

NANOTECHNOLOGY NEWS NETWORK
BIG THINGS HAPPEN IN SMALL PLACES

Мария Рыбалкина

НАНОТЕХНОЛОГИИ для всех

Большое - в малом

www.nanonewsnet.ru

Мария Рыбалкина
Нанотехнологии для всех
Большое - в малом

Художник
Дизайнер обложки
Литературный редактор
Фото на обложке

Антон Зубенко
Александр Куринный
Валентина Свидиненко
Маргарита Молчанова

Вы не знаете, что такое нанотехнологии? На что похож фуллерен и чем уникальна нанотрубка? Никогда не слышали про Космический лифт, который НАСА планирует построить к 2018 году? А про японские автомобили на экологически чистых топливных ячейках? Не знаете из чего можно сделать наноробота и как работают самоочищающиеся покрытия? Так вот знайте, что в США и Японии об этом уже знает каждая домохозяйка...

Нанотехнологии – это "самые высокие" технологии, на развитие которых ведущие экономические державы тратят сегодня миллиарды долларов. По прогнозам ученых нанотехнологии в XXI веке произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую в XX произвели компьютеры в манипулировании информацией", а их развитие изменит жизнь человечества больше, чем освоение письменности, паровой машины или электричества.

"Нанотехнологии для всех" – это первая в России научно-популярная книга по нанотехнологиям предназначенная специально для новичков. В отличие от традиционных учебников, книга написана живым интересным языком, рассказывающим о сложных вещах в простой и занимательной форме. В то же время, охвачены все основные направления современной нанотехнологии с учетом российской действительности и самой свежей информации ведущего аналитического агентства Nanotechnology News Network. Рекомендуется к чтению всем, кто идет в ногу со временем..

Дорогие друзья!

Вы держите в руках уникальную книгу, посвященную последним достижениям современной науки и техники.

Нанотехнология - высокотехнологичная отрасль, направленная на изучение и работу с атомами и молекулами. Разработки в этой области ведут к революционным успехам в медицине, электронике, машиностроении и создании искусственного интеллекта. Если 10 лет назад единицы людей представляли себе, что такое нанотехнологии, то, через 5 лет, по оценкам экспертов, вся промышленность будет развиваться, используя технологии работы с атомами и молекулами.

С помощью нанотехнологий можно очищать нефть и победить многие вирусные заболевания, можно создать микроскопических роботов и продлить человеческую жизнь, можно победить СПИД и контролировать экологическую обстановку на планете, можно построить в миллион раз более быстрые компьютеры и освоить Солнечную систему.

А представьте себе ноутбук с нанотехнологическими топливными ячейками вместо батареек. Такая машина, созданная японской компанией, может работать сутками без подзарядки.

Юниаструм Банк, один из крупнейших и динамично развивающихся банков страны, традиционно поддерживает развитие нанотехнологий в России. В этом году мы выступили спонсорами II Всероссийского Конкурса молодежных проектов в области нанотехнологий, проводимого компанией Nanotechnology News Network, а в прошлом году профинансировали награждение победителей аналогичного конкурса.

В настоящее время мы оказываем активную поддержку образованию и информационному обеспечению в этой области. При поддержке Банка создан и ведущий сайт по нанотехнологиям в России <http://www.nanonewsnet.ru>

Тот факт, что удалось подготовить и выпустить книгу, посвященную нанотехнологиям, заслуживает восхищения и самого высокого одобрения. Автору книги удалось удивительным образом собрать ценнейшие материалы воедино, буквально по крупицам. Мы выражаем свою уверенность, что Вы получите настоящее удовольствие и радость от прочтения этой книги.

Председатель Совета директоров Юниаструм Банка

Г.Писков

Президент Юниаструм Банка

Г.Закарян

Содержание

Зачем читать эту книгу?	1
Глава 1. Введение в нанотехнологии	
Основные понятия	9
Краткая справка по истории нанотехнологий	20
Оборудование нанотехнологии	22
Самосборка	31
Наноэффекты в природе: удивительные лапки	32
Фуллерены и углеродные нанотрубки	35
Ультрадисперсные наноматериалы	42
Будущее нанотехнологий: проблемы и перспективы	43
Небывалые возможности	45
Опасности, которыми не следует пренебрегать	58
Нано на стыке наук	61
Наноиндустрия в России и за рубежом	64
Глава 2. Законы квантового мира	
Как возникла квантовая физика	69
Основные понятия и законы квантовой механики	75
Структура атома	76
Принципы работы лазера	80
Корпускулярно-волновой дуализм нанообъектов	85
Квантовые пределы точности измерений	88
Волновая функция и вероятностный характер поведения квантовых объектов	91
Основные положения теории вероятностей	93
Уравнение Шредингера и Периодическая система элементов Менделеева	99
Квантовые размерные эффекты	105
Почему нельзя смешивать законы классической и квантовой физики	107
Квантовые эффекты, обеспечивающие реализацию эталонов физических величин	109
Квантовые точки, проволоки и плоскости	111
Квантовая механика и компьютер	112
Сверхпроводимость и сверхтекучесть	114
Квантовая телепортация	116
Соображения по поводу вероятностной интерпретации квантовых явлений	118
Глава 3. Нанохимия и наноматериалы	
Химическая связь	122
Что такое нанохимия?	129
Объекты нанохимии. Классификации наночастиц	132
Способы получения наночастиц	139
Получение углеродных наночастиц — фуллеренов и нанотрубок	142
Примеры уникальных свойств некоторых наночастиц	147
“Умные” материалы	152
Алмазоид — наноматериал будущего	162
Перспективы применения алмазоида	164
Глава 4. Нанoeлектроника и МЭМС	
Появление и развитие полупроводниковой электроники	169
Электропроводность	170
Электронно-дырочный переход	174
Диод	176
Транзистор	176
Интегральная микросхема	179

Как делают микросхемы	180
Развитие литографии	183
Проводящие полимеры	185
Появление и развитие MEMS и NEMS-технологии	189
Сенсоры	196
Проект “Умная пыль”	199
Проект “Электронный нос”	202
Проект “Электронный язык”	207
Проект “Видеоочки”	209
Нанoeлектроника	210
Проекты наномоторов	216
Глава 5. Инструменты нанотехнологии	
История развития микроскопии	224
Оптический микроскоп	224
Разрешающая способность микроскопов	227
Электронный микроскоп	228
Сканирующая зондовая микроскопия	232
Сканирующий туннельный микроскоп	233
Атомно-силовой микроскоп	233
Типы кантилеверов	234
Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля	235
Наноиндентор	236
Сканирующие зондовые лаборатории	238
Учебное нанотехнологическое оборудование “УМКА”	239
Нановесы	241
Спектроскопия	242
Моделирование наноструктур	243
Визуализационное моделирование	245
Вычислительное моделирование	245
Инженерное моделирование	250
Механосинтез и нанофабрика	254
Преодоление проблемы массового производства наноструктур	269
Электроосаждение	270
Мягкая литография	270
Рисование и печать	271
Биосинтез	272
Глава 6. Биотехнологии и наномедицина	276
Основные понятия биотехнологии	278
Общая схема биотехнологического производства	283
Примеры биотехнологических производств	286
Основные механизмы генной инженерии	292
Технология рекомбинантной ДНК	292
Получение инсулина	300
Получение интерферонов	301
Трансгенные животные	301
Трансгенные растения	302
ГМ–продукты: за и против	305
О проекте “Геном человека”	308
Некоторые сведения о человеческом геноме	311
Функции генов	311
Генетическая общность человека и других биологических видов	312
Протовирусы	313
Упаковка ДНК в хромосому	313

Практическое значение результатов проекта “Геном человека”	314
Наномедицина	315
Лаборатория на чипе	316
Нанотехнологии против вирусов и бактерий	319
Адресная доставка лекарств в пораженные клетки	321
Использование квантовых точек в качестве люминесцентных маркеров	326
Наносистемы и биотехнологии: подражая природе	327
Конструирование из белков	328
“Поделки” из молекул ДНК	329
РНК-наномашин	331
Приручение бактериофага	333
Нанотехнологии и бессмертие	333
Проект первый - наномедицина по Фрайтасу	336
Проект второй — перенос сознания в компьютер	345
Проект третий — криосохранение	359
О некоторых этических вопросах бессмертия	364
Глава 7. Нанобизнес	
Инвестиции	369
Доходность и риск	370
Время = деньги	371
Конкуренция	372
Информация	374
Наноэкономика	377
Отрасли нанобизнеса	382
Авиация и космонавтика	382
Автомобилестроение	383
Аудио- и видеотехника	383
Безопасность	384
Бытовая техника	384
Вооружение и военная техника	384
Горнодобывающая промышленность	385
Городское и коммунальное хозяйство	385
Индустрия красоты	385
Машиностроение	386
Медицина	386
Наука	386
Сельское хозяйство	387
Строительство	387
Телекоммуникации	387
Экология	387
Энергетика	388
Принципы нанобизнеса	388
Проектирование бизнеса	391
Перспективы nanoиндустрии в России	398
Глава 8. Нанотехнологии и общество	
“Над пропастью во лжи” или в погоне за смертью	404
О концепции устойчивого развития	411
О положении России в контексте устойчивого развития	416
Роль молодежи в современном обществе	419
Нанотехнологии и безопасность страны	423
Заключение	432
Полезные ссылки	

Заумному зануде,
Неутомимому генератору идей,
Воплощению интеллектуальной смелости
и творческого оптимизма -

Александру Оликевичу

Благодарности

Хочу поблагодарить всех, кто так или иначе принимал участие в создании этой книги.

Огромное спасибо моему лучшему другу, кумиру и ангелу-хранителю - моей мамочке Ангелине Алексеевне Рыбалкиной. Мамочка, спасибо тебе за все!

Выражаю искреннюю признательность Леониду Андреевичу Жураковскому - прекрасному преподавателю физики, учителю “от Бога”, без дружеского участия которого я бы никогда не взялась за написание этой книги. Большое Вам спасибо!

От всего сердца благодарю всех членов дружной команды Nanotechnology News Network за помощь и активное участие в подготовке книги: Александра Оликевича, Александра Куринного, Юрия и Валентину Свидиненко. Мы все-таки сделали это!

Большое спасибо моему двоюродному брату Антону Зубенко - талантливому художнику, самоотверженно нарисовавшему более 200 иллюстраций за рекордно короткий срок. Ты просто умница!

Очень признательна руководству КБ “Юниаструм Банк” - единственного банка, поддерживающего нанотехнологии в России - за финансовую помощь в издании книги. Большое спасибо!

Благодарю всех экспертов, предоставивших свои ценные замечания по содержанию книги: коллектив молодых ученых под руководством Галины Викторовны Поповой, Михаила Арсеновича Ананяна, Елену Михайловну Егорову, Александра Чубенко, Анатолия Самуиловича Левина. Также огромное мерси моему главному “бета-тестеру” - ученику 11 класса Владимиру Михайлову.

Спасибо всем ученым и инженерам, продолжающим работать в России несмотря ни на что.

Очень хочу поблагодарить всех членов клуба “Кекушин Сейбукай карате” и лично его руководителя Виктора Юрьевича Апарина, мудрые наставления и уроки которого помогли мне сохранять твердость духа и преодолевать все многочисленные препятствия, возникавшие на пути создания этой книги.

Большое спасибо всем друзьям и учителям, поддерживавшим и помогавшим мне морально. Без вас эта книга никогда не увидела бы свет!

Зачем читать эту книгу?

“Уверяю тебя, что ты никогда не постигнешь смысла жизни, уставившись в телевизор”.

Бредли Тревор Гривс

Область науки и техники, именуемая нанотехнологией, как и соответствующая терминология, появились сравнительно недавно. Однако её перспективы настолько грандиозны для нашей цивилизации, что необходимо широкое распространение основных идей нанотехнологии, прежде всего среди молодежи. Именно этой цели и должна послужить данная книга.

Поскольку всё передовое и перспективное часто популяризируется в обществе, то сегодня приставку “нано” в рекламных целях стали использовать все, кому не лень, и даже в тех областях, где ей, казалось бы, совсем нечего делать.

На самом деле “*нано*” означает одну миллиардную (10^{-9}) долю чего-либо. Например, нанометр – одна миллиардная доля метра. Примерно таковы размеры молекул (поэтому часто нанотехнологию называют также молекулярной технологией). Для сравнения, человеческий волос приблизительно в шестьдесят тысяч раз толще одной молекулы.

Становится понятно, что, например, продовольственный магазинчик “Наносекунда”, несмотря на завораживающее название, вряд ли сможет обслужить покупателя за одну миллиардную долю секунды, что бы там не утверждала вывеска...

Прежде чем идти дальше я хочу четко сформулировать цели, ради которых и была написана эта книга. Помимо чисто учебной задачи, которая заключается в как можно более доступном и интересном изложении основных фактов и законов нанонауки, хотелось бы поставить перед читателями еще и некоторые жизненные вопросы, особенно актуальные для нашей исторической эпохи.

Если мы внимательно проанализируем историю науки (как и человечества в целом), мы увидим, что многие революционные изменения в обществе были связаны с большими трудностями, вызванными нежеланием людей принять новую информацию, особенно если она противоречит уже устоявшейся, привычной большинству, картине мира.

Так, западная цивилизация благополучно просуществовала несколько столетий в твердом убеждении, что Земля плоская. Это хоть и не соответствовало действительности, но и не мешало людям составлять карты и вполне успешно ориентироваться по ним. Утверждения Галилея и других ученых о том, что Земля круглая, дорого им обошлись. В частности, в 1600 году за подобную “ересь” Джордано Бруно был сожжен по приказу “святой” католической инквизиции (хотя при внимательном прочтении Ветхого Завета, в нем даже можно найти упоминание того, что Земля круглая и висит в космосе “ни на чем”¹, т.е. вопреки бытовавшему мнению не опирается ни на каких китов, черепах, слонов и т.д.). Итак, обществу потребовалось еще около 200 лет для того, чтобы признать этот факт...

Аналогично более 2000 лет просуществовала уверенность в том, что атом является мельчайшей единицей всего сущего. И когда в XX веке наука открыла субатомные элементарные частицы (электрон, протон, нейтрон и др.), это полностью изменило все базовые представления о Вселенной. Кстати, некоторые субатомные частицы (в частности, позитрон) были как бы “придуманы” физиками: сначала рассчитаны, а потом обнаружены экспериментально, что еще раз говорит в пользу человеческой способности постигать разумом то, что неочевидно.

После открытия субатомных частиц прежний логический мир распался. Оказалось, что субатомные частицы “ведут себя” не так, как, по мнению ученых, им “положено” себя вести. Основной постулат Аристотелевской логики — основы основ всей научной мысли — утверждающий, что один объект не может быть одновременно “А” и “не А”, не мог объяснить того, что, например, свет является одновременно и волной, и потоком частиц. Квантовая физика вступила в спор с Аристотелем и выиграла его.

Казалось, что механика великого Ньютона способна безупречно объяснить все видимые и невидимые законы Вселенной. И ничто не предвещало создания теории относительности. Однако ее открытие привело к коренному изменению представлений о мире и такому научному прорыву, о котором даже не мечтали — чего стоит одна только атомная энергия.

¹. Книга пророка Исаии 40:22; Книга Иова 26:7

Ситуацию в научном мире после открытия Эйнштейна, как нельзя лучше описывает шутовское четверостишие:

*Был мир земной крошечной тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон!
Но сатана недолго ждал реванша:
Пришел Эйнштейн и стало все, как раньше*

Своей выдающейся работой Эйнштейн не отверг полностью ньютоновскую механику, но отвел ей более скромное место частного случая, справедливого только для движений, медленных по сравнению со скоростью света...

Одним словом, “все течет, все изменяется”, и сегодня человечество снова стоит на пороге новых революционных решений и технологических прорывов, которые принесут такие изменения в нашу жизнь, которые нам и не снились. Будем ли мы готовы к ним? Надеюсь, что эта книга поможет дать утвердительный ответ на этот вопрос.

Приведенных выше примеры хорошо иллюстрируют, что человеческая мысль всегда ищет новых знаний, пытается разгадать и осмыслить самые необъяснимые загадки природы. Нащупав в интеллектуальной темноте новые знания, лишь немногим удавалось донести их до окружающих, убедить общество в истинности своих догадок.

Но что же заставляет разумов одних людей искать и доказывать новое, а других — сопротивляться новизне, охранять старое?

Писатель-фантаст и ученый Эрик Дрекслер, перу которого принадлежит фундаментальный труд “Машины созидания”, считается пионером нанотехнологий. В этой своей работе он, упоминает проблему так называемых “минов” — воспроизводящихся мысленных структур, или идей, подверженных, подобно живым существам, законам эволюции, а именно: борьбе за существование и стремлению к размножению.

Дрекслеру принадлежит следующее утверждение: “примеры мимов — это идеи, общеупотребительные выражения, мода в одежде, мелодии, способы производства горшков и постройки арок. Точно так же, как гены размножаются в среде генов, перескакивая от тела к телу (от поколения к поколению) через сперматозоиды и яйцеклетки, мимы размножаются в среде ми-

мов, перескакивая из мозга в мозг посредством процесса, который в широком смысле может называться имитацией.

Мимы копируются, потому что люди учатся и учат других. Они изменяются, потому что люди создают новые идеи и неправильно истолковывают старые. Они подвергаются отбору (отчасти), потому что люди не верят или повторяют все, что слышат. Так же как особи одного вида конкурируют за ограниченные пространство и ресурсы, так и мимы должны конкурировать за ограниченный ресурс - человеческое внимание и усилия. Поскольку мимы формируют поведение, их успех или неудача - это жизненно важный вопрос.

Начиная с древних времён, мысленные модели и способы поведения передавались от родителя к ребенку. Мимические структуры, которые помогают выживанию и воспроизводству, имели тенденцию к распространению. (“ешьте этот корень только после приготовления; не ешьте те ягоды, их злой дух будет скручивать ваши кишки”). Год за годом люди поступали по-разному и их действия давали разнообразные результаты.. Год за годом кто-то умирал, в то время как остальные находили новые способы выживания и передавали их следующим поколениям. Гены построили наш мозг на принципе имитации, поскольку имитируемые структуры были в целом полезны: в конце концов их носители выживали и распространяли их.

Сами мимы, тем не менее, встречают свои собственные вопросы “жизни” и “смерти”: как репликаторы (объекты, способные к самовоспроизведению), они развиваются исключительно чтобы выживать и распространяться. Подобно вирусам, они могут воспроизводиться, не помогая выживанию или благосостоянию их хозяина. В действительности мим “жертвы во имя” может распространяться через сам факт убийства своего хозяина (что движет действиями террористов - камикадзе? (прим. автора))”.

Способность человека противостоять ложным и вредным идеям Дрекслер называет “умственной иммунной системой”. Она действует по тем же принципам, что и иммунная система организма. Старейшая и самая простая умственная иммунная система просто даёт команду: “верь старому и отбрасывай новое”. Что-то подобное обычно удерживало племена от отказа от старого, проверенного пути в пользу безумства новых идей - таких, как идея повиновения предполагаемым приказам призрака

уничтожить весь скот и всё зерно племени - мол это принесёт каким-то образом чудесное изобилие пищи и армии предков выгонят чужеземцев (этот мим заразил племя Ксоза из Южной Африки в 1856 году; к следующему году 68.000 человек умерли, и большей частью от голода).

Иммунная система вашего тела следует похожему правилу: она обычно принимает все типы клеток, присутствовавшие в начале жизни, и отторгает как инородные и опасные потенциальные раковые клетки и бактерии. Эта простая система “отбрасывай новое” когда-то работала хорошо, однако в век пересадки органов она может убить, ведь операция по трансплантации требует совместимости тканей донора и реципиента. Аналогично, в век, когда наука и технологии постоянно изменяются, негибкая умственная иммунная система становится опасной помехой.

При всех своих недостатках, принцип “отклоняй всё новое” прост и удобен. Традиция содержит многое, что испытано и проверено временем. Изменение рискованно: как большинство мутаций вредны, так и множество новых идей опасно. Однако мимы, защищающие разум от новых идей, также могут охранять паразитирующую бессмыслицу от столкновения с истиной. Во времена быстрых изменений они могут делать умы опасно косными.

Многое в истории философии и науки может рассматриваться как поиск лучших умственных иммунных систем, лучших способов отклонять ложное, бесполезное и вредное. Лучшие системы уважают традицию, однако поощряют эксперимент. Они предлагают стандарты для оценки мимов, помогая уму различить паразитов и полезные инструменты.

Я призываю читателей обратить пристальное внимание на свое развитие и образование, потому что знания и профессионализм в начале XXI века обретают особую актуальность. Помните, что только ваш интеллект, эрудиция и мобильность позволят отличить реально выгодные идеи от смертельно опасных и принимать правильные решения.

Главная цель этой книги - подготовить читателей к любым неожиданностям, научить эффективно действовать в критических ситуациях. Мне хочется подвести читателей к осознанию того, что те, кто ориентирован на будущее, кому жить в этом будущем и творить его, должны уже сегодня в полной мере осознавать всю ответственность за принимаемые решения.

Работая при слабом свете свечи, трясясь на ухабах в деревянных повозках, мог ли человек прошлого мечтать о “таинственных силах”, способных наполнить светом не только комнату, но и улицы ночного города, или передвигать железные “повозки” с невероятной скоростью? Видимо, кто-то мог, и, следуя своей мечте, совершал открытия. Но у большинства, как обычно, не хватало смелости или фантазии выйти в своем воображении за пределы привычного, старого мира. “Три закона робототехники” Айзека Азимова тридцать лет назад воспринимались многими почитателями его таланта всего лишь как красивая сказка, мечта из разряда научной фантастики. А сегодня роботы и искусственный интеллект являются одними из самых быстроразвивающихся отраслей.

Мечты мечтами, но возникает естественный вопрос: если в XIX веке не пользовались электричеством, значит ли это, что в XIX веке электричества не существовало в природе? Или это говорит лишь о том, что мысль человеческая была в то время не в силах обнаружить эти “таинственные силы” природы, известные сегодня как электромагнитные волны?

Итак, во все времена жили те великие люди, которые первыми находили то, что веками было скрыто от других, или первыми воплощали в жизнь свои “нереальные” замыслы. Что же толкает этих первопроходцев постоянно искать что-то новое, добиваться реализации своей мечты вопреки всем преградам? Какие качества отличают их? Ответы на эти вопросы стоит поискать самому, но среди этих качеств, несомненно, должны быть:

- самостоятельность мышления, даже вопреки авторитетному мнению большинства;
- вечное стремление к познанию и улучшению мира;
- уверенность в своих силах и правильности пути.

Эти качества всегда отличали неординарного человека от обывателя. Надеюсь, после прочтения книги читатель проникнется стремлением развивать в себе эти качества, являющиеся необходимым основанием любого жизненного успеха. Ведь как там поется у “Наутилус Помпилиус”?

*“Воздух выдержит только тех, только тех, кто верит в себя
Ветер дует туда, куда скажет тот, кто верит в себя...”*

Всем известно, что первые компьютеры в начале 1950-х занимали целую комнату. Сегодня же любой карманный компьютер в сотни тысяч раз превосходит их по быстродействию и возможностям.

Легендарный Билл Гейтс, автор операционной системы MS DOS и основатель компании MicroSoft, в 1981 году авторитетно заявил: “640 килобайт хватит всем!”. Мог ли он представить себе в тот момент, насколько далеко благодаря его изобретению продвинулись программные и технические возможности персональных компьютеров!

В 1959 году появился первый плоский транзистор. В 1965-м уже выпускались микросхемы, состоящие из 50-60 транзисторов. Сорок лет назад Гордон Мур, сооснователь фирмы Intel, предположил, что быстродействие компьютеров (то есть число элементов на микросхеме) будет удваиваться каждые 18 месяцев без существенного изменения цены. Согласно его прогнозу, эта тенденция должна была сохраниться в течение последующих 10 лет, а в 1975 году все с удивлением обнаружили, что прогноз сбылся. “Закон Мура” актуален и сейчас:

Год выпуска	Модель процессора	Кол-во транзисторов
1971	4004	2.250
1972	8008	2.500
1974	8080	5.000
1978	8086	29.000
1982	286	120.000
1985	386 TM	275.00
1989	486 TM DX	1.180.000
1993	Pentium	3.100.100
1997	Pentium II	7.500.000
1999	Pentium III	24.000.000
2000	Pentium 4	42.000.000

Табл.Закон Мура

Обратите внимание, что закон Мура не является законом в буквальном смысле слова, так как не отражает никаких природных закономерностей, обусловленных фундаментальными законами природы. Непосредственно к законам могут относиться, например, закон гравитации, сформулированный Ньютоном, или законы электромагнитного поля, описываемые урав-

нениями Максвелла — они объективны по своей природе, существуют независимо от наших знаний, желаний или нужд. Поэтому, говоря о законе Мура, следует понимать, что на самом деле речь идет лишь о научном прогнозе.

Гонка технологий, подчиняясь олимпийскому принципу “Быстрее! Выше! Сильнее!”, задает темп жизни, и для того, чтобы быть успешной современной личностью, нужно не просто шагать в ногу со временем, а опережать его в спринтерском броске. Поэтому еще одна задача, которую читатель, надеюсь, поставит перед собой, будет звучать так: “научиться быстрее учиться”. Возможно, кто-то увидит в такой формулировке призыв тратить меньше времени на развлечения и просмотр бесконечных телепрограмм, и больше — на саморазвитие? Если вы так подумали, то вы совершенно правы — это именно то, что я имею в виду.

Ничуть не умаляя ценности отдыха, понимая, что как бы ни приятно бы проваляться весь вечер на диване, переключая каналы с одного ток-шоу на другое, все же следует признать, что цена успеха сегодня заключается в правильной расстановке приоритетов и планировании времени (которого никак не хватит и на личное развитие, и на всяческие “Окна”). Чем-то придется жертвовать, иначе получится как в известной притче: “Немного поспишь, немного подремлешь, немного, сложив руки, лежишь. И придет, как прохожий, бедность твоя, и нужда твоя — как человек вооруженный”.

Кстати говоря, автору однажды довелось проводить исследование на тему современного американского сленга. Принимая во внимание уровень гос. финансирования тех же нанотехнологий (правительство США увеличило финансирование в этой области до \$3,7 млрд. в течение 4 лет!), стоит ли удивляться тому, что в их молодежной среде столь любимый нами “телек” величают не иначе, как “idiot box”. Дальнейшие комментарии, как говорится, излишни...

Глава 1. Введение в нанотехнологии

“Нанотехнологии произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией”.

Ральф Меркле

Основные понятия

Несмотря на то, что все явления природы тесно взаимосвязаны, человек привык изучать их с какой-либо одной стороны. Поэтому любая наука обладает собственной системой терминов и понятий, в которые вкладывает свой смысл. Один и тот же объект, скажем, школьник, будет вызывать совершенно разный профессиональный интерес у представителей различных профессий, таких, как, например, врач, психолог или учитель.

Для врача, вероятнее всего, школьник будет “определяться” такими характеристиками, как вес, рост, группа крови, наличие или отсутствие хронических заболеваний и т.д. Психолог примется выяснять тип его темперамента, вид мышления или самооценку. А вот учителя математики вряд ли будут заботить ваш темперамент или группа крови, когда вы плохо напишете контрольную – скорее всего, вас будут оценивать с точки зрения владения материалом, глубины знаний и поведения на уроке.

И, несмотря на то, что школьник остается одним и тем же в кабинете врача, на приеме у психолога, на уроке математики, мы видим, что его можно “изучать” под совершенно разными углами зрения. То же справедливо и для всего остального. Так и природные явления будут выглядеть совершенно по-разному для химика, физика или биолога.

Но “вернемся к нашим баранам” (то есть нанотехнологиям). В самом названии “нанотехнология” мы видим два существенных для нас термина – “нано” и “технология”. Определимся сначала со вторым понятием.

Энциклопедический словарь определяет **технологию** (от греч. “techne” – “искусство”, “мастерство”, “умение” + “logos” – “наука”) как совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния (свойств, формы) первоначального сырья в процессе производства конечной продукции.

Задача технологии - использование законов природы на благо человека. Существуют “технологии машиностроения”, “технологии химической очистки воды”, “информационные технологии” и т.д.

Видно, что технологии в основе своей различаются природой исходного материала. Именно значительная разница между такими видами сырья, как металлические конструкции и информация, определяет и существенные различия в методах их обработки и преобразования.

Перечисляя технологии, нельзя не вспомнить такое выражение, как “высокие технологии”. Давайте подумаем, в чем же их суть? Мы привыкли к тому, что высокими называют эффективные технологии, появившиеся сравнительно недавно, но не получившие еще повсеместного распространения. Как правило, это технологии из области микроэлектроники, и связаны они с удивительно маленькими размерами устройств.

Тысячи лет назад наши предки брали камни, содержащие триллионы триллионов атомов, и удаляли слои, содержащие миллиарды триллионов атомов, чтобы сделать из них наконечники для стрел. Они делали прекрасную работу с трудновоспроизводимым мастерством. И тот, кто первый придумал эту технологию обтесывания камня, в те далекие времена мог называть её высокой технологией, и был бы абсолютно прав. Ведь еще лет 15-20 тому назад сотовые телефоны, например, считались устройствами типа “high-tech”. Однако сегодня “мобилей” уже никого не удивишь.

Поэтому мы полагаем, что уместно называть “высокими” все передовые технологии, характерные для того или иного этапа развития общества.

Теперь дадим определение собственно “нанотехнологии”.

В начале главы мы уже упоминали о том, что приставка *нано* (от греч. “*nanos*” — “карлик”) означает одну миллиардную (10^{-9}) долю какой-либо единицы (в нашем случае - метра). Атомы и мельчайшие молекулы имеют размер порядка 1 нанометра.

Современные микросхемы с размерами компонентов в одну десятую толщины тончайшего волоса могут считаться маленькими в стандартах тесальщиков кремня, но каждый транзистор все еще содержит триллионы атомов, и микрочипы все еще видимы невооружённым глазом.

Технологии, которые можно проследить от ручной обработки камня до кремниевых чипов, оперируют сырьем, представляющим собой большие совокупности атомов и молекул. Этот стиль можно назвать *балк-технологией* (англ. “bulk” — “груда”, “кипа”).

Нанотехнология призвана прецизионно (сверхточно) манипулировать индивидуальными атомами и молекулами. Она изменит наш мир больше, чем мы можем себе представить.

Атом — (от греч. “atomos” — “неделимый”) — это мельчайшая частица химического элемента, носитель его свойств, способный образовывать с другими атомами более сложные конструкции — молекулы.

Обратите внимание на то, что “дословный перевод” слова “атом” неверен, и на самом деле атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. Однако это слово придумал еще древнегреческий философ Демокрит, и все его используют по привычке.

Нанотехнология - это совокупность методов производства продуктов с заданной атомарной структурой путем манипулирования атомами и молекулами.

В связи с данным определением нанотехнологий возникает естественный вопрос: каким же образом мы можем манипулировать веществом на уровне атомов и молекул? Ведь наши руки слишком громадны для наномасштаба. Этот вопрос является камнем преткновения современной нанонауки. Самое изящное решение этой проблемы, способное совершить новую технологическую революцию, предложил Эрик Дрекслер в книге “Машины созидания”. Для манипулирования атомами он изобрел специальные наномашинны, или *ассемблеры*.

Чтобы их представить, нужно сначала наглядно представить, как выглядит молекула. Для этого мы изобразим атомы как бусинки, а молекулы как группы бусинок, соединённые между собой кусочками проволоки (несмотря на чрезвычайную простоту такого представления, химики часто используют именно его, строя модели из пластмассовых ша-

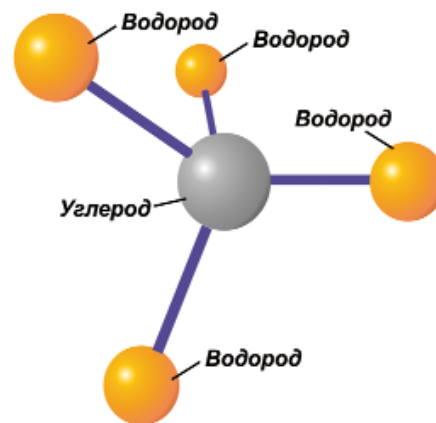


Рис1. Модель молекулы метана (CH₄)

ров, связанных спицами в нескольких направлениях). Атомы имеют круглую форму подобно шарам, и хотя молекулярные связи - не кусочки проволоки, наша визуальная модель, как минимум, даёт важное представление о том, что связи могут быть порваны и восстановлены.

Наномашины должны уметь захватывать атомы или молекулы и соединять их между собой, причем не хаотично, а в соответствии с заданным алгоритмом. Важно отметить, что такие машины уже тысячи лет превосходно функционируют в природе, и примером их работы может служить механизм синтеза белка рибосомами.

Из курса биологии вы, должно быть, помните, как молекула рибосомы конструирует белок, “считывая” из молекул РНК “инструкции” для его построения. Напомним вкратце читателям основные моменты этого процесса.

Итак, **белки** — это обязательная составная часть всех клеток, обеспечивающая их жизнедеятельность. Роль белков в организме чрезвычайно разнообразна. Различают белки-гормоны, участвующие в управлении всеми жизненными процессами организма, его ростом и размножением. На сетчатке нашего глаза возникает изображение благодаря особому светочувствительному белку — родопсину. Мы способны двигаться, потому что наши мышцы сокращаются и расслабляются благодаря белкам актину и миозину. Все химические процессы в организме протекают при участии специальных белков—ферментов. Без них невозможны пищеварение, дыхание, обмен веществ, свертывание крови и пр. Белки выполняют и защитные функции — при попадании в организм болезнетворных бактерий или ядов вырабатываются белки-иммуноглобулины, нейтрализующие их вредное воздействие.

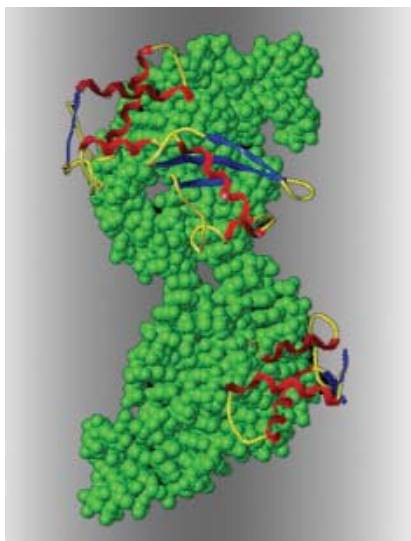


Рис 2. Структура белка

При знакомстве с таким разнообразием белков и их функций весьма неожиданным оказывается тот факт, что все белки растительного и животного мира — от совершенно инертных до биологически активных - состоят из одних и тех же стандартных звеньев - **аминокислот**, соединенных прочной химической связью, называемой пептидной. Внеш-

не молекула белка подобна последовательности бусинок на нити, где роль бусинок выполняют молекулы аминокислот. В составе большинства белков находится в среднем 300-500 таких “бусинок”.

Количество аминокислот в природе ограничено — всего 20 видов, и их можно уподобить двадцати “буквам” особого “химического алфавита”, из которых составлены белки — “слова” длиной в 300-500 букв.

С помощью двадцати букв можно написать огромное количество таких длинных слов. Если учесть, что замена или перестановка хотя бы одной буквы в слове придаст ему новый смысл, то число возможных комбинаций букв в слове длиной в 500 символов составит 20500!

Цепь каждого белка построена из собственной *только этому* белку комбинации аминокислот: только определенное число и только в определенной последовательности. Уникальность характерной для того или иного белка комбинации аминокислот и определяет его химические и биологические свойства. Перестановка всего лишь одного аминокислотного звена на другое место, его замена или потеря приведет к очень значительному изменению свойств белковой молекулы. Значит, при синтезе (построении) отдельного белка необходимо владеть точной информацией о чередовании аминокислотных звеньев в его структуре. В природе такая информация хранится на специальном носителе - молекуле ДНК, в которой содержится информация о структуре всех существующих в организме белков.

Отрезок молекулы ДНК, в котором содержится информация о последовательности аминокислот в одном белке, называется *ген*, потому информацию в ДНК называют генетической, а ген является единицей наследственного материала. В ДНК содержится до нескольких сот генов.

Молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) представляет собой две спирально закрученные одна вокруг другой нити. Ширина такой двойной спирали — около 2 нм. Длина же — в десятки тысяч раз больше — несколько сотен тысяч нанометров. За открытие двойной спирали ДНК, несущей наслед-

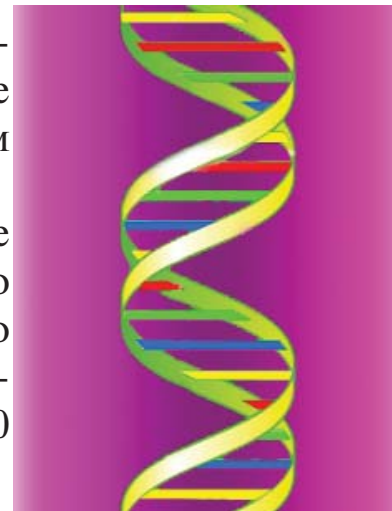


Рис 3. Структура ДНК

ственную информацию, в 1962 году ученые Уотсон и Крик получили Нобелевскую премию.

Нити ДНК представляют собой цепи из нуклеотидов, а **нуклеотиды** — это органические вещества, состоящие из трех соединенных друг с другом молекул: азотистого основания, пятиуглеродного сахара (пентозы) и остатка фосфорной кислоты. Нуклеотиды назвали по именам 4-х типов азотистых оснований, входящих в их состав: *аденин* (А), *гуанин* (Г), *цитозин* (Ц) и *тимин* (Т). Порядок расположения четырех типов нуклеотидов в цепях ДНК очень важен — он определяет порядок аминокислот в белках, то есть их структуру.

Чтобы понять, как в ДНК запрограммирована структура белка, стоит вспомнить азбуку Морзе, по которой все буквы алфавита, знаки препинания и цифры обозначаются комбинацией коротких (точка) и длинных (тире) сигналов. Оказывается, подобный шифр существует и в ДНК! Как в азбуке Морзе каждой букве соответствует определенное сочетание точек и тире, так в коде ДНК определенное последовательное сочетание нуклеотидов соответствует определенной аминокислоте в молекуле белка. Знать код ДНК — значит знать сочетание нуклеотидов, соответствующее каждой аминокислоте.

Чтобы закодировать все возможные цифры, буквы и знаки препинания, нам хватает всего двух символов (точка и тире). Чтобы закодировать одну аминокислоту, сочетания из трех нуклеотидов вполне достаточно (из 4 нуклеотидов можно создать 64 комбинации, по три нуклеотида в каждой: $4^3=64$). Такое сочетание называется **триплетом** или **кодоном**.

Код ДНК обладает *однозначностью* (один триплет шифрует не более одной аминокислоты) и универсальностью (т.е. для всего живущего и растущего на Земле — бактерий, грибов, злаков, муравья, лягушки, лошади, человека — одни и те же триплеты кодируют одни и те же аминокислоты). В настоящее время код ДНК расшифрован полностью, т.е. для каждой аминокислоты точно установлены кодирующие ее триплеты.

Еще раз напоминаем читателям, что замена или удаление хотя бы одного нуклеотида в последовательности ДНК приведет к нарушению структуры синтезируемых белков. Поскольку генетический код подобен языку, то наглядным примером этому

может послужить следующая фраза, составленная из буквенных триплетов:

жил был кот тих был сер мил мне тот кот

Несмотря на отсутствие знаков препинания нам понятен и смысл и логика этого “предложения”. Если же мы уберем первую букву в этой фразе, но читать будем также триплетами, то получится бессмыслица:

илб ылк отт ихб ылс ерм илм нет отк от

Похожая генетическая бессмыслица возникает и при выпадении одного нуклеотида из гена. Белок, считываемый с такого испорченного гена, может привести к серьезным *генетическим заболеваниям* организма (болезнь Дауна, серповидноклеточная анемия, сахарный диабет, мышечная дистрофия и т.д.). Такая ошипка в информационной матрице ДНК будет повторяться всякий раз при синтезе конкретного белка, подобно тому, как ошибка на типографской матрице, с которой печатается книга или газета, будет повторяться во всех экземплярах данного тиража.

Являясь матрицей для синтеза всех белков, сама молекула ДНК, однако, в процессе синтеза не участвует. Она является лишь носителем генетической информации.

При синтезе белка информация о его структуре сначала доставляется из ДНК к молекуле *рибосомы* — своеобразной фабрике по производству белков. Этот перенос информации осуществляется с помощью молекулы *информационной РНК* (рибонуклеиновая кислота), которая является точной копией, зеркальным отражением структуры одного участка ДНК. И-РНК — это одноцепочная спираль, комплементарная одной нити молекулы ДНК.

Процесс копирования генетической информации из ДНК в РНК называют *транскрипцией* (лат. “transcriptio” - переписывание). В процессе переписывания специальный фермент — полимеразы, двигаясь вдоль ДНК, последовательно считывает ее нуклеотиды и по принципу комплементарности образует цепочку и-РНК, как бы снимая с ДНК “чертеж” того или иного гена. С каждого гена можно снять любое число копий РНК.

Таким образом, можно сказать, что в процессе синтеза белка и-РНК выполняет роль перфокарты², на которую записана “программа” для построения конкретного белка.

Итак, молекула и-РНК с записанной на нее программой направляется к рибосоме, где происходит синтез белка. Туда же направляется поток материала, из которого строится белок – аминокислот. Аминокислоты попадают в рибосому не самостоятельно, а с помощью подвижных *транспортных РНК* (т-РНК). Эти молекулы способны различать среди всего многообразия аминокислот только “свою” аминокислоту, присоединять её к себе и подтаскивать к рибосоме.

Синтез белка на рибосомах называется *трансляцией* (от лат. “translatio” – “передача”).

По мере сборки белковой молекулы рибосома “ползет” по и-РНК и синтезирует белок, запрограммированный на данной и-РНК. Чем дальше продвинулась рибосома по и-РНК, тем больший отрезок белковой молекулы “собран”. На ленте и-РНК, как на конвейере, одновременно идет сборка одного и того же белка несколькими рибосомами (см. рисунок 4). Когда рибосома достигает конца и-РНК, синтез окончен.

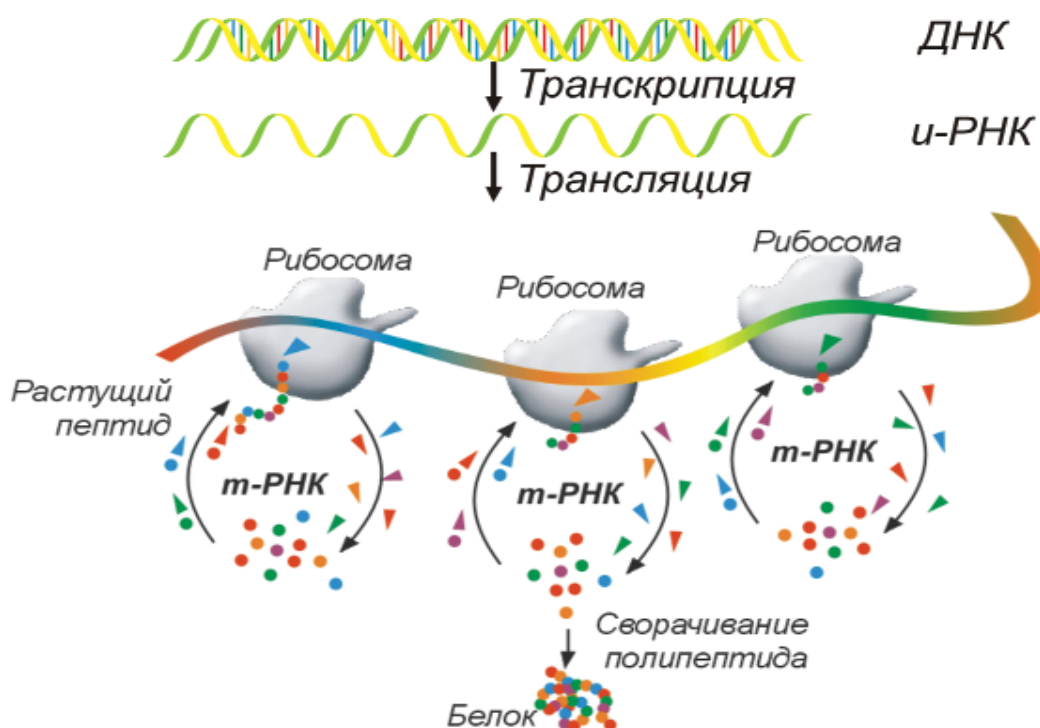


Рис 4. Процесс синтеза белка рибосомами

² *Перфокарта* – это кусок или лента из твердой бумаги с дырочками для светового луча, пробитыми в определенных местах. В XIX веке перфокарты применялись в текстильном производстве – с их помощью ткацкий станок “программировали” на получение того или иного рисунка, а в середине XX века на перфокартах и перфолентах записывались программы для первых ЭВМ).

Теперь остановимся подробнее на механизме работы рибосомы. Обратимся к рисунку. Рибосома движется по и-РНК не плавно, а прерывисто, “шажками”, триплет за триплетом. На каждом шаге к месту контакта рибосомы с и-РНК “подплывает” какая-нибудь молекула т-РНК с прицепленной к ней аминокислотой.

Как уже было сказано, каждая т-РНК способна различать только “свою” аминокислоту и присоединять её для транспортировки к месту построения белка. Это происходит благодаря содержащемуся в ней триплету, комплементарному (подходящему) конкретной аминокислоте.

Если кодовый триплет т-РНК окажется комплементарным к триплету и-РНК, находящемуся в данный момент в рибосоме, то аминокислота отделится от т-РНК и присоединится к строящейся цепочке белка (к белковой молекуле добавится еще одна “бусинка”).

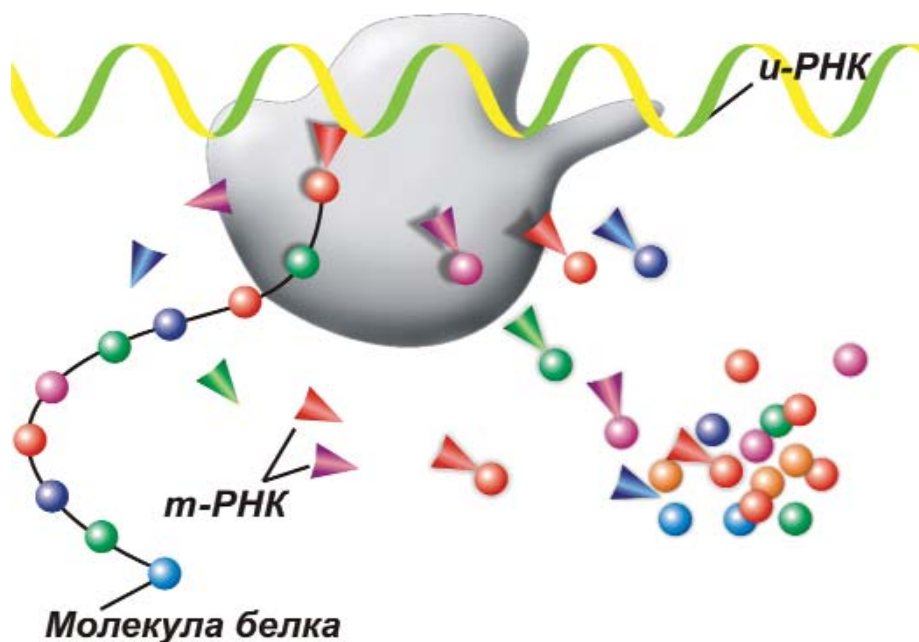


Рис 5. Рибосома синтезирует белок

Свободная т-РНК затем выбрасывается из рибосомы в окружающую среду. Здесь она захватывает новую молекулу аминокислоты и несет ее в любую из работающих рибосом. А наша рибосома делает следующий “шаг” вперед по и-РНК на один триплет. Так постепенно, триплет за триплетом, движется по и-РНК рибосома и растет звено за звеном цепь белка.

Пройдя по всей длине и-РНК, рибосома с готовым белком “сходит” с неё. Затем белковая молекула направляется к тому участку клетки, где требуется данный вид белка, а рибосома

направляется к любой другой и-РНК (рибосома способна синтезировать любой белок; характер белка зависит исключительно от матрицы и-РНК).

Итак, рибосомы доказали, что наномашин, построенные из белка и РНК, могут быть запрограммированы на построение сложных молекул, то есть по сути являются природными ассемблерами (сборщиками атомов) для производства заданных молекулярных структур.

Генные инженеры сегодня пытаются построить первые экспериментальные искусственные наномашин, используя биологический природный материал: аминокислоты, белки, молекулы ДНК и др. Однако биоподобные наномашин (и все, что они могут создать) - это органика, а значит, их возможности ограничены. Они теряют стабильность или разрушаются при повышенных температурах и давлениях (происходит сворачивание белка), подвержены радиации, не могут обрабатывать твердый материал, действовать в химически агрессивных средах и т.п. Поэтому было бы неразумно отказаться от грандиозных работ человечества в сфере балк-технологии. Это все то, до чего “не додумалась” природа, от колеса до компьютера.

В то же время без биоподобных структур очень трудно манипулировать отдельными атомами и молекулами. Поэтому наномашин-ассемблеры должны представлять собой синтез живых и технических систем. Дрекслер дает ассемблеру следующее определение:

Ассемблер – это молекулярная машина, способная к саморепликации, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков.

Главная задача ассемблера - соединение атомов и молекул в заданном порядке. Он должен уметь строить наносистемы любого назначения - двигатели, станки, вычислительные устройства, средства связи и т.д. Это будет универсальный молекулярный робот со сменными программами на “перфолентах” типа цепочек РНК или ДНК.

Внешний вид сборщика можно представить себе как “ящик” нанометрового размера с “рукой” - манипулятором длиной в сотню атомов. Исходным материалом для манипулятора могут служить атомы, молекулы и химически активные

молекулярные конструкции. Внутри сборщика размещены устройства, управляющие работой манипулятора и содержащие программу всех его действий. Поскольку составление больших молекул со сложной структурой потребует особой точности в позиционировании, ассемблер должен иметь несколько таких манипуляторов.

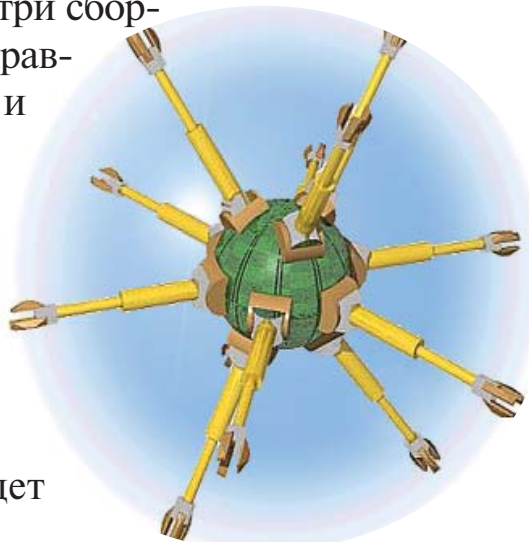


Рис 6. Внешний вид ассемблера

Возможно, ассемблер будет чем-то похож на паука, при этом одними “лапами” он будет держаться за поверхность, а другими складывать сложные молекулярные структуры атом за атомом. Наиболее популярная схема наноассемблера представлена на рисунке.

Управлять сборщиками должны будут нанокомпьютеры, программируемые на каком-нибудь обычном языке управления промышленными роботами и имеющие связь с обычным компьютером, которым управляет человек. Представим, что человек-оператор моделирует на компьютере некоторую конструкцию, особым образом задавая её молекулярную структуру. “Нарисовав” нужный объект, он передает команду ассемблерам, которые начинают создавать его атом за атомом. И через некоторое время у конструктора появляется готовая вещь с заданными характеристиками при минимальном вмешательстве человека.

Ассемблеры могут работать в паре с *дизассемблерами* — наномашинами, способными разбирать объект на атомы с записью его структуры на молекулярном уровне. Например, для создания копии какого-то объекта необходимо, чтобы дизассемблер разобрал его атом за атомом и передал всю информацию о типе атомов, их положении и т.д. ассемблеру, который потом может создавать копии объекта сколько угодно раз. Теоретически такая копия ничем не будет уступать оригиналу - она будет повторять его вплоть до отдельного атома! Дизассемблеры также помогут ученым лучше узнать вещи и их атомную структуру.

Как уже было сказано, ассемблеры будут обладать способностью к *репликации* (размножению). Когда речь идет об

эволюции, то репликатор — это объект, который способен сам себя скопировать, включая любые изменения, которым он мог подвергнуться (подобно гену, миму или компьютерному вирусу). Реплицируется (размножается путём создания своей копии) ассемблер по команде макрокомпьютера или в зависимости от окружения.

Таким образом, создав один единственный универсальный ассемблер, способный создавать копию себя, мы через несколько часов получим целую армию этих крошек, которые в буквальном смысле слова изменят нашу жизнь. Самой большой проблемой ассемблеров является сложность их первоначального конструирования. Тем не менее, лаборатории всех мировых держав борются за право быть первыми в этом революционном прорыве.

Возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы: от “проживающих” в организме нанокompьютеров, убивающих раковые клетки и ремонтирующих поврежденные ткани и органы, до автомобильных двигателей, не загрязняющих окружающую среду.

Сегодня Foresight Institute — базис всех мировых нанотехнологий — обещает \$250.000 тому, кто построит нано-манипулятор — “руку”, которая сможет оперировать на молекулярном уровне, и тому, кто создаст 8-битный сумматор, уместящийся в кубике со стороной в 50 нанометров (так что у вас еще есть все шансы неплохо подзаработать!).

Ждать осталось не так уж долго. Оптимисты считают периодом расцвета практических нанотехнологий первую четверть наступившего века. Пессимисты отодвигают срок до середины века. Значит, тем, кто сегодня определяет свою будущую профессию, стоит задуматься: быть может, программист нанороботов и конструктор молекулярных компьютеров станут наиболее популярными специальностями уже через несколько лет.

Краткая справка по истории нанотехнологий

Дедушкой нанотехнологий можно считать греческого философа Демокрита. 2400 лет назад он впервые использовал слово “атом” для описания самой малой частицы вещества.

1905 Швейцарский физик Альберт Эйнштейн опубликовал работу, в которой доказал, что размер молекулы сахара составляет примерно 1 нанометр.

1931 Немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать нанообъекты.

1959 Американский физик Ричард Фейнман впервые опубликовал работу, где оценивались перспективы миниатюризации. Основные положения нанотехнологий были намечены в его легендарной лекции “Там внизу — много места” (“There’s Plenty of Room at the Bottom”), произнесенной им в Калифорнийском Технологическом Институте. Фейнман научно доказал, что с точки зрения фундаментальных законов физики нет никаких препятствий к тому, чтобы создавать вещи прямо из атомов.

Тогда его слова казались фантастикой только лишь по одной причине: еще не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами (то есть опознать атом, взять его и поставить на другое место). Чтобы стимулировать интерес к этой области, Фейнман назначил приз в \$1000, тому, кто впервые запишет страницу из книги на булавочной головке, что, кстати, осуществилось уже в 1964 году.

1968 Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разработали теоретические основы нано-обработки поверхностей.

1974 Японский физик Норио Танигучи ввел в научный оборот слово “нанотехника”, предложив называть так механизмы размером менее 1 микрона.

1981 Германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали сканирующий туннельный микроскоп - прибор, позволяющий осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне. Через четыре года они получили Нобелевскую премию.

1985 Американский физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смолли создали технологию, позволяющую точно измерять предметы диаметром в один нанометр.

1986 Создан атомно-силовой микроскоп, позволяющий, в отличие от туннельного микроскопа, осуществлять взаимодействие с любыми материалами, а не только с проводящими.

1986 Нанотехнология стала известна широкой публике. Американский футуролог Эрик Дрекслер опубликовал книгу, в которой предсказал, что нанотехнология в скором времени начнет активно развиваться.

1989 Дональд Эйглер, сотрудник компании IBM, выложил название своей фирмы атомами ксенона.

1998 Голландский физик Сеез Деккер создал нанотранзистор.

2000 Администрация США объявила “Национальную нанотехнологическую инициативу” (National Nanotechnology Initiative). Тогда из федерального бюджета США было выделено \$500 млн. В 2002 сумма ассигнований была увеличена до \$604 млн. На 2003 год “Инициатива” запросила \$710 млн., а в 2004 году правительство США приняло решение увеличить финансирование научных исследований в этой области до \$3,7 млрд. в течение четырех лет. В целом, мировые инвестиции в нано в 2004 году составили около \$12 млрд.

2004 Администрация США поддержала “Национальную наномедицинскую инициативу” как часть National Nanotechnology Initiative

Стремительное развитие нанотехнологий вызвано еще и потребностями общества в быстрой переработке огромных массивов информации.

Современные кремниевые чипы могут при всевозможных технических ухищрениях уменьшаться ещё примерно до 2012 года. Но при ширине дорожки в 40-50 нанометров возрастут квантовомеханические помехи: электроны начнут пробивать переходы в транзисторах за счет туннельного эффекта (о нем речь пойдет ниже), что равнозначно короткому замыканию. Выходом могли бы послужить наночипы, в которых вместо кремния используются различные углеродные соединения размером в несколько нанометров. В настоящее время ведутся самые интенсивные разработки в этом направлении.

Оборудование нанотехнологии

Всякая технология, будь то обработка материала на макро-, микро- или наноуровне, не может обходиться без средств измерения соответствующих величин. Среди многообразия измерительных приборов существуют специальные приборы для измерения как больших, так и малых расстояний.

Так, малые расстояния вплоть до миллиметрового (10^{-3} м) порядка легко измеряются с помощью обычной линейки. Ею можно измерить, например, толщину куска плотного картона. Не так уж трудно измерить толщину тонкого листа бумаги, ес-

ли таких листов много. Сложите в стопку сто листов, возьмите линейку и разделите получившуюся величину на 100. В результате такого измерения мы получаем толщину одного листа, исходя из того, что все листы совершенно одинаковые.

Однако для меньших размеров линейка уже не годится. Если попытаться измерить с ее помощью толщину волоса, то единственное, что можно будет сказать - это то, что волос очень тонкий, что очевидно и без измерений. Поэтому чтобы идти дальше в сторону еще меньших расстояний, необходимы увеличительные приборы, из которых всем наиболее знаком обычный оптический микроскоп.

Оптический микроскоп позволяет видеть мелкие детали величиной до 0,25 мкм. Дальнейшие способы улучшения микроскопа, работающего на принципах оптики, привели к созданию его электронного варианта, с помощью которого удастся наблюдать предметы с размерами порядка нанометра. Электронный микроскоп позволяет различать даже атомные решетки, но вот обнаружить в них дефекты он уже не может³. А ведь для целей нанотехнологии нужно хорошо визуализировать отдельные атомы!

Поэтому когда все возможности данного устройства были исчерпаны, ученые принялись искать новые пути решения поставленной задачи. И вот в начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая визуально исследуемую площадь его поверхности, а как бы трогая её. Здесь пригодился открытый к тому времени туннельный эффект, на основе которого в 1981 году был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

Подробным изучением СТМ и туннельного эффекта мы займемся позже, а пока лишь в общих чертах раскроем их суть.

Туннельный эффект является принципиально квантовомеханическим эффектом, не имеющим аналога в классической физике, и потому представляет огромный интерес для исследователей. Он основан на корпускулярно-волновом дуализме — двойственной природе элементарных частиц.

С точки зрения классической механики очевидно, что никакое материальное тело, имеющее энергию E , не может преодолеть потенциальный барьер высотой V_0 , если $V_0 > E$. Напри-

³. Подробнее о принципах работы различных микроскопов рассказывается в главе "Инструменты нанотехнологий"

мер, если принять за материальное тело мяч, а за потенциальный барьер — очень высокий бетонный забор, то понятно, что если кинуть мяч в сторону забора недостаточно высоко — так, что его энергии не хватит на перелет стоящего перед ним барьера, то он, ударившись о преграду, отскочит назад.

Однако если в качестве материального тела рассмотреть электрон, то оказывается, что даже если высота потенциального барьера выше, чем собственная энергия электрона, то он с определенной вероятностью может оказаться с другой стороны барьера, лишь незначительно изменив свою энергию, как если бы в “заборе” оказалась некая “дырка” или туннель⁴

Это необъяснимое, на первый взгляд, туннелирование является следствием того, что электрону присущи как корпускулярные, так и волновые свойства. Будь электрон классической частицей, обладающей энергией E , он, встретив на своем пути преграду, требующую для преодоления большей энергии, должен был бы отразиться от этой преграды. Однако, будучи одновременно и волной, он проходит сквозь эту преграду, подобно тому, как рентгеновские волны свободно проходят сквозь материальные объекты.

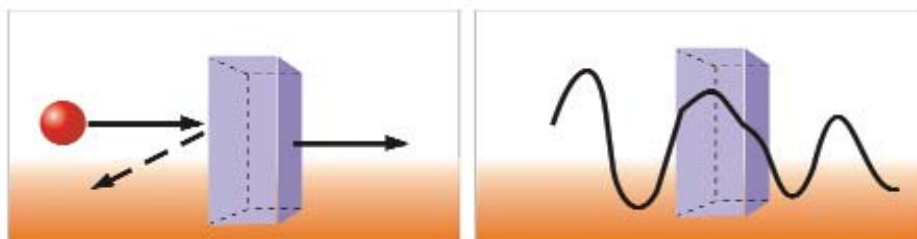


Рис 7. Туннельный эффект

Таким образом, над поверхностью любого проводника или полупроводника всегда наблюдается некоторое количество свободных электронов, “вышедших” за его пределы не в результате термоэлектронной эмиссии, а благодаря туннельному эффекту.

Если взять два проводящих вещества, расположить их на расстоянии 0,5 нм друг от друга и приложить к ним сравнительно малую разность потенциалов (0,1-1 В), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется туннельным током.

⁴. Причины столь “парадоксального” поведения подробно анализируются в главе “Законы квантового мира”.

Если повторить тот же опыт, но к поверхности интересующего тела поднести острый предмет, например, очень тонкую иглу с кончиком в атом толщиной, то, проводя ею над изучаемым объектом (сканируя его поверхность) можно получать информацию о строении объекта на атомном уровне.

В 1981 году сотрудники компании IBM Г. Бининг и Г. Рорер на основе этого явления построили первый *сканирующий туннельный микроскоп* (СТМ) и в 1982г. с его помощью впервые в истории получили изображение поверхности золота, а затем и кремния с атомарным разрешением.

За это открытие в 1985 году ученые были удостоены Нобелевской премии, а дальнейшее развитие сканирующей микроскопии привело к бурному развитию нанотехнологий.

По иронии судьбы, огромные возможности СТМ были осознаны далеко не сразу: некоторые научно-популярные издания даже не хотели брать в печать статью Бининга и Рорера, содержащую описание изобретения, на основании того, что это якобы “недостаточно интересно”! (впрочем, то же наблюдалось и десять лет спустя в ряде российских СМИ).

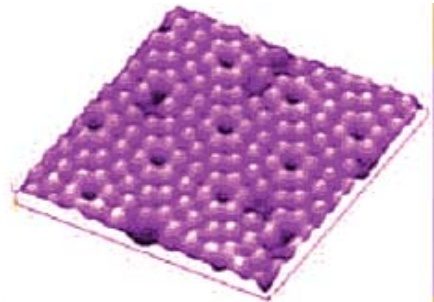


Рис 8. СТМ изображение поверхности монокристаллического кремния

Рабочим органом СТМ — зондом — служит токопроводящая металлическая игла. Зонд подводится к изучаемой поверхности на очень близкое расстояние ($\sim 0,5$ нм) и при подаче на зонд постоянного напряжения между ними возникает туннельный ток, который экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом. Это значит, что при увеличении расстояния лишь на 0,1 нм туннельный ток уменьшается почти в 10 раз! Именно это и обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте рельефа поверхности вызывают существенное изменение туннельного тока.

Поддерживая ток и расстояние постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над нею по осям X и Y, то опускаясь, то поднимаясь в зависимости от ее рельефа.

Информация об этом перемещении отслеживается компьютером и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

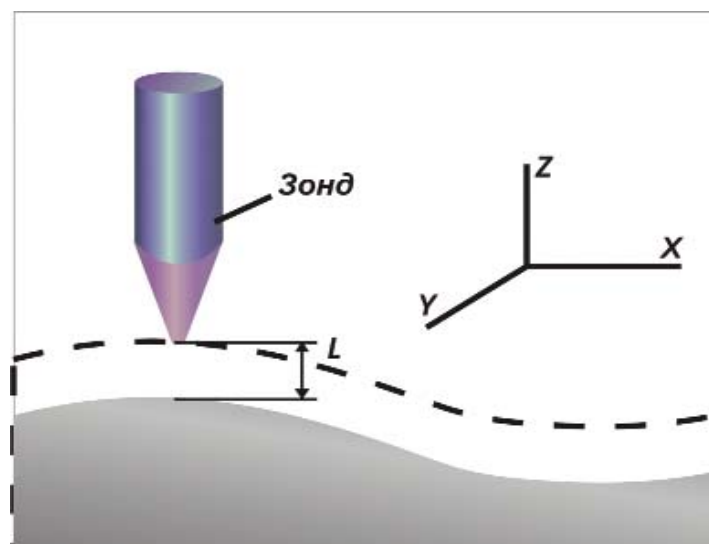


Рис 9. Схема работы СТМ

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов.

В *режиме постоянной высоты* острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется (рис. 10а). Исходя из данных о величине тока туннелирования, измеренной в каждой точке поверхности, строится образ ее рельефа.

В *режиме постоянного тока* СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой ее точке (рис. 10б).

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты быстрее, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх-вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких образцов. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью изучать сложные поверхности, но он занимает и больше времени.

Важной деталью сканирующего туннельного микроскопа является механический манипулятор, который должен обеспечивать перемещение зонда над поверхностью с точностью до тысячных долей нанометра. Обычно механический манипулятор изготавливают из пьезокерамического материала.

Удивительным свойством такого материала является **пьезоэффект**. Суть его заключается в следующем: если из пьезоматериала вырезать прямоугольную балку, нанести на противоположные стороны металлические электроды и приложить к ним

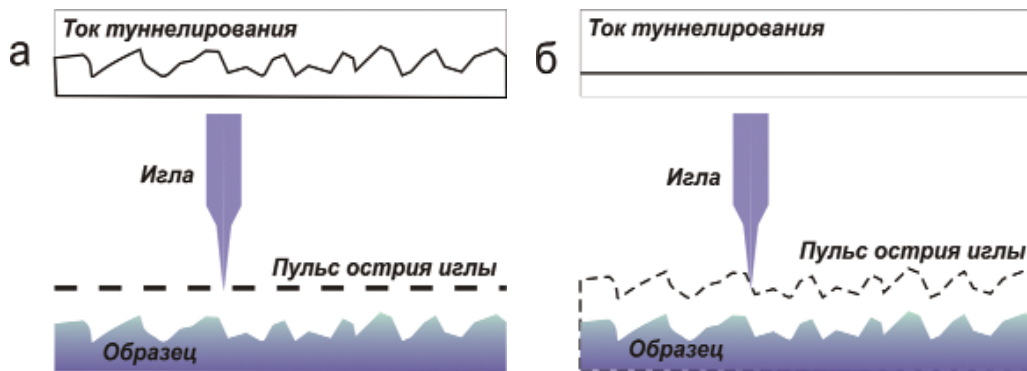


Рис 10. Режимы работы СТМ

разность потенциалов, то под действием тока произойдет изменение геометрических размеров балки. И наоборот: при малейшей деформации (сжатии) балки на ее противоположных концах возникнет разность потенциалов. Таким образом, управляя малыми изменениями тока, можно добиться перемещения зонда на очень малые расстояния, необходимые для работы сканирующего микроскопа.

В практических конструкциях обычно используют пьезокерамические манипуляторы, выполненные в виде тонкостенной трубки с несколькими отдельными электродами. Управляющее напряжение вызывает удлинение или изгиб таких манипуляторов и, соответственно, перемещение зонда по всем трем пространственным координатам X , Y и Z .

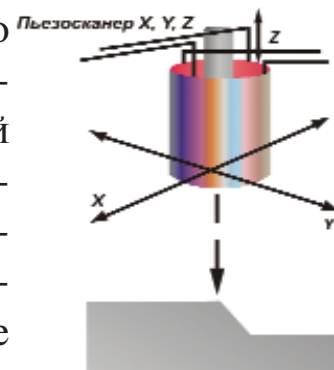


Рис 11. Схема пьезоманипулятора

Конструкции современных манипуляторов обеспечивают диапазон перемещения зонда до 100–200 мкм в плоскости и до 5–12 мкм по высоте.

Туннельный микроскоп позволил ученым исследовать поверхности на атомном уровне. Однако этот прибор имеет и ряд ограничений. Основанный на туннельном эффекте, он может применяться только для изучения материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Но прогресс не стоит на месте, и в 1986 г в лаборатории цюрихского отделения IBM были созданы микроскопы следующего поколения — **атомно-силовые** (АСМ). АСМ тоже позволяет исследовать поверхности с атомной точностью, но уже вовсе не

обязательно электропроводящие. Сегодня именно он представляет наибольший интерес для исследователей.

Принципы действия атомно-силового и туннельного микроскопов практически одинаковы, только в отличие от туннельного работа атомно-силового микроскопа основана на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях (около 0,1 нм) между атомами двух тел действуют силы отталкивания (рис. 12а), а на больших — силы притяжения (рис. 12б).

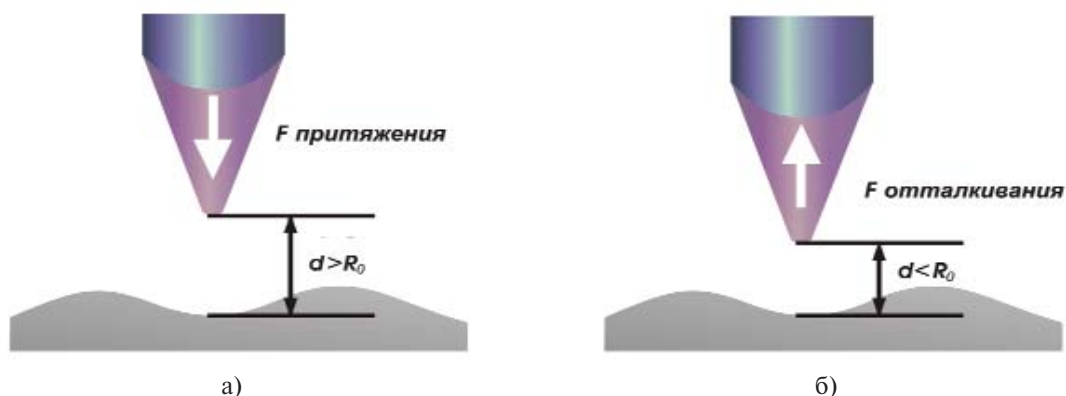


Рис 12. Принцип действия АСМ

В сканирующем атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над нею острие. В качестве зонда в АСМ обычно используется алмазная игла. При изменении силы F , действующей между поверхностью и острием, пружинка, на которой оно закреплено, отклоняется, и это регистрируется датчиком. Величина отклонения упругого элемента (пружинки) несет информацию о рельефе поверхности.

На рисунке представлена кривая зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом.

По мере приближения иглы к поверхности ее атомы все сильнее притягиваются к атомам образца. Сила притяжения будет возрастать, пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются на расстоянии между атомами около 0,2 нм.

Подобно СТМ в АСМ сканирование поверхности может происходить двумя способами: *сканирование кантилевером* (зондом) и *сканирование подложкой*. В первом случае вдоль исследуемой поверхности движется кантилевер, во втором относительно не-



Рис 13. Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом

подвижного кантилевера движется сама подложка.

Для регистрации сил взаимодействия зонда с поверхностью обычно используют метод, основанный на регистрации отклонения лазерного луча, отраженного от кончика зонда. Луч направляется на самый кончик кантилевера, покрытый специальным алюминиевым зеркальным слоем, после чего попадает в специальный

четырёхсекционный фотодиод.

Таким образом, малейшие отклонения кантилевера приводят к смещению луча лазера относительно секций фотодиода, что, в свою очередь, меняет сигнал с фотодиода, показывающего смещения кантилевера в ту или иную сторону. Такая система позволяет измерять отклонения луча на угол $0.1''$, что соответствует отклонению кантилевера всего на сотые доли нанометра!

Поскольку АСМ не требует, чтобы образцы были проводящими, он позволяет исследовать свойства проводников и изоляторов, молекул ДНК и других мягких материалов.

Дальнейшее развитие зондовой микроскопии показало, что изложенный принцип может быть реализован практически для любого вида взаимодействия острия зонда с поверхностью. Это привело к созданию целого ряда различных подвижных микроскопов, носящих общее название — сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Сегодня наиболее известны следующие их разновидности:

- туннельные зонды;
- атомно-силовые зонды;

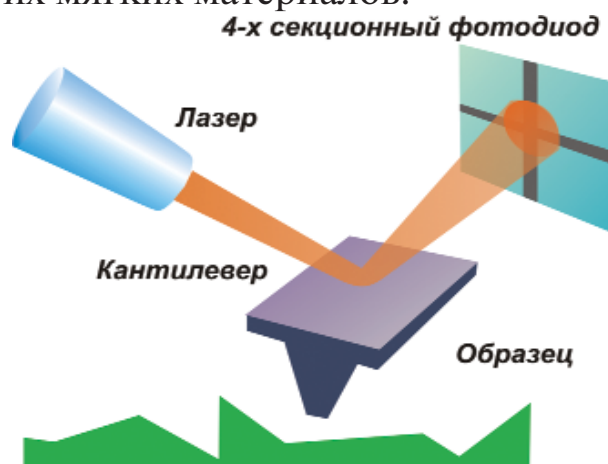


Рис 14. Регистрации отклонения лазерного луча от начального положения

- оптические зонды ближнего поля;
- магнитные силовые зонды;
- электростатические силовые зонды и др.

К более подробному изучению некоторых типов СЗМ мы обратимся в одной из следующих глав, а пока представляем общую схему СЗМ.

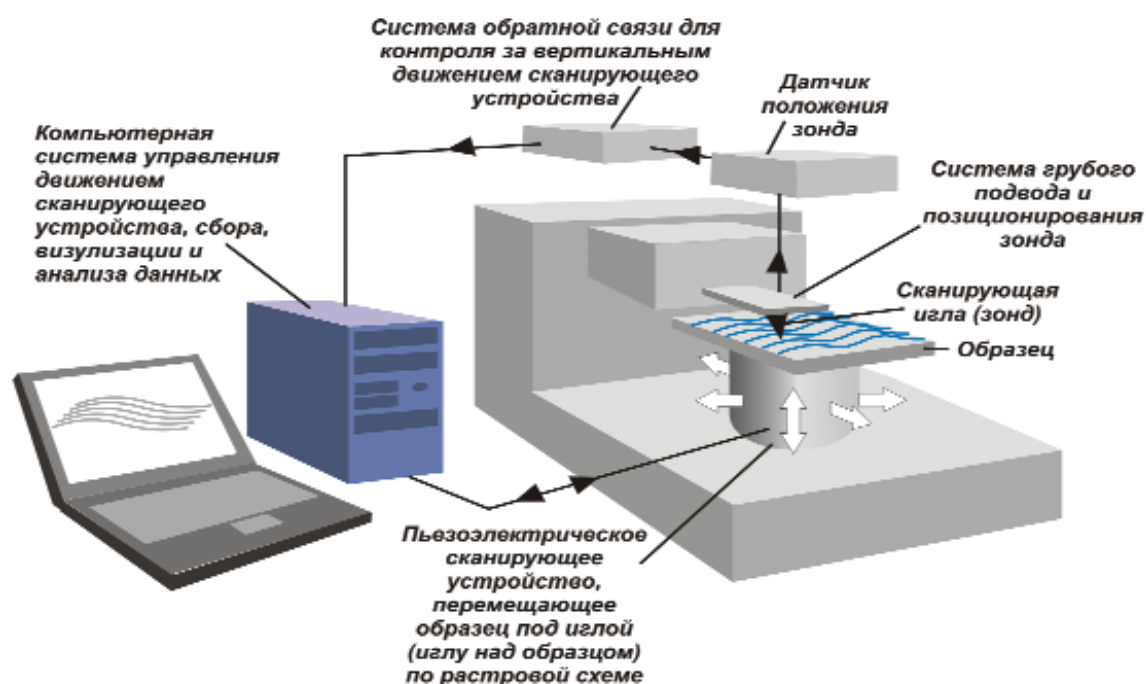


Рис 15. Общая схема работы СЗМ

В конструкции каждого сканирующего зондового микроскопа есть свои особенности. Однако общая схема остается более или менее одинаковой. В состав СЗМ обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные и производит на их основе построение СЗМ-изображения. Кроме того, специальное программное обеспечение позволяет исследователю как угодно манипулировать полученным изображением (масштабировать, поворачивать, строить сечения и т.п.) чтобы проанализировать наблюдаемую картину поверхности.

Терминология, сложившаяся в сканирующей зондовой микроскопии, несет на себе отпечаток своего англоязычного происхождения. Так, часто острие сканирующей иглы называется “типом” (tip), а консоль — “кантилевером” (cantilever).

Сегодня СЗМ являются основными инструментами нанотехнологии. Благодаря значительным усовершенствованиям

они позволяют изучать не только топологию (геометрические свойства) исследуемых объектов, но и массу других характеристик: магнитные и электрические свойства, твердость, однородность состава и др., и все это с нанометровым разрешением!

Кроме определения различных параметров, современные СЗМ позволяют *манипулировать* нанообъектами, обеспечивать захват отдельных атомов и перенос их в новую позицию, производить атомарную сборку проводников шириной в один атом, придавая поверхностям различных предметов новые нужные качества.

Существуют два основных способа манипуляции атомами с помощью иглы СТМ: *горизонтальный* и *вертикальный*. При вертикальной манипуляции после захвата нужный атом отрывают от поверхности, поднимая зонд на несколько ангстрем. Отрыв атома от поверхности контролируют по скачку тока. Разумеется, отрыв и перетаскивание атома требует больших усилий, чем просто его “перекачивание” по поверхности, как при горизонтальной манипуляции, но зато потом процесс переноса не зависит от встречающихся на поверхности препятствий (ступеней, ям, адсорбированных атомов). После перемещения в необходимое место атом “сбрасывают”, приближая острие к поверхности и переключая напряжение на игле.

Сегодня в мире в широком ассортименте выпускаются СЗМ и принадлежности к ним. Среди наиболее известных фирм можно назвать Digital Instruments, Park Scientific Instruments, Omicron, Topometrix, Burleigh и др. Цены на них колеблются в широких пределах — от 40 тыс. долл. за простейший АСМ до 100–200 тыс. долл. и выше в зависимости от комплектации и спектра решаемых задач. В России СЗМ изготавливают фирмы Нанотехнология-МДТ, Концерн Наноиндустрия и др.

Между прочим, нельзя не отметить один интересный факт: в сказке Н. Лескова “Левша” первый русский нанотехнолог, сумевший подковать блоху, утверждает, что увидеть надписи на гвоздиках, которыми подкована блоха, можно только в микроскоп с увеличением в 5 миллионов раз, что в точности соответствует увеличению современного СТМ!

Самосборка

Чтобы материалы обладали высоким качеством, они должны быть хорошо структурированы на уровне атомов и молекул.

Одним из нанотехнологических способов создания таких заданных структур является самосборка.

Самосборка широко распространена в живой природе. Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток, структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул и т.д.

Механизм самосборки наносистем в природе подтолкнул исследователей к попытке “скопировать” его принципы для построения искусственных наноструктур. Так, в настоящее время достигнуты успехи в изготовлении наноматериала, имитирующего естественную костную ткань. Для этого использовалась самосборка волокон около 8 нм диаметром, имитирующих естественные волокна коллагена. К полученному материалу хорошо прикрепляются естественные костные клетки, что позволяет использовать его как “клей” или “шпатлёвку” для костной ткани.

Очень развита электростатическая самосборка, позволяющая изменять материал в реальном времени. Основой для этого служит управление разностью потенциалов, приложенных к материалу с наночастицами внутри.

Наноэффекты в природе: удивительные лапки

“Длина его составляет от 8 до 30 см. Голова довольно широка и сильно сплющена, глаза без век со щелевидным зрачком, шея коротка, тело толстое и сплющенное, хвост умеренной длины, по большей части весьма ломкий. Тело покрыто мелкими бугорчатыми и зернистыми чешуйками. Водятся в теплых странах Старого и Нового света”...

Речь идет о гекконе — безобидной красивой ящерке, давно привлекающей внимание ученых своей уникальной способностью лазать как угодно и где угодно. Гекконы не только взбираются по отвесным стенам - они с такой же легкостью ходят по потолку или оконному стеклу.

Долгое время ученые не могли понять, каким образом геккон бежит по совершенно гладкому вертикальному стеклу, не падая и не соскальзывая. Было предпринято много попыток объяснить этот природный феномен.

Сначала полагали, что весь секрет в уникальных присосках, которыми снабжены лапки животного. Но выяснилось, что на

лапах геккона нет ничего, похожего на присоски, которые, обеспечивали бы ящерице хорошее сцепление.

Не оправдалось и предположение, что геккон бежит по стеклу, приклеиваясь к его поверхности клейкой жидкостью, подобно тому, как держится на разных предметах улитка. В случае клейкой жидкости на стекле оставались бы следы от его лап; тем более никаких желез, способных выделять такую жидкость, на лапах геккона не обнаружено.

Разгадка этого явления буквально поразила общественность: ведь при движении геккончик использует законы молекулярной физики! Ученые внимательно изучили лапку геккона под микроскопом. Выяснилось, что она покрыта мельчайшими волосками, диаметр которых в десять раз меньше, чем диаметр человеческого волоса. На кончике каждого волоска находятся тысячи мельчайших подушечек размером всего двести миллионных долей сантиметра. Снизу подушечки прикрыты листочками ткани, и при большом увеличении видно, что каждый листочек покрыт сотнями тысяч тонких волосообразных щетинок. А щетинки, в свою очередь, делятся на сотни лопатообразных кончиков, диаметр каждого из которых всего 200 нм!

Сотни миллионов этих волосков позволяют цепляться за малейшие неровности поверхности. Даже совершенно гладкое, на наш взгляд, стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Как оказалось, здесь работают силы Ван-дер-Ваальса, или, говоря иначе, силы межмолекулярного взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса основывается на квантовой механике. Молекулы веществ на малых расстояниях отталкиваются, а на больших притягиваются (тот же принцип положен в основу работы АСМ).

Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах наношетинок столь плотно прилегают к ней, что лапка



Рис 16. Геккон

как бы прилипает к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напряжет мышцы и потянет лапку - силы Ван-дер-Ваальса исчезают, и она легко отделяется от поверхности!

Силы Ван-дер-Ваальса очень малы, однако расположение волосков на пальчиках гекконов позволяет обеспечить



Рис 17. Увеличенное изображение лапки геккона

достаточно большую поверхность взаимодействия, чтобы ящерица могла удержаться, например, на потолке при помощи всего одного пальца своей пятипалой лапы или кончика хвоста.

Все это побудило исследователей к попыткам использовать сделанное открытие.

Сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. В дальнейшем планируется снабдить его искусственными волосками и увеличить прижимающую силу. А если удастся прикрепить к роботу хвост геккона, он сможет бегать по острым граням.

Если эксперименты по созданию ящерицеподобных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых разных областях — от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет.

Можно положить данный принцип в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в вакууме (обычный скотч в космосе не работает). Ведутся разработки нового поколения так называемых “сухих клеев” с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию (липучесть) на основе электростатики.

Можно изготовить обувь и перчатки, прочно удерживающие человека на вертикальной стене. Они облегчили бы жизнь не только альпинистам и монтажникам-скалолазам, но и всем остальным людям.

Фуллерены и углеродные нанотрубки

Еще Демокрит в своей атомистической концепции Вселенной обратил внимание на то, что мир состоит из множества “кирпичиков” - химических элементов и их соединений, различающихся между собой особыми свойствами.

Как неодинаковы свойства каждого из “кирпичей мироздания”, так неодинаковы и их истории. Одни элементы, такие, как медь, железо, сера, углерод, известны с доисторических времен. Возраст других измеряется только веками, несмотря на то, что ими, даже не открытыми, человечество пользовалось всегда (тот же кислород, к примеру, был открыт лишь в XVIII веке). Третьи были открыты 100-200 лет тому назад, но приобрели первостепенную важность лишь в наше время. К ним относятся уран, алюминий, бор, литий, бериллий и др.

У четвертых рабочая биография только начинается...

В 1985 году Роберт Керл, Гарольд Крото и Ричард Смолли совершенно неожиданно открыли принципиально новое углеродное соединение — **фуллерен**, уникальные свойства которого вызвали целый шквал исследований. В 1996 году первооткрывателям фуллеренов присуждена Нобелевская премия.

Основой молекулы фуллерена является углерод - этот уникальнейший химический элемент, отличающийся способностью соединяться с большинством элементов и образовывать молекулы самого различного состава и строения. Из школьного курса химии вам, конечно же, известно, что углерод имеет два основных аллотропных состояния: графит и алмаз. Так вот, с открытием фуллерена, можно сказать, углерод приобрел еще одно аллотропное состояние. Для начала рассмотрим структуры молекул графита, алмаза и фуллерена.

Графит обладает *слоистой структурой*. Каждый его слой состоит из атомов углерода, ковалентно связанных друг с другом в правильные шестиугольники.

Соседние слои удерживаются вместе слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами. Поэтому они легко скользят друг по другу. Примером этого может служить простой карандаш - когда вы проводите графитовым

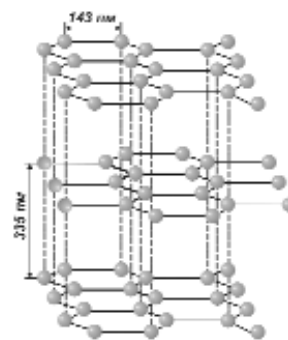


Рис 18. Структура графита

стержнем по бумаге, слои постепенно “отслаиваются” друг от друга, оставляя на ней след.

Алмаз имеет трехмерную *тетраэдрическую структуру*. Каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя другими. Все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии (154 нм) друг от друга. Каждый из них связан с другими прямой ковалентной связью и образует в кристалле, каких бы размеров он ни был, одну гигантскую макромолекулу.

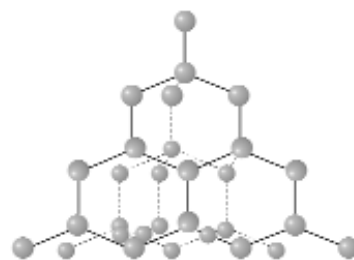


Рис19. Структура алмаза

Благодаря высокой энергии ковалентных связей С-С алмаз обладает высочайшей прочностью и используется не только как драгоценный камень, но и в качестве сырья для изготовления металлорежущего и шлифовального инструмента (возможно, читателям доводилось слышать об алмазной обработке различных металлов).

Фуллерены получили свое название в честь архитектора Бакминстера Фуллера, который придумал подобные структуры для использования их в архитектуре (поэтому их также называют бакиболами). Фуллерен имеет *каркасную структуру*, очень напоминающую футбольный мяч, состоящий из “заплаток” пяти- и шестиугольной формы. Если представить, что в вершинах этого многогранника находятся атомы углерода, то мы получим самый стабильный фуллерен C_{60} .

В молекуле C_{60} , которая является наиболее известным, а также наиболее симметричным представителем семейства фуллеренов, число шестиугольников равно 20. При этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет три общие стороны с шестиугольниками и три - с пятиугольниками.



Рис 20. Структура фуллерена

Структура молекулы фуллерена интересна тем, что внутри такого углеродного “мячика” образуется полость, в которую благодаря капиллярным свойствам можно ввести атомы и молекулы других веществ, что дает, например, возможность их безопасной транспортировки.

По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены их молекулы, содержащие различное число атомов углерода - от 36 до 540.

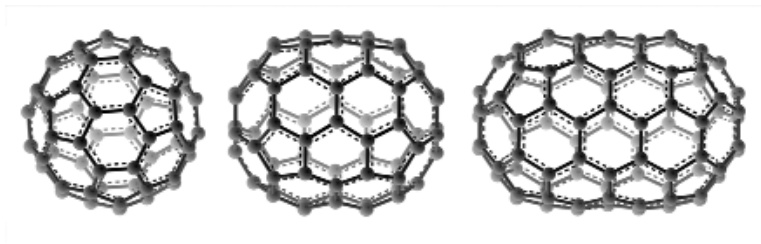


Рис 21. Представители фуллеренов а) C_{60} б) C_{70} в) C_{90}

Однако разнообразие углеродных каркасных структур на этом не заканчивается. В 1991 году японский профессор Сумио Иидзима обнаружил длинные углеродные цилиндры, получившие названия нанотрубок.

Нанотрубка — это молекула из более миллиона атомов углерода, представляющая собой трубку с диаметром около нанометра и длиной несколько десятков микрон. В стенках трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников.

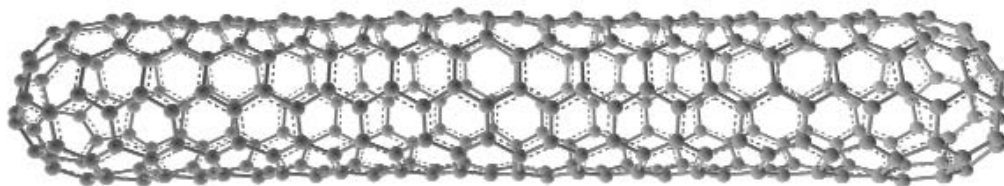


Рис 22. Структура нанотрубки

Структуру нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и “склеиваем” ее в цилиндр (на самом деле, конечно, нанотрубки растут совсем по-другому). Казалось бы, что может быть проще — берешь графитовую плоскость и сворачиваешь в цилиндр! — однако до экспериментального открытия нанотрубок никто из теоретиков их не предсказывал. Так что ученым оставалось только изучать их и удивляться.

А удивляться было чему — ведь эти изумительные нанотрубки в 100 тыс. раз тоньше человеческого волоса оказались на редкость прочным материалом. Нанотрубки в 50-100 раз прочнее стали и имеют в шесть раз меньшую плотность! *Модуль Юнга* — уровень сопротивления материала деформации — у нанотрубок вдвое выше, чем у обычных углеродных волокон. То есть трубки не только прочные, но и гибкие, и напоминают по своему пове-

дению не ломкие соломинки, а жесткие резиновые трубки. Под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки ведут себя довольно экстравагантно: они не “рвутся”, не “ломаются”, а просто-напросто перестраиваются!

Эти необычные свойства нанотрубок можно использовать для создания искусственных мускулов, которые при одинаковом объеме могут быть вдесятеро сильнее биологических, не боятся высоких температур, вакуума и многих химических реагентов.

Из нанотрубок можно создать сверхлегкие и сверхпрочные композиционные материалы, чтобы шить из них одежду, не стесняющую движений, для пожарных и космонавтов. НанокABELЬ от Земли до Луны из одиночной трубки можно было бы намотать на катушку размером с маковое зернышко. Небольшая нить диаметром 1 мм, состоящая из нанотрубок, могла бы выдержать груз в 20 т, что в несколько сотен миллиардов раз больше ее собственной массы!

Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микрон — что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина получаемых нанотрубок постепенно увеличивается — сейчас ученые уже вплотную подошли к сантиметровому рубежу. Полиучены многослойные нанотрубки длиной 4 мм. Поэтому есть все основания надеяться, что в ближайшем будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в метры и даже сотни метров.

Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: ведь невидимый невооруженным взглядом “трос” в тысячи раз тоньше человеческого волоса и способный удерживать груз в сотни килограмм найдет бесчисленное множество применений.

Нанотрубки бывают самой разной формы: однослойные и многослойные, прямые и спиральные. Кроме того, они демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств.

Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости (*хиральности*) нанотрубки могут быть как проводниками, так и полупроводниками электричества. Электронные свойства нанотрубок можно целенаправленно менять путем введения внутрь трубок атомов других веществ.

Пустоты внутри фуллеренов и нанотрубок давно привлекали внимание ученых. Эксперименты показали, что если внутрь фуллерена внедрить атом какого-нибудь вещества (этот процесс носит название “интеркаляция”, т.е. “внедрение”), то это может изменить его электрические свойства и даже превратить изолятор в сверхпроводник!

А можно ли таким же образом изменить свойства нанотрубок? Оказывается, да. Ученые смогли поместить внутрь нанотрубки целую цепочку из фуллеренов с уже внедренными в них атомами гадолиния. Электрические свойства такой необычной структуры сильно отличались как от свойств простой, полый нанотрубки, так и от свойств нанотрубки с пустыми фуллеренами внутри. Интересно отметить, что для таких соединений разработаны специальные химические обозначения. Описанная выше структура записывается как Gd@C60@SWNT, что означает “Gd внутри C60 внутри однослойной нанотрубки (Single Wall NanoTube)”.

Может ли какой-либо иной материал с таким простым химическим составом похвастаться хотя бы частью тех свойств, которыми обладают нанотрубки? Спектр их возможного применения очень широк. Вот лишь несколько примеров.

Из нанотрубок можно делать, например, уникальные провода для микроприборов. Уникальность их заключается в том, что ток протекает по ним практически без выделения тепла и достигает громадного значения — 10^7 А/см². Классический проводник при таких значениях мгновенно бы испарился.

Разработано также несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Уже в 2006 году появятся эмиссионные мониторы с плоским экраном, работающие на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, другой конец начинает испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. Получающееся при этом зерно изображения будет фантастически малым: порядка микрона!

Другой пример — использование нанотрубки в качестве иглы сканирующего микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряже-

ние, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Необычные электрические свойства нанотрубок сделают их одним из основных материалов наноэлектроники. На их основе изготовлены новые элементы для компьютеров. Эти элементы обеспечивают уменьшение устройств по сравнению с кремниевыми на несколько порядков. Сейчас активно обсуждается вопрос о том, в какую сторону пойдет развитие электроники после того, как возможности дальнейшей миниатюризации электронных схем на основе традиционных полупроводников будут полностью исчерпаны (это может произойти в ближайшие 5-6 лет). И нанотрубкам отводится бесспорно лидирующее положение среди перспективных претендентов на место кремния.

Еще одно применение нанотрубок в наноэлектронике — создание полупроводниковых гетероструктур, т.е. структур типа “металл/полупроводник” или стык двух разных полупроводников (нанотранзисторы).

Теперь для изготовления такой структуры не надо будет выращивать отдельно два материала и затем “сваривать” их друг с другом. Нужно лишь в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно - заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником) просто надломив его посередине особым образом. Тогда одна часть нанотрубки будет обладать металлическими свойствами, а другая - свойствами полупроводников!

Нанотрубки — идеальный материал для безопасного хранения газов во внутренних полостях. В первую очередь это относится к водороду, который давно стали бы использовать как топливо для автомобилей, если бы громоздкие, толстостенные, тяжелые и небезопасные баллоны для хранения водорода не лишали водород его главного преимущества — большого количества энергии, выделяемой на единицу массы (на 500 км пробега автомобиля требуется всего около 3 кг H_2).

Ввиду того, что запасы нефти на нашей планете не бесконечны, автомобиль на водородном топливе был бы эффективным решением многих экологических проблем. Поэтому, возможно, скоро вместо традиционного бензина новые водородные “бензобаки” с нанотрубками будут заполнять водородным

топливом стационарно под давлением, а извлекать — небольшим подогревом такого “водородобака”. Чтобы превзойти обычные газовые баллоны по плотности запасенной энергии, нужны нанотрубки с полостями относительно большого диаметра — более 2–3 нм.

В нанотрубки можно не только “загонять” атомы и молекулы поодиночке, но и буквально “вливать” вещество. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть как бы втягивает вещество в себя. Таким образом нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки и хранения химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов.

Попав внутрь нанотрубки, атомы или молекулы уже не могут выйти наружу: концы нанотрубок надежно “запаяны”, а углеродное кольцо слишком узко для того, чтобы большинство атомов “пролезло” через него. В таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. Попав в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях, а операции “запаивания” и “распаивания” концов нанотрубок вполне под силу современной технологии. Уже создана нанотрубка с одним закрытым концом.

Также не исключено, что через 10–15 лет на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с очень активными ферментами, эти нанотрубки собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и “вскрываются” в определенный момент. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы через 3 – 5 лет. Основной проблемой является отсутствие эффективных методов “открывания” таких механизмов и их интеграции в белковые маркеры для поиска клеток-мишеней.

Возможно, создадут и более эффективные методы доставки лекарств на основе вирусов и нанокапсул. На основе нанотрубок также создан конвейер, способный точно транспортировать отдельные атомы с большими скоростями вдоль нанотрубки.

Ультрадисперсные наноматериалы

Рассмотренные выше фуллерены и нанотрубки из-за своих сверхмалых размеров относятся к ультрадисперсным.

Дисперсность — это степень раздробленности вещества на частицы. Чем меньше размер отдельной частицы, тем выше дисперсность. Большинство веществ окружающего нас мира существуют в виде дисперсных систем, например, грунты и почвы, многие технические материалы (песок, различные порошки и т.д.), некоторые продукты (соль, сахар, крупа). По степени дисперсности частицы можно разделить на грубодисперсные, *высокодисперсные* (или коллоидные, размер которых колеблется в пределах от 10^{-5} — 10^{-7} м) и *ультрадисперсные* (соответственно, нанометрового порядка).

Повышенный интерес ученых к наноматериалам объясняется тем, что уменьшение дисперсности частиц какого-либо вещества может приводить к заметным изменениям их свойств. Так, еще в XIX веке Майкл Фарадей, впервые создав коллоидную суспензию золота, состоящую из крошечных частиц этого металла, обнаружил, что ее цвет менялся на фиолетовый, что свидетельствует об изменении отражающих свойств суспензии при уменьшении размеров частиц.

В последнее время стало известно, что наночастицы серебра оказывают антибактериальное действие, что делает их полезными для лечения многих болезней. Это свойство серебра еще в древности заметили служители церкви, используя серебро для приготовления “святой воды”. Но в виде наночастиц антибактериальная активность серебра повышается в тысячи раз!

Такие углеродные наночастицы, как фуллерены и нанотрубки, своими удивительными свойствами тоже подтверждают тот факт, что многие вещества в наноформе не ведут себя так же, как в привычном для нас виде. Это объясняется тем, что с уменьшением размеров частиц увеличивается интенсивность их взаимодействия с окружающей средой, что приводит к изменению их газонасыщенности, окисленности, токсичности, взрывоопасности, плотности и т.д. по сравнению со свойствами тех же материалов в обычной форме.

Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно давно и используется в разных областях техники. Примерами могут служить широко применя-

емые аэрозоли, красящие пигменты, получение цветных стекол благодаря окрашиванию их коллоидными частицами металлов. Малые частицы и наноразмерные элементы используются для производства различных авиационных материалов. Например, в авиации применяются радиопоглощающие керамические материалы, в матрице которых беспорядочно распределены ультрадисперсные металлические частицы.

Суспензии металлических наночастиц (обычно железа или меди) размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы.

Ультрадисперсные материалы обычно не встречаются в природе в свободном состоянии, а представляют собой искусственный продукт. В настоящее время существует большое количество способов измельчения веществ, например: механическое дробление (для получения различных порошков), резание (получение стружки), измельчение в шаровых, вибрационных и вихревых мельницах, измельчение ультразвуком и др.

Наночастицы производятся и при помощи нанотехнологии, в частности, туннельно-зондовыми методами, использующими “умение” современных сканирующих микроскопов манипулировать отдельными атомами. И, конечно же, большие успехи в этом направлении будут достигнуты после создания ассемблеров – сборщиков атомных структур.

Подробному обсуждению свойств и эффектов, присущих наночастицам, посвящена отдельная глава “Нанохимия и наноматериалы”.

Будущее нанотехнологий: проблемы и перспективы

Благодаря прорыву в области производства микроскопов современные ученые могут манипулировать атомами и располагать их так, как им заблагорассудится. Такого еще не было за всю историю развития человечества!

Идеальная техническая система — это система, масса, габариты и энергоемкость которой стремятся к нулю, а ее способность выполнять работу при этом не уменьшается. Предельный случай идеализации техники заключается в уменьшении её размеров (вплоть до полного “исчезновении”) при одновременном увеличении количества выполняемых ею функций. В иде-

але — технического устройства не должно быть видно, а функции, нужные человеку и обществу, должны выполняться. Закон увеличения степени идеальности гласит: развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности.

На практике хорошей иллюстрацией этого закона может служить постоянное стремление производителей микроэлектроники и бытовой техники к миниатюризации, созданию устройств всё меньших размеров со все большими функциональными возможностями. Взять, например, те же сотовые телефоны или ноутбуки: размер все уменьшается, в то время как функциональность только растет.

Таким образом, нанотехнологии и наноустройства являются закономерным шагом на пути совершенствования технических систем. И возможно, не последним: за областью нановеличин лежат области *пико* (10^{-12}), *фемто* (10^{-15}), *атто* (10^{-18}) и т.д. величин с еще неизвестными и непредсказуемыми свойствами...

В настоящее время на рынке продаются только скромные достижения нанотехнологии, вроде самоочищающихся покрытий, "умной одежды" и упаковок, позволяющие дольше сохранять свежими продукты питания. . Однако ученые предсказывают триумфальное шествие нанотехнологии в недалеком будущем, опираясь на факт её постепенного проникновения во все отрасли производства.

Нанотехнология станет основой новой промышленной революции, которая приведет к созданию устройств в 100 раз более прочных, чем сталь и не уступающих по сложности человеческим клеткам.

Уже создаются и будут создаваться устройства, функциональные возможности которых определяются необычными свойствами новейших материалов. Благодаря обработке на атомарном уровне, привычные материалы будут обладать улучшенными свойствами, постепенно становясь все легче, прочнее и меньше по объему. Согласно прогнозам большинства ученых, это произойдет уже через 10-15 лет.

Как уже говорилось. возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы - начиная от микроскопических компьютеров, убивающих раковые клетки, и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду, однако большие перспективы чаще всего несут с собой и большие

опасности. Взять хотя бы достижения в области атомной энергии и печальные последствия Чернобыльской аварии или трагедию Хиросимы и Нагасаки. Ученые всего мира сегодня должны четко представлять себе, что подобные “неудачные” опыты или халатность в будущем могут обернуться трагедией, ставящей под угрозу существование всего человечества и планеты в целом.

В связи с этим становится понятно, почему с самого появления нанотехнологии её развитию мешают страхи, часть которых однозначно относится к разряду научной фантастики, но некоторые, однако ж, вовсе не лишены основания. К сожалению, обсуждение этих проблем выходит за рамки книги. Поэтому, дабы не вводить читателя в заблуждение и позволить ему самостоятельно сделать выводы, в этой главе мы отдельно расскажем о тех перспективах и возможностях, которых мы вправе ожидать от нанотехнологий, а затем кратко опишем возможные проблемы и опасности, связанные с их развитием.

Небывалые возможности

Медицина

Медицина изменится неузнаваемо. Во-первых, наночастицы могут использоваться в медицине для точной доставки лекарств и управления скоростью химических реакций. Нанокapsулы с метками-идентификаторами смогут доставлять лекарства непосредственно к указанным клеткам и микроорганизмам, смогут контролировать и отображать состояние пациента, следить за обменом веществ и многое другое. Это позволит эффективнее бороться с онкологическими, вирусными и генетическими заболеваниями.

Представьте себе, что вы подхватили грипп (при этом вы даже еще не знаете, что его подхватили). Тут же среагирует система искусственно усиленного иммунитета - десятки тысяч нанороботов начнут распознавать (в соответствии со своей внутренней базой данных) вирус гриппа и за считанные минуты ни одного вируса у Вас в крови не будет! Или у вас начался ранний атеросклероз -искусственные клетки начинают чистить механическим и химическими путями Ваши сосуды .

Во-вторых, возможно создание нанороботов-врачей, способных “жить” внутри человеческого организма, устраняя все возникающие повреждения или предотвращая их возникнове-

ние. Последовательно проверяя и, если надо, “исправляя” молекулы, клетку за клеткой, орган за органом, наномашинны вернут здоровье любому больному, а затем просто не допустят никаких заболеваний и патологий, в том числе генетических. Теоретически это позволит человеку жить сотни, а может быть, тысячи лет.

В-третьих, появится возможность быстрого анализа и модификации генетического кода, простое конструирование аминокислот и белков, создание новых видов лекарств, протезов, имплантантов. В этой области рядом исследователей уже проводится проверка различных наноматериалов на совместимость с живыми тканями и клетками.

По прогнозам журнала *Scientific American*, уже в ближайшем будущем появятся медицинские устройства размером с почтовую марку. Их достаточно будет наложить на рану. Это устройство самостоятельно проведет анализ крови, определит, какие медикаменты необходимо использовать, и впрыснет их в кровь.

Нужно отметить, что появление высоких технологий из-за их высокой стоимости привнесли в здравоохранение ряд новых проблем, в том числе морально-этического свойства, связанных с наличием и доступностью медицинских услуг для широких слоев населения. Тем не менее, как бы сильно ни развивалась научно-техническая основа медицины, главными факторами исцеления больного всегда были и останутся профессиональная подготовка, этические и человеческие качества врача.

Материаловедение

Качество многих привычных материалов может быть повышено за счет использования наночастиц и атомарной обработки. Нанотехнологии позволят создавать более легкие, тонкие и прочные композитные (смешанные, сложносоставные) материалы. Появятся так называемые “умные” материалы, способные изменять свою структуру в зависимости от окружающей среды. Также появятся материалы сверхпрочные, сверхлегкие и негорючие (на основе алмазоида), которые могут использоваться в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

Электроника, компьютерные технологии, робототехника

С появлением новых средств наноманипулирования возможно создание механических компьютеров, способных в кубе



Рис 23. Медицинские нанороботы в представлении художников

с ребром 100 нм функционально повторить современный микропроцессор Intel Pentium II.

Применение нанотехнологий в микроэлектронике (т.е. теперь уже наноэлектронике) позволит перейти от планарной технологии изготовления процессоров (с количеством транзисторов 10^8 шт. на см^2) к 3D-технологии, то есть к 10^{12} транзисторов на см^3 соответственно, что в 10 тыс. раз больше, чем на современном этапе.

Развитие методов атомно-силовой микроскопии может обеспечить производство памяти с поверхностной плотностью данных до 17 терабит/ см^2 . Это позволит создать компьютеры и микропроцессорные системы гораздо большей производительности, чем существующие сейчас.

В 2002 году компания HP создала память с электронной адресацией, имеющую на сегодняшний день наибольшую плотность данных. Опытный лабораторный образец 64-битной памяти использует молекулярные переключатели (ключи) как активные устройства и по размерам не превосходит квадратного микрона. Эта область настолько мала, что больше 1000 таких устройств может поместиться на торце человеческого волоса. Плотность битов в устройстве более чем в 10 раз больше, чем в современных кремниевых аналогах.

С течением времени предполагается дальнейшее уменьшение компьютерных компонентов с помощью нанотехнологии. Это приведет к оснащению практически всех бытовых устройств встроенными компьютерами.

Планируется создание нанороботов размером всего 1-2 микрон, оснащенных бортовыми механокомпьютерами и источниками энергии, которые будут полностью автономны и смогут выполнять разнообразные функции, вплоть до самокопирования.

На основе нанотрубок уже сейчас создают детали наномашин — подшипники, передачи. Создание наномоторов на основе АТФ (универсального аккумулятора и переносчика энергии во всех биологических системах) позволит приводить в движение нанороботов, а развитие беспроводной лазерной связи позволит управлять ими и служить “энергопроводом”.

Микроскопия и средства визуализации

Если на сегодняшний день основными средствами визуализации являются СЗМ — сканирующие зондовые микроско-

пы, то с появлением нанороботов откроются новые возможности в наноманипулировании, сканировании и средствах визуализации макромолекулярных структур, поскольку можно будет обрабатывать их с атомарной точностью.

Социальные последствия

По прогнозам экспертов Национальной нанотехнологической инициативы США, развитие нанотехнологий через 10-15 лет позволит создать новую отрасль экономики с оборотом в \$1.000.000.000.000 и миллионы рабочих мест.

Принципиально иным станет образование. Дети получают карманные наноконструкторы, создающие движущиеся модели животных, машин и космических процессов, которыми они смогут управлять. Соответственно, изменится и сам подход к обучению, традиционная безличная классно-урочная система канет в прошлое, изменятся учебные программы. Игровые и учебные наномашинки откроют доступ к мировым знаниям, разовьют по индивидуальной программе умственные способности каждого ребенка.

Труд в современном смысле, то есть “в поте лица”, который с незапамятных времен был главным содержанием жизни, перестанет существовать. Потеряют смысл и нынешние понятия стоимости, цены, денег. Зато повысится, вероятно, стоимость идеи-конструкции определенной вещи для построения ее ассемблерами.

Как считает Дрекслер, в таком полностью обновленном обществе осуществится настоящая утопия, но не из тех, где дается рецепт коллективного счастья в типовых общежитиях. Наоборот, каждый человек получит максимальное разнообразие вариантов существования, возможность, не мешая другим, свободно избирать и менять образ жизни, экспериментировать, ошибаться и начинать сначала.

Домашний быт и сельское хозяйство

Нанотехнологии способны произвести революцию в сельском хозяйстве. Молекулярные роботы смогут производить пищу, “освободив” от этого растения и животных. С этой целью они будут использовать любое “подножное сырье”: воду и воздух, где есть главные нужные элементы — углерод, кислород, азот, водород, алюминий и кремний, а остальные, как и для “обычных” живых организмов, потребуются в микроколичествах.

К примеру, теоретически возможно производить молоко прямо из травы, минуя промежуточное звено — корову. Человеку не придется убивать животных, чтобы полакомиться жареной курочкой или копченым салом. Предметы потребления будут производиться “прямо на дому”.

Промышленность и космонавтика

Ожидается, что уже в 2025 году появятся первые ассемблееры, созданные на основе нанотехнологий. Теоретически возможно, что они будут способны конструировать из готовых атомов любой предмет. Достаточно будет спроектировать на компьютере любой продукт — и он будет собран и размножен сборочным комплексом нанороботов.

В своих “Машинах созидания” Дрекслер описывает, как примерно будет выглядеть создание, или точнее говоря “выращивание” ракетного двигателя:

“Процесс идет в баке, на дно которого помещают подложку — основание. Крышка бака герметически закрывается, и насосы наполняют его вязкой жидкостью, содержащей миллионы ассемблеров, запрограммированных на функции сборщиков двигателя.

В центре подложки находится “зародыш” — нанокomпьютер, хранящий в памяти все чертежи будущего двигателя, а на поверхности имеется участок, к которому могут “прилипнуть” сборщики из бурлящей вокруг взвеси. Каждый из них получает информацию о назначенном ему пространственном положении относительно зародыша и приказ захватить своими манипуляторами несколько других сборщиков из взвеси. Они также подключаются к компьютеру “зародыша” и получают аналогичные приказы. За несколько часов в жидкости вырастает некое подобие кристаллической структуры, с мельчайшими подробностями очерчивающей форму будущего двигателя.

Снова включаются насосы, и взвесь в баке заменяет сборщиков раствором строительных материалов — триллионами атомов различных химических элементов. Компьютер зародыша отдает команду, и часть составляющих каркас строителей отпускает своих соседей, складывает манипуляторы и также вымывается, оставляя ходы и каналы, которые будут заполнены нужными атомами и молекулами.

Специальные усики оставшихся сборщиков интенсивно гребут, создавая в каналах непрерывный ток жидкости, содержащей “топливо” и исходные материалы и выносящей из рабочей зоны отходы и тепло. Система связи, замкнутая на компьютер зародыша, передает команды каждому строителю. Там, где требуется наибольшая прочность, сборщики складывают атомы углерода в алмазную решетку. Где критичны тепловая и коррозионная устойчивость, на основе окиси алюминия создаются структуры кристаллической решетки сапфира. В тех местах, где напряжения невелики, сборщики экономят вес конструкции, меньше заполняя поры. И по всему объему будущего двигателя атом за атомом выкладываются клапаны, компрессоры, датчики и т.д. На всю работу потребуется менее суток времени и минимум человеческого внимания.

На что похож этот двигатель? Это уже не массивный кусок сваренного и скрепленного болтами металла, он без швов, подобный драгоценному камню. Его пустые внутренние ячейки, построенные в ряды, находящиеся примерно на расстоянии длины волны света друг от друга, облегчают структуру, уже сделанную из самых легких и прочных известных материалов. В сравнении с современными металлическими двигателями этот усовершенствованный двигатель будет легче более, чем на 90%.

Он выдерживает длительное и интенсивное использование, потому что состоит из более прочного материала. Поскольку ассемблеры позволили проектировщикам делать материал двигателя таким, что он при нагрузке течет прежде, чем ломается, двигатель не только прочен, но и износостоек.

При всем своем превосходстве, этот двигатель, в общем-то, вполне обычен. В нем просто заменили плотный металл тщательно устроенными структурами из легких, прочно связанных атомов.

Но это все еще самые простые возможности нанотехнологии. Из теории известно, что ракетные двигатели работали бы оптимально, если бы могли менять свою форму в зависимости от режима. Только с использованием нанотехнологии это станет реальностью.

Конструкция более прочная, чем сталь, более легкая, чем дерево, сможет подобно мускулам (используя тот же принцип скользящих волокон) расширяться, сжиматься и изгибаться,

меняя силу и направление тяги. Космический корабль сможет полностью преобразиться примерно за час.

Нанотехника, встроенная в космический скафандр и обеспечивающая круговорот веществ, позволит человеку находиться в нем неограниченное время, к тому же превратит оболочку скафандра в “умножитель силы”.

Нанороботы способны воплотить также мечту фантастов о колонизации иных планет - эти устройства смогут создать на них среду обитания, необходимую для жизни человека. Станет возможным автоматическое строительство орбитальных систем, самособирающихся колоний на Луне и Марсе, любых строений в мировом океане, на поверхности земли и в воздухе (эксперты прогнозируют это к 2025 гг.). Возможность самосборки может привести к решению глобальных вопросов человечества: проблемы нехватки пищи, жилья и энергии. В освоении космоса начнется новая эра.

Космический лифт

Тот, кто думает, что с помощью нанотехнологии можно создать только что-то субмикроскопическое, невидимое для человеческого глаза, вероятно, будут удивлены проектом, разрабатываемым в последнее время специалистами из NASA и привлечшим столько внимания со стороны ученых и широкой общественности. Речь идет о проекте так называемого космического лифта.

Космический лифт — это трос длиной в несколько десятков тысяч километров, соединяющий орбитальную космическую станцию с платформой, размещенной посреди Тихого океана.

Идее космического подъемника более века. Первым о нем заговорил в 1895 году великий русский ученый Константин Циолковский, основоположник современной космонавтики. Он указывал на то, что принцип, положенный в основе современного ракетостроения, не позволяет современным ракетопосылателям быть эффективным средством для доставки груза в космос. Причин тому несколько:

Во-первых, КПД современных ракет очень низок из-за того, что львиная доля мощности двигателей первой ступени уходит на работу по преодолению силы земного тяготения.

Во-вторых, известно, что значительное увеличение массы топлива в несколько раз даёт лишь небольшой прирост скорости

ракеты. Потому, например, американский ракетный комплекс “Сатурн-Аполлон” при стартовой массе 2900 тонн выводил на орбиту только 129 тонн. Отсюда астрономическая стоимость космических запусков с помощью ракет (стоимость вывода килограмма груза на низкую орбиту составляет в среднем около \$10.000.)

И, несмотря на многократные попытки снизить стоимость запуска ракет, по-видимому, радикально удешевить транспортировку грузов и людей на орбиту до стоимости стандартных авиаперевозок на базе современных ракетных технологий принципиально невозможно.

Чтобы отправлять грузы в космос более дешевым способом, исследователи из Лос-Аламосской национальной лаборатории предложили создать космический лифт. Цена запуска груза с помощью лифта по предварительным оценкам может снизиться с десятков тысяч долларов до \$10 за килограмм. Ученые полагают, что космический лифт сможет в буквальном смысле перевернуть мир, дав человечеству совершенно новые возможности.

По сути, лифт будет представлять собой кабель, соединяющий орбитальную станцию с платформой на поверхности Земли. Кабинки на гусеничном ходу будут перемещаться по кабелю вверх и вниз, переноса спутники и зонды, которые нужно вывести на орбиту. С помощью этого лифта на самом верху можно будет построить в космосе стартовую площадку для космических аппаратов, отправляющихся к Луне, Марсу, Венере и астероидам. Оригинально решена проблема подачи энергии к самим лифтовым “кабинам”: трос будет покрыт солнечными батареями либо кабины будут оснащены небольшими фотоэлектрическими панелями, которые с Земли будут подсвечивать мощные лазеры.

Ученые предлагают разместить наземную базу космического лифта в океане, в экваториальных водах Тихого океана, за сотни километров от маршрутов коммерческих авиарейсов. Известно, что ураганы никогда не пересекают экватор и здесь почти не бывает молний, что обеспечит лифту дополнительную защиту.

Космический лифт описан в произведениях Циолковского, а также писателя-фантаста Артура Кларка, а проект строительства такого лифта был разработан ленинградским инженером Юрием Арцутановым в 1960 году. Долгие годы активным пропагандистом идеи космического лифта был астраханский ученый Г.Поляков.

Но до сих пор никто не мог предложить материал такой легкости и прочности, чтобы из него можно было бы сделать космический трос. До недавнего времени самым прочным материалом являлась сталь. Но изготовить из стали трос длиной в несколько тысяч километров не представляется возможным, так как даже упрощенные расчеты говорят о том, что стальной трос необходимой прочности рухнул бы под собственной тяжестью уже на высоте в 50 км.

Однако с развитием нанотехнологий появилась реальная возможность изготовить трос с нужными характеристиками на основе волокон из сверхпрочных и сверхлегких углеродных нанотрубок. Пока никому не удалось сделать даже метровый кабель из нанотрубок, но, по уверениям разработчиков проекта, технологии производства нанотрубок совершенствуются ежедневно, так что подобный кабель вполне может быть сделан уже через несколько лет.

Главный элемент подъемника — трос, один конец которого крепится на поверхности Земли, а другой теряется в космосе на высоте около 100 тыс. км. Этот трос будет не просто “болтаться” в космическом пространстве, а будет натянут, как струна, благодаря воздействию двух разнонаправленных сил: центробежной и центростремительной.

Чтобы понять их природу, представьте, что вы привязали к веревке какой-нибудь предмет и начали его раскручивать. Как только он приобретет определенную скорость, веревка натянется, потому, что на предмет действует центробежная сила, а на саму веревку — сила центростремительная, которая ее и натягивает. Нечто подобное произойдет и с поднятым в космос тросом. Любой объект на его верхнем конце или даже сам свободный конец будет вращаться, подобно искусственному спутнику нашей планеты, только “привязанному” особой “веревкой” к земной поверхности.

Уравновешение сил будет происходить, когда центр масс гигантского каната находится на высоте 36 тысяч километров, то есть на так называемой геостационарной орбите. Именно там искусственные спутники висят неподвижно над Землей, совершая вместе с ней полный оборот за 24 часа. В этом случае он будет не только натянут, но и сможет постоянно занимать строго определенное положение — вертикально к земному горизонту, точно по направлению к центру нашей планеты.



Рис 24. Космический лифт в представлении художника Пэта Ролинга*

Для начала строительства космического лифта необходимо будет совершить пару полетов на космических челноках. Они и специальная платформа со своим автономным двигателем доставят 20 тонн троса на геостационарную орбиту. Затем предполагается опустить на Землю один конец троса и закрепить где-то в экваториальной зоне Тихого океана на платформе, похожей на нынешнюю стартовую площадку для запуска ракет.

Затем рассчитывают пустить по тросу специальные подъемники, которые будут добавлять все новые и новые слои нанотрубочного покрытия к тросу, наращивая его прочность. Этот процесс должен занять пару-тройку лет - и первый космический лифт будет готов.

* Перепечатано с <http://flightprojects.msfc.nasa.gov>

Любопытные совпадения: в 1979 году писатель-фантаст Артур Кларк в своем романе “Фонтаны рая” выдвинул идею “космического лифта” и предложил заменить сталь неким сверхпрочным “псевдоодномерным алмазным кристаллом”, который и стал основным строительным материалом для данного приспособления. Самое интересное, что Кларк почти угадал. Нынешний этап интереса к проекту строительства космического лифта связан именно с углеродными кристаллами — нанотрубками, обладающими замечательными свойствами, с которыми мы уже познакомились.

И что совсем уж удивительно: физика - одного из участников разработки космического лифта - зовут Рон Морган. Морганом же звали и персонажа романа Артура Кларка - инженера, построившего космический лифт!

Морган настоящий прогнозирует, что первый лифт в космос человечество сможет построить всего через 12-15 лет, что он будет способен поднимать до 20 тонн грузов каждые 3 дня, а его предварительная стоимость составит 10 миллиардов долларов.

Политика

Нанотехнологии имеют большое военное будущее. На военные наноисследования в одном только 2003 году США потратили \$201 млн. В военной сфере также активны Великобритания и Швеция. Как предполагается, в 2008 году будут представлены первые боевые наномеханизмы. Военные исследования в мире ведутся в шести основных сферах: технологии создания и противодействия “невидимости”, энергетические ресурсы, самовосстанавливающиеся системы (например, позволяющие автоматически чинить поврежденную поверхность танка или самолета), связь, а также устройства обнаружения химических и биологических загрязнений.

Производители уже получают первые заказы на нанороботы. К примеру, армия США заказала компании Friction Free Technologies разработку военной формы будущего. Она должна изготовить носки с использованием нанотехнологий, которые должны будут выводить пот, но сохранять ноги в тепле, а носки в сухости.

Чрезвычайно интересен проект исследовательской организации “Институт нанотехнологий для солдат” при Массачусе-

тском технологическом институте. На предстоящие пять лет институт получил грант ВС США в размере \$50 млн. на разработку материалов для солдатской формы средствами нанотехнологий. В проекте принимают участие около 150 сотрудников, включая 35 профессоров Массачусетского института, а также военные специалисты.

Униформа будущего “наносолдата” должна уметь отражать пули, самостоятельно лечить раны своего хозяина, повышать его способности, делать его незаметным и позволять ходить по отвесным стенам. В отличие от средневековых аналогов “нанокольчуга” будущего, произведенная при помощи молекулярных технологий, будет легкой и удобной.

Для защиты от поражения огнестрельным оружием может быть создан так называемый *экзоскелет* - специальный костюм, повышающий свою плотность в месте удара пули.

Еще одна идея - вплетать в ткань волокна органических полимеров, отражающие свойства которых зависят от механических напряжений либо электрических полей. Это сделает солдата “невидимым” для стандартных систем обнаружения, использующих различные виды излучения, поскольку в сочетании с массивом микромеханических датчиков эти нановолокна смогут воссоздавать прохождение света таким образом, как если бы солдата не было в данном месте.

При этом солдатам не обязательно носить на себе еще и электрогенератор, чтобы обеспечить электропитание собственного обмундирования - искусственные мускулы, разрабатываемые в настоящее время в Массачусетском технологическом институте, позволяют преобразовывать механическую энергию движения и накапливать её наподобие аккумулятора. Солдат сможет сначала поднакопить запасы энергии в ткани, а затем использовать ее, чтобы перепрыгнуть через высоченную стену. Прямо как в компьютерных играх - чтобы высоко и далеко прыгнуть, надо какое-то время просто идти.

Экология

Нанотехнологии способны также стабилизировать экологическую обстановку. Новые виды промышленности не будут производить отходов, отравляющих планету, а нанороботы смогут уничтожить последствия старых загрязнений — нанотехни-

ка восстановит озоновый слой, очистит от загрязнений почву, реки, атмосферу, океаны, демонтирует заводы, плотины, рудники, запечатает радиоактивные отходы в вечные самовосстанавливающиеся контейнеры. Более того, эксперименты с образцами почв, пораженных радиационно и химически (в том числе и чернобильских), показали возможность восстановления их с помощью нанопрепаратов на основе бактериородопсина до естественного состояния микрофлоры и плодородности за несколько месяцев!

Следы промышленной деятельности почти исчезнут с лица Земли, сократятся сельскохозяйственные угодья, большую часть планеты покроют сады и естественные экосистемы...

С помощью механоэлектрических нанопреобразователей можно будет преобразовывать любые виды энергии с большим КПД и создавать эффективные устройства для получения электроэнергии из солнечного излучения с КПД около 90%. Утилизация отходов и глобальный контроль за энергосистемами позволит существенно увеличить сырьевые запасы человечества.

Опасности, которыми не следует пренебрегать

Восторженно предвкушая те положительные изменения, которые принесет с собой промышленная революция, не будем столь наивны, чтобы не задуматься о возможных опасностях и проблемах. Многие крупные ученые современности не зря пытаются привлечь внимание не только к позитивным перспективам будущего, но и к возможным негативным последствиям.

Билл Джой, сооснователь и ведущий ученый Sun Microsystems в Пало Альто, штат Калифорния, утверждает, что исследования в области нанотехнологий и других областях должны быть остановлены до того, как это навредит человечеству. Его опасения поддержала еще одна группа нанотехнологов, выпустив так называемый “Foresight Guidelines” — “руководящие линии Института предвидения”. Как и Джой, они считают, что стремительный рост нанотехнологий выходит из-под контроля. Но, вместо простого запрета исследований в этой области они предложили установить правительственный контроль над опасными исследованиями. Такой надзор, утверждают они, сможет предотвратить случайную катастрофу.

Страхи перед нанотехнологиями начали появляться с 1986 года, после выхода в свет “Машин созидания” Дрекслера, где он не только нарисовал утопическую картину нанотехнологи-

ческого будущего, но и затронул “обратную сторону” этой медали. Одну из проблем, которая представлялась ему наиболее серьезной, он назвал “*проблемой серой слизи*” (“grey goo problem”). Опасность серой слизи в том, что нанометровые ассемблеры, вышедшие из-под контроля в результате случайной или намеренной порчи систем управления, могут начать реплицировать сами себя до бесконечности, потребляя в качестве строительного материала все на своем пути, включая леса, заводы, домашних животных и людей. Расчёт показывает, что теоретически такой ассемблер со своим потомством окажется в состоянии переработать всю биомассу Земли за считанные часы (правда, без учёта времени на перемещение по поверхности планеты).

Предварительный анализ показывает, что ассемблер может быть сделан достаточно надёжным, чтобы вероятность появления самовоспроизводящейся ошибки оказалась пренебрежимо малой. Однако неразумно полностью исключить опасность преднамеренного программирования ассемблера террористом или хулиганом, подобным современным создателям компьютерных вирусов.

В своих опасениях Джой опирается на то, что гипотетические части футуристических микромашин уже выпущены и встают на свои места. “Один из компонентов ассемблера — электронное устройство молекулярных размеров, — говорит Джой, — сейчас уже реализовано”.

Далее он узнал, что саморепликация уже давно работает вне биологических систем: исследователи показали, что простые пептидные молекулы могут провоцировать свою собственную репродукцию. “Вот почему самореплицирующиеся машины становятся все более реальными, — заключил Джой. — И от их реальности веет угрозой”.

Другие ученые опровергают страхи перед “серой слизью”, говоря о принципиальной невозможности преодолеть все практические трудности в создании подобных механизмов. “Все это высосано из пальца”, — утверждает Блок. Будет ошибкой отталкиваться от того, что раз простые молекулы имеют способность к репродукции, то инженеры смогут построить сложные наномашин, умеющие делать то же самое. Что касается биологических систем, то они, конечно, способны к репликации, но, во-первых, они далеко не нанометровых размеров, а во-вторых, фантастически сложны по своей структуре, поскольку включают в

себя отдельные системы для хранения и копирования генной информации, системы энергопроизводства, синтеза белков и др.

“Даже природа не сделала нанометрической структуры, способной к репликации”, - замечает Виола Вогель, наночеловек Университета Вашингтона, штат Сиэтл.

Тем не менее, возможны другие сферы злоупотребления достижениями нанотехнологий. На одной из встреч, посвященных обсуждению дальнейшего развития нанотехнологий, представители научного общества, исследовательских центров и государственных агентств были собраны для обсуждения проблем в этой области, вызывающих беспокойство. Особенно остро вставали вопросы следующего типа:

- Способна ли образовательная система обучить достаточно нанотехнологических специалистов?
- Может ли прогресс нанотехнологий подорвать традиционный бизнес и оставить тысячи людей без работы?
- Может ли снижение стоимости продукции благодаря нанотехнологиям и молекулярной биологии сделать их легкодоступными для террористов, чтобы разработать опасные микроорганизмы?
- Каким будет эффект от вдыхания некоторых веществ, которые в настоящее время формируются в молекулярном масштабе? Исследования показали, что та же нанотрубка, представляющая собой соединение сверхтонких игл, имеет структуру, похожую на асбест, а этот материал при вдыхании вызывает повреждение легких.
- Что случится, если в окружающую среду будет выпущено большое количества наноматериала, начиная от компьютерных чипов и заканчивая краской для самолетов? Не будут ли наноматериалы вызывать аллергию?
- Когда Майкл Фарадей создавал коллоидную суспензию золота, состоящую из крошечных частиц металла, он увидел, что ее цвет менялся на фиолетовый. Значение этого открытия очень важно для нанотехнологии. Не окажутся ли материалы, считавшиеся безопасными в обычной форме, опасными для здоровья, когда их используют в форме наночастиц? Теоретически они могут оказаться более химически активными.
- Не приведет ли вторжение наночастиц в наши тела к непредсказуемым последствиям? Они могут быть меньше белков. Что случится, если наночастицы вызовут пересворачива-

ние белка? Проблемы со сворачиванием белка могут вызвать, например, болезнь Альцгеймера.

Эти и другие вопросы, стоящие сегодня перед исследователями, действительно очень актуальны и важны. В бешеной гонке нанотехнологий ученые должны взять на себя всю полноту ответственности за жизнь и здоровье других людей, чтобы не оказаться беззаботными фанатиками, совершившими “революцию” только лишь “во имя революции”, не утруждая себя размышлениями о возможных трагических последствиях и катастрофах.

По всем этим причинам исследование наноэффектов новых технологий будет требовать принципиально новых методов и междисциплинарного подхода.

Нано на стыке наук

Если достижения ушедшего века позволяют говорить, что XX век был веком узкоспециализированных профессионалов, то сегодня, поступая в то или иное учебное заведение, молодой человек не может быть абсолютно уверен, что профиль, на который он собирается потратить 5 лет своей жизни, лет через 5-10 не окажется никому не нужным “старьем” в свете современных технологий.

“Так как же быть?”, - спросите вы. Неужели традиционное профессиональное образование может обесцениться настолько, что станет не актуальным на рынке труда?

Конечно, нет, но на современном этапе профессионализма в какой-то узкоспециализированной профессии будет явно не хватать. Как вы, наверное, уже поняли, нанотехнологии - это не просто отдельная часть знаний, это масштабная, всесторонняя область исследований. Ее достижения касаются всех сфер жизнедеятельности человека. И поэтому лидирующее положение в будущем, естественно, будут занимать люди, обладающие фундаментальным образованием, основанным на междисциплинарном подходе.

Вероятно, постепенно эта тенденция будет распространяться и на вузовское образование, побуждая составителей учебных программ объединять множество фундаментальных дисциплин в одном курсе. Но зачем же ждать, когда это сделают академики из Минобразования, когда у нас сегодня есть все возможности самим развиваться в разных направлениях, включая не только естественнонаучный профиль, но и гуманитарный?

К сожалению, современная система нацелена на формирование узкоспециализированных "винтиков", а не самостоятельно мыслящих и гармонично развитых людей. Нередко можно встретить человека, прекрасно разбирающегося, например, в программировании, но при этом совершенно не знакомого с достижениями современной биологии, или наоборот. Поэтому, надеюсь, читатель простит меня за небольшой "ликбез" по различным направлениям современной науки и техники.

Ярким примером междисциплинарного мышления, достигшего выдающихся результатов в различных областях науки и искусства, являлся гений Леонардо да Винчи. Его нельзя называть только ученым, только художником, только архитектором или только инженером. Леонардо да Винчи своим примером показал возможность плодотворного сочетания различных знаний и умений в одном человеке, что бы там ни утверждали адепты "узкоспециализированного подхода".

Кстати, если говорить о связи нанотехнологий с фундаментальными науками, то можно сказать, что практически любой предмет, из тех, что изучаются в школе, так или иначе будет связан с технологиями будущего.

Самой очевидной представляется связь "нано" с физикой, химией и биологией. По-видимому, именно эти науки получают наибольший толчок к развитию в связи с приближающейся нанотехнической революцией.

Но не только. Без развития информационных систем (особенно таких областей информатики, как искусственный интеллект, компьютерное моделирование, робототехника и т.д.), фундаментальной базой которых является математический аппарат, невозможно проектирование и создание ассемблеров и других устройств наноэлектроники.

Эколог будущего также не останется без работы. Напротив, прогресс в сфере нанотехнологий, будет ставить перед ним все больше вопросов и задач: от автоматических наносистем охраны окружающей среды до сверхточного прогнозирования и борьбы с экологическим загрязнением и природными катаклизмами.

Бурное освоение космоса может дать совершенно новый материал для астрономических исследований и гипотез.

Историки и обществоведы будут изучать характерные черты и проблемы "нанотехнологического общества" как

следующего за “информационным” в цепочке общественно-исторических формаций.

Основы безопасности жизнедеятельности, возможно, станут одним из актуальнейших направлений будущих исследований.

Психологи и социологи будут решать множество вопросов, связанных с адаптацией всех “неподготовленных” к неожиданным последствиям нанореволюции.

Взросшие требования к образованию, потребность в новых методах и концепциях обучения потребует от будущих учителей новаторства и активности.

Перед философами, экономистами и политологами встанет множество новых вопросов, требующих нетрадиционных решений в условиях нанотехнического прогресса.

Музыка, изобразительное искусство, литература, балет, театр и все, что относится к выражению творческого потенциала человека, всегда стояли несколько особняком от научно-технического прогресса. С одной стороны, это говорит о том, что стремление человека к прекрасному, возвышенному - извечно и что никакие достижения научно-технического прогресса не в силах уменьшить в глазах человека той ценности и притягательности, которой обладают такие нравственные категории, как доброта, красота, истина, благородство, честность, творчество, любовь.

С другой стороны, во все времена искусство пыталось отразить современное состояние общества, не отставая от научно-технического прогресса в своём индивидуальном поиске новых средств и форм выражения. Так, в Средние века отражение теологической морали, господствовавшей во всех сферах общественной жизни, можно увидеть во всех образцах культуры того времени, будь то живопись, музыка или литература.

Эпоха Возрождения, провозгласившая человека венцом творения и воспевавшая его божественное происхождение в проявлении чисто “человеческих” качеств, также оставила немало свидетельств такого мировоззрения в произведениях искусства того времени.

Кинематограф, литература и поэзия Советского периода нашей с вами истории также проникнуты идеями и лозунгами социализма и коммунизма.

Опять же, современное искусство позиционирует себя как “искусство новых технологий” и использует все последние дос-

тижения компьютерной техники. Медиа-арт, веб-арт, компьютерная графика, голография — наиболее актуальные на сегодняшний день направления. Иными словами, искусство шествует вслед за прогрессом, не желая оставаться “за бортом” и стремясь всегда адекватно отражать окружающую нас действительность. Таким образом, перспективы развития науки и техники также определяют пути искусства.

Кстати, в 2001 году японские учёные, используя передовые лазерные технологии, создали самую маленькую в мире скульптуру. Она изображает разъярённого быка, разворачивающегося для атаки. Размеры “микробыка” впечатляют: 10 мкм в длину и 7 мкм в высоту

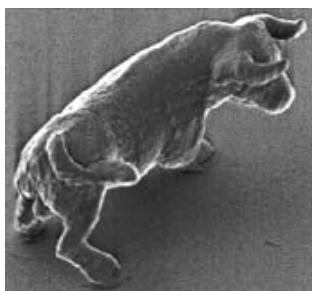


Рис 25. Микроскульптура

— не больше, чем у красных кровяных телец человеческой крови. Увидеть его можно только в сверхмощный микроскоп. При “высечении” скульптуры использовались два лазера, которые работали в инфракрасном диапазоне и по специальной программе обрабатывали заготовку из полимера, затвердевавшего только под

воздействием лазерного луча. Почему бы этому бычку не положить начало новому направлению в области наноскульптуры?

И кто знает, может быть не за горами тот день, когда “Битлз” нового поколения поразят весь мир новым музыкальным “нано”-течением...

Наноиндустрия в России и за рубежом

Считается, что с 2000 года началась эра гибридной наноэлектроники. В настоящее время ежегодно проводятся сотни конференций, посвящённых различным аспектам нанотехнологии. Опубликовано сотни тысяч статей и монографий, созданы специальные сайты в Интернете, происходит интенсивная подготовка к созданию наноэлектронных элементов и различных функциональных устройств: от простейших до нанокomпьютеров.

Кроме наноэлектроники, на основе нанотехнологии наиболее активно развиваются: микро- и наноробототехника, позволяющая создать миниатюрные исполнительные механизмы с быстродействием в миллионы раз выше существующих и более сложные робототехнические системы с распределёнными механическими устройствами: интегральная нанооптоэлектроника, позволяющая создать солнечные элементы с КПД в 4 раза

больше существующих, светодиоды и лазеры с перестраиваемым от инфракрасного до ультрафиолетового спектром излучения, высокоэффективные транспаранты и функциональные оптические приборы.

Осознание стратегической важности нанотехнологий привело к тому, что в разных странах на уровне правительств и крупнейших фирм созданы и успешно выполняются программы работ по нанотехнологиям.

В Японии программа работ по нанотехнологии получила высший государственный приоритет “Огато”. Данный проект спонсирует не только государство, но и дополнительно около 60 частных фирм. Кроме данного проекта, в Японии финансировалось около дюжины проектов, посвящённых различным аспектам нанотехнологии - квантовым волнам, флуктуациям в квантовых системах, и др. Крупнейшими проектами являлись “Atom Craft project” и “Aono project”. Внимание, уделяемое государством, было не случайным - ещё 10 лет назад в стране присуждались золотые медали за лучшие достижения в области нанотехнологии. Основные разработки проводились в центре перспективных технологий “Цукуба”.

В Европе более чем в 40 лабораториях проводятся нанотехнологические исследования и разработки, финансируемые как по государственным, так и по международным программам (программа НАТО по нанотехнологии).

Кроме того, программы работ по нанотехнологии приобрели статус государственных программ даже в сравнительно небольших странах типа Голландии и Финляндии.

В США отставание от Японии в финансировании работ по нанотехнологии стало предметом государственного обсуждения, в результате которого объём финансирования одних только фундаментальных исследований каждый год стал удваиваться.

С целью форсирования работ именно в данном направлении в 2000 году по решению правительства США работы по нанотехнологии получили высший приоритет. В результате была создана Национальная нанотехнологическая инициатива, а при президенте организован специальный комитет, координирующий работы по нанотехнологии в 12 крупнейших отраслях промышленности и вооружённых силах.

Одной из целей программы является создание на основе нанотехнологии вычислительных устройств с производительностью в миллион раз выше существующих процессоров Pentium. Кроме того, в отличие от финансирования работ в области фундаментальных исследований, объём финансирования работ по нанотехнологии в фирмах многократно выше. Например, только в фирме Intel в прошлом году на разработки в области нанотехнологий было потрачено более 1 млрд. долл.

В 2005 году мы насчитываем уже более 50 стран, ведущих исследования и разработки в нанотехнологии, включая Южно-Африканскую Республику.

В России фундаментальные исследования по нанотехнологии проводятся по нескольким программам. Наиболее крупные из них: программа “Физика наноструктур”, руководимая академиком Ж.И. Алферовым, и “Перспективные технологии и устройства в микро- и наноэлектронике”, руководимая академиком К.А. Валиевым.

По последним данным, о состоянии российской наноиндустрии можно сказать следующее:

Достигнуты высокие результаты в области создания нанотехнологических приборов и установок. Были развиты основы микромеханики и разработаны сканирующие зондовые, туннельные и атомно-силовые микроскопы (концерн “Наноиндустрия”, фирма НТ-МДТ, НТЕ, НИИФП им. Ф.В.Лукина и др.).

Отечественные ученые создали собственные теоретические и экспериментальные заделы в области твердотельных элементов квантовых компьютеров, квантовой связи, квантовой криптографии. Технологии атомного масштаба (0,5-0,1 нм) открывают абсолютно новые перспективы в этой сфере.

Разрабатываются новые методы получения наноматериалов: синтез и компактирование ультрадисперсных порошков, получение наноматериалов методами интенсивной пластической деформации, кристаллизация из аморфного состояния, пленочная нанотехнология.

Проводятся материаловедческие работы в области “интеллектуальных материалов”, ультрадисперсного состояния и супрамолекулярной химии, коллоидных систем, а также разрабатываются теоретические принципы строения частиц с наноразмерами, учитывающие размер как физико-химический фактор.

В области медицины, генетики и экологии также ведутся исследования и разработки наносистем. Созданы образцы так называемых “биочипов”, разработаны технологии выделения мономолекулярных кристаллических упорядоченных белковых структур бактериального происхождения и их использования в области микроэлектроники, микро- и наномеханических устройств, биосенсоров, биотехнологии.

Результаты анализа свидетельствуют, что отечественные разработки находятся на уровне мировых достижений, но при очевидных успехах российской науки в области нанотехнологических исследований наша страна пока не может вплотную заняться их массовым промышленным внедрением. Главная проблема — традиционный недостаток финансирования: в настоящее время в России не существует целевой государственной программы финансирования работ в области нанотехнологий.

Однако все же выдаются гранты на прикладные исследования в нанотехнологии по отдельным международным программам, а также выделяются средства отдельными передовыми предприятиями.

Положительным фактором в этом вопросе является высокий кадровый и научно-технологический потенциал России, базирующийся на её известных интеллектуальных преимуществах. Российское образование высоко оценивается зарубежными предприятиями, и много русских специалистов работает в нанотехнических лабораториях по всему миру.

Итак, повторим еще раз!

- Согласно закону Мура, быстродействие компьютеров удваивается каждые 18 месяцев. Чтобы эта тенденция могла сохраняться в дальнейшем, необходимо, чтобы размеры транзисторов преодолели нанометровый рубеж.

- **Нанотехнологии** - это технологии манипулирования веществом на уровне атомов и молекул с целью получения продуктов с наперед заданной структурой.

- Толчком к развитию нанотехнологий послужила лекция Ричарда Фейнмана “Там внизу много места”, в которой он научно доказывает, что с точки зрения физики нет никаких препятствий к тому, чтобы создавать вещи прямо из атомов.

- Для эффективного манипулирования атомами Эрик Дрекслер ввел понятие **ассемблера** - молекулярной наномашинки, способной к саморепликации, которая может построить любую молекулярную структуру. Ассемблеры будут представлять собой синтез живых и технических систем.

- Пример эффективного природного ассемблера - механизм синтеза белка рибосомой.
- В настоящий момент главным оборудованием нанотехнологий являются сканирующие зондовые микроскопы, наиболее популярны среди которых *туннельный* и *атомно-силовой* микроскопы.
- Основным элементом зондовых микроскопов является зонд (кантилевер) - сверхтонкая игла, позволяющая сканировать поверхность с атомарным разрешением.
- Работа СТМ основана на измерении колебаний туннельного тока, возникающего между зондом и поверхностью образца на расстоянии менее 0,5 нм. При изменении расстояния всего на 0,1 нм туннельный ток изменяется в 10 раз. Такие перепады позволяют с высокой точностью судить о рельефе поверхности на уровне атомов.
- СТМ может работать в двух основных режимах:
 - а) постоянной высоты (острие иглы перемещается над образцом, а ток меняется)
 - б) постоянного тока (ток поддерживается постоянным за счет перемещения иглы).
- В отличие от туннельного, атомно-силовой микроскоп позволяет исследовать не только проводящие, но и диэлектрические вещества (в том числе и биообъекты). Работа АСМ основана на измерении сил межмолекулярного взаимодействия, возникающих между зондом и поверхностью на малых расстояниях (порядка ангстрема).
- В 1985 году Р. Керл, Г.Крото и Р. Смолли открыли третье аллотропное состояние углерода - *фуллерен*, обладающее удивительными свойствами, - за что были удостоены Нобелевской премии. Молекула фуллерена имеет форму футбольного мяча, и состоит из правильных пяти- и шестиугольников. Свое название фуллерен получил в честь архитектора Бакминстера Фуллера, впервые придумавшего использовать подобные структуры в строительстве.
- В 1991 году Сумио Иидзума открыл *нанотрубки* - цилиндрические углеродные образования, поразившие ученых физико-химическими свойствами. Нанотрубки бывают однослойные и многослойные, они гораздо легче дерева и в десятки раз прочнее стали, могут быть как проводниками тока, так и диэлектриками, обладают капиллярным эффектом и могут использоваться во многих областях науки и техники.
- Чем выше дисперсность частицы, тем больше площадь ее контакта с окружающей средой, что значительно влияет на химические и физические свойства данного вещества.

Глава 2. Законы квантового мира

“Раз поведение атомов так не похоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физiku - всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие ученые не понимают его настолько, как им хотелось бы ...”

Ричард Фейнман

Как возникла квантовая физика

Квантовая физика (механика) как научная теория оформилась в начале XX века. Она ставит перед собой практически те же задачи, что и классическая механика Ньютона, то есть устанавливает способы описания и законы движения физических тел в пространстве и времени. Различие заключается в том, что в качестве объектов изучения выступают не макроскопические тела, как в классической физике, а субмикронные (элементарные) частицы из мира атомов и молекул.

Говоря об элементарных частицах, нельзя не упомянуть древнегреческого философа Демокрита, который полагал, что атомы — это неделимые частицы материи, различающиеся только формой, величиной и положением. Он считал, что существует всего четыре вида таких атомов: атомы земли, воды, воздуха и огня.

Химия XIX века доказала существование гораздо большего разнообразия атомов, а открытие электрона в 1897 году положило конец мифу об их неделимости. Позднее кроме электрона были открыты и другие субатомные частицы — протон, нейтрон, мезон, пион и т.д. Но при этом оказалось, что взаимодействие между элементарными частицами происходит под действием каких-то доселе неизвестных сил, многократно превышающих все изученные к тому времени.

Таким образом, в начале XX столетия выяснилось, что классическая механика не способна адекватно описывать законы взаимодействия микрочастиц, движущихся в чрезвычайно малом объеме (внутри атома), а необходимость установления этих законов и привело к рождению “новой” физики, получившей название квантовой.

Но ведь физика — это наука о природе, ведь это видно даже из ее названия (“*physis*” — в переводе с греческого значит “природа”). И как единая природа, так должна быть единой и физи-

ка, изучающая закономерности ее проявлений. Поэтому исторически возникшее разделение дисциплины на “классическую” и “квантовую” представляется нам не совсем правильным. Тем не менее, иногда это оправдано — ведь способы решения конкретной физической задачи определяются видом тех законов и формул, которыми мы пользуемся, а они существенно различаются в классической и квантовой физике.

“**Квант**” в переводе с латинского означает “наименьшее количество”, на которое может измениться дискретная (прерывистая) физическая величина. Квантом также называют частицу-носитель каких-либо свойств (например, фотон — это квант электромагнитного поля).

Переход от классических представлений к квантовым требует от человека определенной психологической перестройки, ибо многие понятия, прочно устоявшиеся в нашем классическом мире, оказываются “вне игры” в мире квантовом.

Например, мы привыкли, что в классической физике положение тела вполне конкретно задается в трехмерном пространстве, а для описания его движения (т.е. изменения положения со временем) используется понятие *траектории*. При этом, каким бы сложным ни было движение тела в классической механике: равномерным, вращательным, колебательным и т.д., — мы, зная уравнение его траектории, всегда можем предсказать положение тела в последующий момент времени. Причем, говоря о том, что тело движется по некоторой траектории, мы предполагаем, что оно не может в один и тот же момент перемещаться в пространстве еще каким-нибудь образом (согласитесь, сложно представить автомобиль или самолет, движущийся одновременно в двух направлениях).

А вот в квантовой механике мы уже не можем оперировать понятием единственно возможной траектории частицы вообще, поскольку современный уровень развития знаний о законах квантового мира пока не позволяет нам однозначно и точно описывать движение элементарных частиц.

Да что там траектория! Вот если в классике все очевидно — бросили вы деревяшку (*частицу*) в пруд, а по поверхности пруда побежали *волны*, — то в микромире сам квантовый объект умудряется обладать одновременно как волновыми свойствами, так и свойствами частицы. Вспомните хотя бы эффект тун-

нелирования электронов сквозь потенциальный барьер, с которым мы познакомились в первой главе при изучении СТМ. Если представить себе электрон в виде микроскопического мячика, движущегося в сторону высокого потенциального “забора”, то нельзя со стопроцентной уверенностью утверждать, что если его собственная энергия меньше потенциальной энергии барьера, то он обязательно отскочит от него (как это сделал бы обычный мячик в нашем представлении). Факт остается фактом: некоторые электроны все же “проскакивают” сквозь барьер, словно в “заборе” для них имеется специальный “туннель”, проявляя таким образом свои волновые качества.

В квантовой физике такие “чудеса в решете” строго доказываются и точно описываются, хотя с классической точки зрения выглядят абсурдом. Тем не менее, эти “абсурдные” квантовые эффекты уже десятки лет исправно работают в различных приборах, а туннельные микроскопы с 1985 года весьма продуктивно служат науке.

Сразу обращаем ваше внимание на то, что представлять электрон в виде круглого мячика не совсем правильно, поскольку на самом деле определить его истинную форму физика — пока — неспособна. Поэтому следует понимать, что аналогия “электрон-мячик” — это лишь удобная мысленная модель, наглядное допущение, оправданное в некоторых случаях. Подробнее о проблеме определения природы элементарных частиц мы поговорим чуть позже.

И все-таки, в каком мире мы живем — квантовом или классическом? Повторимся: наш мир един, как его ни назови. А вот какими законами пользоваться — квантовыми или классическими — зависит от конкретной задачи и необходимой точности ее решения.

Когда же, а точнее — с чего началось разделение физической науки на классическую и квантовую? Можно сказать, что первопричиной этому было расхождение в понимании природы света.

Первые научные воззрения на природу света принадлежат великим ученым XVII века — Ньютону и Гюйгенсу. Они придерживались противоположных взглядов: Ньютон считал, что свет представляет собой поток частиц (корпускул). Гюйгенс полагал, что свет — это волновой процесс. По Ньютону получалось, что чем больше оптическая плотность среды, тем больше в ней скорость распространения света, по Гюйгенсу — наоборот. Великих ученых мог рассудить только опыт, однако в XVII веке необходимая для его проведения техника была недоступна. Поэтому вплоть до XIX века (когда ученым удалось измерить скорость света

в различных оптических средах) свет считали потоком особых световых частиц. Таким образом, сначала “победила” теория Ньютона, чей непререкаемый авторитет попросту “задавил” идеи Гюйгенса.

Но в начале XIX века Академия наук Франции объявила конкурс на лучшую работу по теории света, на котором Огюст Френель представил свою работу по интерференции и дифракции света, согласно которой свет представляет собой волновой процесс.

Когда распространяющийся плоский фронт волн на поверхности воды достигает перегородки, в которой есть узкая щель, волны выходят из нее кругами. Это явление называется *дифракцией*. Дифракция присуща не только обычным волнам, но и всем видам излучения, включая радиоволны, световые волны и рентгеновские лучи. При наличии в перегородке нескольких щелей каждая из них оказывается источником круговых или сферических волн. Эти волны *интерферируют* (взаимодействуют) друг с другом, взаимно уничтожаясь в одних местах и усиливаясь в других.

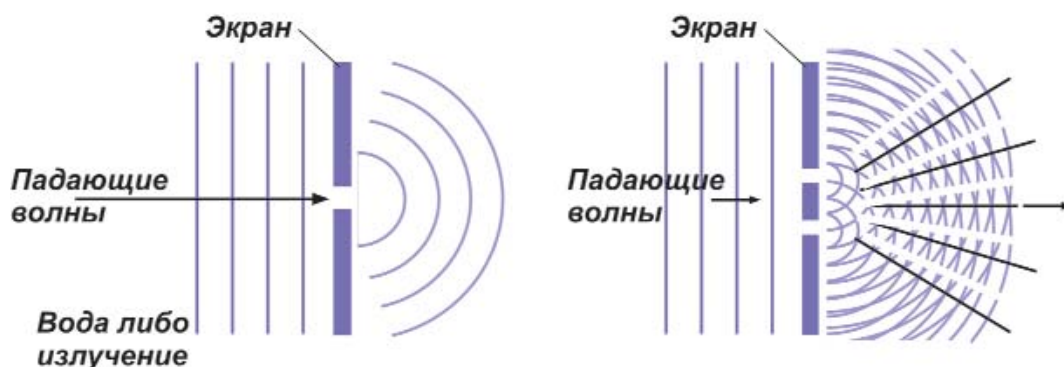


Рис 26. Явления дифракции и интерференции

Надеемся, что из курса школьной физики читатель хорошо помнит те характерные дифракционные и интерференционные картины, которые свидетельствуют о способности волн огибать препятствия, соразмерные длине волны. Поэтому мы не будем подробно останавливаться на опытах Френеля и продолжим рассказ.

В ходе дальнейшего обсуждения президент Академии Пуассон заметил Френелю, что из его теории следуют “нелепые выводы”. Например, если осветить тонкую иголку пучком параллельных лучей, то в том месте, где должна быть геометрическая тень от иголки, по теории Френеля должна быть светлая полоса. Присутствующий на заседании ученый секретарь Академии Араго тут же организовал проведение этого нехитрого экспери-

мента, и маститые академики получили возможность убедиться в правоте Френеля (кстати говоря, это был один из редчайших случаев в науке, когда критикуемый автор доказал свою правоту, как говорится, “не отходя от кассы”). Появившаяся затем *теория электромагнетизма Максвелла*, из которой следовало существование в природе электромагнитных волн, и экспериментальное обнаружение этих волн Герцем, доказавшим, что их свойства подобны свойствам света, окончательно убедили ученый мир в том, что свет — это электромагнитная волна.

Казалось бы, вопрос можно было считать закрытым — Ньютон ошибался, как и многие. Но дело в том, что у великих и ошибки великие... В конце XIX века эксперимент установил *тепловое излучение* абсолютно черного тела.

Как известно, обычный свет (видимое излучение) представляет собой совокупность электромагнитных волн разной длины ($\sim 400\text{--}760\text{ нм}$), воспринимаемых человеческим глазом. Об этом наглядно свидетельствует радуга — природная демонстрация разложения белого цвета на “составляющие”. Ни для кого не секрет, что наш глаз воспринимает различные цвета не потому, что объекты обладают некоторым абстрактным свойством “цвет”, а потому, что они способны *поглощать* и *отражать* электромагнитные волны некоторой длины. Так, мы воспринимаем траву и листья деревьев зелеными не потому, что они “зеленые сами по себе”, а потому, что они поглощают все электромагнитные волны, кроме тех, которые соответствует зеленой части спектра. Если бы было иначе, мы бы могли различать цвета и в темноте, чего не наблюдается (недаром возникла поговорка “ночью все кошки серы”).

Абсолютно черным телом называют тело, способное полностью поглощать весь падающий на него поток излучения, независимо от длины его волны.

Абсолютно черное тело — это, конечно, теоретическая абстракция, но наиболее близким приближением к нему является сажа или платиновая чернь. Суть экспериментов по тепловому излучению состоит в следующем: в качестве абсолютно черного тела берется небольшой черный из-

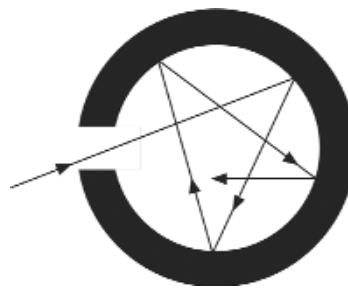


Рис 27. Схематическое изображение абсолютно черного тела

нутри сосуда с отверстием. Луч света, попавший в такой сосуд, через некоторое время полностью поглощается стенками сосуда, нагревая его.

Тепловое излучение можно почувствовать не только прогуливаясь под летним солнышком, но и приблизив руку к горячему, но совершенно не светящемуся утюгу. Вслед за экспериментальным обнаружением теплового излучения последовали многочисленные попытки его теоретического обоснования, в связи с чем были построены различные теоретические модели этого явления.

Наиболее адекватной казалась теория теплового излучения, предложенная Рэлеем и Джинсом. При выводе своих формул они действовали *очень строго*, не делая никаких упрощений, то есть опирались только на классические столпы физической науки, утверждавшие, что свет — это электромагнитная волна. В результате сравнения экспериментальных данных с уравнениями, выведенными в рамках такого классического подхода, обнаружилось, что теория Рэлея-Джинса описывает правильно лишь спектр излучения для самых малых частот, а в целом слишком отличается от реальных показателей.

Согласно этой теории, чем больше частота излучения, тем больше энергии содержит спектр, то есть все тела должны излучать очень большую энергию в виде электромагнитных волн с очень высокой частотой (которая соответствует ультрафиолетовой части спектра) и каждое тело, потеряв всю свою энергию, быстро бы замерзло до отрицательных температур. Этот странный вывод получил драматическое название “*ультрафиолетовой катастрофы*”, так как демонстрировал полный провал попыток объяснить свойства спектра излучения, оставаясь в рамках понятий классической физики, согласно которой свет имел волновую природу.

Лишь в 1900-м году разрешить это противоречие сумел немецкий ученый Макс Планк, выдвинув гипотезу **квантов** света. Гипотеза Планка сильно напоминает корпускулярную теорию Ньютона и хорошо согласуется с результатами, полученными экспериментально. Если одним из основных идеологических моментов классической физики было понятие *непрерывности* светового потока, то Планк ввел в физику понятие *дискретности*, предположив, что свет испускается отдельными порциями (квантами), которые он назвал фотонами.

Интересно, что, став основоположником квантовой физики, Планк до конца своих дней боролся против основных ее идей. В частности, на свою гениальную гипотезу световых квантов Планк смотрел не более чем как на изящный математический прием, позволяющий вывести формулу, точно объясняющую все закономерности равновесного теплового излучения.

Основные понятия и законы квантовой механики

Итак, Планк ввел в обращение новый термин — квант. Что это такое?

Суть гипотезы Планка: атомы вещества могут испускать свет, но не непрерывно, а в виде отдельных порций (квантов). Энергия отдельного кванта пропорциональна частоте световой волны:

$$E = \hbar \cdot \nu$$

где E — энергия кванта света, называемого также фотоном;

ν — его частота;

$\hbar$ — $1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

В физике величину, имеющую такую размерность в системе СИ (Дж·с — энергия, умноженная на время), называют *действием*. Это разумно: подействовать — значит сообщить телу определенную энергию в течение определенного времени. Так вот, постоянная Планка есть не что иное, как *квант действия*, то есть наименьшее по величине действие, возможное в природе. Ввиду малости величины $\hbar$ квантовый характер воздействия для макроскопических тел не проявляется.

Постоянная Планка $\hbar$ — это фундаментальная физическая константа, определяющая границу между классическими и квантовыми представлениями. Если в условиях задачи физические величины действия значительно больше, то можно обойтись классической Ньютоновской механикой. В противном случае необходимо решать задачу по законам квантовой механики.

Несколько позже великий Эйнштейн для объяснения законов фотоэлектрического эффекта воспользовался гипотезой Планка и доказал, что свет не только *испускается* квантами, но и *поглощается* такими же порциями.

Итак, принципиальное свойство света — его двойственная природа, или *корпускулярно-волновой дуализм*. С одной стороны, свет — это совокупность электромагнитных волн разной

частоты, с другой — это поток частиц (квантов, фотонов). Чтобы увидеть ту или другую сторону природы света, нужно поставить соответствующие опыты. Например, если мы поставим опыты по интерференции или дифракции света, то убедимся, что свет — это волновой процесс. Если же поэкспериментируем с фотоэффектом, то убедимся, что свет — это поток фотонов. Разрешение этого противоречия как раз и привело к становлению и развитию квантовой механики.

Структура атома

С точки зрения классических законов физики непонятна устойчивость атома и линейчатый характер атомных спектров. К началу XX века опыты показали, что электроны представляют собой отрицательно заряженные частицы, являющиеся составной частью атома. Электрический ток является ни чем иным, как упорядоченным движением электронов вдоль металлического провода, и в этом смысле *электрон* есть *квант электричества*.

Исходя из этого, Э. Резерфорд предложил в 1910 г **планетарную модель атома**, в которой отрицательно заряженные электроны вращаются как планеты вокруг центрального положительно заряженного ядра, притягивающего их подобно Солнцу (напомним, что заряды одинаковых знаков отталкиваются, а противоположных — притягиваются). Такая аналогия между атомом и Солнечной системой сразу же захватила воображение людей. Она действительно позволяет очень наглядно представить атом и объяснить некоторые его свойства, например, различия в энергии электронов.

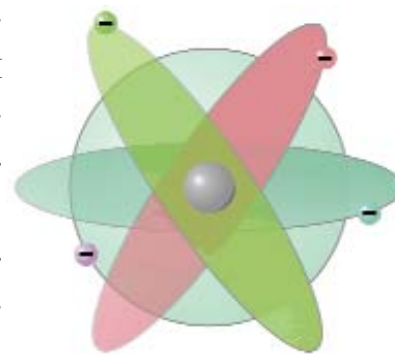


Рис 28. Модель атома Резерфорда

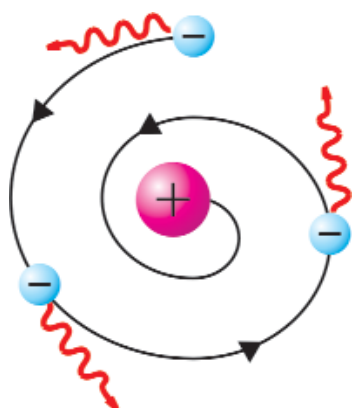


Рис 29. Траектория, по которой двигался бы электрон по законам классической физики

Она действительно позволяет очень наглядно представить атом и объяснить некоторые его свойства, например, различия в энергии электронов.

Однако пользоваться данной аналогией можно только до определенного предела. Основной ее недостаток следует из природы электрических зарядов: если на заряд действует магнитное поле или силы притяжения какого-нибудь атомного ядра, то заряд не может двигаться равномерно и прямолинейно. Его траектория будет

искривлена, а из теории Максвелла следует, что такой заряд при движении должен испускать электромагнитные волны, теряя при этом часть своей энергии.

Таким образом, из законов классической физики неизбежно следовал вывод, что, двигаясь ускоренно по определенным орбитам, электрон, излучающий энергию в виде электромагнитных волн, со временем должен терять скорость и, в конце концов, упасть на ядро (что положило бы конец существованию атома).

Согласно теоретическим расчетам, атомы бы прекратили свое существование примерно за наносекунду, что, конечно же, противоречит долговременной стабильности атома в действительности. Кроме того, совокупность таких атомов должна была бы давать сплошной спектр излучения, а не линейчатый, наблюдаемый на опыте.

Постулаты Бора и квантование орбит

Успех в устранении этих противоречий был достигнут Нильсом Бором в 1913 г., когда он распространил идеи Планка и Эйнштейна о квантовых свойствах электромагнитного излучения и на атомы вещества. Бор ограничился рассмотрением атома водорода, поскольку он очень прост (единственный электрон вращается вокруг одного протона) и поддается математическому анализу.

Изучая линейчатый спектр атома, Бор понял, что существуют очень простые правила, управляющие излучением световых волн атомами вещества, которые хорошо объясняют множество существующих электронных орбит. Свои выводы он сформулировал в виде известных постулатов Бора.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): электроны в атоме могут обладать лишь определенными (разрешенными) значениями энергии, другими словами - находиться на определенных *энергетических уровнях*, образующих дискретный энергетический спектр атома.

Второй постулат Бора (правило частот): при определенных условиях электроны могут переходить с одного уровня на другой (или с одной орбиты на другую), поглощая или испуская фотон.

Существует орбита с наименьшей возможной энергией, на которой электрон может находиться неограниченно долго — это его *основное состояние*. При переходе с низшего энергетического

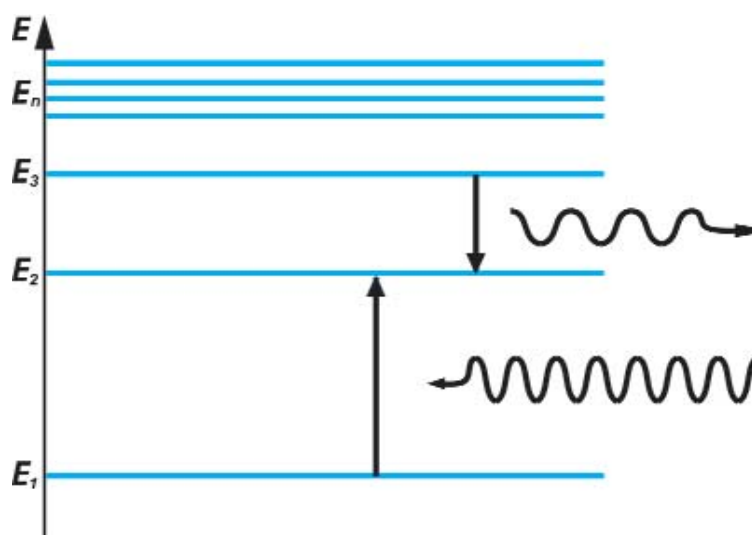


Рис 30. Энергетическая схема атомных уровней. Энергия E_1 соответствует основному состоянию, E_2 — возбужденному.

ческого уровня на высший электрон возбуждается, но при каждом удобном случае всегда стремиться вернуться из *возбужденного состояния* обратно в основное. В возбужденном состоянии электрон может находиться не дольше наносекунды.

Что же заставляет электрон постоянно стремиться к своему первоначальному состоянию? Читатели наверняка обращали внимание, что большинство всех объектов в природе всегда стремится минимизировать любое напряжение. Так, например, капля жидкости принимает сферическую, а не треугольную или квадратную форму именно потому, что такая форма наиболее “выгодна” с точки зрения противостояния силам поверхностного натяжения. То же самое справедливо и для электрона: чтобы удержаться на верхней орбитали (превосходящей по энергии его собственную), ему нужно изрядно “попотеть”, преодолевая мощную силу притяжения ядра — а какому нормальному электрону это понравится? В этом смысле электрон можно в шутку сравнить с лентяем в спортзале: едва тренеру удастся загнать его на высокую перекладину, он вместо того, чтобы подтягиваться, тут же норовит с нее спрыгнуть.

“А как же тогда электрон переходит на более высокий уровень?”, — спросите вы. Предположим, что атом находится в состоянии n и обладает энергией E_n . Чтобы вынудить электрон перейти на уровень m , мы должны каким-то образом “выпихнуть” его из основного состояния, придав ему некоторую дополнительную энергию (подобно тому, как пинок тренера необходим, для того, чтобы лодырь оказался на перекладине). Для этого будем “обстреливать” электрон световыми фотонами различной частоты. Напо-

минаем, что энергия фотона зависит от частоты излучения, поэтому она равна:

$$E = h\nu$$

где ν — частота,

h — постоянная Планка.

Оказывается, не каждый фотон способен вынудить атом перейти в возбужденное состояние, а лишь тот, чья энергия в точности равна разности энергий возбужденного и основного состояний электрона в атоме, то есть:

$$h\nu = E_m - E_n$$

Только при такой энергии электрон, поглотив фотон, перейдет на уровень, соответствующий энергии E_m .

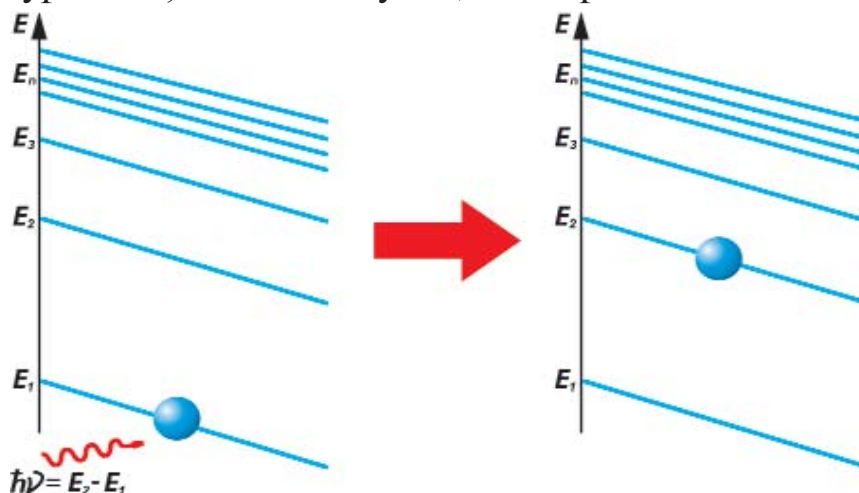


Рис 31. Получив необходимое количество энергии, электрон переходит на следующий энергетический уровень

Если же энергия фотона окажется больше либо меньше необходимой, то он “пролетит” сквозь атом, никоим образом не повлияв на состояние электрона.

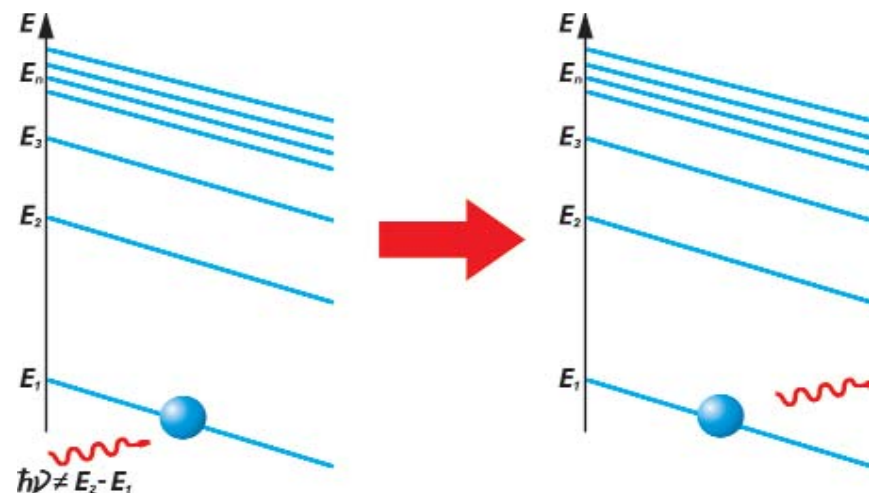


Рис 32. Электрон остался в первоначальном состоянии вследствие избыточной, либо недостаточной энергии бомбардирующего его фотона

Итак, электрон находится в возбужденном состоянии, из которого он в силу своей природы стремится вернуться обратно на “родной” уровень. Для этого ему нужно “освободиться” от энергии, полученной от фотона. Поэтому обратный переход сопровождается испусканием светового фотона абсолютно той же частоты, то есть

$$E_n = E_m - \hbar \nu$$

Так квантовая механика обнаружила, что *атом обладает способностью поглощать и испускать фотоны света*, и это в дальнейшем послужило основой создания лазеров и множества других машин, использующих этот принцип.

Итак, сформулируем важный вывод из теории квантовой механики: *физические величины в квантовом мире изменяются квантами, т.е. дискретно.*

Невозможно представить себе квантовую физику без одного из ее основных принципов:

Принцип Паули (или принцип запрета): на каждом энергетическом уровне атома *в данном состоянии* может находиться только один электрон, при этом чем выше уровень электрона, тем большая энергия ему соответствует. Каждому значению энергии соответствует своя орбита электрона вокруг ядра.

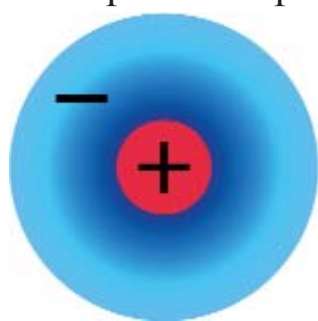


Рис 33. Схема атома водорода

Строго говоря, орбита в квантовой механике — понятие довольно условное. Из-за несовершенства современной аппаратуры и невозможности четко зафиксировать положение электрона в атоме, можно лишь приблизительно говорить о некоторой “размытой” орбите электрона, означающей только то, что “в среднем” электрон находится на определенном расстоянии от ядра.

Принципы работы лазера

Понять и запомнить с первого раза многочисленные квантовые постулаты не так-то просто. Поэтому, чтобы облегчить читателям изучение этой главы (на наш взгляд, самой сложной ввиду большого объема новой информации), давайте еще раз повторим вышеизложенное, но уже на примере работы лазера — заме-

чательного практического применения квантовых законов и способности электронов поглощать и излучать световые кванты.

Рассмотрим вкратце принцип работы простейшего лазера. Мы выяснили, что при переходе атома из *основного состояния*, которому соответствует более низкий энергетический уровень, в *возбужденное* (где энергия, соответственно, выше) происходит **поглощение** фотона веществом с переходом на более высокий энергетический уровень.

● – невозбужденный атом с энергией E_i
● – возбужденный атом с энергией E_j

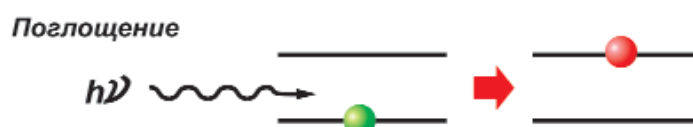


Рис 34. Поглощение фотона

Из возбужденного состояния электрон всегда стремится вернуться в основное, поэтому время его пребывания в таком состоянии чрезвычайно мало — наносекунда. Переход электрона на более низкий энергетический уровень сопровождается излучением кванта света. Такое самопроизвольное излучение принято называть **спонтанным**.

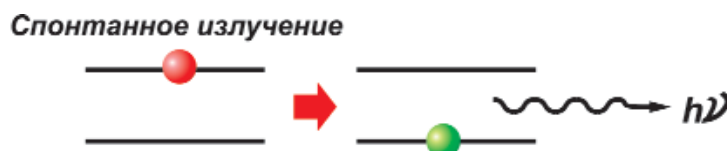


Рис 35. Спонтанное излучение

Однако существует и другой вид излучения, открытый Эйнштейном и называемый **вынужденным**, или **индуцированным**. Индуцированное излучение происходит тогда, когда электрон в возбужденном состоянии снова подвергается действию внешнего электромагнитного излучения. При этом электрон переходит на более низкий энергетический уровень, испуская фотон, *когерентный* (идентичный по энергии и направлению) фотону, спровоцировавшему данный переход.

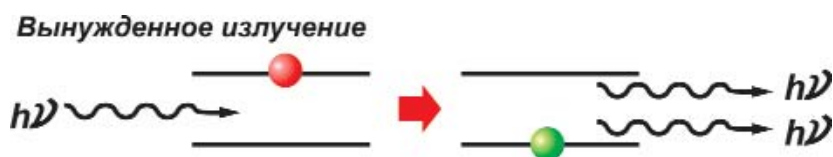


Рис 36. Вынужденное излучение

Таким образом, при индуцированном излучении мы уже имеем два абсолютно идентичных (когерентных) фотона, движущихся в одном направлении.

А теперь представим себе цепочку атомов, вытянутую в прямую линию. Если все эти атомы находятся в возбужденном состоянии, то внешний фотон, ударив в крайний атом по направлению вдоль цепочки, вызовет излучение фотона из него, причем излученный фотон будет иметь такую же энергию и направление, что и ударивший. Таким образом, будут двигаться уже два одинаковых фотона. Один из них ударит в следующий атом, который даст излучение ещё одного такого же фотона. Начинается движение уже трех одинаковых фотонов. Точно так же происходит излучение четвертого, пятого фотона, и т. д. Так **в результате незначительного внешнего излучения начнется лавинообразное усиление светового потока**. Теоретически коэффициент усиления может достигать огромнейшего значения: 10^{20} , и в результате такого усиления будет двигаться огромная армия фотонов, имеющих одинаковую энергию и одинаковое направление движения. Таким образом, излучение будет когерентным.

Такая схема получения когерентного (синхронного и синфазного) излучения впервые предложена в 1939 г. советским ученым В.А. Фабрикантом и получила название **лазер**. Слово является аббревиатурой от английской фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER) — усиление света с помощью вынужденного излучения.

Мы знаем, что в природе атомы всегда стремятся вернуться к своему основному, невозбужденному состоянию. Поэтому если число возбужденных атомов *меньше или равно* числу невозбужденных, то, сколько их ни облучай с помощью внешнего источника, никакого усиления света не получится (поскольку число фотонов, поглощенных невозбужденными атомами, будет превосходить число фотонов, излученных возбужденными). Значит, для усиления света и получения когерентного излучения надо, чтобы возбужденных атомов было больше, чем находящихся в основном, невозбужденном состоянии.

Если мы сможем каким-то образом “переселить” электроны на более высокие уровни, то есть возбудить большинство атомов, то получим так называемую **инверсию населенности** энергетических уровней. Тогда при облучении вещества будут

преобладать переходы с верхнего уровня на нижний, что приведет к усилению падающего на вещество света.

Состояние вещества, в котором создана инверсная населенность энергетических уровней, называется активным или *рабочим*, а процесс создания инверсной населенности называется *накачкой*. Методы накачки разнообразны и зависят от типа лазера (твердотельного, жидкостного, газового, ядерного, полупроводникового и т.п.).

Рассмотрим процесс оптической накачки на примере трехуровневого рубинового лазера. Трехуровневым он называется

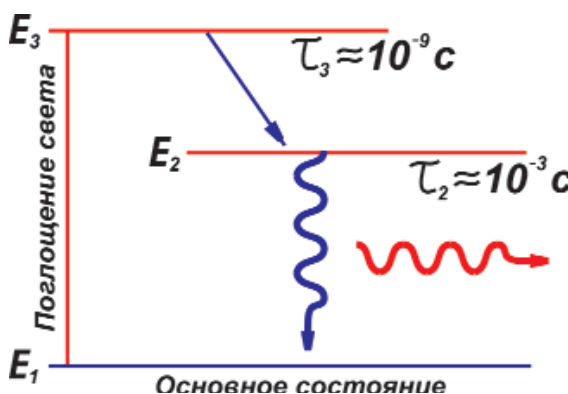


Рис 37. Трехуровневая схема оптической накачки

потому, что энергетический переход электронов здесь осуществляется благодаря третьему, дополнительному уровню, который называется *метастабильным* (на рисунке ему соответствует уровень E_2). В отличие от возбужденного состояния (уровень E_3), время жизни ато-

ма на этом уровне 10^{-3} с, что в миллион раз дольше, чем 10^{-9} с.

Необходимость использования метастабильного уровня объясняется вот чем: при оптической накачке атомы сначала возбуждаются, поглощая свет. Но для этого недостаточно только двух уровней. Какой бы мощной ни была лампа накачки, возбужденных атомов не станет больше, чем невозбужденных.

Поглотив первоначальное излучение, атомы переходят в возбужденное состояние (которому соответствует уровень E_3), из которого тут же *спонтанно* и *без излучения* перескакивают на метастабильный уровень E_2 , где и накапливаются. Через некоторое время число атомов на уровне E_2 начинает превышать число атомов в основном состоянии, создавая требуемую инверсию населенности.

Однако для нормального функционирования лазера такой процесс должен повторяться многократно и регулярно. Для этого активную среду помещают в оп-

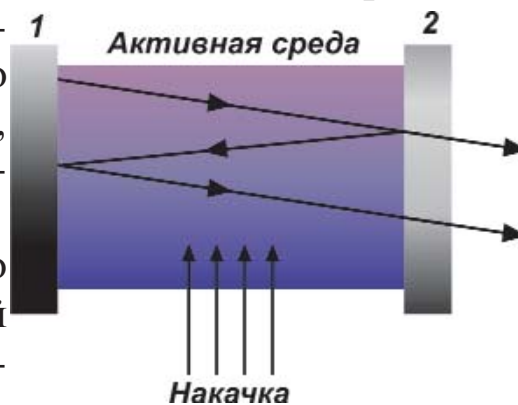


Рис 38. Схема оптического резонатора

тический резонатор (систему, способную породить колебания определенной амплитуды и частоты), который представляет собой систему двух зеркал.

В пространстве, заполненном активной средой, между двумя зеркалами, одно из которых полупрозрачное (на рисунке - зеркало 2), движется поток излучаемых атомами фотонов. Большая часть этого потока проходит через полупрозрачное зеркало и в виде когерентного луча излучается во внешнее пространство, а небольшая часть потока отражается обратно. В свою очередь, эти фотоны вызывают вынужденный переход встретившихся на их пути атомов и т.д. Развивается лавинообразный процесс, причем каждый следующий фотон летит в том же направлении, что и фотон, его вызвавший.

Таким образом, оптический резонатор обеспечивает многократное происхождение световых волн, распространяющихся вдоль его оси по усиливающей среде, вследствие чего достигается высокая мощность излучения, поэтому если какой-то внешний источник энергии (относительно слабый) может поддерживать инверсное состояние активной среды, то через зеркало 2 все время будет излучаться когерентный поток фотонов.

Свойства лазерного излучения

Излучение лазера представляет собой поток летящих почти параллельно одинаковых фотонов. Это придает ему ряд важных особенностей.

Во-первых, очень малая расходимость лазерного излучения. Если, например, диаметр лазерного пучка 1 см, а длина волны $5 \cdot 10^{-5}$ см, то угол расходимости составит всего $0,003^\circ$, то есть, фактически, получаем параллельный поток излучения. С помощью собирающих линз и зеркал лазерные лучи можно сфокусировать в точку размером 500 нм (для видимого света). Если такой луч послать на Луну, то он осветит на её поверхности круг диаметром 30 м. Луч хорошего прожектора осветил бы поверхность диаметром 40.000 километров.

Во-вторых, лазерное излучение обладает высокой монохромностью, т. е. имеет практически одну-единственную частоту и соответствующую ей одну-единственную длину волны. Это объясняется тем, что у всех фотонов в лазерном луче одинаковая энергия.

Третья особенность лазерного излучения состоит в том, что можно в широких пределах управлять длительностью излучения - от сколь угодно длительных до сверхкоротких (вплоть до 10^{-15} с) импульсных вспышек. Импульсы такой малой длительности имеют в пространстве ничтожно малую длину и огромную мощность. Современные лазеры излучают в одном таком импульсе энергию до нескольких тысяч джоулей! Это сравнимо с мощностью крупнейших электростанций. Огромная мощность лазерного излучения приводит к тому, что вещества, освещенные лазером, могут быть нагреты до весьма высоких температур. Интенсивность сфокусированного лазерного луча может быть 10^{20} Вт/см² и более, при этом напряженность электрического поля в луче достигает 10^{11} В/см. Под действием такого сильного поля происходит не только ионизация атомов - они расщепляются на электроны и положительные ионы - но и термоядерные реакции, в ходе которых одни элементы превращаются в другие.

Лазеры имеют многочисленные применения в технике для сварки, резки и плавления металлов, в медицине - как бескровные скальпели при лечении разных болезней. Лазерная локация позволила измерить скорость вращения планет и уточнить характеристики движения Луны и Венеры. Лазеры используются в оптоволоконных линиях связи для передачи и обработки большого объема информации. Лазеры считывают информацию с компакт-дисков в каждом компьютере и проигрывателе. Наконец, применяя лазеры для нагрева плазмы, пытаются решить проблему управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время созданы лазеры, генерирующие излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн. За создание лазеров советские физики Н. Басов и А. Прохоров вместе с американским физиком Ч. Таунсом в 1964 году получили Нобелевскую премию.

Корпускулярно-волновой дуализм нанообъектов

Итак, мы уяснили, что свет представляет собой одновременно частицу и волну. В 1924 году французский ученый Шарль де Бройль распространил принцип квантово-волнового дуализма на *все* микрообъекты природы. Согласно де Бройлю, каждой частице следует поставить в соответствие волну, длина которой

связана с импульсом этой частицы. По де Бройлевской *гипотезе о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма*, не только фотоны, но и все частицы вообще (электроны, протоны и т.д.) наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами. Последние, в свою очередь, должны проявляться в явлениях дифракции и интерференции частиц.

Когда мы изучаем свет, сначала бросаются в глаза его волновые свойства, а при более пристальном рассмотрении — корпускулярные. При изучении же частиц наблюдается обратная картина.

В соответствии с известным соотношением Эйнштейна, фотону с энергией $E = h\nu$, соответствует энергия $mc^2 = h\nu$.

Здесь c - скорость света; m - масса фотона; ν - его частота.

Отсюда:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Учитывая, что импульс фотона $p = mc$, а частота света связана с длиной волны λ соотношением: $\nu = c/\lambda$, получим:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Данное уравнение является замечательной иллюстрацией двойственной природы света, поскольку объединяет длину волны света λ , связанную с его волновой природой, и импульс фотона p , характеризующий его как частицу.

Заслуга де Бройля состоит в том, что он распространил данную формулу на все частицы материи, придав ей универсальное значение.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

где $p = mv$ - импульс частицы,

m - масса частицы,

v - ее скорость.

Гипотеза де Бройля впоследствии была подтверждена экспериментально. В частности, в опыте американских физиков К. Дэвидсона и Л. Джермера в 1927 году обнаружена дифракция элементарных частиц — электронов. Для этого они использова-

ли всем хорошо известную электронно-лучевую трубку, применяющуюся в телевизорах, дисплеях и осциллографах.

В этих трубках (или электронных пушках) *электронные пучки*, генерируемые катодом и управляемые электромагнитным полем, направляются в сторону экрана, покрытого люминофором. При попадании частицы в экран на нем возникает светящееся пятнышко. Так вот, на пути от источника к экрану электроны ведут себя как классические частицы, и их движение можно рассчитать средствами классической физики. Однако если на пути летящих в трубке электронов поставить экран со щелью, то после прохождения их через эту щель на экране наблюдается чередование темных и светлых полос, аналогичное дифракционной картине световых волн. Значит, электроны способны к дифракции, то есть ведут себя подобно волнам!

Позднее советский ученый Тартаковский доказал, что волновые свойства присущи не только пучкам электронов, но и каждому электрону в отдельности. А в 1999 году обнаружена интерференция фуллеренов и биомолекул.

В таблице приведены и другие эксперименты, свидетельствующие как о волновых, так и о корпускулярных свойствах электрона:

Исследуемое явление	Волновая теория	Корпускулярная теория
Дифракция	+	—
Отражение	+	+
Преломление	+	+
Интерференция	+	—
Фотоэффект	—	+

Табл 2. Эксперименты, свидетельствующие о волновых и корпускулярных свойствах электрона

Человеку, привыкшему к законам макромира, бывает трудно представить волновую природу электрона или другой частицы. Нам удобнее представлять себе электрон в виде воображаемого шарика в миниатюрной солнечной системе. Тем не менее, это представление годится только для первоначального знакомства с понятием межатомных взаимодействий, но не подходит для дальнейшего изучения квантовой механики. Поэтому к атому нужно подходить скорее как к странному музыкальному инструменту — аналогу звукового резонатора, — в котором вместо звуковых волн мы имеем волны электронные.

Такое сравнение помогает понять суть квантования орбит. Известно, что натянутые струны рояля как простейшие резонаторы могут колебаться только с определенной частотой. Поэтому, говоря об электронных орбитах, следует иметь в виду различные частоты колебаний. Меняя частоту, электрон излучает световую волну, частота которой тем выше, чем больше разница частот электрона, между которыми произошел переход.

Приведем еще одну аналогию, которая поможет облегчить понимание волновой природы электрона. Вообразите серию волн, набегающих на пологий берег. Они имеют вполне определенную скорость, и ее можно вычислить, зная время и расстояние между двумя соседними гребнями. Волна, однако, не особенно локализована, она занимает большое пространство. Электрон, скорость которого известна (в отличие от положения, которое мы смутно представляем), можно представить в виде такой волны.

Длина волны де Бройля обратно пропорциональна импульсу частицы. Фактически это означает, что *для больших тяжелых частиц длина волны очень мала, и волновые свойства таких частиц заметить практически невозможно*. Это касается всех макрообъектов, для более-менее точного описания которых вполне хватает классической механики.

Квантовые пределы точности измерений

Одной из актуальнейших проблем современной нанотехнологии является так называемая “проблема толстых пальцев”, под которой подразумевается сложность манипулирования микро- и наночастицами. Ведь если даже диаметр волоса в несколько тысяч раз превосходит нанометровые размеры, то какими же должны быть инструменты для работы с объектами квантового мира?

Бор сформулировал один из основополагающих принципов квантовой механики — *принцип дополнительности*, согласно которому невозможно точно измерить одну физическую величину микрообъекта без потери информации о величине, дополнительной к ней.

Фактически суть таких взаимно дополнительных величин описывается и соотношением неопределенностей Гейзенберга, которое утверждает, что существуют такие пары физических величин, одновременное и точное определение которых невозможно.

Примером такой пары величин являются координаты частицы x и проекция ее импульса p на ось x . Количественно соотношение неопределенностей формулируется следующим образом:

Если Δx —неопределенность координаты частицы, а Δp —неопределенность проекции импульса частицы p на ось x , то произведение этих неопределенностей должно быть не меньше постоянной Планка $\hbar$:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Отсюда следует, что если мы точно определили координату частицы:

$$\Delta x \rightarrow 0$$

то мы ничего не можем сказать об ее импульсе:

$$\Delta p \rightarrow \infty$$

И наоборот.

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определено значение одной из входящих в него величин, тем менее определено значение другой. Например, по столу ползет муха. Попытаемся определить одновременно ее координату и импульс. Для точного определения координаты “зафиксируем” положение мухи хлопнушкой. Да, в этом случае мы точно знаем координату мухи, но что тогда можно сказать о ее импульсе? Ведь она уже не ползет, а лежит вверх ножками... Конечно, данная аналогия не совсем корректна, поскольку муха является далеко не квантовым объектом, но она весьма показательна.

Рассмотрим еще несколько примеров. Допустим, нам требуется определить координату Δx и импульс Δp электрона. Зная, что электрон обладает волновыми свойствами, мы даже интуитивно чувствуем, что волна — это ускользающий объект, который “не дается в руки”. Чтобы определить местонахождение электрона Δx , он должен рассеять хотя бы один фотон. При этом вследствие дифракции координата будет определена с точностью до порядка длины волны фотона:

$$\Delta x \sim \lambda \quad (1).$$

Но, рассеивая фотон, электрон изменяет свой импульс на величину Δp , которая будет примерно равна импульсу фотона:

$$P_{\phi} \sim \frac{\hbar}{\lambda} \quad (2).$$

Из (1) и (2) следует:

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar,$$

то есть как раз соотношение неопределенностей.

Другая пара величин, связанных соотношением неопределенностей, — это энергия системы E и время t , в течение которого система имеет это значение энергии. В этом случае соотношение неопределенностей выглядит так:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar.$$

Отсюда следует, что если мы имеем возможность наблюдать динамическую систему в течение времени Δt , то ее энергия может быть определена с точностью, не более, чем:

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t}$$

Таким образом, соотношение неопределенностей устанавливает фундаментальные, *принципиально непреодолимые пределы точности измерений*. Можно даже сказать, что природа позволяет изучать себя с точностью только до соотношения неопределенностей, и не более того.

Читатель может возразить, что если мир един, то почему мы не говорим о принципе неопределенности для измерения классических частиц, например, в случае движения бильярдного шара или автомобиля? На самом деле неопределенность присутствует и здесь, но по ряду причин мы ее не замечаем. Во-первых, любое измерение, выполненное с помощью инструментов, пусть даже самых совершенных (а совершенству, как известно, нет предела), не может быть идеальным в том смысле, что положение и скорость не могут быть определены совсем без ошибок. Ошибки присущи физическим измерениям; можно стремиться к их уменьшению, но избавиться от них полностью нереально. Во-вторых, неопределенность, предсказанная Гейзенбергом, уменьшается с увеличением массы рассматриваемо-

го объекта, пока не становится совершенно незаметной в случае макроскопических тел.

Итак, мы убедились, что:

Никакой эксперимент не может привести к одновременному и точному измерению величин, которые являются дополнительными друг к другу.

Принцип дополнительности часто объясняют влиянием измерительного прибора на частицы. С одной стороны, это оправданно, поскольку большинство измерительных приборов так или иначе является макроскопическими, грубыми по отношению к размерам квантовых объектов. Понятно, что чем больше техническое несовершенство измерительного прибора, тем менее определенными (точными) будут измерения.

С другой стороны, неопределенность в измерениях связана не только с несовершенством измерительной техники, но и с объективными свойствами материи. Дело в том, что любое измерение как физический процесс обязательно сопровождается воздействием на объект в процессе измерения. Когда мы, предположим, определяем силу тока в цепи с помощью амперметра, в идеале нужно изолировать его от всех внешних факторов, в том числе делать это, например, в абсолютной темноте. Ведь фотоны света могут оказывать давление на стрелку и показания амперметра в темноте и на свету будут различными.

Разумеется, ни один психически здоровый человек не станет учитывать подобные “тонкости” в макром мире, но когда речь идет о пространстве квантовых величин, без этого просто не обойтись.

Волновая функция и вероятностный характер поведения квантовых объектов

Классическая механика решает задачи, в которых состояние системы тел в любой момент времени может быть точно рассчитано.. Квантовой же механике приходится иметь дело с объектами, изучение которых ограничено принципом неопределенности, описанным выше.

Если в классическом мире мы выбираем некоторый объем dV и решаем задачу поиска местонахождения частицы (например, нахождения телевизора в комнате), то имеются только два варианта точного решения этой задачи:

- либо частица находится в данном объеме (вероятность ее нахождения там равна 1 или 100%)
- либо частицы нет в данном объеме (вероятность ее нахождения там равна 0 или 0%)

Законы квантового мира не обладают той степенью наглядности, которая свойственна законам классической механики. Здесь все гораздо сложнее. Например, известно, что указать точное расположение электрона в атоме невозможно — он как бы “размазан” вокруг положительно заряженного ядра-протона. Тем не менее, мы все же можем утверждать, что *с определенной долей вероятности* данный электрон находится на той или иной орбите.

Поэтому для решения задачи нахождения частицы в квантовом мире мы можем лишь указать, что вероятность dP того, что частица находится в объеме dV равна:

$$0 \leq dP \leq 1$$

Очевидно, что чем больше рассматриваемый объем, тем выше вероятность обнаружить в нем искомую частицу (если, например, заранее известно, что телевизор находится в комнате, то, увеличивая объем той части комнаты, в которой производится поиск, мы тем самым увеличиваем вероятность успешного обнаружения искомого предмета).

Следовательно, вероятность dP прямо пропорциональна dV и связана с ней следующим соотношением:

$$dP = |\Psi|^2 \cdot dV$$

Коэффициент пропорциональности $|\Psi|^2$ — это квадрат амплитуды *волновой функции*.

Волновая функция — это величина, которая в квантовой механике полностью описывает состояние микрообъекта (электрона, протона, атома и т.п.) и вообще любой квантовой системы.

Исторически название “волновой” она получила потому, что уравнение, определяющее эту функцию (уравнение Шрёдингера, о котором речь пойдет дальше), внешне похоже на уравнение, описывающее волновые процессы (типа Sin, Cos). Но на самом деле мы не можем ассоциировать волновую функцию микрочастицы с какой-то физической реальностью, как в

случае звуковых или морских волн. Волновая функция — понятие чисто математическое и имеет вероятностный смысл.

Чтобы обеспечить понимание волновой функции, нам необходимо познакомиться сначала с основами теории вероятностей. Эта тема, как правило, не входит в обычный школьный курс математики, хотя на самом деле здесь нет ничего сложного.

Основные положения теории вероятностей

Окружающий нас мир полон случайностей. Номера выигрышных билетов в лотерее, количество солнечных дней в году, результаты спортивных состязаний, выпадение “решки” при подбрасывании монеты, неожиданная случайная встреча, кардинально переворачивающая судьбу — все это примеры случайных событий, происходящих в повседневной жизни и влияющих на нее.

Теория вероятностей не может предсказать, произойдет или не произойдет какое-то реальное событие, а лишь предлагает математический аппарат для анализа и прогнозирования вероятности его появления. Она изучает вероятностные закономерности случайных событий, существующие объективно, т.е. независимо от наших желаний и предпочтений.

Исторически зарождение теории вероятностей связано с поиском закономерностей в азартных играх, таких как карты и кости. Именно тогда были предприняты первые попытки математического прогнозирования и количественного определения шансов на успех. Исходными понятиями здесь являются понятия “случайное событие” и “испытание” (опыт, эксперимент).

Случайное событие — это явление, которое при одних и тех же условиях может или произойти, или не произойти.

Испытание — это создание и осуществление этих неопределенных условий. Любое испытание приводит к результату или исходу, который заранее невозможно точно предсказать.

Случайные события происходят повсеместно — в природе, науке, технике, экономике, военном деле и т.д. Приведем простейшие примеры испытаний и соответствующих им случайных событий.

Важно отметить, что на самом деле “случайные события” вовсе не случайны — просто для их расчета пришлось бы учесть такое количество факторов и произвести расчеты такой сложности, что никто этим не занимается. Однако с совершенствованием компьютеров и датчиков люди смогут анализировать данные все

№	Испытание	Событие
1	Бросание монеты	Выпадение “орла” или “решки”
2	Бросание игральной кости	Выпадение 1,2,3,4,5 или 6
3	Выстрел по цели	Попадание в цель или промах
4	Извлечение карты из колоды	Извлечение карты одного цвета, масти или достоинства

Табл. 3. Примеры простейших испытаний и событий

быстрее и точнее и многие события перестают быть случайными. Например, попадание снаряда в цель перестало быть случайным, когда в нем появился компьютер, рассчитывающий и корректирующий траекторию полета. Выигрыш в рулетку сотни лет считался случайностью, пока хитрые игроки не наловчились передавать данные об игре через видеокамеру в суперкомпьютер, который смог рассчитать, на какую цифру упадет шарик. С развитием нанотехнологии компьютеры станут еще мощнее и компактнее, а значит, многие события перестанут быть случайными и станут не только предсказуемыми, но и управляемыми.

Случайные события могут быть:

а) *достоверными* или *невозможными*;

Достоверным называется событие, которое в данных условиях всегда происходит, невозможным — если оно никогда не может быть результатом данного испытания. Например, при бросании монеты событие А — “Выпадение какой-либо стороны монеты” будет достоверным, а В — “Одновременное выпадение “решки” и “орла”” — невозможным.

б) *зависимыми* или *независимыми*;

Если появление одного события влечет за собой появление другого, то говорят, что второе событие зависит от первого.

в) *равновероятными* или *неравновероятными*;

Например, в случае бросания игральной кости события выпадения каждой цифры равновероятны (если, конечно, это “честная” кость, без смещенного центра тяжести).

А вот вероятности события “В полдень в Москве выпадет снег” будут сильно различаться в зависимости от времени года, соответствующего данному испытанию.

К определению самого понятия вероятности существует несколько различных подходов. Мы рассмотрим лишь те из них, которые необходимы нам для понимания изучаемых квантовых явлений, а именно — классический и статистический подходы.

Классическое определение вероятности исторически сложилось первым. Оно имеет место в случаях, когда случайные события являются равновероятными. Для начала рассмотрим пример: предположим, в корзине лежат 10 шаров одинакового размера, из которых 6 — красных, 3 — зеленых и 1 — желтый. Все шары хорошо перемешаны, а опыт состоит в том, что мы наудачу вытаскиваем один шар из корзины.

Результатом этого опыта будет служить одно из следующих случайных событий $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{10}$,

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ — выпадение красного шара

$\omega_7, \omega_8, \omega_9$ — выпадение зеленого шара

ω_{10} — выпадение желтого шара

Интуитивно понятно, что вероятность выпадения красного шара выше, чем остальных, поскольку среди всех возможных исходов количество возможных благоприятных исходов, соответствующих этому событию, выше. Таким образом,

Вероятность — это отношение числа благоприятных событию исходов m к общему числу всех равновозможных исходов n

Обычно вероятность обозначают буквой P (от англ. “probability” - вероятность). Вероятность в данном случае понимается как количественная мера объективной возможности появления случайного события A и определяется формулой

$$P(A) = \frac{m}{n}$$

В нашем примере событиям выпадения красного, зеленого и желтого шара будут соответствовать вероятности $6/10$, $3/10$ и $1/10$.

Функция вероятности обладает некоторыми специальными свойствами:

1. $0 \leq P \leq 1$, так как количество благоприятных исходов не может быть больше их общего числа.

2. Вероятность достоверного события = 1

3. Вероятность невозможного события = 0

Статистическое определение вероятности

Классическим подходом к вероятности удобно пользоваться, когда количество всех равновозможных исходов в опыте ограничено и не слишком велико. Однако эти условия не всегда соблю-

даются на практике: иногда приходится решать задачи, в которых число исходов постоянно меняется или бесконечно велико. Кроме того, не всегда события могут быть равновероятными.

Практика показывает, что массовые случайные явления обладают одним уникальным свойством: с увеличением числа испытаний повышается устойчивость их появления. Например, если повторить опыт бросания монетки 100 раз, то примерно в 50% испытаний выпадет “орел”, а в 50% - “решка”. Если увеличить число испытаний до 1000 раз, это в конце концов приведет к еще большей устойчивости частоты полученных значений, а это уже определенная закономерность.

При статистическом подходе нас интересует не исход отдельно взятого испытания, а то, что получается в результате его многократного повторения, то есть в качестве статистической вероятности события принимают *частоту появления того или иного события* при неограниченном увеличении числа испытаний.

Например, если в результате достаточно большого числа испытаний оказалось, что относительная частота весьма близка к 0.4, то это число можно принять за статистическую вероятность события.

Статистический вероятностный подход используется повсеместно для анализа и прогнозирования событий, процессов, явлений. На его основе построены некоторые научные теории физики, квантовой механики, эволюции, генетики, информатики и др. Вероятностно-статистические методы широко применяются в промышленности для контроля качества продукции, технической диагностики оборудования, организации массового обслуживания, астрономических наблюдений и т.д.

В рамках статистического подхода вводится понятие **плотности распределения вероятности $p(x)$** , вид функции которой определяет закон распределения случайных величин. Существуют самые разные законы распределения: равномерное распределение, распределение Пуассона, распределение Бернулли и др., но наиболее распространено в природе так называемое **нормальное распределение**, или **распределение Гаусса**. На рисунке представлен вид функции такого нормального распределения, а смысл его заключается в том, что в результате большого числа испытаний относительная частота появления какого-то события группируется вокруг некоторого среднего числа, которое и можно принять за значение статистической вероятности.

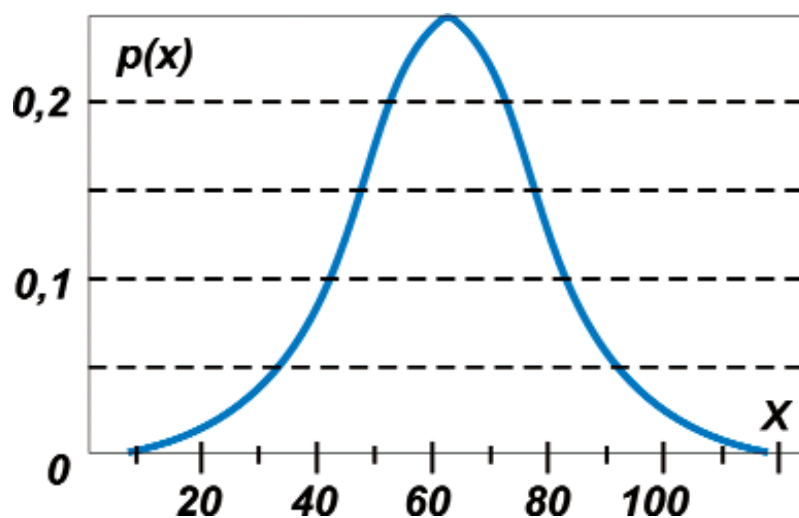


Рис 39. График функции плотности вероятности при нормальном распределении

Следующий пример наглядно иллюстрирует данный закон распределения: предположим, мы высыпает мешок гороха на пол, держа его в одном и том же вертикальном положении. В принципе, после этого существуют некоторая вероятность обнаружить горошину в любом месте комнаты, даже в самом дальнем углу. Однако вероятность того, что мы найдем горошину в самом центре образовавшейся на полу “кучки”, гораздо выше. Значение вероятности, соответствующее координате центра кучки, мы и принимаем за статистическую вероятность.

Другой пример: пусть производится серия выстрелов по цели. Если учесть, что стрелки палят не наобум, а прилагают все усилия, чтобы попасть в “яблочко”, то вероятность попадания пули будет возрастать с приближением к центру мишени.

Но “вернемся к нашим баранам”. Итак, мы решаем задачу нахождения микрочастицы в некотором объеме dV , например, ищем местоположение электрона в атоме. Как мы уже знаем, из-за несовершенства измерительных приборов мы не можем точно указать его местоположение, а можем лишь указать вероятность dP его местонахождения в той или иной части объема dV .

Кроме того, мы знаем, что эта вероятность dP прямо пропорциональна dV и связана с ней следующим соотношением:

$$dP = |\Psi|^2 \cdot dV$$

где $|\Psi|^2$ — это квадрат амплитуды волновой функции, математический смысл которой соответствует как раз функции плотности распределения вероятностей.

Перепишем данное уравнение в виде:

$$|\psi|^2 = \frac{dP}{dV}$$

Теперь ясно видно, что $|\Psi|^2$ определяет вероятность нахождения частицы в некоторый момент времени t в некотором объеме dV , то есть фактически место ее нахождения в точке с координатами x, y, z (объем имеет три измерения)

В атоме водорода единственный электрон как бы образует вокруг ядра электронное облако — облако отрицательного заряда, плотность которого в некоторой точке характеризует вероятность нахождения там электрона. На рисунке показана вероятность обнаружить электрон на расстоянии r от ядра атома водорода.

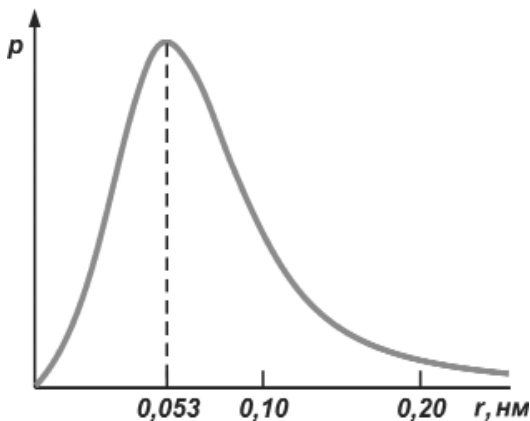


Рис 40. График вероятности обнаружения электрона на разном расстоянии от ядра

Максимальная вероятность найти электрон соответствует расстоянию $r = 0,053 \text{ нм}$. Вполне возможно, что в некоторый момент электрон находится или ближе к ядру, или дальше, но вероятность его обнаружения при этом убывает.

Область пространства, для которой вероятность обнаружения электрона составляет 95%, называется **атомной орбиталью**.

Итак, мы усвоили еще одну важную особенность квантовой механики:

Поведение элементарных частиц носит вероятностный характер, описываемый волновой функцией

Чтобы определить волновую функцию частицы для конкретной задачи, физики решают *уравнение Шредингера*, которое учитывает влияние электромагнитных сил на ее движение. Это дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка.

$$-\frac{\hbar^2}{2} \sum_j \frac{1}{m_j} \frac{\partial^2}{\partial r_j^2} \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$$

Страшно? Для решения этого уравнения потребуются знания, которые не может обеспечить школьная программа по математике, поэтому мы не будем обсуждать его в нашем курсе. Заметим лишь то, что для квантового мира уравнение Шредингера играет ту же роль, что законы Ньютона для мира классического.

Уравнение Шредингера и Периодическая система элементов Менделеева

Многообразие нашего мира объясняется огромным разнообразием элементов, существующих во Вселенной. В настоящее время науке известно более 110 элементов с уникальными физико-химическими свойствами.

Мы знаем, что атом любого вещества состоит из положительно заряженного ядра, окруженного облаком электронов. Ядро, в свою очередь, состоит из некоторого количества протонов, заряженных положительно, и нейтронов, не имеющих никакого заряда. Атомы стабильны потому, что в своем основном состоянии они энергетически нейтральны, то есть положительный заряд ядра полностью скомпенсирован суммарным зарядом электронов (число протонов в ядре атома равно числу электронов на его орбиталях).

Ученые всегда стремились упорядочить все разнообразные элементы в некую единую логическую схему. Самой удачной попыткой сделать это оказался принцип, предложенный в 1869 году русским ученым Д.И. Менделеевым, который лег в основу современной Периодической системы элементов.

В таблице Менделеева элементы расположены в порядке возрастания их **атомных номеров** (числа протонов в ядре). Например, атомный номер водорода равен единице. Это говорит о том, что ядро атома водорода состоит из одного протона, вокруг которого вращается единственный электрон.

Элементы распределены по горизонтальным рядам, называемым **периодами**, и вертикальным столбцам, называемым **группами**. Такое распределение основывается на некоторой общности физико-химических свойств элементов, которые периодически изменяются в соответствии с их атомным номером. Например, все элементы первой группы (кроме водорода) являются *щелочными металлами*, а все элементы восьмой группы представляют собой *благородные газы*.

Все это здорово, но при чем же здесь уравнение Шредингера? Мы помним, что согласно принципу Паули, электронная оболочка атома не может одновременно содержать два электрона в одном и том же состоянии. А поскольку число электронов в некоторых атомах достигает десятков и даже сотен, то возникает естественный вопрос: как же они все там расположены?

Решение волнового уравнения Шредингера позволило вычислить четыре параметра, которых достаточно, чтобы полностью охарактеризовать состояние любого отдельно взятого электрона. Эти параметры получили название “четыре квантовых числа”. Полученная квантовая четверка — своего рода “паспорт”, однозначно идентифицирующий каждый электрон в атоме.

Главное квантовое число (число n) характеризует *оболочку*, в которой находится электрон. Оно соответствует повышающимся энергетическим уровням оболочек.



Рис 41. Схема атома с двумя энергетическими оболочками

Чем больше число n , тем дальше электрон отстоит от ядра и тем выше его энергия. Выделяют четыре энергетических оболочки: $K(n=1)$, $L(n=2)$, $M(n=3)$ и $N(n=4)$.

Но одного деления на оболочки для полного описания состояния электрона недостаточно. Дело в том, что каждая энергетическая оболочка атома может “вмещать в себя” разное количество электронов. Понятно, что для того, чтобы обеспечить их уникальность (согласно принципу Паули), каждая оболочка должна разбиваться еще на несколько подоболочек, получивших название *орбиталей*.

Орбитальное квантовое число (число l) определяет *форму* электронных орбиталей.

Решение уравнения Шредингера позволило вычислить формы всех существующих видов электронных орбиталей. Их всего четыре: s -, p -, d - и f -орбитали. На рисунке изображен вид s -, p - и d -орбиталей. S -орбиталь имеет сферическую форму, p -орбиталь — форму гантелей, d -орбиталь похожа на трехмерный четырехлепестковый цветок.

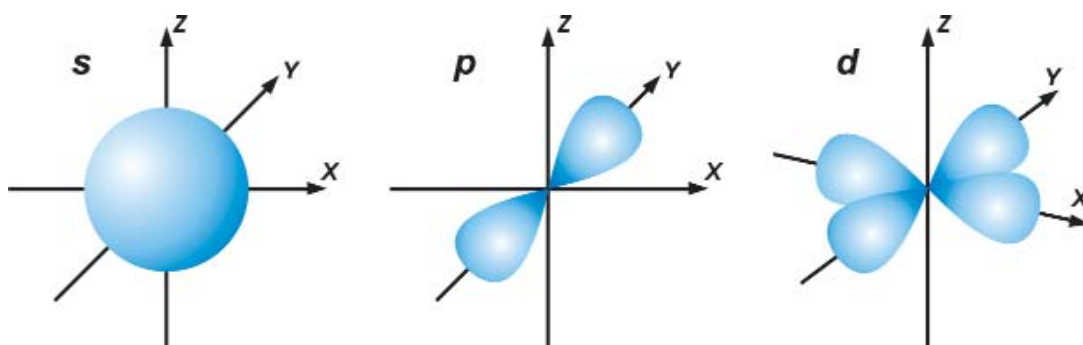


Рис 42. Форма s -, p - и d - орбиталей

Каждому типу орбитали соответствует определенная энергия электрона. При переходе с одной орбитали на другую электрон испускает излучение, характерное для соответствующего типа линий в атомном спектре, откуда, собственно, и произошло их название:

s-орбиталь соответствует “резкой” (sharp) *s*-линии атомного спектра;

p-орбиталь соответствует “главной” (principal) *p*-линии;

d-орбиталь соответствует “диффузной” (diffuse) *d*-линии;

f-орбиталь соответствует “фундаментальной” (fundamental) *f*-линии;

Энергетические уровни оболочек содержат в себе разное количество орбиталей. На рисунке показано относительное расположение энергетических уровней орбиталей, принадлежащих первым четырем электронным оболочкам:

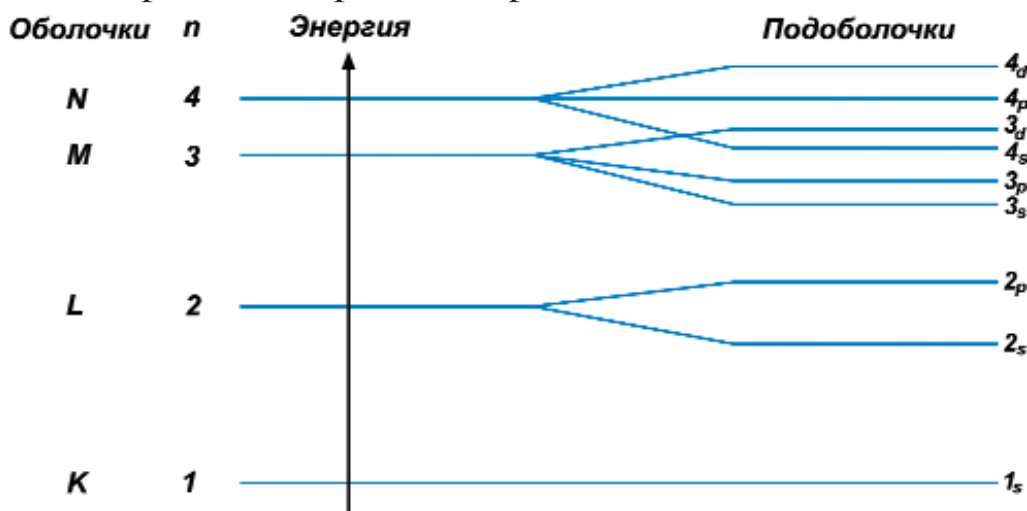


Рис 43. Порядок расположения атомных орбиталей и оболочек

Так, первая *K*-оболочка содержит только одну *s*-орбиталь. Следовательно, на первом энергетическом уровне может “жить” либо один, либо два электрона. Вторая оболочка включает не только *s*-, но и 3 *p*-орбитали. Здесь обитают уже $2+6=8$ электронов и т.д. Обратите внимание на особенность *4s*-подоболочки: ее энергетический уровень расположен чуть ниже *3d*-подоболочки.

Магнитное квантовое число (число *m*) отражает влияние внешнего магнитного поля на состояние электрона и определяет ориентацию орбиталей в пространстве

Электрон — это не только отрицательно заряженная частица, но еще и миниатюрный магнит, подобный стрелке компаса

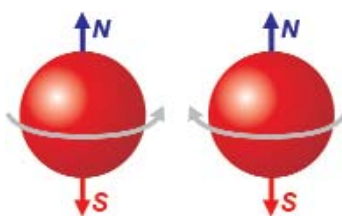


Рис 44. Магнитные полюсы электрона

с северным и южным полюсами. Электрон нельзя размагнитить, но зато можно поворачивать в пространстве, воздействуя на него внешним электромагнитным полем.

Число m также показывает максимально возможное число орбиталей для каждой оболочки l .

Всего на оболочке может быть:

- одна s –орбиталь;
- три p –орбитали;
- пять d – орбиталей;
- семь f – орбиталей.

Давайте теперь пристальнее посмотрим на один отдельно взятый электрон. Он, подобно планете Солнечной системы, вращается не только вокруг положительно заряженного ядра, но и вокруг собственной оси. Поэтому одной из важнейших характеристик при описании электрона является его спиновое квантовое число.

Спиновое квантовое число (число s), показывает направление собственного момента вращения, который называется *спином* (от англ. “spin” — вращаться). Вращаться электрон может только в двух состояниях: по часовой стрелке, “спин вверх” ($s=+1/2$), и против часовой стрелки, “спин вниз” ($s=-1/2$).

Итак, принимая во внимание приведенные выше сведения, принцип запрета Паули можно переписать следующим образом:

Никакие два электрона в атоме не могут иметь одинаковые наборы четырех квантовых чисел.

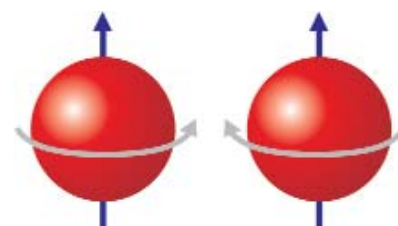


Рис 50. Спин электрона. Пару электронов с противоположными спинами изображают стрелками $\uparrow\downarrow$

Электронная конфигурация элемента - это запись распределения электронов в атоме по оболочкам и орбиталям. Она обычно записывается для атомов в основном состоянии согласно следующим правилам:

1. Электроны заполняют орбитали последовательно, от меньшего энергетического уровня к большему. Низшие по энергии орбитали всегда заполняются первыми.

Например:

Водород, атомный номер = 1, число электронов = 1

Этот единственный в атоме водорода электрон должен занимать s -орбиталь K -оболочки, поскольку из всех возможных орбиталей она имеет самую низкую энергию. Электрон на этой орбитали называется $1s$ электрон.

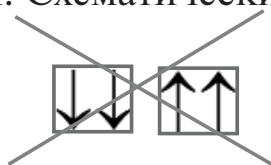
Следовательно, электронная конфигурация водорода в основном состоянии: $1s^1$.

2. На любой орбитали может находиться не более двух электронов, и то лишь в том случае, если они имеют противоположные спины.

Например:

Литий, атомный номер = 3, число электронов = 3

Орбиталь с самой низкой энергией — это $1s$ -орбиталь. Она может принять на себя только два электрона с неодинаковыми спинами. Схематически это записывается так:



— запрещенное расположение спинов.

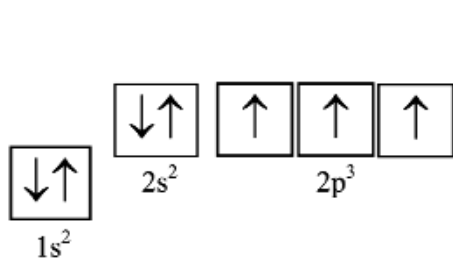
Третий электрон в атоме лития должен занимать орбиталь, следующую по энергии за самой низкой орбиталью, т.е. $2s$ -орбиталь. Таким образом, литий имеет электронную конфигурацию: $1s^2 2s^1$.

3. Заполнение орбиталей одной подоболочки начинается одиночными электронами с параллельными (одинаковыми по знаку) спинами, и лишь после того, как одиночные электроны займут все орбитали, может происходить окончательное заполнение орбиталей парами электронов с противоположными спинами.

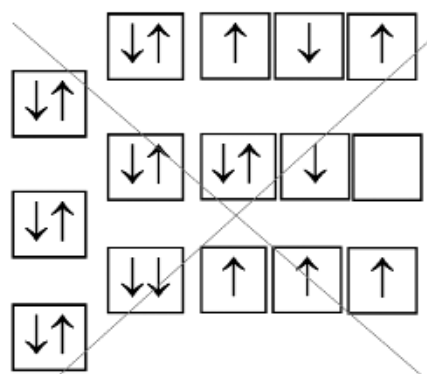
Например:

Азот, атомный номер = 7, число электронов = 7

Азот имеет электронную конфигурацию $1s^2 2s^2 2p^3$. Три электрона, находящиеся на $2p$ -подоболочке, должны располагаться поодиночке на каждой из трех $2p$ -орбиталей. При этом все три электрона должны иметь параллельные спины.



Разрешенная конфигурация электронов



Три неразрешенные конфигурации электронов

Современная наука считает все электроны стандартными, поэтому если поменять два любых электрона местами, конфигурация системы не изменится. В таблице представлены электронные конфигурации элементов с атомными номерами от 1 до 20:

Атомный номер	Элемент	Электронная конфигурация	Атомный номер	Элемент	Электронная конфигурация
1	Водород	$1s^1$	11	Натрий	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
2	Гелий	$1s^2$	12	Магний	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
3	Литий	$1s^2 2s^1$	13	Алюминий	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
4	Бериллий	$1s^2 2s^2$	14	Кремний	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
5	Бор	$1s^2 2s^2 2p^1$	15	Фосфор	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
6	Углерод	$1s^2 2s^2 2p^2$	16	Сера	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
7	Азот	$1s^2 2s^2 2p^3$	17	Хлор	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
8	Кислород	$1s^2 2s^2 2p^4$	18	Аргон	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
9	Фтор	$1s^2 2s^2 2p^5$	19	Калий	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
10	Неон	$1s^2 2s^2 2p^6$	20	Кальций	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$

Табл 4. Электронные конфигурации первых 20-ти элементов Периодической системы

Из таблицы видно, что электронные конфигурации элементов отличаются периодичностью, что и отображено в таблице Менделеева. Например, все элементы одного периода имеют одинаковый электронный остов (внутренние электронные оболочки) и отличаются лишь количеством электронов, находящихся на подоболочках с самой высокой энергией.

А все элементы, принадлежащие какой-либо группе, имеют характерную для нее электронную конфигурацию высшей по энергии оболочки. Например, для I группы характерна конфигурация Ns^1 , где N – номер периода; для II группы – конфигурация Ns^2 , для III группы – $Ns^2 p^1$ и так далее, до группы 0(VIII), все элементы которой имеют конфигурацию $Ns^2 p^6$.

	Группы							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII(0)
Характерная конфигурация	s^1	s^2	s^2p^1	s^2p^2	s^2p^3	s^2p^4	s^2p^5	s^2p^6
2-й период	$2s^1$	$2s^2$	$2s^22p^1$	$2s^22p^2$	$2s^22p^3$	$2s^22p^4$	$2s^22p^5$	$2s^22p^6$
3-й период	$3s^1$	$3s^2$	$3s^23p^1$	$3s^23p^2$	$3s^23p^3$	$3s^23p^4$	$3s^23p^5$	$3s^23p^6$
4-й период	$4s^1$	$4s^2$	$4s^24p^1$	$4s^24p^2$	$4s^24p^3$	$4s^24p^4$	$4s^24p^5$	$4s^24p^6$

Табл. 5. Электронная конфигурация высшей по энергии подоболочки у элементов различных групп

Электронная конфигурация элементов VIII группы называется *устойчивой*, поскольку при этом внешняя оболочка их атомов заполнена полностью. Элементы этой группы получили название “инертных” или “благородных” газов, поскольку из-за своей устойчивой электронной конфигурации при обычных условиях они практически не образуют химических соединений. Подробнее о механизме образования химических связей можно прочесть в главе, посвященной нанохимии.

Квантовые размерные эффекты

В нашей вводной лекции мы познакомились с понятием ультрадисперсности и убедились, что с уменьшением размера частиц какого-либо вещества его физические и химические свойства могут существенно меняться. Это происходит из-за того, что ход физических процессов зависит не только от свойств самого вещества, но и от геометрии той области пространства, в которой они протекают — грубо говоря, от “размеров” этой области. Для наглядной иллюстрации этой идеи приведем следующую аналогию: представим, что в узком переулке нужно развернуться какому-то транспортному средству. Очевидно, что мотоциклисту это будет сделать легче, чем водителю тяжелого КАМАЗа.

Размерные эффекты в твердых телах — это явление, наблюдающееся в условиях, когда геометрические размеры объекта сравнимы с той или иной из длин, определяющих протекание физических процессов (например, длиной свободного пробега носителя заряда, длиной волны де Бройля и т.д.).

В зависимости от размеров исследуемого образца различают классические и квантовые размерные эффекты, которые могут влиять практически на любые свойства вещества. Понятно, что для нанометровых объектов, где размеры частиц срав-

ними с де Бройлевской длиной волны электрона, характерны именно квантовые размерные эффекты, определяющие такие свойства вещества, как теплоемкость, электропроводность некоторые оптические свойства и т.п.

Самым ярким представителем квантовых размерных эффектов является туннельный эффект — явление, играющее важную роль в нанотехнологии. Сущность туннельного эффекта заключается в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера. Это явление чисто квантовое, ведь классическая частица не может находиться внутри потенциального барьера высоты V , если ее энергия $E < V$, так как кинетическая энергия частицы становится при этом отрицательной, а ее импульс — мнимой величиной.

$$\frac{p^2}{2m} = E - V$$

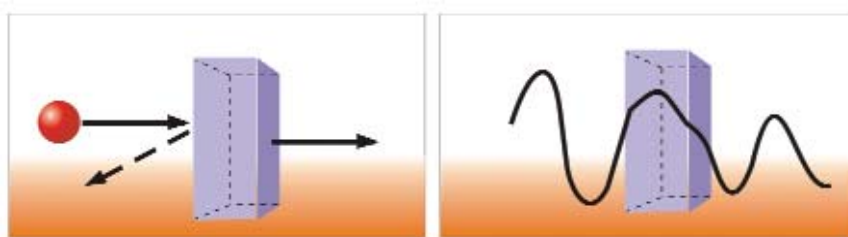


Рис 21. Условная схема туннельного перехода

Однако для микрочастицы этот вывод не справедлив: вследствие соотношения неопределенностей фиксация частицы внутри барьера делает неопределенным ее импульс.

Поскольку потенциальная энергия частицы однозначно определяется ее координатой, кинетическая энергия - импульсом, а в силу соотношения неопределенностей одновременно и точно координату и импульс частицы определить невозможно, то разделение энергии на кинетическую и потенциальную в квантовой физике бессмысленно. Соответственно, появляется вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер.

Феномен туннелирования открыл в 1928 году наш соотечественник Г. А. Гамов, впервые получив решения уравнения Шредингера, описывающие возможность преодоления частицей энергетического барьера, даже если ее энергия меньше вы-

соты барьера. Найденное решение объясняло многие экспериментально наблюдавшиеся процессы и позволило понять большой круг явлений, происходящих при вылете частицы из ядра — основы атомной науки и техники. Многие считают, что за грандиозность результатов его работ, ставших основополагающими для многих наук, Г. А. Гамов должен был быть удостоен нескольких Нобелевских премий.

И лишь спустя тридцать лет после открытия Гамова появились первые приборы на основе туннельного эффекта: туннельные диоды, транзисторы, датчики, термометры для измерения сверхнизких температур, и, наконец, сканирующие туннельные микроскопы, положившие начало современной нанотехнологии.

Почему нельзя смешивать законы классической и квантовой физики

В квантовой механике широко используется *принцип суперпозиции*. Это означает, что результат действия двух или более волн может быть получен суммированием действий каждой из волн в отдельности. Согласно этому допущению, если квантомеханическая система может находиться в нескольких состояниях, описываемых, соответственно, волновыми функциями $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$, то физически допустимой будет и суперпозиция (суммирование, наложение) этих состояний, то есть состояние, изображаемое волновой функцией

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 + c_3\psi_3 + \dots + c_n\psi_n$$

где $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ — вероятность нахождения системы в состояниях $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n$ соответственно. Операция суммирования в теории вероятности соответствует логическому “или”, а операция умножения — логическому “и”. Поэтому для простоты восприятия суперпозицию вида $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ можно читать так: *система N находится в состоянии ψ , если она находится либо в состоянии ψ_1 , либо в состоянии ψ_2 .*

Таким образом, любая сложная волновая функция может быть представлена в виде совокупности нескольких более простых функций

Возможность состояний, в которых данная физическая величина не имеет определенного значения, а определяется суперпозицией вероятных состояний данной величины, является *характерной чертой квантовой механики, принципиально отличающей ее от механики классической*. Описать такое “смешанное” состояние одной частицы на языке классической механики невозможно.

Поэтому ошибочно рассматривать (даже теоретически) физические системы, в которых формально объединены как классические, так и квантовые объекты, поскольку такие системы некорректны для исследования — в них обнаруживаются неразрешимые противоречия. Одно из них демонстрирует предложенный Э.Шредингером “*парадокс кошки*”.

Пусть в замкнутой системе, ограниченной некоторым непроницаемым “ящиком”, находится кошка. На кошку направлен ствол заряженного ружья. И ружье и кошка — это классические объекты. Запустим теперь в этот ящик движущуюся микрочастицу, обладающую волновыми свойствами. При попадании этой частицы в курок ружья оно стреляет, и кошка погибает.



Рис 47. Кошка Шредингера в непроницаемом ящике

Пусть наша частица может находиться в первом квантовом состоянии, описываемом волновой функцией Ψ_1 , и пусть в этом состоянии вероятность обнаружить частицу вблизи курка равна нулю. Это значит, что если частица находится в первом квантовом состоянии, то кошка в ящике жива.

Есть и другое состояние частицы, описываемое волновой функцией Ψ_2 . В этом квантовом состоянии вероятность нахождения частицы в области вблизи курка ружья очень велика и практически равна единице. Таким образом, если частица находится во втором состоянии, то кошка мертва.

По принципу суперпозиции состояний микрочастица может находиться и в состоянии, которое является суперпозицией первого и второго состояний и описывается волновой функцией

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_2$$

Тот факт, что частица в таком состоянии с равной вероятностью может быть обнаружена либо в состоянии 1, либо в состоянии 2, возражений не вызывает. Однако возникает коварный вопрос: Жива или мертва кошка в таком состоянии?

Ведь кошка не может находиться в состоянии, которое является суперпозицией жизни и смерти (то есть одновременно быть “ни живой, ни мертвой”). Так жива или мертва кошка? Ведь если мы откроем ящик, то однозначно увидим, что кошка или жива, или мертва. И если она мертва, то когда это произошло? Ведь до открытия ящика уверенности в том, что кошка мертва, не могло быть. Неужели мы убили кошку тем, что открыли ящик?!

На эти вопросы нет ответов только потому, что была рассмотрена некорректная система, формально объединяющая классические и квантовые объекты.

Эффекты квантовой физики, обеспечивающие реализацию эталонов основных единиц измерения физических величин системы СИ

Формально, чисто количественно, развитие нанотехнологий можно охарактеризовать как переход человечества от манипулирования величинами порядка “микро” (10^{-6}) — микрометр, микроампер, микросекунда и т.д. — к величинам порядка “нано” (10^{-9}) — нанометр, наноампер, наносекунда и т.д. Такой переход требует наличия новых единиц измерения физических величин и их в тысячу раз более точных эталонов.

Система единиц физических величин строится на основе физических теорий, отражающих существующие в природе взаимосвязи между ними. Это позволяет определять новые единицы физических величин через совокупность ранее определенных единиц, и, в конечном счете, через основные (независимые) единицы системы. В качестве основных выбирают едини-

цы, которые могут быть воспроизведены эталонами или эталонными установками с наивысшей точностью, соответствующей уровню развития науки и техники в данную эпоху.

Эталоны — это такие средства измерения, которые обеспечивают воспроизведение и хранение узаконенных единиц измерения физических величин, а также передачу их размера другим средствам измерения.

Без эталонов невозможно добиться сопоставимости результатов измерения, выполненных в различное время при помощи разных приборов. Совокупность эталонов образует эталонную базу. В нее входят эталоны основных единиц системы СИ. Рассмотрим некоторые из них.

Эталон метра. Согласно принятому в 1960 году Генеральной конференцией по мерам и весам определению, метр — это длина, равная 1650763,73 длины волны красно-оранжевого излучения атома криптона 86. Эталон метра — это комплекс аппаратуры, включающий интерферометры для точного измерения расстояний. Он позволяет воспроизводить метр со средним квадратическим отклонением не более 0,5 нанометра.

Атомная секунда, воспроизводимая цезиевыми эталонами частоты и времени, равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия. Данный эталон позволяет воспроизводить время с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-12}$ секунды.

Эталоны, основанные на эффекте Джозефсона. Суть эффекта состоит в протекании сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Эффект предсказал теоретически английский студент Б. Джозефсон в 1962 г., за что в 1973 г. он получил Нобелевскую премию. Эффект позволяет чрезвычайно точно измерять слабые магнитные поля (до 10^{-18} Тл), малые токи (до 10^{-10} А) и напряжение (до 10^{-15} В).

В системе СИ есть и другие эталоны, но именно эти связаны с квантовыми эффектами и могут быть использованы для калибровки нанотехнологических средств измерения и аппаратуры.

Квантовые точки, проволоки и плоскости

Одно из промышленных применений нанотехнологий связано с квантовыми точками и плоскостями.

Квантовая плоскость — это многослойная твердотельная структура из тонких пленок различных веществ толщиной в один атом, сложенных одна на другую. Из-за малой толщины пленок в таких структурах начинают проявлять себя квантовые эффекты, которые весьма сильно воздействуют на поведение электронов внутри квантовой плоскости, что позволяет произвольным образом менять физические и химические свойства таких веществ.

Пионером в области создания приборов на таких структурах был русский ученый, академик Жорес Иванович Алферов, ставший в 2002 году Нобелевским лауреатом. Вслед за Нобелевской премией Алферов получил государственную. Его работа “Фундаментальные исследования процессов формирования и свойств гетероструктур с квантовыми точками и создание лазеров на их основе” ознаменовала первый этап нового направления, открывающего широкие перспективы.

Квантовые точки — это крохотные пирамидки в 50-100 атомов одного материала, размещенные на монокристалле другого материала.

Размер одной квантовой точки составляет единицы-десятки нанометров. Электронный спектр идеальной квантовой точки соответствует электронному спектру одиночного атома, хотя реальный квантовый объект при этом может состоять из сотен тысяч атомов. Именно по этой причине квантовые точки называют также “искусственными атомами”.



Рис 48. Квантовая точка

Ввиду малости величины квантовой точки на ее основе можно строить различные полупроводниковые устройства, использующие для своей работы квантовые размерные эффекты.

Лазеры нового поколения, основанные на гетероструктурах с квантовыми точками, прекрасно работают, подтверждая старую истину, что в науке нет нерушимых догм. Ведь долгое время считалось, что вырастить кристалл с кусочками другого материала внутри без дефектов невозможно. То, что сделали сот-

рудники лаборатории Ж.И. Алферова, можно смело назвать революцией в лазерной физике. Если раньше ученые, выращивая кристаллы для лазеров, вынуждены были полностью управлять процессом, то теперь ситуация иная — нужная структура растет сама!

“Все дело в новой технологии выращивания материала”, — говорит академик Алферов. — “Традиционно гетероструктурные материалы, например, из арсенида галия и арсенида индия, получают, накладывая слой за слоем. Много лет назад, начиная эти исследования, мы наносили слои друг на друга вручную. Эта работа требовала огромного внимания и напряжения. Но теперь мы решили эту задачу, и уже сама природа помогает нам получать в процессе выращивания различные ансамбли таких квантовых точек. Дело в том, что если правильно подобрать все параметры: температуру, скорость осаждения, соотношение потоков атомов, то кристалл вырастет без дефектов. И вырастет сам. Это позволяет радикально улучшить свойства полупроводниковых приборов, скажем, температурную стабильность лазерных диодов”.

Один из участников работы Николай Леденцов, выступая на международном семинаре “Нанотехнологии в физике, химии и биотехнологии”, пошутил, что теперь, зная законы роста наноматериалов, можно и поразвлечься: расположить квантовые точки в виде блюдца, сплести бусы из точек, создать большие и маленькие nanoостровки. За этой шуткой большое будущее — варьируя расположение квантовых точек, можно изменять и корректировать свойства кристалла.

Квантовые проволоки — это совокупность квантовых точек, нанесенных с помощью сканирующего микроскопа на кристаллическую подложку. Они позволяют изменять свойства кристаллов и создавать различные электропроводящие пути.

Квантовая механика и компьютер

В настоящее время вычислительная техника подошла к пределу своих возможностей по быстродействию компьютеров и размеру микросхем. Масштаб порядка 0,1 микрон определяет границу применимости законов классической физики, и при дальнейшем увеличении быстродействия и уменьшении

размеров мы попадаем в наномир, где доминируют квантовые размерные эффекты. Поэтому для решения задач конструирования компьютеров нового поколения требуется принципиально новый подход.

В последние годы стала широко обсуждаться идея использования квантовых эффектов для хранения и обработки информации, поэтому квантовые точки привлекают все большее внимание. Электроны в квантовой точке локализованы, поэтому энергетический спектр квантовой точки является дискретным, как у отдельно взятого атома.

Мы привыкли к тому, что ЭВМ оперирует с числами, выраженными в двоичной форме, то есть состоящими только из нулей и единиц. На заре вычислительной техники логические элементы ЭВМ выполнялись на основе реле (ключ разомкнут — 0, ключ замкнут — 1), потом на смену реле пришли электронные лампы, а затем — полупроводниковые структуры. Все перечисленные электронные устройства являются, по сути дела, объектами макромира, поскольку для выполнения ими своих функций требуется наличие макроскопического (многие миллионы и даже миллиарды) числа электронов.

Давайте теперь пристальнее посмотрим на один отдельно взятый электрон. Он обладает одной удивительной характеристикой — *спином*, или собственным моментом вращения. Вращаться электрон может только в двух состояниях: “спин вверх” ($S=+1/2$) и “спин вниз” ($S=-1/2$). Такое впечатление, что сама Природа говорит нам: “Вот он, электрон, - естественный кандидат для представления чисел в двоичной форме”. Действительно, приписав электронам со спином вниз и вверх соответственно логический нуль и логическую единицу, мы можем каждой конкретной спиновой конфигурации системы электронов поставить в соответствие определенный набор таких нулей и единиц, то есть определенное число, записанное в двоичной форме, или, другими словами, определенную информацию (при этом один электрон является носителем одного бита информации).

Наличия соответствия между знаком спина электрона и логическими переменными (нулями и единицами) недостаточно для конструирования конкретных вычислительных схем и устройств. Пока это лишь голая идея. Нужно придумать какие-то

реальные способы ввода, хранения, обработки и вывода спиновой информации. И, прежде всего, нужно научиться локализовать отдельные электроны в небольших областях пространства (чем меньше будут размеры этих областей, тем выше будет плотность информации, и тем больше логических элементов мы сможем разместить в единице объема или на единице площади).

На современном уровне развития технологии для этой цели как нельзя лучше подходят квантовые точки. В каждую пирамидку из атомов можно внедрить произвольное число электронов. При этом движение электрона в квантовой точке будет ограничено во всех трех направлениях и энергетический спектр является полностью дискретным, как в отдельном атоме.

Таким образом, дискретность электронных состояний в квантовой точке и наличие у него собственного вращательного момента — спина — могут быть использованы при конструировании сверхминиатюрных логических элементов, которые в скором времени, будем надеяться, станут основой нового поколения ЭВМ. Компания HP уже провозгласила стратегию создания наноэлектроники на основе квантовых эффектов и молекулярных компьютеров.

Сверхпроводимость и сверхтекучесть

Собственным моментом вращения обладаю не только электроны, но и другие элементарные частицы, которые в зависимости от их спина делятся на два вида - фермионы и бозоны. ***Фермионами*** называются частицы, имеющие полуцелое значение спина (например, электроны), а ***бозонами*** - частицы с целым спином (например, фотоны). Принцип Паули, по которому две одинаковые частицы не могут находиться в одном и том же состоянии, справедлив для всех фермионов, но бозоны его начисто игнорируют: в одном состоянии может находиться сколько угодно бозонов!

При глубоком охлаждении некоторых металлов электроны их атомов с противоположными спинами, преодолевая электрическое отталкивание, объединяются в пары, называемые *куперовскими* (по имени их первооткрывателя). Эти пары, в отличие от отдельных электронов, обладают нулевым суммарным спином и поэтому являются бозонами. Такие частицы облада-

ют замечательным свойством: если температура ниже некоторого критического значения, они могут скапливаться на самом нижнем энергетическом уровне (в основном состоянии). Чем больше их там соберется, тем труднее какой-либо частице выйти из этого состояния. Все пары при этом когерентны, то есть описываются единой волновой функцией. Тогда электрический ток переносится не отдельными электронами, а куперовскими парами, то есть квантами тока с зарядом $2e$ (e - заряд электрона). Если в обычном проводнике электроны постоянно натыкаются на дефекты кристаллической решетки, примесные атомы и т.п., мешающими прохождению тока, то с когерентными куперовскими парами этого не происходит. Грубо говоря, они могут проходить через любые преграды и даже друг через дружку! Это сводит электрическое *сопротивление* проводника к нулю, и, например, возбужденный в сверхпроводящем кольце ток может крутиться в нем бесконечно долго.

Электрический ток в сверхпроводнике напоминает ток, создаваемый электроном на орбите в атоме Бора: это как бы очень большая электронная орбита.

В 1911 году Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость ртути, а в 1957 году Бардин, Купер и Шриффер создали свою знаменитую теорию сверхпроводимости. В 1933 году Мейснер и Оксенфельд показали, что сверхпроводники полностью выталкивают линии магнитного поля из своего объема - это так называемый эффект Мейснера: постоянный магнит парит (левитирует) над сверхпроводящим диском (см. фото).



Рис 49. Эффект Мейснера *

* Перепечатано с www.phys.pe.kr

Сверхпроводники позволят создать сверхмощные магниты, не требующие электрического питания, сверхчувствительные сенсоры, электронику, не нуждающуюся в охлаждении и многое другое. Кстати, в отличие от Шредингера кота, электрический ток в сверхпроводнике вполне подчиняется квантовым законам суперпозиции различных состояний: ученым удалось создать замкнутое кольцо, по которому ток одновременно течет и по часовой, и против часовой стрелки!

При понижении температуры многие металлы и сплавы переходят в сверхпроводящее состояние. Этот переход происходит при определенной для каждого материала температуре, называемой критической. Однако практическое использование замечательных свойств сверхпроводников тормозится их потребностью в сверхнизких температурах и, соответственно, громоздких криогенных установках. Исследования в области наноматериалов позволили создать специальные вещества (нанокерамику, нанотрубки и т.п.), которые являются сверхпроводниками при сравнительно высоких температурах. Широкое распространение высокотемпературных сверхпроводников приведет к огромной экономии электроэнергии, уменьшению и удешевлению всех электрических устройств.

Объединяться в бозоны могут не только электроны. В 1938 году советский ученый П.Л. Капица открыл явление сверхтекучести гелия. При температурах, близких к абсолютному нулю, у гелия исчезает вязкость и он становится *сверхтекучим*. Сверхтекучий гелий так и норовит улизнуть: если налить его в обычный глиняный кувшин, он утечет сквозь тончайшие поры в его структуре. Если налить сверхтекучее вещество в сосуд из более плотного материала, то в виде тонкой пленки он потечет вверх по стенкам и далее опять таки через край. Его невозможно заморозить никаким понижением температуры и даже

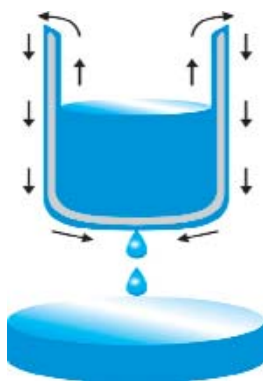


Рис 50. Сверхтекучесть жидкого гелия

нельзя создать разность температур — сверхтекучесть приводит к сверхтеплопроводности.

Квантовая телепортация

Издавна люди мечтали о *телепортации* — мгновенном перемещении в пространстве. Герои народных сказок оказываются

в тридевятом царстве, надев волшебное колечко, а компьютерные игры и фантастика кишат “порталами” и “прыжками в гиперпространстве”. Ну, казалось бы, здесь-то причем нанотехнология со своими пылинками?

Известен так называемый *парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена* (ЭПР-парадокс), заключающийся в том, что если после взаимодействия двух квантовых частиц провести наблюдения за одной из них, то мгновенно изменятся параметры другой, уже далеко отлетевшей частицы. Эксперименты показали, что частицы проявляют удивительную взаимосогласованность даже на таких больших расстояниях, на которых они никак не могли бы повлиять на друга с точки зрения классической теории. Дело в так называемой “нелокальности” волновой функции для системы из нескольких частиц — несмотря на то, что частицы уже далеко друг от друга, вероятности нахождения их в том или ином состоянии остались взаимосвязанными после квантового взаимодействия. Это казалось фантастикой, пока Антон Цойлингер и Франческо де Мартини не передали состояние поляризации между двумя фотонами при помощи третьего на расстояние 10 км.

Достигнув успехов в телепортации фотонов, экспериментаторы уже планируют работы с другими частицами: электронами, атомами и ионами. Телепортация сможет обеспечить надежную передачу и хранение данных на фоне мощных помех, когда все другие способы оказываются неэффективными. Возможно, в будущем сети квантовой телепортации получат такое же распространение, как современные телекоммуникационные сети.

Но передачей информации на расстояние уже никого не удивишь, а как же материальные объекты? Обычно полагают, что переместить какой-либо объект или даже человека — значит переместить все частицы, из которых он состоит. Но, поскольку квантовые частицы неотличимы друг от друга, их можно не перемещать, а “собрать” телепортируемый объект из новых частиц на основе полученной информации (например, при помощи молекулярных сборщиков — ассемблеров). Следовательно, телепортация объекта есть телепортация квантовых состояний частиц и воссоздание их на удаленном расстоянии.

Так можно было бы и копировать объекты, но в силу всеобщего принципа неопределенности чем больше получено ин-

формации о некотором объекте, тем больше искажений вносится в этот объект — и так до тех пор, пока исходное состояние не будет разрушено полностью. Как только будет считана вся нужная информация, объект исчезнет и снова появится на свет только после квантовой сборки.

Вместо заключения или некоторые замечания по поводу вероятностной интерпретации квантовых явлений

Экспериментальные подтверждения справедливости квантовой механики столь убедительны, что должны были развеять всякое недоверие к ней. Но остаются сомнения в плане философском: хорошо известно, что Эйнштейн, Шредингер и де Бройль, которые были творцами новой механики, высказывались против понимания сущности теории на основе принципа неопределенности. “Бог не играет в кости”, — так Эйнштейн отзывался о вероятностной трактовке волновой функции.

Но в своей работе физики всегда имеют дело с несовершенными теориями, справедливыми только для ограниченного круга явлений, ровно до тех пор, пока кто-нибудь не открывает новые явления, вынуждающие их выходить за рамки старых теорий и строить новые. Так, две с половиной тысячи лет назад, атом считался неделимым; вплоть до XV века человечество пребывало в абсолютной уверенности относительно того, что Земля плоская. До рождения Ньютона многие природные закономерности также описывались лишь в терминах вероятности.

В наше время пока нет ни конкретных предложений, как преодолеть рубежи квантовой механики, ни экспериментальных данных, указывающих на такую возможность. Но все же квантовая механика (вне всяких сомнений!) будет, в конце концов, превзойдена, и приоткроется перед людьми завеса неопределенности, скрывающая сегодня тайны квантового мира.

Итак, повторим еще раз:

- Разделение физики на классическую и квантовую произошло в начале XX века. Оба направления решают сходные задачи (устанавливают законы взаимодействия физических тел), но различаются природой изучаемых объектов (макротела, субатомные частицы)

- Предпосылкой для такого разделения послужил спор между Ньютоном и Гюйгенсом, касаемо природы света. Ньютон принимал свет за поток световых частиц, а Гюйгенс — за волновой процесс. Дальнейшее развитие науки доказало, что правы были оба физика. Разрешил данное противоречие Макс Планк, введя в 1900 году понятие “кванта”.

- “**Квант**” означает “наименьшее количество”, на которое может измениться дискретная физическая величина.

- Суть гипотезы Планка: атомы вещества испускают свет в виде отдельных порций (квантов). Энергия отдельного кванта пропорциональна частоте световой волны:

$$E = \hbar \cdot \nu$$

где E — энергия кванта света, называемого также фотоном;
 ν — его частота;

$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

- **Постоянная Планка** — это квант действия, т.е. наименьшее действие, возможное в природе. Ввиду малости величины $\hbar$, для макроскопических тел оно не проявляется. Поэтому для описания их взаимодействия достаточно законов классической физики.

- Альберт Эйнштейн доказал, что свет не только испускается, но и поглощается квантами.

- Нильс Бор сформулировал основные постулаты квантовой физики:

1. Дискретный энергетический спектр атома объясняется тем, что каждый электрон находится на собственном энергетическом уровне, соответствующем строго определенной энергии.

2. Электроны могут переходить с одного уровня на другой, поглощая или испуская фотон. Этот принцип лежит в основе работы лазера.

- Согласно *гипотезе де Бройля*, каждой частице, независимо от ее природы, следует поставить в соответствие волну, длина λ которой обратно пропорциональна импульсу частицы, то есть ее массе. Это значит, что для макрочастиц длина волны очень мала и их волновые свойства заметить практически невозможно.

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{m\nu}$$

- Бор и Гейзенберг сформулировали принципы квантовой механики, относящиеся к проблеме точности измерений:

Принцип дополнительности Бора: нельзя точно измерить одну физическую величину микрообъекта без потери информации о величине, дополнительной к ней.

Соотношением неопределенностей Гейзенберга: существуют такие пары физических величин, одновременное и точное определение которых невозможно. (например, координата частицы x и ее импульс)

- Поведение элементарных частиц носит вероятностный характер, описываемый **волновой функцией**. Ее математический смысл соответствует плотности распределения вероятности обнаружить частицу в определенной точке пространства

- Чтобы вычислить волновую функцию, нужно решить **уравнение Шредингера**, которое учитывает влияние внешнего электромагнитного поля на движение частицы, и играет в квантовом мире ту же роль, что законы Ньютона для мира классического.

- Согласно **принципу запрета Паули**, на каждом энергетическом уровне атома в конкретном состоянии может находиться только один электрон.

- **Главное квантовое число (n)** характеризует оболочку, в которой находится электрон. Оно соответствует повышающимся энергетическим уровням оболочек;

- **Орбитальное квантовое число (l)** определяет форму электронных орбиталей;

- **Магнитное квантовое число (m)** определяет ориентацию орбиталей в пространстве;

- **Спиновое квантовое число (s)**, показывает собственный момент вращения электрона: по часовой стрелке ($s=+1/2$), или против часовой стрелки ($s=-1/2$);

- **Квантовые размерные эффекты** наблюдаются в условиях, когда геометрические размеры объекта сравнимы с характеристиками длин, определяющих протекание физических процессов. Квантовыми эффектами объясняются такие удивительные явления, как туннелирование электронов сквозь высокий потенциальный барьер, сверхтекучесть, сверхпроводимость, квантовая телепортация и т.п.

- Согласно *принципу суперпозиции* любую сложную волновую функцию можно представить в виде совокупности более простых функций. Это принципиально квантовомеханическое явление, неприемлемое для классической физики, о чем красноречиво говорит “парадокс кошки”.
- Многие эффекты квантовой физики обеспечивают реализацию эталонов основных единиц измерения физических величин системы СИ.
- Ввиду малости величин, с которыми ей приходится иметь дело, нанотехнология практически целиком построена на квантовомеханических законах. Большое значение здесь имеют *квантовые точки, проволоки и плоскости*, уникальные свойства которых определяются как раз квантовыми эффектами. В частности, в последние годы стала широко обсуждаться идея использования квантовых эффектов для создания компьютеров нового поколения — квантовых, где в качестве логических констант предполагается использовать значения спина электронов.

Глава 3. Нанохимия и наноматериалы

“Алхимики искали только золото, но открыли вместо него порох, фарфор, целебные средства и ряд законов природы”.

А. Шопенгауэр

Химическая связь

Каждый из нас лепил в детстве из пластилина, вырезал бумажные фигурки и склеивал их между собой, пришивал пуговицу... Так или иначе, все мы понимаем, что объекты окружающего нас мира удерживаются вместе не “абы как”, а с помощью каких-то дополнительных сил. Эти силы заметно различаются в зависимости от своей природы: в одном случае это нитка, соединяющая вместе кусочки ткани, в другом — всемирное тяготение, в третьем — клей, глина и т.п. В мире атомов и молекул роль такого универсального “клея”, связывающего их между собой, выполняет *химическая связь*. Природа химической связи объясняется силой электрического притяжения между отрицательными электронами и положительными ядрами.

Химия - наука о составе, строении, свойствах веществ и их превращениях, основанная на общих принципах физики.

Подобно тому, как разные виды клея различаются прочностью, сила химической связи также неодинакова для разных веществ. Об этом свидетельствует наш повседневный опыт: одни вещества легко разрушаются при малейшем воздействии (например, соль растворяется в воде), так как связи между их атомами очень слабы. Атомы других веществ связаны сильнее, но и они поддаются деформации (например, металлы, которые можно гнуть и ковать); третьи же вещества (алмаз) настолько прочны, что им нипочем ни сверхвысокие температуры, ни давление.

Соль, металл и алмаз являются яркими представителями трех наиболее характерных типов химической связи — *ионной*, *металлической* и *ковалентной*. Обратите внимание, насколько тип связей между атомами и молекулами вещества влияет на его физические и химические свойства.

Атомы вступают в химические связи с единственной целью: *приобрести устойчивую электронную конфигурацию*

(полностью заполнить свою внешнюю электронную оболочку). Впервые эту гипотезу выдвинули в 1916 г. ученые Коссель и Льюис, а впоследствии она была доказана и экспериментально.

В главе, посвященной квантовым явлениям, говорилось о том, что атомы так называемых “благородных газов” (гелия, неона, аргона и др.) упорно избегают химических связей. Такая “неприступность” этих элементов обусловлена тем, что каждый из них сам по себе имеет устойчивую электронную конфигурацию. Конфигурация гелия — $1s^2$, а остальных — Ns^2Np^6 , где N — номер соответствующего химического ряда.

В отличие от инертных газов, остальные атомы имеют неустойчивую электронную конфигурацию и охотно вступают в химические связи с другими элементами. Способность образовывать связи называется **валентностью**.

Ионная связь

Ионная связь представляет собой электрическое притяжение между противоположно заряженными ионами (частицами, несущими электрический заряд).

"Ion" в переводе с греческого, означает "идущий" - это подчеркивает, что ионы движутся в электрическом поле.

Согласно гипотезам Планка и Бора, энергия каждого электрона в атоме квантована и принимает лишь определенные значения, соответствующие конкретным энергетическим уровням (орбитам). Электроны могут переходить с одного уровня на другой, поглощая или излучая фотоны. Поглотив фотон, электрон переходит на более высокую орбиту, а сила, связывающая его с ядром, уменьшается.

Если электрону удастся полностью “освободиться” от сил притяжения ядра и покинуть атом, то происходит **ионизация атома**. Атом превращается в положительный ион, именуемый **катионом** и обозначаемый знаком “плюс”.

Na^+ , Ag^+ - катионы натрия и серебра

Если же атом, наоборот, принимает в себя дополнительные электроны, то их избыток превращает его в отрицательный ион — **анион**, который изображается с “минусом”, например:

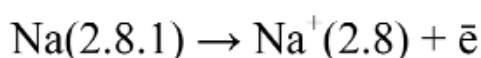
Cl^- , O^- - анионы хлора и кислорода

Напомним, что химическая связь объясняется стремлением атомов приобрести устойчивую электронную конфигурацию, подобную конфигурации “ближайшего” к ним инертного газа. Рассмотрим некоторую последовательность элементов в таблице Менделеева, среди которых имеется неон ($1s^1 2s^2 2p^6$).

В скобках рядом с символом элемента указано число электронов в *K*-, *L*- и *M*-оболочках.

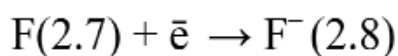


Атом натрия может приобрести устойчивую электронную конфигурацию неона, избавившись от одного электрона.



Образовавшаяся частица — положительно заряженный ион натрия.

У фтора на один электрон меньше, чем у неона. Следовательно, если фтор присоединит один электрон (например, от атома натрия), он приобретает заполненную внешнюю оболочку из восьми электронов:



Между полученными частицами — анионом фтора и катионом натрия — будет действовать сила электростатического притяжения, связывающая их между собой. Это и называется **ионной химической связью**.

Одно из свойств ионных соединений — способность образовывать *кристаллическую решетку*, в узлах которой расположены положительные и отрицательные ионы. Типичный представитель вещества с ионной связью — всем известная поваренная соль. Ее формула — ***NaCl***.

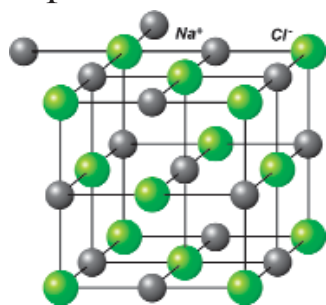


Рис 51. Модель кристаллической решетки хлорида натрия

Большинство ионных соединений легко разрушаются под внешним воздействием или в химических реакциях. На рисунке 52 показано, что происходит, если на ионный кристалл действует деформирующая сила. Небольшие сдвиги в кристаллической решетке сближают одинаково заряженные ионы. При этом силы отталкивания между одноименными зарядами создают трещины в кристалле.

Рисунок 53 хорошо иллюстрирует, что происходит с кристаллами соли, когда им приходится иметь дело с молекулами воды. Атомы, из которых состоит вода имеют разный заряд, (кислород больше и тянет электронное “одеяло” на себя, что делает его отрицательнее, чем водород). Поэтому атомы кислорода притягивают положительно заряженные катионы натрия, а атомы водорода — анионы хлора, растаскивая кристаллическую решетку *NaCl*.

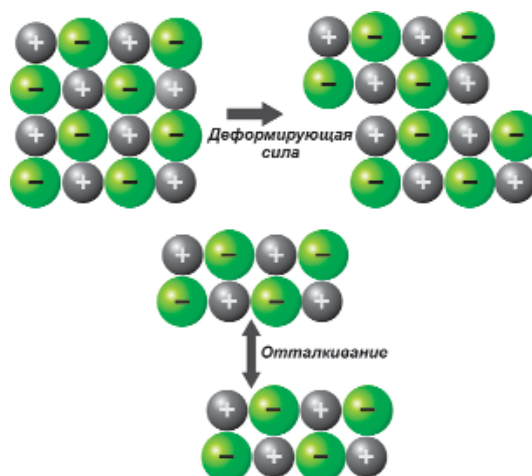


Рис 52.. Схема поведения кристаллической решетки NaCl под действием деформирующей силы

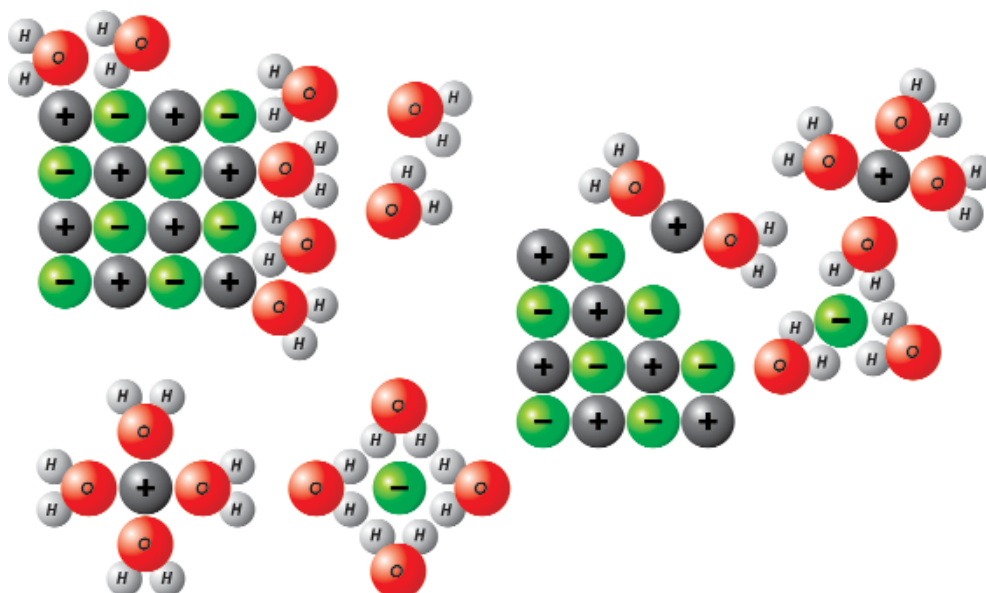


Рис 53. Иллюстрация процесса растворения соли в воде

Ковалентная связь

Ионная связь — не единственный тип химической связи. В молекуле хлора Cl_2 ($3s^2 3p^5$) мы встречаемся с так называемой ковалентной связью между атомами. В такой связи каждый из двух атомов делится с другим одним из своих внешних электронов. При этом оба приобретают восьмой электрон в свою внешнюю оболочку и обретают устойчивую конфигурацию. Каждую ковалентную связь удобно схематически представить палочкой (C-C) или в виде точки и крести-

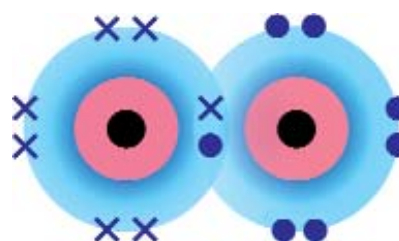


Рис 54. Схема ковалентной связи

ка. Каждая точка или крестик изображают электрон в валентной оболочке атома.

Электроны, образующие общую пару, называются **валентными**. Образую ковалентную связь, они занимают одну и ту же орбиталь, а их спины, согласно принципу Паули, направлены в противоположные стороны. Таким образом, орбитали атомов при ковалентной связи перекрываются между собой.

Для того чтобы орбитали перекрывались, расстояние между атомами должно быть очень маленьким. Этому препятствуют силы отталкивания между их ядрами. Но ковалентная связь достаточно сильна, чтобы удерживать атомы в таком положении. Благодаря этому нелегко оторвать атомы с общей орбиталью друг от друга.

Именно большая энергия ковалентной связи объясняет феноменальную прочность алмаза, в котором каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя другими

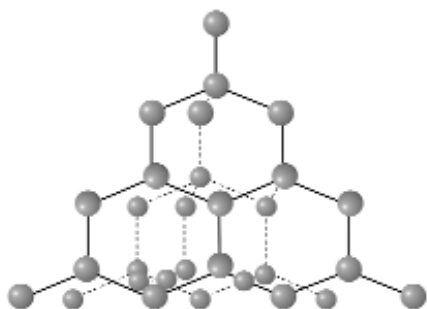


Рис 55. Структура алмаза

Ковалентная связь наиболее характерна для молекул, состоящих из одинаковых атомов (например, H_2 или Cl_2), либо каркасных структур (алмаз). Двойная, и, тем более, тройная ковалентные связи прочнее обычной.

Ионная и ковалентная связи являются двумя предельными случаями множества реально существующих химических связей, которые в действительности имеют промежуточный характер. Однако можно утверждать, что некоторые соединения являются преимущественно ионными, а некоторые — преимущественно ковалентными.

Проводя шутливую аналогию, можно заметить, что стремление атомов отнять, отдать или поделить между собой электроны, чтобы достичь электронной устойчивости, сильно напоминает социальное поведение людей, манипулирующих деньгами для достижения своего комфорта (морального либо материального). Есть “атомы—меценаты”, вступающие в химическую связь путем безвозмездной отдачи “лишних” электронов. В противоположность им существуют и настоящие “рэкетиры”, которые так и норовят оторвать какой-нибудь электрон у зазе-

вавшегося соседа. Но есть и “добропорядочные граждане”, объединяющие свои электроны для совместного достижения электронной устойчивости. В подобном контексте неудивительно, что ковалентная связь гораздо стабильнее, чем ионная, а также обладает гораздо большей энергией (прочностью)!

Впрочем, стоит заметить, что поведение отдельных атомов во многом зависит “от обстоятельств” — в разных реакциях одни и те же вещества (как и люди) могут вести себя совершенно по-разному.

Металлическая связь

Металлы — очень распространенный материал современной промышленности. Большая часть машин, станков, инструментов и транспортных средств изготовлена из металла. Металлы хорошо проводят тепло и электричество, они достаточно прочны, их можно деформировать без разрушения. Некоторые металлы ковкие (их можно ковать), некоторые тягучие (из них можно вытягивать проволоку). Эти уникальные свойства объясняются особым типом химической связи, соединяющей атомы металлов между собой — металлической связью.

Металлы в твердом состоянии существуют в виде кристаллов из положительных ионов, как бы “плавающих” в море свободно движущихся между ними электронов.

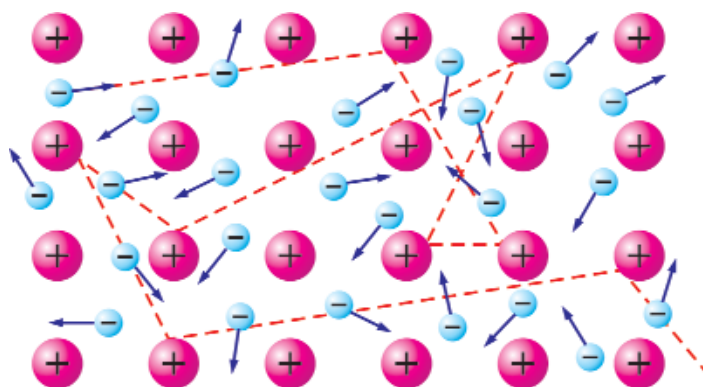


Рис 6. Кристаллическая решетка металла. Показана траектория одного из свободно движущихся электронов

Электроны в металлах *делокализованы*, то есть не принадлежат какому-либо конкретному атому. Как получается такое уникальное электронное “море”?

Когда два атома металла сближаются, орбитали их внешних оболочек перекрываются, образуя *молекулярные орбитали*. Если подходит третий атом, его орбиталь перекрывается с орбиталя-

ми первых двух атомов, что дает еще одну молекулярную орбиталь. Когда атомов много, возникает огромное число трехмерных молекулярных орбиталей, простирающихся во всех направлениях. Вследствие многократного перекрывания орбиталей валентные электроны каждого атома испытывают влияние многих атомов.

Металлическая связь объясняет свойства металлов, в частности, их прочность. Под действием деформирующей силы решетка металла может изменять свою форму, не давая трещин, в отличие от ионных кристаллов.

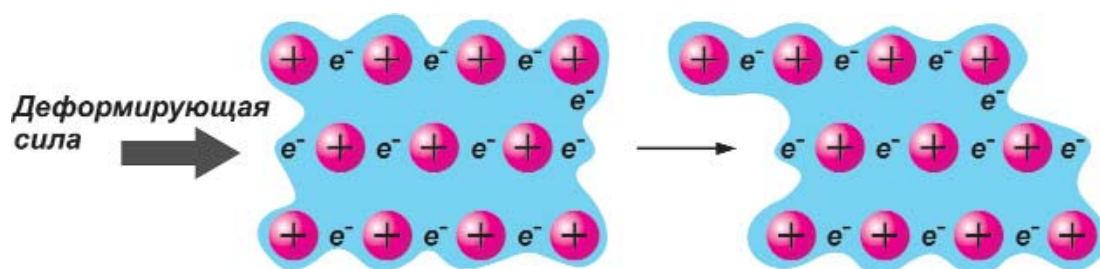


Рис 57. Действие деформирующей силы на кристаллическую решетку металла

Высокая теплопроводность металлов объясняется тем, что если нагреть кусок металла с одной стороны, то кинетическая энергия электронов увеличится. Это увеличение энергии распространится в “электронном море” по всему образцу с большой скоростью.

Становится понятной и электрическая проводимость металлов. Если к концам металлического образца приложить разность потенциалов, то облако делокализованных электронов будет сдвигаться в направлении положительного потенциала: этот поток электронов, движущихся в одном направлении, и представляет собой всем знакомый электрический ток.

Ван-дер-ваальсовы силы

Кроме рассмотренных типов химической связи говорят также о сравнительно слабых силах Ван-дер-Ваальса. В 1873 году этот человек выдвинул предположение о существовании сил межмолекулярного притяжения, подобных тем, что существуют в связях между атомами. В дальнейшем гипотеза подтвердилась — были открыты различные типы межмолекулярного взаимодействия, где

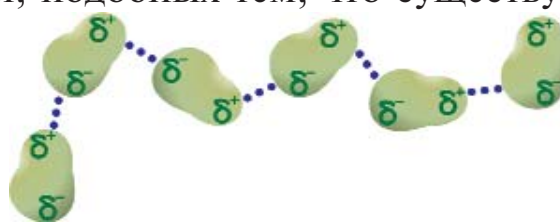


Рис 8. Схема диполь-дипольного притяжения

наиболее распространено так называемое *диполь-дипольное притяжение*.

Некоторые молекулы (преимущественно с ковалентными связями) обладают так называемым *дипольным моментом*. Его суть в том, что в одной части молекулы “скапливается” больше электронов, чем в другой. Это приводит к возникновению разности потенциалов на ее концах. Сила притяжения между различными зарядами связывает молекулы между собой, как показано на рисунке.

В настоящий момент термин “Ван-дер-ваальсовы силы” распространяется на все слабые межмолекулярные силы, кроме водородной связи.

Водородная связь

Несмотря на то, что водородная связь, возникающая вследствие силы притяжения между атомом водорода и электроотрицательным атомом, представляет собой предельный случай диполь-дипольного притяжения, ее, как правило, не относят к силам Ван-дер-ваальса.

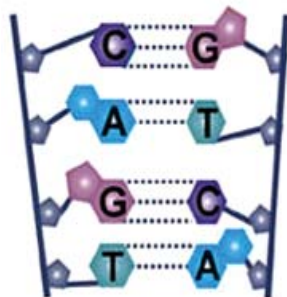


Рис 59. Схема водородной связи в молекуле ДНК

Во-первых, потому что она гораздо сильнее обычных

межмолекулярных связей (рис. 60), а во-вторых,

потому что она может возникать и в виде *внутримолекулярных связей* (рис 59).

Именно водородные связи объясняют многие уникальные свойства воды и льда.

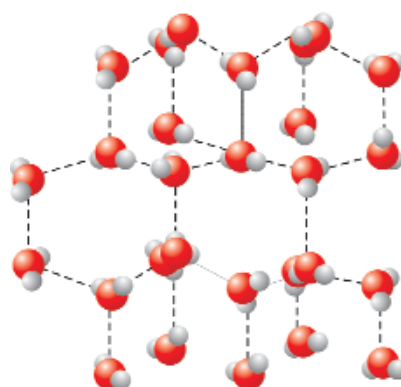
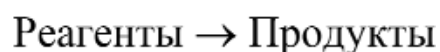


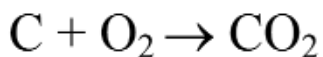
Рис 60. Схема водородной связи в кристалле льда

Что такое нанохимия?

Не требует пояснений, что химическая связь образуется в результате химических реакций. При этом вещества, подвергающиеся превращению, называются *реагентами*, а вновь образующиеся вещества называют *продуктами*. Таким образом, любую реакцию можно записать так:



Например:



На ход реакции влияет множество факторов: температура, давление, состояние и концентрация исходных веществ и пр.

Балк-технология (традиционные химия, физика, механика) имеет дело с макроскопическими количествами вещества, содержащими такое громадное количество атомов, что вещество кажется сплошным и мы редко вспоминаем о его атомарной структуре. Триллионы соединенных вместе атомов образуют так называемое *компактное вещество*.

Стремительное развитие прецизионной техники, в частности, сканирующих микроскопов, позволило изучать вещества на уровне отдельных атомов и молекул. И вот тут-то ученых ждало множество сюрпризов! Оказалось, что одно и то же вещество может значительно изменять свои химические свойства и реакционную способность в зависимости от количества атомов в исследуемом образце и его размера.

Первым обратил на это внимание известный ученый XIX века Майкл Фарадей, сумевший получить коллоидную *суспензию*⁵, состоящую из крошечных частиц золота. В отличие от своего компактного состояния, имеющего всем знакомый желтоватый блеск, полученный образец был фиолетового цвета. Это говорит о том, что отражающие свойства золота изменяются при уменьшении размеров его частиц.

Количество атомов в частице даже называли "третьей координатой" таблицы Менделеева (наряду с группой и рядом).

Следует отметить, что именно первые опыты по получению наноскопических частиц привели к бурному росту интереса к нанохимии в научных кругах. Оказалось, что частицы нанометровых размеров обладают повышенной химической активностью и реакции с их участием протекают гораздо быстрее. Это свойство наночастиц привело к созданию новых эффективных *катализаторов*⁶.

⁵ *Суспензией* (или взвесью) называется гетерогенная смесь двух компонентов. Она состоит из более крупных частиц одного компонента, взвешенных в среде второго компонента. По истечении некоторого времени частицы суспензии осаждаются на дно сосуда. Суспендированные (взвешенные) частицы обычно имеют диаметр порядка 1000 нм. и больше.

⁶ *Катализатор* - это вещество, которое повышает скорость химической реакции, но само не расходуется в этом процессе.

Сегодня ученые умеют получать наноструктуры практически всех химических элементов, что дает огромную свободу для исследований. В последнее время стало известно, что наночастицы серебра гораздо лучше убивают бактерии, чем серебро в компактном состоянии, что делает их полезными для очистки воды и борьбы с инфекциями. На сегодняшний день наночастицы являются наиболее изученной областью нанохимии.

Частицы металлов размером менее 10 нм, называемые **кластерами**, обладают высокой химической активностью и способны вступать в реакции с другими веществами практически без какой-либо дополнительной энергии. Избыточность энергии таких частиц объясняется нескомпенсированностью связей их поверхностных атомов. Дело в том, что доля поверхностных атомов у наночастицы значительно больше, чем у вещества в компактном состоянии, и растет с уменьшением частицы. Соответственно увеличивается и вклад поверхностных атомов в энергию системы.

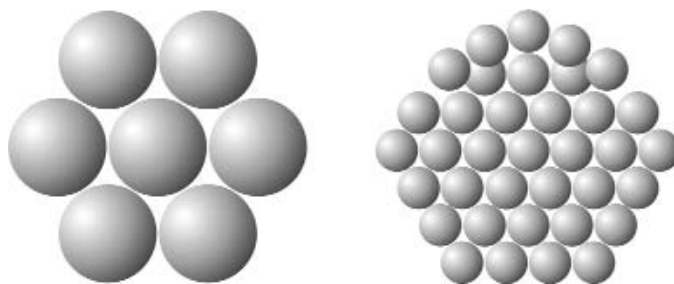


Рис 61. Большинство атомов наночастицы (слева) лежат на ее поверхности, в отличие от компактного вещества (справа)

Из школьного курса физики мы знаем, что поверхностные атомы обладают некоторой избыточной энергией по сравнению с внутренними — это объясняет поверхностное натяжение и капиллярный эффект. Избыточность энергии существенно влияет на *температуру плавления, растворимость, электропроводность, окисленность, токсичность, взрывоопасность* и т.д. Все это позволяет утверждать, что размер частицы является активной переменной, определяющей наряду с другими факторами ее свойства и реакционную способность.

Свойства наносистем настолько отличаются от свойств макроскопических количеств тех же веществ, что их изучает особое научное направление под названием физикохимия наносистем или **нанохимия**.

В первой половине XX века наибольший вклад в нанохимию внесли специалисты, изучавшие *коллоиды*⁷, а во второй половине — полимеры, белки, природные соединения, фуллерены и нанотрубки.

Активно развиваясь в последние десятилетия, нанохимия занимается изучением свойств различных наноструктур, а также разработкой новых способов их получения, изучения и модификации.

Одна из приоритетных задач нанохимии - установление связи между размером наночастицы и ее свойствами.

В нанохимии чрезвычайно велика роль *квантовых размерных эффектов*, вызывающих изменение свойств вещества в зависимости от размера частиц и количества в них атомов или молекул. Роль размерных эффектов настолько велика, что предпринимаются попытки создать таблицы зависимости свойств кластеров и наночастиц от их размера и геометрии наподобие периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева.

Для промышленного получения наночастиц существует много способов: биохимический, радиационно-химический, фотохимический, электровзрывной, микроэмульсионный, детонационный, лазерная абляция в жидкости, конденсация, вакуумное испарение, ионная имплантация и др. Позже мы рассмотрим некоторые способы подробнее.

Объекты нанохимии. Классификации наночастиц

Поскольку нанохимия — наука сравнительно молодая, пока нет ни единой терминологии, ни классификации того, что она изучает. Более того: можно сказать, что классификаций столько же, сколько ученых. Относительно общепризнанным считается, что нанохимия исследует получение и свойства различных *наносистем*.

Под *наносистемой* здесь понимается взвесь наночастиц размером не более 100 нм в некоторой среде. При этом сами наночастицы следует понимать как системы, состоящие из еще

⁷ *Коллоиды* занимают промежуточное место между растворами и суспензиями. Они состоят из *диспергированных частиц* (от "dispersio" - рассеяние) и *дисперсионной среды*, в которой распределены частицы, и отличаются меньшими, по сравнению с суспензий, размерами частиц (1-500 нм.) В отличие от суспендированных частиц, коллоидные частицы не осаждаются и не отделимы от дисперсионной среды обычными методами. Примеры коллоидов: дым, все виды аэрозолей, взбитые сливки, фруктовое желе, молоко, майонез, мыльная пена и т.п.

более мелких единиц — *кластеров* — минимальных строительных “кирпичиков” вещества. Размер кластера не превышает 10 нм. Именно на уровне кластеров активно проявляются всевозможные квантовые эффекты.

В науке было немало попыток классифицировать объекты нанохимии. Следующая таблица поможет вам не запутаться в определениях:

Фазовое состояние	Единичные атомы	Кластеры	Наночастицы	Компактное вещество
Диаметр, нм	0,1-0,3	0,3-10	10-100	свыше 100
Кол-во атомов	1-10	10-10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁹	свыше 10 ⁹

Табл. 6. Объекты нанохимии

Итак, примерами наносистем могут быть многоатомные кластеры и молекулы, нанок капли и нанокристаллы. Такой подход позволяет рассматривать единичные атомы как нижнюю границу нанохимии, а верхняя граница — это такое количество атомов в объекте, дальнейшее увеличение которого ведет к потере специфических свойств наночастицы — они становятся аналогичными свойствам компактного вещества. Количество атомов, определяющих верхнюю границу, индивидуально для каждого вещества.

По геометрическому признаку (мерности) нанообъекты можно классифицировать с разных точек зрения. Одни исследователи предлагают характеризовать мерность объекта количеством измерений, в которых объект имеет макроскопические размеры. Другие берут за основу количество наноскопических измерений. Мы попробуем ввести классификацию, интегрирующую оба подхода:

Характеристики объекта	Количество измерений менее 100нм	Количество измерений более 100нм	Примеры
Все три размера (длина, ширина и высота) менее 100 нм	3-мерный объект	0-мерный объект	фуллерены, квантовые точки, коллоидные растворы, микроэмульсии
Поперечные размеры менее 100 нм, а длина сколь угодно велика.	2-мерный объект	1-мерный объект	нанотрубки, нановолокна, нанокapилляры и нанопоры

Только один размер (толщина) менее 100 нм, а длина и ширина сколь угодно велики.	1-мерный объект	2-мерный объект	наноплёнки и нанослои
Все три измерения превышают 100 нм	0-мерный объект	3-мерный объект	обычные макротела

Табл 7. Объединенная классификация объектов нанохимии

Классификация нанообъектов по их мерности важна не только с формальной точки зрения. Геометрия существенно влияет на их физико-химические свойства.

В зависимости от *вещества, формы кластеров и типа связи между атомами* существует величайшее множество нанообъектов. Вот некоторые из них:

Частицы из атомов инертных газов

Это самые простые нанообъекты. Атомы инертных газов с полностью заполненными электронными оболочками слабо взаимодействуют между собой посредством сил Ван-дер-ваальса.



Рис 62. Наночастица из 16 атомов аргона

При описании таких частиц с достаточно хорошей точностью применима модель твердых шаров. Энергия связи, то есть энергия, затрачиваемая на отрыв отдельного атома от такой наночастицы, очень мала, поэтому они существуют при температурах не выше 10-100 К.

Частицы металлов

В металлических кластерах из нескольких атомов может быть реализован как ковалентный, так и металлический тип связи. Наночастицы металлов обладают большой реакционной способностью и часто используются в качестве катализаторов.

Наночастицы металлов обычно принимают правильную форму - октаэдра, икосаэдра, тетрадекаэдра.

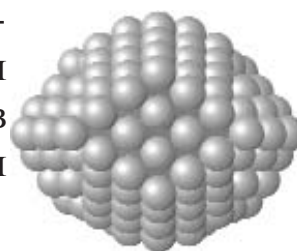


Рис 63. Наночастица металла



Рис 64. Возможные формы металлических наночастиц

Фуллерены

Как уже говорилось в первой главе, фуллерены представляют собой полые внутри частицы, образованные многогранниками из атомов углерода, связанных ковалентной связью. Это недавно открытая природная форма углерода, существующая наряду с уже хорошо известными графитом и алмазом. Особое место среди фуллеренов занимает частица из 60 атомов углерода — C_{60} , напоминающая микроскопический футбольный мяч.



Рис 65. Молекула фуллерена C_{60}

Фуллерены находят широкое применение, как то: создание новых смазок и антифрикционных покрытий, новых типов топлива, алмазоподобных соединений сверхвысокой твердости, датчиков и красок.

Нанотрубки

Нанотрубка — это полая внутри молекула, состоящая из порядка 1.000.000 атомов углерода и представляющая собой однослойную трубку диаметром около нанометра и длиной в несколько десятков микрон. На ее поверхности атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников.



Рис 66 Молекула однослойной нанотрубки

Нанотрубки обладают рядом уникальнейших свойств, которые подробно рассматривались в первой главе. Благодаря им нанотрубки находят большое число областей применения, преимущественно в создании новых материалов, электронике и сканирующей микроскопии.

Уникальные свойства нанотрубок — высокая удельная поверхность, электропроводность, прочность — позволяют создавать на их основе эффективные носители катализаторов для различных процессов. Например, из нанотрубок делают новые источники энергии — *топливные ячейки*, способные работать в 3 раза дольше, чем простые батарейки аналогичного размера.

При использовании подобной ячейки в сотовом телефоне он сможет находиться в режиме ожидания около двух недель — вместо 4 дней, как нынешнее поколение телефонов.

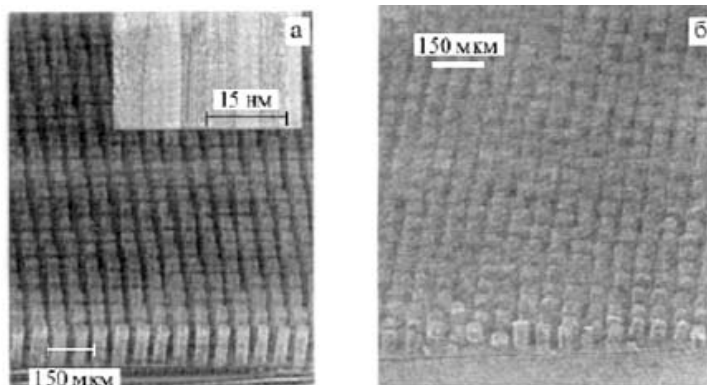


Рис 67. СТМ-изображения матриц углеродных нанотрубок, выращенных на подложке из пористого (а) и гладкого (б) кремния

Топливная ячейка заправляется метиловым спиртом, который в ходе реакции расщепляется на кислород и водород, и в результате выделяется тепло и электричество. Эффективность же этого процесса зависит от размера катализатора, а потому наночастицы платины, нанесенные на нанотрубки, служат отличным катализатором.

Компания NEC начала выпуск ноутбуков со встроенной топливной ячейкой в начале 2005 года. Пока что время автономной работы этого ноутбука составляет около пяти часов, однако к 2006 году инженеры планируют увеличить его до 40 часов. В настоящее время разработками топливных ячеек заняты многие компании, такие как Motorola, Casio, Sony, Hitachi и Samsung.

Удивительные свойства нанотрубок помогают им накапливать и хранить водород — экологичное топливо автомобилей будущего. Для выработки электроэнергии в двигателях на топливных ячейках используется реакция водорода (H_2) и кислорода (O_2). При этом выхлоп автомобиля состоит из водяного пара (H_2O). Раньше производители не могли и помыслить о таких автомобилях, потому что водород — самый легкий в мире газ, и несколько килограмм водорода — это уже огромный баллон. Ни за какие коврижки автолюбители не стали бы таскать с собой гигантский пузырь и надувать его на бензоколонках. Но нанотрубки с наночастицами палладия могут компактно хранить водород в тысячи раз больше своего объема, а значит, сделают автомобили более мощными, дешевыми и экологичными.

Компания Toyota еще в 2001 приступила к испытаниям такого автомобиля. Ожидается, что к 2010 году японские компании выпустят 50.000 машин на топливных ячейках, а к 2020 году - уже 5.000.000! Hyundai, UTC Fuel Cells и ChevronTexaco открыли в Калифорнии экспериментальную водородную станцию, которая будет заправлять 5 машин Hyundai и Kia на водородных топливных ячейках.

Дальнейшее развитие технологии топливных ячеек позволит хранить в них в сотни и тысячи раз больше энергии, чем в современных батарейках. Как же она там поместится? Очень просто. В «квантовой» главе мы упоминали формулу $E=mc^2$, выведенную Эйнштейном. Многие ее видели, но далеко не все понимают ее смысл. А она попросту отражает взаимосвязь между материей и энергией или, проще говоря, то, что можно превращать энергию в вещество и наоборот — вещество в энергию.

Согласно этой формуле, например, в хомячке весом 0,11 кг содержится $0,11 \cdot (300.000.000)^2 = 10^{16}$ Дж энергии, то есть в сто раз больше, чем выделяется при атомном взрыве! Почему же хомячок отнюдь не взрывоопасен и порой даже флегматичен? Потому что энергию из вещества получить крайне сложно. Даже в атомных электростанциях в энергию превращается только тысячная доля массы. В *термоядерных* реакциях, происходящих на Солнце, в энергию превращается уже 1% вещества. И только при столкновении с *антивеществом* материя освобождает свою полную энергию.

Так вот, наше Солнце представляет собой огромную *термоядерную водородную топливную ячейку*. Если при сгорании водород превращается в воду, соединяясь с кислородом, то в термоядерной реакции два атома водорода превращаются... в атом гелия, разумеется, с выделением огромной энергии. Если химические реакции изменяют молекулы, перемещая атомы, то термоядерные реакции реализуют мечту средневековых алхимиков, превращая одни химические элементы в другие (как вы уже, наверное, догадались, этим мы обязаны перемещениям субатомных частиц).

С их помощью ученые даже получили золото из свинца, однако разбогатеть на этом им не удалось — термоядерная установка для получения одного нанограмма золота стоит дороже нескольких вагонов, набитых золотыми слитками.

Однако есть все основания полагать, что нанотехнология сделает термоядерные приборы компактными и дешевыми. Тогда в каждой «пальчиковой» батарееке будет гореть миниатюрное солнышко, автомобили смогут годами ездить без дозаправки водородом, а сотовому телефону и ноутбуку зарядное устройство вообще не понадобится. Подобную топливную ячейку многие читатели наверняка видели в фильме «Терминатор-3», когда выброшенная роботом сломанная батареека взорвалась как атомная бомба.

Ионные кластеры



Рис 68. Кластер NaCl

Ионные кластеры представляют собой классическую картину, характерную для иллюстрации ионной связи в кристаллической решетке $NaCl$. Если ионная наночастица достаточно велика, то ее структура близка к структуре объемного кристалла. На рисунке изображен типичный пример ионной частицы с химической формулой $NaCl$

Такие ионные соединения находят применение в создании фотопленок с высоким разрешением, молекулярных фотодетекторов, различных областях микроэлектроники и электрооптики.

Фрактальные кластеры

Фрактальным называется объект с разветвленной структурой. Таковы сажа, коллоиды, различные аэрозоли и аэрогели. Фрактал — это такой объект, в котором при возрастающем увеличении можно увидеть, как одна и та же структура повторяется в нем на всех уровнях и в любом масштабе.

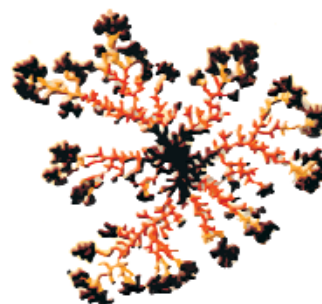


Рис 69. Фрактальный кластер

Молекулярные кластеры



Рис 70. Молекулярный кластер ферредоксина.

Большинство кластеров являются молекулярными. Их число и разнообразие огромны. В частности, к молекулярным кластерам относятся многие биологические макромолекулы. На рисунке 70 изображена молекула белка — ферредоксина.

В таблице приведены примеры различных наночастиц и наносистем – объектов изучения нанохимии.

Наночастицы	Наносистемы
Фуллерены	Кристаллы, растворы
Нанотрубки	Агрегаты, растворы
Молекулы белков	Растворы, кристаллы
Полимерные молекулы	Золи, гели
Неорганические нанокристаллы	Аэрозоли, коллоидные растворы
Мицеллы	Коллоидные растворы
Наноблоки	Твердые тела
Пленки Ленгмюра—Блоджетт	Тела с пленкой на поверхности
Кластеры в газах	Аэрозоли
Наночастицы в слоях веществ	Наноструктурированные пленки

Табл 8. Основные объекты нанохимических исследований

Способы получения наночастиц

Разработано огромное множество методов получения наночастиц, позволяющих весьма точно регулировать размеры частиц, их форму и строение. Мы не будем утомлять читателя подробностями и описывать каждый метод в отдельности. Ограничимся лишь описанием общих принципов, хотя надо признать, что все разработанные методы по-своему уникальны и заслуживают самого пристального внимания.

Итак, по принципу воздействия все методы получения можно разделить на две большие группы:

- **диспергационные методы**, или методы получения наночастиц путем измельчения обычного макро-образца;
- **конденсационные методы**, или методы “выращивания” наночастиц из отдельных атомов.

Первая группа – это подход “сверху вниз”. Исходные тела измельчают до наночастиц. Это самый простой из всех способов создания наночастиц, своего рода “мясорубка” для макро-тел. Вторая – подход “снизу вверх”, то есть получение наночастиц путем объединения отдельных атомов. Этот принцип основан на феномене конденсации, с которым все хорошо знакомы.

По определению, *конденсация* (от лат. condensatio – уплотнение, сгущение) – это переход вещества из газообразного состояния в конденсированное (твердое или жидкое) вследствие его ох-

лаждения. Если хорошенько подышать на стеклышко, оно запотеет. На самом деле это означает, что на нем образуется множество крошечных, не видимых глазу капелек воды. Если температура воздуха в помещении ниже температуры выдыхаемого нами пара, то при дальнейшем охлаждении микроскопические капельки будут собираться в более крупные и явные капли.

Примерно то же самое происходит и при конденсационном способе получения наночастиц. Исходные макротела сначала испаряют, после чего образующийся пар конденсируют до образования наночастиц нужного размера. В результате компактное вещество превращается в ультрадисперсное. Нечто похожее происходит и при восстановлении наночастиц из ионных растворов, только используется не пар, а жидкость.

Во всех методах получения наночастиц требуется мощный приток энергии от внешнего источника, поскольку эти методы приводят к получению наночастиц в *неравновесном метастабильном состоянии*.

Как только приток энергии прекращается, система стремится вернуться к равновесию. Почему это происходит?

Рассмотрим, например, *конденсационный метод*: монокристалл нагревают до плавления и последующего испарения. Затем образовавшийся пар резко охлаждается. По мере охлаждения зарождаются и укрупняются наночастицы. Они начинают упорядочиваться и объединяться в наноагрегаты. Если предоставить такую систему самой себе, то постепенно границы между наночастицами в агрегатах исчезают и они превращаются в микрокристаллы. При длительном выдерживании микрокристаллов в паре наиболее мелкие и дефектные из них испаряются, а более крупные и совершенные продолжают расти. И так до тех пор, пока в системе не воссоздастся исходный монокристалл.

В течение всего интервала времени от момента, когда в паре уже накопилось заметное количество наночастиц, до момента, когда большинство наночастиц достигнет размера 100 нм, система находится в наносостоянии. Затем она переходит в равновесие, появление наночастиц прекращается. И если не создать искусственные условия для их консервации, то возникшие частицы тоже могут перейти в стадию компактного вещества.

В биохимическом, фотохимическом и радиационно-химическом синтезе конденсация наночастиц происходит не из пара, а из раствора в специальных условиях, обеспечивающих защиту наночастиц от слипания и реакций с раствором.

При *диспергационном способе*, в условиях достаточного притока механической энергии, размер фрагментов, на которые распадается монокристалл, уменьшается. Пока приток механической энергии велик, большинство фрагментов имеют нанометровый размер и система остается в наносостоянии. Когда же “мясорубка” останавливается, некомпенсированность поверхностных связей приводит к тому, что нанофрагменты начинают срастаться и укрупняться. Все это продолжается до тех пор, пока в системе не будет воссоздан исходный монокристалл.

Чтобы предотвратить этот нежелательный эффект, в систему вводится некоторый *стабилизатор*, который обычно представляет собой молекулярный раствор белков, полимеров или поверхностно активных веществ (ПАВ). На определенной стадии агрегации стабилизатор вступает в действие: его молекулы облепляют растущую наночастицу со всех сторон, что препятствует ее дальнейшему росту. Регулируя состав и концентрацию стабилизатора, можно получать наночастицы любого диаметра.

Итак, мы выяснили, что большинство наносистем, получаемых промышленными методами, нестабильны, и если не создать необходимых условий для их консервации, они будут стремиться вернуться в свое компактное состояние. Но как же тогда объяснить стабильность некоторых наночастиц, например, уже известных нам фуллеренов и нанотрубок? Ведь несмотря на свои нанометровые размеры, они превосходно существуют и “по-одиночке”, отнюдь не стремясь объединяться с себе подобными.

Ввиду этой уникальной особенности, фуллерены, нанотрубки и некоторые другие наночастицы были названы “*магическими*”, а числа входящих в них атомов — “*магическими числами*”. Например, для щелочных металлов магические числа — 8, 20 и 40, для благородных металлов — 13, 55, 137 и 255, для углеродных кластеров — 60, 70, 90 и т.д.

Все атомы “магических” наночастиц крепко связаны между собой, что придает им необходимую стабильность.

Измельчать вещество в наночастицы можно не только механически. Российская компания «Передовые порошковые технологии» получает наночастицы взрывая металлическую нить мощным импульсом тока (см. рисунок 71).

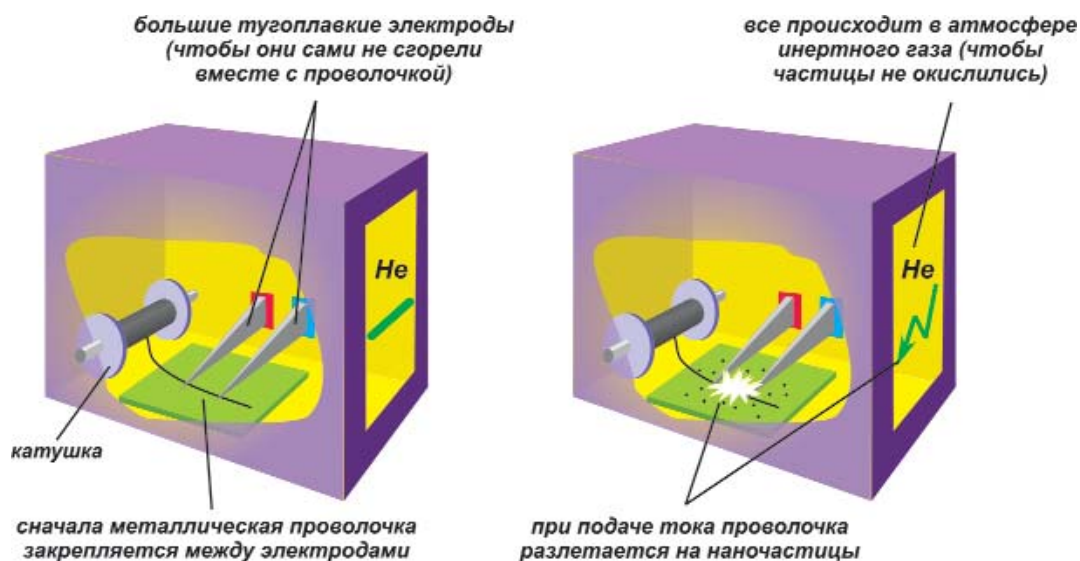


Рис 71. Электровзрывной метод получения наночастиц

Существуют и более экзотические способы обзавестись наночастицами. Американские ученые в 2003 году собрали с листьев фигового дерева микроорганизмы *Rhodococcus* — и поместили их в золотосодержащий раствор. Бактерии действовали как химический восстановитель, собирая из ионов серебра аккуратные наночастицы диаметром около 10 нм. Строя наночастицы, бактерии чувствовали себя нормально и продолжали размножаться.

Получение углеродных наночастиц – фуллеренов и нанотрубок

Конец XX века ознаменовался открытием новых форм углерода — фуллеренов и нанотрубок. Научная и практическая значимость этих открытий настолько велика, что они даже были отмечены Нобелевской премией. А ведь найдены были эти уникальные вещества в обычной саже, тысячелетиями получаемой при сгорании любых углеродсодержащих веществ — древесины, графита, природного газа и т.п.!

Сегодня разработано много методов получения углеродных наноструктур с разными размерами и свойствами, но суть всех методов одна: нанотрубки и фуллерены образуются в результате химических превращений углеродсодержащих материалов в

условиях повышенных температур. Мы рассмотрим несколько наиболее популярных методов.

Электродуговое распыление графита

Это самый распространенный метод, разработанный Кречмером. Именно так японский ученый Сумио Иджима впервые получил нанотрубки в 1991 году. Суть метода такова: в камере, заполненной инертным газом, между графитовыми электродами горит электрический разряд, ионизирующий атомы газа. Катод и стенки камеры охлаждаются при помощи воды или жидкого азота.

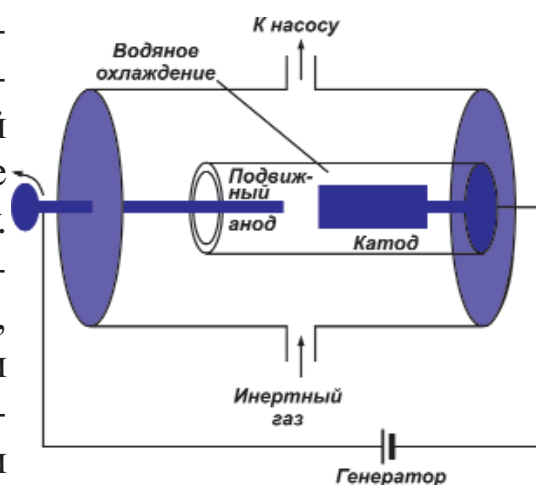


Рис 72. Схема установки Кречмера для получения нанотрубок и фуллеренов

При токе дуги порядка 100 А, давлении газа в несколько раз меньше атмосферного и напряжении на электродах 25-35В температура образующейся между электродами плазмы достигает 4000К. При такой температуре поверхность графитового анода интенсивно испаряется. В результате резкого перепада температур атомы углерода уносятся из горячей в более холодную область плазмы⁸ и конденсируются в осадок на стенках камеры и поверхности катода.

Рассматривая этот осадок в электронный микроскоп, можно увидеть наряду с сажей и графитом новые структуры — фуллерены и нанотрубки. При этом часть осадка, содержащая графит, сажу, и фуллерены осаждаются на холодные стенки камеры, а часть, содержащая графит и нанотрубки - на катод.

Лазерное испарение графита

В этом методе испаряемый лазером графит конденсируется на охлаждаемом коллекторе. Графитовая мишень расположена в длинной кварцевой трубке внутри цилиндрической печи с температурой 1000°C.

Вдоль трубки с невысокой скоростью прокачивается буферный газ (гелий или аргон). Мишень облучают лазером с энергией 140 мДж, длительностью импульса 8 нс и диаметром

⁸ **Плазма** - ионизированный газ, в котором атомы теряют несколько внешних электронов и превращаются в положительно заряженные ионы.

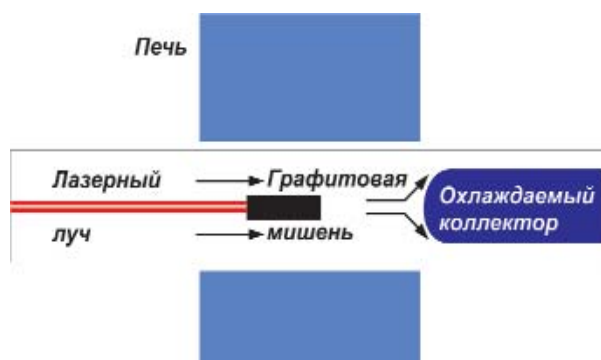


Рис 73. Схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок лазерным испарением графита

сфокусированного пучка около 1,6 мм. Продукты термического распыления графита уносятся из горячей области и осаждаются на поверхности охлаждаемого коллектора. В получаемом осадке помимо наночастичек графита обнаружи-

ваются также фуллерены и нанотрубки.

Важной особенностью лазерного метода является высокая чувствительность характеристик синтезируемых нанотрубок к параметрам лазерного излучения. В частности диаметра нанотрубок прямо зависит от мощности излучения. Это дает возможность получения нанотрубок с заданными структурными параметрами. К недостаткам метода следует отнести его относительно невысокую производительность и трудность масштабирования.

Сегодня получение нанотрубок в небольших количествах, достаточных для изучения, стало обычным делом. Проблема теперь состоит в снижении их себестоимости и получении в промышленных масштабах, поскольку рассмотренные выше методы не позволяют достичь этого. С этой точки зрения интересен третий метод, разработанный российскими учеными под руководством М.М. Томишко.

Метод химического осаждения из пара

Этот наиболее практичный и массовый способ получения углеродных нанотрубок основан на термохимическом осаждении углеродсодержащего газа на поверхности горячего металлического катализатора. Данный метод также получил название *метода каталитического разложения углеводородов*.

Углеродсодержащая газовая смесь (обычно смесь ацетилена C_2H_2 или метана CH_4 с азотом) пропускается сквозь кварцевую трубку, помещенную в печь при температуре около 700-1000°C. В трубке находится керамический тигель с катализатором — металлическим порош-

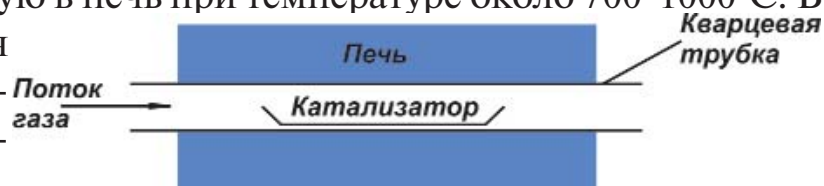


Рис 74. Схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок химическим осаждением из пара

ком. Разложение углеводорода, происходящее в результате химической реакции атомов газа с атомами металла, приводит к образованию на поверхности катализатора фуллеренов и нанотрубок с внутренним диаметром до 10 нм и длиной до нескольких десятков микрон. Геометрические параметры нанотрубок в существенной степени определяются условиями протекания процесса (времени, температуры, давления и сорта буферного газа и пр.), а также степенью дисперсности и сортом катализатора.

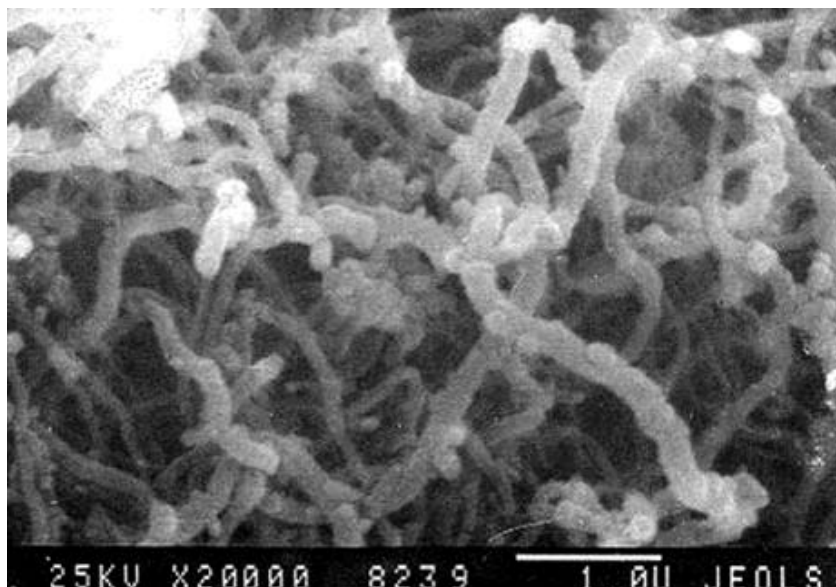


Рис 75. Так под микроскопом выглядят нанотрубки, полученные химическим осаждением из пара

Получение нанотрубок и фуллеренов методом химического парового осаждения особенно интенсивно развивается в последнее время, так как позволяет получать большое количество одинаковых нанотрубок на поверхности шаблона. Это открывает путь крупномасштабному получению фуллеренов и нанотрубок и созданию на их основе промышленного производства разнообразной нанопродукции.

Как видно из описания, при всех методах получения фуллеренов и углеродных нанотрубок конечный материал содержит часть шлака — сажу, частицы аморфного графита, а в случае использования катализаторов — частицы металлов. Для повышения чистоты полученного продукта используют различные методы очистки — как механические (фильтрация, обработка ультразвуком, центрифугирование), так и химические (промыывание в химически активных веществах, нагревание и пр.). Сегодня уже возможно получение макроскопических количеств

⁹ *Тигель* — специальный сосуд для плавки, варки или нагрева различных материалов.

фуллеренов и нанотрубок (до нескольких литров) практически из любого углеродсодержащего газа (например, обычного природного газа), а ученые пытаются найти наиболее выгодный экономически метод, который позволит получать их пусть не массово, но с минимумом примесей.

Надо сказать, что метод получения наноструктур играет очень важную роль. Он влияет не только на свойства наноструктуры, но и на время ее жизни — то есть период, в течение которого частица способна эти уникальные свойства проявлять. По истечении этого срока наночастицы либо окисляются, либо агрегируются в микрочастицы и приобретают свойства компактных веществ.

Так, например, в зависимости от метода получения время жизни наночастиц серебра может варьироваться в пределах от часов до нескольких месяцев. Ученые концерна “Наноиндустрия” под руководством Е.М. Егоровой развивают уникальный биохимический метод получения наночастиц серебра, благодаря которому они проявляют свою активность в течение целого года. Наночастицы получают восстановлением ионов металлов до атомов в обратных мицеллах, представляющих собой микроскопические камеры из молекул и ионов. Образовавшимся в такой камере атомам не остается ничего другого, как объединяться в наночастицы, а оболочка мицеллы предохраняет полученные частицы от слипания и нежелательных реакций.

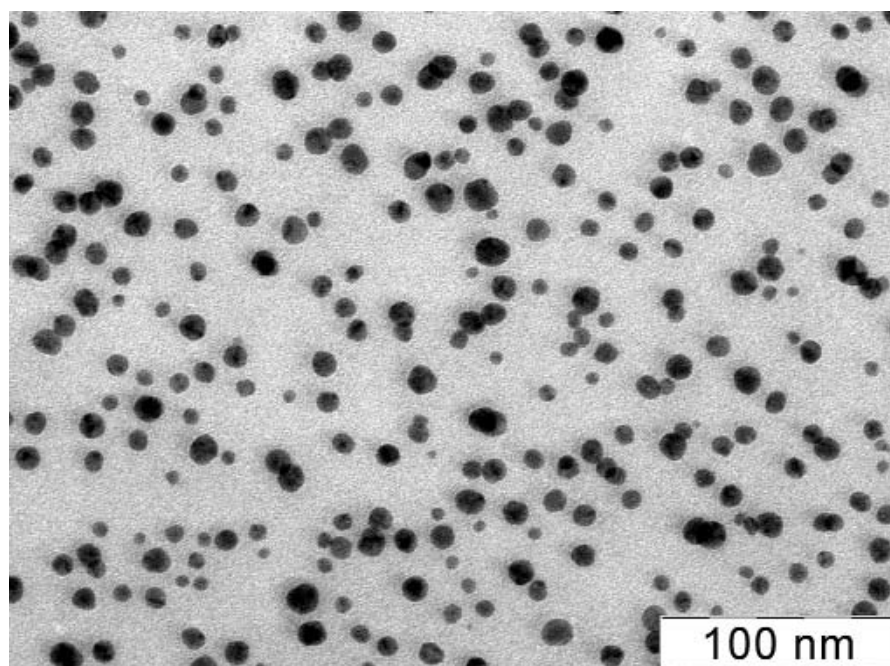


Рис 76 Фотоизображение наночастиц серебра, полученных биохимическим синтезом в обратных мицеллах

Примеры уникальных свойств некоторых наночастиц

Серебро

Как уже отмечалось, свойства у наночастицы серебра на самом деле уникальные.

Во-первых, это феноменальная бактерицидная и антивирусная активность. Об антимикробных свойствах, присущих ионам серебра, человечеству известно уже очень давно. Наверняка большинство читателей слышали о целительных способностях церковной “святой воды”, получаемой путем прогонки обычной воды сквозь серебряный фильтр. Такая вода не содержит многих болезнетворных бактерий, которые могут присутствовать в обычной воде. Поэтому она может храниться годами, не портясь и не “зацветая”.

Кроме того, такая вода содержит некоторую концентрацию ионов серебра, способных нейтрализовать вредные бактерии и микроорганизмы, чем и объясняется ее благотворное влияние на здоровье человека.

Установлено, что наночастицы серебра в тысячи раз эффективнее борются с бактериями и вирусами, чем серебряные ионы. Как показал эксперимент, ничтожные концентрации наночастиц уничтожали все известные микроорганизмы (в том числе и вирус СПИДа), не расходуясь при этом.

Кроме того, в отличие от антибиотиков, убивающих не только вредоносные вирусы, но и пораженные ими клетки, действие наночастиц очень избирательно: они действуют только на вирусы, клетка при этом не повреждается! Дело в том, что оболочка микроорганизмов состоит из особых белков, которые при поражении наночастицами перестают снабжать бактерию кислородом. Несчастный микроорганизм больше не может окислять свое «топливо» - глюкозу - и гибнет, оставшись без источника энергии. Вирусы, вообще не имеющие никакой оболочки, тоже получают свое при встрече с наночастицей. А вот

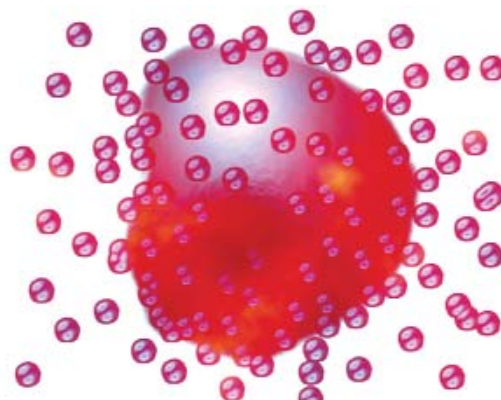


Рис 77. Вирусы атакуют клетку. Скорость, с которой вирус атакует клетку, превышает скорость пули

клетки человека и животных имеют более «высокотехнологичные» стенки, и наночастицы им не страшны.

В настоящий момент проводятся исследования возможностей использования наночастиц серебра в фармацевтических препаратах. Но уже сейчас они находят огромное количество применений.

Например, фирма “Гелиос” выпускает зубную пасту “Знахарь” с наночастицами серебра, эффективно защищающую от различных инфекций. Также небольшие концентрации наночастиц добавляют в некоторые кремы из серии “элитной” косметики для предотвращения их порчи во время использования. Добавки на основе серебряных наночастиц применяются в качестве антиаллергенного консерванта в кремах, шампунях, косметических средствах для макияжа и т.д. При использовании наблюдается также противовоспалительный и заживляющий эффект.

Ткани, модифицированные серебряными наночастицами, являются, по сути, самодезинфицирующимися. На них не может “ужиться” ни одна болезнетворная бактерия или вирус. Наночастицы не вымываются из ткани при стирке, а эффективный срок их действия составляет более шести месяцев, что говорит о практически неограниченных возможностях применения такой ткани в медицине и быту. Материал, содержащий наночастицы серебра, незаменим для медицинских халатов, постельного белья, детской одежды, антигрибковой обуви и т.д., и т.п.

Наночастицы способны долго сохранять бактерицидные свойства после нанесения на многие твердые поверхности (стекло, дерево, бумага, керамика, оксиды металлов и др.). Это позволяет создать высокоэффективные дезинфицирующие аэрозоли длительного срока действия для бытового применения. В отличие от хлорки и других химических средств обеззараживания, аэрозоли на основе наночастиц не токсичны и не вредят здоровью людей и животных.

Люди всегда искали способы борьбы с инфекциями, передаваемыми воздушно-капельным путем — гриппом, туберкулезом, менингитами, вирусным гепатитом и т. п. Но, увы, воздух в наших квартирах, офисах и особенно в местах массового скопления людей (больницы, общественные учреждения, школы, детские сады, казармы, тюрьмы и т. п.) перенасыщен патогенными микроорганизмами, выдыхаемыми зараженными людьми.

Традиционные способы профилактики не всегда справляются с этой проблемой, поэтому нанохимики предложили для ее решения очень элегантный способ: добавить в лакокрасочные материалы, покрывающие стены заведений, наночастицы серебра. Как оказалось, на покрашенных такими красками стенах и потолках не может “жить” большинство патогенных микроорганизмов.

Наночастицы, добавленные в угольные фильтры для воды, практически не вымываются с ней, как это происходит в случае обычных серебряных ионов. Это говорит о том, что срок действия таких фильтров будет несоизмеримо больше, а качество очистки воды возрастет на порядок.

Короче говоря, крошечные, незаметные, экологически чистые серебряные наночастицы могут применяться везде, где необходимо обеспечить чистоту и гигиену: от косметических средств до обеззараживания хирургических инструментов или помещений. При этом, как уверяют ведущие российские ученые в данной области, стоимость средств и материалов, созданных на их основе, будет не намного дороже традиционных аналогов, и с развитием нанотехнологий они станут доступны каждому. Фирма Samsung уже добавляет наночастицы серебра в сотовые телефоны, стиральные машины, кондиционеры и другую бытовую технику.

Помимо обеззараживающих свойств, наночастицы серебра обладают также высокой электропроводностью, что позволяет создавать различные проводящие клеи. Проводящий клей может быть использован, например, в микроэлектронике для соединения мельчайших электронных деталей.

Оксид цинка

Наночастицы ZnO также обладают рядом уникальных свойств (в том числе и бактерицидных), среди которых особый интерес вызывает способность поглощать широкий спектр электромагнитного излучения, включая ультрафиолетовое, инфракрасное, микроволновое и радиочастотное.

Такие частицы могут служить, например, для защиты против УФ-лучей, придавая новые функции стеклам, пластмассам, краскам, синтетическим волокнам и т.д. Это позволяет создавать солнечные очки, специальную одежду и другие вещи, не только защищающие от ультрафиолета, но и препятствующие

нагреву в жаркий летний день. Их можно использовать в солнцезащитных кремах, мазях и других препаратах, поскольку они мягки, безопасны и не раздражают кожу.

Кроме того, способность этих наночастиц к рассеянию электромагнитных волн может использоваться в тканях одежды для придания ей свойств невидимости в инфракрасном диапазоне за счет поглощения излучаемого человеческим телом тепла. Это позволяет изготавливать камуфляжи и покрытия типа “стелс”, невидимые в широком диапазоне частот — от радио до ультрафиолета. Такая одежда просто незаменима в военных или антитеррористических операциях, поскольку позволяет вплотную подойти к противнику без риска быть замеченным приборами ночного видения.

Материал на основе наночастиц ZnO может также применяться в инфракрасных датчиках.

Серпентин

Нанотрубки серпентина — замечательный пример промышленного применения уникальных свойств наночастиц. Отечественный концерн “Наноиндустрия” выпустил на основе минеральных нанотрубок (не путать с углеродными!) специальный ремонтно-восстановительный состав (РВС). Такой нанотехнологический РВС способен восстановить после износа практически любые трущиеся металлические поверхности (двигатели автомобилей, узлы трения различных станков и механизмов), а залив его в картер автомобиля, можно надолго забыть о проблеме износа двигателя.

В обычном состоянии механические части двигателя постепенно разрушаются из-за трения, так как созданы по грубой балк-технологии. Но если добавить в масло флакончик РВС, то происходит следующее: при работе механические части нагреваются от трения, этот нагрев катализирует присоединение нанотрубок к поврежденным областям, в результате чего в областях интенсивного трения на поверхности деталей образуется идеально ровный защитный слой. А при сильном нагреве они утрачивают свою способность к присоединению. Таким образом, в трущемся узле постоянно поддерживается тепловое равновесие и детали, ввиду идеальной гладкости взаимодействующих поверхностей, практически не изнашиваются.

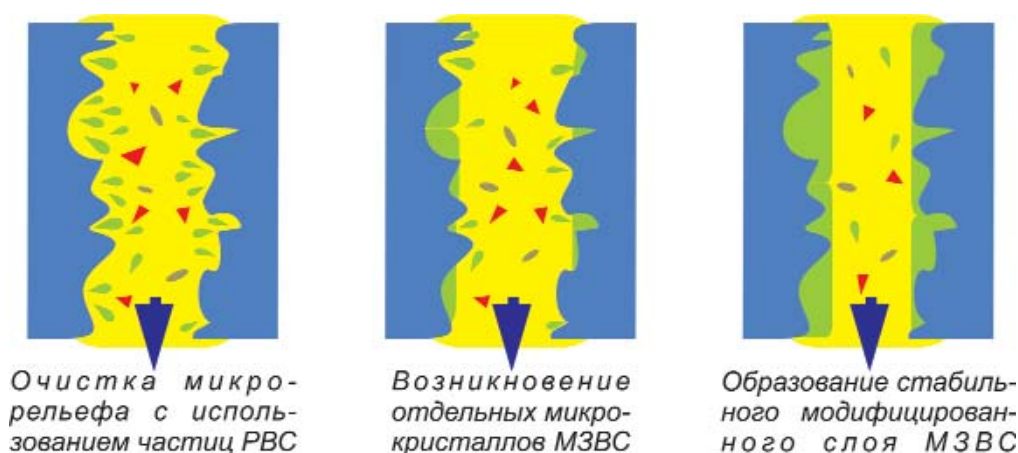


Рис 78. Схема действия восстановительного состава РВС "Нанотехнология"

Результаты исследований показали, что слой остается в целостности и сохранности феноменально долгое время после смены масла. Такая простая, казалось бы, технология помимо продления жизни вашего автомобиля дает еще кучу полезных преимуществ, в частности:

- возможность восстановления изношенных деталей без разборки двигателя;
- очистка двигателя от нагара и смолистых отложений;
- увеличение мощности двигателя на 15-17%;
- снижение стоимости ремонта деталей в 2-3 раза;
- снижение вибрации и шума;
- уменьшение токсичности выхлопных газов на 70-80%!

Последнее заслуживает особого внимания в связи с далеко не благоприятной экологической обстановкой, вызванной переизбытком выхлопных газов по всему миру. Руководство стран западной Европы, уделяющее большое внимание этой проблеме, мгновенно оценило возможности нового продукта. В частности, итальянская "партия зеленых", проведя необходимые исследования, пришла к выводу, что если все владельцы автомобилей обработают их российским РВС, это снизит уровень выбросов настолько, что Италия сможет подписать Киотское соглашение¹⁰ без снижения промышленных выбросов вообще. В настоящее время в Италии лоббируется соответствующий законопроект.

Ликвидация некоторого числа промышленных предприятий привело бы к многомиллиардным убыткам для экономики страны, в то время как стоимость обработки одного автомобиля

¹⁰. В главе "Нанотехнологии и общество" Киотскому протоколу уделено большое внимание

составляет менее \$30 (не говоря уже о личных выгодах для каждого автолюбителя). Нам же остается только удивляться равнодушию российских чиновников, не проявивших никакого интереса к представленному им подробному отчету о результатах испытаний отечественного нанотехнологического продукта.

Диоксид кремния

Наночастицы диоксида кремния (SiO_2) обладают удивительным свойством: если их нанести на какой-либо материал, то они присоединяются к его молекулам и позволяют поверхности отторгать грязь и воду. Самоочищающиеся нанопокрывтия на основе этих частиц защищают стекла, плитку, дерево, камень и т.д. Частицы грязи не могут прилипнуть или проникнуть в защищаемую поверхность, а вода легко стекает с нее, унося любые загрязнения.

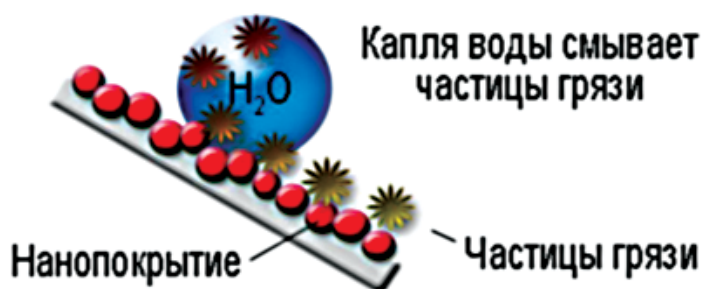


Рис 79. Принцип действия самоочищающихся нанопокровтий

Нанотехнологи придумали, как защищать не только такие монолитные структуры, как дерево или камень, но и нашу с вами одежду. Одного литра водного раствора наночастиц SiO_2 , глубоко проникающих в волокна тканей, хватает для обработки 5-30 кв.м полотна. Ткань после нанесения покрытия свободно пропускает воздух, но не пропускает влагу. Можно забыть про трудновыводимые пятна от кофе, жира, грязи и пр. Покрытие устойчиво к трению, гибко, не портится от солнечного света, температуры и стирки.

“Умные” материалы

Одним из главных практических применений нанохимии является производство всевозможных наноматериалов. Благодаря специфическим свойствам наночастиц, лежащих в их основе, такие материалы часто превосходят “обычные” по многим параметрам.

Например, прочность металла, полученного средствами нанотехнологии, превышает прочность обычного в 1,5 – 2, а в некоторых случаях — и в 3 раза. Твердость его больше в 50-70 раз, а коррозионная стойкость — в 10-12 раз!

Разнообразие наноматериалов с уникальными свойствами буквально поражает воображение: это и сверхлегкие, сверхпрочные нанопокрывтия для чего угодно — от самолетов до режущих инструментов, и самоочищающиеся ткани, и материал, защищающий человека от вредного воздействия радиоизлучения (ведущие производители сотовых телефонов уже планируют производить из него корпуса для телефонов нового поколения).

"Умные" материалы активно реагируют на изменения окружающей среды и изменяют свои свойства в зависимости от обстоятельств.

Помимо улучшения свойств привычных промышленных материалов развитие нанохимии ведет ко все большему распространению так называемых “умных материалов”.

Самым простым примером “умного материала”, созданного природой, является наша кожа. Ведь подумать только: наше тело покрыто миллиардами чувствительных “нано датчиков”, связанных с головным мозгом! Даже с закрытыми глазами мы легко отличаем круглое от квадратного, мокрое от сухого, горячее от холодного... Наша кожа способна реагировать на “опасность”, заставляя нас рефлексивно одергивать руку, чтобы не обжечься, или одеваться потеплее, чтобы защитить свой организм от переохлаждения; она способна к самозаживлению при травмах, самодостраивается по мере роста человека.

Кроме того, наша кожа обладает уникальной системой пототделения, необходимой для защиты организма в условиях высоких температур. Каждый школьник знает, что оптимальная температура здорового человека — около 36,6°С. При повышении или понижении температуры тела всего лишь на 2-3 градуса мы чувствуем слабость, наша работоспособность падает, внимание и память ухудшаются, портится настроение. Падение температуры тела ниже 30°С очень опасно для здоровья. При 27°С наступает кома, происходит нарушение сердечной деятельности и дыхания. Температура ниже 25°С является критической — человек умирает. Не менее опасно и повышение тем-

пературы тела. Критической считается температура 42°C – при ней происходит нарушение обмена веществ в тканях мозга, человек теряет сознание. Если такая температура долго не спадает, это грозит повреждением головного мозга и даже смертью.

Тем не менее, благодаря потовым железам, “встроенным” в нашу кожу, мы способны без особого вреда переносить температуры, намного превышающие эти критические 42 градуса. Как доказали английские физики Благден и Чентри (проводившие ради опыта несколько часов в натопленной печи хлебопек-карни), *в сухом воздухе при постепенном нагревании* наш организм способен выдержать до 160°C! (напомним, что это больше чем в полтора раза выше температуры кипения воды!). То есть можно запросто сварить яйцо или поджарить бифштекс в воздухе, в котором люди могут достаточно долго оставаться без вреда для себя.

Чем же объясняется такая выносливость? Тем, что наша кожа автоматически реагирует на повышение температуры окружающей среды посредством обильного выделения пота. Испарение капелек пота с поверхности нашего тела поглощает тепло из того слоя воздуха, который непосредственно прилегает к коже, тем самым охлаждая его до нормальной температуры.

Природа позаботилась о своих созданиях, наградив нас этим поистине волшебным средством защиты. Но и человеческая мысль тоже не стоит на месте! Уже довольно давно металлурги изобрели “потеющий” металл для защиты промышленных объектов от высоких температур. Этот, тоже своего рода “умный”, материал представляет собой пористую сталь с вкраплениями множества микрочастиц меди. Так как температура плавления меди меньше, чем стали, то, как только внешняя температура достигает некоторого критического предела, металл начинает активно “потеть”: медь расширяется и сквозь поры выходит на поверхность, унося излишек тепла из системы. При остывании капельки меди снова “всасываются” стальными капиллярами и материал возвращается в исходное состояние.

Разброс свойств наноматериалов огромен. В настоящий момент группа российских ученых под руководством Г.В. Поповой работает над созданием *биомиметических* материалов – материалов, подражающих биологическим тканям, распространенным примером которых могут быть производимые насе-

комыми паутины, отличающиеся эластичностью и прочностью, превышающими эластичность и прочность всего, что до сих пор смогли создать наши технологии.

Основу всех биомиметиков составляют искусственные белки. Подобно своим природным собратьям, они также состоят из аминокислот, но синтезируются не рибосомой, а человеком. Причем если обычные белки имеют уникальную последовательность из двадцати различных аминокислот, то белки для биомиметиков вполне могут ограничиться какой-либо одной, но повторяющейся молекулой. Так получаются аналоги белков - полиаминокислоты, построенные на основе одного-единственного элемента. Затем эти белковые блоки можно как угодно соединять между собой, "цеплять" к ним другие молекулы - красители, фотоактивные, электроактивные, люминесцирующие и т.д., - всякий раз получая материалы с новыми интересными свойствами.

Вспомните, какое огромное количество белков с самыми разными функциями создала природа. Большинство из них умеют активно реагировать на изменения внешней среды, активно приспосабливаться к ним. Искусственные биомиметики, сходные по своим качествам с природными белками, также проявляют "разумность" в ответ на слабые внешние раздражители: облучение, тепло, электроток, вредные вещества. На их основе уже сконструированы оптические сенсорные материалы для нанобиотехнологии и наноустройств, производящих экологический мониторинг.

Повышаешь, например, температуру на полградуса - биомиметический сенсор сразу меняет цвет, а потом приходит в исходное состояние. Или пускаешь совсем слабенький электрический ток - и система тут же обесцвечивается. Откроешь рядом банку с нашатырным спиртом или даже Комет-гелем - система начинает светиться (люминесцировать), а закроешь банку - и никаких "кошачьих глаз". Чем не разумный материал? Самое интересное, что с самим материалом при этом вроде бы ничего не происходит - все эти отклики и изменения вызываются внутренней перестройкой, неразличимой для человеческого глаза.

Особый интерес представляют также и *биodeградируемые* материалы, среди которых очень интересен упаковочный биоматериал, способный быстро разлагаться на естественные при-

родные компоненты по истечении определенного времени (скажем, срока хранения продукта), не загрязняя окружающую среду, как это делают металлические и пластиковые упаковки.

В этом направлении британскими учеными реализован весьма оригинальный проект по утилизации сотовых телефонов. В настоящее время мобильные телефоны являются одними из самых выбрасываемых устройств среди потребительской электроники. В Европе пользователи ежегодно избавляются от более чем ста миллионов старых телефонов. Суть инновации заключается в материале, из которого изготавливается корпус телефона. Ученые предлагают заменить его на новый полимер, который способен разлагаться в земле в течение нескольких недель. Кроме того, внутри корпуса, под прозрачным окошком, можно разместить семена растений — например, подсолнуха. После того, как телефон попадет в землю, семя начнет прорастать, и из телефона вырастет цветок. Новый полимер совершенно нетоксичен и полностью разлагается при попадании на мусорную свалку. Таким образом, по мнению специалистов, удастся решить проблему экологичной утилизации старых сотовых телефонов.

К числу вещей, созданных из "умных материалов" можно отнести так называемую "умную одежду". Среди огромного количества подобных проектов можно выделить, например, одежду, реагирующую на изменение температуры: когда жарко, одежда пропускает воздух, чтобы охладить своего владельца, а когда холодно — наоборот, уплотняется. Совсем скоро на прилавках магазинов появится одежда, не впитывающая запах табачного дыма, самоочищающаяся одежда, спортивная одежда с эффектом охлаждения, костюмы и куртки, самостоятельно "подгоняющие" свой размер под размер хозяина, одежда, отгоняющая насекомых, носки, благоухающие цветочными ароматами, рубашки которые не мнутся, даже если их скомкать и надолго запихнуть в чемодан.

Современные фантастические фильмы буквально изобилуют примерами подобных "умных" материалов. Самый яркий пример — жидкий "Терминатор" из одноименного фильма, принимающий любую форму. С развитием нанотехнологий материалы с подобными чудодейственными способностями становятся реальностью. А сегодня уже существует уникальная

ферромагнитная жидкость, способная принимать определенную форму под действием электромагнитного поля. На рисунке изображены несколько кадров видеоролика, демонстрирующего поведение ферромагнитной жидкости под действием электромагнитного поля.

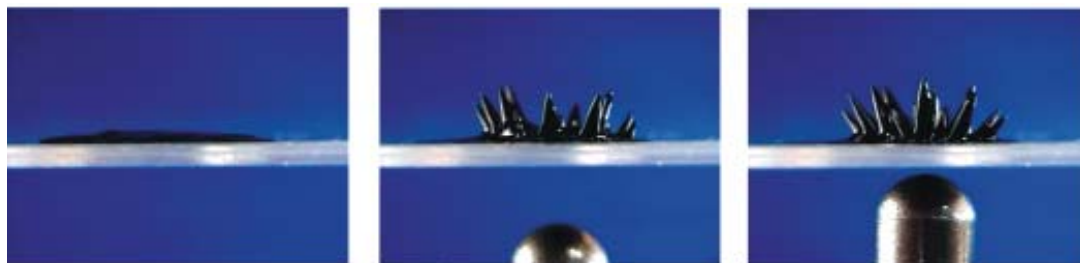


Рис 80. Кадры видеозаписи ферромагнитной жидкости под действием изменяющегося магнитного поля

Ферромагнитная жидкость представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из *дисперсионной среды*, *магнитной фазы* и *стабилизатора*. В качестве дисперсионной среды может выступать любая жидкая среда: вода, масло, различные растворы. В качестве магнитной составляющей обычно используются наночастицы, обладающие сильными ферромагнитными свойствами. Введение же в жидкость стабилизатора, прочно связывающегося с поверхностью магнитных частиц и препятствующего их агрегации, обеспечивает устойчивость такой жидкости. Ферромагнитные жидкости — это совершенно новый обширный класс магнитных материалов, и их, несомненно, ждет широкий спектр применений в технике и промышленности.

Такая система не только активно реагирует на изменения окружающей среды, но и поддается управлению. Поведение таких материалов можно запрограммировать заранее.

"Умные материалы" следующего поколения представляют собой программно-аппаратный комплекс из всевозможных сенсоров, миниатюрных компьютеров и исполнительных наноустройств.

Разработчиками компании Philips был предложен проект по созданию нижнего белья, со встроенными нанодатчиками, отслеживающими нарушения в сердечном ритме своего обладателя. В экстренном случае (например, инфаркт) одежда связывается по беспроводной связи с ближайшей станцией скорой помощи и спасает человеку жизнь...

Наверняка многие читатели видели фантастический фильм “Хищник”, где хитрый инопланетный монстр, нападавший на Шварценеггера, обладал чудесным костюмом-невидимкой.



Рис 81. Кадр из кинофильма “Хищник”

И что бы вы думали? Сегодня уже продемонстрированы первые образцы такого костюма, созданного с помощью нанотехнологий! Они пока еще далеки от совершенства, но, кажется, уже в ближайшие годы мы получим первого настоящего “человека-невидимку”.



Рис 82. Демонстрация одного из опытных образцов костюма-невидимки *

Правительство США планирует к 2018 году оснастить таким камуфляжем своих солдат.

Принцип работы костюма-невидимки будущего прост: он представляет собой наноматериал, в который встроены миниатюрные видеодатчики и светоизлучающие элементы. Каждый дат-

* Перепечатано с www.intelmessages.org

чик, принимающий изображение из какой-либо точки, например, со спины, посылает видеосигнал на процессор, который перенаправляет его на соответствующий участок “экрана” спереди.

При этом процессор моделирует траекторию луча таким образом, как если бы между принимающим датчиком и светоизлучающим элементом ничего не было. Это позволяет наблюдателю видеть предметы, которые фактически находятся за обладателем костюма.

Технология “невидимости” наверняка будет задействована во многих сферах человеческой деятельности. Возможно, ею воспользуются хирурги, которым собственные руки и инструменты часто мешают видеть оперируемые органы. Летчики также будут не против “прозрачного” пола в кабине самолета, показывающего все детали посадки и т.д.

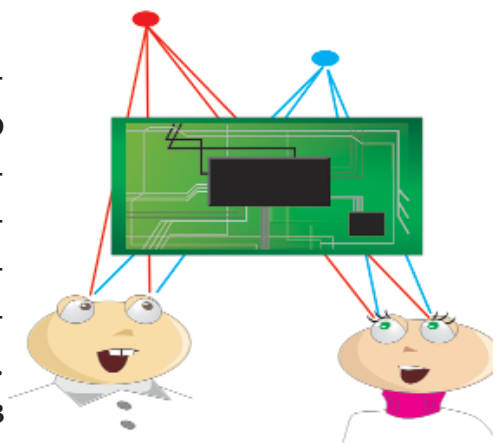


Рис 83. Схема работы костюма-невидимки

Теперь давайте немного пофантазируем...

Как уже было отмечено, одной из особенностей “умных материалов” является возможность программного управления их поведением. Так что мешает нам как программистам такого материала-невидимки запрограммировать его “показывать” внешним наблюдателям не только “пустое место”, и даже не самого пользователя костюма, а кого-нибудь другого, например, известную кинозвезду или пришельца-гуманоида? Вот где было бы раздолье для любителей розыгрышей!

Впрочем, сколь бы ни был изобретателен ум шутника-невидимки, “оружие” против него может быть самым простым: баллон с яркой краской да распылитель — и никакой вам невидимости!

Кстати, вот вопрос: а будет ли “человек-невидимка” отбрасывать тень в яркий солнечный денек? Предлагаем поразмыслить над этим вопросом самостоятельно...

Сегодня создать столь совершенную конструкцию невидимости пока нереально — нет ни соответствующих компьютерных мощностей, ни малых размеров. Однако технологии применения той же идеи, ну, например, в архитектуре уже вполне реальны. Для маскировки всего или части высотного здания

достаточно даже сантиметрового “разрешения”. Поэтому, наверное, не за горами то время, когда однотипные многоэтажные “коробки” канут в лету, а нашему взору предстанут архитектурные ансамбли, буквально “парящие в воздухе”.

Архитектура будущего будет потрясать воображение красотой, надежностью и индивидуальностью.



Рис 84. Возможно, именно так в будущем смогут выглядеть современные города.

Следует отметить, что идея подобной конструкции не нова. Сотни миллионов лет назад природа уже изобрела похожее покрытие из микроскопических видеодатчиков и наградила ими глаза некоторых насекомых. На рисунке изображены глаза стрекозы с 200-кратным увеличением.



Рис 85. Взгляните в глаза стрекозы*

Некоторые наноматериалы “ведут себя” совсем не так, как им “положено” себя вести с точки зрения классической науки. В школе нас учат, что при нагревании все тела расширяются, а

* Фото перепечатано с разрешения Курта Декерта - автора замечательной книги “Eye Design Book” (www.eyedesignbook.com)

при охлаждении сжимаются. Однако наноматериал, над которым в настоящее время работает Елена Сердунь — молодой кандидат наук из ФЭИ, — ведет себя с точностью до наоборот! Материал состоит из пористой матрицы и лиофобной, то есть немачивающей ее, жидкости. Если его нагреть, то он сжимается, накапливая тепло. И наоборот — отдавая тепло, расширяется. Можно поступить наоборот: сжать систему, и тогда она самопроизвольно нагреется!

Такой “умный” материал, превращающий тепловую энергию в механическую и наоборот, фактически представляет собой обратимый тепловой аккумулятор. Благодаря своим удивительным способностям он может использоваться как преобразователь тепловой энергии в двигателях, холодильниках или стать основой для невиданных прежде энергетических установок. К примеру, защитные клапаны и мембраны, автоматически срабатывающие при изменении температуры или давления (в случае перегрева или разгерметизации) без вмешательства человека. Такие клапаны способны самостоятельно контролировать весь производственный процесс, предотвращать последствия ошибок персонала и останавливать работу оборудования в случаях угрозы аварии.

Их можно применять для повышения надежности производства, для защиты емкостей, находящихся под давлением, при перевозке и хранении опасных или ядовитых грузов и т.п.

Но инженеры на этом не остановились и создали наноструктурированный сплав четырех металлов — свинца, сурьмы, серебра и теллура, преобразующий тепловую энергию... прямо в электричество. Это позволит не только использовать тепло, бесполезно рассеиваемое при работе разных устройств, но и получать огромное количество дармовой энергии из лавы и расплавленных пород, из которых почти целиком состоит наша Земля, начиная с глубины в несколько десятков километров.

Американские ученые уже сумели пропустить мощные электрические заряды по молекулярным полимерным цепочкам, что является одним из ключевых моментов в создании так называемых “солнечных пластмасс”, которые могут сделать солнечные батареи настолько эффективным источником электричества, что они составят серьезную конкуренцию сегодняшним тепловым электростанциям. Тончайшие пленки, вырабатываю-

щие электроэнергию, можно будет просто наклеить на крышу дома - и полностью обеспечить его электричеством. Долговечные и эффективные солнечные батареи могут быть созданы, например, на основе фуллеренов или биополимеров.

Сегодня такие “умные” наноматериалы кажутся нам чудесными, необычными, и, конечно же, являются весьма дорогостоящими, поскольку их получение еще остается в рамках лабораторий. Но все же не за горами тот день, когда и они переступят их порог и войдут в нашу привычную жизнь.

Ведь сегодня мы повсеместно используем, например, алюминий и даже не задумываемся над тем, что когда-то алюминиевая посуда (аналог современных баночек из-под кока-колы) ценилась наравне с золотой и серебряной. До изобретения электричества из-за огромных трудностей, связанных с получением алюминия, этот легкий и красивый металл применялся только для изготовления ювелирных изделий. Об этом свидетельствуют многие археологические находки. Хрестоматийный пример: алюминиевая кружка на золотой цепочке. В 1889 г., когда великий русский химик Д. И. Менделеев приезжал в Лондон, ему были преподнесены в качестве особо ценного подарка весы, сделанные из золота и алюминия.

Так что весьма вероятно, что вскоре каждый из нас сможет использовать “умные” наноматериалы в своей повседневной жизни. Только представьте: вы садитесь в сверхпрочный и сверхлегкий автомобиль, температура салона в котором вне зависимости от погоды — будь то невыносимая жара или трескучий мороз — всегда остается в пределах 20-22°C. Кресла и стулья в вашем доме сделаны из “умного” материала, реагирующего на изменение давления. Когда вы садитесь, они автоматически трансформируются таким образом, чтобы сидеть в них было удобно и комфортно. Окна вашего дома, сделанные из самоочищающегося стекла, самостоятельно расщепляют и удаляют попадающую на них грязь и пыль, не требуя никаких усилий с вашей стороны. А на грядках у вашего дедушки парниковая пленка реагирует на потепление или похолодание и сама открывается и закрывает грядки. Красота!

Алмазоид – наноматериал будущего

Уникальные свойства алмаза издавна привлекали внимание ученых. Во-первых, благодаря тому, что каждый атом угле-

рода в кристаллической решетке алмаза связан с четырьмя другими атомами прочными ковалентными связями С-С, алмаз обладает феноменальной прочностью. Он способен выдерживать давление порядка 1050 ГПа и температуру свыше 1800°С.

Во-вторых, этот драгоценный кристалл состоит из атомов углерода — довольно распространенного на Земле элемента, входящего также в состав нефти, природного газа, древесины, угля, графита и пр. На нашей планете имеется около $6 \cdot 10^{18}$ тонн углерода, что в миллион раз превышает массу всех построек и продукции за всю историю человеческой цивилизации.

Благодаря своим замечательным характеристикам природный алмаз мог бы найти широкое применение в промышленности, медицине и т.д., если бы не его чрезвычайная редкость и дороговизна. Оригинальные бриллиантовые украшения из самых больших природных алмазов не превышают нескольких сантиметров и стоят сотни тысяч долларов. Однако повсеместная распространенность углерода не могла не навести ученых на мысль о разработке методов получения искусственных алмазов из дешевых углеродсодержащих соединений.

В итоге, такие методы были изобретены, и сегодня искусственный алмаз является превосходным материалом во многих областях промышленности: электронной, металлообрабатывающей, авиакосмической, автомобильной, судостроительной и т.д.

С развитием нанотехнологий возрос интерес к получению алмазных частиц нанометрового размера и возникла идея существования *алмазоидов* — мельчайших кирпичиков, из которых состоит кристалл макроскопического алмаза, полностью повторяющих его тетраэдрическую структуру. Такие элементарные кирпичики-молекулы получили название: *адамантана* ($C_{10}H_{16}$), *диамантана* ($C_{14}H_{20}$) и *триамантана* ($C_{18}H_{24}$).

Между собой атомы углерода связаны ковалентной связью, а свободные связи поверхностных атомов “заняты” атомами водорода.

Долгое время эти соединения считались гипотетическими молекулами, так как их нельзя было ни выделить из окружаю-

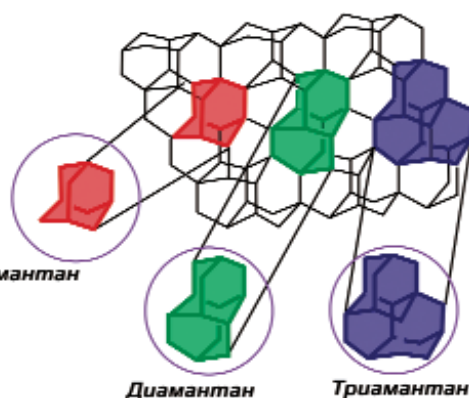


Рис 86. Структура алмазоидов

щей среды, ни получить методами термохимического синтеза. Но в 1957 они были обнаружены в природе — алмазоиды удалось выделить из... сырой нефти.

Алмазоиды могут иметь разную пространственную структуру, но всем им присущи те же базовые характеристики, как у природного алмаза: модуль Юнга > 1050 ГПа, температура плавления выше 1800°C , плотность 3500 кг/м³. Поэтому любой объект, изготовленный из алмазоидов, будет иметь жесткость гораздо больше, чем аналогичный из стали, более высокую температуру плавления, и будет гораздо легче аналогов из других материалов.

Алмазоид представляет собой углеводород, в котором атомы углерода образуют тетраэдральную пространственную решетку, точно такую же, как и в алмазе.

Перспективы применения алмазоида

Благодаря характеристикам, близким к алмазу, алмазоид имеет широкий спектр применения в различных областях жизнедеятельности человека. Это, прежде всего, микро- и наноэлектроника, медицина, машиностроение, металлообработка, двигателестроение, авиастроение, транспорт. Рассмотрим вкратце некоторые из них.

Наноалмаз и алмазоидные пленки имеют широкие перспективы применения в различных устройствах электроники, MEMS и NEMS-устройствах¹¹, полевых транзисторах, электронно-лучевых устройствах и оптических компьютерах.

Одним из основных современных применений наноалмазов является полировка электронных и оптических материалов для электроники, радиотехники, оптики, медицины, машиностроения, ювелирной промышленности. Составы на основе наноалмазов позволяют получить совершенную зеркальную поверхность твердых тел любой геометрической формы, не имеющую дефектов и дислокаций, с высотой шероховатости рельефа 2–8 нм.

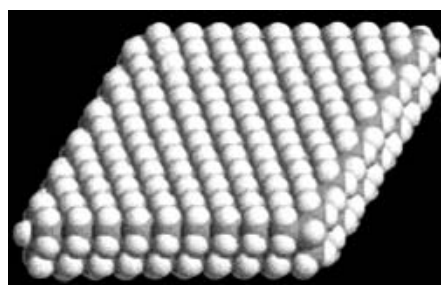


Рис 87. Модель алмазоидной пленки. Серыми шариками изображены атомы углерода, белыми — окружающие их атомы водорода

¹¹. MEMS- или NEMS- аббревиатура от Micro (Nano) Electric Mechanical System. Подробному описанию этих устройств посвящена отдельная глава данной книги.

Применение наноалмазов существенно улучшает качество микроабразивных и полировальных составов, смазочных масел, абразивных инструментов¹², полимерных композитов, резин и каучуков, систем магнитной записи.

Введение наноалмазов в полимеры, резины и пластмассы увеличивает их прочность и износостойкость. “Алмазные” шинные резины, устойчивые к проколам и перепадам температур, уже сегодня прекрасно работают и в условиях Крайнего Севера, и в жарких пустынях.

Наноалмазы применяются в смазках, маслах и охлаждающих жидкостях. Использование наноалмазов в маслах увеличивает ресурс работы моторов и трансмиссий.

Алмазоид является первым претендентом в списке материалов, из которых в перспективе могут быть изготовлены медицинские наноинструменты и нанороботы. Поскольку их деятельность будет производиться, в основном, внутри тела, необходимо, чтобы их поверхность была полностью биосовместима с тканями и клетками организма.

Известно, что обычный алмаз отличается высокой биосовместимостью по сравнению с другими веществами. Клинические испытания сравнительно грубой алмазной поверхности протезов и имплантантов показали, что она химически инертна, нетоксична для клеток, воспринимается лейкоцитами как “своя” и не вызывает воспалительных или патогенных процессов.

Ученые только что научились получать алмазные нанопокрyтия, поэтому невозможно точно предсказать реакцию на них клеток организма, но известно, что мелко измельченные углеродные частицы хорошо усваиваются телом: древесный уголь и копоть (сферические частицы диаметром 10-20 нм) использовались для татуировки с древнейших времен. В настоящий момент активно ведутся исследования на биосовместимость алмазоидных наночастиц, но до сих пор ни о каких вредных воздействиях на организм заявлено не было.

Вероятно, благодаря своим уникальным характеристикам, алмазоид станет универсальным и дешевым материалом XXI века.

¹² *Абразивные инструменты* - инструменты высокой твердости для механической обработки металлов

Получение наноалмазов

На сегодня существует несколько способов получения алмазных наночастиц. Среди них наиболее распространены следующие:

- получение из природных алмазов физическими методами;
- синтез при сверхвысоких давлениях и температурах;
- электронно- и ионно-лучевые методы, использующие облучение углеродсодержащего материала пучками электронов и ионами аргона.
- химическое осаждение углеродсодержащего пара при высоких температурах и давлениях.

На следующем рисунке изображены стадии зарождения и роста наночастиц алмаза из газовой фазы при 1000°С.

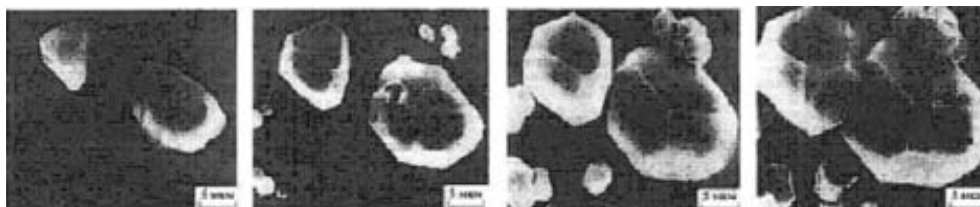


Рис 88. а) 0 мин, б) 15 мин, в) 30 мин, г) 60 мин после начала наращивания затравочных кристаллов алмаза, помещенных на медную подложку

Еще наноалмазы получают детонационным синтезом, ведь при взрыве образуется достаточно высокая температура и давление для формирования наноалмазов. Однако взрывчатка стоит дорого. В то же время, по международным обязательствам, наша страна должна уничтожить более миллиона тонн своих боеприпасов, что обходится в 1500 долларов на тонну. Академик В.М.Лоборев предложил использовать боеприпасы для производства наноалмазов, но до практики дело, как это водится, не дошло. В результате имеем отсутствие боеприпасов, наноалмазов и денег.

Для получения сложных алмазоидных наноструктур перспективна идея автоматизированного механосинтеза, который станет возможным с появлением точных наноманипуляторов.

Сегодня химикам удастся получать сложные молекулярные комплексы, смешивая в пробирках различные вещества при необходимых условиях и в нужной концентрации. Так почему просто не собирать наноструктуры из атомов механическим путем под контролем компьютера и человека? Если удастся добиться необходимых результатов с помощью пробирок, то не лучше ли наноманипуляторы справятся с таким заданием?

Идея молекулярного механосинтеза чрезвычайно проста и напоминает роботизированную фабрику, например, по сборке автомобилей: наноманипулятор берет атом и присоединяет его к поверхности собираемого объекта. Такая система кажется довольно простой и эффективной, и более подробно будет рассмотрена в главе “Инструменты нанотехнологии”

Итак, повторим еще раз!

- Атомы образуют химические связи, чтобы приобрести устойчивую электронную конфигурацию, т.е. полностью заполнить свою внешнюю электронную оболочку. Тип связи влияет на свойства вещества, включая реакционную способность..

- Выделяют несколько типов химической связи:

Ионная связь обусловлена электрическим притяжением между противоположно заряженными ионами. Типичный представитель - поваренная соль (NaCl).

Ковалентную связь образуют атомы с общей парой электронов. Типичный представитель — алмаз.

Металлическая связь связывает ионы металлов, “плавающие” в облаке нелокализованных электронов, что объясняет высокую гибкость и прочность металлов.

Силы Ван-дер-Ваальса - это все виды слабого межмолекулярного взаимодействия, кроме водородной связи.

Водородная связь обусловлена притяжением между атомом водорода и другими электроотрицательными атомами. Она может быть как межмолекулярной (вода, лед), так и внутримолекулярной (в молекуле ДНК).

- Количество атомов в частице сильно влияет на ее свойства

- **Нанохимия** изучает свойства и способы получения наночастиц. Одна из главных задач нанохимии - установление связи между размером и реакционной способностью частицы.

- Выделяют две группы методов получения наночастиц:

Диспергационные (измельчение);

Конденсационные (восстановление из ионов и атомов).

- Наночастицы (кроме “магических”) так и норовят слиться. Чтобы этому помешать в систему вводят стабилизатор.

- Наночастицы могут обладать уникальными свойствами.

Наночастицы серебра убивают большинство известных вирусов и микробов. Фильтры для очистки воды и воздуха на ос-

нове этих наночастиц гораздо более эффективны и долговечны по сравнению с ионными фильтрами.

Наночастицы оксида цинка защищают от вредного воздействия УФ лучей. Их можно использовать при производстве очков, одежды, солнцезащитных кремов и пр. Кроме того, ими можно модифицировать ткани для камуфляжей и покрытий типа “стелс”, невидимых в широком диапазоне частот.

Наночастицы диоксида кремния позволяют создавать самоочищающиеся покрытия для тканей, стекла, дерева, керамики и камня.

РВС на основе *нанотрубок серпентина* продлевает жизнь автомобиля и значительно снижает уровень выхлопных газов.

- Одним из практических применений нанохимии является производство наноматериалов с улучшенными свойствами, а также “умных” материалов, способных активно реагировать на изменения окружающей среды и изменять свои свойства в зависимости от обстоятельств.

- С развитием нанотехнологий большой интерес вызывает **алмазоид** - углеводород, в котором атомы углерода образуют тетраэдрическую пространственную решетку, точно такую же, как в алмазе. Выделяют три вида алмазоидов: (адамантан, диамантан и триамантан), Всем им присущи базовые характеристики алмаза, в том числе, высокая биосовместимость. Благодаря этому, алмазоид является первым претендентом в списке материалов, из которых в перспективе могут быть изготовлены медицинские нанороботы.

Глава 4. Нанoeлектроника и МЭМС

“Закон Мура - замечательный пример экспоненциального роста. На то, чтобы добиться от компьютера быстрого действия в 1 МГц, у человечества ушло 90 лет. Сегодня же мы добавляем по 1 МГц каждый день.”

Рэй Курцвейл

Появление и развитие полупроводниковой электроники

Нельзя не восхищаться достижениями человечества во второй половине XX века, когда чуть ли не каждый год сопровождался крупным прорывом то в одной, то в другой области. Одной из причин тому явилось широкомасштабное применение полупроводников.

Казалось бы, что здесь такого? Люди начали использовать еще один вид материалов, и только. Но... можно сказать, что именно полупроводники превратили за несколько десятилетий разгромленную во второй мировой войне нищую, голодную Японию в одну из ведущих держав мира.

Полупроводники — это нечто среднее между проводниками и диэлектриками. К ним относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений. Почти все неорганические вещества окружающего нас мира — полупроводники. Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

Главная особенность полупроводников состоит в том, что их физические свойства сильно зависят от внешних воздействий - изменения температуры или малейшего количества примесей.

Целенаправленно изменяя температуру полупроводника или легируя его (добавляя примеси), можно управлять его физическими свойствами, в частности, электропроводностью.

То, что вещества по-разному проводят электричество, людям было известно еще 180 лет назад. В 1821 году английский химик Хэмфри Дэви установил, что электропроводность металлов уменьшается с ростом температуры.

Проводя дальнейшие эксперименты, его ученик Майкл Фарадей в 1833 году обнаружил, что у сернистого серебра электропроводность с ростом температуры не падает, а возрастает. Затем он открыл еще несколько веществ с необычной зависимостью проводимости от температуры. В то время, однако, это не заинтересовало научный мир, пока в 1873 году не обнаружили, что сопротивление селена (Se) меняется при освещении.

Селеновые фотосопротивления сразу нашли применение в разных оптических приборах. И первым полупроводниковым прибором стал *фоторезистор*, представляющий собой обычный селеновый столбик, электрическое сопротивление которого в темноте ниже, чем на свету.

Бурное развитие полупроводниковой электроники началось с изобретением сначала точечного (1948г.), а затем и плоскостного (1951г) транзистора — основы любой современной микросхемы.

Чтобы понять принцип работы транзистора, надо рассмотреть ряд физических процессов, протекающих в полупроводниках. Для начала рассмотрим суть электропроводности, то есть способности различных веществ проводить ток.

Электропроводность

Как известно, все вещества состоят из атомов, соединенных химическими связями, во многом определяющими их физико-химические свойства, в частности, электропроводность. Так, например, соль или дерево не проводят ток, являясь идеальными диэлектриками, в то время как металлическая проволока служит превосходным проводником тока. В чем же секрет высокой электропроводности металлов?

Электропроводность металлов

Атомы в кристаллической решетке металлов упакованы очень плотно - каждый атом может быть непосредственно связан с 12-ю соседними. Поэтому электроны внешних оболочек атомов (валентные электроны) оказываются “свободными” и не участвуют в межатомных взаимодействиях. Эти электроны могут беспорядочно двигаться, образуя так называемый “электронный газ”, в который погружены положительные ионы металла, расположенные в узлах кристаллической решетки

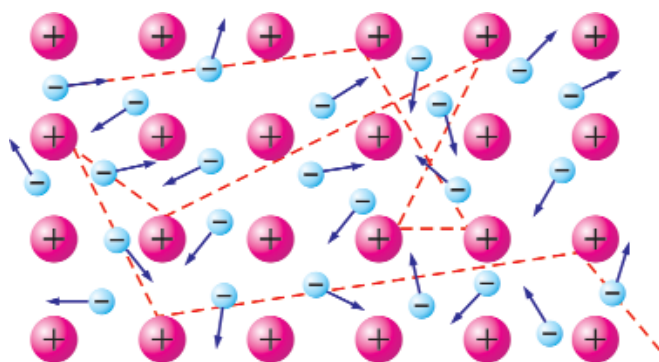


Рис 89. Газ свободных электронов в кристаллической решетке металла. Показана траектория одного из электронов

Как ионы, образующие решетку, так и электроны участвуют в тепловом движении. Ионы совершают тепловые колебания в узлах решетки. Свободные электроны движутся хаотично и сталкиваются с ионами решетки. Из-за взаимодействия с иона-

ми электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый потенциальный барьер. Высота этого барьера называется *работой выхода*.

При комнатной температуре у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера. Но если приложить к металлической проволоке разность потенциалов, то по ней потечет электрический ток, образованный свободными электронами, постоянно присутствующими в кристалле. Именно высокая концентрация свободных электронов и обуславливает высокую электропроводность всех металлов.

Электропроводность полупроводников

Рассмотрим теперь кристаллическую решетку полупроводниковых кристаллов. Для полупроводников характерна *ковалентная связь* между атомами. В качестве примера рассмотрим кристалл германия (Ge), имеющий четыре валентных электрона.

Благодаря прочности ковалентной связи электроны в кристалле германия гораздо более локализованы, чем в металлах. Это означает, что в обычных условиях его проводимость на порядки меньше, чем у металлов (из-за отсутствия “свободных” нелокализованных электронов).

Что же будет, если к такому кристаллу приложить разность потенциалов? Даже если при этом в кристалле будет создано очень сильное электрическое поле, оно сможет лишь чуть-чуть деформировать электронные орбиты, но разорвать их полностью окажется не в состоянии. Свободных носителей заряда в кристалле не возникнет, и, следовательно, не будет электрического тока. Таким образом, в “чистом виде” кристалл германия представляет собой обычный диэлектрик.

Чтобы в кристалле кремния появились свободные носители заряда, необходимо как-то нарушить их стабильные ковалентные связи. Достичь этого можно различными способами.

Во-первых, кристалл можно просто нагреть, придав его электронам дополнительную энергию, достаточную для того, чтобы разрушить межатомные электронные связи. Предположим, в результате нагревания одна из связей разорвалась, а выбитый со своей орбиты электрон оказался между четырьмя соседними атомами.

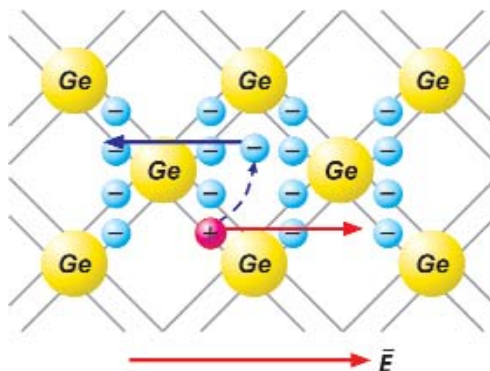


Рис 90. Парно-электронные связи в кристалле германия

Что в это время происходит с разорванной связью?

Появившаяся у нее дополнительная энергия позволяет захватить электрон из соседней связи. В свою очередь, вновь образовавшаяся “дырка” также “отнимает” электрон у соседней связи и т.д. В результате такая неполная связь подобно свободному электрону хаотично перемещается между атомами решетки. Движение разорванных связей происходит за счет перехода электронов, участвующих в соседних связях, а не свободных электронов, так что каждый раз в кристалле появляется очередная неполная связь.

Образно это можно уподобить случаю, когда в заполненном зрительном зале уходит один из зрителей первого ряда. На его место сразу пересаживается зритель из второго ряда, чье место тут же занимает человек, сидевший в третьем ряду и т.д. При этом пустое место перемещается по залу от первого ряда к последнему противоположно движению зрителей.

Когда разорванная связь перемещается по кристаллу, то движется и созданный ею нескомпенсированный положительный заряд. Это можно рассматривать как появление в полупроводнике положительно заряженных частиц, величина заряда которых равна заряду электрона. Такие квазичастицы (“квази” — значит “почти”, так как это все-таки не частицы) получили название “**дырок**”.

Свободный электрон и дырка существуют в кристалле не вечно. Спустя некоторое время, составляющее от 10^{-10} до 10^{-2} с, свободный электрон и дырка встречаются и *рекомбинируют*.

При рекомбинации выделяется энергия, которая была затрачена на создание электронно-дырочной пары. Иногда она выделяется в виде излучения, но чаще она передается кристаллической решетке, нагревая ее. Такая проводимость называется *собственной электропроводностью* полупроводников.

Дырки рождаются и гибнут только парами вместе со свободными электронами, поэтому концентрации электронов (n) и дырок (p) в собственном полупроводнике (без примесей) равны:

$$p = n$$

Второй способ получить в полупроводнике свободные носители заряда — намеренное введение в кристалл различных примесей. Рассмотрим ситуацию, когда в четырехвалентный проводник, например, в кремний, попадает атом пятивалентного вещества, например, мышьяк — As или фосфор — P.

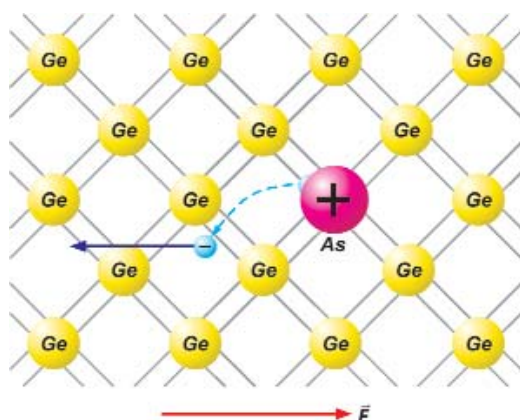


Рис 91. Атом мышьяка в решетке германия.
Полупроводник n-типа

Наличие пяти валентных электронов в атоме As говорит о его способности организовывать химические связи с пятью соседними атомами. Но в кристаллической решетке кремния имеется только четыре соседних атома, с которыми можно образовать связи. Поэтому только четыре из пяти валентных электронов мышьяка оказываются включенными в прочные химические связи. Оставшийся же пятый электрон оказывается не задействованным в связях, вследствие чего в кристалле создаются дополнительные носители заряда — электроны.

Такие примеси называют *донорными*. Обратите внимание на то, что, в отличие от собственного полупроводника, рождение свободного электрона здесь не сопровождается одновременным появлением дырки, поскольку межатомные связи при этом не разрушаются. В результате концентрация свободных электронов в кристалле с донорными примесями значительно больше концентрации дырок:

$$p < n$$

Полупроводники с донорными примесями называют *полупроводниками n-типа* (от англ. “negative” – отрицательный, по знаку основных носителей заряда) или *электронными полупроводниками*, а электроны – основными носителями заряда.

Возможна и противоположная ситуация, когда в четырехвалентный полупроводник вводится трехвалентная примесь, например индий – In или алюминий – Al. Для образования связей с четырьмя соседними атомами ему не хватает одного валентного электрона. В этом случае атом примеси может легко “отобрать” недостающий электрон у соседнего атома кремния. В результате у атома кремния возникает неполная связь, способная перемещаться по кристаллу (дырка). Такие примеси называют **акцепторами**.

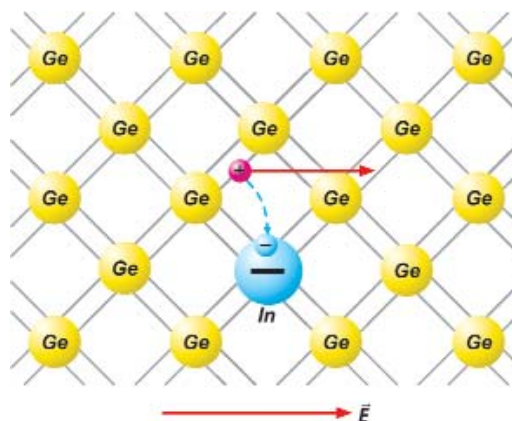


Рис 92. Атом индия в решетке германия.
Полупроводник p-типа

Рождение примесных дырок также не приводит к образованию электронно-дырочных пар, и концентрация дырок в полупроводнике с акцепторными примесями выше, чем концентрация электронов:

$$p > n$$

Дырки в данном случае являются основными носителями заряда, а сам полупроводник называют *полупроводником p-типа* (от англ. positive – положительный) или *дырочным полупроводником*.

Электронно-дырочный переход

Любой полупроводниковый прибор основан на одном или нескольких электронно-дырочных переходах.

Электронно-дырочный переход (p-n переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

Поскольку в полупроводнике n-типа концентрация электронов значительно превышает концентрацию дырок ($n \gg p$), а в полупроводнике p-типа – наоборот ($p \gg n$), то при кон-

такте двух полупроводников разных типов начинается процесс диффузии: дырки из р-области стремительно диффундируют (переходят) в n-область, а электроны, наоборот, из n-области в р-область.

В результате диффузии в n-области на границе контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В р-области, наоборот, уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, препятствующий дальнейшему процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу. Такой слой называется *запирающим*.

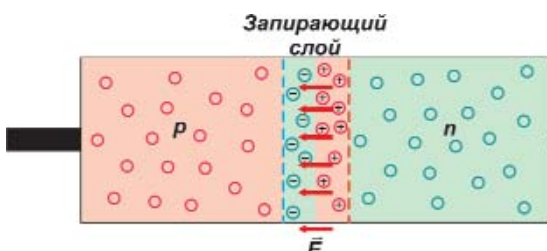


Рис 93. Образование запирающего слоя при контакте полупроводников р- и n-типов

р-n-переход обладает одной удивительной особенностью: *односторонней проводимостью*, то есть способностью пропускать электрический ток только в одну сторону.

Рассмотрим два возможных варианта подачи напряжения на р-n-переход:

1) положительный полюс источника соединен с р-областью, а отрицательный — с n-областью.

Тогда в силу притягивания разноименных зарядов друг к другу напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться. Естественно, это облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из р-области и электроны из n-области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать р-n-переход, создавая ток в прямом направлении. Сила тока через р-n-переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.



Рис 94. Прямое включение р-n перехода

2) положительный полюс источника соединен с n-областью, а отрицательный — с р-областью.

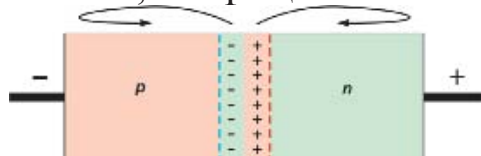


Рис 95. Схема обратного включения р-n перехода

Такое включение приведет к возрастанию напряженности поля в запирающем слое. Дырки в р-области и электроны в n-области не

будут двигаться навстречу друг другу, что приведет к увеличению концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Следовательно, ток через р-п-переход практически не идет.

Напряжение, поданное на р-п-переход при таком включении, называют *обратным*. Весьма незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в р-области и дырок в п-области.

Диод

Способность р-п-перехода пропускать ток только в одном направлении используется в приборах, которые называются полупроводниковыми диодами. Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия. При их изготовлении в кристалл с одним типом проводимости вплавляют капельки материала с другим типом проводимости.

Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный. Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода приведена на рисунке.

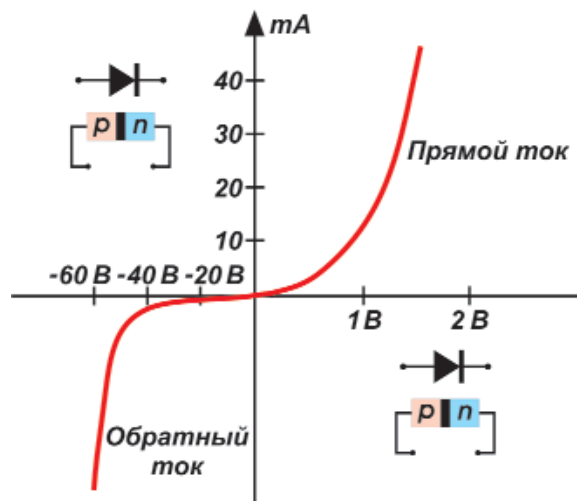


Рис 96. Вольтамперная характеристика кремниевого диода (использованы различные шкалы для положительных и отрицательных напряжений).

Транзистор

Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя р-п-переходами называются транзисторами, на их работе основаны все логические микросхемы. Название происходит от сочетания английских слов *transfer* — переносить и *resistor* — сопротив-

ление. Для создания транзисторов обычно используют германий или кремний.

Обычный *плоскостной (планарный) транзистор* представляет собой тонкую полупроводниковую пластинку с электронным или дырочным типом проводимости, на которую нанесены участки другого полупроводника с противоположным типом проводимости. Пластинку транзистора называют **базой (Б)**, одну из областей с противоположным типом проводимости — **коллектором (К)**, а вторую — **эмиттером (Э)**. В условных обозначениях транзистора стрелка эмиттера показывает направление тока через него.

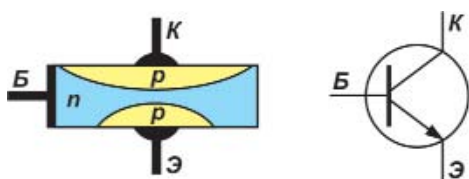


Рис 97. Транзистор структуры $r-n-r$ Транзисторы бывают двух типов: $r-n-r$ и $n-p-n$. Например, германиевый транзистор $r-n-r$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной проводимостью. В ней создаются две области с акцепторной примесью, т. е. с дырочной проводимостью.

В транзисторе $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а две области — проводимостью n -типа.

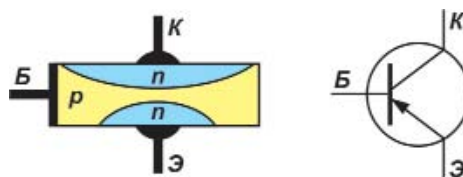


Рис 98. Транзистор структуры $n-p-n$

Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения, два $p-n$ перехода взаимодействуют и в цепи коллектора тоже возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала.

Вдумайтесь в это. В радиоприемнике ничтожный сигнал, пойманный антенной, управляет мощными колебаниями динамика. Слабые сигналы микросхем управляет моторами и искусственными мышцами роботов. Туннельный ток СТМ мощностью в доли наноампера управляет макроскопическим зондом. Как? Через транзисторы!

В транзисторе маленький ток управляет большим. Это суть электроники.

Но управление не обязательно подразумевает усиление. Можно управлять сигналами, несущими информацию — логические нули и единицы. А это значит, что можно целенаправ-

ленно изменять хранимую информацию — то есть *обрабатывать* ее, что и делает микропроцессор, работая на двоичной логике.

В CMOS (комплементарной металл-оксид-полупроводниковой) логике транзистор включен так, что нулевое или положительное напряжение кодирует “0”, а отрицательное “1”. Пока цепь базы разомкнута, ток в цепи эмиттера практически не идет, так как для основных носителей свободного заряда переход заперт. Это состояние соответствует логическому “0”. При подаче отрицательного напряжения на базу дырки — основные носители заряда в эмиттере — переходят из него в базу, создавая в цепи ток, что соответствует логической “1”.

Таким образом, “0” на входе схемы запирает транзистор, а на выходе мы имеем опять “0”. Если же подать “1” на вход (базу транзистора), он откроется и выдаст “1” на эмиттере.

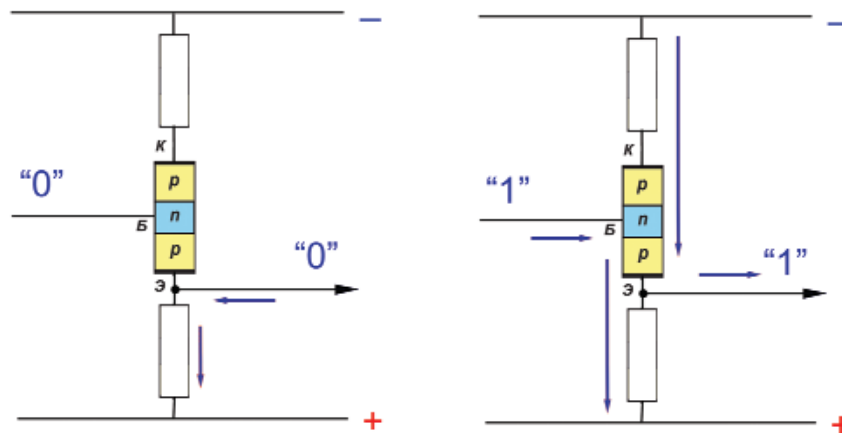


Рис 99. р–п–р-транзистор как логический переключатель

Можно сделать все наоборот и присоединить выход к коллектору. Тогда мы получим логическую схему “НЕ”, превращающую “0” в “1”, а “1” в “0”.

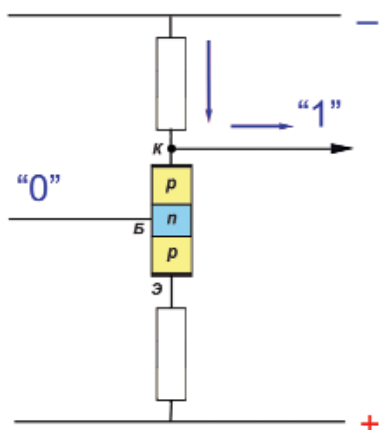


Рис 100. Схема «НЕ» на одном транзисторе

Соединяя транзисторы, можно получать и более сложные логические схемы: “И”, “ИЛИ”, “Исключающее ИЛИ (XOR)” и другие.

Современная технология производит полупроводниковые приборы — диоды, транзисторы, фотосенсоры размером в несколько микрон.

Однако для дальнейшего развития техники возникла необходимость перехода на транзисторы нанометровых раз-

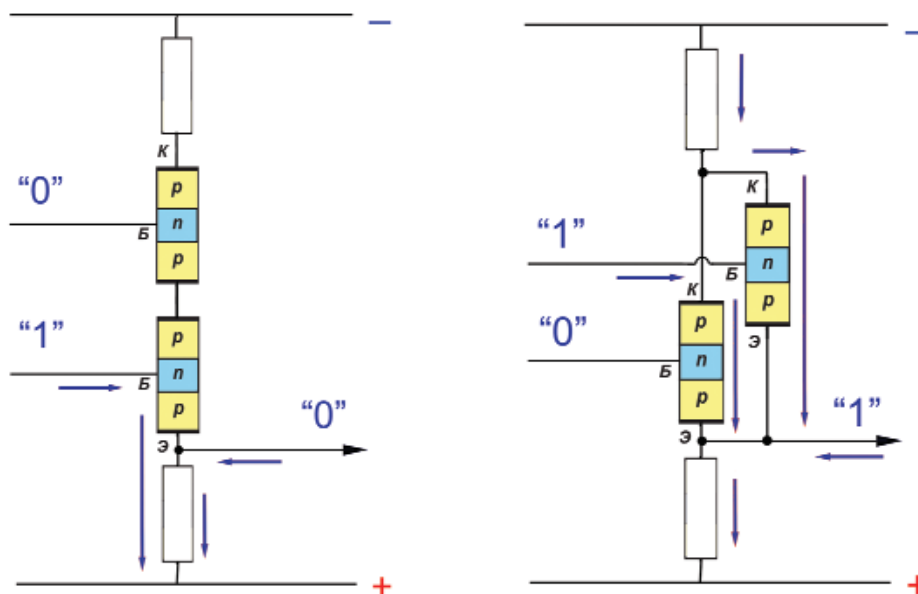


Рис 101. Транзисторные схемы «И» (слева) и «ИЛИ» (справа)

Соединяя несколько транзисторов, можно получить все базовые логические схемы, необходимые для работы микропроцессора: "И", "ИЛИ", и "НЕ".

меров. Ведь быстродействие компьютера напрямую зависит от количества транзисторов, которое удастся разместить на единице площади. И первые попытки перешагнуть нанометровый рубеж уже дали хорошие результаты. Подробнее об этом будет рассказано в одном из следующих параграфов.

Интегральная микросхема

Применение микросхем привело к революционным изменениям во многих областях электроники. Это особенно ярко проявилось в компьютерной индустрии. На смену громоздким вычислительным машинам, содержащим десятки тысяч электронных ламп и занимавшим целые здания, пришли компактные и быстрые настольные и даже карманные компьютеры.

Интегральная схема (ИС) — это система микроскопических устройств (диодов, транзисторов, проводников и т.п.) на одной подложке. С чьей-то легкой руки микросхемы стали также называть чипами за некоторое сходство с тонкими ломтиками жареного картофеля (англ. chip).

Чип размером в 1 см² может содержать миллионы микроскопических устройств. Очевидно, что последовательное созда-

ние таких приборов “вручную” невозможно из-за огромного количества межсоединений (попробуйте-ка правильно спаять 1.000.000 транзисторов о трех ногах каждый, плюс еще мириады обслуживающих элементов — резисторов, диодов и т.п., да при этом еще не запутаться в проводах!). Выход из создавшегося положения был найден на пути интеграции (объединения) в едином устройстве — интегральной схеме — всего этого множества полупроводниковых устройств и межсоединений, созданных в едином технологическом цикле.

Как делают микросхемы

Поскольку микросхема создается на поверхности пластины, технология ее изготовления называется *планарной* (от англ. “planar” — “плоский”). Ее основу составляет *литография*. Название “литография” происходит от греческих слов “литос” — камень и “графо” — пишу, что дословно означает “писать на камне”. Литография в микроэлектронике — это действительно способ формирования заданного рисунка (рельефа) в слое полупроводника.

Изготовление, или “выращивание”, интегральной микросхемы включает в себя несколько основных этапов:

1. Подготовка подложки

Подложкой обычно является пластина кристалла кремния (Si) - самого распространенного полупроводника на Земле. Обычно пластина имеет форму диска диаметром 200 мм и толщиной менее миллиметра. Получают ее разрезанием цилиндрического монокристалла.

Так как свойства полупроводникового кристалла сильно зависят от направления (вдоль или поперек кристалла), то перед тем как нарезать кристалл на пластины, его свойства измеряют во всех направлениях и ориентируют нужным образом.

Для резки монокристаллов на пластины применяются диски с режущей кромкой, покрытой алмазной крошкой размером 40-60 микрон, поэтому после резки пластины получаются шероховатыми, на них остаются царапины, трещины и другие дефекты, нарушающие однородность структуры приповерхностного слоя и его физико-химические свойства. Чтобы восстановить поверхностный слой, пластину тщательно шлифуют и полируют.

Все процессы по обработке полупроводниковых пластин проводятся в условиях вакуумной гигиены в специальных помещениях со сверхчистой атмосферой. В противном случае пыль может осесть на пластину и нарушить элементы и соединения микросхемы (гораздо меньшие по размерам, чем сама пыль).

Очищенная кремниевая пластина подвергается так называемому *оксидированию* (или окислению) - воздействию на заготовку кислородом, которое происходит под высокой температурой (1000°C).

Таким образом на поверхности заготовки создается тончайший слой диоксида кремния SiO_2 . Регулируя время воздействия кислорода и температуру кремниевой подложки, можно легко сформировать слой оксида нужной толщины.

Диоксидная пленка отличается очень высокой химической стойкостью, большой прочностью и обладает свойствами хорошего диэлектрика, что обеспечивает надежную изоляцию находящегося под ним кремния и защищает его от нежелательных воздействий в ходе дальнейшей обработки.

2. Нанесение фоторезиста

Если некоторые области кремния, лежащие под слоем оксида, необходимо подвергнуть обработке, то оксид надо предварительно удалить с соответствующих участков. Для этого на диоксидную пленку наносится слой фоторезиста.

Фоторезист — это светочувствительный материал, который после облучения становится растворимым в определенных химических веществах. Фотошаблон представляет собой пластинку, состоящую из прозрачных и непрозрачных участков, и играет роль трафарета.

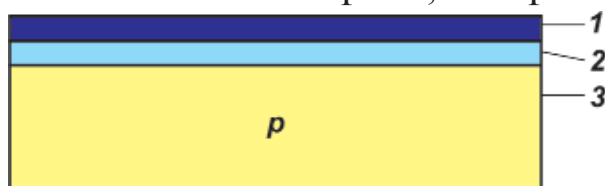


Рис 102. Исходная полупроводниковая пластина с проводимостью р-типа, покрытая слоями SiO_2 и фоторезиста: 1 - слой фоторезиста, 2 - слой SiO_2 , 3 - полупроводниковая пластина

3. Экспонирование

На следующем этапе — экспонировании — пластину с наложенным на нее фотошаблоном подвергают действию излучения. Фоторезист, расположенный под прозрачными участками фотошаблона, засвечивается.

В результате засвеченный слой, чья структура и химические свойства изменились под действием излучения, а также находящийся под ним слой диоксида кремния могут быть удалены с помощью химикатов (каждый слой – своим химикатом).

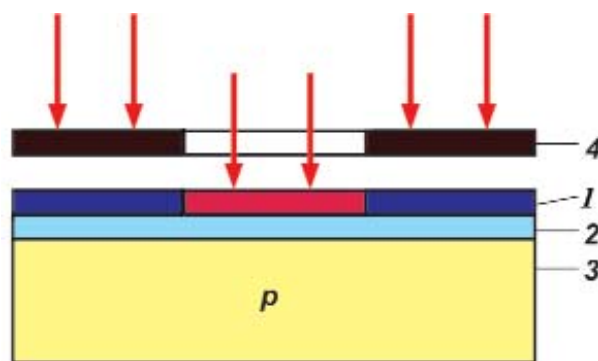


Рис 103. Облучение фоторезиста через фотошаблон: 1 - засвеченный участок фоторезиста, 2 - слой SiO_2 , 3 - полупроводниковая пластина, 4 – фотошаблон

4. Травление

Удаление облученного фоторезиста и оксидной пленки называется травлением. Этот процесс необходим, чтобы вскрыть окно для доступа к материалу подложки. Травление может быть химическим “мокрым” или плазменным “сухим”. Химическое жидкостное травление основано на растворении химическими веществами не защищенных фоторезистивной маской участков образца. Более эффективными являются “сухие” методы обра-

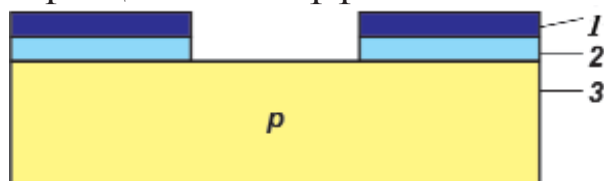


Рис 104. Кремниевая пластина с “окном” в слое SiO_2 , образовавшимся в результате облучения и последующего травления: 1 - фоторезист, 2 - слой SiO_2 , 3 – полупроводниковая пластина;

ботки, основанные на взаимодействии газозарядной плазмы с поверхностным слоем материала. Кроме того, существует ионное, ионно-химическое и плазмохимическое травление.

Результатом травления является полное удаление материала на участках, не защищенных фоторезистом.

5. Заключительным этапом формирования микросхемы являются процессы **эпитаксии, диффузии и металлизации**.

Эпитаксией называют ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки. Его производят в особом реакторе. Эпитаксия позволяет создавать равномерные атомные слои на пластине.

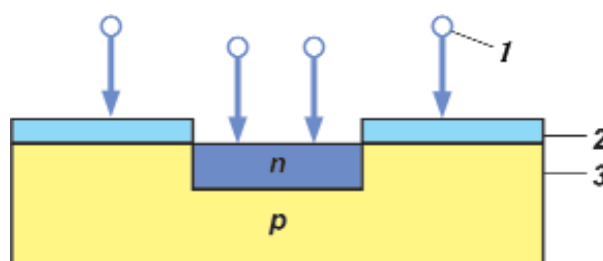


Рис 105 Выращивание на поверхности пластины эпитаксиального n-слоя с помощью диффузии донорных примесей: 1- ионы, 2 - слой SiO_2 , 3 - полупроводниковая пластина

Диффузию используют для создания p- и n-областей. Для этого в кремний в качестве акцептора вносят бор (В), а в качестве доноров — фосфор (Р) и мышьяк (As). Процесс заключается в нагреве пластины и внедрении в нее ионов с высокой энергией.

Металлизация завершает изготовление чипа. В ходе этого процесса осаждаются тонкие металлические пленки из алюминия, золота или никеля, которые образуют электрические соединения между активными областями и приборами на кристалле — токопроводящие линии и контактные площадки, которые мы можем наблюдать на любой микросхеме.

Итак, процесс изготовления микросхем включает несколько технологических этапов: очистка, окисление, литография, травление, диффузия, осаждение и металлизация.

Развитие литографии

Бесспорно, для дальнейшего развития электроники, т.е. увеличения производительности за счет уменьшения размеров чипов, ключевым моментом является совершенствование методов литографии.

Это значит, что толщина линий, наносимых светом на поверхности фоторезиста в момент формирования “рисунка” микросхемы, должна стремиться к уменьшению. Этого можно достичь уменьшением длины волны, ведь чем меньше длина волны, тем более мелкие детали рельефа она позволяет «нарисовать».

Первоначально засветка производилась инфракрасным излучением с длиной волны чуть более 1 микрона — и ширина дорожек была примерно такой же. Затем стандартными стали длины волн 435 и 365 нм. При помощи источника излучения с длиной волны 365 нм вычерчивались линии толщиной до 0,35 микрон, что почти соответствует длине волны.

Затем благодаря переходу на источники, действующие в спектре глубокого УФ-излучения (**DUV-литография** “Deep Ultra Violet”) с длиной волны 248 нм, полупроводниковая промышленность перешла на 0,18-микронную литографию. Достижение топологических размеров в 100 нм и меньше потребует уменьшения длины волны излучения, возможно, за счет применения принципиально новых источников.

В настоящее время интенсивно развивается ***EUV-литография*** (Extreme Ultra Violet) – литография в спектре жесткого ультрафиолета, обеспечивающая толщину линий проводников в 70 нм, что примерно в тысячу раз меньше толщины человеческого волоса.

EUV-литография является обычной литографией, но с использованием излучения с длиной волны 11 - 14 нм, отражающей оптикой и фотошаблонами. Оптическая система содержит набор зеркал между источником света и маской.

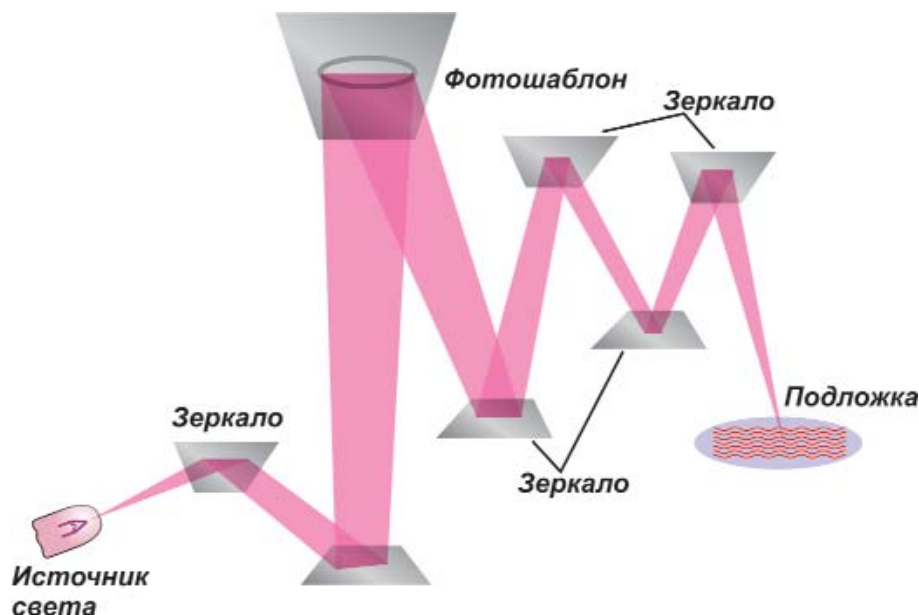


Рис 106. Схема оптической литографии

Чтобы дать читателю представление о преимуществах EUV-литографии, приведем несколько наглядных примеров:

- EUV-технология приводит к появлению микропроцессоров в 30 раз быстрее существующих. Процессор в 10 ГГц, например, будет настолько быстрым, что, например, за время, пока человек успевает моргнуть глазом (около 1/5 секунды), он сможет произвести порядка 2 млрд. вычислений.
- EUV-литография предназначена для печати на кремниевой подложке элементов размером 0,07 мкм (70 нм) и менее. Это все равно, что рисовать изображение размером с двухрублевую монету на поверхности Земли с космического корабля, а затем поверх него печатать другую картинку, четко совмещая их между собой. На одном кристалле соли (с ребром 0,25 мм) разместилось бы около 3600 таких 70-нанометровых элементов.
- Элементы, нанесенные с помощью EUV- и DUV-литографии, примерно так же отличаются друг от друга, как две оди-

наковые линии, проведенные на бумаге шариковой ручкой (EUV) и маркером (DUV).

Переход к EUV- литографии позволил пересечь 100 нм рубеж, оставаясь в рамках традиционной фотолитографии. Однако сложная зеркальная оптика и технология изготовления фотомасок делает такой подход исключительно дорогим, оставляя место для разработки литографических процессов, основанных на иных физических принципах.

Проводящие полимеры

Долгое время основными материалами микроэлектроники считались кремний - основа чипов, и медь, используемая в токопроводящих дорожках и контактах. Пластмассовым в компьютере был разве что корпус монитора. Однако прогресс не стоит на месте, и в последнее время все большую популярность завоевывают проводящие полимеры, которым, по прогнозам материаловедов, в ближайшие годы предстоит стать чуть ли не основным сырьем для производства полупроводниковой техники. Но прежде чем говорить об электропроводимости таких веществ, давайте вспомним, что же такое полимеры вообще.

Полимеры - это огромные молекулы-цепочки (макромолекулы), состоящие из большого числа многократно повторяющихся однотипных молекул-звеньев (мономеров). Греческая приставка "поли", означает "много".

Типичным полимером является уже знакомая нам молекула белка, состоящая из сотен молекул аминокислот. В природе полимеры встречаются на каждом шагу. Они — важная часть любого микроорганизма, растения, животного. Например, целлюлоза, крахмал, каучук, природные смолы — примеры полимеров растительного мира. В человеческом организме также немало полимеров: мышцы, кожа, волосы и др.

До недавнего времени полимеры создавала только природа. Но в 20-х годах прошлого столетия человек узнал ее секрет и научился синтезировать их самостоятельно. Искусственные полимеры прочно вошли в наш быт под видом таких привычных веществ, как полиэтилен, капрон, нейлон и другие виды пластмасс. Сегодня благодаря своим ценным свойствам пластмассы повсеместно заменяют древесину, металл, стекло. Пластмассы

не боятся влаги и едких кислот, не подвержены ржавчине и гни-ли и к тому же изготавливаются из дешевого углеводородного сырья.

Меняя длину и способы переплетения цепочек-полимеров, можно управлять прочностью и эластичностью пластмасс. Сто-ит к цепочке добавить еще хотя бы одно звено или ввести не-большое количество примесей — и у полимера появляются но-вые свойства. Одни пластмассы по прочности сравнимы с са-мой лучшей сталью, другие эластичнее резины, третьи прозрач-ны, как хрусталь, но не разбиваются. Одни пластмассы мгно-венно разрушаются под действием тепла, другие способны вы-держивать очень высокую температуру. Зная все это, ученые на сегодняшний день создали сотни тысяч различных синтетичес-ких полимеров.

Строение и состав полимеров

Однотипные атомы или группы атомов в макромолекуле могут иметь линейную, разветвленную или пространственную структуру. К *линейным* полимерам относится, например, нату-ральный каучук. К *разветвленным* - амилопектин, к *сложным пространственным* - нанотрубки.

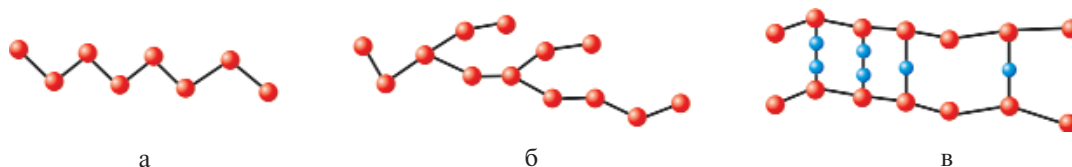


Рис 107. Различные типы структуры полимеров:
а — линейная, б — разветвленная, в— пространственная

Образование полимеров

Природные полимеры образуются в процессе биосинтеза в клетках живых организмов. Они могут быть выделены из расти-тельного и животного сырья. В основе получения синтетичес-ких полимеров лежат химические процессы *полимеризации* и *поликонденсации*. Реакцией полимеризации называется получе-ние новой макромолекулы с большим молекулярным весом из атомов или простых молекул - мономеров, причем это новое соединение имеет одинаковый с мономерами состав. На рисун-ке приведена условная схема реакций полимеризации (а) и по-ликонденсации (б).

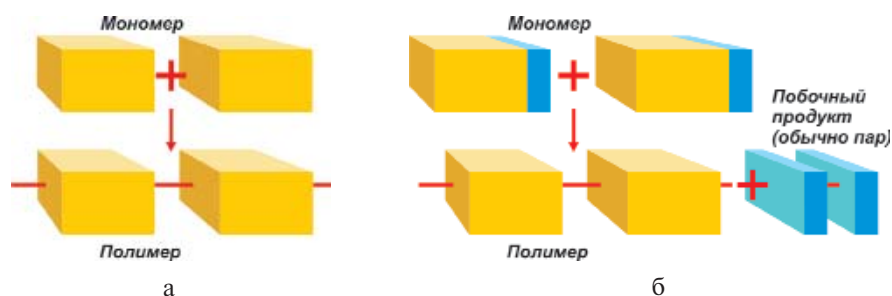


Рис 108. Реакции образования полимеров:
а)- полимеризация, б)- поликонденсация

Электропроводимость полимеров

Отличительным свойством синтетических полимеров до недавнего времени считалось их нулевая электропроводность. Все привычные типы пластмасс являются хорошими диэлектриками благодаря прочным ковалентным связям, образующим макромолекулярные соединения.

Однако эпохальное достижение трех нобелевских лауреатов 2000 года - Алана МакДайярмида (США), Алана Хигеру (США) и Хидеки Ширакаве (Японии) — круто изменило общепринятую точку зрения. Этим ученым впервые удалось превратить пластмассу в электрический проводник.

Как это часто бывает в истории науки, открытию помогла случайность. Студент Ширакавы как-то по ошибке добавил слишком много катализатора, в результате чего бесцветный пластик вдруг стал отражать свет подобно серебру, и это навело на мысль о том, что он перестал быть изолятором. Дальнейшие исследования привели к открытию полимера с проводимостью, в десятки миллионов раз превосходящей обычный пластик. Это открывает путь к новой электронике XXI века, основанной на органических материалах. Ведь органические материалы легче и гибче традиционного кремния, им проще придать нужную форму, в том числе и трехмерную.

Что же представляют собой проводящие полимеры? Если коротко, то основой для них служат вещества с молекулами, в которых имеются чередующиеся двойные углеродные связи. В чистом виде они не являются проводниками, поскольку электроны в них локализованы в силу их участия в образовании ковалентных химических связей. Для освобождения электронов применяются различные примеси, после их ввода появляется возможность перемещения зарядов (электронов и дырок) вдоль

молекулярной цепи. Распространенным примером проводящего полимера является полианилин.

На проводящих полимерах основана молекулярная электроника. Например, ученые из Аризонского университета создали ограничитель напряжения из семи анилиновых фрагментов. Разрабатываются молекулярные транзисторы, конденсаторы, диоды.

Американская компания Superconnect разработала материал, который в будущем поможет ускорить передачу данных в Интернете в сто раз! Это особый полимер, склеенный с набором фуллеренов, позволяющий управлять потоками света при помощи других потоков (т.е. чисто фотонный транзистор).

Это — первый шаг на пути создания полностью оптических маршрутизаторов в Интернете. Сейчас для управления потоками данных (которые между крупными узлами передаются по оптоволокну), их преобразовывают из оптических импульсов в электронные. Чипы определяют направление передачи и переключают канал, после чего поток битов в виде электронов снова переводят в световые импульсы и отправляют к месту назначения. Такие двойные преобразования — одно из узких мест, снижающих общую пропускную способность Интернета. Заменив обычные маршрутизаторы, сочетающие оптические и электронные компоненты, на полностью оптические, можно будет повысить скорость передачи данных в сто раз.

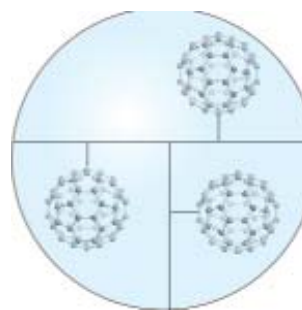


Рис 109. Сочетание фуллеренов и полимерных цепей - ключ к сверхбыстрым оптическим переключателям

Дешевизна производства полимеров открывает перед органической электроникой новые области применения. Например, такие полимеры позволят печатать любую ИС на простых компьютерных принтерах, используя особый химический раствор вместо чернил. Это — колоссальное технологическое и экономическое преимущество, ведь принтер прост в обращении и стоит копейки по сравнению с традиционным дорогостоящим оборудованием для изготовления интегральных микросхем.

На принтерах, например, в ближайшее время сотрудники британской компании Cambridge Display Technologies собираются наладить выпуск видеодисплеев для мобильных телефонов и

других переносных устройств. Исходным материалом для таких дисплеев будут новые светоизлучающие полимеры, где излучение происходит в результате рекомбинации электронов и дырок. Также в скором времени следует ожидать массового производства новых пластиковых мониторов на основе полимерных матриц. На фото изображен один из лабораторных образцов таких дисплеев компании Universal Display.



Рис 110. Демонстрация гибкого монитора на основе проводящего полимера*

Более того — если можно печатать и проводники, и полимеры, то почему бы не напечатать на принтере сам принтер? Именно это и стремятся сделать добровольцы проекта RepRap — самореплицирующийся принтер, который сможет печатать все детали для своих копий из проводящих, полупроводящих и непроводящих полимерных чернил. Конечно же, он сможет не только размножаться - на таком принтере можно будет запросто «распечатать» цифровую фотокамеру или мобильный телефон!

Появление и развитие MEMS и NEMS-технологии

Итак, мы вкратце рассмотрели процесс развития полупроводниковой электроники от элементарного селенового фоторезистора до изготовления сложных интегральных микросхем. Появление и развитие MEMS-технологий явилось следующим шагом на пути эволюции полупроводниковой техники.

Английская аббревиатура “MEMS” (или по-русски “МЭМС”) расшифровывается как микроэлектромеханические системы. Соответственно, NEMS-технология использует нанoeлектромеханические системы. Понятно, что приставки “микро” и “нано” характеризуют уже привычные для нас чрезвычайно малые масштабы. Поэтому сначала нужно понять — а что же такое *электромеханическая система*.

Без особого преувеличения можно сказать, что начало современной электротехники положил гениальный английский ученый Макс Фарадей, открывший в 1873 году явление элект-

* Перепечатано с www.universaldisplay.com

ромагнитной индукции. Суть его чрезвычайно проста: если рамку из металлической проволоки вращать в магнитном поле, то по ней потечет электрический ток. Другими словами, механическая энергия перейдет в электрическую.

И наоборот, если по рамке, находящейся в магнитном поле, пропустить ток, то рамка начнет вращаться. Это иллюстрирует работу простейшего электродвигателя, где вращающаяся рамка выполняет функцию ротора.

Вращающаяся металлическая рамка в магнитном поле - это прообраз генератора электрического тока.

Мы видим, что рассмотренные выше процессы взаимобратимы, то есть одну и ту же электромеханическую систему можно использовать и как двигатель, и как генератор. При нынешнем уровне развития науки и техники изготовление электромеханических устройств в масштабе, скажем, миллиметров или даже сотен микрон не составляет принципиальных трудностей. Такие устройства и получили название микро- или наноэлектромеханические системы.

МЭМС представляют собой трехмерные микрообъекты и микромашины: моторы, насосы, турбины, микророботы, микродатчики или целые аналитические микролаборатории, выполненные на кремниевой подложке.

Их размеры могут быть меньше спичечной головки, и поэтому использование МЭМС позволит резко уменьшить массу и объем традиционной электронной техники, а также значительно снизить ее стоимость.

Впервые о возможностях таких устройств заговорили еще в 1959 году. Но для превращения МЭМС из любопытных лабораторных “игрушек” в реальные изделия, пользующиеся спросом на рынке, потребовалось целых 40 лет. Только в конце 90-х началось освоение промышленного производства МЭМС, а сейчас МЭМС широко используются в самых различных сферах человеческой деятельности: в телекоммуникациях, медицине, транспорте и т.д. MEMS-системы на сегодняшний день являются ключевым фактором в развитии нанотехнологий. Именно на базе таких систем планируется создание наноманипуляторов и нанороботов.



Рис 111. Современные МЭМС-системы *

Традиционный микропроцессор способен лишь на то, чтобы решать определенный алгоритм и выдавать тот или иной результат вычислений. Микроэлектромеханические же устройства способны не только обрабатывать определенные данные, но и выполнять некоторые движения, то есть выступать в роли микроботов.

Если ИС обеспечила проводникам возможность “думать”, то МЭМС позволяет им “ощущать”, общаться и взаимодействовать с внешним миром. Поэтому без преувеличения можно сказать, что МЭМС — это новая волна полупроводниковой революции. По мнению экспертов, развитие МЭМС-аппаратуры может иметь такие же последствия для научно-технического прогресса, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Изготовление МЭМС очень похоже на создание микросхем. Здесь также используется кремний — самый популярный в микроэлектронике материал, а технология создания МЭМС-устройств очень напоминает процедуру создания ИС. И в той, и в другой имеется замечательная возможность создавать необходимые структуры в едином технологическом процессе. И планарной, и МЭМС-технологии присущи осаждение материала, перенос изображений и удаление промежуточных слоев (в МЭМС — для отделения механических частей).

Как правило, создание микромеханических изделий требует создания более толстых пленок, более глубокого травления, а сам технологический процесс имеет значительно больше этапов.

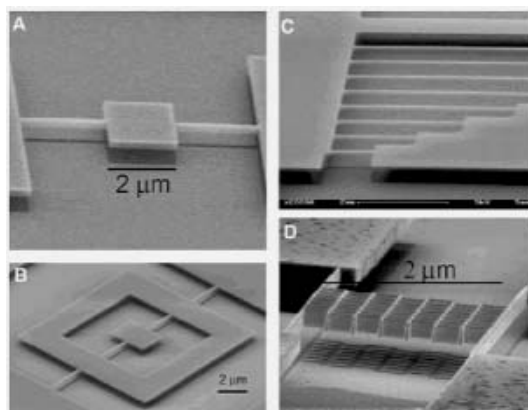


Рис 112. Уже изготовленные НЭМС-системы**

* Перепечатано с www.memx.com

** Перепечатано с www.cmp.caltech.edu

Как ни удивительно, но МЭМС-системы могут выступать не только в роли сенсоров и «мускулов» микро- и нанороботов. Они также могут быть основой нанокomпьютеров.

История создания компьютеров начинается в девятнадцатом веке с универсальной механической машины Чарльза Бэббиджа. В 1833 г. английский ученый, профессор Кембриджского университета Чарльз Бэббидж разработал гигантский арифмометр с программным управлением, арифметическим и запоминающим устройствами. Аналитическая машина Бэббиджа стала предшественницей и прообразом современных компьютеров и машин с программным управлением. Как ни странно, но она была полностью механической. И это не мешало ей выполнять простейшие арифметические и логические операции, а также хранить полученные результаты.

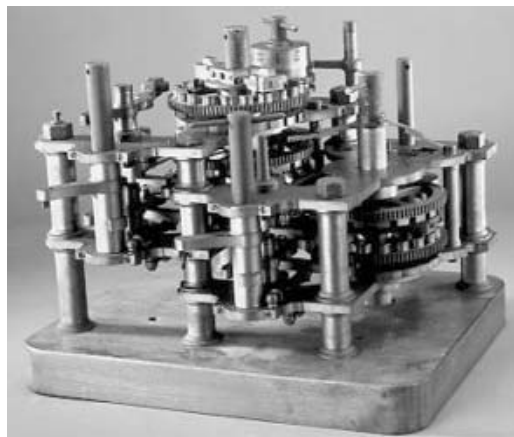


Рис 113. Машина Чарльза Бэббиджа*

Подобие машины Бэббиджа ученые собираются создать в наномасштабе, используя «НЭМС-арифмометры».

Эрик Дрекслер предложил проект механокомпьютера — компьютера, в котором все логические операции, хранение и обработка информации производятся с помощью последовательных движений системы стержней. Используя нанотехнологически измененные материалы (например, алмаз или сапфир), можно добиться высокой скорости распространения информации. Дрекслер составил детальное описание подобного компьютера на основе механотранзисторов, причем размеры подобного устройства составят всего 400х400х400 нм.

При этом его вычислительная мощность - 10^{16} операций в секунду, что можно приравнять к производительности современного персонального компьютера Pentium IV с тактовой частотой 1 ГГц. Если представить себе такой механокомпьютер в сравнении с красной кровяной клеткой (эритроцитом), то эритроцит будет больше в 10-15 раз!

Если использовать эти наноустройства для хранения информации, то полученная механическая память будет выгоднее

* Перепечатано с <http://old.ej.ru/033/btw/any/>

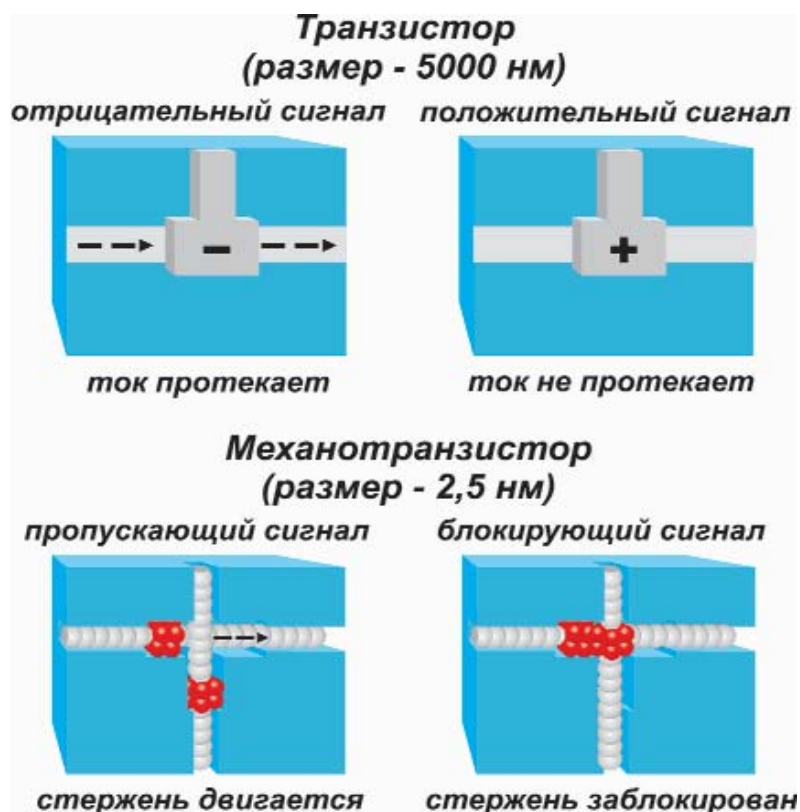


Рис 114. Принцип действия механотранзистора

по плотности данных, чем современные электромагнитные системы. Вероятно, что механопамять обгонит по емкости даже те магнитные устройства, которые по нынешним технологиям изготовления приближаются к физическому пределу плотности информации для магнитных устройств.

Механопамять может работать, выполняя миллионы и миллиарды циклов в секунду. Моханти сказал, что механические ключи новой памяти потребляют в миллион раз меньше энергии, чем их электронные аналоги.

Расскажем о создании одного из прототипов логических ячеек механопамяти. С помощью электронно-лучевой литографии исследователи сделали «шаблон» для матрицы механических ключей и вытравили их из монокристаллического слоя кремния, покрытого слоем оксида кремния.

Электронно-лучевая литография уже давно используется МЭМС- и нанотехнологами в качестве основного производственного инструмента. Она также является основным инструментом для производства микроэлектронных схем и ею пользуются при массовом производстве микросхем и процессоров. Так что для массового производства механопамяти не нужно будет использовать дополнительные устройства, вы-

пуск готового продукта можно производить на уже имеющемся оборудовании.

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

Маленькие размеры устройства позволяют ему достичь высокочастотных вибраций (в опытах — до 23,57 МГц). Эта частота отражает скорость чтения записанной информации. Для сравнения, винчестеры в современных ноутбуках характеризуются скоростью считывания информации в несколько сот килогерц.

Исследователи заверяют, что наномеханические ключи могут достичь скорости до миллиарда циклов в секунду. При этом их размеры могут быть меньше тех, которые изготовлены экспериментально.

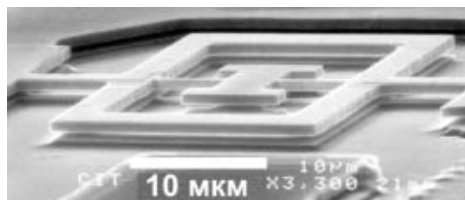


Рис 115. МЭМС-ячейка памяти*

Другое преимущество наномеханики перед наноэлектроникой заключается в том, что диапазон вибрации наноструны составляет несколько ангстрем. Для вибрации в таком диапазоне устройство потребляет всего несколько фемтоватт электроэнергии, в то время как современные ключи потребляют милливатты. Механическая память также свободна от ограничений суперпарамагнитного эффекта, который определяет граничные размеры магнитной памяти.

Объединение принципов механических и электронных вычислений позволит создать гибридные механоэлектрические НЭМС-транзисторы, которые работают по принципу переноса носителей заряда механическим путем.

Приведем один пример. В 2001 году профессор Роберт Блайк из Висконсина, США, представил рабочий электромеханический маятник, который вибрировал в диапазоне радиочастот и мог переносить отдельные электроны от одного электрода к другому при активации “механической руки” устройства

* Перепечатано с www.cmp.caltech.edu

(т.е. работать как транзистор). Установка Блайка изображена на рисунке 116.

В центре устройства — вибрирующий маятник, который был назван Блайком “механической рукой”. Если между точками G1 и G2 приложить переменное напряжение, то маятник будет колебаться с частотой, пропорциональной частоте переменного напряжения. В рабочем устройстве маятник колебался с частотой в 100 МГц. Маятник С электрически изолирован от электродов G1, G2, S и D и заземлен.

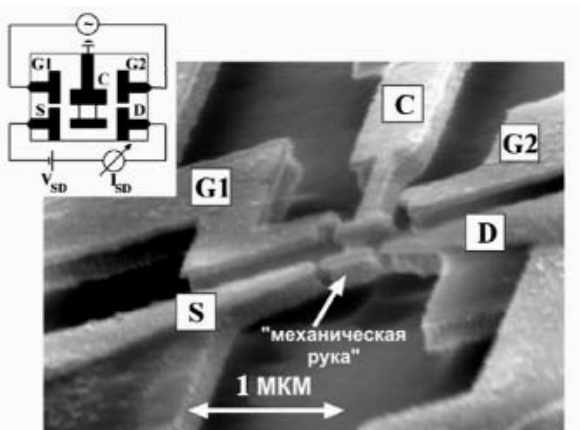


Рис 116. Наномеханический осциллятор Блайка*

Электроды S и D представляют собой исток и сток транзистора соответственно. Как только маятник касается электрода S, на его поверхность благодаря туннельному эффекту переносится один электрон, который затем передается с помощью колебаний маятника на электрод D. На схеме показан источник напряжения транзистора V_{SD} и прибор, с помощью которого исследователи могли наблюдать за переносом электронов I_{SD} .

Осциллятор исследователи изготовили из кремния по технологии SOI (silicon-on-insulator: слой кремния на слое изолятора) в несколько этапов. Сначала с помощью электронно-лучевой литографии нанесли на кремниевую поверхность золотую маску, которая повторяла геометрию устройства, а также алюминиевую маску травления (для тех участков, которые надо удалить). Далее был вытравлен механический маятник и его туннельные контакты (с точностью до 10 нм).

В обычных микроэлектронных транзисторах переносится около 100.000 электронов, чтобы обеспечить состояние 1 или 0. В новом электромеханическом транзисторе эту роль выполняет *один* электрон. Преимущества нового устройства — в отсутствии тепловых шумов, так как сток и исток физически разделены. Также уменьшится энергопотребление устройства, собранного на этих транзисторах.

* Перепечатано с www.cmp.caltech.edu

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

С помощью НЭМС также можно будет создать наноманипуляторы — устройства, способные выполнять управляемый механосинтез или просто перемещать отдельные молекулы. Над созданием подобного устройства сейчас работает ряд крупнейших компаний и лабораторий. Уже созданы проекты манипуляторов, но пока еще ни один из них не воплотился в реальность.

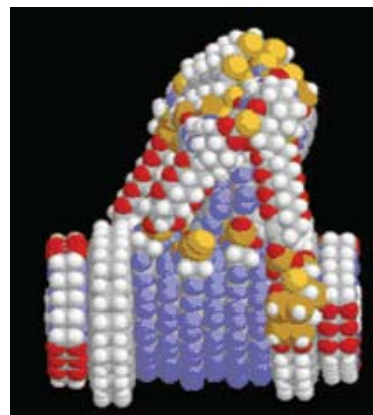


Рис 117. Модель наноманипулятора Дрексlera

Многообразие вариантов и областей применения МЭМС и НЭМС ограничено только нашим воображением. Одним из эффективных приложений МЭМС-технологии сегодня являются датчики, или сенсоры.

Сенсоры

Развиваясь, человечество все больше стремится понять и освоить природные механизмы, тысячелетиями функционирующие в биологических организмах, в том числе и человеческом. Иногда результатом таких попыток становится создание электронной техники, имитирующей работу органов чувств человека или животных.

В основе работы таких устройств лежат **сенсоры**, или датчики — технические элементы, чувствительные к внешним воздействиям (от англ. “sense” — “чувствовать”).

Собственно говоря, сегодня подобные устройства вряд ли могут кого-нибудь поразить: уже давно сенсоры встраиваются в автомобили, музыкальные центры, холодильники и другие бытовые приборы. Датчики широко используются в охранных системах, системах контроля над глобальными катаклизмами (например, **сейсмодатчики**, способные заблаговременно предупредить людей о надвигающемся землетрясении по малейшим колебаниям), системах противопожарной безопасности, медицине.

Большой популярностью сегодня пользуются **ультразвуковые сенсоры**. По принципу работы они напоминают маленький

локатор. Волны, исходящие от них, проникают в любой затаенный уголок помещения, и малейшее изменение геометрии комнаты (например, появление неожиданных гостей с мешком для денег) приводит к срабатыванию сигнализации.

Похожий принцип действия и у *инфракрасных датчиков*, срабатывающих в момент попадания движущегося объекта, излучающего тепло (например, человека или собаки), в зону чувствительности датчика.

Пьезоэлектрический сенсор предназначен для обнаружения механических воздействий на отдельные предметы и используется при охране сейфов, музейных экспонатов и т.д. Такой сенсор представляет собой МЭМС-устройство, способное обнаружить смещение вплоть до 1 микрона. В основе работы сенсора лежит пьезоэлектрический эффект, суть которого подробно излагалась в первой главе при описании пьезомеханического манипулятора, обеспечивающего перемещение зонда сканирующего микроскопа.

Весьма популярны также *газовые сенсоры*, суть работы которых заключается в анализе воздуха, попадающего в сенсор через полупроницаемую мембрану. Молекулы газа вступают в реакцию с электролитом у измерительного электрода. В результате реакции генерируется электрический ток, по измерению которого можно судить о наличии тех или иных веществ в атмосфере. Такие устройства позволяют определять утечку газов и проверять состояние атмосферы на предмет наличия токсичных веществ, взрывоопасного водорода и т.п.

Наносенсоры — это чувствительные элементы, действие которых основано на наномасштабных эффектах. Сегодня наносенсоры находят широкое применение в контроле над состоянием сложных систем, бытовой технике и в биомедицине.

Рассмотрим, как с помощью НЭМС-систем построить нанорецептор, который смог бы отделять молекулы только одного типа. И как сделать перепрограммируемый рецептор, который отбирал бы только те молекулы, описание которых в данный момент передает центральный компьютер.

Можно ли гарантировать чистоту отбора? На все эти вопросы можно ответить с помощью математического моделирования нанорецепторов и наноструктур. Классический нанорецептор, названный Молекулярным Сортирующим Ротором (далее МСР), предложен Эриком Дрекслером.

Каждый ротор имеет “гнезда” по окружности, конфигурированные под определенные молекулы. Находясь в окружении молекул, “гнезда” селективно захватывают только заданные молекулы и удерживают их до тех пор, пока молекула не окажется внутри устройства. От “гнезда” ее отсоединяет стержень, расположенный внутри ротора. Такие роторы могут быть спроектированы из 10^5 атомов и иметь размеры порядка (7x14x14 нм) при массе 2×10^{-21} кг. Они смогут сортировать молекулы, состоящие из 20 и менее атомов, со скоростью 10^6 молекул/сек при энергозатратах в 10^{-22} Дж на 1 молекулу. МСР позволяет создавать давление в 30 000 атмосфер, потребляя 10^{-19} Дж.

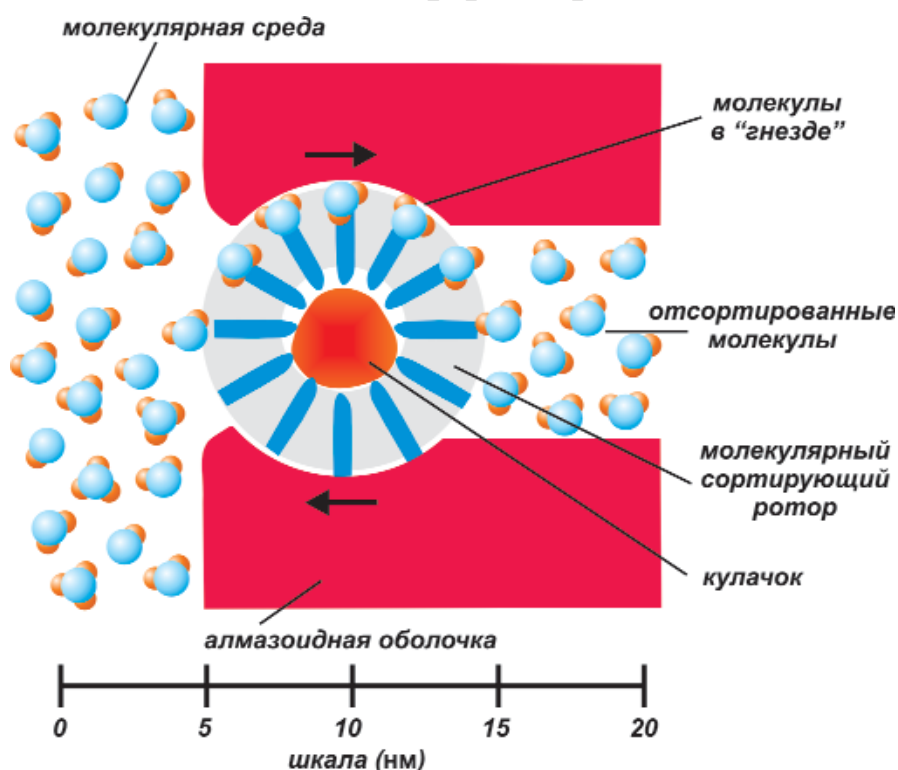


Рис. 118 Молекулярный сортирующий ротор

Роторы полностью обратимы и поэтому могут быть использованы как для нагнетания, так и для выгрузки молекул газов, воды и глюкозы. Каждый ротор имеет 12 “гнезд” для присоединения молекул, расположенных по длине окружности ротора. МСР позволяют нагнетать в резервуары химически чистые вещества, в которых не будет ни одной чужеродной молекулы.

Присоединительные “гнезда” роторов имеют специфическую структуру и будут производиться путем конструирования их атом-за-атомом по примеру строения активных центров некоторых ферментов. Так, фермент гексокиназа имеет присоединительные “гнезда” для глюкозы.

Ральф Меркле, исследователь из компании Херох и коллега Эрика Дрекслера, предполагает, что для большинства “присоединительных гнезд” для молекул, вытянутых в длину и имеющих линейную структуру, можно использовать нанотрубки. Ральф рассчитал, какого диаметра должны быть нанотрубки для различных молекул. Выглядеть такой рецептор может так, как показано на рисунке 119.

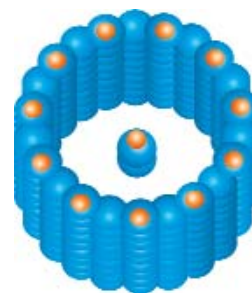


Рис 119. Нанотрубка в качестве „гнезда”

А Роберт Фрайтас предлагает ряд “механических” рецептов для сортировки молекул. Они имеют разное исполнение, но смысл один и тот же: рецептор, по сигналу с компьютера, автоматически принимает форму искомой молекулы.



Рис 120 Сортирующие рецепторы Фрайтаса

Интеграция в одном устройстве МЭМС, электроники и чувствительных нанoeлементов породило огромное многообразие интереснейших научных проектов, многие из которых уже воплощаются в жизнь, а часть пока что находится в стадии разработки. Рассмотрим некоторые из них.

Проект “Умная пыль”

В романе известного фантаста Станислава Лема «Непобедимый» грозным оружием будущего были не громоздкие космические крейсера или танки, а микроскопические частички кремния. По отдельности эти песчинки представляли собой безобидный кварцевый песок, но, объединяясь в пылевые тучи, превращались в мощное оружие.

Благодаря развитию МЭМС предсказания фантаста становятся реальностью. В 1998 году американские ученые из военного агентства DARPA выдвинули концепцию “умной пыли” (smart dust). Суть ее заключается в том, чтобы разбрасывать с самолетов над зоной боевых действий тысячи крошечных сенсоров-радиопередатчиков, которые незаметно для противника

станут отслеживать все его перемещения и действия. Предполагалось также, что простые по отдельности сенсоры будут самоорганизовываться в сложную, наделенную искусственным интеллектом сеть, которая сможет производить фильтрацию и первичную обработку собранных данных, дабы переправлять командованию лишь существенную информацию.

Одной из самых плодотворных разработок в этом направлении стал совместный проект Калифорнийского университета в Беркли и корпорации Intel, в рамках которого созданы умные сенсоры Motes (в переводе с англ. — “пылинки”). Что же представляют собой эти “пылинки”? Это миниатюрные чувствительные приборы размером с таблетку аспирина, способные автономно работать в любых условиях и с помощью радиоволн объединяться в локальные сети для передачи собранной информации центральному компьютеру.

Исследователи изготовили несколько сотен экспериментальных “умных пылинок”. Все “пылинки” снабжены сенсорами и радиопередатчиками, передающими сигнал по цепочке от одного робота к другому. Поскольку объем памяти “пылинки” составляет лишь несколько килобайт, то для их совместной работы разработали специфическую “крошечную” операционную систему TinyOS, оперирующую файлами размером порядка 200 байт, и соответствующую систему баз данных TinyDB, проводящую внутрисетевую обработку данных. Стоит отметить, что при этом они отличаются достаточно долгим сроком службы — их батареек хватает на несколько лет! Секрет такой долговременной работы “пылинок” заключается в том, что они включаются лишь на короткое время: делают замеры, передают сигнал — и снова “засыпают”.

Что же касается принципов самоорганизации сети, то в ее основу положена логическая система простых “локальных правил”. Когда на местности развернуты тысячи сенсоров и шлюзов-маршрутизаторов, то простое правило для каждого сенсора гласит: “Установить связь с ближайшим шлюзом”. Следовательно, все сенсоры автоматически группируются вокруг ближайших шлюзов.

Первые испытания “умной пыли” проводились в марте 2001 года на военной базе в Калифорнии. Тогда с самолета было сброшено шесть “умных пылинок”. Попадая на землю, они

тут же объединились в беспроводную сеть и приступили к измерению напряженности магнитного поля вокруг себя. А после того как мимо проехала машина, принялись рассчитывать ее скорость и определять направление движения, сообщая эти данные переносному компьютеру, находящемуся в ближайшем лагере.

Области применения “умной пыли”:

Благодаря таким качествам, как беспроводность, автономность, миниатюрность, множественность, надежность и относительно низкая стоимость, “умная пыль” уже стремительно находит применение в повседневной человеческой жизни. Помимо военных и полицейских приложений, самоорганизующиеся сенсорные сети могут использоваться и в мирных целях — от наблюдения за окружающей средой до присмотра за пожилыми людьми. Приведем лишь несколько примеров использования “умной пыли”, давшего высокие положительные результаты.

Каждое лето остров Дикой Утки в двенадцати милях от берегов штата Мэн подвергается массовому нашествию морских птиц, собирающихся здесь для выведения потомства. Чтобы выяснить, сколько птенцов они высиживают и какие условия для этого требуются, орнитологу Джону Андерсону приходилось каждый сезон обследовать тысячи норок, выбиваясь из сил и нарушая покой птиц. После того как два года назад Андерсон и его группа разбросали по острову сеть “умных пылинков” и подключили питающуюся от солнечной батареи базовую станцию к Интернету, их жизнь и работа коренным образом изменились. “Вы можете находиться в любой точке мира, — восхищается Андерсон, — и знать, что в данный момент происходит в любой из норок, куда мы подбросили наши маленькие и незаметные сенсоры”.

В прошлом году биолог университета Калифорнии в Беркли Тодд Доусон развернул в местном ботаническом саду сеть из 80 миниатюрных приборов производства корпорации Intel и получил первую в мире трехмерную картину изменений микроклимата в вечнозеленом лесу. Аналогичный, но более масштабный проект по исследованию экосистем осуществляет сейчас с помощью тех же малышек лос-анджелесский университет Калифорнии в лесном заповеднике около города Palm Springs.

Другие исследователи испытывают «motes» в качестве средства для моделирования последствий землетрясений, мониторинга движения транспорта в военных зонах, использования воды в сельскохозяйственных угодьях, получения информации о состоянии зданий, дорог, загрязнении водоемов — этот перечень можно продолжать до бесконечности. В частности, это будет очень важно для тех «motes», которые будут использоваться в городах для обнаружения признаков нападения биотеррористов.

Одним из обоснованных опасений являются сомнения по поводу правомочности данной технологии. Помимо позитивных применений, “умная пыль” может играть роль и незаметного подслушивающего устройства (особенно если учесть современные темпы минитюаризации электроники), что дает ее обладателям большие возможности для вторжения в личную жизнь граждан. А по мере ее распространения вероятность злоупотреблений полученной информацией может только расти. Но поскольку остановить научно-технический прогресс еще не удавалось, это, по-видимому, должно привести к совершенствованию законов с учетом появившихся новых технических возможностей покушения на неприкосновенность личности.

Проект “Электронный нос”

Представьте, что вы после продолжительной вечерней прогулки заходите в дом, где печется яблочный пирог. С первой же секунды ваш нос, почуяв и распознав аппетитный аромат, сообщит об этом вашему мозгу.

Как это происходит? Дело в том, что практически любое химическое вещество издает специфический запах. Попадая в нос, молекулы этого вещества, присутствующие в воздухе в небольших концентрациях, раздражают соответствующие рецепторы, передающие в мозг информацию о наличии в воздухе определенных веществ посредством нейронной сети.

Известно, что чувствительность носа у людей сильно различается. Профессиональные дегустаторы парфюмерии обладают уникальным “нюхательным” даром и превосходят в этом обладателей обычных носов. Специально натренированные собаки-ищейки способны “вынюхивать” определенные виды наркотических или взрывоопасных веществ. Но ни одна собака не в состоянии уловить запах человека в помещении, где силь-

но пахнет бензином, ацетоном, краской, или когда следы присыпаны пахучим веществом (например, табаком); на остроту обоняния самого первоклассного дегустатора сильно влияют такие факторы, как усталость, различные инфекции, токсические вещества, общее физическое состояние, субъективность в оценках восприятия и т.д.

С целью избавления от этих и других неудобств в настоящее время разрабатываются различные варианты так называемого “электронного носа”.

Электронный нос — это мультисенсорная система для скоростного анализа состояния воздуха, имитирующая работу человеческого органа обоняния.

Такое устройство представляет собой программируемый набор датчиков, каждый из которых “нюхает” отдельный компонент запаха вещества или продукта. Чем больше датчиков установлено, тем точнее результат. Наносенсоры для электронного носа подбираются по их химическому родству, и обычно для этой цели используются полимерные проводящие плёнки.

В отличие от обычных газовых сенсоров, разрабатываемых специально для каждого отдельного вещества, электронный нос достаточно универсален, а с помощью наносенсоров способен уловить и детектировать настолько малые концентрации веществ, что с ним не сравнится ни одна ищейка.

Строение электронного носа

Как правило, электронный нос состоит из трех функциональных узлов:

- системы пробоотбора;
- матрицы сенсоров с заданными свойствами;
- блока процессорной обработки сигналов, поступающих от сенсоров.

Исследуемая проба закачивается воздушным насосом в кюветное отделение, где установлена линейка или матрица сенсоров. Там порция газовой смеси разделяется на отдельные фракции, которые прогоняются через систему специальных рецепторов и, в зависимости от состава и количества, изменяют их характеристики. В одном из вариантов электронного носа присоединение специфической молекулы к поверхности сенсора, представляющего собой тончайшую иглу-кантилевер толщи-

ной в 100 нм и длиной 50 микрон, вызывает изменение резонансной частоты за счет изменения его массы. Измеряя новую частоту колебаний кантилевера, можно определить присутствие специфических групп молекул.

Величины показаний каждого детектора передаются на процессорный модуль. Специальная программа анализирует полученные данные и выдает результаты в виде своеобразных “клякс” - хроматограмм (на самом деле это графики интенсивностей запахов в центральных координатах).

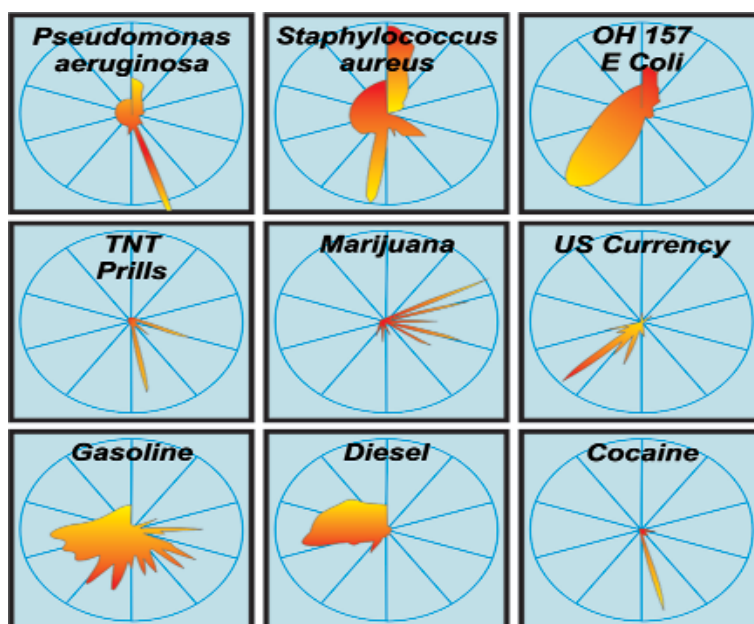


Рис 121. Визуальные образы программы VaporPrint™ для болезнетворных микроорганизмов, взрывчатых веществ, наркотиков и горючих жидкостей

После дегустации в систему подаются пары промывочного газа (например, спирта), чтобы удалить пахучее вещество с поверхности датчиков и подготовить прибор к проведению нового измерительного цикла.

Период времени, в течение которого сенсоры электронного носа анализируют закаченную пробу воздуха, называется *временем отклика*. Современные образцы отличаются достаточно высоким быстродействием. Время отклика у некоторых из них составляет порядка 10 секунд.

Период подачи в ячейку промывочного газа получил название *времени восстановления* (латентного периода). Время восстановления, как правило, колеблется в пределах минуты.

Следует отметить, что проблема идентификации запахов с алгоритмической точки зрения достаточно сложна (каждый за-

пах представляет собой сложный комплекс химических соединений), поэтому для распознавания образов запаха система “электронный нос” использует элементы искусственного интеллекта. В частности, наиболее перспективным считаются так называемые искусственные нейронные сети (ИНС).

Нейронные сети представляют собой компьютерную имитацию взаимодействующих нейронов мозга человека и состоят из ряда соединенных между собой простых обрабатывающих информацию единиц — нейронов. Слои нейронов, получающих внешнюю информацию, называются *входными*, выводящих конечный результат — *выходными*, промежуточные слои — *внутренними*, или скрытыми. При этом у каждого нейрона имеются несколько входов и только один выход. Главным плюсом нейронных сетей является их *обучаемость*, то есть возможность целенаправленной минимизации ошибок выходных сигналов.

Области применения электронного носа

До недавнего времени главными препятствиями на пути использования электронного носа были его малая эффективность и высокая цена. Ранние сенсорные матрицы имели недостаточную чувствительность, были не специфическими, медлительными, часто нестабильными в течение длительного времени и дорогими.

На сегодняшний день достаточно большое количество “электронных носов” являются коммерчески доступными приборами. Современный электронный нос срабатывает за 10 секунд, обладает высокой степенью специфичности и чувствительности, стабильно работает в течение длительного времени и использует сравнительно недорогую технологию твердотельного датчика-сенсора. Сейчас стоимость такого прибора составляет от \$20 тыс. до \$100 тыс., но по мере совершенствования технологии изготовления самих сенсоров прогнозируется существенное снижение их стоимости.

Тем не менее, уже сегодня “электронные носы” уже оказывают помощь в решении многих проблем.

Криминалистика и национальная безопасность. “Электронный нос” может обеспечить новые возможности в борьбе с контрабандным ввозом и распространением наркотиков, пре-

дупредить террористические диверсии. Вынюхивая метан, можно быстро обнаружить и устранить утечки в газопроводах.

Промышленность Есть сведения, что в районе многих месторождений угля и нефти наблюдается повышенная микроконцентрация этого природного газа. Стало быть, “электронный нос” способен отыскивать залежи этих ископаемых.

Пищевая промышленность “Электронный нос” может быть использован для оценки свежести продуктов, контроля качества, мониторинга случайных или преднамеренных загрязнений или несоответствий торговой марке. Например, с помощью этого прибора удалось установить, что почти половина образцов кофе “Нескафе”, продаваемого в наших магазинах, очень далека от эталона. То же самое и с коньяками.

Электронный нос необходим при разработке и производстве кормов для животных, ведь в этом случае сами потребители продукта не могут прокомментировать его запах.

Портативный интегральный прибор может помочь туристам отличить съедобные природные объекты от несъедобных.

Медицина Индивидуальный запах выделений человека уже давно используется в классической медицине как важный диагностический признак. В XXI веке нос врача заменит “электронный нос”. Ученые Пенсильванского университета создали “электронный нос”, который выявляет инфекционные болезни по дыханию обследуемого человека. Дело в том, что все бактерии, независимо от своей природы, в процессе жизнедеятельности выделяют различные газы. В случае поражения инфекцией дыхательных путей эти газы обязательно присутствуют в выдохе. “Электронный нос” подносится ко рту больного, получает его выдох и сравнивает химический состав с базой данных типичных примеров химического состава выдоха заведомо больных людей, на основании чего ставится соответствующий диагноз.

Образец прибора, разработанный в Иллинойском институте технологий способен обнаружить в воздухе возбудителей туберкулеза и других инфекционных заболеваний. По запаху станет возможным диагностировать пневмонии, онкологические заболевания и даже атипичную пневмонию (SARS). При черепно-мозговых травмах на самых ранних этапах можно будет рас-

познать запах вытекающей спинномозговой жидкости, что позволит предотвратить многие смертельные исходы травматических поражений центральной нервной системы.

Следует отметить, что диагностика заболеваний дыхательных путей является в медицинской практике очень сложным процессом. Отличить, скажем, пневмонию от обычной респираторной инфекции типа ОРЗ удастся далеко не сразу. Применение “электронного носа” позволяет ускорить проведение анализа, снизить стоимость и повысить точность результатов. Ученые считают, что “электронный нос” будет таким же верным спутником врача, как и аппарат для измерения артериального давления.

Развлечения Уже сегодня создан небольшой прибор, позволяющий синтезировать запахи, смешивая ароматические вещества в определенных компьютером пропорциях. Объединив его с “электронным носом” можно будет «отсканировать запах», а потом передать его через Интернет и воспроизвести! Компьютерные игры наполнятся ароматами, а продавцы пиццы и парфюмерии смогут размещать запахи продукции на своих сайтах. Впрочем, с парфюмерией все обстоит не совсем гладко — ведь если каждая девушка сможет скачать из Интернета понравившийся запах, то не надо будет покупать духи. Более того — можно будет отсканировать электронным носом запах духов в магазине или даже на дискотеке — и спокойно синтезировать их дома! Не говоря уже о том, что на рынке можно будет купить коллекции тысяч ароматов, записанные на CD. Видимо, парфюмерная отрасль начнет борьбу с «ароматическим пиратством», как производители музыки и программ.

Многим знакома электронная робот-собака Aibo. Так вот если оснастить ее “электронным носом” она сможет узнавать хозяина по запаху и различать предметы как настоящая!

Проект “Электронный язык”

Для анализа многокомпонентных жидкостей ученые из Санкт-Петербургского университета Юрий Власов и Андрей Легин совместно с итальянскими коллегами из Римского университета “Тор Вергата” изготовили систему химических сенсоров типа “электронный язык”. Этот прибор распознает жид-

кости сложного состава по вкусу, то есть выполняет работу электронного дегустатора.

В основе этой системы — массив сенсоров, методы распознавания образов и многомерной калибровки для обработки данных. Издавна принято различать четыре основных вкуса: кислый, сладкий, соленый и горький. В целом же считается, что вкусовые ощущения связаны с характерными сигналами — “отпечатками”, порождаемыми разными сочетаниями импульсов от вкусовых рецепторов языка. На этих же принципах строится и работа электронного языка. Он состоит из четырех разных химических сенсоров, каждый из которых по-разному реагирует (изменением электрического сопротивления) на тот или иной вкус. Комбинация сигналов сенсоров составляет электронный “отпечаток” вкуса. Для удобства классификации “отпечатков” разработчики сводят реакции всех сенсоров к местоположению одной точки на графике. Присутствие сладкой компоненты смещает точку к верхней левой вершине диаграммы, кислой компоненты — к верхней правой вершине, горькой или соленой — вниз графика. Вкус кофе при такой классификации, к примеру, попадает в нижнюю часть диаграммы, ближе к середине по горизонтали, а такие, казалось бы, похожие для человеческого языка вкусы дистиллированной и слабо минерализованной воды оказываются на графике легко различимыми.

Как и “электронный нос”, данная система основана на хроматографии, когда состав смеси определяется путем разделения присутствующих в ней компонентов. В “электронном языке” это достигается за счет применения специального микрочипа с миллионами мельчайших каналов, предназначенных для отбора молекул строго определенного размера. Сигнал от микрочипа обрабатывается компьютером и выдается в удобной для пользователя форме.

Возможности распознавания вкуса с помощью “электронного языка” ученые показали на примере минеральной воды, соков, кофе и растительного масла: электронный дегустатор успешно различил около 30 видов грузинских и итальянских минеральных вод, более 30 различных соков, 15 типов кофе, представляющих смеси разных близких по вкусу сортов. Разумеется, “электронный язык” легко отличил настоящую, при-

родную минеральную воду от ее искусственной подделки, хотя по основному химическому составу они были практически идентичны. Удалось решить и более сложную задачу — распознать три разных сорта растительного масла. На очереди твердые пищевые продукты — фрукты, мясо, рыба.

Помимо чисто дегустаторских “способностей” электронного языка, его также можно использовать и для анализа рабочих жидкостей на предмет наличия примесей. Кроме того, станет возможным быстрый и точный мониторинг окружающей среды, ведь для определения уровня загрязнения воды достаточно «лизнуть» воду в реке или озере.

Проект “Видеоочки”

Новая МЭМС-технология позволила компании Microvision сделать систему проекции изображения прямо на сетчатку глаза. Этим создается иллюзия полноразмерного изображения.

Теперь не только пилоты сверхзвуковых самолетов могут использовать шлем с трехмерным изображением. Он перешел на службу к автомеханикам и инженерам. Простой автомеханик, надев такой шлем, превращается в информационного гуру. На сетчатку глаза передается рисунок, показывающий точные чертежи выбранного автомобильного узла, его комплектация, необходимые расчеты. С помощью беспроводной системы пользователь связан с Интернетом — если чего нет в стандартной базе данных, он может поискать там. Также с помощью встроенной системы расчетов автомеханик может рассчитать любой узел автомобиля (или другого механизма).

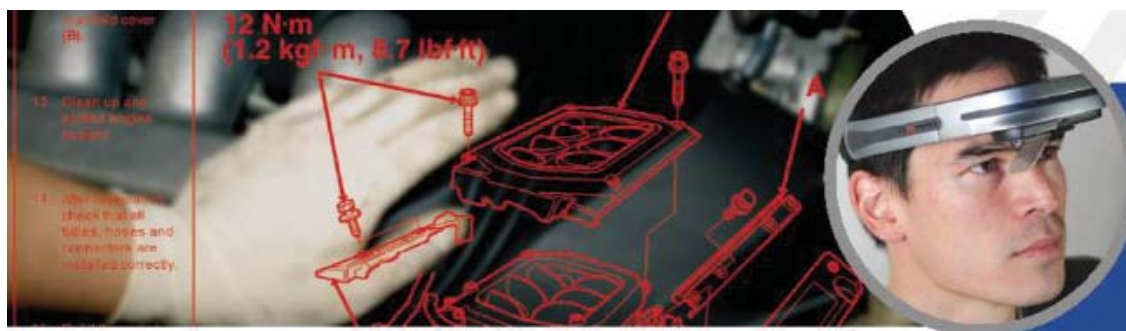


Рис 122. Видеоочки-экспертная система NOMAD от Microvision

Вскоре такими шлемами обзаведутся не только автолюбители. Фактически передаваемая на сетчатку глаза картинка мо-

* Перепечатано с www.mvis.com/nomad

жет быть любой. Новинка очень пригодится инженерам, химикам, биологам и, конечно, любителям компьютерных игр.

Наноэлектроника

Уже в начале нашего века появились серьезные преграды на пути развития электроники. Прежде всего это касается роста степени интеграции и быстродействия ИС. Планарная технология приближается к фундаментальным пределам, определяемым самой природой. Ведущие производители ИС уверенно осваивают технологию 90 нм. Казалось бы, “еще немного, еще чуть-чуть”, и будет технология в 50 нм, но... в силу вступают квантовые законы и эффекты. Например, пробел между проводящими дорожками шириной 50 нм будет насквозь “простреливаться” в поперечном направлении электронами за счет туннельного эффекта.

Другие проблемы — отвод тепла, выделяемого элементами ИС, сверхплотно расположенными в микрообъеме кристалла, а также уровень собственных шумов, равный полезному сигналу или превышающий его.

В связи с этим рассматриваются различные пути преодоления трудностей, связанных с нанометровыми масштабами. Один из возможных путей дальнейшего прогресса — разработка миниатюрных интегральных устройств, в которых роль электронов частично или полностью передана фотонам. Это должно привести к созданию вычислительной техники, превосходящей по быстродействию и информационной емкости современные электронные устройства. Для реализации приборов с квантовой связью или устройств оптической обработки информации могут быть использованы квантовые плоскости на основе множества чередующихся сверхтонких (толщиной в один атом) полупроводниковых пленок. Замена электронов на фотоны породило новое направление в электронике — *нанофотонику*.

Союз магнитных полупроводников с фотоникой позволит создать запоминающие устройства на ядрах атомов. А благодаря интеграции традиционных составных частей компьютера на одном магнитно-полупроводниковом оптическом чипе мы получим сверхбыстрые и сверхэффективные нанокomпьютеры и другие устройства обработки, передачи и хранения данных. Свою лепту в повышение быстродействия внесет также отказ от

необходимости изменять способ представления информации в памяти, процессоре, канале передачи данных.

Использование на чипе магнитооптоэлектронных структур позволит изготавливать очень быстрые переключатели и коммутаторы сигналов, способные работать на частотах в несколько терагерц. Следует также отметить, что магнитооптические полупроводники дадут возможность осуществлять прямое преобразование квантовой информации из электронного представления в оптическое и обратно минуя процесс детектирования.

Еще одна альтернатива — углеродная наноэлектроника, где ведущая роль принадлежит уже знакомым нам углеродным нанотрубкам. Одним из уникальнейших свойств нанотрубок является возможность управления их физико-химическими свойствами посредством изменения хиральности — скрученности решетки относительно продольной оси.

Всего лишь правильно изогнув нанотрубку в нужном месте, можно с легкостью получить проволоку нанометрового диаметра как с металлическим, так и с полупроводниковым типом проводимости. При этом соединение двух таких нанотрубок образует диод, а трубка, лежащая на поверхности окисленной кремниевой пластины, — канал нанотранзистора.

Компания Chartered Semiconductor Manufacturing представила архитектуры микросхем, разработанных по 65-нанометровому процессу. Завод в Сингапуре планирует начать их массовое производство начале 2006 года, а Texas Instruments уже произвел образцы 65-нм чипов.

Такие наноэлектронные устройства уже созданы и доказали свою работоспособность. Samsung намерен применить нано- и биотехнологии в мобильных телефонах для передачи сигнала нейронам и считывания эмоций. Philips делает энергонезависимую наноэлектронную память.

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

Принцип работы выключателя прост - при подаче напряжения на устройство между двумя нанопроводниками возника-



Рис 123. Обычный выключатель

ет или распадается мостик из серебра, который выполняет роль проводника. Длина мостика, по которому протекает ток, — всего 1 нанометр. На отрезке длиной 1 нанометр можно расположить 10 атомов водорода. Транзистор, изготовленный на основе этого ключа, будет вдесятеро меньше транзистора, используемого в современном процессоре Pentium IV. Поэтому нанoeлектроника на основе новых квантовых переключателей может вытеснить современную уже через 10 лет. В отличие от обычных механоэлектрических переключателей у нанoаналога нет движущихся механических частей. “Перемычка из серебра возникает между шинами просто от подачи на них напряжения”, — говорит Хасегава, директор Национального института материаловедения Японии.

Мостик, состоящий из атомов серебра, формируется, когда между шинами возникает небольшая положительная разность потенциалов. А когда это напряжение меняет знак, мостик разрушается. Устройство работает при комнатной температуре.

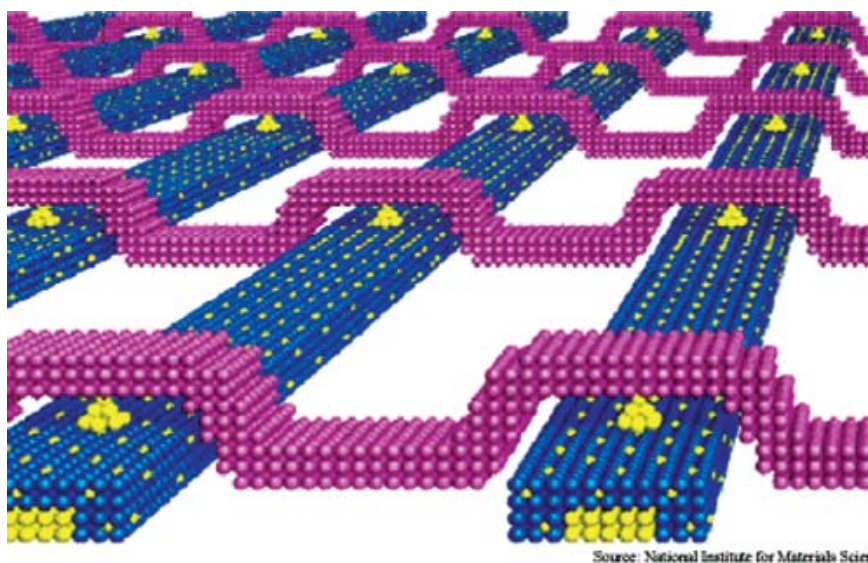


Рис 124. Матрица квантовых наноключей*

Прототип, изготовленный учеными, переключается с частотой около 1 мегагерц (или миллион раз в секунду) при разнице потенциалов между шинами 0,6 В. Частота переключений устройства связана с толщиной шин. Как говорит Хасегава, ес-

* Перепечатано из "Quantized Conductance Atomic Switch," Nature, January 6, 2005 (National Institute for Material Science)

ли их еще уменьшить, то можно достичь частоты в 1 гигагерц. Этот частотный предел использует современная электроника.

Расскажем, как происходит формирование серебряного мостика. Весь секрет состоит в составе нанопроводников-шин. Один проводник состоит из сульфида серебра, покрытого тонким слоем чистого серебра. Второй — из платины, тоже покрытой чистым серебром. При возникновении между шинами положительной разности потенциалов атомы серебра “собираются” в мостик длиной 1 нанометр, а при изменении знака напряжения мостик разрушается и атомы возвращаются в прежнее состояние.

Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства емкость памяти на его основе будет больше той, которая существует сейчас. Если же использовать каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит 2.5 гигабит на квадратный сантиметр, в то время как самые “сверхплотные” чипы памяти характеризуются емкостью в 1 гигабит на квадратный сантиметр.

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

Исследователи смогли сконструировать логические ячейки И, ИЛИ и ИЛИ-НЕ на основе нового ключа. Все логические устройства показали хорошие рабочие характеристики. Теперь ученые разрабатывают методы серийного производства матрицы квантовых ключей.

Компания HP объявила стратегию нанoeлектроники, основанную на подобных молекулярных ключах. Эта стратегия приведет к массовому производству многослойной нанoeлектроники. Руководство компании объявило, что хочет сделать производство нанокomпьютеров главным направлением бизнеса компании.

Наиболее революционные достижения нанoeлектроники приближаются к квантовым пределам, установленным самой природой. Основу таких устройств составляет, например, работа одного электрона, имеющего два дискретных спиновых сос-

тояния. Но этой основе можно было бы построить квантовый компьютер, ведь для оперирования в двоичной системе исчисления достаточно реализовать элементы, способные иметь два устойчивых, стабильных во времени состояния, условно соответствующих логическим “0” и “1”, и допускать достаточно быстрые переключения между ними. Такие функции может выполнять электрон в двухуровневой системе (например, в двухатомной молекуле — переход с одного атома на другой). Другая возможность — переориентировать спин электрона из одного устойчивого состояния в другое с помощью, например, воздействия на него электромагнитного поля (этими исследованиями занимается научное направление - *спинтроника*).

Магнитным спином обладают не только электроны, но и некоторые другие элементарные частицы, а также ядра атомов.

В наше время спинтроника изучает магнитные и магнито-оптические взаимодействия в полупроводниковых структурах, динамику и когерентные свойства спинов в конденсированных средах, а также квантовые магнитные явления в структурах нанометрового размера.

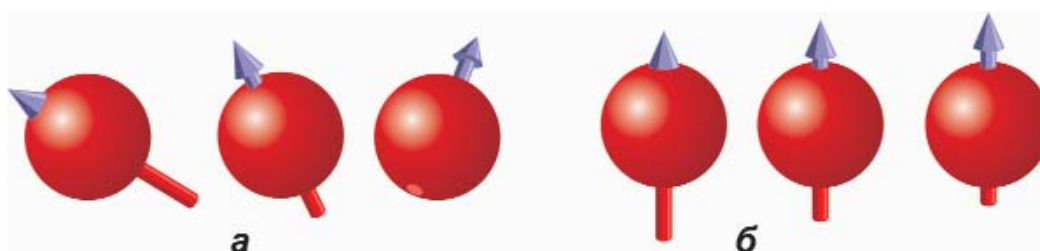


Рис 125. Возможные направления ориентации спинов

В обычной твердотельной микроэлектронике информация представляется с помощью электрического заряда. Состояние магнитного момента при этом не задано — собственные моменты частиц ориентированы хаотично (рис. 135а).

Спинтроника же использует дополнительную возможность представления информации с помощью магнитного момента квантовых частиц (рис. 135б). Одно из явлений спинтроники, названное гигантским магнитным сопротивлением (GMR), в конце 1990-х было использовано в магнитных головках жестких дисков. В результате емкость дисков за пять лет выросла в сто раз!

В будущем развитие спинтроники сулит производство компьютеров с быстродействием порядка 1 ТГц (10^{12} операций в секунду), плотность записи информации порядка 10^3 Тбит/см², что на много порядков выше, чем сегодня. При такой плотнос-

ти записи на диске размером с наручные часы можно было бы разместить базу данных, включающую фотографии, отпечатки пальцев, медицинские карты и биографии абсолютно всех жителей Земли!

Третье перспективное направление развития нанотехники, отмеченное еще Эриком Дрекслером, — переход, как это ни кажется парадоксальным, от электронных устройств к механическим компьютерам.

Обычный механический компьютер с элементами макроскопического масштаба, разумеется, очень громоздок и работает чрезвычайно медленно. Однако с компонентами размером в несколько атомов такой механический компьютер оказался бы в миллиарды раз компактней современной микроэлектроники. И хотя механические сигналы передаются в 100 тыс. раз медленнее, им нужно было бы “преодолевать” путь в 1 млн. раз меньший, чем электронам в современных микросхемах. Поэтому простой механический нанокомпьютер был бы более быстрым.

Прототип такого устройства уже существует. Компанией IBM создана удивительная “многоножка”, которая стала первым квантовым коммерческим устройством хранения данных.

Устройство состоит из записывающей матрицы манипуляторов и среды хранения информации. Конструктор устройства, Марк Ланц рассказывает, что устройство состоит из матрицы, включающей в себя 4096 “ножек”, выполненных как устройства чтения/записи (подобные “ножки”-кантилеверы используются сейчас в электронных и атомно-силовых микроскопах).

“Многоножка” - не простой жесткий диск, где головки не прикасаются к магнитной поверхности, она представляет собой “чистую” цифровую технологию. Принцип ее работы можно сравнить с работой старых проигрывателей грампластинок, в которых считывающая вибрирующая игла скользила по борозде, несущей информацию, только у “многоножки” есть ряд кантилеверов, которые скользят по поверх-



Рис 126. «Многоножка» под оптическим микроскопом *

* Перепечатано с <http://domino.research.ibm.com>

ности хранения данных, на которой есть углубления, кодирующие „1” и „0”.



Рис. 127. “Многоножка” считывает информацию*

Таким образом, отклонения кантилеверов от равновесного положения переводятся в набор „0” и „1”.

Ведутся исследования и в области биоэлектроники. В отличие от обычных, биологические компьютеры могут выполнять одновременно не одну, а много программ. Израильские ученые создали компьютер, состоящий из одних только ДНК и энзимов, способный параллельно выполнять 1 млрд. программ без вмешательства оператора для обработки результатов. Применять такой компьютер планируют для одновременного биохимического анализа множества веществ и для шифрования больших изображений.

Проекты наномоторов

Дальнейшее развитие нанотехнологий и НЭМС невозможно без эффективных наноразмерных двигателей. Сегодня разработано и продолжает разрабатываться огромное количество различных проектов нанодвигателей, которые также называют наноактюаторами. Рассмотрим некоторые из них.

Вращательный наноактюатор на основе АТФазы

АТФаза — это природный фермент, который можно найти практически в любом организме. Ферменты служат для расщепления белков, жиров, углеводов. АТФаза состоит из двух отдельных частей: гидрофобной (водоотталкивающей) и гидрофильной (водопритягивающей) части, ответственной за синтез и гидролиз АТФ. В процессе синтеза/гидролиза АТФ происходит вращение центральной субъединицы. Хотя еще не до конца известна природа этого вращения, но по сути это готовый биологический наномотор!

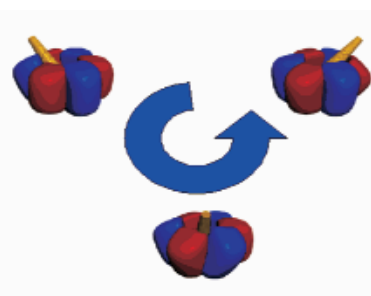


Рис 128. Вращение γ - субъединицы при гидролизе АТФ

* Перепечатано с <http://domino.research.ibm.com>

Электростатические наноактюаторы

Исследователи из США создали модель вращательного наноактюатора, использующего лазер как источник энергии.

Наномотор состоит из двух концентрических графитовых цилиндров (наподобие двух нанотрубок, одна из которых расположена внутри другой): ротора и статора. При этом к ротору диаметрально противоположно присоединены два электрических заряда. Движение производится благодаря переменному излучению двух лазеров.

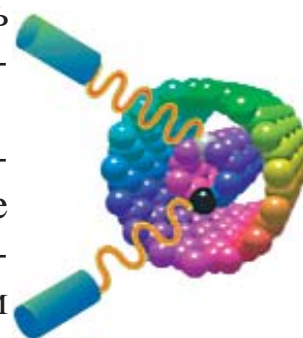


Рис 129. Наномотор, приводимый в движение светом

Наноактюатор на основе молекулы ДНК

Этот актюатор изготовлен из молекулы ДНК, к одному концу которой прикреплена светоизлучающая органическая молекула, а к другому — светопоглощающая. Когда цепь ДНК выпрямляется, излучающая и поглощающая молекулы разделяются и система излучает свет, и наоборот. Исследователи пытаются использовать в качестве нанодвигателей молекулы актина и кинезина — основные двигательные молекулы живых организмов. Следующая стадия — модель саркомера (единицы мышечной структуры).

Проект диэлектрофорезного наномотора

Здесь используется притягивание или отталкивание частиц от электродов в сильном неоднородном электростатическом поле. В Калифорнийском университете были проведены эксперименты по перемещению нанотрубок и молекул ДНК посредством диэлектрофореза в водных растворах. Электроды были сделаны из нанотрубок. Промежуток между электродами составлял 10 нм, подаваемое напряжение — 1 В. На концах электродов образовалось сильное неоднородное электростатическое поле, притягивающее частицы. Нанотрубки-электроды образуют статор, наночастицы в центре — ротор. Если подавать на электроды переменное напряжение, наночастица будет вращаться, причем ее положение напрямую зависит от величины напряжения, подводимого к электродам.

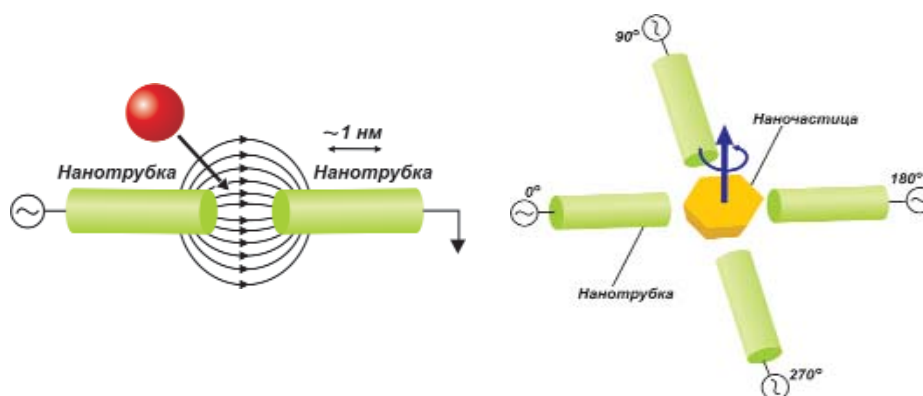


Рис 130. Диэлектрфорезный наномотор

Наномотор на эффекте поверхностного натяжения

Физики из США построили первый наноэлектромеханический актюатор, который использует эффекты поверхностного натяжения. Он состоит из двух капель жидкого металла на поверхности углеродных нанотрубок и приводится в движение слабым электромагнитным полем. Алекс Зеттл считает, что новый наномотор послужит приводным устройством для различных НЭМС.

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

Актюатор состоит из “большой” капли жидкого индия диаметром 90 нм и “маленькой” диаметром 30 нм. Электрический ток, протекающий по нанотрубке, вызывает миграцию отдельных атомов

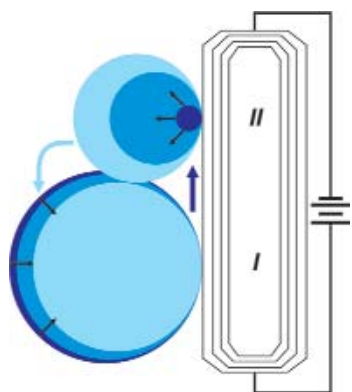


Рис 131. Наномотор на основе поверхностного натяжения

капель вдоль нанотрубки от капли I к капле II (направление показано маленькой стрелкой). Радиус маленькой капли II увеличивается быстрее, чем уменьшается радиус капли I. Процесс длится до тех пор, пока капли не соприкасаются друг с другом. Силы поверхностного натяжения заставляют капли поменяться местами, используя созданный касанием

гидродинамический канал. Затем цикл повторяется. Частота перемещения капель зависит от величины постоянного напряжения, приложенного к нанотрубке.

В работающем наномоторе цикл обмена каплями протекает за 200 пикосекунд при напряжении в 1.3 В.

Наномотор на основе нанотрубок и золотых электродов

В университете Беркли (Калифорния) сконструирован действующий электростатический наномотор размером в 500 нм. Ротор мотора изготовлен из золота и закреплен на многослойной нанотрубке. Две нанотрубки, вставленные меньшая в большую, образуют подшипник. Толщина ротора — 5-10 нм. Два заряженных статора, также изготовленных из золота, расположены на кремниевой поверхности. Примерная скорость вращения такого наномотора около 30 оборотов в секунду.



Рис 132. Наномотор на основе золотых электродов и нанотрубок

Ротор на основе нанотрубки

Корейский университет планирует в течение 7 лет создать насос и актюатор на основе вложенных нанотрубок. При вращении одной нанотрубки внутри другой сила трения ничтожно мала, а трение на поверхности нанотрубки в газовом потоке велико. Используя разницу в силах трения, можно заставить вращаться внешнюю нанотрубку, воздействуя на нее газом. Если внутренний слой многослойной нанотрубки повернуть, она возвращается в прежнее положение благодаря электростатике. При этом она движется маятниковобразно с частотой несколько МГц, что позволит сделать насос, нагнетающий в другую нанотрубку газ, заставляя ее вращаться.

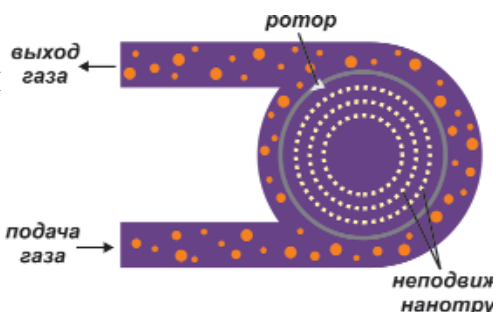


рис 133. Нанотрубчатый ротор

Туннельный электростатический наномотор Дрексlera

Этот проект описан в книге Дрексlera “Наносистемы”. Мотор состоит из двух электродов статора: положительного и

отрицательного, и диэлектрического ротора, в который включен ряд нанопроводников-электродов.

Электроды статора имеют две различные поверхности: с высокой и низкой работой выхода электродов. При подаче напряжения на электроды статора нанопроводники ротора заряжаются через туннельные промежутки, причем неодинаково из-за разной работы выхода электронов с поверхностей. Взаимодействие неоднородного распределенного по ротору заряда с электрическим полем статора вызывает вращение наномотора.

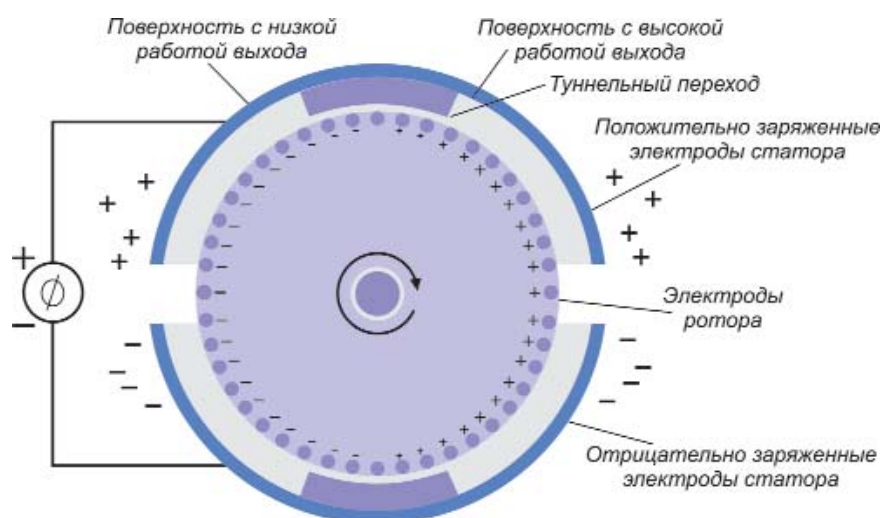


Рис 144 Туннельный электростатический наномотор

Для мотора диаметром 25 нм Дрекслер рассчитал следующие характеристики: напряжение питания 10В, ток статора 110 нА, скорость ротора 1000 м/с. При этом наномотор потреблял бы мощность около 1,1мВт. Плотность мощности составляла бы величину, больше чем 10^{15} Вт/м³, что сравнимо с плотностью мощности макроскопических электромоторов.

В заключение этой главы отметим, что сегодня темпы роста мировых продаж изделий MEMS ежегодно удваиваются, что ставит эту отрасль в один ряд с так называемыми “критическими” технологиями, определяющими уровень развития экономики.

Итак, повторим еще раз!

- Стремительный прогресс науки и техники во второй половине XX века во многом объясняется созданием и совершенствованием полупроводниковых *транзисторов* - основы современной электроники.

- В зависимости от способности пропускать ток все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.
- Характерной чертой полупроводников является их зависимость от внешних воздействий. Целенаправленно меняя температуру полупроводникового кристалла или внося в него примеси, можно эффективно управлять его физическими свойствами, в том числе и электропроводностью.

- Электропроводность полупроводников бывает двух типов:

Собственная — возникает при нагревании вещества. Тепловое движение разрывает межатомные связи, образуя "дырки", которые вызывают движение электронов, стремящихся заполнить разорванные связи. Ток идет пока дырки и электроны не рекомбинируют. Собственный полупроводник имеет равные концентрации электронов и дырок ($n=p$).

Примесная — объясняется наличием в полупроводнике примесей с лишними (донорные), или недостающими (акцепторные) электронами. Полупроводник с донорной примесью относится к *n-типу* ($n>p$), а с акцепторной - к *p-типу* ($n<p$).

- Полупроводниковые приборы основаны на электронно-дырочных переходах. *P-n переход* — это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости. На p-n переходах построены диоды и транзисторы.

- Микропроцессор состоит из миллионов транзисторов, оперирующих электрическими импульсами, символизирующими нулями и единицы. Соединяя несколько транзисторов, можно получить все базовые логические схемы, необходимые для работы микропроцессора: "И", "ИЛИ", "НЕ" и другие.

- *Интегральная микросхема* (ИС) — это система микроскопических устройств (диодов, транзисторов, проводников и т.п.) на одной подложке. Другое популярное название микросхемы - *микрочип*..

- Микросхемы представляют собой плоские пластины, поэтому технология их создания называется планарной. Ее основу составляет *литография* - способ формирования заданного рисунка (рельефа) в слое полупроводника.

- Процесс изготовления микросхем включает несколько технологических этапов: очистка, оксидирование, литография, травление, диффузия, осаждение и металлизация.

- Долгое время основными материалами микроэлектроники считались кремний, служащий основой для создания ИС, и медь, используемая в качестве токопроводящих дорожек

и контактов. Однако в последнее время все большую популярность завоевывают так называемые *проводящие полимеры*, открытые в конце XX века. Благодаря дешевизне производства такие полимеры находят все больше применений в электронике.

- Чем больше транзисторов можно поместить на единице площади, тем выше быстродействие компьютера. Поэтому для дальнейшего развития микропроцессорной техники неизбежен переход к нанoeлектронике, МЭМС, и НЭМС.

- МЭМС (микроэлектромеханические системы) представляют собой трехмерные микрообъекты и микромашины: моторы, насосы, турбины, микророботы, микродатчики или целые аналитические микролаборатории, выполненные на единой кремниевой подложке. Размеры таких устройств могут быть меньше спичечной головки.

- МЭМС находят большую область приложений. В частности, на их основе создаются такие уникальные устройства, как "электронный нос", "электронный язык", "умная пыль", "видеоочки" и множество других.

- Дальнейшее развитие нанотехнологий, МЭМС и НЭМС-устройств невозможно без эффективных наноразмерных двигателей. В настоящее время разрабатываются большое количество как молекулярных, так и механических различных проектов наномоторов (наноактюаторов).

Глава 5. Инструменты нанотехнологии

“Главный инструмент нанотехнолога — его мозг”.

Александр Оликевич

Главное отличие человека от животных — его стремление к познанию и преобразованию природы. Появившись однажды на определенном этапе эволюции, это слабое существо, не имевшее ни крыльев, ни клыков, ни когтей, ни смертоносного жала, ни густого шерстяного покрова — в общем, ничего из того арсенала защитных средств, которыми обладали его более “удачливые” соседи, смогло в конце-концов не только выжить в жестких условиях естественного отбора, но и диктовать природе свои условия, активно преобразовывая окружающую среду.

Активность мышления, подгоняемая инстинктом самосохранения, во все времена заставляла человека изобретать все новые инструменты, будь то топор, колесо или компьютер. Покоряя новые вершины познания, человек видел перед собой все более широкие горизонты, все более смелые мечты манили его, все полнее становилось его знание о мире. Тысячелетиями человек шел по пути познания, проникая все дальше в тайны природы, и, видимо, не будет конца этому пути...

Получая новую информацию, мы анализируем, систематизируем и осмысливаем ее, и лишь потом ставим вопросы, ищем доказательства, формулируем законы, выдвигаем гипотезы и теории. Поэтому огромную роль в познании природы играют инструменты получения информации о ней, первыми среди которых были наши удивительные органы чувств: глаза, уши, нос — сами по себе сложные устройства, достойные восхищения инженера. А ведь знания о природе не самоцель, а тоже своего рода инструменты, с помощью которых человек решает различные задачи: от постройки дома до полета на Луну. Но научных знаний тоже недостаточно. Чтобы воспользоваться ими, надо создать соответствующую технику, для чего опять-таки необходимы инструменты; сначала ими была просто пара лохматых рук.

Познание природы и развитие инструментов глубоко взаимосвязаны. Чем совершеннее инструменты, тем более точную информацию мы можем получать, тем достовернее наши знания о природе. Так, например, до открытия телескопа человеку

были недоступны сведения ни о форме, ни о структуре нашей Галактики. А до изобретения сканирующих микроскопов никто и не подозревал о существовании уникальных углеродных соединений — фуллеренов и нанотрубок.

С другой стороны, более совершенное мышление позволяет изобретать более точные инструменты и приборы, порой на порядки превосходящие возможности существующей технологии. Так, многие изобретения величайшего гения Леонардо да Винчи (типа цепного привода или шарикоподшипника) были теоретически вполне работоспособны, однако же не использовались в XVI веке. Для их реализации была необходима высокоточная обработка деталей, которая хоть и не представляет сложности сегодня, но была совершенно нереальна для той эпохи.

Проникнув в невидимый мир атомов и молекул, мы еще острее нуждаемся в развитии инструментов, способных не только обеспечить получение новой информации, но и привести к потрясающему прогрессу во многих областях. Данная глава представляет собой небольшой обзор некоторых наиболее популярных инструментов нанотехнологии, но все же читателю следует помнить, что на самом деле их несравненно больше.

История развития микроскопии

Едва рождаясь на свет, человек начинает активно познавать окружающий мир, используя изначально присущие ему методы получения информации типа “посмотреть”, “потрогать”, “попробовать на вкус” и т.д.

С появления первого человека до начала XVII в. эти методы были единственным способом получения объективной информации о мире. Однако когда развитие оптики привело к созданию первых телескопов и микроскопов, ученые впервые получили возможность проникнуть далеко за пределы видимости, доступные человеческому зрению.

Оптический микроскоп

Как бы человек ни гордился своей изобретательностью, все же следует признать, что в основе многих его достижений лежат принципы, так или иначе “подсмотренные” у природы. В частности, речь идет о самом популярном инструменте ученых — микроскопе.

Человеческий глаз представляет собой естественную оптическую систему с определённым *разрешением* — возможностью различения деталей наблюдаемого объекта. Для нормального зрения максимальное разрешение (на расстоянии наилучшего видения 25 см) составляет порядка 0,1–0,2 мм. Размеры же микроорганизмов, клеток растений и животных, деталей микроструктуры кристаллов и т.п. значительно меньше этой величины. Обнаружение и изучение подобных объектов было бы невозможным без оптических микроскопов.

Микроскоп (от греч. “micros” — малый, и “scopéo” — смотреть) — оптический прибор для получения увеличенных изображений объектов, не видимых невооружённым глазом, оказал поистине революционное действие на развитие многих наук, и в особенности, биологии.

Увеличение изображения происходит за счёт преломления света, проходящего сквозь стеклянную линзу, способную в зависимости от своей формы фокусировать или рассеивать световой пучок. Самым простым прибором, демонстрирующим это явление, является обыкновенная лупа — плосковыпуклая линза.

Один из первых микроскопов сконструирован в 1609-1610 гг. Галилеем. Он состоит из двух систем линз - **окуляра** и **объектива**. Объектив, расположенный близко к образцу, создает первое увеличенное изображение объекта, которое еще раз увеличивается окуляром, который помещают ближе к глазу наблюдателя.

Образец обычно берется в виде очень тонкого среза и рассматривается в падающем свете, поэтому под предметным столиком находится специальная система линз, называемая *конденсором*, который концентрирует свет на образце. Еще ниже расположено зеркало, которое отбрасывает свет лампы на образец, за счет чего вся оптическая система микроскопа и создает видимое изображение.

На рисунке представлена схема работы микроскопа.

С XVIII столетия развитие микроскопии шло главным образом по пути улучшения конструкции механических частей. Совершенствование шлифовки и подгонки линз привело к тому, что микроскопы начала XIX в. давали увеличение до 1000 раз.

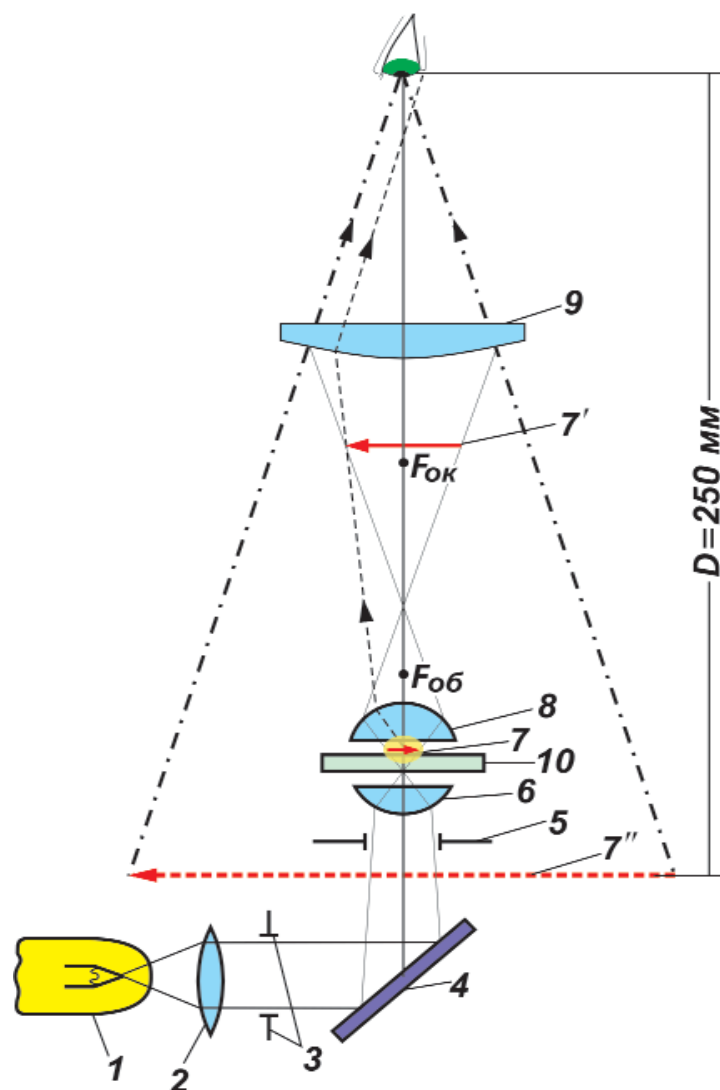


Рис 135. Схема работы оптического микроскопа

(1—осветительная лампа; 2—линза, используемая для равномерного освещения объекта; 3—полевая диафрагма для ограничения светового пучка; 4—зеркало; 5—апертурная диафрагма для ограничения светового пучка; 6—конденсор; 7— рассматриваемый объект (препарат); 7'—увеличенное действительное изображение объекта; 7''—увеличенное мнимое изображение объекта; 8—объектив; 9—окуляр; 10—предметный столик)

Создание фабричного производства микроскопов, конкуренция между фабриками привели к удешевлению инструментов, и микроскоп становится повседневным лабораторным инструментом, который могли иметь даже отдельные врачи и студенты. С этого момента отмечается настоящий “микроскопический бум”. Перед исследователями открылся новый, дотоле недоступный мир. С энтузиазмом первооткрывателей они кладут под микроскоп буквально все, что попадаетея им под руку — кончик иглы, зубной налет, капли крови, дождя. Открытия следуют одно за другим...

Рассматривая каплю воды из канавы, А. Левенгук — один из талантливейших микроскопистов-любителей — впервые увидел

простейших; исследователю удалось рассмотреть не только строение многих из них, но и способы движения и даже размножения. Он же впервые описал красные кровяные тельца — эритроциты.

В 1677 г. Левенгук совместно со студентом-медиком И. Гамом открыл сперматозоиды¹³. Р. де Грааф установил, что женская половая железа млекопитающих, подобно яичнику птиц, продуцирует яйца. Идея о наличии яйца у млекопитающих приблизила разрешение вопроса о сущности оплодотворения.

В 1773 г., почти через 100 лет после первых наблюдений А. Левенгука, датскому зоологу О.Ф. Мюллеру удалось настолько хорошо рассмотреть бактерий, что он смог описать очертания и формы нескольких из них.

Применение микроскопа позволило детально изучить микроструктуру различных органов животных. М. Мальпиги обнаружил капилляры; это удачно дополняло учение В. Гарвея о кругах кровообращения. Мальпиги описал микроскопическое строение легких, печени, почек, селезенки. Я. Сваммердам изучил строение насекомых, их развитие.

Изучение доселе недоступных деталей строения животных, растений и грибов показало, что в основе всего живого лежит универсальное крошечное образование — клетка. В 1839 г. Т.Шванн формулирует *клеточную теорию*. Ученому удалось показать, что клеточная структура имеет всеобщее распространение в мире живого, все ткани состоят или развиваются из вполне стандартных клеток. Таким образом, клеточная теория показала морфологическое единство всей органической природы и тем самым способствовала утверждению идеи эволюции.

Эти примеры лишний раз доказывают, что развитие инструментов идет рука об руку с развитием науки и технологии и что успехи в этих областях связаны самым тесным образом.

Разрешающая способность микроскопов

Хотя со времен Левенгука увеличение оптических микроскопов выросло с 300 до 1500 единиц, на пути дальнейшего роста разрешающей способности стоит непреодолимый теоретический барьер — так называемый “предел Рэлея”.

¹³ Микромир оказался настолько необычен, что далеко не сразу ученые смогли полностью осознать увиденное. Сперматозоидов, например, сначала принимали либо за маленьких человечков, которые затем линейно вырастают во время беременности, либо за простейших, паразитирующих в сперме

Английский физик Джон Рэлей в 70-х годах XIX века сформулировал принцип, в соответствии с которым *предельное разрешение микроскопа не может быть больше половины длины волны освещающего объект света*. Например, если освещать объект красным лазером с длиной волны $\lambda=650$ нм, то предел разрешения окажется в 325 нм.

Это досадное препятствие объясняется явлением дифракции света: изображение точки даже в идеальном, не вносящем никаких искажений объективе, не воспринимается глазом как точка, так как вследствие дифракции является, фактически, круглым светлым пятнышком конечного диаметра, окруженным несколькими попеременно тёмными и светлыми кольцами. Если же две светящиеся точки расположены на очень близком расстоянии друг от друга, то их дифракционные картины накладываются одна на другую, давая в результате весьма размытое изображение со сложным распределением освещенности.

В погоне за все более высоким оптическим разрешением микроскописты шли на самые разные технические ухищрения. В частности, была доведена до предела длина облучающего света, что привело к созданию ультрафиолетовой микроскопии (280–300 нм), позволяющей визуализировать объекты размером 150–170 нм. Но, несмотря на то, что ультрафиолетовые микроскопы почти вдвое превосходят обычные по разрешающей способности, они обладают одним серьезным недостатком: ультрафиолет повреждает биообъекты, поэтому такие микроскопы совершенно не подходят для биотехнологических исследований.

Электронный микроскоп

Для изучения нанообъектов разрешения оптических микроскопов (даже использующих ультрафиолет) явно недостаточно. В связи с этим в 1930-х гг. возникла идея использовать вместо света электроны, длина волны которых, как мы знаем из квантовой физики, в сотни раз меньше, чем у фотонов.

Как известно, в основе нашего зрения лежит формирование изображения объекта на сетчатке глаза световыми волнами, отраженными от этого объекта. Если, прежде чем попасть в глаз, свет проходит сквозь оптическую систему микроскопа, мы видим увеличенное изображение. При этом ходом световых лучей умело управляют линзы, составляющие объектив и окуляр прибора.

Но как же можно получить изображение объекта, причём с гораздо более высокой разрешающей способностью, используя не световое излучение, а поток электронов? Другими словами, как возможно видение предметов на основе использования не волн, а частиц?

Ответ очень прост. Известно, что на траекторию и скорость электронов существенно влияют внешние электромагнитные поля, с помощью которых можно эффективно управлять движением электронов.

Наука о движении электронов в электромагнитных полях и о расчёте устройств, формирующих нужные поля, называется *электронной оптикой*

Электронное изображение формируется электрическими и магнитными полями примерно так же, как световое — оптическими линзами. Поэтому в электронном микроскопе устройства фокусировки и рассеивания электронного пучка называют «*электронными линзами*».

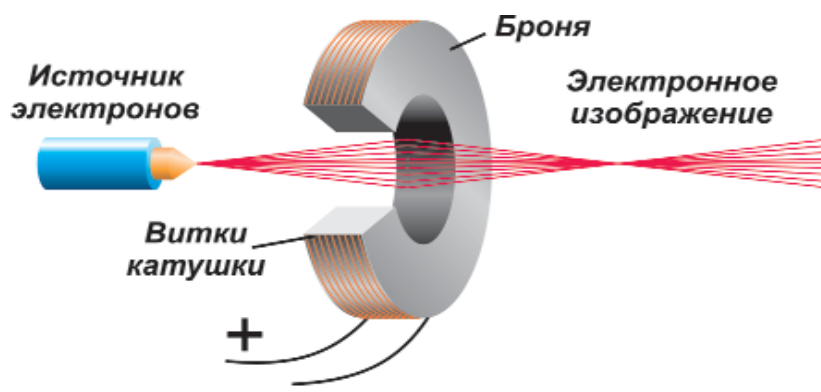


Рис 136. Электронная линза. Витки проводов катушки, по которым проходит ток, фокусируют пучок электронов так же, как стеклянная линза фокусирует световой пучок

Магнитное поле катушки действует как собирающая или рассеивающая линза. Чтобы сконцентрировать магнитное поле, катушку закрывают магнитной «броней» из специального никель-кобальтового сплава, оставляя лишь узкий зазор во внутренней части. Создаваемое таким образом магнитное поле может быть в 10—100 тыс. раз сильнее, чем магнитное поле Земли!

К сожалению, наш глаз не может непосредственно воспринимать электронные пучки. Поэтому они используются для «рисования» изображения на люминесцентных экранах (которые светятся при попадании электронов). Кстати, тот же принцип лежит в основе работы мониторов и осциллографов.

Существует большое количество различных типов электронных микроскопов, среди которых наиболее популярен *растровый электронный микроскоп (РЭМ)*. Мы получим его упрощенную схему, если поместим изучаемый объект внутри электронно-лучевой трубки обычного телевизора между экраном и источником электронов.

В таком микроскопе тонкий луч электронов (диаметр пучка около 10 нм) обегает (как бы сканируя) образец по горизонтальным строчкам, точку за точкой, и синхронно передает сигнал на кинескоп. Весь процесс аналогичен работе телевизора в процессе развертки. Источником электронов служит металл (обычно вольфрам), из которого при нагревании в результате термоэлектронной эмиссии¹⁴ испускаются электроны.

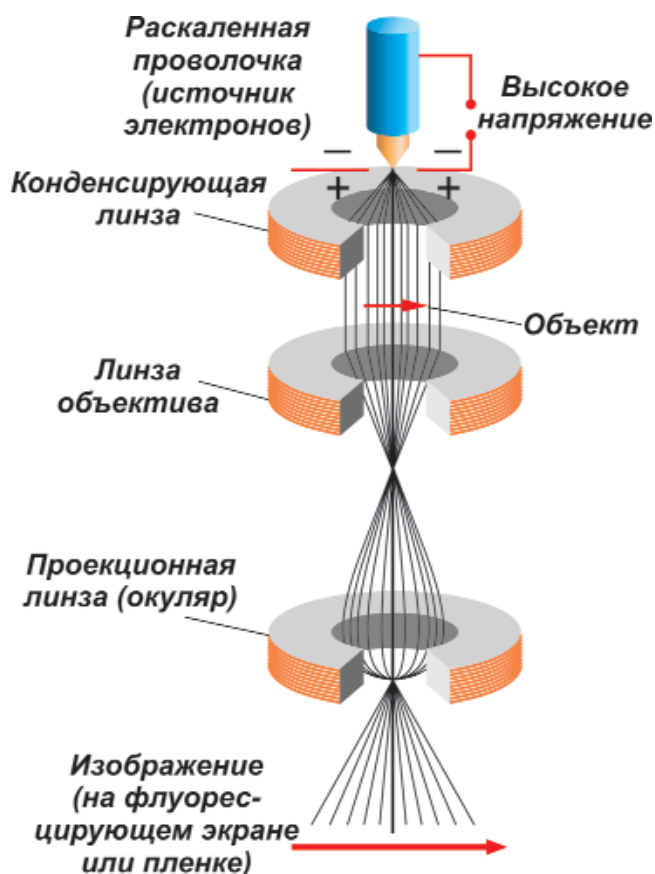


Рис 137. Схема работы растрового электронного микроскопа

При прохождении электронов через образец одни из них рассеиваются из-за столкновений с ядрами атомов образца, другие — из-за столкновений с электронами атомов, а третьи проходят сквозь него. В некоторых случаях испускаются вторичные электроны, индуцируется рентгеновское излучение и

¹⁴ **Термоэлектронная эмиссия** — выход электронов с поверхности проводников. Число вышедших электронов мало при $T=300\text{K}$ и экспоненциально растет с повышением температуры.

т.п. Все эти процессы регистрируются специальными детекторами и в преобразованном виде выводятся на экран, создавая увеличенную картинку изучаемого объекта.

Увеличение в данном случае понимается как отношение размера изображения на экране к размеру области, обеганной пучком на образце. В связи с тем, что длина волны электрона на порядки меньше, чем фотона, в современных РЭМ это увеличение может достигать 10 миллионов¹⁵, соответствуя разрешению в единицы нанометров, что позволяет визуализировать отдельные атомы.

Главный недостаток электронной микроскопии — необходимость работы в полном вакууме, ведь наличие какого-либо газа внутри камеры микроскопа может привести к ионизации его атомов и существенно исказить результаты. Кроме того, электроны оказывают разрушительное воздействие на биологические объекты, что делает их неприменимыми для исследования во многих областях биотехнологии.

История создания электронного микроскопа — замечательный пример достижения, основанного на междисциплинарном подходе, когда самостоятельно развивающиеся области науки и техники, объединившись, создали новый мощный инструмент научных исследований.

Вершиной классической физики была теория электромагнитного поля, которая объяснила распространение света, электричество и магнетизм как распространение электромагнитных волн. Волновая оптика объяснила явление дифракции, механизм формирования изображения и игру факторов, определяющих разрешение в световом микроскопе. Успехам квантовой физики мы обязаны открытием электрона с его специфическими корпускулярно-волновыми свойствами. Эти отдельные и, казалось бы, независимые пути развития привели к созданию электронной оптики, одним из важнейших изобретений которой в 1930-х годах стал электронный микроскоп.

Но и на этом ученые не успокоились. Длина волны электрона, ускоренного электрическим полем, составляет несколько нанометров. Это неплохо, если мы хотим увидеть молекулу или даже атомную решетку. Но как заглянуть внутрь атома? На что похожа химическая связь? Как выглядит процесс отдельной хи-

¹⁵ При увеличении в 10 миллионов раз арбуз "вырастает" до размеров Луны.

мической реакции? Для этого сегодня в разных странах ученые разрабатывают *нейтронные микроскопы*.

Нейтроны обычно входят в состав атомных ядер наряду с *протонами* и имеют почти в 2000 раз большую массу, чем электрон. Те, кто не забыл формулу де Бройля из квантовой главы, сразу сообразят, что и длина волны у нейтрона во столько же раз меньше, то есть составляет пикометры - тысячные доли нанометра! Тогда-то атом и предстанет исследователям не как расплывчатое пятнышко, а во всей своей красе.

Нейтронный микроскоп имеет много плюсов — в частности, нейтроны хорошо отображают атомы водорода и легко проникают в толстые слои образцов. Однако и построить его очень трудно: нейтроны не имеют электрического заряда, поэтому преспокойно игнорируют магнитные и электрические поля и так и норовят ускользнуть от датчиков. К тому же не так-то просто выгнать большие неповоротливые нейтроны из атомов. Поэтому сегодня первые прототипы нейтронного микроскопа еще весьма далеки от совершенства.

Сканирующая зондовая микроскопия

Представьте, что вам завязали глаза и попросили как можно подробнее описать некоторый предмет. Каковы будут ваши действия? Конечно, сначала вы хорошенько ощупаете его, постаравшись получить хоть какую-то информацию. При этом получить сведения о некоторых свойствах данного предмета вам, конечно же, не удастся (например, о его цвете). Тем не менее, вы сможете рассказать многое о *форме* предмета, его *размерах*, *температуре*, *твердости*, *материале*, из которого он сделан, и т.п.

Принцип подобного “ощупывания” поверхности лежит в основе так называемых сканирующих зондовых микроскопов, определяющих мельчайшие неровности поверхности, ведя по ней кончиком сверхтонкого зонда.

Сканирующие зондовые микроскопы обеспечивают атомарное разрешение и работают не только в вакууме, но и в газовой и жидкой среде. Сегодня они являются основным аналитическим оборудованием нанотехнологов

С основными типами сканирующих микроскопов — туннельным и атомно-силовым — мы уже знакомы, так что при желании можно перечитать соответствующие параграфы первой главы, а здесь мы лишь вкратце напоминаем их суть.

Сканирующий туннельный микроскоп

Основой СТМ является очень острая игла, скользящая над исследуемой поверхностью, почти касаясь ее (зазор между иглой и поверхностью составляет менее одного нанометра). При этом вследствие туннельного эффекта между острием иглы и поверхностью образца возникает *туннельный ток*.

Сильная зависимость туннельного тока от расстояния (при изменении зазора на одну десятую нанометра ток изменяется в 10 раз) обеспечивает высокую чувствительность микроскопа. Баланс иглы на столь малом расстоянии от исследуемой поверхности обеспечивается следящей системой, управляющей пьезоманипулятором по результатам измерения туннельного тока. Измеряя величины управляющих сигналов, определяют высоту исследуемой области, а перемещая иглу вдоль поверхности образца, определяют профиль поверхности с точностью до отдельных атомов.

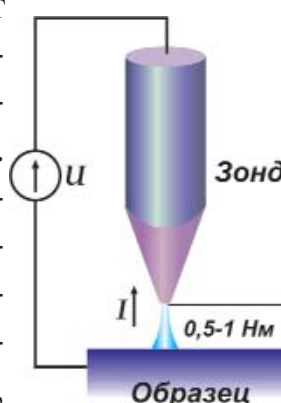


Рис 138. Схема работы СТМ

Основанные на измерении туннельного тока изображения, получаемые с помощью этого микроскопа, дают информацию о пространственном распределении плотности электронных состояний вблизи поверхности. Образно говоря, туннельный микроскоп как бы “видит” распределение электронных облаков вблизи поверхности.

Атомно-силовой микроскоп

Сразу после изобретения туннельного микроскопа исследователи всего мира убедились, что это прибор необыкновенно замечательный, ведь до его появления еще никому не удавалось

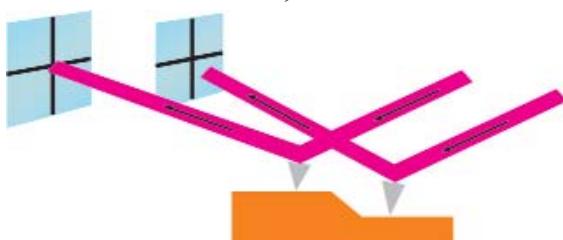


Рис 139. Схема работы АСМ

разглядывать поверхность с такой неслыханной точностью — атом за атомом! Однако и у СТМ есть недостаток: с его помощью можно изучать только материалы, хорошо проводящие элект-

рический ток. Поэтому когда с помощью СТМ принялись изучать непроводящие вещества, их пришлось покрывать тонкой метал-лической пленкой, что было не всегда удобно.

Но вот в конце 1986 Биннинг, один из изобретателей СТМ, предложил конструкцию нового сканирующего прибора, измеряющего не туннельный ток, а силу связей между атомами вещества. Новый прибор был назван атомным силовым микроскопом. В нем регистрируют изменения силы притяжения иглы к поверхности. Игла расположена на конце кантилевера, способного изгибаться под действием небольших межатомных сил, которые возникают между исследуемой поверхностью и кончиком острия. Зонд “ощупывает” поверхность образца практически в буквальном смысле слова.

Мельчайшие отклонения кантилевера детектируются с помощью лазерного луча, отражающегося от его тыльной поверхности на фотодиод. По изменению показаний фотодиода судят о рельефе исследуемого объекта.

Типы кантилеверов

Атомно-силовая микроскопия оказалась настолько эффективной, что на ее основе были созданы другие специфические методики, позволяющие получать картины не только рельефа поверхности, но и многих других показателей. В частности, на сегодняшний день наиболее распространены следующие разновидности АСМ:

- *Магнитно-силовой микроскоп (МСМ)* в качестве зонда использует намагниченное острие. Его взаимодействие с поверхностью образца позволяет регистрировать магнитные микрополя и представлять их в качестве карты намагниченности.
- *Электро-силовой микроскоп (ЭСМ)* — в нем острие и образец рассматриваются как конденсатор и измеряется изменение ёмкости вдоль поверхности образца.
- *Сканирующий тепловой микроскоп* регистрирует распределение температуры по поверхности образца. Его разрешение достигает порядка 50 нм, так как в меньших масштабах такая макроскопическая характеристика вещества как температура не применима.
- *Сканирующий фрикционный микроскоп* “скребется” по поверхности, составляя карту сил трения.

- *Магниторезонансный микроскоп* позволяет получать изображение спинов отдельных электронов, отслеживая реакцию поверхности на быстро изменяющееся магнитное поле зонда.

- *Атомно-силовой акустический микроскоп* позволяет очень точно измерять модуль Юнга в каждой точке как мягких, так и твердых образцов.

Одним из недостатков АСМ является невозможность изучить глубинную структуру образца — ведь зонд скользит по поверхности и не может заглянуть внутрь. Однако и это ограничение удалось обойти — ученые уже построили настоящий *дизассемблер*, названный *трехмерным атомно-зондовым томографом*, который сканирует небольшой участок, потом «выщипывает» слой толщиной в один атом и сканирует участок снова, записывая параметры каждого нового атома. Современные томографы успевают «выщипать» 20.000 атомов в секунду — т.е. 72 миллиона атомов в час.

Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля

Отдельного внимания заслуживает *оптический микроскоп ближнего поля* (SNOM). По принципу действия он напоминает туннельный микроскоп, только в качестве зонда здесь применяется очень тонкая “прозрачная игла” из оптоволокна, а вместо туннельного тока регистрируются изменения характеристик проходящего по ней лазерного луча.

Каким же образом происходит сканирование объекта? Оптоволоконный зонд, сужающийся до диаметра меньше длины волны света, подносится вплотную к сканируемой поверхности (на расстояние меньше длины волны) и как бы “чувствует” поверхность. “Чувствовать” здесь означает буквально следующее: согласно законам оптики на границе раздела двух сред различной плотности (стекло/воздух) световой луч преломляется и отражается от торца иглы. При этом световая волна не выходит из волновода на большое расстояние, а лишь слегка “вываливается” из его кончика.

На другом конце волновода установлен приемник отраженного от свободного торца света. Зонд сканирует образец подобно игле туннельного микроскопа, и если меняется расстояние между исследуемой поверхностью и кончиком зонда, то меня-

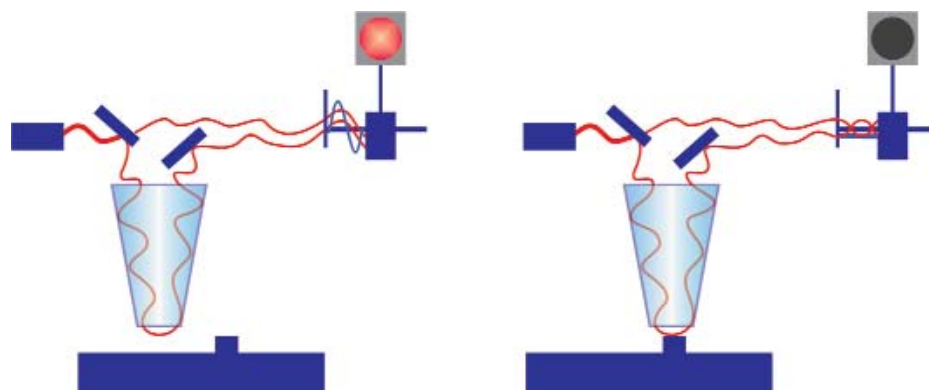


Рис 140. Схема работы оптического сканирующего микроскопа

ются и характеристики отраженной световой волны (амплитуда и фаза). Эти изменения регистрируются приемником и используются для построения изображения рельефа поверхности.

Разрешение, получаемое таким методом, достигает 50 нм, что на порядки превосходит разрешение обычного оптического микроскопа. Кроме того, оптическая микроскопия ближнего поля идеально подходит для исследования различных биообъектов, ведь при использовании простых световых волн биообъект не подвергается никакому разрушительному воздействию (в отличие от АСМ, где возможно механическое повреждение образца, или электронной микроскопии с ее ионизирующим облучением).

Недавно исследователи добились еще большего разрешения SNOM, объединив ближнепольную оптическую микроскопию с многоножкой от IBM (см. главу «Нанoeлектроника и НЭМС»). У такого гибридного прибора ожидается разрешение в 13 нм, что в десятки раз меньше длины световой волны!

Наноиндентор

Из главы «Нанохимия и наноматериалы» нам известно, что абсолютное большинство веществ в наноформе значительно отличаются по химическим свойствам от своего макроскопического состояния, в частности, изменяется их каталитическая активность. Это объясняется тем, что удельная площадь поверхности (доля поверхностных атомов) у нанообъектов значительно выше, чем у веществ в обычном состоянии.

То же самое справедливо и для *механических свойств* (твердости, пластичности, упругости и т.п.). Результаты практических опытов показали, что, абсолютное большинство материалов в субмикронных масштабах ведут себя как предельно проч-

ные, подобные алмазу, даже если в обычном состоянии являются мягкими материалами (как, например, пластилин). Другими словами, в условиях наноконтакта твердость материала может во много раз превышать его макроскопическую твердость. Особенно сильно это проявляется в областях с характерными размерами менее 100 нм. Наглядной моделью этого поразительного, на первый взгляд, процесса может служить пружина: гораздо легче сжать металлическую пружину, чем сам материал, из которого она состоит.

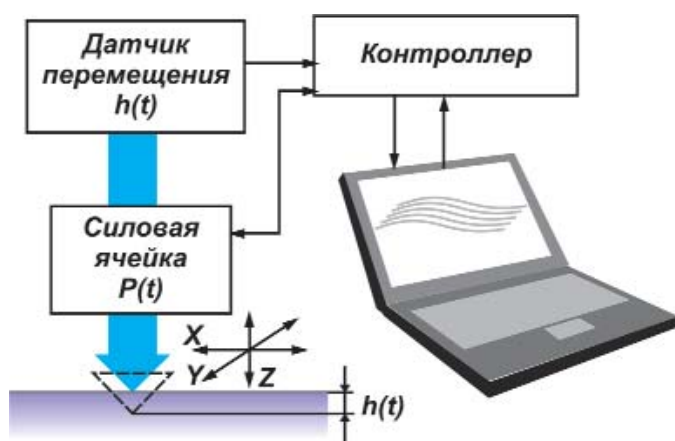


Рис 141. Схема работы наноиндентора

Для исследования механических свойств различных материалов в нанометровом диапазоне широко применяется специальный метод определения микротвердости вещества — **наноиндентирование** (от англ. “indent” — выдалбливать, образовывать выемку).

Наноиндентирование основано исключительно на механическом воздействии на исследуемую поверхность и не требует визуализации ее рельефа. Метод очень прост и заключается в прецизионном погружении зонда в поверхность образца на глубину нескольких нм и непрерывной регистрации прилагаемого усилия.

Затем по этим данным строится диаграмма “сила давления — глубина погружения”, из которой можно извлечь десятки параметров, характеризующих материал на нанометровом уровне!

Этот простой и дешевый способ позволяет, имея в распоряжении минимум материала, производить комплексные исследования его поверхностных свойств. Наноиндентирование позволяет исследовать

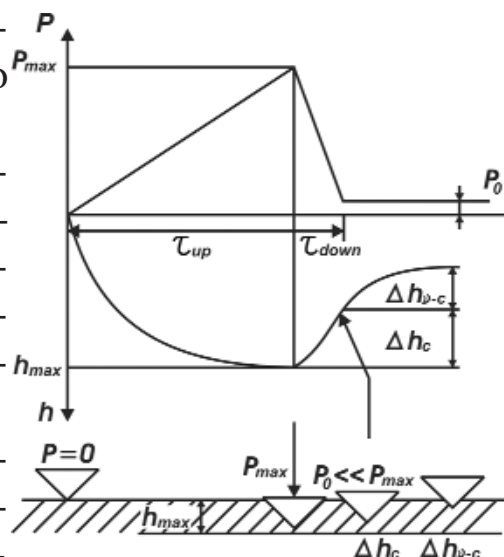


Рис 142. Принцип действия наноиндентора.

(P —нагрузка на индентор; h —вертикальное смещение индентора; t —время; τ —длительность цикла нагружения;)

довать динамику процессов в наномасштабе, что недоступно другим методам, в частности, атомно-силовой, электронной и оптической микроскопии.

Сканирующие зондовые лаборатории

Говоря о сканирующих зондовых микроскопах, нельзя не упомянуть российскую компанию "Нанотехнология-МДТ", которая уже более 10 лет производит СТМ, АСМ, СБОМ и другие приборы, по качеству не уступающие зарубежным конкурентам. Более того, компания создает новые типы нанооборудования — сканирующие зондовые лаборатории. Это комплекс, включающий в себя целый набор различных зондовых устройств. Кроме детальной информации о поверхности такая лаборатория позволяет провести спектральный анализ объекта, реконструировать его трехмерную структуру, а также допускает возможность автоматизации исследований!

Применение СЗМ в биологии очень ограничено, потому что живые организмы относительно крупные и подвижные. А оптические микроскопы имеют малое разрешение, не позволяя исследовать объекты, размер которых меньше 1 микрона.

Чтобы преодолеть эти ограничения, разрабатывают систему, позволяющую наблюдать объект оптическими методами, а при необходимости исследовать отдельные участки средствами СЗМ. При этом происходит точное наложение изображений, полученных с помощью оптического микроскопа и СЗМ. Полученную таким образом информацию об объекте можно существенно дополнить данными о его химическом составе. Для этой цели комплекс оснащен сканирующим спектрометром и сверхбыстрыми лазерами.

Сканирующая зондовая лаборатория "NTEGRA" позволяет изменять температуру образца в диапазоне от -30°C до $+300^{\circ}\text{C}$ прямо во время работы. Это позволяет наблюдать разные структурные изменения на поверхности образца: кристаллизация, плавление, процессы роста, и т.д.

При исследованиях живых объектов, а также во многих химических экспериментах необходимо проводить сканирование в жидкости. Для таких исследований разработана закрытая жидкостная ячейка с протоком жидкости и нагревом. С ее помощью можно изучать биологические объекты - живые клетки или взаимодействующие макромолекулы.

В одной из зондовых лабораторий совмещены *криотом* — специальный прибор для получения ультратонких срезов — и *база СЗМ*. Мгновенное исследование методами СЗМ свежего среза замороженного биологического образца позволяет получить изображение его внутренней структуры. При этом можно измерить и записать карты таких параметров, как жесткость, липкость, вязко-эластичность и т.п. Последовательный анализ поверхностей образца, получаемых при удалении ультратонких слоев с помощью микротомы, позволяет реконструировать трехмерную структуру объекта.

Учебное нанотехнологическое оборудование “УМКА”

Обратите внимание, что сканирующие зондовые микроскопы не настолько просты в использовании, как может показаться из описания. Затупившаяся или слегка поврежденная игла зонда, недостаточная чистота поверхности образца и другие несовершенства могут значительно мешать достижению точного атомарного разрешения. Кроме того, для корректного функционирования этих приборов требуется обеспечить их максимальную вибро- и шумоизоляцию, дабы проезжающий мимо лаборатории трамвай не повредил столь чувствительные приборы в момент их работы.

Вот почему помимо собственно сканирующих микроскопов в комплекте с ними обычно поставляются еще и сложные вибро-, термо- и шумоизоляционные установки. Кроме того, для работы на атомном уровне эти микроскопы должны находиться в глубоком вакууме и при сверхнизких температурах. Все это самым непосредственным образом сказывается на их размерах и стоимости — микроскоп среднего уровня занимает много места и стоит сотни тысяч долларов. В современных условиях приобрести такое оборудование может позволить себе далеко не каждый исследовательский центр, не говоря уже об обычных вузах и частных лабораториях.

В связи с этим невозможно не упомянуть чудо отечественной инженерной мысли: уникальный сканирующий туннельный микроскоп “УМКА”, произведенный концерном “Нано-индустрия”. В отличие от зарубежных аналогов, “УМКА” помещается в небольшом кейсе, стоит менее 9 тысяч долларов и работает в комнатных условиях!



Рис 143. Сканирующий туннельный микроскоп "УМКА"

Созданная специально для обучения нанотехнологов, такая установка может быть использована для исследовательских и лабораторных работ на атомно-молекулярном уровне в области физики, химии, биологии, медицины, генетики и других наук.

Комплекс "УМКА" включает в себя: туннельный микроскоп, систему виброзащиты, набор тестовых образцов, наборы расходных материалов и инструментов. Программа с открытым кодом позволяет управлять экспериментами и наблюдать результаты с обычного компьютера. Ниже приведены основные достоинства комплекса "УМКА" по сравнению с мировыми аналогами:

- разрешение до 0,01 нм;
- низкая стоимость;
- малые габариты;
- не требует специального обучения для работы;
- нет механических деталей, требующих смазки и ремонта;
- повышенная виброустойчивость и помехозащищенность;
- не требуются специальные помещения и фундамент;
- возможность работы в вакууме и неагрессивных газах;
- сканирование пленок и биообъектов без предварительного напыления металла (работа на ультранизких токах);
- высокая температурная стабильность, позволяющая проводить длительные манипуляции с группами атомов;
- высокая скорость сканирования, позволяющая наблюдать быстротекущие процессы;
- гибкое программное обеспечение с открытым кодом;
- для управления используется обычный персональный компьютер и др.

Вспомните, какую роль сыграли в начале XIX века удешевление и доступность первых оптических микроскопов. Получив широкие возможности изучать мир микроорганизмов и клеток, человечество колоссально продвинулось в своих знаниях о том, как устроена жизнь, какие законы природы лежат в ее основе.

Сегодня “УМКА” делает мир атомов и молекул реально доступным для талантливых исследователей XXI века. Ее компактность, надежность, широкие возможности и, главное, доступная цена, несомненно, приведут к тому, что большинство научных лабораторий в России смогут изучать нанотехнологии не только теоретически. А значит, не за горами эпоха новых открытий и свершений!

Нановесы

Весами, на которых можно взвешивать тела с массой в несколько милли- и микрограмм, давно уже никого не удивишь — они используются в любом школьном кабинете физики. Но нельзя непосредственно взвесить как очень большой, так и очень маленький объекты, поскольку для них не существует эталонных мер.

А можно ли взвесить объект, масса которого в десятки миллионов раз меньше микрограмма? Для работы с подобными микроскопическими телами недавно сотрудниками Технологического института штата Джорджия (США) были созданы самые чувствительные и самые маленькие в мире весы. Они состоят из тонкого кантилевера-нанотрубки длиной около 4 микрон (он-то и представляет собой чашу весов). На рисунке изображена процедура взвешивания вируса, масса которого равна 22 фемтограммам ($1 \text{ фг} = 10^{-15} \text{ г}$).

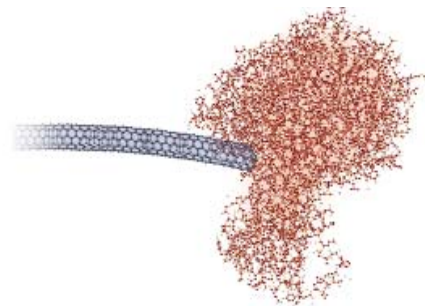


Рис 144. Нановесы на основе нанотрубки

В основе работы нановесов лежит эффект, хорошо известный из школьной физики: собственная частота колебаний пружины зависит от массы груза и ее жесткости.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Другими словами, зная коэффициент упругости пружины и измерив частоту ее колебаний, можно с легкостью определить

массу частицы, находящейся на ее конце. Точно так же можно измерять массу, подсоединенную к свободному концу нанотрубки. В созданных весах кантилевер приводится в колебательное движение с помощью импульса лазера или переменного электрического поля. При этом он освещается тонким лазерным лучом, способным улавливать мельчайшие отклонения его собственной частоты колебания. Как только частица попадает на кантилевер, частота его колебаний уменьшается. Сдвиг собственной частоты из-за искомой добавочной массы измеряется с помощью “зайчика”, отражающегося от кантилевера.

Если известна упругость нанотрубки, то можно по смещению резонансной частоты определить массу частицы. И присоединенная масса (даже очень незначительная) может быть определена путем простого вычисления. На нановесах можно “взвесить” объект массой около 10^{-15} г! При присоединении такой массы резонансная частота падает более чем на 40%.

Более точных методов измерения массы предельно малых объектов, чем нановесы, пока еще нет. Исследователи взвесили таким образом даже вирусы. Нанотрубочные весы нашли широкое применение для измерения бактерий, клеток, биомолекул и других биологических объектов.

Спектроскопия

Для изучения наноструктур важно знать не только их массу или расположение атомов, но и то, из чего они состоят. Определять химический состав образцов — т.е. содержание в них атомов тех или иных элементов — позволяют методы *спектроскопии*, использующие различные приборы для исследования спектров излучения, поглощения, отражения, рассеяния и др.

Спектр — это распределение интенсивности электромагнитного излучения по длинам волн

Изменение энергетических уровней электронов в атомах сопровождается испусканием или поглощением фотонов различной частоты. Зная, какие частоты (спектральные линии) соответствуют атомам различных химических элементов, можно, взглянув на спектр вещества, определить его состав.

Один из самых современных спектрометров, разработанный российским ученым Н. Суриным, позволяет одновременно исследовать спектры испущенного объектом излучения, лю-

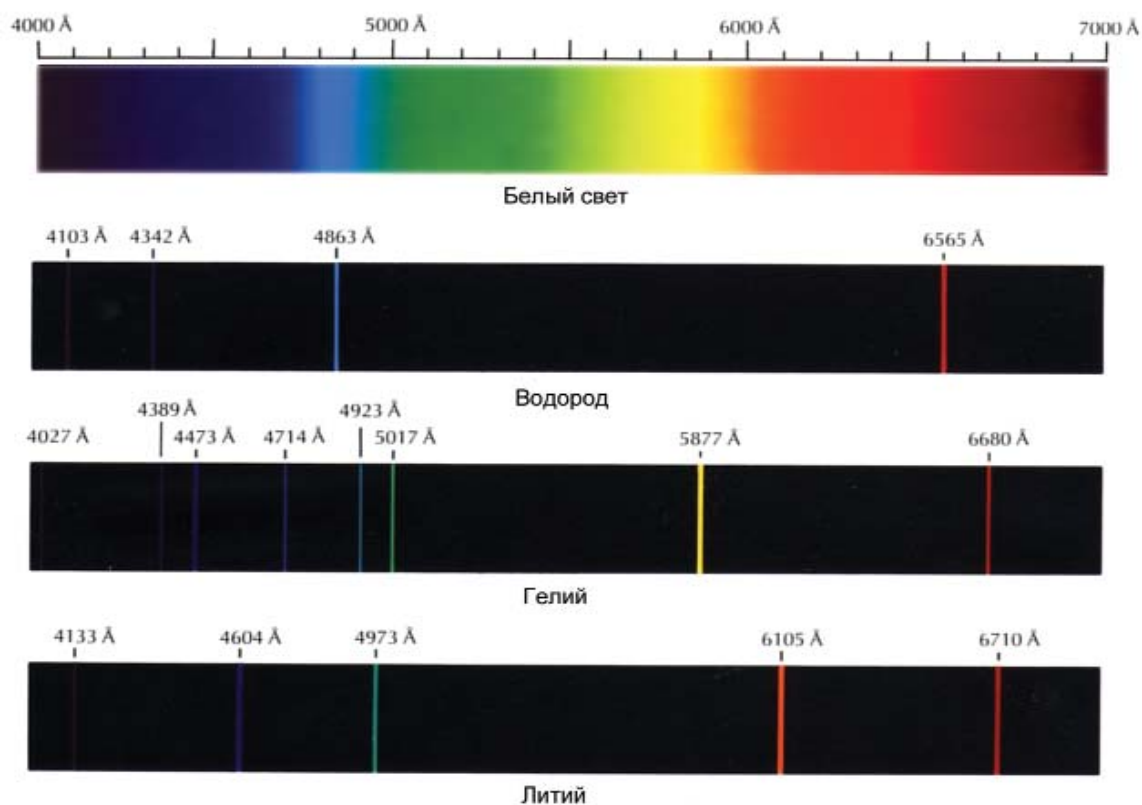


Рис 145. Спектры белого света и первых трех химических элементов

минесценции, рассеяния света, излучения, отраженного поверхностью объекта и излучения, прошедшего через образец. Это дает огромное количество информации не только о составе образца, но и о происходящих в нем квантовых процессах.

С помощью спектрометра можно узнать не только состав, но и, например, количество наночастиц. Известно, что наночастицы в растворе имеют примерно одинаковый размер, но с течением времени слипаются в более крупные комочки и оседают. Соответственно, их количество в растворе постепенно уменьшается. Теперь возьмем каплю этого раствора и поместим в спектрометр. По интенсивности спектральных линий, соответствующих материалу наночастиц, можно рассчитать концентрацию соответствующих атомов в растворе. Разделив ее на количество атомов в наночастице, получим количество наночастиц на кубический сантиметр раствора.

Моделирование наноструктур

Чтобы создать любой нанообъект, будь то наноробот либо новая молекула, нужно сначала в детально разработать ее структуру и технологию создания. Но как это сделать, если такие структуры даже невозможно увидеть? Чтобы избежать

конструирования многочисленных дорогих прототипов наносистем, чтобы понять, какая из них будет работать, а какая нет, инженеры используют модели.

Молекулярные модели могут быть разными. В самом простом случае это *физические модели* из цветных шариков, украшающие школьные кабинеты химии. Такие модели предельно просты и наглядны, однако их достоверность оставляет желать лучшего. Ведь атомы — это отнюдь не твердые пластиковые шарики, а сложные физические системы, живущие по своим законам.

Поскольку модели цветных шариков плохо отражают реальные свойства молекул, нанотехнологи обычно используют *компьютерные модели*, в которых можно задать настоящие законы квантовой физики.

Основанное на мощном математическом аппарате, компьютерное моделирование играет ключевую роль в разработке наносистем

Что же представляет собой компьютерное моделирование? Наверняка многие читатели имеют представление о различных САПР — системах автоматизированного проектирования (или по-английски CAD — computer aided design). Обычные инженеры, дизайнеры и архитекторы давно используют преимущества компьютерного моделирования, применяя в работе известные программы, такие как MathCAD, AutoCAD, ArchiCAD и т.п.

Творчество молекулярного инженера очень похоже на творчество архитектора, проектирующего здание, который, в зависимости от назначения, рассчитывает его прочность, устойчивость, удобство строительства, стоимость, влияние окружающей среды и т.п. При этом большинство необходимых расчетов, основанных на теоретических данных, берет на себя компьютерная программа. При современном уровне знаний, позволяющем судить о квантовых законах с большой достоверностью, расчет и моделирование наноструктур стали вполне реальной задачей, сходной с обычными задачами CAD.

Существуют несколько основных типов математического моделирования в нанотехнологии:

Тип моделирования	Примеры программ
Визуализационное	RasMol
Вычислительное	Chem3D
Инженерное	NanoXplorer

Табл 8. Примеры нанотехнологических CAD-программ

Визуализационное моделирование

Наиболее простая из современных визуализационных программ — небольшая программа **RasMol**, которая ничего не рассчитывает, но позволяет наблюдать в трехмерном виде наноструктуры, созданные другими.

В программе можно хорошенько рассмотреть наноструктуру, покрутить, увидеть химические элементы, связи и группы, а также экспортировать результаты в графический файл. На сайте www.pdb.org есть модели всех известных белков и биомолекул, а на нашем сайте есть даже модели деталей будущих наномашин.

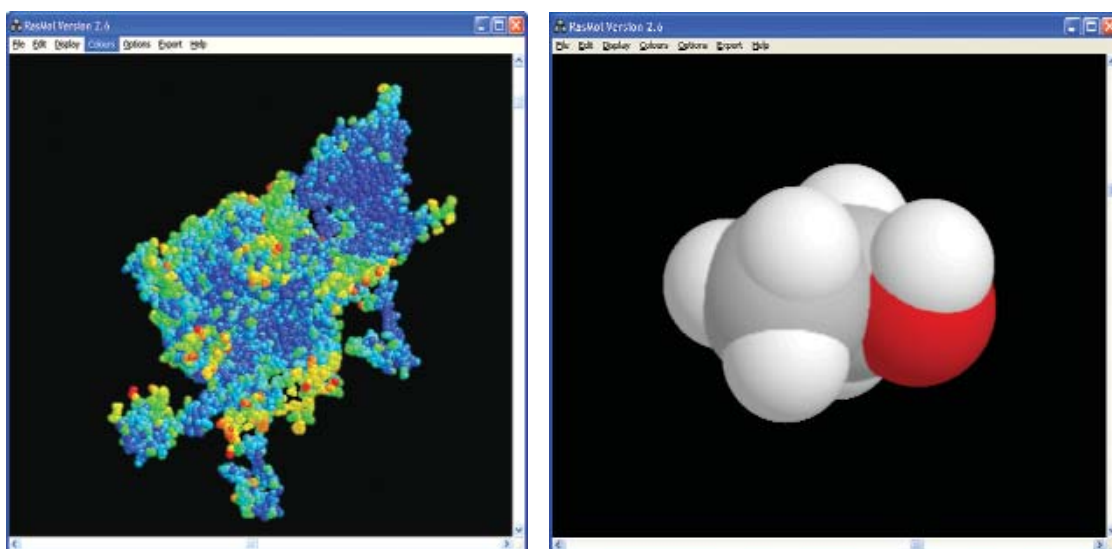


Рис 146 Наноструктуры в окне программы RasMol. Вирус SV40 и молекула этилового спирта

Вычислительное моделирование

Смотреть чужие модели наноструктур, конечно интересно, но гораздо интереснее строить их самим. Для этого используют математическое моделирование методами квантовой механики, молекулярной динамики и различные статистические подходы. С их помощью можно увидеть не только трехмерную модель объекта, но и его поведение при воздействии температуры, электро-магнитных полей, гамма-квантов, и др. Рассмотрим одну из популярных программ — **Chem3D**. Графический интерфейс делает ее очень удобной и понятной:

- любую химическую формулу можно набрать на клавиатуре, после чего на экран автоматически выводится графическое изображение молекулы;

- существуют разные виды представления молекул: стержневая, шаростержневая, ван-дер-ваальсова и другие.

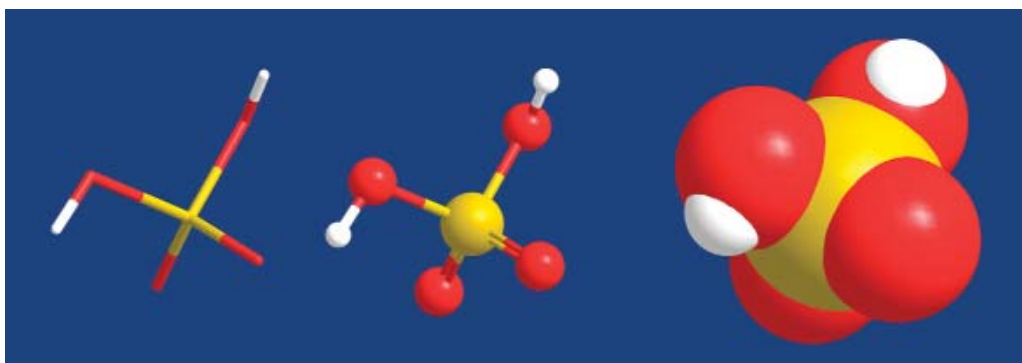


Рис 147. Модель серной кислоты H₂SO₄: а) стержневая, б) шаростержневая в) Ван-дер-ваальсова

- можно “вручную” собрать наноструктуру, и Chem3D сам оптимизирует ее, представляя реальное расположение атомов;

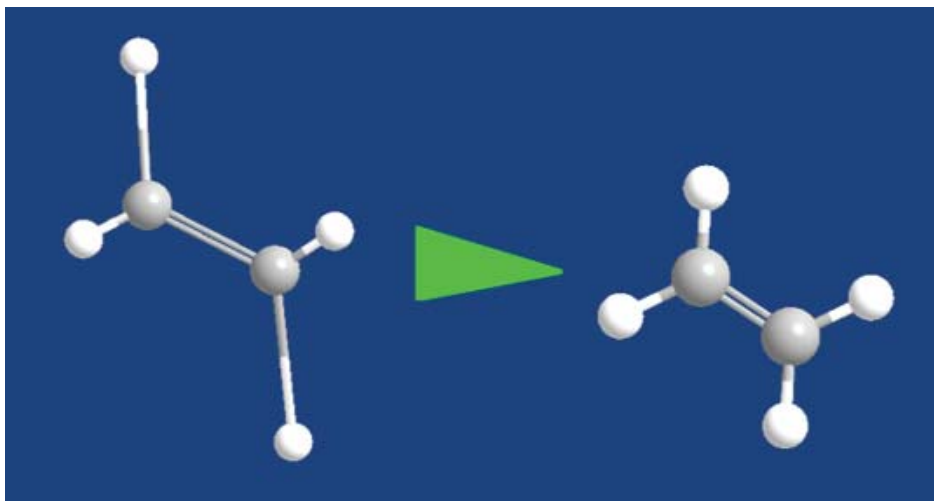


Рис 148. Так выглядела бы молекула этилена (C₂H₄) на самом деле

- молекулярная механика позволяет “нагреть” структуру, повлиять на нее электромагнитными полями и посмотреть динамику этих взаимодействий;

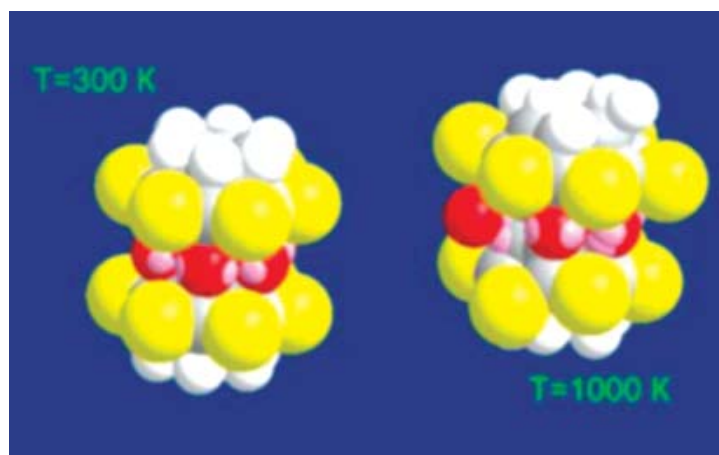


Рис 149. Наш логотип нагретый до 1000K

- можно моделировать довольно сложные структуры;

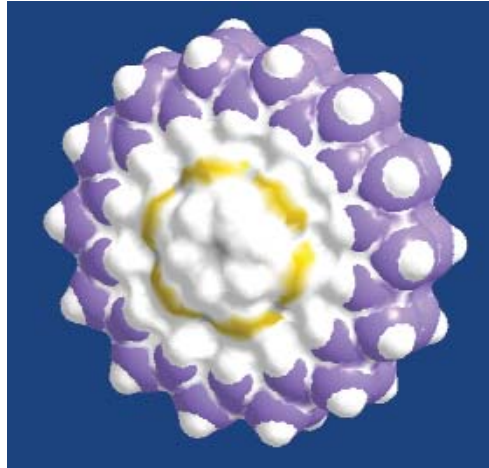


Рис 150. Модель сложного наномеханизма

- или создавать группы и манипулировать ими;

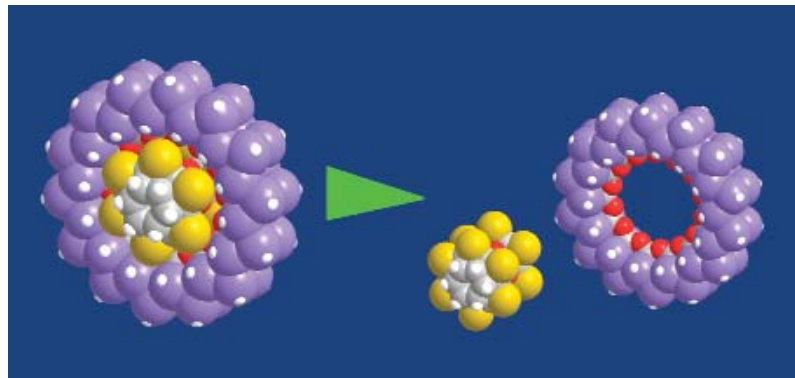


Рис 151. Можно собирать, разбирать наноструктуры и перемещать их по экрану

- можно рассмотреть наноструктуру в “реалистичном” виде, т.е. так, как бы она выглядела в атомно-силовом микроскопе;

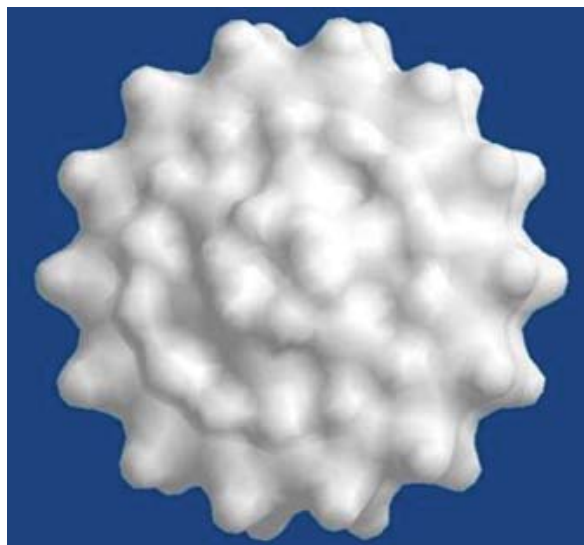


Рис 152. Картина Ван-дер-ваальсовых сил на поверхности нанообъекта

- основные молекулы, необходимые для наномodelей, уже созданы, и хранятся в базе данных. Это общеизвестные вещества: H_2O , C_2H_2 , C_6H_6 , АТФ, а также молекулы посложнее - от различных современных лекарств до сложных биомолекул;

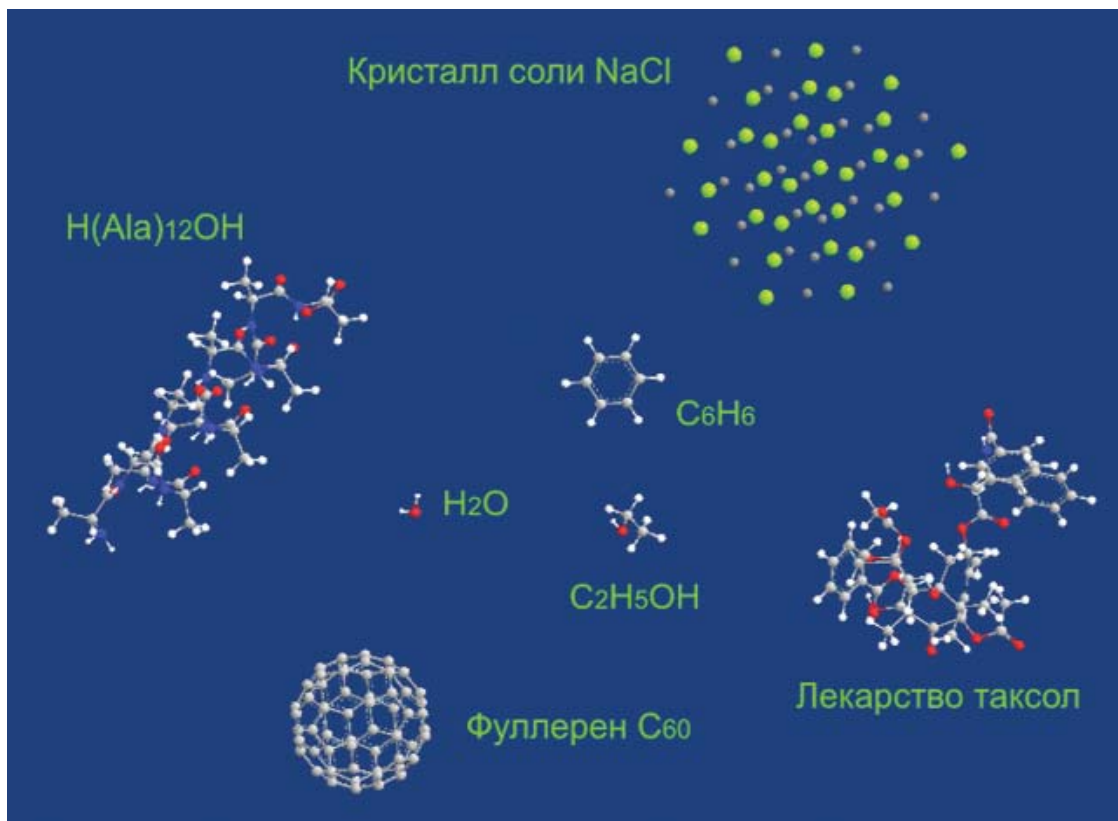


Рис 153. Примеры сложных и простых молекул

- если же необходимо построить структуру из отдельных атомов и посмотреть, как она будет выглядеть в реальности (если, конечно, эта структура не противоречит химическим зако-

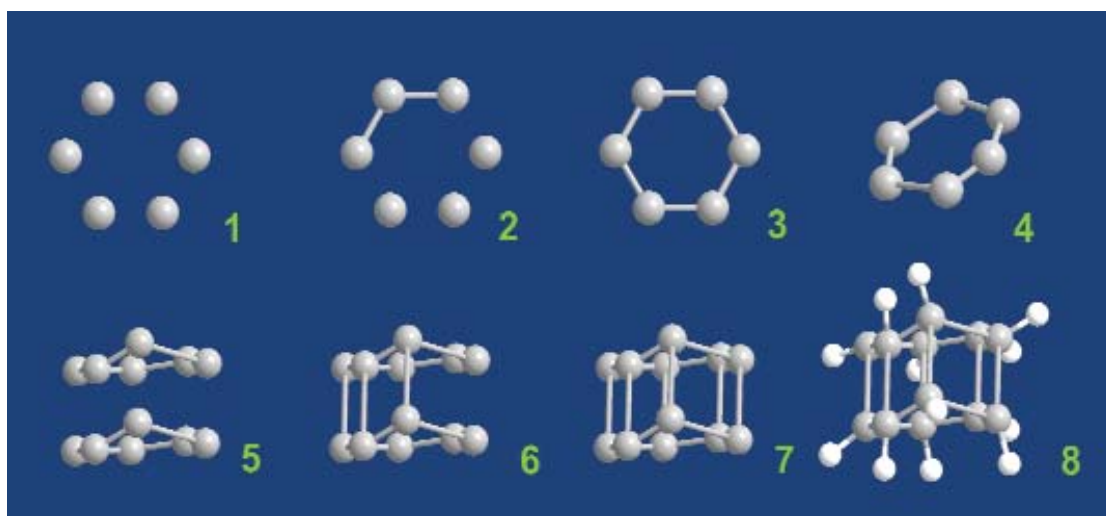


Рис 154. Процесс построения наностержня диаметром шесть атомов углерода

нам природы), то можно создавать отдельные атомы, набирая их символы соответственно таблице Менделеева, а потом соединить их химическими связями.

Можно видеть, что полученная структура не отличается “упорядоченностью”. Но это нам и не нужно. Все равно, как бы точно мы ни располагали атомы относительно друг друга, компьютер сделает это точнее, решая уравнения квантовой механики. Теперь это не просто плод нашей фантазии, а вполне реальное расположение атомов с соответствующими химическими связями между ними. Такая структура не противоречит законам природы, а значит, ее можно будет когда-либо создать.

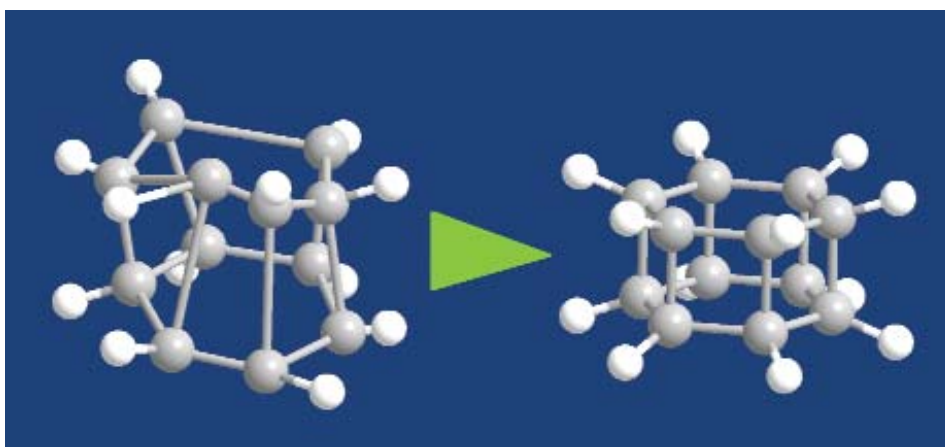


Рис 155. Минимизация энергии - реальный вид структуры

Таким образом, копируя и добавляя необходимые связи, можно добиться любой длины стержня. Снова минимизируя энергию, мы увидим, что структура не выпрямилась, как мы бы хотели, а наоборот, стала искривленной:

Это не ошибка, а реальное расположение атомов. Программа показала, что стержень с такой структурой будет кривым. Так что для того, чтобы получить “гладкий” стержень, необходимо придумать другую молекулярную конфигурацию. Попробуем, например, конфигурацию, основанную на четырех атомах углерода:

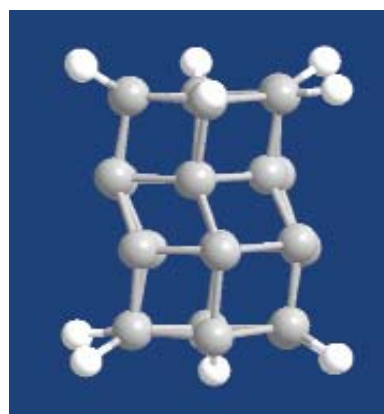


Рис 156. Кривой наностержень

Минимизируя энергию, получаем следующую структуру:

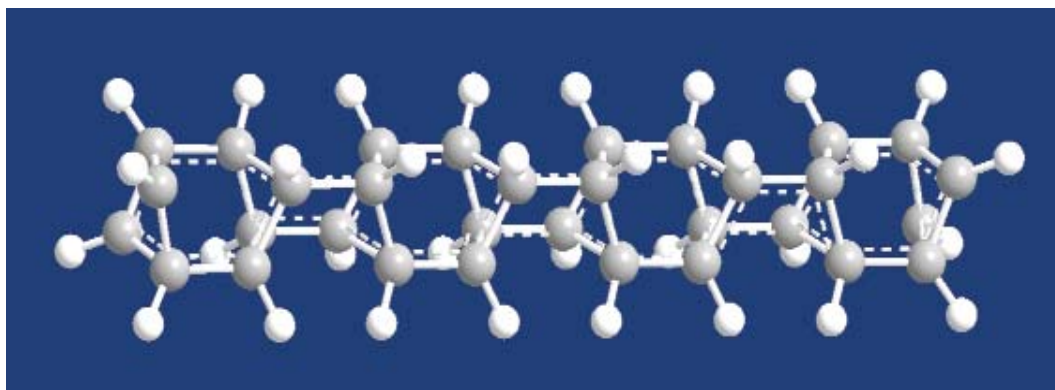


Рис 157. “Чертеж” наностержня из 4х атомов углерода

Видим, что это уже прямая структура, которую можно использовать в наномеханизмах. На основе таких стержней возможно построение механокомпьютеров и молекулярных ячеек памяти.

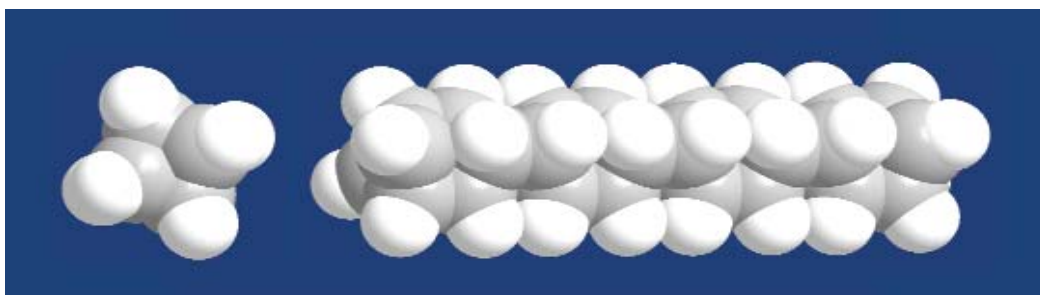


Рис 158. Наностержень на основе четырех атомов углерода

Здесь рассмотрены только некоторые из возможностей, предоставляемых Chem3D. Программа “умеет” также многое другое: от визуализации структуры белков до расчета электрохимических потенциалов и молекулярных орбиталей. Без сомнения, лучший способ ознакомиться с программой — установить ее и попробовать самому. Ее демо-версия есть на одном из дисков серии “Мир нанотехнологий”, выпускаемых компанией Nanotechnology News Network.

Инженерное моделирование

Теперь поговорим о различных программах, помогающих инженеру-нанотехнологу создавать наносистемы, которые затем можно испытать, подвергая различным тестам.

С тех пор, как алхимики начали обозначать таинственными символами химические элементы, человечество изобрело множество способов записи информации о веществе: от химических формул до компьютерных файлов, содержащих координа-

ты каждого атома. Так, например, для описания продукта микронных размеров необходимо учесть взаимное расположение триллионов атомов, составляющих продукт. Однако после создания различных “шаблонов” и готовых узлов описание можно свести к файлу малого размера, содержащего набор и описание шаблонов, деталей и их взаимосвязей. Если необходимо заполнить определенный объем, то это можно описать с помощью “шаблона” элементарной единицы объема и использовать затем этот шаблон столько раз, сколько необходимо для заполнения искомого объема.

Описание дизайна нанодеталей должно быть параметрическим. То есть если нужно построить нанотрубку, то необходимо создать модель одной секции нанотрубки, указав ее длину. Задаем затем длину всей нанотрубки и программа самостоятельно дублирует модель одной секции нужное количество раз.

Компания NanoTitan разработала иерархический язык описания наноструктур *panoML* (на основе языка XML). С его помощью можно описать наносистему на молекулярном уровне, а также определить ее основные электрические, оптические, физические свойства, информацию о применении, авторских правах изобретателя и др.

Модель наноустройства описывается отдельными наносистемами и молекулярными машинами, которые, в свою очередь, разворачиваются в набор молекул, нанотрубок, других деталей и взаимосвязей между ними. Для облегчения работы с языком *panoML* и создана программа *NanoXplorer*, позволяющая создавать модели наноустройств по примеру программы AutoCAD. Различия, разумеется, есть, однако проектировать наноустройства в программе **NanoXplorer** гораздо легче, чем, например, в Chem 3D, которая ограничивается моделированием отдельных узлов наномашин.

Установив программу на своем компьютере, пользователь получает доступ к всемирной базе данных наноструктур. С ее помощью можно использовать в своей разработке уже созданные модели наноподшипников, валов, компьютеров, двигателей, манипуляторов и пр. С другой стороны, создав свою собственную структуру, можно через Internet загрузить ее в базу данных для использования такими же изобретателями. Таким

образом, база данных постоянно пополняется новыми моделями наноструктур.

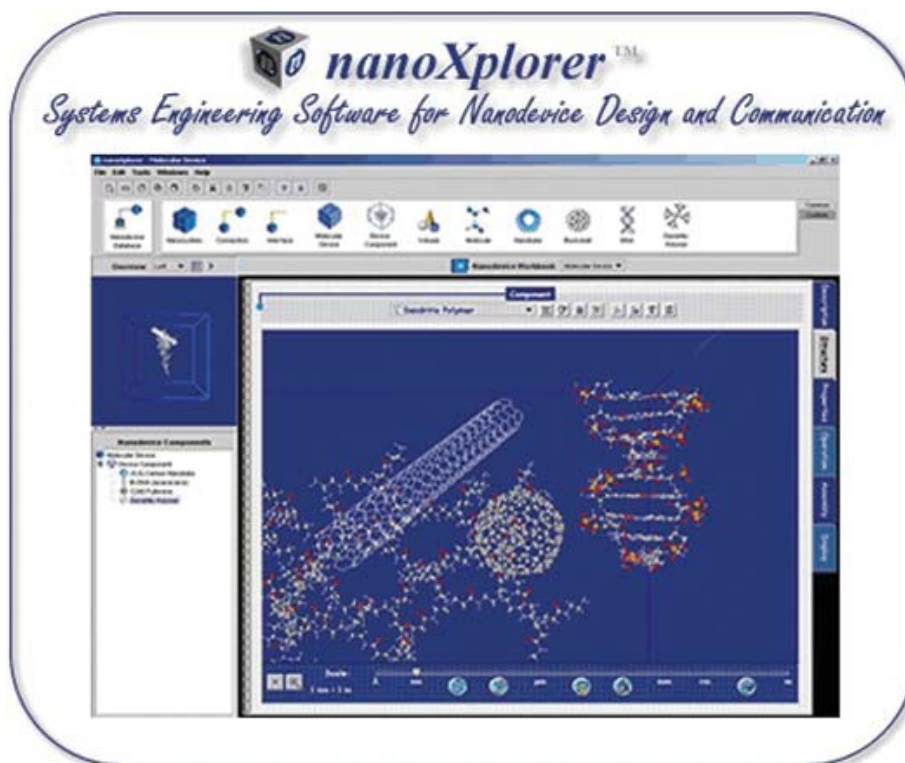


Рис 159. Интерфейс программы NanoXplorer

С помощью программы можно создать разнообразные модели: от биочипов и искусственных энзимов до нанороботов.



Рис 160. Панель инструментов NanoXplorer

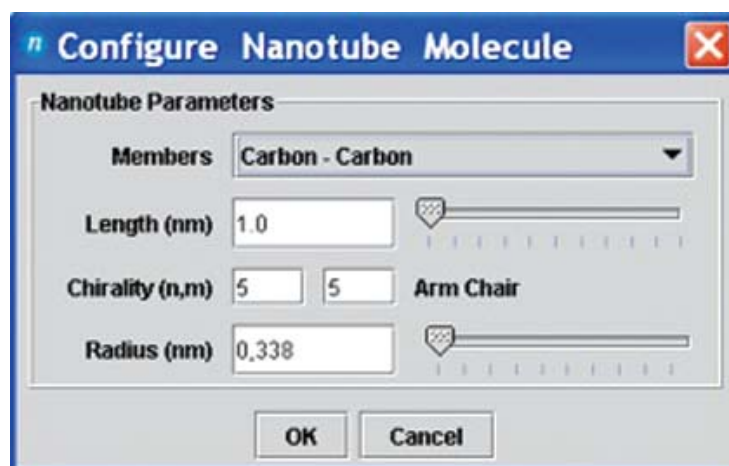


Рис 161. Настройка свойств нанотрубки в NanoXplorer

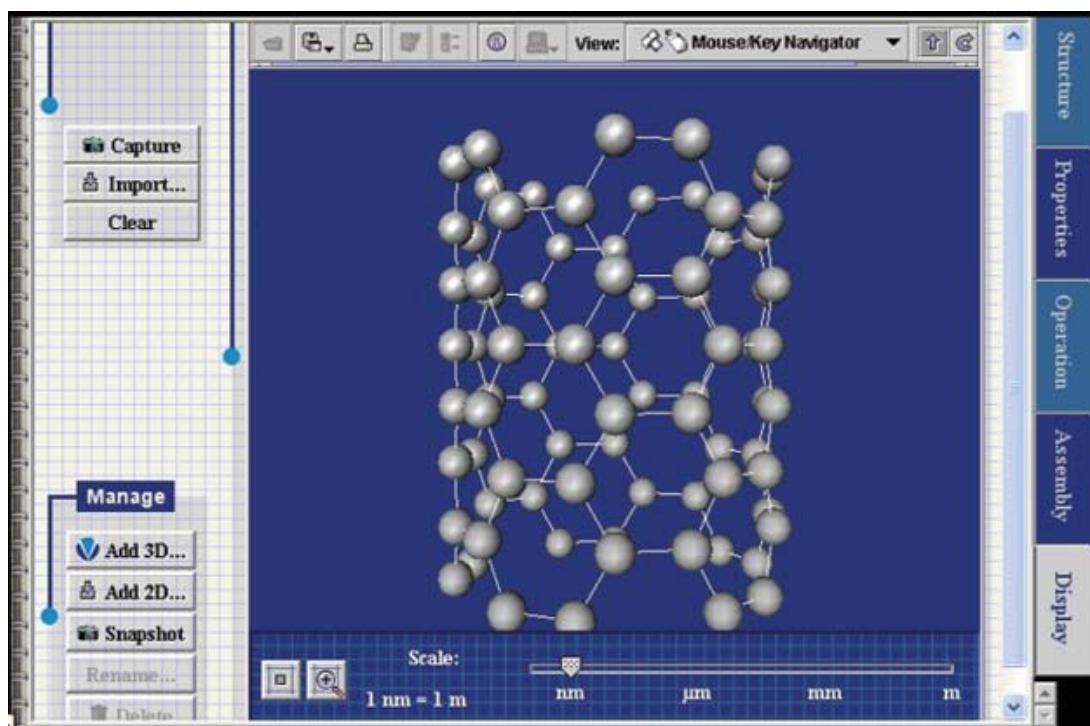


Рис 162. Просмотр полученной нанотрубки

С помощью программы NanoXplorer разработано уже немало сложных и функциональных наносистем (см. рисунок 163).

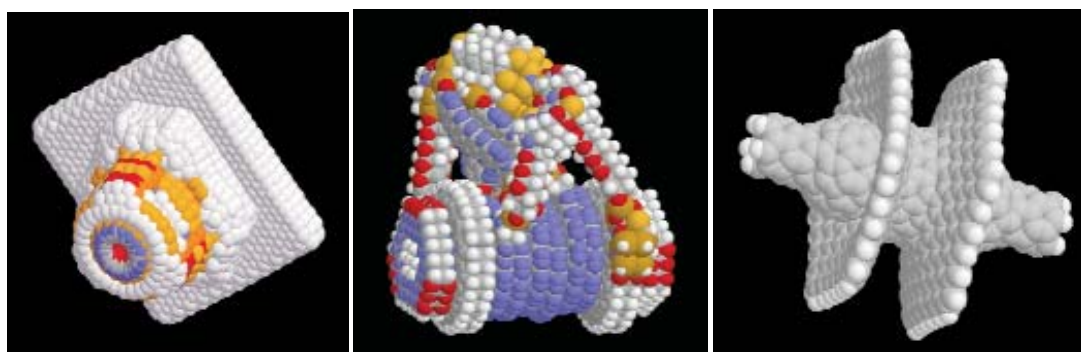


Рис 163. Модели наносистем: а) нанодатчик для атомов Ne, б) наноманипулятор, в) наноподшипник из углерода

Прогресс компьютерного моделирования наноструктур очень сильно зависит от мощности имеющихся компьютеров и эффективности вычислительных алгоритмов. Чем мощнее компьютер и чем оптимальнее его программа, тем более сложную наносистему можно спроектировать. Поскольку, согласно закону Мура, производительность компьютеров со временем растет экспоненциально, с каждым годом ученым становятся доступны все новые и новые возможности. Достижения нанoeлектроники, основанной на точных компьютерных моделях квантовых явлений, позволят создать еще более мощные

компьютеры, способные быстро рассчитывать сверхсложные наносистемы, например, нанороботов из миллиардов атомов.

Сегодня, чтобы смоделировать несколько атомов, компьютер перегоняет миллиард раз в секунду невероятные количества электронов по запутанным и гигантским (с точки зрения нанотехнолога) лабиринтам макроскопических микросхем. Совершенно нелепо для расчета нескольких атомов бросаться триллионами электронов. Поэтому в квантовых компьютерах будущего квантовые процессы будут моделировать сами себя.

Механосинтез и нанофабрика

В последнее время бурное развитие электронной, атомно-силовой и туннельной микроскопии, равно как и развитие информационных технологий, привело к тому, что сегодня наблюдения за поведением отдельных атомов стали доступны широкому кругу исследователей.

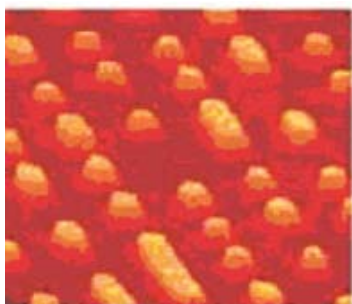
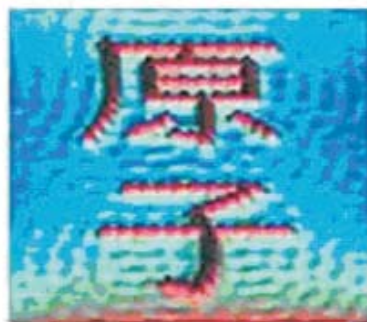


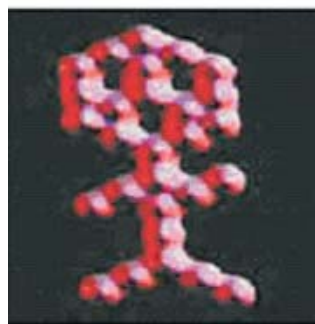
Рис 164. Рельеф CD-ROMа, атомарное разрешение

На рисунке изображена поверхность CD-ROM диска с атомарным разрешением — продукт современной визуализации нанообъектов.

Кроме того, современная прецизионная техника позволяет не только визуализировать отдельные атомы, но даже манипулировать ими — катать по поверхности, переставлять с места на место и т.д. Об успехах в этом направлении говорит популярность так называемой “нанолитографии” — выкладывания из атомов различных “рисунков” на поверхности подложки. На рисунках представлены несколько примеров подобного “нанорисования”.



а)



б)

Рис 165. а) иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди, б) “пляшущий человечек” выложенный молекулами СО

Выкладывать по подложке различные “атомные рисунки”, конечно, интересно, но имеет ли это какой-нибудь практический смысл? Ведь одна из главных идей нанотехнологии состоит в том, чтобы производить обычные, необходимые человеку вещи, такие как еда, одежда, мебель, оргтехника и т.п., но улучшенного качества и из простого сырья.

Поэтому, несмотря на успехи микроскопии, до настоящей нанотехнологии, в том виде, в котором её описывал Дрекслер, сканирующим методам еще далеко. Согласитесь, сложно представить себе массовое производство какого-нибудь продукта, основанное на работе сканирующего микроскопа, поатомно собирающего каждый предмет. Даже если мы будем размещать атомы со скоростью один атом в секунду (что соответствует скорости современных нанотехнологических установок), то сборка малюсенькой батареечки для наручных часов заняло бы более 10^{17} лет, что в десять миллионов раз превышает возраст нашей Вселенной!

Конечно, при виде подобных чисел может показаться, что нанотехнология по Дрекслеру невозможна в принципе. Но ведь это происходит только оттого, что мы подходим к ней с привычной для нас точки зрения: измеряем расстояние и время в макроскопических величинах — метрах и секундах.

Но в наном мире действуют совсем иные величины: миллиардные доли метра и миллиардные доли секунды. Если бы мы были нанометровыми человечками, то вращение сверла бормашины в зубном кабинете казалось бы нам таким же медленным, как обычному человеку — вращение Земли вокруг Солнца. А ведь Земля вращается не так уж и медленно — 30 км/с! А за то время, пока обычный человек успел бы моргнуть своим “громадным” глазом, мы бы успели основать и построить наноскопический Санкт-Петербург, такой же, как тот, на сооружение которого у обычных людей ушло около 300 лет!

Таким образом, нанометровые инструменты и манипуляторы, в отличие от современных макроскопических, могли бы быть очень быстрыми. Если движение большой и тяжелой “руки” макроскопического робота-сборщика занимает секунды и тратит киловатты энергии, то наноробот способен перебирать своими “ручонками” за миллиардные доли секунды, затрачивая всего лишь миллиардные доли ватт. Кроме того, промыш-

ленная установка весом всего 1 грамм, как показывают расчеты, может иметь более 10^{17} наноманипуляторов. С помощью такой установки те же батарейки, которые при макроскопическом подходе нереально собрать из атомов, можно будет “штамповать” десятками тысяч штук в секунду!

Возможность производить любую вещь по желанию ее владельца издревле будоражила умы людей. Вспомните хотя бы мечты алхимиков о философском камне. И вот в конце XX века, имея за плечами более основательный багаж знаний о природе, чем в Средние века, человечество вновь возвращается к своей древней мечте, предлагая в качестве подобной “скатерти-самобранки” идею нанофабрики — небольшой установки, способной на молекулярном уровне создавать различные предметы.

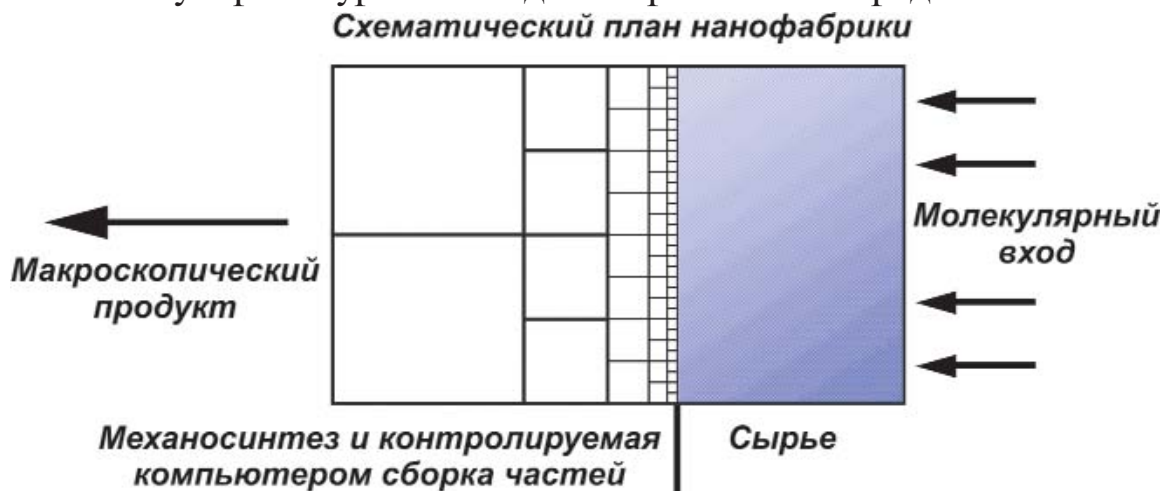


Рис 166. Схема процесса сборки продукции в нанофабрике

Впервые о подобной нанофабрике упоминал еще основатель нанотехнологии Э. Дрекслер. Впоследствии другими учеными было предложено огромное количество проектов молекулярной нанофабрики, среди которых наибольшую популярность получили проекты, основанные на конвергентной и параллельной сборке.

Идея *конвергентной сборки* принадлежит Крису Фениксу — директору Центра ответственных нанотехнологий CRN (Center For Responsible Nanotechnology, США). Ее суть заключается в том, что конечный продукт составляется из маленьких кубиков, последовательно объединяющихся во все более крупные “строительные блоки”. Весь процесс осуществляется с помощью так называемых *фабрикаторов*, способных захватывать отдельный блок, перетаскивать его в нужное место и соединять химическими связями с другими.

Фабрикатор, являясь ключевым устройством нанофабрики, представляет собой управляемое устройство, способное комбинировать атомы друг с другом, создавая различные химические связи между ними. Фактически, фабрикатр — это наноманипулятор, связанный с компьютером и линией доставки сырья. В отличие от мобильного наноробота-ассемблера он неподвижен и привязан к какой-либо основе.

Итак, процесс конвергентной сборки выглядит следующим образом: сначала самые маленькие фабрикатры создают из атомов элементарные “кирпичики”. Затем фабрикатры побольше берут эти “кирпичики” и соединяют их друг с другом в более крупные блоки. Эти блоки, в свою очередь, также соединяются между собой фабрикатрами третьего уровня и т.д. Весь процесс повторяется до тех пор, пока необходимый продукт с заданной пользователем формой, структурой, размерами и пр. не будет собран полностью.

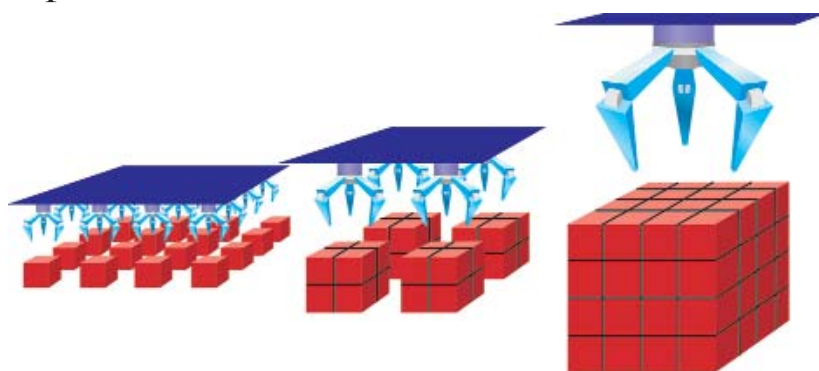


Рис 167.Схема конвергентной сборки

Весь процесс напоминает роботизированную сборку изделия на обычной фабрике. За счет того, что сборка на самом деле происходит не поатомно, а все возрастающими блоками, время производства конечного продукта не выходит за рамки разумного.

Суть *параллельной сборки* еще проще: матрица из множества одинаковых наноманипуляторов, работающих одновременно, создает необходимый предмет, как бы наращивая его слой за слоем.

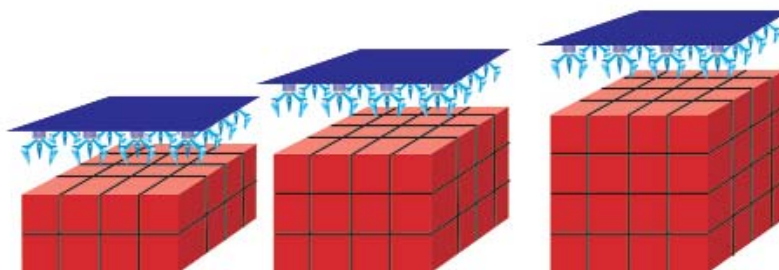


Рис 168. Схема параллельной сборки

Если мы хотим произвести продукт высотой 1 мм, это потребует укладки 100 тысяч атомных слоев. Если один сборщик будет обслуживать поверхность около 5000 атомов и укладывать 4 слоя в секунду, сборка полного продукта займет несколько часов. Таким образом, скорость работы сборщиков должна быть не меньше 20.000 атомов в секунду. Конечно, ломать - не строить, но, как мы уже писали, современный атомный томограф разбирает поверхность с такой же скоростью, успевая записывать параметры каждого атома.

Предполагается, что первые примитивные нанофабрики смогут строить предметы на основе *алмазоида*, благодаря относительной легкости образования ковалентных связей между атомами углерода. Теоретические расчеты показывают, что создание алмазоидных поверхностей и структур методами механо-синтеза вполне осуществимо. Необходимо только иметь поатомное описание вещи, которую надо собрать (оно должно включать как взаимное расположение атомов и их типы, так и химические связи между атомами).

Чтобы выпускать продукт в больших количествах, производство должно быть автоматизировано и поставлено на поток. Если на сегодняшний день НЭМС-системы изготавливаются долго и с большим трудом, то нанофабрика значительно облегчит их производство и тиражирование. Также нанофабрика сможет делать свои копии, т.е. реплицироваться.

Ну а как же сделать саму нанофабрику, состоящую из триллионов отдельных фабрикаторов? Построить нанофабрику с помощью одного фабрикатора будет сложновато. Скорее всего, несколько фабрикаторов объединят в блоки мини-фабрик, которые соберут фабрику побольше, и так до тех пор, пока это производство не достигнет макроскопического уровня. Результатом этого “производственного роста” и будет искомая нанофабрика.

На первый взгляд идея саморепликации механизмов, пусть даже молекулярных, вызывает некоторое недоверие — как такое возможно? Но природа создала множество разнообразных «репликаторов» (ДНК, вирусы, животные), а последние исследования НАСА (Национального аэрокосмического агентства США) показали, что искусственные машины, делающие свои копии, могут быть не сложнее, чем существующий чип Pentium IV. Компания General Dynamics совместно с НАСА провела иссле-

дования возможности постройки реплицирующихся клеточных автоматов. Математическое моделирование этих систем продемонстрировало возможность постройки репликаторов вообще и нанорепликаторов в частности.

Интерес НАСА к репликаторам объясняется просто: для освоения Луны и тем более Марса потребуется огромное количество оборудования и рабочих рук — даже больше, чем люди использовали для освоения Земли (другие планеты ведь надо еще терраформировать — переделать атмосферу, построить дороги и т.п.). Запускать туда миллионы космических кораблей с миллиардами тонн грузов нереально и дорого. Зато небольшая команда макроскопических роботов-репликаторов весом всего 20 тонн сможет размножиться и самостоятельно построить все необходимые рудники, электростанции, заводы и фабрики. Для участия в этом проекте НАСА, кстати, пригласила Роберта Фрайтаса — известного специалиста по нанороботам. А самих репликаторов придумал в 1960-х основатель кибернетики фон Нейман, правда, только в теории — тогда никто не ожидал, что вскоре они вплотную приблизятся к реальности. По предварительным расчетам, построение первого репликатора займет около 10-15 лет.

Нанофабрика будет иметь блочную конструкцию, чтобы можно было легко сделать ее копию с помощью другой нанофабрики. Блочная система также будет удобна для производства различных компонентов НЭМС-систем, нанокomпьютеров и нанороботов. Каждый фабрикатор должен быть способен произвести наноблок размерами 200x200x200 нанометров. Эта структура принимается К. Фениксом как элементарный “кирпичик” нанофабрики. Подобный наноблок может содержать нанокomпьютер (механический или квантовый) или системы привода нанофабрики, генераторы, части конвейеров и наноманипуляторов. Для изготовления одного такого наноблока фабрикатору понадобится несколько часов. По теоретическим расчетам Криса Феникса, одна готовая нанофабрика сможет всего за два дня произвести свою точную копию. На первый взгляд — долго. Но посмотрим, сколько понадобится дней, чтобы каждый житель земли получил в подарок по нанофабрике, при условии, что каждая вновь произведенная фабрика начинает в тот же момент строить свои копии:

День	Количество произведенных нанофабрик	
1-й	1	одна
3-й	2	
5-й	4	
7-й	8	
9-й	16	
11-й	32	
13-й	64	
15-й	128	
17-й	256	
19-й	512	
21-й	1024	тысяча
23-й	2048	
25-й	4096	
27-й	8192	
29-й	16384	
31-й	32768	
33-й	65536	
35-й	131072	
37-й	262144	
39-й	524288	
41-й	1048576	миллион
43-й	2097152	
45-й	4194304	
47-й	8388608	
49-й	16777216	
51-й	33554432	
53-й	67108864	
55-й	134217728	
57-й	268435456	
59-й	536870912	
61-й	1073741824	миллиард
...	...	...

Табл 9. Скорость размножения нанофабрик

Вот и получается, что через пару месяцев после начала репликации у всех жителей Земли будет по нанофабрике. Плохо это или хорошо — пока неизвестно, ясно одно: технология эта

разработана таким образом, чтобы производить максимальное количество продукции за короткий срок.

Функциональные блоки нанофабрики

Нанофабрике потребуется серьезная *система охлаждения* — ведь плотность ее мощности велика (для нанофабрики размерами 0,5х0,5х0,5 м номинальная мощность составит около 200 КВт). Поэтому ее архитектурой предусмотрена система охлаждения внешней оболочки и макроузловых сборок с высоким давлением, которая далее разветвляется на охлаждение среднего давления (в промежуточных стадиях сборки) и на систему низкого давления (для охлаждения отдельных наноблоков с фабрикаторами).

Кроме того, предполагается обеспечение нанофабрики *системой связи* с центральным компьютером, а также *системой транспортировки* готовой продукции. Специальный *сортiroвочный ротор* будет выбирать из поступающего сырьевого материала лишь те атомы и молекулы, которые необходимы для каждой конкретной операции, для гарантии ее точной, бездефектной и безаварийной работы и т.д. Большинство таких блоков могут быть реализованы в виде МЭМС- и НЭМС-устройств.

С одной стороны к нанофабрике будут присоединены баллоны с сырьем - молекулами и атомами, а также охладителем. С другой - интегрированный CAD-интерфейс для проектирования продукта. Представьте себе, что к вашему ноутбуку присоединили небольшой ящик размерами 0,5х0,5х0,5 м. Далее на компьютере запускают программу типа 3D MAX и предлагают вам что-нибудь нарисовать. Например, стеклянный шар. Вы рисуете его, указывая тип стекла, его характеристики, цвет, плотность и пр. и, в результате из ящичка выходит нарисованный вами шар. Теперь вы изменяете тип материала, из которого изготовлен шар, на, например, “свинину”, и из ящичка через некоторое время выпадает идеально круглый шар из свинины...

Однако зачем делать шарики из свинины? Нарисуем лучше руку робота из алмазоида размерами менее 1 мкм с помощью стандартных инструментов, и присоединим ее к нашему шару (только размерами поменьше, скажем, 1 мкм), оснастив его механокомпьютером (тоже стандартным инструментом) и добавив “батарейки”. Все, наноробот готов! Зададим в управляю-

щей программе количество побольше, и из ящичка выйдет серия таких нанороботов (правда, вряд ли их можно будет увидеть невооруженным глазом). Или же нажав на фабрике кнопку “replicate”, мы через два дня получим копию нанофабрики.



Рис 169. Вид нанофабрики в представлении художника

Итак, что мы имеем? Алмазная фабрика размером с монитор может выпускать продукт размером 10*10*10 см и весить 4 килограмма. Производственный процесс займет около 3 часов. При этом продукт будет иметь упорядоченную структуру вплоть до атома. Репликация подобной фабрики займет около двух дней. При этом стоимость продукта будет зависеть только от стоимости сырья, из которого изготовлены продукты. Мощность фабрики составляет около 200 кВт. Фабрика полностью автоматизирована и будет соединяться с персональным компьютером, образуя производственный комплекс.

Человек-оператор сможет создавать различные продукты в специальной САПР, подобно тому, как сегодня создают чертежи деталей машин. Фабрика повторит конструкцию с точностью до атома. Такая фабрика благодаря своим размерам может стать основой производственного комплекса любого частного лица. Столь мощного орудия производства у человечества еще не было, и с его появлением производственный процесс сведется к разработке самого продукта или скачиванию его чертежей из Интернета. Вероятно, в квартирах будущего вместо

холодильников будут стоять нанофабрики, специализированные под производство продуктов питания и изысканных деликатесных блюд, а в мире будет ходить информационная валюта, с помощью которой можно будет купить файлы с новыми продуктами, предметами и пр.

Не забудем и про спам! Толпы рекламных существ и механизмов, вылезающих из нанофабрик, подключенных к всемирной товарообменной сети, станут будить вас каждое утро. Зато друзья всегда смогут переслать вам не только фотографии, из нового путешествия, но и вполне реальные сувениры.

Мечты мечтами, но прежде чем построить первую нанофабрику, человек должен сначала научиться создавать ее мельчайшие детали — наноманипуляторы, с помощью которых фабриктор мог бы захватывать отдельный атом, удерживать его, отрывать из одного места и присоединять к другому. Напоминаем, что процесс образования или разрыва химической связи таким механическим способом традиционно называется *механосинтезом*.

Но как это осуществить? Каким образом манипулятор сможет захватить и удержать атом? “Приклеить” его в нужное место?

Ответ прост. Мы знаем, что атомы “приклеиваются” друг к другу посредством химической связи. Значит, для того, чтобы захватить и удержать отдельный атом, манипулятору придется образовать с ним химическую связь некоторого типа. Добавление нового атома в нужное место потребует точно такого же “приклеивания” атома к собираемому предмету посредством химической связи, но более прочной, чем связь, удерживающая атом на манипуляторе.

Разработка такого манипулятора — главная цель всей современной нанотехнологии, на сегодняшний момент, к сожалению, никем не реализованная. Однако существуют теоретические проекты различных



Рис. 170. Рекламный киберспаммер

инструментов механосинтеза, несомненно, заслуживающих внимания. Рассмотрим некоторые из них.

Вспомните, что представляет собой структура любой алмазоидной конструкции: не что иное, как решетку из атомов углерода, соединенных с четырьмя другими атомами ковалентной связью.

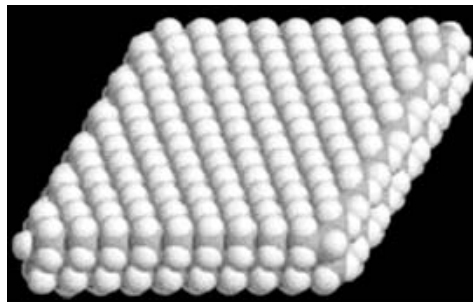


Рис 171. Модель нанопленки из алмазоида

Стало быть, в качестве сырья для создания предметов из алмазоида могут выступать различные углеводороды (вещества, молекулы которых состоят из атомов углерода и водорода), широко распространенные в природе и промышленности. Примером углеводородов могут служить, например, метан (CH_4), бензол (C_6H_6), ацетилен (C_2H_2) и пр.

Поэтому, во-первых, необходим инструмент, который служит для отщепления от молекулы атома водорода. Такой инструмент был предложен Э. Дрекслером.

“Инструмент Дрекслера” представляет собой “хваталку”, держащую на конце атом углерода со свободной ковалентной связью. Когда инструмент приближается к нужной молекуле на расстояние приблизительно 10,8 нм, атом водорода сразу присоединяется к нему, едва “почув” рядом возможность образовать ковалентную связь с углеродом.

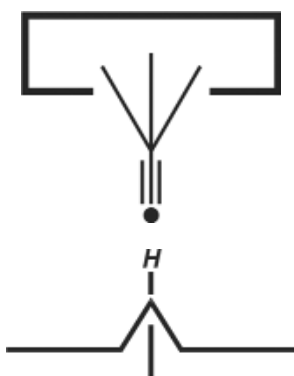


Рис 172. Инструмент Дрекслера

Отщепив водород от молекулы или поверхности, мы, тем самым, наделяем ее саму реакционной способностью. Если рабочая зона находится в вакууме, то на место водорода можно механически присоединить другой атом или молекулу, от которой также оторвали водород.

Если же в момент отщепления водорода в рабочей зоне нанофабрики находится в свободном состоянии какое-нибудь вещество, способное к реакции с углеродом, оно быстро займет место удаленного водорода. Наполнив рабочую зону углеродсодержащими парами, можно легко синтезировать алмазоидные структуры, вот так отщепляя от алмазной пленки водород в нужных местах.

Антиподом инструмента Дрекслера является “*инструмент присоединения водорода*”, сконструированный так, чтобы атом водорода, слабо прикрепленный к его концу, мог легко вступить во взаимодействие с химически активной молекулой или поверхностью. Чтобы связь была достаточной слабой, водород прикрепляется к атому олова (Sn).

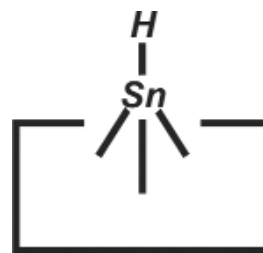


Рис 173. Инструмент присоединения водорода

Чтобы строить собственно алмазоидную поверхность, необходим инструмент, способный присоединять к ней атомы углерода. За это отвечает “*инструмент Фрайтаса*”, который может точно прикрепить димер C–C к синтезируемой поверхности и затем отсоединиться от нее. Инструмент спроектирован так, чтобы к нему димер прикреплялся относительно слабо и обладал высокой реакционной способностью. Захватывающим концом инструмента могут быть атомы Si, Ge, Sn, Pb (в порядке ослабления связей с углеродом). Эти атомы удерживаются под большим углом алмазоидными держателями. Инструменты, содержащие переходные металлы, могут быть полезны как катализаторы различных реакций.

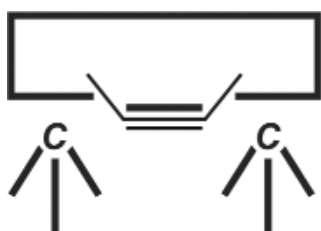


Рис 174. Инструмент Фрайтаса

Атомы удерживаются под большим углом алмазоидными держателями. Инструменты, содержащие переходные металлы, могут быть полезны как катализаторы различных реакций.

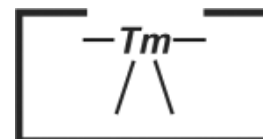


Рис 175. Инструмент-катализатор

“*Инструменты Меркле*” – свободные радикалы C, Si и Sn и инструмент со свободной двойной углеродной связью, предназначенные для выполнения различных вспомогательных операций.

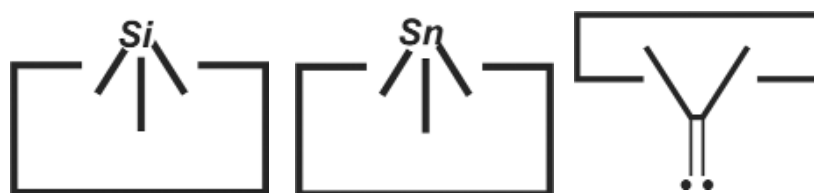


Рис 176. Вспомогательные инструменты

Инструменты присоединения функциональных групп. Существует великое множество таких групп, например, –ОН, –СООН, –СОО–, –Сl, –NH₂ и т.п., способных сильно влиять на функциональность продукта. Каждая из них может быть с одной или нескольких сторон химически присоединена к углеродным каркасам, образуя, соответственно, функциональ-

ные поверхностные структуры и соединительные перемычки. Необходимость создания таких инструментов объясняется, отчасти и тем, что без некоторых функциональных групп может оказаться невозможным ни создание наноактюаторов, ни сложных наносистем. А ведь без этого невозможно создание и самой нанофабрики.

Кроме того, разрабатываются и другие интересные инструменты. Например, исследователи компании IBM модернизировали СТМ так, чтобы с его помощью отщеплять или присоединять к атомам отдельные электроны, что сразу влияет на их реакционную способность. Химики из Орегонского университета создали *хелатор* - молекулярные «крабовые клешни», которые захватывают отдельные атомы мышьяка.

Несмотря на то, что в настоящий момент пока не существует инструментов, способных так изящно манипулировать атомами, некоторые практические шаги в этом направлении все же сделаны. То и дело в новостных рассылках появляются сообщения об изобретении того или иного устройства, способного манипулировать если не единичными атомами и молекулами, то небольшими кластерами, что уже очень неплохо.

Одним из лидеров в этом направлении является компания Zyvex, которая уже на протяжении нескольких лет выпускает МЭМС-системы из четырех скоординированных между собой наноманипуляторов с тремя степенями свободы каждый, предназначенных для захвата, измерения, позиционирования и сборки микро- и наноразмерных образцов. Устройство обеспечивает как грубое позиционирование каждого манипулятора на 12 мм по всем трем осям с разрешением 100 нм, так и точное



Рис 177. Наноманипулятор фирмы Zyvex*

позиционирование с разрешением менее 5 нм. Манипуляторы представляют собой микропинцеты различной конфигурации, обеспечивающие микросборку, манипуляцию и анализ частиц размером до 500 нм.

Применяются такие устройства в основном при разработках в области энергетики, мате-

* Перепечатано с www.zyvex.com

риаловедения, изучении поверхностей, в электронике, биотехнологии и т.д. Современные нано-манипуляторы — это сложные механизмы, довольно большие и тяжёлые (даром, что носят приставку «нано»), а главное, очень дорогие — десятки тысяч долларов.

Вот если бы удалось создать аналог с более умеренной ценой, то, представьте, сколько небольших лабораторий, компаний и изобретателей смогли бы попробовать свои силы в нанотехнологиях. Именно об этом думает профессор Массачусетского технологического института Мартин Калпеппер, собравший наноманипулятор *HexFlex* почти что из подручных материалов.

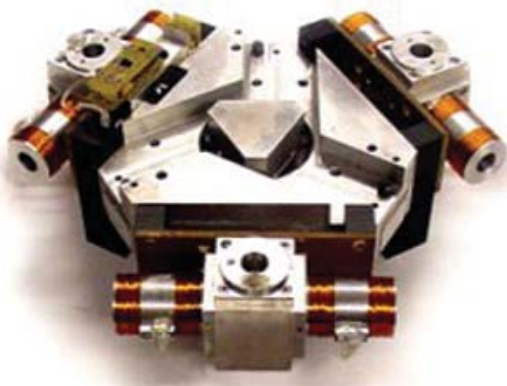


Рис 178 Наноманипулятор Калпеппера*

Его манипуляторы просты (но эта та простота, для достижения которой потребовалось много бессонных ночей), компактны и дешёвы, а изготовить их легко без применения каких-либо «супернавороченных» технологий. Упрощение конструкции позволило умельцу создать самый маленький в мире наноманипулятор — диаметром менее миллиметра.

Но использование механических наноманипуляторов для оперирования атомами и наноструктурами — не самый изящный вариант. Вспомним, что в квантовом мире волны столь же осязаемы, как частицы, и сразу на ум приходит идея манипуляторов, состоящих из... света.

Исторически первенство в оптическом манипулировании атомами принадлежит отечественным ученым. Метод “микроуправления светом” был впервые применен в 1979 году советскими физиками под руководством Владилена Летохова из Института спектроскопии, которые сумели затормозить атомы натрия с помощью пучка света. В 1986 году американские исследователи из компании Bell продемонстрировали действие так называемого “оптического пинцета”.

Когда лазерный пучок неоднороден, частица втягивается в область наибольшей яркости излучения — как шарик скатывается в низину. Это происходит потому, что при изменении нап-

* Перепечатано с <http://psdam.mit.edu>

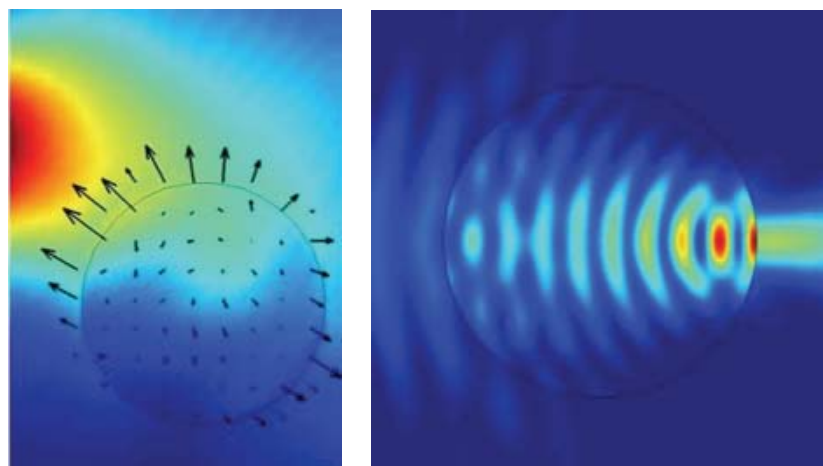


Рис 179. Оптический наноманипулятор

равления потока фотонов (обладающего, как и все квантовые частицы, импульсом) возникает сила, сдвигающая пойманную частицу. Перемещая фокус луча, можно передвигать “пойманные” нанообъекты или даже выстраивать из них разнообразные конструкции.

Лазерные лучи, гораздо более нежные чем механические «лапы» обычных манипуляторов, охотно применяют биологи для захвата клеток, молекул ДНК, хромосом и т.п.

В последнее время были созданы еще более замечательные оптические инструменты. Применяя специально подобранные линзы, инженеры формируют лучи с заданными свойствами — так называемые *Бесселевы пучки*. Силы в них действуют вдоль луча или с вращением вокруг его оси. Захватывая нанообъекты, эти пучки способны двигать их вдоль луча или вращать. В Самарском Институте систем обработки изображений группа под руководством Виктора Сойфера использовала пучки Бесселя, лазерный луч в которых закручивался в спираль при помощи специальных линз — дифракционно-оптических элементов. Используя всего один такой элемент, удалось захватить, пере-

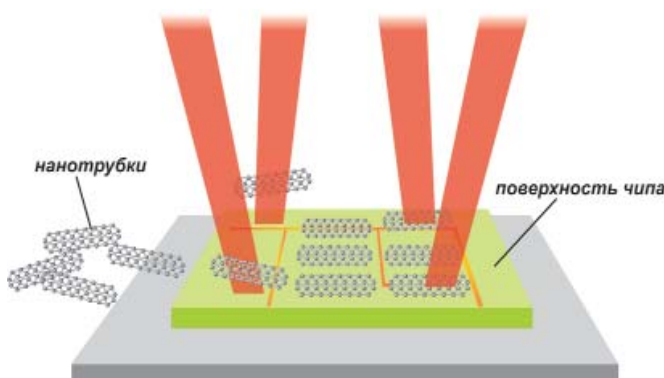


Рис 180. Лазерная манипуляция нанотрубками

мещать и медленно вращать микроорганизмы дрожжей диаметром 5–10 микрон и частицы полистирола. Ученые надеются, что при помощи этих технологий смогут работать приводы в наномеханизмах будущего.

Тем временем американская военная компания Argux создала специальный жидкий кристалл, разделяющий лазерный луч на 200 отдельно управляемых лучиков, каждый из которых может манипулировать нанообъектами. С помощью этой системы уже удалось аккуратно размещать нанотрубки на поверхности чипа, что позволит строить сверхбыстрые наночипы.

Мы не раз уже говорили о сходстве природных и искусственных наномашин. Раз они так похожи, то почему бы не пойти в создании наноманипуляторов еще одним путем: поймать каких-нибудь микробов и привлечь к труду — например, сборке нанодеталей. Именно к этому стремится американский ученый Роберт Хэймерс. Он уже научился манипулировать живыми бактериями с помощью электромагнитного поля.

В опыте участвовали бактерии *Bacillus mycoides*. Они имеют форму прутка длиной 5 микронов и диаметром 800 нанометров. Бактерии поместили в водно-глицериновый раствор, покрывающий кремниевый чип. На золотые электроды подали переменное напряжение с частотой 1 МГц. В результате бактерии выстроились вдоль силовых линий электрического поля, касаясь с двух сторон электродов. Микроорганизмы послужили своего рода нанопроводниками, пропуская небольшой ток, с помощью которого исследователи установили их месторасположение. Затем, создав медленный ток жидкости, исследователи смогли перемещать бактерии вдоль электродов.

Хэймерс предлагает использовать бактерий для перемещения и сборки нанодеталей - квантовых точек, нанотрубок, наночастиц. На детали наномашин планируется наносить белковые маркеры, комплементарные (взаимно соответствующие) маркерам на поверхности микроорганизмов. Затем бактерии перемещают в нужные места и осуществляют сборку.

Преодоление проблемы массового производства наноструктур

Камнем преткновения нанотехнологии, основанной на зондовых методах, является невозможность организации массового производства высокотехнологичных товаров. Результаты, демонстрирующие потенциальные возможности нанотехнологии, уже достигнуты, но технологии массового производства тех же наноэлектронных схем (подобно планарной крем-

ниевой) как таковой не существует. Конечно, нанофабрика решила бы эту проблему в два счета, однако до ее создания, по видимому, еще очень далеко. Тем не менее, уже сейчас развивается множество перспективных направлений массового производства наноструктур.

Электроосаждение

Группе российских ученых из МГУ под руководством Галины Цирлиной удалось разработать весьма любопытный способ получения наноструктур, пригодный для их массового промышленного производства. Наноструктуры здесь получают при комнатной температуре электроосаждением нанокристаллов различных оксидов.

Электроосаждение — очень простой процесс: ионы оксидов металлов в растворе электролита оседают на заряженный электрод под действием тока. Управляя изменениями тока во время осаждения, можно манипулировать ростом оксидов и получать нанокристаллы разной формы и структуры.

А ведь существует так много разных оксидов! Например, из оксидов рутения этим методом можно получить сверхъёмкие конденсаторы удельной ёмкостью 100 Ф/г — в сто тысяч раз больше, чем у конденсаторов в обычной лампе дневного света! Чего уж говорить о таких наноконденсаторах, чтобы сдвинуть с места огромный корабль или поразить его молнией.

Из оксидов вольфрама осаждают электрохимические сенсоры, чутко реагирующие на малейшее содержание нитратов (то есть можно выбирать экологически чистую репку на рынке), устройства электрохимической энергетики (помните мощный взрыв, вызванный маленькой топливной ячейкой из “Терминатора III”?).

Осаждая поочередно слои оксидов двух разных металлов, получают биметаллический нанокompозит для устройств магнитной записи или электрохромные (меняющие цвет под действием тока) устройства. Более того, осаждением наноксидов нашим ученым удалось получить сверхтонкий высокотемпературный сверхпроводник.

Мягкая литография

Обычная фотолитография прекрасно зарекомендовала себя в случае, когда необходимо разместить как можно большее ко-

личество элементов на маленькой площади полупроводникового кристалла. Однако она совершенно не подходит для случаев, когда те же элементы нужно разместить по большой площади, на иных материалах или не на плоских поверхностях.

Технология размещения наноструктур на любых поверхностях, названа “мягкой литографией”. Она не требовательна к качеству и форме подложки, а потому применять её можно для неровных и гибких поверхностей и даже объёмных фигур.

В качестве примера, демонстрирующего возможности новой технологии, исследователи из Иллинойского университета (США) показывают полусферу, покрытую матрицей фоточувствительных транзисторов и способную сыграть роль основного элемента для широкоугольного цифрового фотоаппарата.

Делают ее так: сперва на выбранную поверхность наносят тонкие плёнки алюминия, кремния и нитрида кремния. Потом поверхность нагревают и методами зондовой микроскопии “рисуют” на ней определенную наноструктуру с характерными размерами в десятки нм. Затем штампуют ею мягкую полимерную матрицу, которую потом подвергают облучению для затвердения.

Минимальные размеры элементов, создаваемых этим способом, составляют около 10 нм, что позволяет, в принципе, осуществлять очень плотную запись, но производительность и надежность оставляют желать лучшего. Тем не менее, мягкую литографию ждёт большое будущее.

Рисование и печать

Очень удобный способ нанесения наноструктур на поверхности предложила компания NanoInk, выпускающая самые маленькие авторучки на Земле. Точки, линии и буквы, выходящие из-под их “пера”, примерно в десять тысяч раз меньше тех, что создаются с помощью обычной шариковой ручки. Но в отличие от макроскопических “коллег”, данная ручка представляет собой зонд АСМ с наконечником из нитрида кремния.

Когда АСМ используется по прямому назначению, возникает проблема: на наконечнике конденсируется влага из окружающего воздуха, что ухудшает качество измерений. Оказалось, частицы воды в образующейся капельке постоянно движутся — от наконечника к поверхности и наоборот. Это свойство решили использовать для перемещения вместе с водой мо-

лекул “чернил”. Меняя уровень влажности в приборе, задают размер капельки и ширину линии. Ширина линий составила всего несколько десятков молекул, а толщина - одну молекулу. Эту технологию окрестили “перьевой нанолитографией” (dip-pen nanolithography).

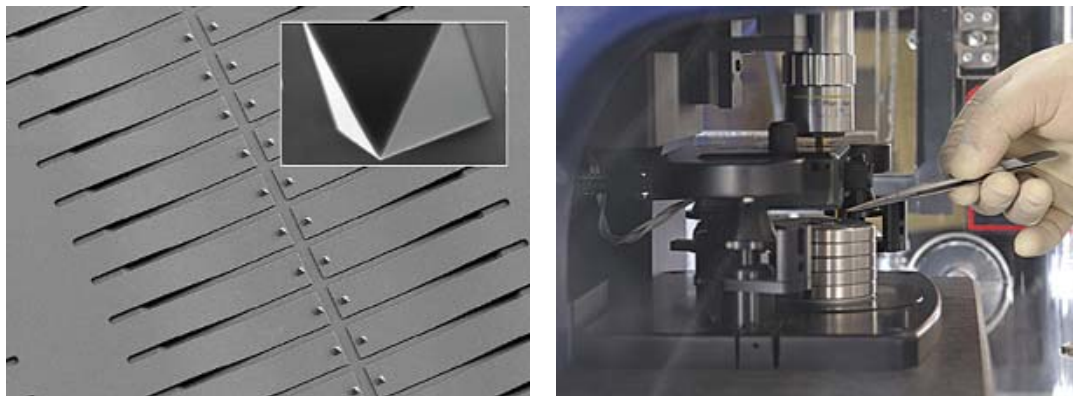


Рис 181. Система кантилеверов-«авторучек» и внешний вид установки DPN*

Перьевая нанолитография имеет много достоинств: в качестве “чернил” можно использовать все, что угодно, а писать можно на любой поверхности. “Атомная ручка” найдет применение в наноэлектронике: с ее помощью на площади в один квадратный дюйм можно прочертить до 1 млн. линий. Эксперты отмечают также относительную дешевизну устройства.

Авторучка — хорошо, а принтер лучше. Установки, содержащие матрицы управляемых зондов-авторучек (как в «многоножке») вполне могут пригодиться в серийном производстве наноэлектронных устройств. Обратите внимание, что, в отличие от обычной литографии, здесь не нужно трудоемкое изготовление фотошаблона, а значит, станки-«нанохудожники» смогут переключаться на производство все новых и новых наночипов сразу как только инженеры будут их разрабатывать. Таким образом, одна и та же фабрика сможет производить множество разных типов микросхем.

Биосинтез

Другой перспективный инструмент создания наноструктур — биологические наномашинны. Нэд Симэн из Нью-Йоркского университета уже создал из молекул ДНК “фабрику” по производству одного-единственного полимера. Размеры устройства составляют всего 110x30x2 нм. Оно состоит из двух

* Перепечатано с www.nanoink.net

наномашин, которые Нэд изобрел, скомбинировав определенным образом цепи молекул ДНК.

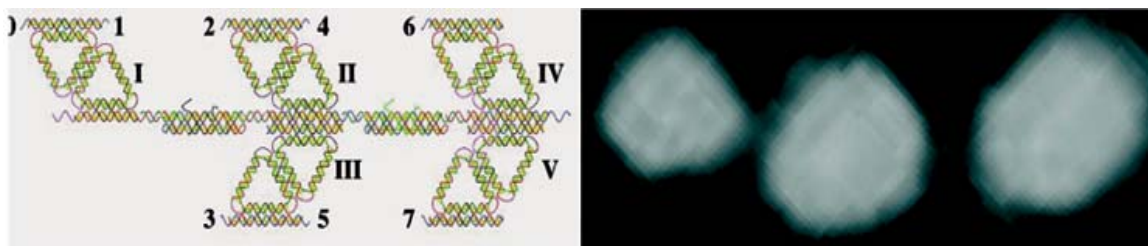


Рис. 182. Схема и АСМ-изображение ДНК-наномашин*

Ученые заставили эту наномашину работать, добавив в раствор, содержащий ее, фрагменты все той же ДНК. Машина тут же начала собирать из них полимер, повторяющий структуру первоначальной “фабрики”. Эта наномашина работает подобно информационной РНК, управляющей синтезом белковой цепочки в организме.

Ученые хотят со временем создать наномашину, работающую подобно рибосоме. “Главное применение будущей искусственной рибосоме будет в синтезе новых материалов по заданной последовательности, закодированной в ДНК, — говорит Симэн. — В конце концов, мы научимся делать полимеры и новые материалы в больших количествах и за малый промежуток времени благодаря ДНК-машинам”.

Итак, повторим еще раз!

- На пути познания природы огромную роль играют инструменты получения информации о ней.
- Оптический микроскоп состоит из двух систем линз — окуляра и объектива. Объектив создает первое увеличенное изображение объекта, которое затем увеличивается еще и окуляром. С помощью таких микроскопов можно получать увеличение до 1000 крат.
- Открытие оптической микроскопии привело к бурному развитию многих наук. Были обнаружены микроорганизмы, более полно изучена работа и строение организма, создана клеточная теория, согласно которой все живое на Земле состоит и развивается из одних и тех же клеток.
- Предельное разрешение микроскопа, согласно “принципу Рэля”, не может быть больше половины длины волны

* Перепечатано с www.nanotechweb.org

падающего на объект света. Поэтому с помощью оптического микроскопа невозможно изучать объекты меньше 150 нм. В связи с этим возникла идея заменить свет электронами (с длиной волны в сотни раз меньше, чем у фотонов).

- “Линзы” электронного микроскопа манипулируют пучком электронов подобно тому, как обычные линзы фокусируют и рассеивают световой поток. Разрешающая способность электронных микроскопов - единицы нанометров.

- Недостаток электронных микроскопов - необходимость работы в полном вакууме и разрушительное воздействие на биобъекты., что делает их непригодными для исследования в области биологии и биотехнологии.

- Этих недостатков лишены СЗМы, обеспечивающие атомарное разрешение. Наиболее популярны среди них туннельный, атомно-силовой и оптический ближнепольный микроскопы. Сегодня они являются основным аналитическим оборудованием нанотехнологов.

- К другим необходимым измерительным приборам относятся нановесы, спектрометры, наноинденторы, зондовые лаборатории и т.п.

- Чтобы создать любой нанообъект его сначала нужно детально смоделировать. Программы для моделирования наноструктур можно разделить на три группы:

- 1) *визуализационные* (показывают наноструктуры, но ничего не рассчитывают);

- 2) *вычислительные* (позволяют проектировать различные наноструктуры, используя методы математического моделирования и законы квантовой физики)

- 3) *инженерные* (позволяют разрабатывать наносистемы, описывать их на молекулярном уровне и определять основные электрические, оптические и физические свойства)

- Возможности компьютерного моделирования наноструктур напрямую зависят от мощности компьютеров и эффективности вычислительных алгоритмов.

- Камень преткновения современной нанотехнологии - невозможность массового производства высокотехнологичных продуктов. В связи с этим возник проект нанофабрики, создающей различные предметы: от одежды до оргтехники. Среди

вариантов нанофабрики наиболее популярны проекты конвергентной и параллельной наносборки.

- Основой работы нанофабрики является множество фабрикатов — управляемых устройств, способных комбинировать атомы, создавая между ними химические связи. По сути, фабрикат — это наноманипулятор, связанный с компьютером и линией доставки сырья. В отличие от мобильного наноробота-ассемблера, он неподвижен и привязан к подложке.

- Помимо нанофабрики, сегодня разработано большое множество альтернативных способов массового производства наноструктур. К ним относятся, например, электроосаждение, мягкая и перьевая нанолитография, биоисинтез и пр.

Глава 6. Биотехнологии и наномедицина

“В самом общем смысле, разница между понятиями «машина» и “живой организм” заключается в «искусственном» и «естественном», соответственно, их происхождении. Нанотехнологии показали возможность создания искусственных аналогов живых систем, управления естественными процессами и создания на основе живых объектов искусственных устройств. Поэтому разница между этими двумя понятиями уже не так очевидна”.

Лидия Соколовская

В вагонах метро можно увидеть зловещую рекламу Останкинского мясокомбината, которая гласит, что сей комбинат отказался от применения генетически модифицированного сырья. На плакате почему-то изображен спелый помидор, сквозь шкурку которого просвечивает... зародыш рыбы. Под этой жуткой картинкой огромными буквами кровавого цвета написано: «**РЫБА?!**» И ниже: «Возможная опасность: для повышения морозоустойчивости некоторых сортов томатов ученые добавили в них **рыбий ген!**». Видимо, реклама предлагает потребителю пораскинуть мозгами — мол, подумай, что тебе дороже: переплатить за килограмм колбасы или же съесть **рыбий ген**? Надо признать, художник постарался на славу — вся кар

тинка выглядит в высшей степени ужасающе. Кстати, тут же рядом с помидором висит фотография очаровательной девушки, рекламирующей сигареты. Стоит ли говорить, что у заядлой курильщицы в принципе не может быть столь белозубой улыбки и безупречного цвета лица, как у этой фотомодели?

У любого мало-мальски образованного человека подобные «помидорные страсти» вызовут усмешку. Ведь даже из школьного курса биологии известно, что ДНК любого организма, будь то рыба, человек или помидор, состоит из одних и тех же нуклеотидов, кодирующих одни и те же аминокислоты, из которых образуются одни и те же белки. В процессе пищеварения и белки, и ДНК одинаково перевариваются, независимо от того, произведены ли растения традиционными методами, методами селекции или с помощью генетически модифицированной ДНК. А уж чтобы из единственного рыбьего гена внутри

помидора образовался целый зародыш (для развития которого из икринки потребовалась бы 30 000 генов) — это уж и вовсе что-то из раздела фантастики, причем далеко не научной...

Тем не менее, на большинство наших сограждан подобный бред действует как красная тряпка на быка. Зная о генной инженерии в лучшем случае из желтой прессы, переполненной страшилками про мутантов, они, увидев такую рекламу, не скупятся на «лестные» эпитеты в адрес генных инженеров и всей современной науки. Бьюсь об заклад, что те, кто поддается подобным рекламным трюкам, и понятия не имеют, сколько миллионов страшных **рыбьих генов** содержит в себе безобидный бутерброд с икрой.

Шутки шутками, но об уровне информированности общества о достижениях генетики убедительно говорят результаты общественного опроса: по различным данным, от трети до двух третей опрошенных считают, что *генетически модифицированные помидоры вредны, потому что содержат гены, а обычные хороши тем, что в них генов нет!* Это позволяет шарлатанам манипулировать чувствами и страхами людей с целью наживы. Ведь как ни крути, а определить точное содержание ГМО (генетически модифицированных организмов) в тех же мясопродуктах невозможно: почти все комбикорма российские фермеры закупают на Западе, а это, как правило, ГМ-корма. А там они не подлежат маркировке, и достоверно определить, что ела на завтрак американская или российская корова, не сможет никакая экспертная комиссия.

Казалось бы — какое нам дело до мясокомбината, отвоевавшего дополнительный процент перепуганных обывателей? Но ведь потом те же обманутые (и, вероятно, подстрекаемые производителями химических удобрений) граждане начинают протестовать против внедрения ГМО, что не может не тормозить научный прогресс, тем более в нашей многострадальной стране. Этот «праведный гнев» порой доходит до настоящего варварства: летом 2000 года в Калифорнии студенты-«зеленые» забрались на опытное поле и сожгли новые сорта кукурузы, выведенные в результате долгих лет селекции (не имеющей никакого отношения к генной инженерии!), помножив на ноль многолетний кропотливый труд ученых.

Все это напоминает невежественные выходки вроде уничтожения ткацких станков луддитами или протесты против первой сельхозтехники, когда крестьяне шли с вилами на “железного дьявола” — трактора. Многие возразят, что сегодня речь идет о “святая святых” — молекуле ДНК, и что такие эксперименты — первейший грех против природы и самого Бога. Но помилуйте, не то же ли самое утверждали в Средние века преследователи первых ученых, пытавшихся проникнуть в тайны строения человеческого тела путем анатомирования трупов? На каком уровне находились бы современная медицина и биология, если б не те первые «святотатцы» (во многих случаях, кстати, люди глубоко верующие)?

Я отнюдь не являюсь адептом трансгенных продуктов и не собираюсь агитировать читателей в их пользу. Нельзя не признать, что компании, производящие ГМ-продукцию, часто готовы ради коммерческой выгоды выбросить на рынок недостаточно проверенный сорт — уж в таком обществе мы живем. Но все же мне очень претит необоснованное паникерство и насаждение невежества, препятствующее развитию высоких технологий, особенно в России. Тем не менее, дыма без огня не бывает, и в этой главе я постараюсь изложить основы биотехнологий и попутно рассказать о достигнутых результатах, отразив их возможные плюсы и минусы.

Основные понятия биотехнологии

Биотехнология — это совокупность методов для придания биологическим объектам *заданных свойств* с целью их использования в разных отраслях производства.

Развитие и становление современной, основанной на знаниях о строении и функциях ДНК, биотехнологии приходится на вторую половину XX века. Биотехнология работает с биомолекулами (ДНК, белки и т. д.), микроорганизмами (бактериями, микроскопическими грибами, дрожжами, спорами, вирусами и т. д.), клетками и тканями растений и животных. Все это можно рассматривать как наноструктуры, поэтому часто биотехнологию считают одним из разделов нанотехнологии.

Многие биотехнологические производства человечество освоило задолго до того, как были открыты не только основные

законы биологии, но и существование самих микроорганизмов. К ним относятся, например, производства хлеба, вина, пива, уксуса, кефира, сыра и т. п.

Где только ни применяются достижения современной нанобиотехнологии:

В пищевой, фармацевтической, химической, нефтяной промышленности микробы производят многие продукты, пищевые добавки и комбикорма, синтезируют и очищают сложные химические вещества, контролируют состав растворов.

В экологии микроскопические работники очищают сточные воды, разлагают отходы и мусор, поглощают вредные вещества.

В энергетике бактерии вырабатывают горючие газы и ликвидируют последствия нефтяных загрязнений, а полученный с помощью дрожжей или микробных ферментов спирт добавляют в бензин. Микробы занимаются фотосинтезом, восстанавливают топливные ячейки, а недавно ученые сделали из бактерии “живую” нанобатарейку.

В сельском хозяйстве используются трансгенные (генетически измененные) растения и животные, биологические средства защиты растений, бактериальные удобрения, фитогормоны, стимулирующие рост растений. Не за горами использование в животноводстве клонированных и даже генетически модифицированных животных.

В электронике биологические объекты уже служат деталями микросхем и датчиков, а в будущем возможно создание полностью живых компьютеров. Изучение молекулярной природы нейронов сделало возможным соединение живых нервов с микрочипами, а удивительное вещество бактериородопсин управляет лучами света.

В машиностроении биомолекулы и микроорганизмы уже сегодня составляют основу примитивных наномашин, синтезирующих по заданной программе сложные полимеры и свои копии. Живые мышцы приводят в движение микророботов, а молекулы ДНК собирают наночастицы в трехмерные структуры.

В основе биотехнологии лежат процессы, протекающие в клетке. Известно, что первыми живыми обитателями Земли были так называемые *прокариотные клетки*, которые и сформировали ту среду, в которой появились все другие организмы. Около двух с половиной миллиардов лет они были единствен-

ными живыми существами на планете, и только 1 млрд. лет назад, когда произошла «неопротерозойская революция», на Земле появились и стали распространяться *эукариоты*.

Наследственная информация всех известных науке существ записана в молекулах ДНК, входящих в состав хромосом. Принято делить организмы на две группы по наличию у них ядра, отделяющего хромосомы от цитоплазмы клетки.

Прокариоты (от лат. «pro» — до + греч. «karyon» — ядро) — это безъядерные организмы, к которым относятся бактерии и цианобактерии (сине-зеленые водоросли). В отличие от них, **эукариоты** (от греч. «eu» — полностью + «karyon» — ядро) имеют четко оформленное ядро с оболочкой, отделяющей его от цитоплазмы. К ним относятся грибы, растения и животные.

Типичный прокариот включает следующие основные подсистемы:

- геном (инструкция по сборке РНК и белков);
- механизм репликации ДНК (производство ее новых копий);
- рибосомы (синтез белка);
- цитозоль (управление обменом веществ);
- мембрана (взаимодействие с внешней средой и синтез АТФ¹⁶).

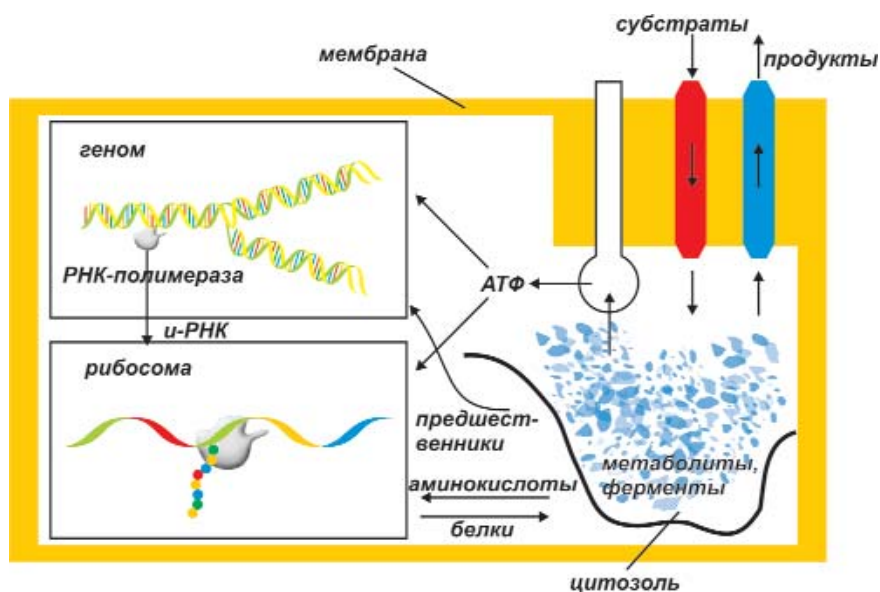


Рис 183. Основные подсистемы прокариотной клетки

¹⁶ **Аденозинфосфорные кислоты** — нуклеотиды, содержащие аденозин (аденин + углевод рибоза) и один, два или три остатка фосфорной кислоты (соответственно, аденозинмонофосфат — АМФ, аденозиндифосфат — АДФ и аденозинтрифосфат — АТФ). Они есть во всех организмах (от микроба и растения до человека) и играют важнейшую роль в обмене веществ и энергий, т. к. присоединение к ним фосфатных групп сопровождается аккумуляцией энергии, а отщепление — выделением энергии, используемой для различных процессов жизнедеятельности. АТФ — универсальный аккумулятор и переносчик энергии во всех живых организмах.

Мембрана содержит механизмы переноса веществ: *субстратов* — внутрь клетки, а *продуктов* ее жизнедеятельности — наружу. Поступающие из внешней среды субстраты (химические соединения органического и неорганического происхождения) в результате электрохимических преобразований расходуются на синтез необходимых клетке соединений, в т. ч. АТФ — универсального переносчика энергии. У фотосинтезирующих организмов мембраны обеспечивают накопление разницы электрических потенциалов, возникающих под действием света при участии молекул хлорофилла.

Одна из главных подсистем клетки — **цитозоль** — представляет собой внутреннюю полужидкую среду клетки. Это своеобразный «котел» всех метаболических превращений. Механизмы обмена веществ в клетке направлены на ее рост и развитие. Для этого необходимы энергия и строительные блоки (аминокислоты) для производства белков. И то, и другое получается в результате переработки поступающих извне веществ. Энергия образуется в результате расщепления сложных веществ — *катаболизма*, а строительные блоки — в результате синтеза, *анаболизма*. Катаболизм и анаболизм представляют собой две основные части *метаболизма* — обмена веществ.

Наследственная информация закодирована в парах нуклеотидов на двойной спирали ДНК. **Ген** — это участок ДНК, кодирующий свойства определенного белка или молекулы РНК и соответствующий какому-либо признаку организма. А полный набор генов называется **геномом**.

Геном бактерий включает несколько тысяч генов, расположенных линейно на макромолекуле ДНК, называемой **хромосомой**. В отличие от эукариотных клеток, имеющих большое число незамкнутых хромосом, клетки прокариот содержат всего одну кольцевую хромосому.

Прокариоты размножаются бесполым путем, посредством деления клеток после *репликации ДНК*. Репликация представляет собой процесс, когда ДНК *дочерних* клеток получаются из одной нити материнской и одной нити вновь синтезированной ДНК. Как это происходит?

Джеймс Уотсон и Френсис Крик, открывшие в 1953 году структуру ДНК, доказали, что ее молекула состоит из тысяч соединенных между собой маленьких молекул четырех видов —

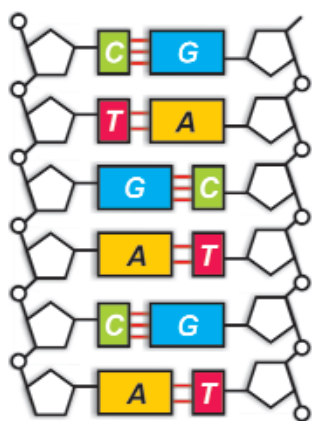


Рис 184. Схема соединений нуклеотидов в молекуле ДНК

нуклеотидов, или оснований: гуанина (G), цитозина (C), тимина (T) и аденина (A). Пары нуклеотидов связаны между собой водородными связями, причем таким образом, что аденин соединяется с тимином, а гуанин — с цитозином.

Именно таким, *комплементарным*, образом соединяются между собой две нити спирали ДНК: напротив тимина из одной нити всегда будет находиться аденин из другой и ничто иное.

Такое расположение позволило объяснить механизмы репликации ДНК: двойная спираль расплетается с образованием двух *репликативных вилок*, на каждой из которых начинается встречный синтез второй нити. В этом процессе принимает участие специальный белок — *ДНК-полимераза*, который, проходя вдоль нити материнской ДНК, последовательно считывает нуклеотиды и строит на их основе вторую нить (по принципу комплементарности).

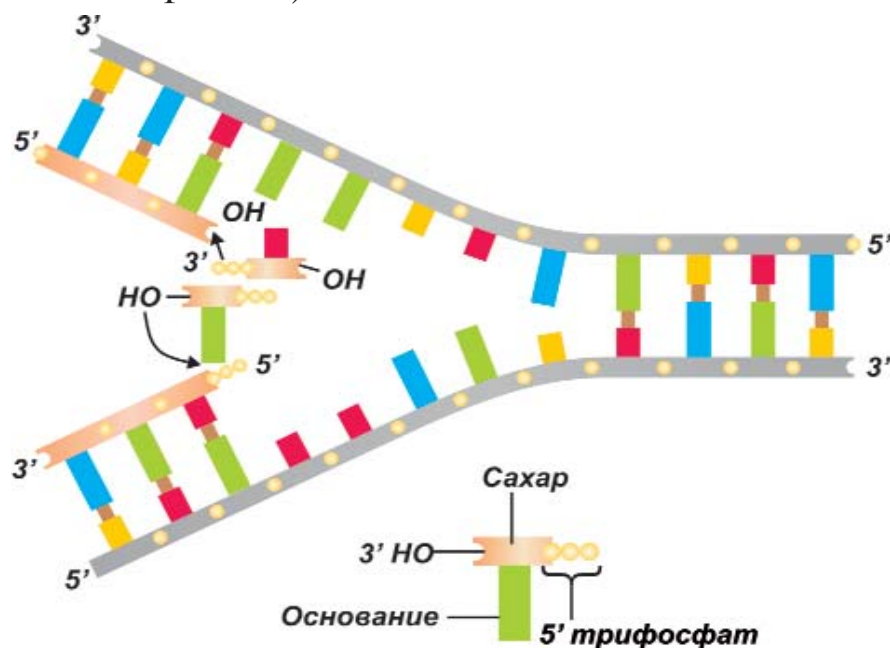


Рис 185. Репликация ДНК

Таким образом, каждая из исходных нитей материнской ДНК получает по точной копии ее бывшей «партнерши». Нуклеотидные нити достраиваются из так называемых *предшественников*, поступающих из цитозоля и образуемых из пентоз, оснований, АТФ, ферментов и др. молекулярных соединений.

Превращение информации в активный белок происходит на *рибосоме*. Мы уже встречались с этим механизмом в первой главе.

Для нормального развития и функционирования клетки ей необходимо поддерживать постоянный обмен веществ с внешней средой, получая из среды различные субстраты и выводя в нее некоторые продукты жизнедеятельности.

В качестве субстратов используются, в основном, различные *углеродсодержащие соединения*¹⁷ — глюкоза, крахмал, спирты и органические кислоты, углекислота, метан, парафины и т. д., широко распространенные в природе.

А вот в качестве *продуктов*, как оказалось, микроорганизмы способны синтезировать многие чрезвычайно полезные вещества — различные белки, ферменты, аминокислоты, витамины, гормоны, антибиотики и прочие биологически активные соединения. Другими словами, бактерии являются настоящими молекулярными фабриками по производству необходимых человеку веществ.

Эти свойства микробов легли в основу множества биотехнологических производств, начало которым положило широкое производство антибиотика пенициллина в 40-х годах XX столетия.

Общая схема биотехнологического производства

Центральное звено любого биотехнологического процесса — *штамм*, то есть совокупность микроорганизмов одного вида, обладающих специфическими физиолого-биохимическими признаками.

Биотехнологическое производство может быть направлено либо на получение максимально возможного количества биомассы (например, производство хлебопекарных дрожжей), либо на достижение максимума выхода продуктов жизнедеятельности клеток. В естественных условиях обмен веществ в клетках осуществляется по принципам строжайшей экономии, что

17. *Углеводы* — обширная группа органических соединений, входящих в состав всех живых организмов. Представители этого класса веществ по составу отвечают общей формуле $C_nH_{2n}O_n$, то есть *углерод + вода* (отсюда название). Примерами углеводов являются глюкоза: $C_6H_{12}O_6$, сахароза $C_{12}H_{22}O_{11}$, крахмал $C_6H_{10}O_5$ и др.

Углеводороды — органические соединения, молекулы которых состоят только из атомов углерода и водорода. Углеводороды являются основным компонентом большинства нефти и природных газов. Общая формула для предельных углеводородов: C_nH_{2n+2} . Например, метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и т. п.

обеспечивается сложной системой его регуляции. Поэтому задача промышленных микробиологов состоит в создании мутантных форм микроорганизмов — сверхпродуцентов соответствующих веществ.

Биотехнологи добиваются *сверхсинтеза* необходимого продукта метаболизма, что достигается как путем изменения генетической программы организма, так и посредством нарушения его регуляторных систем.

Для выделения из природных популяций сверхпродуктивных штаммов используются разнообразные методы.

Селекция — это искусственный отбор организмов с лучшими в своем поколении показателями. Главный недостаток этого метода — его чрезвычайная длительность.

Более эффективен *индуцированный мутагенез*, основанный на мутагенном воздействии рентгеновского и УФ-излучения или некоторых химических соединений. Мутагены вызывают изменения ДНК, приводящие к сдвигу метаболических реакций, в результате чего часть обычных клеток превращаются в сверхпродуцентов.

Как правило, методы мутагенеза и селекции используются в совокупности. Например, так были получены высокопродуктивные штаммы бактерий *Bacillus subtilis*, способные выделять до 75 кг витамина В₂ из тонны питательной смеси.

Достижения в области генетики и молекулярной биологии позволили биотехнологам начиная с 70-х гг. прошлого века, перейти от слепого отбора штаммов мутантов к сознательному конструированию геномов, используя для этой цели *технология рекомбинантной ДНК* — основу современной генной инженерии. Подробнее об этих механизмах будет рассказано чуть позже, а пока ознакомимся с общей схемой микробиологического производства и вкратце «пройдемся» по достигнутым результатам.

Общая схема микробиологического производства состоит из следующих основных этапов:

1. Подготовка питательной среды

Питательная среда служит источником органического углерода — основного строительного элемента жизни. Микроорганизмы поглощают широкий спектр органических соединений — от метана (CH₄), метанола (CH₃OH) и углекислоты (CO₂) до

природных биополимеров. Кроме углерода клетки нуждаются в азоте, фосфоре и других элементах (K, Mg, Zn, Fe, Cu, Mo, Mn и др.) Важный элемент подготовки питательных сред — *стерилизация* с целью уничтожения всех посторонних микроорганизмов. Ее проводят термическим, радиационным, фильтрационным или химическим методами.

2. Получение чистых штаммов для внесения в ферментер

Прежде чем начать процесс ферментации, необходимо получить чистую высокопродуктивную культуру. Чистую культуру микроорганизмов хранят в очень небольших объемах и в условиях, обеспечивающих ее жизнеспособность и продуктивность (обычно это достигается хранением при низкой температуре).

Необходимо все время поддерживать чистоту культуры, не допуская ее заражения посторонними микроорганизмами.

3. Ферментация — основной этап биотехнологического процесса

Ферментация — это вся совокупность операций от внесения микробов в подготовленную и нагретую до необходимой температуры среду до завершения биосинтеза целевого продукта или роста клеток. Весь процесс протекает в специальной установке — ферментере.

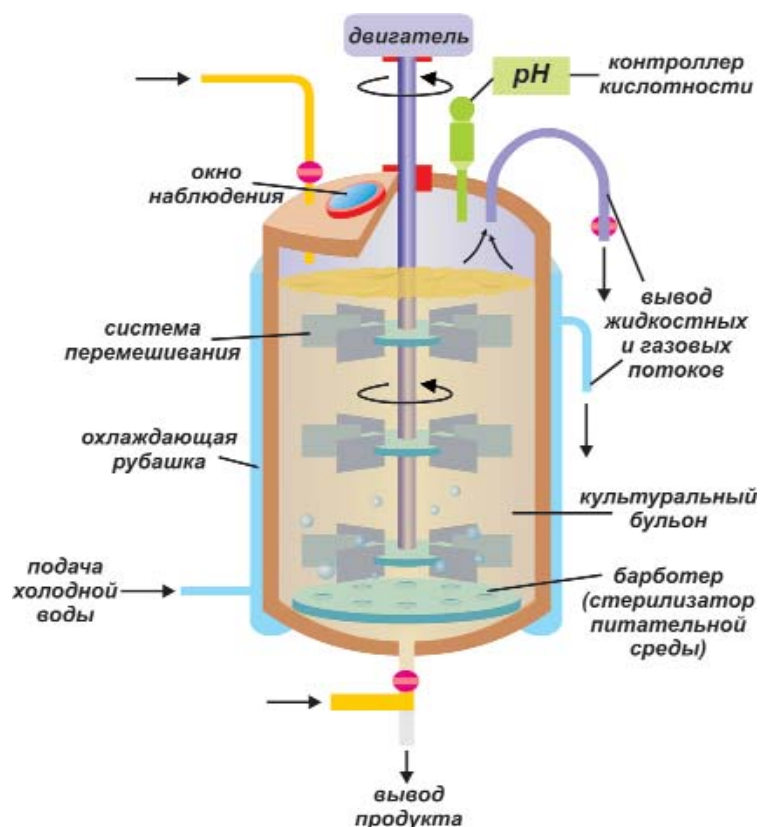


Рис 186. Схема ферментера

Обычный ферментер представляет собой закрытый цилиндр, в котором механически перемешиваются среда вместе с микроорганизмами.

Через него прокачивают воздух, иногда насыщенный кислородом. Температура регулируется с помощью воды или пара, пропускаемых по трубкам теплообменника. Конструкция ферментера должна позволять регулировать условия роста: постоянную температуру, pH (кислотность или щелочность) и концентрацию растворенного в среде кислорода.

По окончании ферментации образуется смесь рабочих микроорганизмов, раствора непротребленных питательных компонентов и продуктов биосинтеза. Ее называют *культуральной жидкостью* или *бульоном*.

4. Выделение и очистка конечного продукта

По завершении ферментации продукт, который желали получить, очищают от других составляющих бульона. Для этого используют различные технологические приемы: фильтрацию, сепарирование (осаждение частиц взвеси под действием центробежной силы), химическое осаждение и др.

5. Получение товарных форм продукта

Последней стадией биотехнологического цикла является получение товарных форм продукта. Они представляют собой либо смесь, либо очищенный продукт (особенно если он предназначен для использования в медицинских целях).

Примеры биотехнологических производств

Получение аминокислот

Среди веществ, получаемых методами биотехнологии, аминокислоты занимают первое место по объему производства — более полумиллиона тонн в год, однако и это — лишь небольшая доля от потребности в них.

Аминокислоты — это структурные единицы, из которых рибосомы строят все необходимые белки организма. Природные аминокислоты вовлечены в биосинтез ферментов, гормонов, витаминов, антибиотиков, токсинов и других азотсодержащих соединений. Белки, в свою очередь, способны синтезировать различные аминокислоты из органического сырья. Но все же половина из необходимых аминокислот не синтезируются в организ-

ме человека и животных. Они называются *незаменимыми аминокислотами*. Недостаток этих аминокислот в питании приводит к нарушению обмена веществ, замедлению роста и развития.

Аминокислота	Потребность, мг/кг массы в сутки	
	младенцы	взрослые
Валин	92	14
Гистидин	33	10
Изолейцин	83	12
Лейцин	135	16
Лизин	99	12
Метионин и цистеин	49	10
Фениланин и тирозин	141	16
Треонин	68	8
Трептофан	21	3

Табл 10. Потребность человека в незаменимых аминокислотах

Белки яиц и молока обладают высокой пищевой ценностью — это и неудивительно, ведь растущим детенышам необходим весь спектр аминокислот. Многие белки растительного происхождения имеют дефицит некоторых незаменимых аминокислот. Так, белки пшеницы и риса обеднены лизином и треонином, а белки кукурузы — лизином и триптофаном.

Внесение промышленных аминокислот в кормовые концентраты позволяет балансировать корма сельскохозяйственных животных по уровню белка. При добавлении 2-4 кг дефицитных аминокислот к 1 т. комбикорма общий расход кормов уменьшается на 15-20%, а выход мяса и молока увеличивается на 20%. Это позволило перевести животноводство на промышленную основу.

Помимо применения в качестве пищевых добавок, приправ и усилителей вкуса аминокислоты используют как сырье в химической, парфюмерной, фармацевтической промышленности и т. п. Промышленное производство аминокислот стало возможным после открытия у некоторых микроорганизмов способности вырабатывать их во внешнюю среду.

Так, штамм *Corynebacterium glutamicum* является продуцентом глутамата. Его использовали при организации первого в мире крупномасштабного биотехнологического производства самой популярной пищевой добавки, глутаминовой кислоты, в Японии в 1956 году.

Промышленными продуцентами лизина являются штаммы бактерий вида *Corinebacterium glutamicum*. Лизин относится к числу незаменимых аминокислот. В России недостаток этой аминокислоты не может быть восполнен за счет богатой ею сои, поэтому в нашей стране производство лизина было организовано первым, в первую очередь — для удовлетворения потребностей животноводства.

Перспективные штаммы продуцентов постоянно улучшают селекцией мутантов с измененной генетической программой и регуляторными свойствами.

Получение витаминов

Витамины — незаменимые соединения различной химической природы, выполняющие каталитические и регуляторные функции. Недостаток того или иного витамина нарушает обмен веществ и нормальные процессы жизнедеятельности организма, приводя к развитию патологических состояний. В организме человека и животных витамины не образуются. К их синтезу способны только растения и ряд микроорганизмов. Способность последних вырабатывать необходимые человеку витамины легли в основу их промышленного производства.

Получение органических кислот

Методы промышленной микробиологии широко применяются для производства некоторых органических кислот, необходимых человеку. Вырабатываемая микробами *уксусная кислота* используется в пищевой промышленности, производстве каучука, пластмассы, волокон, инсектицидов. *Лимонную кислоту* широко используют в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности, а также для очистки металлов. Производство лимонной кислоты принадлежит к числу старейших микробиологических процессов, оно было организовано в 1893 году. С 20-х годов прошлого века налажено промышленное производство *D-глюконовой кислоты* из глюкозы при участии *Aspergillus niger*. Ее используют для извлечения металлов, борьбы со ржавчиной, как моющее средство и в качестве медицинского препарата. Также из глюкозы получают *итаконовую кислоту*, использующуюся для производства пластмасс и красителей.

Получение антибиотиков

Антибиотики — это вещества биологического происхождения, способные убивать микроорганизмы или угнетать их рост. В природе при помощи антибиотиков микроорганизмы борются друг с другом.

Антибиотики делят на *бактерицидные*, вызывающие гибель микроорганизмов, и *бактериостатические*, нарушающие способность микроорганизмов делиться.

Первый антибиотик — пенициллин, образуемый плесневым грибом *Penicillium notatum*, открыл английский бактериолог А. Флеминг (1928). «Оружие микробов» развеяло представления о неизлечимости многих бактериальных заболеваний (туберкулез, сепсис, сифилис и др.) Организация крупномасштабного производства антибиотиков в 40-х годах XX века сыграло решающую роль в становлении промышленной биотехнологии.

Количество открываемых антибиотиков постоянно растет. В 1940 году было известно всего 6 антибиотиков, а в настоящее время описано более 12 000 аналогичных соединений, из которых в медицине применяют около 200 препаратов. 97% антибиотиков токсичны и для человека, поэтому на практике не используются.

Ежегодно в мире производится антибиотиков почти на 20 млрд. долларов. Антибиотики продуцируются плесневыми грибами, актиномицетами, эубактериями и другими микроорганизмами. Среди актиномицетов наибольший вклад вносит род *Streptomyces*, один из видов которого, *Streptomyces griseus*, синтезирует более 50 различных антибиотиков.

Получение ферментов

Ферменты (от лат. fermentum — закваска), или **энзимы** (от греч. en — внутри + zyme — закваска) — белки-катализаторы, присутствующие в каждой клетке. Ускоряя биохимические реакции, ферменты направляют и регулируют все процессы обмена веществ. Ничтожное количество ферментов способно вызывать разложение больших масс других органических веществ, не расходуясь при этом. Будучи самостоятельными химическими веществами, ферменты сохраняют каталитическую активность и вне клеток. В отличие от химических катализаторов, фермен-

ты нетоксичны, используют доступное сырье (в т. ч. отходы), в связи с чем их применение в промышленности выгодно и с экологической, и с экономической точек зрения. Ферменты находят широкое применение в текстильной, кожевенной, целлюлозно-бумажной, медицинской, химической и пищевой промышленности. В медицине распространена практика использования ферментов в диагностических целях, например, для выявления инфаркта миокарда или заболеваний печени.

Источником ферментов могут выступать все живые существа. Для их получения пригодны некоторые растительные организмы на определенной фазе их развития (проросшие зерна злаков и бобовых), а также отдельные ткани и органы животных (поджелудочная железа, слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта, сычуг рогатого скота, семенники половозрелых животных). Однако для массового производства ферментов используют микроорганизмы.

Получение микробных иммуннобиологических препаратов – вакцин, иммунных сывороток и диагностикумов

Вакцины – основной способ профилактики инфекционных заболеваний. Это препараты, изготовленные из ослабленного или убитого инфекционного агента (бактерии, вируса и др.) или его отдельных компонентов, несущих антигенные свойства и способных вызывать иммунитет к данной инфекции.

Термин «вакцина» происходит от латинского слова *vassa* – корова, поскольку вначале для предохранения человека от заболевания оспой ему прививалось содержимое оспенных пузырьков больной коровы. Сегодня вакциной называют все, что получают из патогенных микробов и что вызывает образование специфических антител¹⁸ при попадании в организм. Вакцины получают как из самих микроорганизмов, так и из продуктов их жизнедеятельности. Применение вакцин обеспечивает невосприимчивость организма к заражению реальными возбудителями болезни и стимулирует его защитные силы.

¹⁸ **Антитела** – белки, образующиеся в ответ на введение в организм бактерий, вирусов, белковых токсинов и других инфекционных агентов. Связываясь активными участками с микробами, антитела препятствуют их размножению или нейтрализуют выделяемые ими яды.

Иммунные сыворотки содержат готовые антитела к определенным видам микробов. В отличие от вакцин, их используют не только для профилактики, но и для лечения, поскольку введение антител в зараженный организм способствует быстрому обезвреживанию микробов и их токсинов.

Для получения необходимых для сыворотки антител нарочно инфицируют лошадь. Когда через 10-12 дней ее организм вырабатывает достаточное количество антител, из крови животного получают сыворотку.

Сывороточные препараты, полученные из крови лошади, содержат, помимо необходимых антител, чужеродные для человека белки. Поэтому при их введении у пациента могут возникать аллергические реакции. Чтобы снизить процент осложнений, сыворотку подвергают дополнительной обработке.

В настоящее время широкое применение получили гамма-глобулины, извлекаемые из иммунных сывороток, которые содержат антитела в наибольшей концентрации.

Диагностические сыворотки (диагностикумы) представляют собой взвесь убитых бактерий определенного вида. Например, брюшнотифозный диагностикум — это взвесь убитых бактерий брюшного тифа. Диагностикумы предназначены для качественного и количественного определения соответствующих иммуноглобулинов в сыворотке крови с диагностической целью.

В настоящее время расширяются возможности получения эффективных и безопасных иммунобиологических препаратов с помощью *генной инженерии*. Она позволяет использовать в качестве источников необходимых веществ не организмы людей и животных, а новые искусственно созданные системы — специально культивированные клетки многоклеточных организмов.

Антитела синтезируются в лимфоцитах. Если «скрестить» лимфоциты с быстро делящейся раковой клеткой, то образуются клетки-гибридомы, имеющие свойства обоих «родителей». Из них можно получать целые популяции генетически одинаковых клеток, которые быстро делятся (как раковые) и вырабатывают определенный вид антител (как лимфоцит). Такой клон позволяет получать любые количества антител определенного вида.

Основные механизмы генной инженерии

Технология рекомбинантной ДНК

Вот мы и добрались до *генной инженерии*, вызывающей у непосвященных бурю всевозможных эмоций. Если кратко, то суть генной инженерии сводится к следующему: биологи, зная, какой ген за что отвечает, выделяют его из ДНК одного организма и встраивают в ДНК другого. В результате можно заставить клетку синтезировать новые белки, что придает организму новые свойства.

Мы знаем, что обмен генетической информацией происходит и в природе, но только между особями одного вида. Коты «ухаживают» за кошками, лисы за лисицами, кролики за крольчихами... Случаи же скрещивания особей разных видов (например, собаки и волка) хоть и случаются, но являются скорее исключениями и возможны лишь для близкородственных животных.

Перенос генов от родителей к потомкам внутри одного вида называется *вертикальным*. Так как возникающие при этом особи, как правило, очень похожи на родителей, в природе генетический аппарат обладает высокой точностью и обеспечивает постоянство каждого вида.

Генная инженерия дает возможность преодолевать межвидовые барьеры и передавать признаки одних организмов другим, осуществляя такие изменения генома, которые вряд ли могли бы возникнуть естественным путем. Грубо говоря, генные инженеры делают то, что всегда запрещала природа. Берут, например, ген из рыбы и вставляют его в помидор. Но не для того, чтобы помидор плавал, а чтобы его можно было хранить при низкой температуре. Перенос генов между особями разных видов называется *горизонтальным* (латеральным).

Молекула ДНК, собранная из кусочков ДНК различных организмов, называется *рекомбинантной*. Первая рекомбинантная ДНК, объединившая гены обезьяньего вируса *SV40*, бактериофага *лямбда* и галактозного оперона *E.coli*, была создана в 1972 году группой американских ученых под руководством П. Берга.

Однако первые «генные операции» такого рода эффективно проводились уже более 4,5 миллиардов лет назад главным «генным инженером» — Природой. Речь идет об уже знакомых

нам прокариотах — первых живых существах, населявших нашу планету еще со времен Архейской эры. Как уже говорилось, механизмы передачи генетической информации в природе обладают высокой стабильностью, призванной служить сохранению и выживанию вида. Стабильность эта, однако, не абсолютна, ведь иначе в ходе эволюции не смогло бы возникнуть такого многообразия форм жизни, свидетелями (и представителями) которых мы являемся.

Но прокариоты, как известно, размножаются простым делением, при котором каждая дочерняя клетка получает «в наследство» точную копию родительской ДНК. Откуда же возникло такое разнообразие в среде самих простейших и как могли появиться другие организмы? Одна из наиболее очевидных причин генетической изменчивости — это мутации, являющиеся, по меткому выражению Дарвина, двигателем эволюции.

Мутации — скачкообразные изменения генетического кода клетки, приводящие к появлению новых признаков. Если потомки измененной особи имеют некоторое преимущество перед обычными, например, большую жизнеспособность или повышенную скорость роста, они постепенно накапливаются и вытесняют исходных особей.

Различают мутации *спонтанные* (причины их возникновения неизвестны) и *индуцированные*. Индуцировать мутации могут различные факторы, действующие на генетический материал клетки: физические, химические или биологические.

В ходе эволюции прокариоты выработали способы защиты своего генетического материала от повреждающего действия облучения, химических веществ и других мутагенов. В их клетках обнаружены эффективные системы ремонта поврежденных участков ДНК. Если бы таких механизмов не было, то организм бы переродился и вымер как вид.

Основной механизм восстановления ДНК — это “вырезание” повреждений, так называемая **рестрикция**. Ее осуществляют ферменты *эндонуклеазы*, расщепляющие нить ДНК. Такой способ помогает, только если повреждена только одна цепочка молекулы. Тогда поврежденный участок вырезается, а образовавшаяся брешь заполняется комплементарными нуклеотидами с использованием в качестве матрицы-шаблона неповрежденной нити ДНК. Таким образом, многие случайные мутации попросту вырезаются.

Однако когда повреждение касается обеих нитей, тот же самый механизм восстановления превращается в орудие самоубийства: эндонуклеазы распознают поврежденный участок и разрывают в его месте обе нити ДНК. Кстати говоря, то же самое происходит и в клетках многоклеточных организмов в случае фатального повреждения хромосом. Такое генетически запрограммированное самоубийство биологи называют **апоптозом**. Оно сохраняет «чистоту генов» и предохраняет вид от деградации. Можно сказать, что клетка руководствуется своеобразным “клеточным самурайским законом” — “лучше умереть, чем ошибиться!”

Однако присущий всем живым существам инстинкт самосохранения порой все же берет верх, и клетке-мутанту удается “обмануть” убийственную рестрикцию путем модификации ДНК — метилированием или введением дополнительных пар нуклеотидов. Уцелевшая клетка приобретает новые свойства и, если они оказываются выгодными, дает начало новому виду существ.

Итак, огромное разнообразие организмов объясняется мутациями. Но, как оказалось, тому есть и другие причины. С развитием генетики ученые обнаружили, что для прокариот характерен путь горизонтального переноса генов между различными особями. Молекулярно-генетический анализ показал, что геномы прокариот представляют собой мозаику генов, приобретенных у разных видов. Одинаковые генетические последовательности можно увидеть у многих прокариот, вне зависимости от степени их родства. Объяснить возникновение такой мозаики может только горизонтальный перенос генов.

Горизонтальный перенос генов у прокариот — это не просто лабораторный артефакт или результат генной инженерии, а распространенное природное явление.

Установлены три основных механизма латерального переноса: трансформация, конъюгация и трансдукция.

Трансформация — это нормальная физиологическая функция обмена генетическим материалом у некоторых бактерий.

Конъюгация имеет наименьшее число ограничений для межвидового обмена генетической информацией, но предполагает тесный физический контакт между микроорганизмами, легче всего достижимый в биопленках.

Трансдукция (от лат. transductio — перемещение) — это перенос генетического материала из одной клетки в другую с по-

мощью некоторых вирусов (бактериофагов), что приводит к изменению наследственных свойств клетки-реципиента. Явление трансдукции было открыто американскими учеными Д. Ледербергом и Н. Циндером в 1952.

Последний механизм следует рассмотреть более подробно, но прежде скажем несколько слов о вирусах.

Вирусы (от лат. *virus* — яд) были открыты в 1892 г. русским ученым-ботаником Д. И. Ивановским при изучении мозаичной болезни (пятнистости листьев) табака. К наиболее опасным заболеваниям, вызываемым вирусами у животных и человека, относят бешенство, оспу, грипп, полиомиелит, СПИД, гепатит и др.

Вирусы — существа совершенно удивительные. Они занимают промежуточное положение между живой и неживой материей, представляя собой случай некоего биологического дуализма. На вопрос “живые ли вирусы?” нельзя ответить однозначно, ведь если живой считать структуру, способную к размножению и обладающую наследственной информацией, то можно сказать, что вирусы живые (впрочем, по этому определению живыми можно признать и компьютерные вирусы). Но если считать живой структуру, обладающую клеточным строением (как, например, растения, грибы, животные), то ответ должен быть отрицательным. Следует также отметить, что вирусы не способны воспроизводить себя вне клетки-хозяина.

Вирусы устроены очень просто. Они состоят из головки (сердцевины) округлой, гексагональной или палочковидной формы диаметром 45-140 нм и отростка толщиной 10-40 и длиной 100-200 нм. В 1 мм³ воды может уместиться около миллиарда фагов.

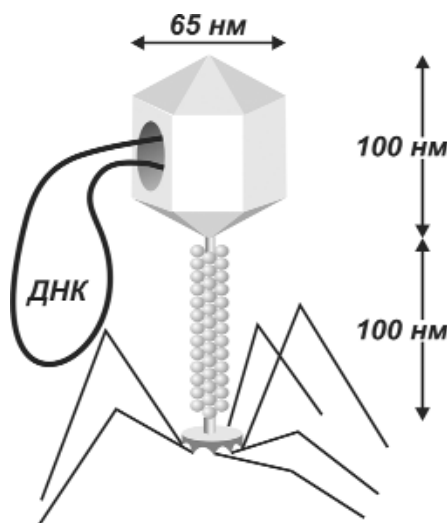
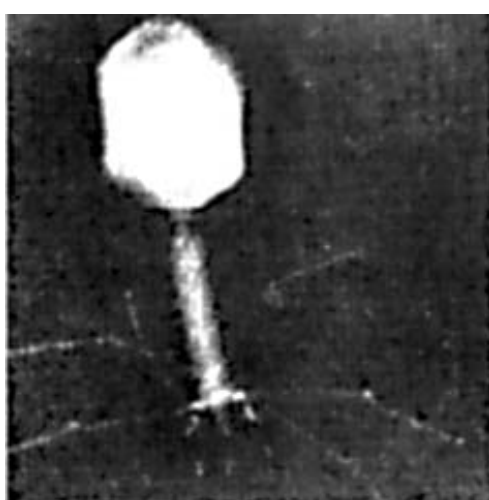


Рис 187. Электронно-микроскопическая фотография и схема строения бактериофага Т4

Сердцевина вируса содержит ДНК или РНК. Ее окружает защитная белковая оболочка (*капсид*). Отросток имеет вид полой трубки, окруженной *сократительными белками* вроде мышечных. На конце отростка у многих вирусов есть *базальная пластинка*, от которой отходят тонкие длинные *отростки-«ноги»*, служащие для прикрепления к клетке-хозяину.

Вирус может воспроизводить себе подобных только внедряясь в клетку хозяина. Для этого он прикрепляется к бактериальной клетке и растворяет клеточную стенку, выделяя особый фермент. Затем содержимое головки по каналцу отростка проникает в клетку. Попадая внутрь клетки, вирус, подобно своему компьютерному собрату, перепрограммирует рибосомы на производство своих копий. Он «выключает» хозяйскую ДНК и, используя свою собственную ДНК или РНК, «заставляет» клетку синтезировать новые копии вируса. После сборки большого числа вирусных частиц клетка, как правило, погибает, а множество новых вирусов, произведенных с ее помощью, выходит на свободу, поражая другие клетки. Вирусы, вызывающие гибель клетки, называют *вирулентными*¹⁹.

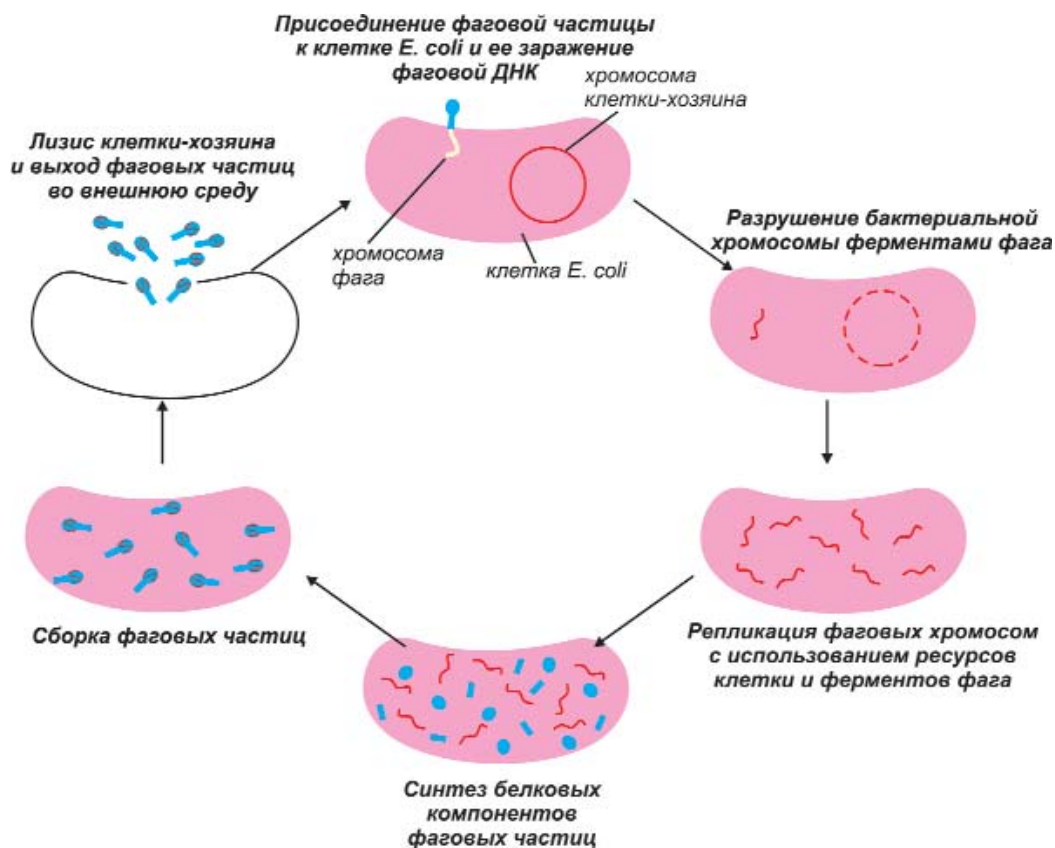


Рис 188. Жизненный цикл вирулентного фага, например T2 или T4

¹⁹ Вирулентность — это степень болезнетворного действия микроба. Ее можно рассматривать как способность адаптироваться к организму хозяина и преодолевать его защитные механизмы.

Однако существует и другая категория вирусов, называемых *умеренными (симбиотическими)*. Проникая внутрь клетки, они могут либо повести себя как обычные фаги, вызывая гибель клетки, либо могут встроиться в ДНК клетки-хозяина и остаться в ней в скрытой неинфекционной форме.

Клетки, содержащие такой вирус, называются *лизогенными*, они могут содержать 2, 3 и более фагов. Лизогения может затем передаваться потомству бактерии. На рисунке показаны два возможных пути развития умеренного вируса.

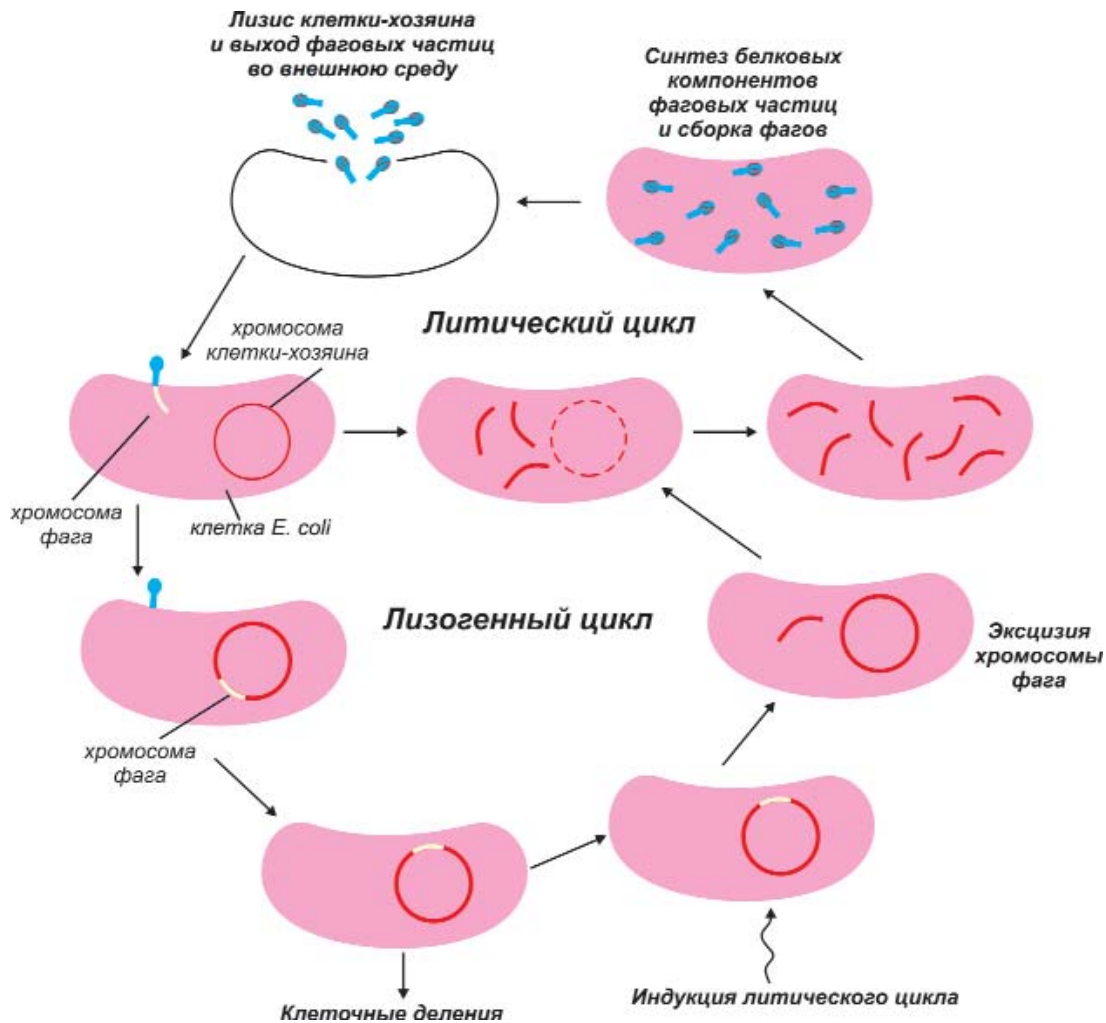


Рис 189. Жизненный цикл умеренного фага. Когда он инфицирует клетку, развитие может пойти по литическому или лизогенному пути

Так, а что же наш «горизонтальный перенос»?

Напоминаем, что трансдукция — это перенос вирусом бактериальных генов из одной клетки в другую, что приводит к изменению наследственных свойств клетки-реципиента.

Трансдукция возможна, если в процессе размножения умеренного фага одна из частиц вирусной ДНК случайно захватит фрагмент бактериальной хромосомы

Когда впоследствии такой вирус заражает другую бактерию, участок бактериальной ДНК проникает в клетку таким же путем, как вирусный. Между трансдуцированной ДНК и участком хромосомы может произойти обмен, и как следствие его возникают *рекомбинанты*, несущие небольшую часть генетического материала клетки-донора.

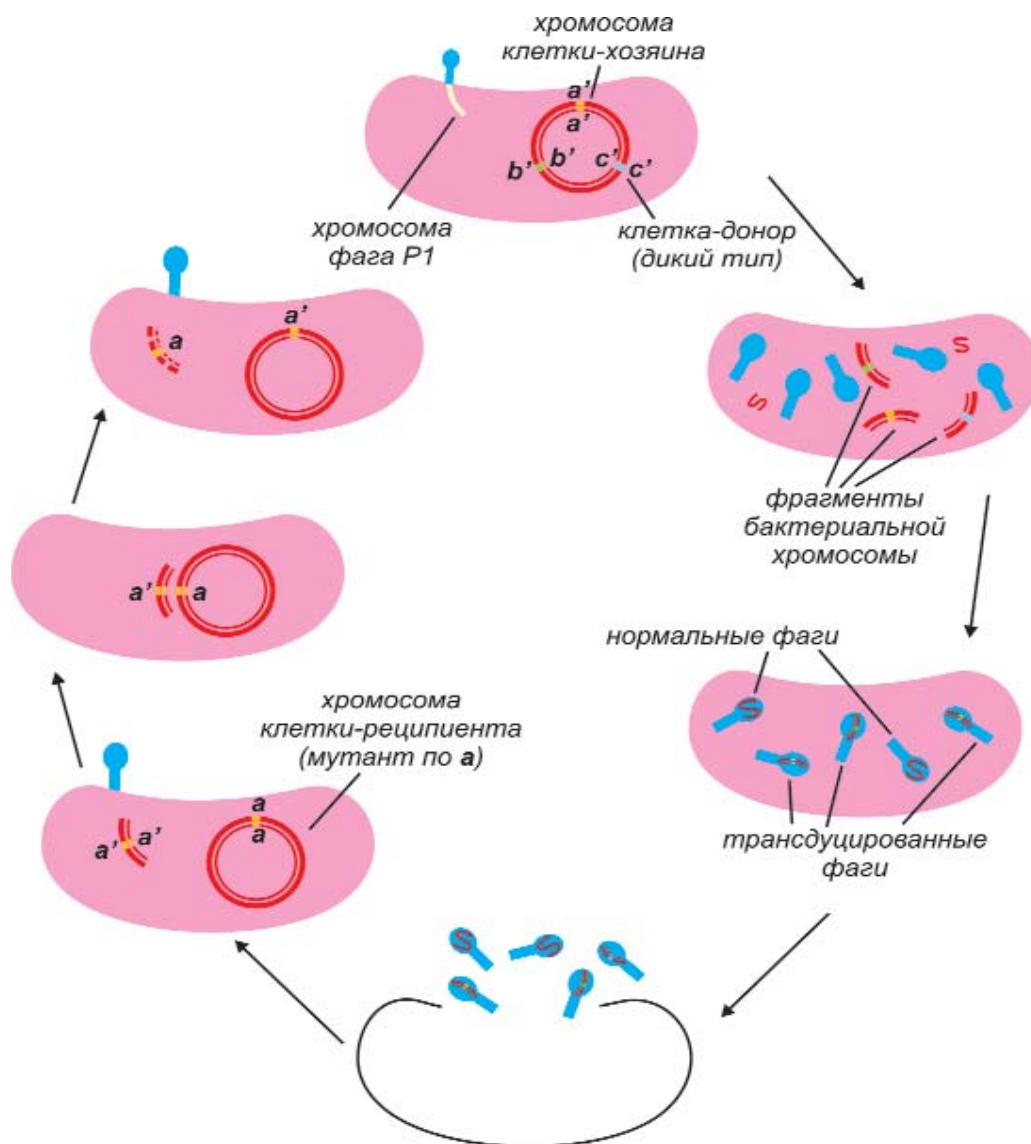


Рис 190. Схема общей трансдукции между линиями *E. coli*:

- а) Клетка дикого типа, инфицированная фагом P1;
- б) ДНК клетки-хозяина деградирует в ходе литического цикла;
- в) в ходе сборки фаговых частиц некоторые фрагменты бактериальной хромосомы включаются в несколько фагов-потомков, что потом приведет к трансдукции;
- г) лизис;
- д) трансдуцирующий фаг инфицирует бактерию-реципиента;
- е) происходит обмен донорного гена a^+ и реципиентного гена a^- ;
- ж) образование стабильного трансдуктанта a^+ .

Итак, мы рассмотрели процесс естественного “горизонтального” обмена генетической информацией между бактериями, то есть перемещения генов из одного организма в другой

посредством мобильных генетических посредников. Рассмотренный механизм получил название трансдукции, а понимание его сути привело к рождению генной инженерии.

Как уже было сказано, суть генной инженерии заключается в том, что в генотип организма встраиваются или исключаются отдельные гены или их группы. Для этого используют метод получения рекомбинантных, т. е. содержащих чужеродный ген, ДНК, которые затем вводятся в организм реципиента и становятся составной частью его генетического аппарата.

Этот процесс состоит из нескольких этапов:

1. Чтобы выделить тот или иной ген из цепочки ДНК, используется **рестрикция** — разрезание ДНК на фрагменты уже знакомыми нам ферментами-рестриктазами. Они попросту «шинкуют» ДНК: режут на отрезки, но не как попало, а в определенных местах. Всякая рестриктаза может опознать лишь одну стандартную последовательность из нескольких нуклеотидов. Молекулы рестриктазы химически связываются с ними и в этих местах рвут цепь ДНК. На рисунке изображена схема расщепления ДНК по остаткам А (аденин).

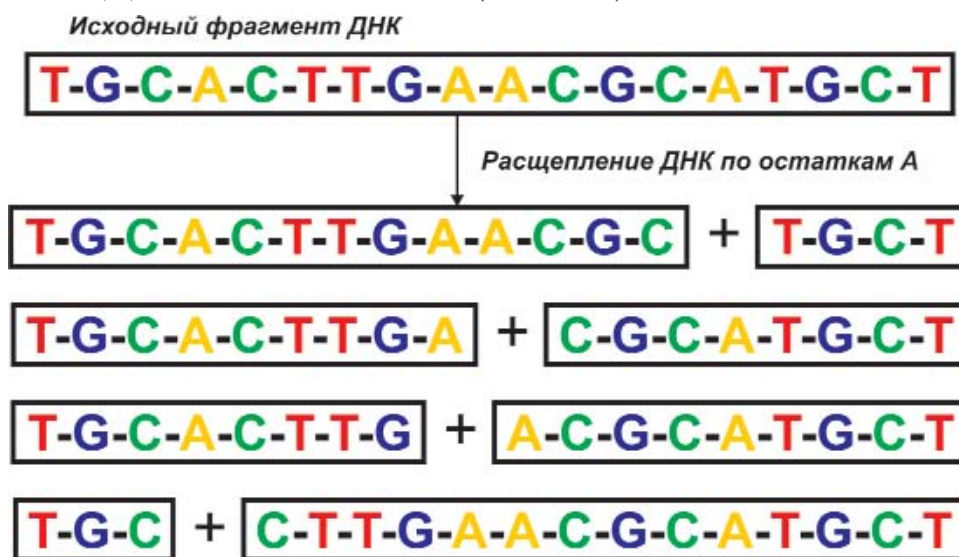


Рис 191. Схема получения фрагментов ДНК в результате расщепления по определенному нуклеотиду (А)

В настоящее время известно более 400 рестриктаз, способных расщеплять ДНК по 120 различным последовательностям нуклеотидов.

2. **Лигирование** — процесс «сшивания» генов с помощью особых ферментов, называемых лигазами. Лигаза сшивают участки ДНК, образуя между их крайними нуклеотидами химическую связь.

3. После того как рекомбинантная ДНК сшита, ее вводят в живые клетки. Этот процесс называется **трансформацией**. Для того, чтобы рекомбинантная ДНК стала частью генетического аппарата клетки, она должна либо встроиться в ее геном и реплицироваться за ее счет, либо быть способной к автономной репликации. Для этого используют **векторы** — мобильные генетические элементы: вирусы, плазмиды и транспозоны. Эти элементы могут присоединять те или иные гены к своей ДНК, а затем, оказавшись в клетке-хозяине, встраиваться вместе с «оторванным» чужеродным геном в хромосому хозяина, которая потом реплицируется уже вместе со всей этой новой последовательностью. В общих чертах это напоминает трансдукцию, имеющую, как мы убедились, место и в природе.

Итак, мы познакомились с общими принципами искусственного конструирования молекул ДНК. Рассмотрим теперь несколько примеров практического применения генной инженерии.

Получение инсулина

Инсулин — гормон поджелудочной железы, регулирующий углеводный обмен и уровень сахара в крови. Его недостаток в организме приводит тяжелейшему заболеванию — сахарному диабету, самой распространенной форме заболеваний эндокринной системы. Самая тяжелая форма диабета, для лечения которой больному необходим инсулин, вызвана гибелью клеток, синтезирующих этот гормон.

Раньше инсулин могли выделять только из поджелудочной железы телят и свиней. Для получения 100 г кристаллического инсулина требовалось 800-1000 кг исходного сырья. Однако с развитием генно-инженерных методов в 1978 г. был получен штамм бактерий *E. coli* (кишечной палочки), способных продуцировать инсулин. В ДНК бактерии был встроен человеческий ген, отвечающий за его синтез. Теперь почти весь инсулин в мире производят трансгенные бактерии.

Получение соматотропина

За синтез **соматотропина** (гормона роста человека) отвечает передняя доля гипофиза. Его недостаток приводит к гипофизарному нанизму — карликовости (в среднем 1 случай на 5000 человек). Пригодный для лечения людей соматотропин можно выделить лишь из гипофиза человека, поэтому раньше его получали

из трупов, но в ничтожных количествах: гормона хватало лишь для лечения 1/3 случаев карликовости, и то лишь в развитых странах. Препарат, выделяемый из трупов, имеет некоторые специфические особенности, приводящие к тому, что у 30% больных, получавших препарат, против гормона вырабатывались антитела, что сводило на нет его биологическую активность.

Сейчас гормон роста синтезируют с помощью специально сконструированных бактерий *E. coli*. Впервые такую бактерию удалось получить в 1979 году.

Получение интерферонов

В 1957 году в Национальном институте медицинских исследований в Лондоне было установлено, что клетки человека и животных, подвергнутые воздействию вируса, выделяют вещества, придающие непораженным клеткам устойчивость к вирусной инфекции. Они как бы препятствуют (интерферируют) размножению вирусов в клетке и поэтому были названы **интерферонами**. Интерфероны помогают нашему организму бороться со множеством вирусных заболеваний.

Препараты на основе различных видов интерферонов используются как иммуномодуляторы — для нормализации и усиления иммунной системы, в т. ч. для лечения различных тяжелых заболеваний — острого вирусного гепатита, рассеянного склероза, остеосаркомы, миеломы и некоторых видов лимфом. Их применяют и для лечения меланом, ряда опухолей гортани, легких и мозга.

Традиционно интерфероны извлекали из крови человека. Из 1 л крови можно выделить всего 1 мкг интерферона, то есть примерно одну дозу для инъекции. На современном этапе интерфероны получают с помощью генетически модифицированных микроорганизмов. Удалось получить штаммы бактерий, способные синтезировать до 5 мг интерферона на литр бактериальной суспензии, содержащей примерно 10^{11} бактерий, что заменяет кровь 25 000 доноров.

Трансгенные животные

Применение методов генной инженерии в животноводстве позволяет повышать продуктивность животных (например, удои молока), сопротивляемость их организма к болезням и т. д. Животных, имеющих в своем геноме чужой ген, принято называть

трансгенными. Благодаря переносу генов у трансгенных животных возникают новые качества, а дальнейшая селекция позволяет закрепить их в потомстве и создавать трансгенные линии.

Так, были получены **животные-биореакторы**, способные выделять ценные биологические вещества. Например, в России группой ученых под руководством Л. К. Эрнста была выведена трансгенная овечка, которая с молоком выделяет химозин — фермент, используемый в производстве сыра. Не так давно для сыроваренной промышленности требовалось огромное количество желудков телят. В последние несколько десятков лет практически все сыроделы пользуются химозином, полученным методом микробиологического синтеза из культур бактерий и микроскопических грибов. Очевидно, что такое получение химозина не только гуманнее, но и выгоднее традиционных способов, требующих убийства сотни телят. Всего из 3 л молока трансгенной овцы можно получить достаточно химозина для производства тонны сыра — и при этом не тратиться ни на работу ферментера, ни на выделение из культуральной жидкости нужного фермента и его очистку.

Другой пример — трансгенная корова, которая выделяет с молоком лекарственный препарат эритропоэтин, применяемый в терапии лейкозов. Ведутся исследования по получению многих других лекарств из молока животных. Применяемые для этого биотехнологические методы с использованием бактерий дороги и сложны. А трансгенные животные быстро размножаются, и выход полезных веществ с их молоком превосходит таковой у бактерий.

Другая важная задача — выведение животных, устойчивых к заболеваниям. Потери в животноводстве, вызванные болезнями, достаточно велики, но уже созданы популяции трансгенных коров и кур, устойчивых к некоторым паразитам.

Трансгенные растения

Тысячи лет люди выводят новые сорта растений путем отбора экземпляров с новыми свойствами, полученными в результате случайных мутаций. С начала XX века стали целенаправленно применять облучение и химические мутагены, слияния соматических клеток и т. д., а скрещивание и отбор стали проводить с учетом законов Менделя. При этих традиционных

методах изменения непредсказуемы и обычно затрагивают многие гены.

Генноинженерные методы позволяют создавать новые генотипы и, следовательно, новые формы растений гораздо быстрее, чем классические методы селекции. Кроме того, появляется возможность целенаправленного изменения генотипа.

Генная инженерия позволяет вводить в растения гены устойчивости к различным стрессовым факторам, фитопатогенам, гербицидам и пестицидам, гены скороспелости, фиксации азота и др. Возможно также и улучшение аминокислотного состава белков растений.

Наибольший урон растениям наносят грибные, бактериальные и вирусные инфекции. В природе растения обладают защитными механизмами, которые начинают действовать в ответ на проникновение фитопатогенов в клетку. Во-первых, начинается синтез веществ, убивающих патогены. Во-вторых, создаются барьеры, препятствующие распространению инфекции.

Применение методов генной инженерии, использующих естественные защитные механизмы, позволяет получать трансгенные растения, устойчивые к грибной, бактериальной и вирусной инфекции. В частности, были получены трансгенные культуры табака и турнепса, в состав генома которых ввели ген хитиназы, а также томаты с геном защитных пептидов редьки, отвечающих за устойчивость к фитопатогенным грибам.

Другой подход к получению растений, устойчивых к вирусной инфекции, состоит во введении в геном исходных растений генов, кодирующих белок оболочки вируса. Это приводит к блокировке размножения вируса и снижению инфицированности. Благодаря такому подходу был получен стойкий антивирусный эффект у табака, модифицированного геном оболочки вируса табачной мозаики.

Интересный эффект дало введение в геном растений гена человеческого интерферона JFN — одного из ключевых белков нашего иммунитета. Ген этого интерферона был введен в растения турнепса, табака, картофеля, что повысило устойчивость этих растений к вирусным заболеваниям.

Создание трансгенных растений, устойчивых к насекомым, с помощью методов генной инженерии стало возможным после того, как было обнаружено, что почвенные бактерии *Bacillus thuringiensis* синтезируют специфический белок, токсичный для насекомых. Ген, ответственный за его синтез, удалось выделить и ввести в геном многих видов сельскохозяйственных растений. Для человека и животных этот белок безопасен, и даже на насекомых разные его варианты действуют по-разному. Различные модификации Vt-токсина могут быть ядовитыми только для жуков, или только для бабочек определенного отряда, и т. д.

В природе растения приспосабливаются к неблагоприятным условиям среды различными способами. Во-первых, это физиологические механизмы, позволяющие растениям избежать неблагоприятных воздействий (например, опадание листьев осенью при снижении температуры). Во-вторых, адаптация с помощью морфологических приспособлений: толстый слой кутикулы на листьях, уменьшение листовой поверхности (прорези), ее опушение, которые предотвращают излишнюю потерю влаги растениями. В-третьих, негативное влияние внешней среды может быть преодолено с помощью изменений метаболизма. Например, при засухе или чрезмерной концентрации солей в почве и воде у высших растений основным защитным механизмом, связанным с изменением метаболизма, является накопление в клетках осмопротекторов.

Именно этот адаптационный механизм наиболее доступен для генноинженерных исследований. Эксперимент показал, что *стрессовый ответ* на избыток солей или недостаток влаги у бактерий и высших растений выражается сходно: и те, и другие начинают усиленно синтезировать белки-осмопротекторы для восстановления осмотического баланса между цитоплазмой и окружающей средой. Поэтому для создания устойчивых к засухе и засолению растений в их геном были введены соответствующие бактериальные гены. Полученные трансгенные растения могли расти в засушливой почве при концентрации соли в среде 20 г/л.

Адаптация к низким температурам сопряжена у бактерий и высших растений с накоплением веществ, понижающих осмотический потенциал клеток и уменьшающих вероятность образования крупных кристаллов льда, способных вызвать их гибель просто из-за разрушения клеточной оболочки. Вот почему

случайные заморозки способны уничтожить большинство сельскохозяйственных культур.

Чтобы не допустить образования льда в клетках, уже давно применяется заражение растений мутантным штаммом бактерии *Pseudomonas syringae*. Полученные таким образом растения легко переносят заморозки вплоть до -8°C .

Однако оказалось, что бактерии мутантного штамма более живучи и могут вытеснить природный штамм этих бактерий, который, попадая в верхние слои атмосферы, способствует кристаллизации атмосферной влаги. Вероятно, вытеснение природного штамма могло бы привести к изменению климата и экологической катастрофе.

ГМ–продукты: за и против

Поскольку с открытием метода генной инженерии человечество приблизилось к небывалой возможности создавать новые виды растений и животных, то естественно, что у биотехнологий, как у любого развивающегося научного направления, появились не только свои защитники, но и враги, в т. ч. и в среде ученых.

Первые убедительно доказывают, что ГМ-растения не только безвредны, но и полезны. Такие растения обладают повышенным содержанием питательных веществ (в особенности белка), необычной стойкостью ко многим видам заболеваний и вредителей и губительным факторам окружающей среды. Все это позволяет, во-первых, значительно повысить урожайность, не привлекая для этого дополнительные гектары земли. Проблема перенаселения планеты — тема отдельного разговора. С годами численность людей на планете только увеличивается, а ведь кушать хочется каждому! Во-вторых, использование ГМ-растений позволяет резко снизить необходимость внесения токсичных химических инсектицидов и гербицидов, что в свою очередь значительно снизит уровень загрязнения сточных вод, отравляющих и живую природу, и людей.

В связи с этим существует мнение, что протесты против ГИ организуются и поддерживаются производителями удобрений и ядохимикатов, которым широкое использование ГМ-растений грозит убытками. В пользу такого мнения выступили 15 тысяч ученых (в т. ч. 20 нобелевских лауреатов), поставивших

свою подпись под утверждением, что ГМ-растения безвредны для здоровья.

В частности, по словам Константина Скрыбина — академика Российской академии сельскохозяйственных наук, «за всю 30-летнюю историю развития биотехнологии не зарегистрировано ни одного случая, доказывающего, что ГМ-продукты опасны для здоровья. Простой пример: США являются безусловным лидером по производству и потреблению ГМ-продуктов. При этом в стране, где любимым способом внезапного обогащения являются суды по любому поводу, не было подано ни одного иска к компаниям, производящим ГМО. Мы не раз объявляли премию в 10 000 долларов любому, кто приведет *научные* доказательства вреда для здоровья ГМ-продуктов, полученных из зарегистрированных ГМ-культур. Однако до сих пор ни одного желающего не нашлось. Непоправимый ущерб окружающей среде, о котором любят говорить «зеленые», также весьма неоднозначен. Достаточно сказать, что после внедрения ГМ-растений США впервые вышли на уровень 1920-х годов по использованию токсичных пестицидов».

В 1990 году широкомасштабное применение химических инсектицидов для борьбы с насекомыми вида *Helicoverpa armigera*, вредителями хлопчатника, привело к появлению мутантов этих вредителей, устойчивых к химическому инсектициду, и к их беспрецедентному размножению. Как утверждают сторонники ГМ-продуктов, сравнительный анализ рисков, сопряженных с применением обычных растений, нуждающихся в химических инсектицидах, и трансгенных, самостоятельно поражающих вредителей, свидетельствует в пользу трансгенных.

Главное обвинение противников ГМ-продукции заключается в том, что поскольку долгосрочные исследования безопасности ГМ продуктов нигде и никем не проводились, нет уверенности в том, что их вред для здоровья человека не проявится через много лет. По данным санитарных служб Голландии, Швейцарии, Дании и специалистов Медицинского Совета Великобритании употребление нового вида кукурузы, в которой в 2-3 раза повышено содержание белка, может со временем необратимо изменить иммунную систему людей, спровоцировать онкологические и нервные заболевания.

Вот типичные примеры исследований противников ГМО:

“Данные правительственных исследований в Шотландском Институте Урожая показали опасность ГМ растений для насекомых. Божьих коровок кормили тлей, которую разводили на ГМ картофельных растениях. Жизнь божьих коровок сокращалась до половины ожидаемой продолжительности жизни, а их плодовитость и кладка яиц значительно уменьшалась”.

“Неблагоприятное воздействие пыльцы трансгенной кукурузы на насекомых было показано в исследовании личинок бабочки Монарх *Danaus plexippus*. У личинок, питавшихся растительным млечным соком с ГМ-пыльцой, наблюдалось замедленное развитие и низкий процент выживаемости”.

Но исследовать на насекомых опасность растений, специально сделанных ядовитыми для насекомых — такие опыты нельзя считать корректными. Объективные исследования показали, что общее количество видов насекомых на полях, засеянных инсектицидными растениями, снижается ровно на один вид — основного вредителя данной культуры. А общее количество насекомых на поле, на котором растут устойчивые к вредителям сорта, намного больше, чем на поле, на котором всех насекомых травят химическими инсектицидами. И насекомоядных птиц на таких полях живет больше.

В статьях противников трансгенных растений постоянно цитируется единственное исследование Арпада Пушта из Университета Абердина (Великобритания). Он показал, что кормление крыс ГМ картофелем с геном лектина луковиц подснежника в течение 10 дней привело к угнетению иммунной системы и нарушению деятельности внутренних органов (разрушалась печень, изменялись зубная железа и селезенка, уменьшался объем мозга) по сравнению с крысами, которые питались обычным картофелем.

В действительности опыты Пушта подтвердили лишь давно известный факт: многие белки, относящиеся к классу лектинов, ядовиты. Методы генной инженерии тут ни при чем: те же нарушения здоровья наступили бы у крыс, которых кормили бы картошкой с добавкой пюре из подснежников или чистого лектина. Белки, которые синтезируют трансгенные растения, и сами эти растения проходят несколько стадий испытаний на токсический и аллергический эффект, вначале на животных, а потом — на людях.

Опасность масштабного применения ГМО связывают и с вытеснением ими других растений, что ведет к значительному сокращению биологического разнообразия. Еще одна причина связана с нарушением трофических цепочек: появление ГМ растений, устойчивых к насекомым, становится причиной исчезновения сначала многих видов насекомых; потом птиц и мелких млекопитающих, питающихся насекомыми; затем и крупных млекопитающих, употребляющих в пищу мелких животных. Но особую опасность представляет третья причина: вероятность встраивания “чужих” генов в геномы других организмов в результате горизонтального переноса генов. Однако у сторонников трансгенных растений есть аргументы и против этих опасений.

Похоже, человечеству в ближайшее время предстоит ответить на непростой вопрос, какое из двух зол меньше — химикаты или генная инженерия? Или, может, следует найти некую “золотую середину”?

На наш взгляд, подобное противостояние научных лагерей в итоге выгодно всем: скептицизм и осторожность одних послужит дополнительным фильтром, заставляющим энтузиастов биотехнологии внимательнее относиться к проверке своих достижений, прежде чем выпускать их в массы.

Развитие науки никогда не протекало плавно, и внедрение любой новой технологии сопряжено с ошибками. Но ведь на то они и ошибки, чтобы на них учиться и, главное, их исправлять. Ведь никогда не ошибается лишь тот, кто ничего и не делает.

О проекте “Геном человека”

Говоря о биотехнологии, нельзя не упомянуть грандиознейший за всю ее историю проект, объединивший усилия нескольких тысяч ученых из разных стран — расшифровку генома человека. Это был один из самых дорогостоящих научных проектов в истории цивилизации — на него было потрачено более 2,7 миллиардов долларов.

Цель проекта заключалась в создании подробной карты человеческого генома, включающей определение всех его генов, их функций и взаимодействий в норме и при нарушениях, приводящих к болезням. Он длился 12 лет и полностью завершился к 2001 году. Результатом явились почти три миллиарда букв

генетического кода человека, приведенные к строгой системе. Был идентифицирован 29 181 ген. Расшифрованный код доступен в сети Интернет.

Что такое карта генома? Грубо говоря, это линейная схема расположения генов в хромосомах с указанием относительных расстояний между ними

Карты генома, подобно географическим, можно строить с различной степенью детализации. Последняя зависит от точности метода анализа. Первые генетические карты давали лишь общее представление о структуре ДНК. В них расстояние между генами — мельчайшими “различимыми на местности объектами” — составляло порядка 7-10 килобаз.

Килобаза (от англ. base - основание) - единица измерения длины молекулы ДНК, равная тысяче пар оснований (нуклеотидов)

Существует всего четыре вида оснований и, соответственно, четыре вида их пар. Как известно из информатики, объект, имеющий 4 состояния, несет в себе 2 бита информации. Значит, 1 байт = 8 битам = 4 парам оснований. Получается, что одна килобаза соответствует 250 байтам, а во всей ДНК человека заключено около 750 Мб информации (что соответствует емкости современного компакт-диска).

В наше время достигнута максимально возможная степень детализации — с точностью до пары нуклеотидов. Современная генетическая карта представляет собой полную последовательность нуклеотидов с указанием, где кончается один ген и начинается следующий.

В основе расшифровки генома лежит сложный процесс, называемый **секвенированием** (от англ. sequence — последовательность). Он базируется на механизме “разрезания” ДНК посредством рестриктаз. Грубо говоря, сначала ДНК “шинкуется” на кусочки, каждый из них анализируется по отдельности, и затем воссоздается первоначальная структура. Это так называемые методы «первого поколения». Однако в процессе реализации проекта «Геном человека» было разработано множество других, более мощных методов.

Когда в 1988 г. один из первооткрывателей знаменитой двойной спирали ДНК Дж. Уотсон публично заявил, что наука вплот-

ную приблизилась к раскрытию химической основы человеческой ДНК, к его словам отнеслись довольно скептически.

К тому времени уже было известно, что геном человека насчитывает около 3 млрд. пар нуклеотидов, и эта величина казалась необозримо большой, ведь тогда расшифровка одного-единственного гена занимала годы кропотливой работы целой лаборатории, а в среде генетиков, по аналогии с правилом «один ген — один белок», бытовало выражение «один ген — одна карьера». Поэтому сама мысль о возможности получения такого объема информации представлялась совершенно фантастической. Критики Уотсона считали, что решение предложенной им задачи малореально в научном отношении, поскольку для него потребовалось бы как минимум 30-40 тысяч лет.

Но факт остается фактом: стремительное развитие науки и техники позволило расшифровать 99% человеческого генома всего за 12 лет. На рисунке изображен график, иллюстрирующий динамику процесса секвенирования ДНК по годам.

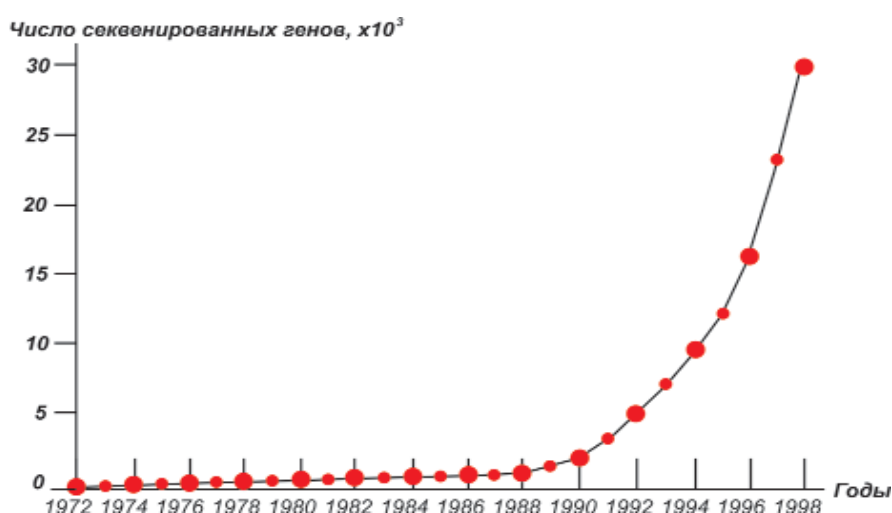


Рис 192. Нарастание числа секвенированных генов человека по годам

Если такие тенденции сохранятся и дальше, то, возможно, через несколько лет родители каждого новорожденного младенца смогут получать его индивидуальный генетический «паспорт» прямо в роддоме.

Одной из причин столь поразительного прогресса науки явилось, в первую очередь, развитие информационных технологий. Специально разработанные программы для анализа распределения нуклеотидов в ДНК позволили достигнуть феноменально быстрой расшифровки большинства «слов» текста нашей «книги жизни».

Некоторые сведения о человеческом геноме

Функции генов

Развитие генной инженерии помимо практического применения имеет еще и большое научное значение. Благодаря успехам в этой области удалось впервые оценить функции генов в организме. На диаграмме представлено примерное распределение функций генов человека.

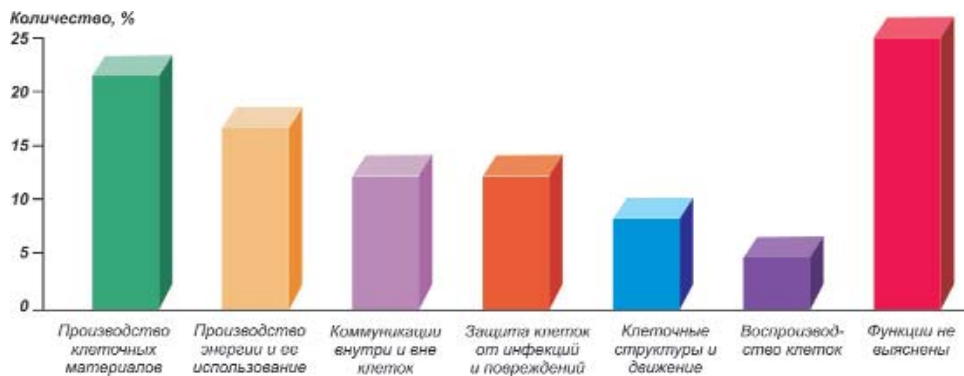


Рис 193. Примерное распределение генов человека по их функциям

Получена интересная информация о количестве генов, отвечающих за образование и работу отдельных органов и тканей человеческого тела. Оказалось, что больше всего генов предназначено для формирования и поддержания активности мозга (3195), а меньше всего — для создания эритроцитов (8).



Рис 194. Количество генов, вовлеченных в развитие и функционирование органов и тканей человека

Генетическая общность человека и других биологических видов

Помимо человека, к настоящему времени полностью секвенированы геномы более 600 видов живых организмов. При этом оказалось, что количество генов и длина ДНК у разных видов заметно различаются. Если в хромосомах человека содержится около 750 Мб информации, то, например, у бактерии *Mycoplasma genitalium* — всего 145 Кб, у бактерии кишечной палочки *Escherichia coli* — 1 Мб, у плодовой мушки дрозофилы — 30 Мб, а у лабораторной мышки... почти 750 Мб. То есть, с точки зрения объема наследственной информации, человек мало чем отличается от мыши! Более того, результаты расшифровки генома грызуна показали, что у нас совпадают до 80% генов, а 99% можно назвать очень похожими.

Куриный геном в три раза короче генома человека (около 250 Мб). Однако при этом у человека и курицы обнаружено около 60% общих генов.

Расшифрованный геном знаменитой рыбы фугу (*Takifugu rubripes*), которая является изысканным лакомством в Японии, но при неправильном приготовлении становится смертельно ядовитой, еще более поразил воображение ученых. Размер генома фугу равен 91 Мб, что составляет всего около 12% от генома человека. Число же генов у этих двух организмов почти одинаково и примерно равно 31 000, а число общих генов у фугу и человека достигает 75%!

Этот феномен объясняется тем, что наша ДНК состоит, строго говоря, не только из генов. Ген — это участок ДНК, кодирующий молекулярную структуру определенного белка. Иначе говоря, это отрезок, на котором, как в файле, записана информация о последовательности аминокислот в белке.

Но далеко не все сочетания нуклеотидов несут смысловую нагрузку, кодируя конкретные белки. Подавляющее большинство нуклеотидных последовательностей в ДНК — так называемые *интроны*, не кодирующие ничего, и, вроде бы, не несущие никаких функций. Для них придумали даже такое обидное обозначение, как “*джанк-ДНК*” (от англ. junk — хлам, мусор). Конечно, о ненужности таких участков не может быть и речи: они хоть и не кодируют белков, но выполняют свои специфические — как правило, регуляторные — функции.

Необычный же геном рыбы фугу состоит сплошь из «смысловых» генов, кодирующих конкретные белки. Эти гены расположены в геноме фугу в непосредственной близости один к другому и поэтому могут быть легко идентифицированы. Вот почему геном фугу служит удобной моделью для генетического анализа.

Протовирусы

При расшифровке ДНК было обнаружено, что помимо собственного генетического материала в геноме человека присутствует большое число геномов вирусов, которые когда-то давно попали в него и там остались. Эти «молекулярные останки» были названы *протовирусами*.

Мы очень мало знаем об их биологической роли, но удивительно и крайне интересно то, что у обезьян эндогенных вирусов намного меньше или нет вообще. Получается, что по чужеродным элементам генома человек от обезьян отличается гораздо сильнее, чем по самим генам. Это дало основание одному из известных исследователей генома академику Е. Д. Свердлову высказать мысль о том, что вирусы могли сыграть важную роль в «очеловечивании» обезьяны.

По словам некоторых ученых, эти «спящие» вирусы могут в любую минуту «проснуться» и принести смертоносные эпидемии. В частности, существует гипотеза, что ВИЧ всегда жил в нас, а потом мутировал и приобрел патогенные свойства, которыми изначально не обладал. То же самое, как предполагают некоторые ученые, происходило и с вирусами бубонной чумы, холеры, тифа, гриппа.

Упаковка ДНК в хромосому

Молекулярную основу генома составляет молекула ДНК — знаменитая «нить жизни», состоящая у человека из более чем 3 млрд. пар нуклеотидов, соединенных между собой в длинные нити. Установлено, что длина одной молекулы ДНК в человеческой клетке составляет около 2 метров. ДНК содержится в хромосоме, а каждая клетка человека содержит 23 пары хромосом. Если учесть, что тело взрослого человека состоит из примерно 50 триллионов клеток ($5 \cdot 10^{13}$), то общая длина всех молекул ДНК в организме — около 10^{11} км, что в тысячи раз превышает расстояние от Земли до Солнца!

Каким же образом такие длинные молекулы могут умещаться в маленьком ядре клетки? Это возможно, во-первых, благодаря тому, что поперечные размеры молекулы ДНК составляют всего 2 нм, а во-вторых, благодаря удивительно точному механизму упаковки ДНК.

ДНК в хромосомах чрезвычайно хитроумно уложена в комплексе со специальными ядерными белками, которые называются *гистонами*. На рисунке изображена приблизительная схема упаковки ДНК.



Рис 195. Схема укладки молекул ДНК в хромосомах

Достойна восхищения и плотность записи данных в ДНК: всего в 8 кубических микронах этой удивительной молекулы содержится 750 Мб генетической информации. Возможно, в будущем биомолекулярная память на основе ДНК позволит хранить в объеме современной “флэшки” 250 миллиардов гигабайт. Что можно записать в такую память? Ну, например, геномы всех когда-либо живших на Земле людей с 30-часовыми видеороликами из жизни каждого.

Практическое значение результатов проекта “Геном человека”

Итак, программа “Геном человека” завершена. Теперь, зная последовательность почти трех миллиардов нуклеотидов, ис-

следователи получили возможность выяснить причины многих заболеваний, имеющих генетическую причину. Только одна часть работы — расшифровка 20-й хромосомы — значительно ускорила исследования в области лечения сахарного диабета, лейкемии и других заболеваний.

В настоящее время описано около 3 тысяч заболеваний, причина которых заключается в поломке генетического аппарата. Число изученных наследственных болезней год от года растет. Эти сведения помогут разобраться в генетических программах развития и функционирования нашего организма, причинах возникновения раковых заболеваний и старения.

Появились принципиально новые подходы к диагностике и лечению наследственных заболеваний. К настоящему времени с помощью генотерапии — введения в организм собственных стволовых клеток с исправленными копиями гена — вылечили только 12 детей, больных тяжелым комбинированным иммунодефицитом, редким врожденным заболеванием, при котором для больного смертельна любая инфекция. Но в различных лабораториях уже разрабатываются способы лечения сотен *моногенных* (вызванных нарушением в единственном гене) болезней. При дальнейшем развитии науки станет возможным исправление дефектных генов прямо в зародыше, что позволит избежать наследственных болезней.

Были созданы международные банки данных, содержащие расшифрованные геномы разных организмов. Теперь любой специалист в мире может воспользоваться собранной там информацией.

Наномедицина

С развитием биотехнологии тесно связано качественно новое направление медицинской науки — молекулярная *наномедицина*. С ней связывают такие уникальные вещи, как:

- Лаборатории на чипе;
- Адресная доставка лекарств к пораженным клеткам;
- Новые бактерицидные и противовирусные средства;
- Диагностика заболеваний с помощью квантовых точек;
- Нанороботы для ремонта поврежденных клеток;
- Нейроэлектронные интерфейсы и многое другое.

В настоящее время подобные проекты — уже не только плод воображения писателей-фантастов, но и реальные средства современной медицины.

Сообщения о новых открытиях в наномедицине появляются так часто, а разрабатываемые в ее рамках проекты столь многочисленны и разнообразны, что полностью описать их в рамках данной главы просто невозможно. Однако с некоторыми из них мы познакомимся поближе.

Лаборатория на чипе

Каждый из нас хотя бы раз в жизни сдавал, к примеру, анализ крови. При этом результатов анализа, как правило, приходилось ждать несколько дней, а то и недель — ведь сначала образец попадал в лабораторию, дожидался там своей очереди, затем анализировался на специальном оборудовании, и лишь после этого возвращался (в виде распечатки результатов) к врачу. Помимо этого нам приходилось еще и здорово раскошелиться, так как в стоимость анализа “включены” оплата труда врача и лаборантов, стоимость транспортировки пробирок, стоимость эксплуатации дорогостоящего оборудования, аренда помещений лаборатории и т.д. А ведь порой скорость, точность и доступность анализа — вопрос жизни и смерти в прямом смысле слова.

И как было бы здорово, если бы врачи или даже сами пациенты могли мгновенно проводить сложнейшие анализы и получать результаты в течение нескольких минут! Представьте себе, какой потрясающе компактной и эффективной могла бы быть лаборатория, если бы все ее пространство (включая инструменты, столы, проходы, клавиатуры, мониторы, и т. д.) можно было бы “сжать” до размеров обыкновенного микрочипа, а все производимые в ней человеческие действия по доставке, перемещению и анализу образца полностью автоматизировать!

А теперь представьте, что такие лаборатории уже существуют! Называются они *лабораториями на чипе* (от англ. *lab-on-chip*). Один чип размером порядка 4x4 см может заменить целый комплекс оборудования, необходимого для анализа ДНК/РНК, установления родства, определения генетически модифицированных организмов, ранней диагностики онкологических заболеваний, изучения эффективности трансфекции

клеток, количественного определения белков, определения уровня экспрессии генов и многого другого!

При этом такая кроха-лаборатория умеет анализировать одновременно до 12 разных образцов, а время анализа, занимавшего раньше недели, сокращается до 15-30 минут. Если вы все еще не верите в то, что это возможно, вспомните первые ЭВМ: они занимали огромные комнаты, а их обслуживанием занимался целый коллектив специально обученных инженеров-операторов. А сегодня любой карманный компьютер, несмотря на свои малые размеры, в тысячи раз превосходит по быстродействию и функциональности самой “продвинутой” компьютер того поколения.

Аналогия с компьютером здесь не случайна, поскольку на первый взгляд лаборатории на чипе очень похожи на своих электронных собратьев: они также создаются на кремниевых подложках, а крохотные ячейки связываются микро- или нано-”дорожками”. Отличие заключается в том, что по дорожкам у них не всегда течет ток. По многим из них течет жидкость из крохотных резервуаров, имплантированных в чип при производстве.

Функционально ячейки тоже отличаются. Если на микросхеме это могут быть ячейки памяти или логические элементы, то в лаборатории на чипе это клапаны, резервуары и биологические или химические реакторы.

Реальным примером подобной технологии могут служить продукты ведущих в этой области компаний Affymetrix (“*GeneChip*”) или Agilent (“*LabChip*”), производящих лаборатории на чипе для генетических анализов.

В таких чипах ДНК анализируется методом **полимеразной цепной реакции** (ПЦР). Его суть заключается в последовательном нагревании и охлаждении раствора, содержащего образец анализируемой ДНК, два *праймера* (участки ДНК в 20 нуклеотидов, комплементарные участкам анализируемого ДНК), смесь четырех нуклеотидов и фермент ДНК-полимераза. При нагревании двунитевые отрезки ДНК расщепляются; при охлаждении под действием фермента каждая из однонитевых цепочек достраивается до двунитевой копии исходного отрезка. Число отрезков молекулы ДНК удваивается при каждом цикле, и из каждой молекулы в исходной пробе через 30 циклов образуется 2^{30} — более миллиарда копий.

Метод был изобретен в 1987 г, и в то время ученым приходилось каждые несколько минут вручную переставлять пробирки из одной водяной бани в другую и после каждого цикла добавлять в них новую порцию фермента. Сегодня ту же работу выполняют миниатюрные автоматизированные лаборатории. Как видим, менее чем за 20 лет метод ПЦР усовершенствовался примерно так же, как компьютеры — за полвека.

Компания CombiMatrix предложила чип размерами с почтовую марку для определения биологической опасности. Устройство, содержащее такой чип, может определить присутствие нескольких видов микроорганизмов, применяющихся в составе бактериологического оружия. На его базе CombiMatrix выпустила детектор HANAA (подходящее название, не правда ли?), который можно использовать в полевых условиях. Прибор помещается в ладони, питается от батареек и весит около одного килограмма. Каждая микроскопическая ячейка чипа заменяет установку для проведения ПЦР. Прибор анализирует ДНК и соотносит с одним из запрограммированных типов патогенной ДНК. Ячейки, в которых присутствует ДНК одного из определяемых чипом патогенных микроорганизмов, флюоресцируют, а их свечение улавливается датчиком. Процесс обработки четырех различных образцов занимает 30 минут. Как говорят разработчики прибора, он может опознать патоген при концентрации 10 бактерий в 1 пробе (1 проба представляет собой капсулу диаметром 5 мм и 2 см длиной).

CombiMatrix также выпустила устройство на основе чипа, в котором проводится иммуноферментный анализ. В его ячейках светятся антитела к ядам, не содержащим ДНК. Такое устройство может опознавать 5 токсинов типа рицина.

Для производства лабораторий на чипе используются почти те же технологии, что и для производства микросхем, включая литографию и травление. Однако лаборатория на чипе, в отличие от планарной микросхемы, должна быть трехмерной. Причина заключается в том, что если электричество может протекать по плоскому проводу, то жидкость не течет по сплюснутому шлангу. Таким образом, при производстве лабораторий на чипе используются совмещенные методы планарной и MEMS/NEMS-технологий.

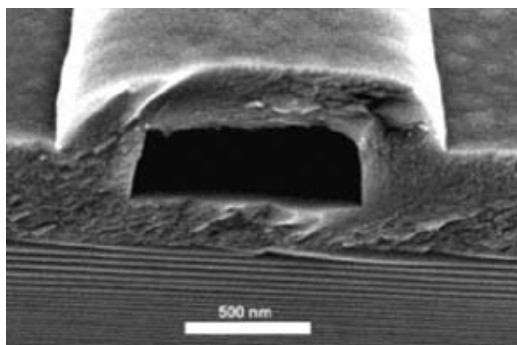


Рис 196. Участок лаборатории на чипе в разрезе

Итак, лаборатория на чипе представляет собой МЭМС-устройство для биохимических анализов. Принимая во внимание стремительный прогресс в области МЭМС-систем, можно прогнозировать, что в дальнейшем размеры и стоимость устройств будут уменьшаться (а функциональность, соответственно, расти), и через несколько лет такая лаборатория станет для нас таким же привычным средством диагностики самочувствия, как сегодня термометр.

Нанотехнологии против вирусов и бактерий

Бактерицидные свойства наночастиц серебра подробно описаны в главе, посвященной химическим аспектам нанотехнологий. Поэтому здесь мы лишь кратко перечислим некоторые возможности их применения в медицинских целях:

- Препараты на основе наночастиц для эффективного за-
лечения ран;
- Обеззараживающие угольные фильтры с наночастицами;
- Бактерицидные краски для профилактики заболеваний,
передающихся воздушно-капельным путем;
- Самодезинфицирующаяся одежда и белье;
- Обеззараживающие аэрозоли и др.

Кроме того, как оказалось, серебряные наночастицы — не единственные наноматериалы, пригодные для борьбы с бактериями. Недавно ученые из Питсбургского университета создали нанокатализатор, который производит углеродные нанотрубки одинакового размера и заставляет их собираться в структуру, напоминающую ковер. При добавлении к «ковру» различных биологических агентов он меняет свой цвет — от красного до желтого.

Самым удивительным оказалось то, что этим «наноковром» можно убивать различные микроорганизмы! В эксперименте на бактериях *E. coli* отдельные нанотрубки «ковра» проткнули их клеточные мембраны, чем вызвали гибель микроорганизмов.

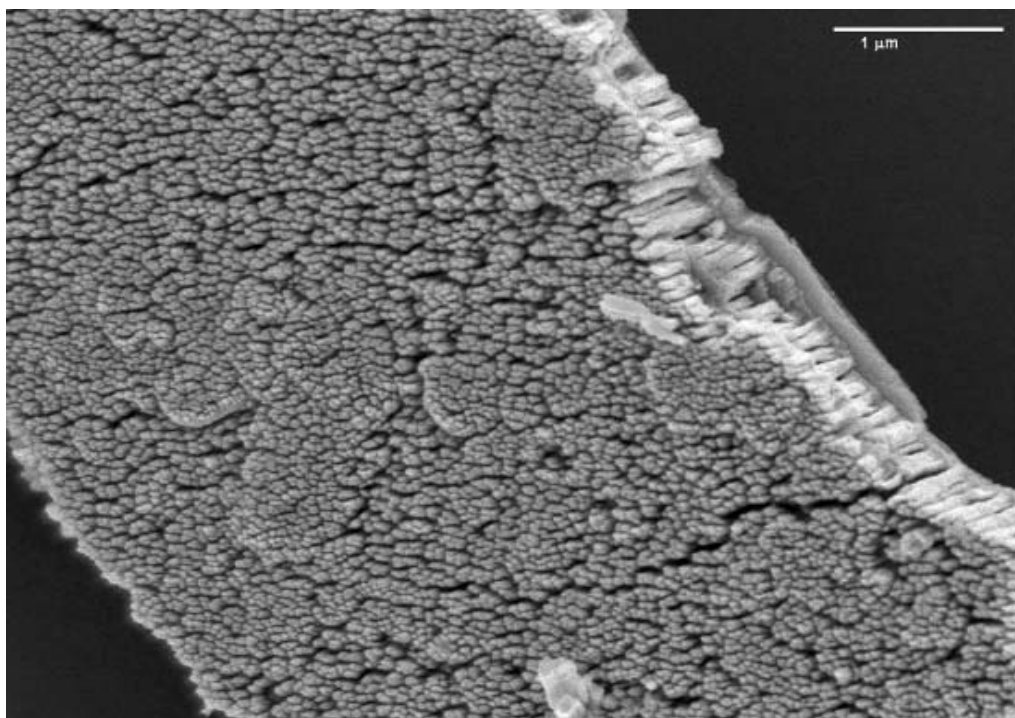


Рис197. Фотоизображение "ковра" из нанотрубок*



Рис 198. Нанотрубка протыкает бактериальную мембрану*

При взгляде на рисунок на ум приходит интересная аналогия: когда человек только начал осваивать мир, он использовал копье для охоты и борьбы с опасными тварями. Сегодня, проникнув в мир клеток и бактерий, человек также “идет с копьем на бактерию”, используя в качестве оружия острую и тонкую нанотрубку.

* Перепечатано с <http://newsbureau.upmc.com/>

Если говорить о потенциальных применениях этого открытия, то, возможно, «наноковер» может быть использован в качестве биологического детектора либо бактерицидной поверхности в фильтрах для очистки воды, воздуха и т. д.

Адресная доставка лекарств в пораженные клетки

Чтобы лекарство было эффективным важно, чтобы его молекулы попали к нужным клеткам: антидепрессанты попали в мозг, противовоспалительные средства — в места воспалений, антираковые препараты — в опухоль и т. д. Способность молекул вещества попадать в теле пациента туда, где они необходимы, называется *биологической усвояемостью*.

Биологическая усвояемость — камень преткновения всей современной фармацевтики. Более 65% денег, потраченных на разработку новых лекарств, выбрасывается на ветер из-за их плохой усвояемости. Один из способов улучшить ее — просто увеличить дозу лекарства. Однако многие лекарства токсичны, и увеличенная доза может вызвать у пациента тяжелые последствия (а порой даже убить). Это особенно важно для противораковых препаратов, которые убивают не только больные, но и здоровые клетки.

Феномен раковых клеток, с точки зрения биотехнолога, заслуживает отдельного рассмотрения. Онкологические заболевания являются одной из главных причин смертности. Самое поразительное, что смерть человека вызывают его же собственные клетки, превратившиеся каким-то образом в бессмертные. В общих чертах этот процесс выглядит следующим образом.

По замыслу природы, все клетки организма должны регулярно обновляться, то есть какое-то время жить, делиться, функционировать, а затем умирать, освобождая пространство для своих молодых собратьев. Во взрослом организме деление клеток строго контролируется и происходит в разных тканях по-разному, а некоторым клеткам (например, нейронам) деление вообще запрещено. Иначе нельзя, ведь если бы каждая клетка делилась, как ей вздумается, организм быстро превратился бы в бесформенный сгусток клеток.

В природе роль биологических часов, регулирующих длительность жизни клетки, выполняют так называемые *теломеры* — особые участки ДНК на концах хромосом. Каждое деление

клетки сопровождается укорачиванием ее теломеров, и, когда последние укорачиваются до предельных размеров, клетки «понимают», что пришла пора умирать, и запускают механизм клеточного самоубийства — апоптоза. Раковые же клетки не подвержены процессу старения, поскольку всякий раз «умудряются» восстанавливать длину своих теломеров при помощи особого фермента *теломеразы*, и поэтому способны размножаться бесконечно.

В результате действия патогенных физических и химических факторов в раковую может превратиться любая клетка организма. До поры до времени такая клетка ничем не отличается от других и строго подчиняется “правилам общежития”, принятым в многоклеточном сообществе. Но в какой-то момент она перестает подчиняться законам природы и начинает бесконтрольно делиться, требуя все больше территориальных, материальных и энергетических ресурсов организма в ущерб другим, более “законопослушным” клеткам (причем такое поведение передается и всему потомству раковой клетки).

В месте скопления быстро размножающихся раковых клеток образуется *опухоль*, которая, если ее вовремя не ликвидировать, может дать *метастазы* — множественные очаги болезни, возникающие по всему телу в результате распространения раковых клеток кровотоком. В процессе метастазирования, как правило, уже поздно что-либо делать — человек обречен на медленную мучительную смерть.

Коварство клетки-предательницы состоит в том, что для «сил безопасности» нашего организма, иммунной системы, эта клетка — своя, такая же, как и все остальные клетки. Вот почему организм, способный с помощью иммунитета успешно бороться с вторжением извне всевозможных бактерий и вирусов, часто оказывается беспомощным перед лицом “внутреннего врага”. Правда, в организме есть еще и “тайная полиция”, способная на ранних стадиях справиться с раковой клеткой. Это особые клетки, Т-лимфоциты (их еще называют *Т-киллерами*). Однако раковая клетка умеет «обманывать» их, выделяя в окружающую среду особый токсин, нарушающий нормальную для Т-киллеров кислотность (рН) и тем самым не подпуская их к себе.

Существует гипотеза, что раковые клетки периодически появляются в каждом организме, но если организм обладает

достаточно сильным иммунитетом, то ему ничего не стоит их вовремя распознать и уничтожить. Но возрастающее с каждым годом число онкологических заболеваний убедительно свидетельствует, что человеку, ослабленному стрессами, отравленному загрязненной средой обитания и вредными привычками, просто не хватает сил эффективно бороться с этими “хитрыми” врагами. То же пресловутое курение (и пассивное в том числе) повышает риск заболевания раком легких на 60%.

Недостаток знаний о причинах появления опухолей ограничивает и возможности их лечения. Сегодня врачи еще не лечат раковые клетки («не перевоспитывают» их), а просто стараются убить, чтобы продлить жизнь всего организма. Для этого у онкологов есть набор проверенных методов: операция, химиотерапия, лучевая терапия или их сочетание.

Операция направлена на то, чтобы удалить саму опухоль. Для этого часто приходится вырезать больные ткани полностью, что очень травматично для организма. Такой метод лечения на ранних стадиях часто оказывается эффективным, однако часть опухолевых клеток может остаться в организме, и оперативное лечение дополняют лучевым или химиотерапевтическим.

Лучевая терапия основана на том, что опухолевые клетки более чувствительны к различным видам облучения, чем здоровые ткани. Поэтому их убивают, облучая больной орган, например, рентгеновскими лучами. Но в этом случае часто гибнут и здоровые клетки, а из-за патогенного действия ионизирующего излучения на организм часто развивается лучевая болезнь.

Химиотерапевтическое лечение также основано на повышенной чувствительности опухолевых клеток к различным химическим препаратам. Химиотерапия достаточно эффективна, но она сильно повреждает все клетки организма, в т. ч. костный мозг — главный кроветворный орган и «склад запчастей» — стволовых клеток. Поэтому увеличивать дозу можно лишь до определенных пределов.

Итак, проблема всех современных методов лечения рака заключается в том, что лекарственные препараты действуют как на больные, так и на здоровые клетки, то есть не избирательно. Сказывается также и проблема биоусвояемости препаратов, которые приходится вводить в больной организм в больших количествах, чтобы победить болезнь не умением, а чис-

лом. Вот почему от подобных «бомбардировок» возникает много побочных эффектов.

Поэтому сегодня учеными всего мира ведутся активные работы по адресной доставке лекарств, которые будут точно попадать в цель, не повреждая других органов. Для этого пытаются создать некое “транспортное средство” для точной доставки лекарств в клетку, так как многие болезни (не только рак) зависят от нарушения внутриклеточных механизмов, повлиять на которые можно только доставив лекарство в клетку.

Поиск молекулярного транспорта начался в восьмидесятые годы, когда исследователи стали активно заниматься генной инженерией. В частности, группе российских ученых под руководством Александра Соболева удалось разработать специальную макромолекулу-транспортёр, способную доставить лекарство в дефектную клетку.

Опыты, которые ставила группа Соболева на раковых клетках, показали, что эффективность лекарственного вещества, которое доставляется макромолекулой-транспортёром в ядро, при различных типах рака может возрасти в 250-1000 раз, а это значит, что во столько же раз можно снизить дозу препарата, чтобы вызвать нужный эффект.

Конструкция транспортёра состоит из четырех функциональных модулей: лиганда, эндосомолитического модуля, сигнала внутриядерной локализации и собственно носителя лекарства. На первом этапе работает *лиганд* — модуль, обеспечивающий обнаружение больной клетки (например, раковой), ее “молекулярное узнавание”. Он же отвечает и за поглощение всей конструкции клеткой. Второй модуль — *эндосомолитический* — разрывает эндосому, “пузырь”, образующийся вокруг транспортёра при его втягивании внутрь клетки. Далее в игру вступает третий модуль, который позволяет транспортёру проникнуть через поры ядерной мембраны. И наконец, четвертый модуль, несущий лекарство, позволяет ему приступить к выполнению основной задачи — уничтожению ядра.

Откуда взяли модули макромолекулы-транспортёра? Один из используемых лигандов был взят из человеческого гормона, обладающего высоким сродством к рецепторам соответствующей клетки-мишени, эндосомолитический модуль — из дифтерийного токсина, модуль внутриядерной доставки — из белка

обезьяньего вируса, носитель лекарства — из части гемоглобиноподобного белка кишечной палочки. Далее с помощью генно-инженерных методов была создана единая работоспособная конструкция.

“Меняя программу модулей, мы можем получить макромолекулы-транспортёры для лечения любого типа рака. К примеру, если для лечения какого-то заболевания нужно доставить лекарство не в ядро, а в другую органеллу клетки, то будет заменена программа модуля внутриклеточной локализации. Или меняется программа носителя в зависимости от лекарственного средства, которое необходимо доставить”, — объясняет Александр Соболев.

Помимо чисто генно-инженерных методов, ведутся разработки и в области применения различных наносистем для обнаружения и уничтожения раковых клеток. В качестве примера можно привести идею создания антираковых наносистем непосредственно в опухолевой ткани.

Было установлено, что если в клеточную ткань ввести растворы некоторых веществ, то наночастицы этих веществ зародятся, вырастут и соберутся в агрегаты на клеточных структурах ткани. Наночастицы почти не влияют на функционирование клеток, но делают их чувствительными к действию внешнего акустического поля (ультразвук). Если после образования наночастиц на них подействовать акустическими волнами, то они нагреются до 43°C за время, за которое клетки без наночастиц почти не изменяют температуры.

Это позволило предположить, что если найти вещества, наночастицы которых могут формироваться в раковых клетках со значительно большей вероятностью, чем в здоровой ткани, то раковые клетки можно будет селективно нагреть и убить. И такие вещества были найдены. Были получены интересные результаты действия одного из них (терофтала) на развитие раковой опухоли у мышей. Стало очевидным, что сами по себе наночастицы терофтала не влияют на развитие опухоли, а акустическое поле лишь слабо замедляет ее рост. Но если поле наложить после образования наночастиц терофтала, причем всего на 10 минут, объем опухоли в течение недели уменьшается на 80%!

Использование квантовых точек в качестве люминесцирующих маркеров

Медиков и биологов чрезвычайно интересует, как перемещаются в организме различные вещества (в частности, лекарства). Отслеживание такого перемещения позволяет им определить, как распределяются и усваиваются в организме новые препараты, то есть какова их биологическая усвояемость.

До недавнего времени для подобных исследований применялись различные красители, называемые *маркерами*, подмешиваемые к исследуемому веществу. Подкрашенные клетки были хорошо видны в оптический микроскоп на фоне бесцветных клеток организма, что позволяло делать довольно точные выводы об их локализации. Но органические красители, во-первых, могут быть токсичными, а во-вторых, для их обнаружения требуется облучение светом лишь определенной частоты, поскольку различные красители отражали различные частоты спектра. Следовательно, для одновременного исследования нескольких препаратов требовалось столько же источников света.

Данную проблему удалось решить с помощью нанотехнологий, а точнее — *квантовых точек*, которые мы рассматривали в одной из предыдущих глав. Напоминаем, что квантовые точки — это полупроводниковые кристаллы нанометрового размера, имеющие уникальные химические и физические свойства, не характерные для тех же веществ в макромасштабе. Учеными были получены уникальные флуоресцентные квантовые точки, причем разного цвета. Эти точки дают намного более мощный отблеск света, чем традиционные красители, и обладают особым биоинертным покрытием, которое, с одной стороны, защищает сами квантовые точки от «нападения» ферментов и других биологических молекул, а с другой — не дает возможности токсичным веществам попасть в организм, что очень важно для диагностики заболеваний. Кроме того, разные группы таких нанометок можно освещать одним общим источником.

Квантовые точки широко применяются в диагностических целях. В частности, их можно присоединять к биомолекулам типа антител, пептидов, белков или ДНК. А эти комплексы, в свою очередь, могут быть спроектированы так, чтобы обнаруживать другие молекулы (например, типичные для поверхности раковых клеток).

В одном из опытов квантовые точки селенида кадмия были соединены со специфическим антителом, реагирующим с поверхностью клеток раковой опухоли. Квантовые точки вводили в кровеносную систему мышей, которая разносила их по организму. Нанокристаллы попадали в опухоль и накапливались там (и практически нигде больше), в результате чего опухоль оказалась хорошо различимой визуально.

Применение квантовых точек может существенно расширить диагностические возможности медицины. Ведь можно сконструировать сотни разновидностей квантовых точек, соединяющихся в организме с различными биомолекулами или антигенами, и таким образом находить участки со специфическим сочетанием признаков заболевания.



Рис 199. Растворы квантовых точек выглядят как подкрашенная вода*

Дальнейшие планы исследователей еще заманчивее. Новые квантовые точки, соединенные с набором биомолекул, будут не только находить и показывать опухоли, но и осуществлять точную адресную доставку новых поколений лекарств.

Наносистемы и биотехнологии: подражая природе

В последнее время на стыке этих двух технологий появилось новое направление — *биомиметика* (био-жизнь, миметика-подобие). Живые организмы производят нанотехнологические операции на протяжении 4.5 миллиардов лет. Живая клетка использует ДНК, РНК и большое количество белков, чтобы строить клеточные структуры нанометровых размеров. Почему бы нанотехнологам не воспользоваться природными примерами для построения собственных наномашин?

* Перепечатано с <http://ehf.uni-oldenburg.de>

Сегодня биомиметические нанотехнологии находятся в зачаточном состоянии, но их развитие существенно ускорит создание наномашин.

Конструируя из белков

Живые организмы строят конструкции из белков, и инженеры думают, как это применить. Некоторые белки, например, могут формировать регулярные структуры в виде кристаллических решеток, которые затем можно использовать при конструировании наномашин и наноэлектронных устройств.

Бактерии на своей поверхности формируют слои кристаллического белка толщиной в одну молекулу, называемые *S-слои* (от англ. single-один), которые повторяются с шагом в 10 нм. Австрийские ученые решили использовать эти естественные «квантовые сверхрешетки» для построения искусственных белковых структур. Первое, что придумали исследователи — выгнать бактерию из *S-слоя* и порвать его на “субъединицы”. Однако эти субъединицы перестраивались на кремниевых и металлических подложках, а также на других синтетических полимерах. Если теперь к *S-слою* на подложке добавить специальные сенсорные молекулы, получится точный биосенсор. Используя характерную для белков боязнь ультрафиолета, исследователи использовали *S-слой* в качестве фоторезиста в литографии.

Другие ученые решили сконструировать из белков и неорганических соединений структуры, которых вообще не существует в природе. Однако из-за огромной сложности квантовых уравнений для белковых молекул даже современные суперкомпьютеры не могут рассчитать, как именно белки с определенной последовательностью аминокислот будут собираться в трехмерные структуры (так называемая проблема фолдинга, или свертки белка). Они пошли другим путем, заставляя вирусы синтезировать разнообразные белки из случайной последовательности аминокислот. Затем ученые попросту промыли оборудование и в нем остались только те белки, которые присоединились к подложке. Так можно создавать белки, образующие новые структуры, соединяясь с разными материалами. Осталось создать “библиотеку” вирусов, производящих белки-липучки для золота, серебра, оксида цинка, арсенида галлия и др.

На основе таких белков, соединенных с неорганическими веществами, можно сконструировать ряд квантовых точек, ко-

торые получают сегодня с помощью вакуумных технологий. Сборка квантовых точек с помощью гибридных белков может происходить при комнатной температуре и быть гораздо дешевле. Такие белки могут пригодиться и при создании наномашин.

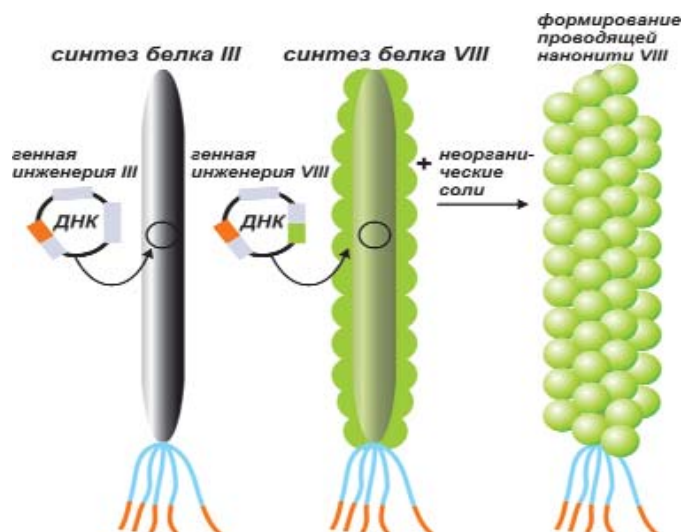


Рис 200. Фрагменты ДНК, кодирующие различные белки, внедряют в ДНК бактериофага, который синтезирует эти белки на своей поверхности. Вирус размножается, образуя длинные нити, покрытые металлом, которые можно использовать в наноэлектронике и наносистемах

Исследователи из МТИ обнаружили, что бактериофаги “собираются” в длинные нити. При этом их внешние белки могут соединяться с сульфидом цинка или сульфидом кадмия, образуя длинные (600 нм) электропроводящие нанонити диаметром 20 нм. При нагревании полученной структуры до 350°C бактериофаги выгорают, а тончайшая металлическая нить остается. Затем ее можно использовать, например, в наноэлектронике. Использованные в этом опыте вирусы состоят всего из шести белков, два из которых соединяются с неорганикой. Исследователи хотят продолжить эксперименты с более сложными по белковому составу вирусами, чтобы получить трехмерные проводящие структуры.

“Поделки” из молекул ДНК

В качестве стройматериала при создании наноструктур могут выступать не только белки, но и... молекулы ДНК. Эту идею развил Нэдриан Симэн, профессор химии из Нью-йоркского университета. Он достиг того, что молекула ДНК образует двумерные и трехмерные структуры. Сама по себе молекула ДНК слишком “мягкая” для того, чтобы сформировать жесткую

структуру. Но если соединить две молекулы, то полученная конструкция будет достаточно “жесткой”, подходящей для того, чтобы создавать устойчивые структуры.

Самым ярким примером такого конструирования из ДНК является первый в мире “шагающий” наноробот, недавно созданный учеными! Робот передвигается, используя оригинальный принцип: поочередно то присоединяет свои «ноги», состоящие из фрагментов ДНК, к базовой молекуле ДНК, то отсоединяет их от нее, продвигаясь таким образом вперед.

Почему исследователи использовали именно молекулы ДНК? На это есть две причины. Первая — цепи ДНК легко соединяются друг с другом, образуя комплементарные пары. Вторая — исследователи надеются, что в дальнейшем можно будет создать более сложных ДНК-роботов в больших количествах, используя репликативную инженерию живых клеток.

Наноробот состоит из двух “ног” - молекул ДНК длиной в 36 нуклеотидов. Сверху “ног” расположена еще одна упругая часть ДНК, связывающая обе “ноги” вместе (см. рисунок). Шагает робот по своеобразной “дороге” — еще одной базовой молекуле ДНК. “Ноги” присоединяются к комплементарным участкам на “дороге” при помощи свободных “якорных” цепей ДНК.

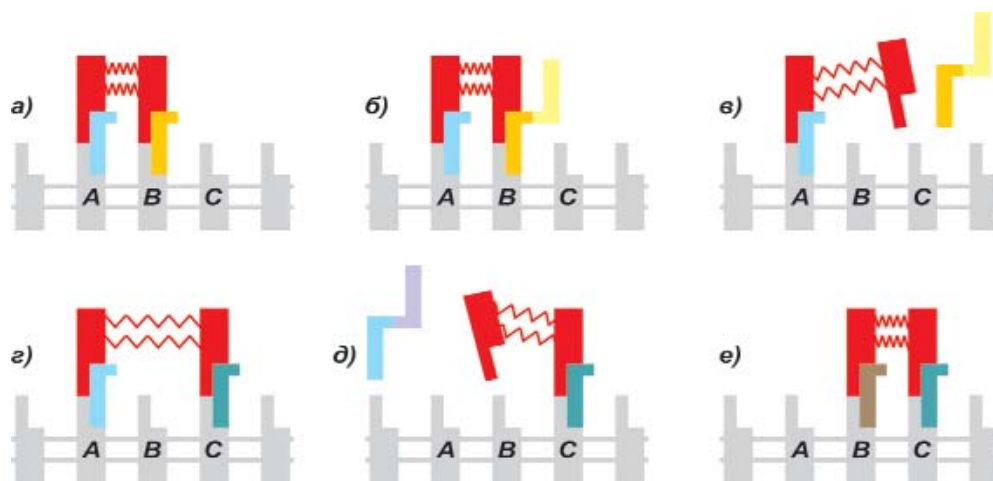


Рис 201. Принцип работы “шагающего наноробота”

- а) Две ДНК-ноги (обозначено красным) присоединены к комплементарным участкам ДНК-дороги (А и В) при помощи якорей (голубой и оранжевый);
- б) Свободная цепь ДНК присоединяется к правому якорю;
- в) Свободная цепь убирает правый якорь, освобождая правую «ногу» от пары В;
- г) Якорная цепь пары С связывает свободную правую ногу;
- д) Другая свободная ДНК-цепь (светло-голубая) убирает якорь от левой ноги, отсоединяя ее от “дороги”;
- е) Другая якорная цепь (серая) присоединяет якорную цепь к паре В;

Итак, правая и левая “ноги” робота имеют уникальную последовательность нуклеотидов, поэтому каждой необходим соответствующий комплементарный ей участок на ДНК-дороге — своеобразный “якорь”.

Для того чтобы затем отсоединить заякоренную “ногу” от «дороги», необходима еще одна свободная цепь ДНК.

“Якорь” имеет участок, который не присоединяется ни к «ноге», ни к “дороге”. Этот участок присоединяется к свободной ДНК, которая затем отбирает “якорь” у “ноги”. “Ноги”, свободные от якоря, соединяются со следующей комплементарной парой на “дороге”, двигая таким образом робота вперед. Повтор этой процедуры приводит к движению робота.

Робот шагает в специальной жидкости, названной “денатурационный буфер”, которая препятствует сворачиванию цепей ДНК. Чтобы робот мог долго двигаться, в жидкости находятся миллионы якорей и свободных ДНК, удаляющих «якоря». Для начала движения робота помещают на “дорогу” и добавляют в раствор якоря.

Следующим шагом исследователей будет добавление к роботу “повозки”, чтобы он мог переносить различные вещества, например, атомы железа.

Мобильные ДНК-роботы могут помочь в сборке более сложных наносистем: нанокомпьютеров, точных наноманипуляторов и более сложных нанороботов. Также ДНК-роботы, оснащенные наноманипуляторами, смогут манипулировать отдельными молекулами и атомами, воплощая в жизнь основную задачу нанотехнологии.

Конечно, как и говорилось выше, это только первые пробы биомиметики в нанотехнологиях. Не следует забывать о том, что природные наномашинки пока совершеннее и проще тех, которые планирует изготовить человек, поэтому исследователи изучают в первую очередь то, что предлагает нам природа.

РНК-наномашинки

Как недавно доказали исследователи из Университета Пэрдю, наномашинки могут быть построены и с помощью самоорганизующихся РНК-структур. Ученые научились строить из молекул РНК несколько различных самособирающихся “матриц” размерами от сотен нанометров до нескольких микрон. При этом их структуру можно задавать заранее!

Самосборка идет в нанометровом масштабе, но конечные “продукты” в ряде опытов достигали микронных размеров. “Наша работа показала, что мы можем управлять структурой трехмерных матриц, полученных с помощью самосборки молекул РНК. При этом мы можем делать матрицы различных размеров и формы, — говорит Пейхуан Гу, профессор молекулярной вирусологии. — В дальнейшем, из молекул РНК можно будет конструировать сложные наномашинны”.

Оказалось, что вирус-бактериофаг *phi29* использует подобные конструкции из молекул РНК для своего вирусного мотора. При этом сам процесс работы мотора похож на работу двигателя внутреннего сгорания автомобиля. Роль камеры сгорания играет портал — образование внутри капсида (тела) вируса, занятое молекулами РНК и ротором. Мономеры РНК, подобно поршням, поочередно толкают центральный 6-сторонний ротор, заставляя его вращаться. В центре ротора находится молекула ДНК.

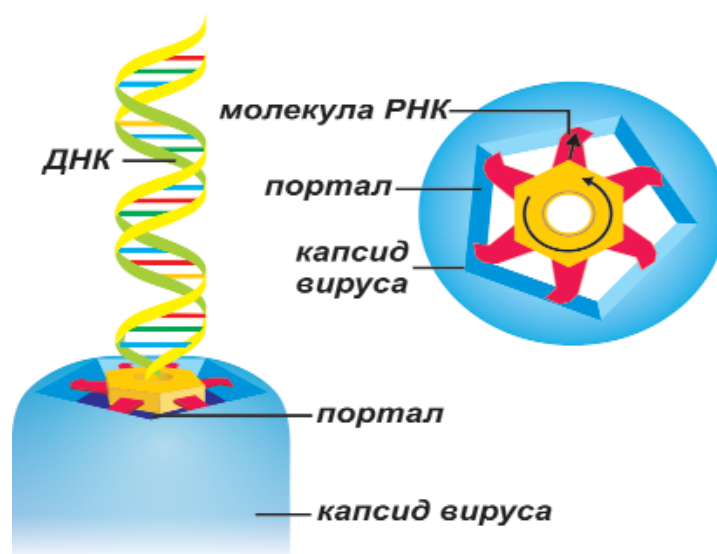


Рис 202. Работа вирусного мотора

Сегодня ученые собирают из молекул РНК “кольца”, “треугольники” и “стержни”. Эти структуры можно интегрировать с нанотранзисторами, нанопроводниками, нанотрубками, биосенсорами и другими уже существующими наноструктурами, чтобы получить сложные НЭМС-системы. Возможно, их можно будет использовать даже для медицинских нанороботов, поскольку молекулы РНК обладают высокой биосовместимостью с человеческим организмом.

Приручение бактериофага

Ранее мы уже рассказывали, каким образом вирус проникает в клетку. С помощью электронной микроскопии удалось получить ряд изображений этого процесса, по которым впоследствии был смонтирован видеофильм, объясняющий механизм инфицирования клетки вирусом.

Главный герой фильма — уже знакомый нам вирус Т4 — состоит из икосаэдральной головки, содержащей вирусную ДНК, ствола, основания ствола и стволовых отростков — «но» (шести длинных и шести коротких). Сперва длинные отростки находят жертву, в роли которой выступает клетка *E. coli*, а затем короткие прочно прикрепляются к ней. Основание при этом передает импульс в ствол, который сокращается, как мускул, выдавливая из себя вирусную ДНК в клетку-хозяина. *E. coli*, таким образом, инфицируется, биохимическая машина клетки продуцирует новые фаговые частицы и, в конце концов, клетка гибнет.

“Для начала наше исследование показывает структуру белков, входящих в состав основания вблизи ствола (так называемого биохимического прокалывающего устройства), и их роль в проникновении вирусной ДНК через мембрану клетки, — говорит Россман. — Мы показали, что это сложная биохимическая машина, позволяющая вирусу эффективно внедряться в клетку-хозяина”.

На базе этих знаний можно прогнозировать появление высокоэффективных лекарственных препаратов. “У вирусов талант в доставке своей ДНК внутрь клеток. Поэтому мы можем использовать некоторые из видов вирусов для доставки здоровой ДНК внутрь раковых клеток”, — говорит исследователь Лейман. На основе вирусов ученые предполагают создать устройство для генной терапии, которое будет лечить отдельные клетки.

Нанотехнологии и бессмертие

Отыскать эликсир бессмертия человечество мечтало всегда. В Средние века этой идеей были одержимы алхимики, а в настоящее время она лежит в основе нового философского течения, получившего название *трансгуманизм*, или *иммортиализм*. Все более популярное сегодня, трансгуманистическое мирово-

зрение утверждает, что человеческий вид является не завершающим звеном эволюции, а скорее ее началом. Трансгуманисты убеждены, что недалек тот день, когда с развитием науки и техники люди смогут радикально усилить свои интеллектуальные и физические возможности, перестанут умирать от старости и болезней и избавят весь мир от несчастий и страданий.

“Природа сыграла с человеком злую шутку, наделив его разумом, но лишив бессмертия, — говорят имморталисты. — Если Бог существует, то он вечен. Животные хоть и смертны, но не страдают от этого. В их голове нет представления о собственной смерти. И лишь человек — единственное животное, которое знает, что в конце концов обязательно умрет”.

Для животных не существует прошлого и будущего в том смысле, какой вкладывают в это понятие люди. Для них существует только настоящее, и потому не существует собственной смерти — собственную смерть невозможно воспринимать из настоящего, ибо пока есть настоящее, мы еще живы. Собственную смерть можно увидеть только из прошлого как нечто будущее. Животные не способны на это, и поэтому, даже умирая для всех, они не умирают сами для себя — для них умирает лишь их настоящее.

Человек способен жить одновременно в прошлом, настоящем и будущем (прошлое — его память, будущее — его мечты), и потому его жизнь, пусть даже самая счастливая, глубоко трагична, ибо животные не умирают никогда, человек же умирает всю свою жизнь. Широко распространенное мнение о том, что сознание быстротечности жизни придает какую-то особую остроту и ценность каждому ее моменту — не более чем самообман. Человек не способен почувствовать всю остроту и ценность настоящего момента так, как это чувствуют животные, потому что настоящее в его сознании сильно потеснено воспоминаниями о прошлом и мечтами о будущем. Настоящее превратилось для человека всего лишь в тонкую грань между прошлым и будущим, не имеющую самостоятельного значения, всего лишь в строительный материал для построения будущего или реставрации прошлого.

Каждый из нас в возрасте нескольких лет от роду пережил глубокое — возможно глубочайшее в жизни — потрясение от осознания неизбежности конца. Воспоминание о нем, как о

всяком травмирующем переживании, глубоко запрятано в подсознании. Мы не помним этого шока и со снисходительным умилением смотрим на маленьких детей, которые плачут от страха смерти, столь еще далекой от них. Да, мы не помним этого потрясения, но шрам от него остался в душе каждого из нас, и на протяжении тысячелетий человеческое подсознание твердит нам «memento mori» («помни о смерти» — лат.). И человек помнит о смерти, боится ее, страдает при одной только мысли о том, что рано или поздно он должен умереть, и посвящает всю свою жизнь борьбе по преодолению этого страха.

Где-то очень глубоко в нашем подсознании горит и обжигает душу безумное, неосуществимое, а потому запретное желание — быть бессмертным. Почему люди всегда приписывали своим богам бессмертие? Потому что сами мечтали быть бессмертными. Люди верили в загробную жизнь потому, что хотели в нее верить, ведь если нельзя быть бессмертным, то можно, по крайней мере, найти какой-то заместитель, суррогат бессмертия. Вот почему религия, какую бы извращенную форму она не принимала, не исчезнет с лица Земли, покуда живо общество, бессмертное по своей сути, но состоящее из множества смертных индивидуумов.

На наш взгляд, мышление трансгуманистов хоть внешне и отличается от религиозного, по сути имеет с ним много общего. Просто веру в Бога трансгуманисты заменили верой в технический прогресс, а в качестве пророков избрали себе авторитетных ученых. И если религия обещает своим приверженцам вечную жизнь в раю, то имморталисты подходят к решению этой проблемы «технически», предлагая обеспечить человека индивидуальным бессмертием и, таким образом, избавить его от вышеописанных страданий. Расшифровав генетический код жизни, ученые вплотную подбираются к возможности целенаправленно и активно замахнуться на процессы биологической эволюции. Разум и амбиции человека, по чьему-то меткому выражению, не позволяют ему простить, что “за какой-то недоеденный огрызок яблока его лишили бессмертия”.

Современный трансгуманизм владеет большим арсеналом различных подходов к достижению бессмертия. Некоторые из них довольно любопытны с точки зрения нанотехнологии, поэтому с ними мы познакомимся поближе. Следует, однако, сра-

зу же оговориться, что в настоящее время ни один из этих подходов “не Но ведь и самолет тоже казался когда-то лишь выдумкой фантазеров-мечтателей.

Проект первый - наномедицина по Фрайтасу

Идеи многих великих открытий часто возникают внезапно, рождаясь там, где их никто не ожидал. Так, упавшее с дерева яблоко навело Ньютона на мысль о законе всемирного тяготения, а приснившаяся таблица позволила Менделееву внести свой неповторимый вклад в развитие химии. Также неожиданно обычный треп на форуме сайта Института Предвидения (Foresight Institute) навел Роберта Фрайтаса — автора первой книги о медицинском применении нанотехнологий «Nanomedicine» — на мысль о создании специальных медицинских нанороботов.

Но обо всем по порядку. 14 июня 1996 года Крис Феникс — автор идеи конвергентной нанофабрики, оставил на форуме сообщение: “А что если заменить кровь человека 500 триллионами роботов?”. Этот “безумный” на первый взгляд вопрос привел Феникса к продолжительному сотрудничеству с Робертом Фрайтасом, результатом которого явился 100-страничный труд под названием “Roboblood” (робототехническая кровь), изданный в 2002 году.

“Roboblood” представляет собой детально рассчитанный проект комплекса медицинских нанороботов, способных жить и функционировать в человеческом теле, выполняя самые разнообразные функции крови, включая циркуляцию дыхательных газов, глюкозы, гормонов, отходов, клеточных компонентов, процесс деления цитоплазмы. Впрочем, для своего наноробота ученые придумали другой термин — *васкулоид* (от лат. vas — сосуд и греч. oidos — подобный).

“Робокровь”, включающая около 500 триллионов микроскопических нанороботов общим весом примерно 2 кг, потребляет 30-200 Ватт энергии в зависимости от рода человеческой деятельности. Система соответствует форме кровеносных сосудов и может служить полной заменой естественной кровеносной системе. Проще говоря, нанороботы образуют кровеносную систему и функционируют в ней.

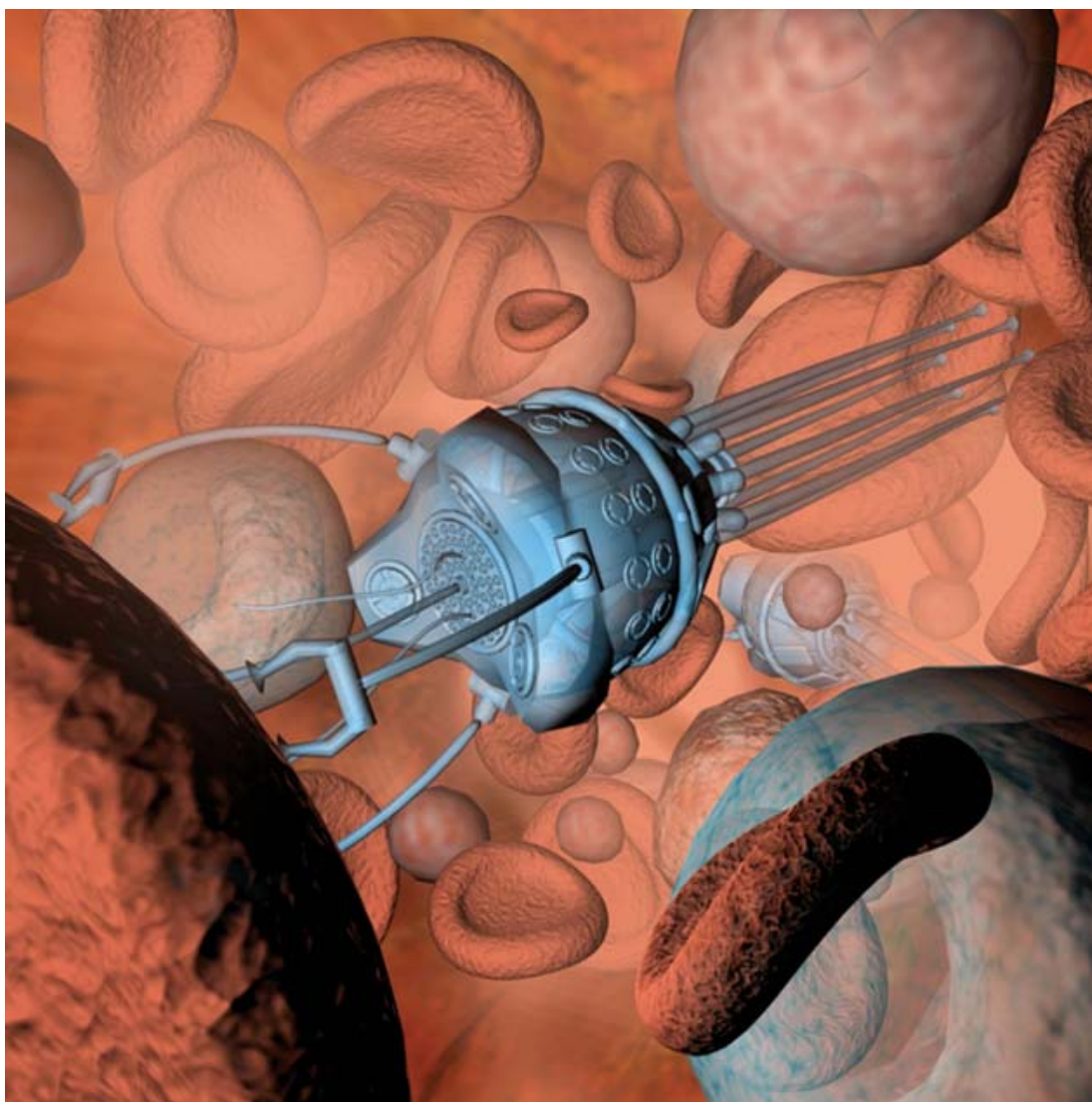


Рис 203. Нанороботы в кровеносной системе

Подразумевается, что они будут сделаны из алмазоида или другого биосовместимого материала, а биологическое питание будут получать из глюкозы и кислорода.

Какие же преимущества дает такая роботизированная кровь обычному человеку? Возможностей, оказывается, множество: это и борьба с болезнетворными микробами, и регулярная “чистка” и укрепление сосудов, предотвращающая болезни типа атеросклероза, варикозного расширения вен и т. д., и автоматическое лечение поврежденных клеток, и даже замена больных генов здоровыми.

Наша кровь — это уникальная система обеспечения жизнедеятельности клеток и тканей, состоящая из множества различных клеток, выполняющих строго определенные функции. Р. Фрайтас разработал несколько проектов медицинских нанороботов различного назначения.

Среди них особенно интересны, например, *респироциты* — искусственные аналоги эритроцитов (красных кровяных телец, отвечающих за доставку кислорода к клеткам). Функциональность респироцитов во много раз превосходит природные эритроциты. Они смогут накапливать в несколько раз больше кислорода при значительно меньших размерах и энергопотреблении. Благодаря респироцитам человек сможет часами обходиться без воздуха (например, плавать под водой) абсолютно без ущерба для здоровья. Кроме возможности переносить больше кислорода, для респироцитов характерны также возможность перепрограммирования, долговечность и высокое быстроедействие.

Каждому из нас знакомы такие досадные неприятности, как ссадины, порезы, раны, а то и разбитый нос. Подобные травмы часто сопровождаются обильным кровотечением, однако по мудрости природы наш организм надежно защищен от смертоносной потери крови благодаря присутствию в ней особых клеток — тромбоцитов, участвующих в свертывании крови (тромбогенезе). Стоит нам случайно порезать палец или ободрать коленку, тромбоциты мгновенно бросаются на помощь к поврежденному сосуду и забивают собой образовавшуюся в нем «брешь», предотвращая, таким образом, дальнейшую потерю крови. Предложенные Фрайтасом искусственные аналоги тромбоцитов — так называемые *клоттоциты* — достигают прекращения кровотечения (даже довольно обширного) за 1 секунду, в то время как для обычного тромбогенеза требуется от 5 до 17 минут. При этом концентрация искусственных тромбоцитов может быть меньше натуральных в 100 раз, то есть клоттоциты Фрайта-са в 10 000 раз эффективней своего природного аналога!

Каждый школьник знает, что необработанная ссадина опасна не столько потерей крови, сколько риском получить заражение. Однако в кровь то и дело попадает небольшое количество болезнетворных микробов через раны на коже, деснах, языке, во время хирургических операций, лечения зубов и даже при выдавливании прыща на носу. Эти чужеродные бактерии обычно уничтожаются в организме особыми клетками крови — лейкоцитами (белыми кровяными тельцами), способными к *фагоцитозу* (захвату и перевариванию чужеродных бактерий), продукции иммуноглобулинов (формированию иммунитета к данной

инфекции). Однако некоторое количество бактерий все же может обойти естественную защиту, и тогда человек заболевает.

В связи с этим комплекс нанороботов, способных быстро очищать кровь человека от патогенов при сравнительно небольшой концентрации, был бы весьма желательным помощником для человеческой иммунной системы. Таких нанороботов Фрайтас назвал *микрофагоцитами*, или искусственными иммунными клетками.

Как работает микрофагоцит? В течение каждого цикла операций, выполняемых устройством, патогенная бактерия прилипает к поверхности наноробота, как муха к липкой ленте, благодаря специальным “присоединительным гнездам”. Далее телескопические наноманипуляторы-хваталки выдвигаются из специальных гнезд на поверхности микрофагоцита и транспортируют бактерию к “умертвительному” резервуару, находящемуся внутри робота. После интенсивного механического перемалывания бактерии ее органические остатки выдавливаются специальным поршнем в “дигестальный” (от англ. digest - переваривать) резервуар, где они перевариваются с помощью комплекса ферментов. Полученные в результате остатки будут представлять собой простые аминокислоты, моонуклеотиды, глицерин, воду, жирные кислоты и простые сахара, абсолютно безвредные для организма человека, которые просто выбрасываются в кровеносную систему. Весь цикл операций занимает не более 30 секунд.

Этот алгоритм, названный автором “перевари-и-выброси”, практически идентичен процессам переваривания и фагоцитоза, которые используют натуральные фагоциты. Однако искусственный процесс фагоцитоза будет намного быстрее и чище — продукты искусственных микрофагоцитов не будут содержать вредных для человека веществ, в отличие от биологически активных, выбрасываемых в кровь натуральными макрофагами после переработки патогенных микробов. Кроме того, искусственные фагоциты будут в 100-1000 раз меньше по объему.

Каким образом нанороботы будут взаимодействовать между собой? Так же, как “общаются” друг с другом триллионы клеток в человеческом теле: посредством сложных молекул, находящихся на их внешних мембранах. Эти молекулы действуют как химические “сигнальные флаги” для того, чтобы обратить-

ся к другим клеткам, или как химические “ворота”, которые управляют входом в клетку из кровотока некоторых молекул (например, гормонов).

Как устроены медицинские нанороботы?

Р. Фрайтас и К. Феникс предложили детально разработанные чертежи разных нанороботов. Но талантливые конструкторы нанороботов есть и у нас. Мы остановимся на описании устройства основных систем медицинского наноробота, предложенного главным аналитиком компании Nanotechnology News Network Юрием Свидиненко. Но сначала ответим на вопрос: что должен “уметь” наноробот и какие подсистемы ему для этого понадобятся?

Во-первых, он должен перемещаться по кровеносной системе человека, то есть обладать мощной *двигательной системой*.

Во-вторых, устройству необходимо иметь несколько типов различных *сенсоров* для мониторинга окружающей среды, навигации и коммуникации.

В-третьих, нанороботу нужна *транспортная система*, доставляющая вещества от хранилищ к наноманипуляторам и обратно.

В-четвертых, для работы с пораженными структурами устройство должно быть оборудовано набором различных *телескопических наноманипуляторов*.

В-пятых, необходимы *приемопередающие устройства*, позволяющие нанороботам связываться друг с другом.

В-шестых, не обойтись без *генераторов* и *источников энергии*.

И, наконец, для удержания крупных объектов необходимы *телескопические захваты*.

На основании выдвинутых требований Юрий построил модель медицинского наноробота общего применения. В идеальном случае это устройство будет способно “ремонттировать” поврежденные клетки; производить диагностику и лечение раковых заболеваний и картографировать кровеносные сосуды; производить анализ ДНК с последующей ее корректировкой; уничтожать бактерии, вирусы, и т. п. На рисунках представлен предполагаемый вид такого наноробота, выполненного из алмазоида.

Электромагнитные волны, которые смогут распространяться в теле человека не затухая, будут по длине волны сравни-

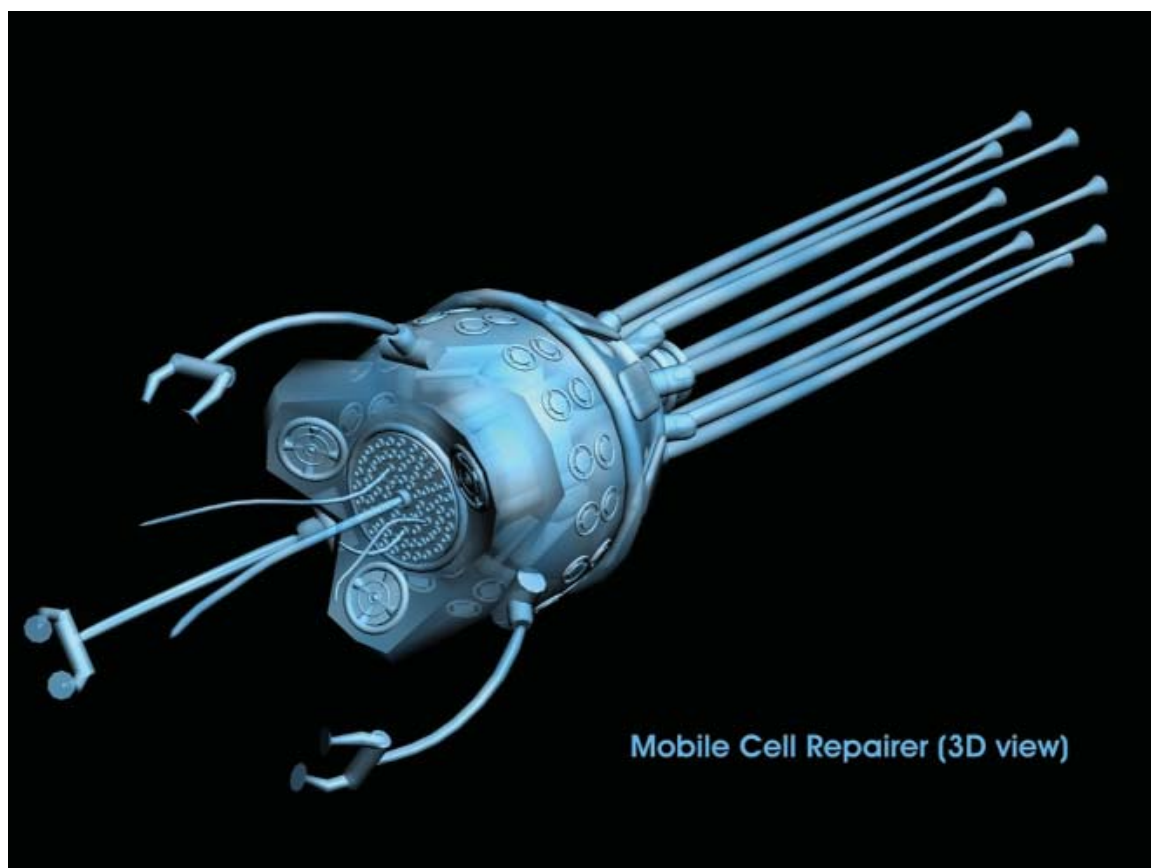


Рис 204. Медицинский наноробот общего применения

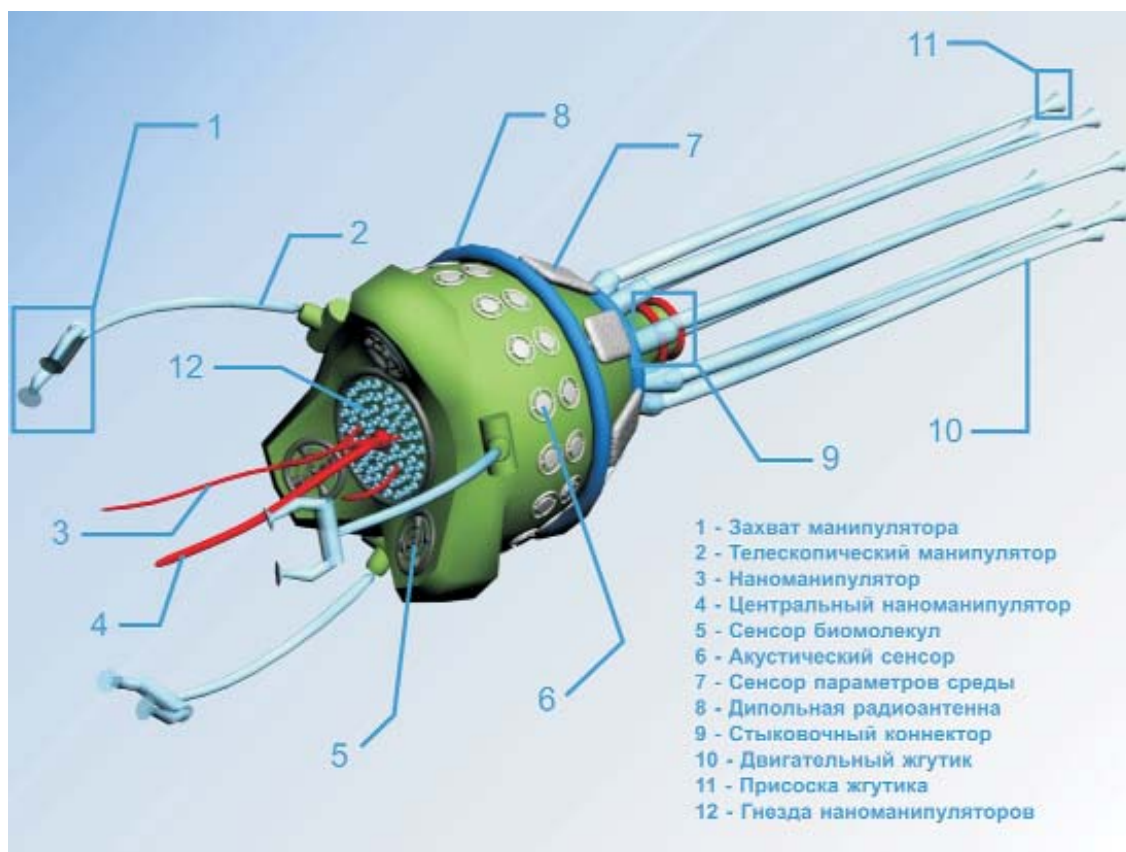


Рис 205. Основные блоки медицинского наноробота

мы с нанороботом. Поэтому его антенны будут иметь вид диполей, выступающих за пределы корпуса.

Наноманипуляторы, механические захваты и жгутики должны быть телескопическими и при необходимости должны убираться в корпус робота, чтобы он мог лучше передвигаться в кровеносном русле.

Чтобы естественная иммунная система не “нападала” на робота, он должен быть сделан из биоинертного материала, например, алмазоида. Ряд экспериментов подтвердил, что гладкие алмазоидные структуры вызывают меньшую активность лейкоцитов и меньше адсорбируют фибриноген. Поэтому можно надеяться, что такое покрытие будет иметь очень низкую биоактивность и внешняя оболочка роботов будет химически инертна.

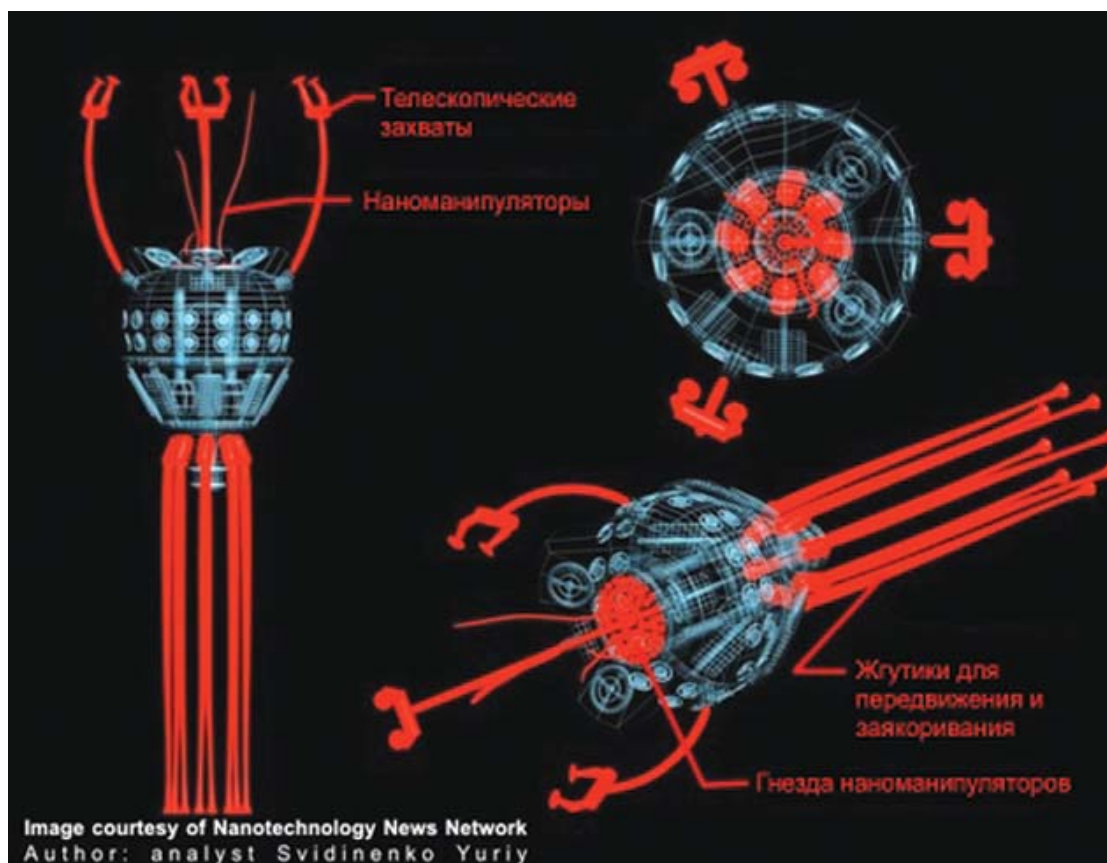


Рис 206. Двигательная подсистема и подсистема заякоривания

Для предложенного наноробота можно будет использовать нанокomпьютер, производящий 10^6 - 10^9 операций в секунду. Это на 4-7 порядков меньше вычислительной мощности человеческого мозга, составляющей $\sim 10^{13}$ операций в секунду. Так что

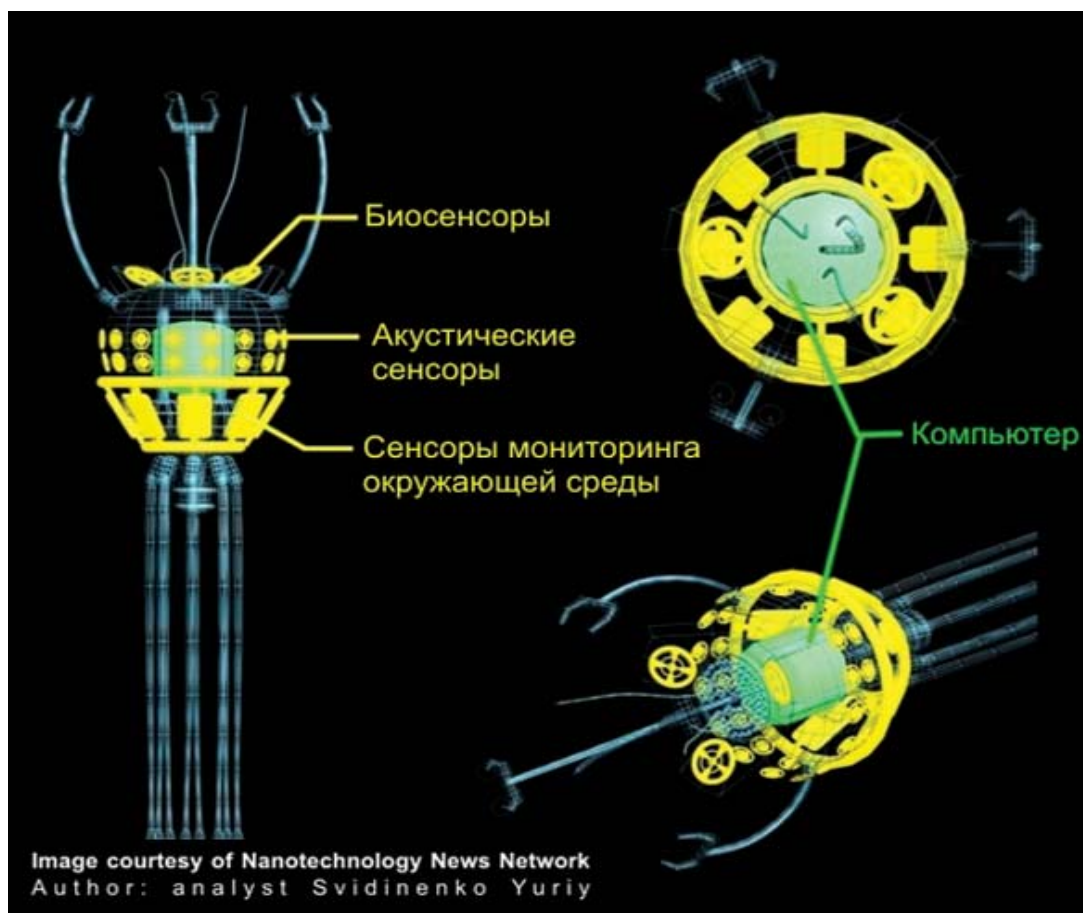


Рис 207. Сенсорная и обрабатывающая подсистема

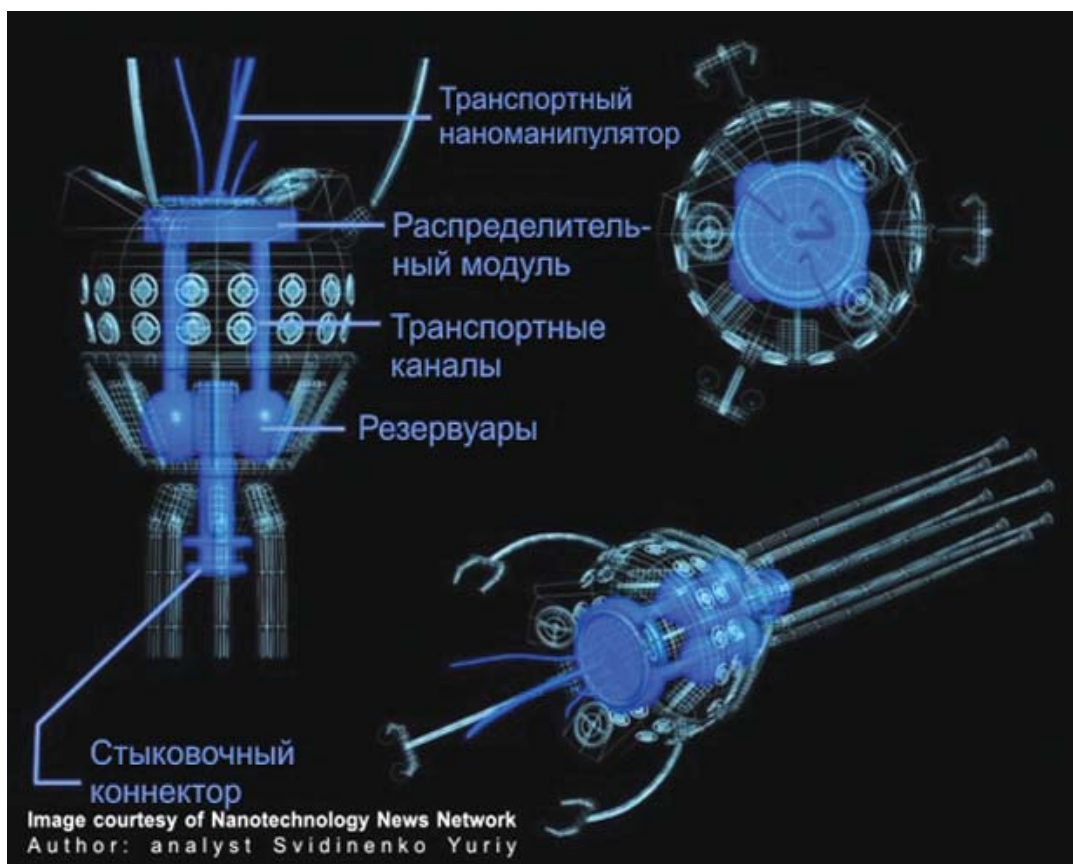


Рис 208. Транспортная подсистема

этот наноробот не будет обладать искусственным интеллектом, что говорит в пользу его надежной “управляемости”.

Рассмотрим конструкцию отдельных подсистем наноробота: Для связи нанороботов друг с другом, а также для формирования навигационной системы полезно будет использовать еще один тип нанороботов — *коммуноцитов*, которые будут работать в виде усилительных станций.

Как медицинские нанороботы будут производить лечение? Возможно, порцию нужных нанороботов можно будет выпить в виде таблетки или сделать инъекцию с помощью обычного шприца. Попадая в кровь, нанороботы распределятся в своеобразную сеть и направятся к поврежденным клеткам.

Если повреждение слишком велико, наноробот должен будет проникнуть внутрь клетки (например, с помощью телескопических манипуляторов) и выпустить из своих “запасов” ферменты, запускающие механизм клеточного апоптоза. Если же “рана” клетки не слишком велика — нанороботы делают инъекцию других ферментов, которые должны способствовать восстановлению ДНК и возвращению клетки к нормальной работе. Такие целебные ферменты уже известны, нужно лишь научиться доставлять их точно в цель.

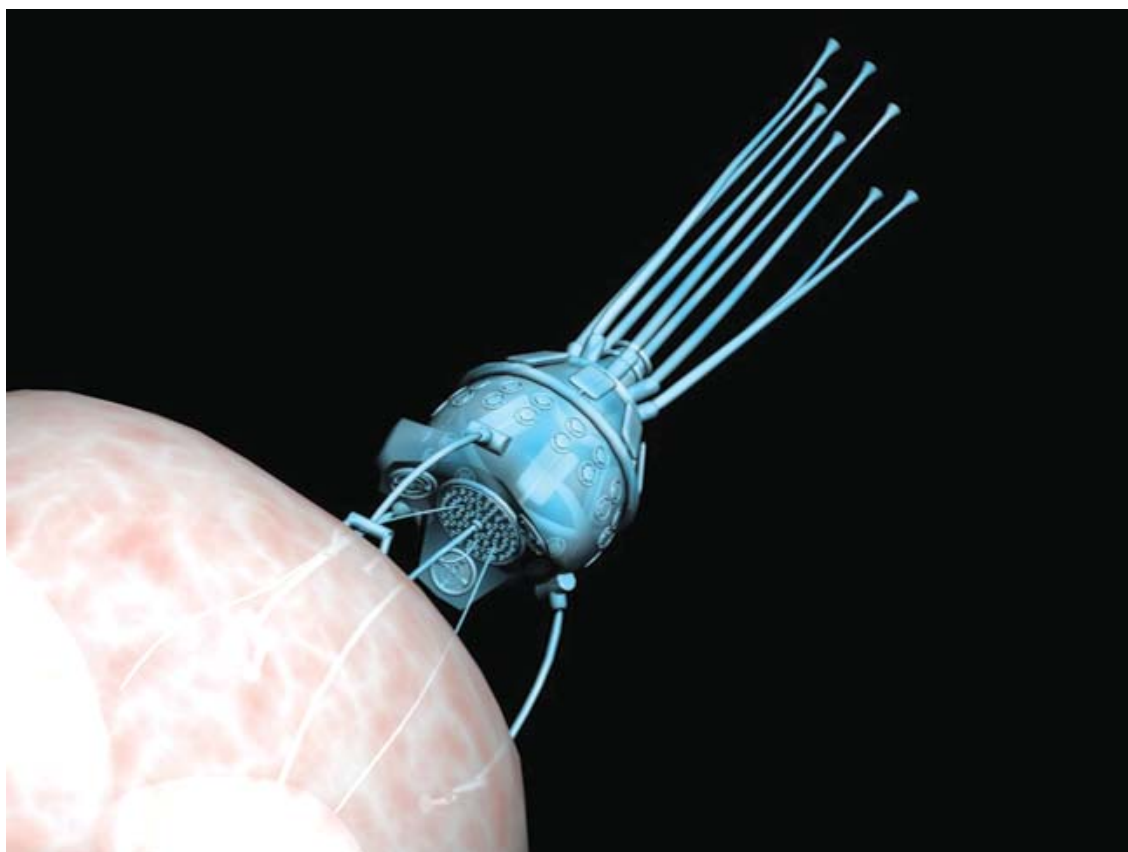


Рис 209. Наноробот ремонтирует клетку

На рисунке изображен наноробот, ремонтирующий клетку *in vivo*. “Отработав”, нанороботы покинут тело обычным биологическим путем, а часть из них может остаться в организме на постоянное “дежурство”.

Нетрудно догадаться, что одной из главных задач, решению которой призваны служить наномедицинские роботы, является достижение человеческого бессмертия. Мы стареем и умираем оттого, что стареют и погибают клетки нашего тела, а благодаря молекулярным роботам, предотвращающим старение клеток, перестраивающим и “омолаживающим” ткани организма, можно будет достигнуть бессмертия человека, не говоря уже об излечении безнадежно больных людей.

Что же касается проблемы выхода нанороботов из-под контроля и их безудержной саморепликации, то, по словам Фрайтаса, такая ситуация исключена, поскольку роботов будут делать за пределами организма, а потом вводить и выводить их по мере необходимости. Если же какой-то наноробот и останется внутри, то функция самокопирования у него будет отключена: “Ни один серьезный ученый никогда не предложит ввести в организм репликаторов, — заявил Фрайтас. — Мы и так уже имеем вирусы, бактерии и других паразитов, которые могут копироваться внутри нас, и это достаточно неприятно. Зачем нам их еще больше?”

В заключение напомним, что описанные наномедицинские проекты — пока что не более чем теория, нуждающаяся в детальном анализе, и для создания подобных медицинских нанороботов, по прогнозам самих ученых, потребуется еще как минимум 30-40 лет.

Проект второй – перенос сознания в компьютер

Смогут ли ученые создать нанороботов по Фрайтасу и достичь с их помощью бессмертия — вопрос спорный. В настоящий момент для этого нет ни соответствующей технологии, ни достаточного числа компетентных специалистов. Однако не одними нанороботами бредят трансгуманисты, ведь можно создать еще и нейроэлектронные носители сознания, о которых пишет другой ученый с мировым именем — Рэй Курцвейл, изобретатель первой технологии оптического распознавания образов, речевого синтезатора для чтения текста и первой системы по распознаванию человеческой речи.

По замыслу Курцвейла, чтобы достичь бессмертия, необходимо перенести сознание из человеческого мозга в программно-аппаратный комплекс. Это позволило бы довести автономию и скорость принятия решений каждым человеком до максимума, а значит повысить его выживаемость в более агрессивной среде и сделать его взаимодействие с окружающим миром более динамичным.

Как известно, нервная система и мозг человека состоят из множества нервных клеток — *нейронов*, соединенных между собой нервными волокнами, которые нейроны используют для обмена информацией между собой, а также для получения сигналов от рецепторов и передачи управляющих импульсов на эффекторы. Подобно тому, как в компьютере информация передается в виде электрических сигналов, по нервным волокнам идут электрохимические импульсы. Нервная система и мозг человека состоят из более чем 100 миллиардов нервных клеток. Нейроны были открыты в начале XX века.

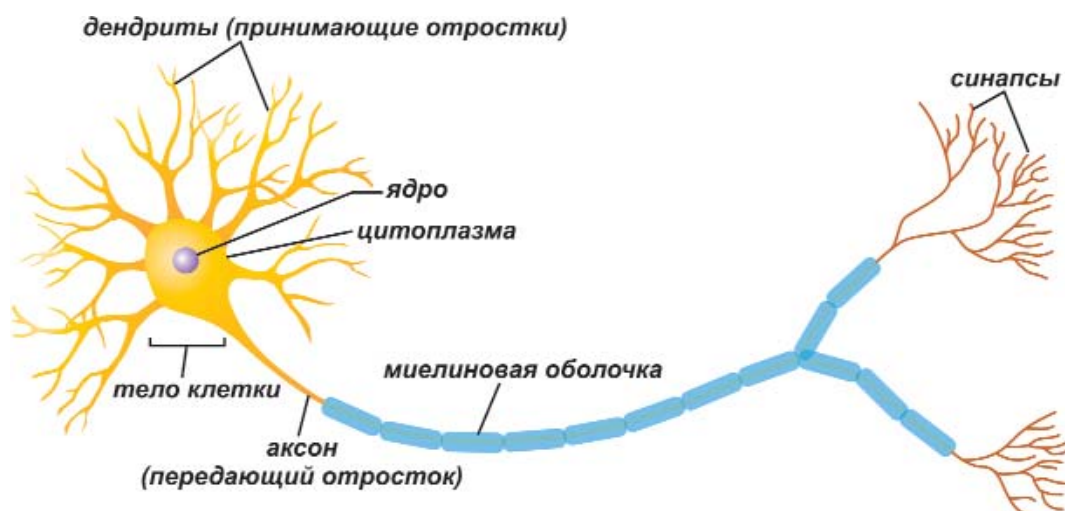


Рис 210. Схема нейрона

Любое наше действие, от самого простого до самого сложного, любая эмоция, от самой слабой до самой сильной, все наши мысли, от самой тривиальной до самой мудрой, — все это реализовано в живом организме как передача особых электрохимических веществ — *нейротрансмиттеров* — между нейронами.

Нейроны имеют необычное строение по сравнению с другими клетками организма.

Тело нейрона составляет наибольшую массу самого нейрона. Оно содержит в себе ядро клетки, в котором хранится наследственная информация. От тела нейрона отходят щупальце-

образные отростки, называемые *дендритами*, и один особенно длинный отросток, называемый *аксон*. Нервные клетки и их отростки покрыты защитной *миелиновой оболочкой*, служащей для электроизоляции нейронов и их отростков. Аксон контактирует с дендритами других нейронов через специальные образования — *синапсы*, своеобразные усилители и выпрямители нервных сигналов. Таким образом, можно сказать, что наш мозг является своеобразной «вычислительной сетью», постоянно (даже во сне) обрабатывающей информацию.

После рождения в нашем организме не образуется ни одного нового нейрона, хотя в начале жизни они даются нам с избытком. В течение жизни незадействованные нейроны постепенно отмирают, в то время как связи между нейронами с развитием мозга множатся и усложняются.

Чем сложнее структура мозга, чем больше в нем соединений между отростками нейронных, тем более сложные задачи он способен решать. Здесь действует простая зависимость: чем больше знаний — тем больше связей. Новые связи формируются только при усвоении новой информации, решении каких-то новых задач. Подобно тому, как невозможно нарастить мышцы, поднимая каждый день одну и ту же штангу без увеличения нагрузки, так бесполезно для развития ума всю жизнь решать только одну хорошо известную задачу. Новых связей не образуется, а старые клетки потихоньку отмирают, унося с собой и старые связи. В результате у человека ухудшаются память, внимание, снижаются умственные способности, он не успевает сориентироваться в быстро меняющемся мире.

Вот почему так полезны для развития мозга различные умственные упражнения — от заучивания стихотворений до решения интегральных уравнений. Потому западные психологи и рекомендуют людям менять работу каждые пять лет, постоянно учась чему-то новому, ведь, как заметил английский поэт Александр Поуп: «Силу уму придают упражнения, а не покой».

Говоря о нейронах, нельзя не упомянуть и о пагубном воздействии алкоголя на клетки мозга. К сожалению, в нашем обществе без выпивки не обходится ни одно застолье, а между тем мало кто задумывается над тем, какой непоправимый вред наносят эти пресловутые «сто грамм» нашему организму. Ведь алкоголь — это самый настоящий яд для любой живой клетки. Его основу составляет высокореакционное химическое соединение

– этиловый спирт (C_2H_5OH). Принятый внутрь, алкоголь через 2 минуты попадает в кровь, которая разносит его по всем клеткам организма.

Не секрет, что клетки нашего тела и особенно клетки мозга не могут выполнять свои функции без участия кислорода. Если перекрыть человеку дыхание, он умрет от удушья уже через несколько минут. Так вот, алкоголь действует на клетки очень похожим образом: он быстро сгорает, вступая в химическую реакцию с жироподобными веществами, содержащимися в клетках, “отнимая” у них кислород и воду. В результате клетки обезвоживаются и погибают. Особенно страдают при этом печень, почки, сердце. Но если эти ткани со временем восстанавливаются за счет новых клеток, то клетки мозга, как известно, не обновляются, поэтому нервная система и головной мозг наиболее беззащитны перед ядовитым действием алкоголя.

В первую очередь страдают клетки больших полушарий головного мозга. Ухудшается условно-рефлекторная деятельность человека, замедляется формирование сложных движений, изменяется соотношение процессов возбуждения и торможения в центральной нервной системе. Под влиянием алкоголя нарушаются произвольные движения, человек теряет способность управлять собой и превращается в отвратительную марионетку: пробуждаются низменные инстинкты, сопровождаемые беспричинной радостью, глупым смехом, суетливостью или, наоборот, агрессивностью. Пьяный человек может говорить и делать то, чего никогда не сказал и не сделал бы, будучи трезвым. За это алкоголь причисляют к специфическим нервным ядам или наркотикам.

Но “вернемся к нашим баранам”. Согласно современным представлениям о физиологии мозга, все наши знания и умения существуют в нем как шаблоны межнейронных соединений и концентрации нейротрансмиттеров. И поскольку личность человека — это не столько его тело, глаза, руки и т. д., сколько его сознание, его внутреннее “Я”, его память, мышление, эмоции и чувства, то один из возможных путей достижения человеческого бессмертия Рэй Курцвейл видит в переносе сознания из биологического мозга на искусственный носитель информации.

Какие аргументы говорят в пользу такого переноса?

Хотя мозг и появился в результате долгого естественного отбора, его дизайн довольно груб. Нейроны — громоздкие приборы, работающие в 10 млн. раз медленнее электроники. Они действуют с частотой всего лишь 200 герц, а сигналы по ним распространяются со скоростью, не превышающей 150 м/с. Поскольку с возрастом мы теряем нейроны вместо того, чтобы наращивать новые, возникает проблема информационного переполнения мозга. Дело в том, что наш мозг, видимо, хранит в себе всю информацию, которую он получает в течение жизни (даже то, что кажется давно забытым, хранится где-то в тайниках нашего подсознания). Но всякое хранилище информации имеет ограниченную емкость, а “апгрейдить” биологический мозг невозможно.

Кроме того, к нейронам невозможен доступ извне, они не могут принимать и передавать импульсы во внешнюю среду или быть произвольно перепрограммированы нашим сознанием. Мы не можем усовершенствовать свой собственный исходный программный код. Мы не можем делать резервные копии содержимого своей памяти. Мы не можем передавать мысли от одного мозга к другому. Мы не можем перемещать сознание из одного места в другое кроме как физической транспортировкой мозга, в котором оно работает. Когда хрупкий биологический мозг повреждается или уничтожается, сознание умирает вместе с ним.

Искусственные же вычислительные устройства всегда превосходили мозг в запоминании и обработке информации. Компьютер может в точности запомнить триллионы фактов, тогда как мы с трудом запоминаем десяток телефонных номеров. Компьютер может осуществлять поиск в базе данных среди миллиардов записей за доли секунды. Он обменивается информацией с другими компьютерами гораздо проще, чем люди. Комбинация человеческого интеллекта с превосходными способностями компьютера в памяти, скорости и точности коммуникаций может дать нашему сознанию необыкновенные возможности.

Как уже было сказано, мозг человека состоит примерно из 100 миллиардов нервных клеток, поэтому для полного описания состояния всех его нейронов требуется примерно 10^{15} байт (100 млрд. нейронов по 1000 соединений и по 10 байт на статус соединения). На первый взгляд — цифра невероятная, хотя на

самом деле это память всего лишь тысячи мощных серверов 2004 года. Если получить такую информацию, то гипотетически можно смоделировать виртуальную нейронную сеть мозга, которая будет функционировать как живая, то есть “реагировать” на раздражители и “думать” так же, как ее биологический носитель.

Когда алгоритмы работы мозга будут распознаны, они могут быть реализованы в синтетических эквивалентах нейронов, которые можно запустить на вычислительном субстрате, в 10 миллионов раз более быстром, чем природные нейроны.

Каким же образом можно получить информацию о состоянии каждого из 100 млрд. нейронов? Гипотетически мозг может быть отсканирован изнутри растворенными в крови нанороботами, образующими локальную беспроводную сеть. Наши капилляры устроены так, что они проходят через каждое межнейронное соединение, каждый нейрон и каждый элемент нейрона. Отправив по ним миллиарды сканирующих роботов, мы можем получить карту мозга с разрешением до отдельного нейрона, отражающую все, что происходит внутри. Более реалистичный проект предполагает линейное проникновение в мозг массива сверхтонких сканирующих электродов на основе, например, нанотрубок.

Главная проблема сканирования мозга связана с медлительностью и несовершенством современной техники, ведь мельчайшее движение пальца, мысль, эмоция и т. п. ведет к изменению состояния нейронов в процессе сканирования. Поэтому точное сканирование живого мозга может звучать фантастично. Но не то же самое ли говорили недавно про сканирование человеческого генома?

Наиболее простое решение этой проблемы, достижимое сегодня — это разрушительное сканирование замороженного мозга. Суть его заключается в послойном срезании и сканировании отдельного тонкого слоя мозга за другим. Так можно получить информацию о каждом нейроне, соединении и концентрации нейротрансмиттера в каждом слое толщиной с синапс. Результаты такого послойного сканирования уже можно посмотреть в Интернете по адресу www.nlm.nih.gov/research/visible/

Для эксперимента использовался замороженный труп приговоренного убийцы, завещавшего свое тело науке и позволив-

шего отсканировать его мозг и тело именно таким путем. Теперь каждый может через интернет посмотреть каждую его клетку каждой косточки, мускула и пр. Однако сканирование проводилось с недостаточно большим разрешением, чтобы воссоздать все межнейронные соединения, узлы и синапсы, являющиеся главным ключом к копированию индивидуальности человеческого мозга.

Главного недостатка разрушительного сканирования — гибели самого биологического носителя сознания — можно избежать, используя технологии неразрушающего сканирования — ЯМР (ядерно-магнитный резонанс), оптическую и инфракрасную томографию. Однако эти методы пока еще не способны различать отдельные нейроны с необходимым разрешением.

Итак, конкретная технологическая реализация искусственных носителей сознания определится по ходу прогресса, однако уже сейчас ясна ее сущность — “супернейроны” бессмертного человека будущего могут быть многократно быстрее биологических, полностью читаемыми и перезаписываемыми, свободно программируемыми, способными экспортировать свое состояние из одного супернейрона в другой и производимыми в неограниченных количествах.

Человек, перенесший свое сознание на технический носитель, начнет с того же IQ, который он имел в прежнем биологическом мозге, но, совершенствуя программное обеспечение и аппаратуру, он вскоре перейдет к сверхинтеллекту. Представьте себе сознание, работающее на частоте 200 МГц — это примерно в миллион раз быстрее, чем обычно. Размышление, которое в биологическом мозге заняло бы год, будет произведено за 31 секунду, а вековые раздумья займут меньше часа! Технические носители позволят нашим личностям умнеть, а не глупеть со временем. И еще мы получим интерфейс, позволяющий напрямую подключаться ко всей нашей машинной инфраструктуре.

За счет электроники может быть “усовершенствован” не только мозг, но и тело, ведь многие, если не большинство наших целей связаны с телом: для каждого важна его внешность, защита, питание, лечение, удовлетворение его различных потребностей и желаний. Если мы намереваемся переместить разум в искусственную вычислительную среду, мы должны снабдить его и новым телом, более функциональным, компактным и неприхотливым, лучше защищенным от внешних угроз.

То есть бессмертные люди должны быть немного киборгами. Не теми неуклюжими механическими андроидами, сплошь облепленными электронными девайсами и с окровавленной печатной платой, торчащей из черепа, которых рисовали фантасты 70-х, а киборгами с новыми, более совершенными, чем биологические, телами, сконструированными при помощи передовых нанотехнологий, способных нормально функционировать и в космическом вакууме, и на дне океана, используя преимущества искусственных органов чувств, способных воспринимать любые излучения и позволяющие увидеть Вселенную во всей полноте ее проявлений.

О принципиальной возможности объединения биологических и электронных компонентов говорят множество разработок в области *нейроэлектрических интерфейсов* — устройств, позволяющих соединять компьютеры с нервной системой. Так, в начале 1990-х нервные клетки пиявки располагали на поверхности транзисторов и пытались установить двусторонний контакт между клетками и электронными компонентами. В 1999 году исследователи из Max Planck Institute поместили нейрон крысы диаметром около 20 мкм на матрицу транзисторов, покрытых слоем диоксида кремния. Нейрон жил в растворе электролита на поверхности чипа в течение трех дней. Ученым удалось передать информацию в виде импульсов от транзисторов к нейрону и наоборот. И нейрон воспринимал электрические импульсы транзистора как свои!

А в начале 2004 года те же исследователи сконструировали чип, передающий импульсы от одного нейрона другому. Размер полученного нейрочипа составил 300 микрон при диаметре нейрона в 60 микрон. Потом были созданы и более сложные интерфейсы, например “чип-нейрон-нейрон-...-нейрон-чип”, нейронные цепи, управляемые микроэлектроникой, и ученые из Max Planck Institute уже управляли живой пиявкой с компьютера.

Но что там киберпиявка, по сравнению с экспериментами исследователей из Института Дюка (Северная Каролина) под руководством профессора Мигуэля Николелиса. Он добился самой настоящей киборгизации, соединив компьютер с двигательным центром мозга крысы 48 проводами. Испытывая острую жажду, крыска беспокойно передвигалась по испытательной комнате. Она нашла предусмотренную учеными кнопку,

нажала ее лапкой и получила небольшое количество воды. Так повторялось несколько раз — крыса нажимала на кнопку и получала воду, а компьютер записывал ее мозговую активность.

Но вскоре кнопку деактивировали, и наступила решающая фаза эксперимента. Ждать пришлось недолго: крыса быстро раскусила этот трюк — она всего лишь подумала о нажатии кнопки — и снова насладились прохладной водой! Ученые были поражены не столько удачей эксперимента, сколько проницательностью крысы. Это был первый шаг к тому, чтобы постичь природу мозга, принцип его работы, “кодировку” мысли, в перспективе изменить в корне жизнь всего человечества.

А нью-йоркские ученые создали целый отряд из пяти радиоуправляемых “крысоботов”, т.е. крыс с вживленными в мозг электродами для дистанционного манипулирования их поведением.

Функционирует крысобот следующим образом. В “центр удовольствия”, т.е. в особый нервный узел, находящийся в срединно-передней части мозга, вживлен главный стимулирующий электрод, а в нервные узлы левых и правых пучков усов крысы вживлены “поворотные” электроды. Ученым управляли животными, совсем как радиоуправляемыми машинками: для получения нового “импульса блаженства” крысе надо просто свернуть в ту сторону, с которой поступает очередной управляющий сигнал.

Попутно ученые установили, что при более интенсивной стимуляции центра удовольствия крыса готова на “подвиги”, например, забирается на дерево или лестницу, прыгает с высоты, бежит по рельсам или выходит на ярко освещенные участки (чего в обычной жизни избегает). Правда, инстинкт самосохранения животных оказался все же сильнее, так что с опасной для жизни высоты крысу-киборга не удастся заставить прыгнуть никакими электростимуляциями “нирваны”.

Следующей целью Николелиса было подключение искусственной руки робота к мозгу обезьяны. Переквалификация с грызунов на приматов не случайна — их мозг больше похож на мозг человека и превосходит мозг грызунов по размеру, что позволяет задействовать большее количество нейронов, а значит и обеспечить более четкие и скоординированные движения. В отличие от 48 проводов, при помощи которых соединялся с компьютером мозг крысы, ученые вживили в мозг обезьянки 96

электродов толщиной с половину человеческого волоса, сигналы от которых шли в радиопередатчик, а оттуда по радио — в компьютер, который при помощи сложных математических функций моделировал движения искусственной руки робота.

Сначала движения руки не соответствовали пожеланиям обезьяны, но постепенно она наловчилась вполне удовлетворительно выполнять простые движения. Она обучалась точно так же, как человек учится, к примеру, печатать на клавиатуре. Умственная деятельность была идентична той, которую обезьяна совершала во время управления своей собственной рукой.

Для большей убедительности сигнал от мозга к руке был передан на расстояние почти 1000 км через Интернет. Для этого была изготовлена еще одна искусственная рука, которая находилась в Массачусетском Технологическом Институте, а обезьяна осталась в Институте Дюка, который, напомним, находится в Северной Каролине. Соавтор проекта Мандаям Сринивасан восторженно отзывался по этому поводу: “Когда мы решили передать сигнал через интернет, мы не знали, насколько существенна будет задержка. Даже через интернет все работало без нареканий. Было интересно смотреть, как в моем кабинете двигалась роботизированная рука, движимая мыслью обезьяны в Дюке. Будто она имела руку длиной в 1000 километров!”

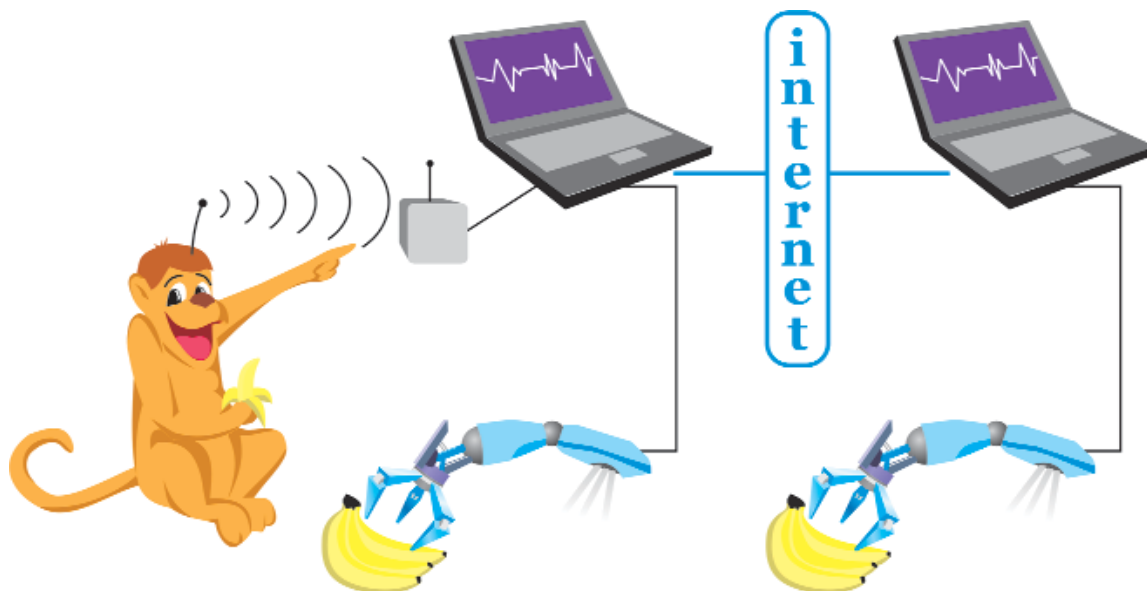


Рис 211. Обезьяна манипулирует механической рукой

Таким образом сегодня мы имеем реальный пример совершенно фантастических способностей:

- *телекинеза* — перемещения предметами силой мысли;
- *телепатии* — передачи мысли на расстояние.

Это в очередной раз показывает, насколько гибок человеческий мозг — он приспосабливается не только к “естественным” действиям (физическим упражнениям, речи, письму, игре на музыкальных инструментах и т.п.), но и к искусственным, которые природой совершенно не предусмотрены, например, управлению искусственной рукой на подсознательном уровне.

Развитие подобных экспериментов открывают перед человечеством множество перспектив. Основная — это помощь людям, которые по той или иной причине не могут использовать стандартные средства взаимодействия с компьютером/роботом. Предполагается вживление некоторого количества микропроводников в различные двигательные центры мозга, которые затем будут соединены с нейрочипом, имплантированным в череп. Человек с подобным устройством сможет просто представляя различные движения управлять другим устройством, например, инвалидной коляской.

В принципе, таким же образом можно управлять роботизированной рукой/ногой или даже своей собственной, если это невозможно из-за повреждений нервной системы. Прототипы подобного устройства уже существуют.

Возможно, всего через несколько лет мы откажемся от компьютерных клавиатур, мышей и других “каменных топов” нашей эпохи, ведь что может быть удобнее интерфейса, в котором компьютер понимает человеческий мозг без посредников в виде рук и ног, которые двигают мышку, нажимают кнопки на клавиатуре, дергают джойстик, нажимают на педали и т.д. Достаточно лишь подумать, и на экране все само передвинется/напечатается/нарисуетя/сосчитается!

Чтобы там не говорили противники киборгизации, но у людей, вынужденных пользоваться имплантатами, выбора нет. Всем им имплантаты здорово помогают и они ни за что не откажутся от уникальной возможности хотя бы частично восстановить свое здоровье. И нанотехнологии уже сегодня принимают в этом непосредственное участие — с их помощью можно делать надежные биосовместимые имплантаты.

Проект “Искусственная сетчатка”, начатый в 1999 году согласно новой программе Министерства Энергетики США, дал потрясающие результаты: в 2002 году два пациента с имплантированным прототипом сетчатки могли различать крупные

буквы и некоторые предметы: чашку, нож, доску и т. д. Причем один из них до операции страдал слепотой 50 лет. В 2004 году уже шесть добровольцев носят микроэлектронный имплантат “искусственной сетчатки”, который выполняет функции живых клеток-фоторецепторов. Имплантат имеет 10 000 электродов, то есть человек видит картинку с разрешением 100x100 пикселей. К 2007 году ожидается сетчатка с разрешением 1000x1000 пикселей.

Как работает искусственный имплантат сетчатки? Устройство состоит из двух частей: одна находится непосредственно внутри глазного яблока, другая — снаружи, в очках пациента.

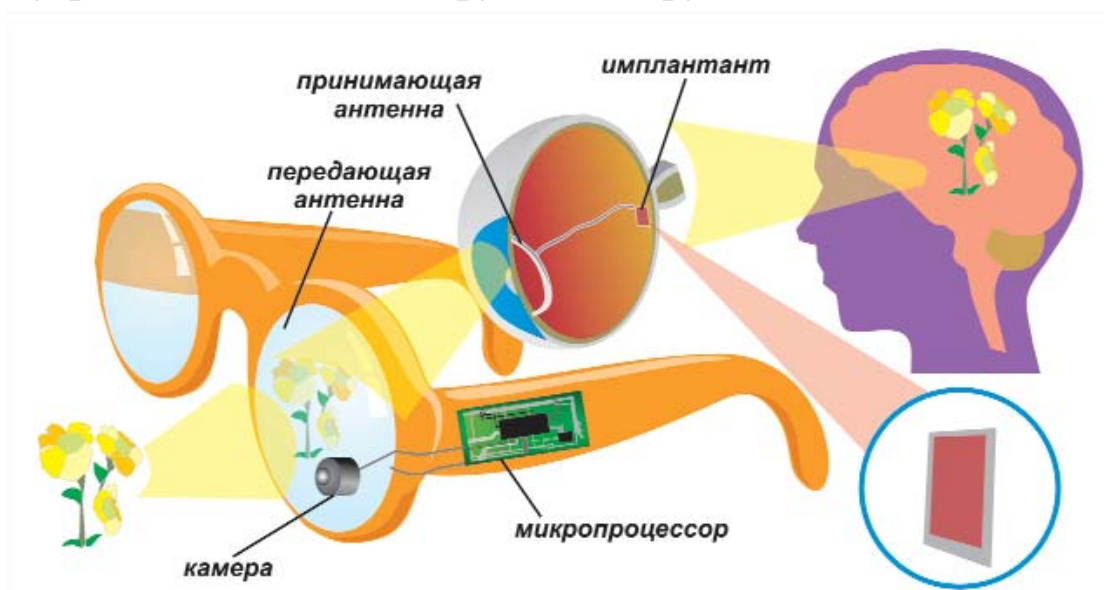


Рис 212. Принцип действия искусственной сетчатки

На линзе очков установлена миниатюрная камера, которая перехватывает изображение и передает его на микропроцессор, находящийся в дужке очков. Микропроцессор превращает сигнал с камеры в набор электрических импульсов, “понятных” для глазного нерва. В линзу очков вмонтирована передающая антенна; она транслирует полученный код прямо в глазное яблоко. Принимающая антенна расположена вокруг радужной оболочки глаза и связана с крохотным имплантатом, который определенным количеством электродов соединен с глазным нервом. С помощью имплантата и происходит передача сигнала в мозг пациента, что позволяет ему видеть окружающий мир.

Так называемая *кохлеарная имплантация* может вернуть слух даже в самых запущенных случаях, когда поражены чувствительные клетки, воспринимающие звуковые колебания. Специальный микрофон воспринимает звук, кодирует его

с помощью звукового процессора и передает электрические импульсы на слуховой нерв посредством гибких электродов, вживленных в улитку внутреннего уха пациента.

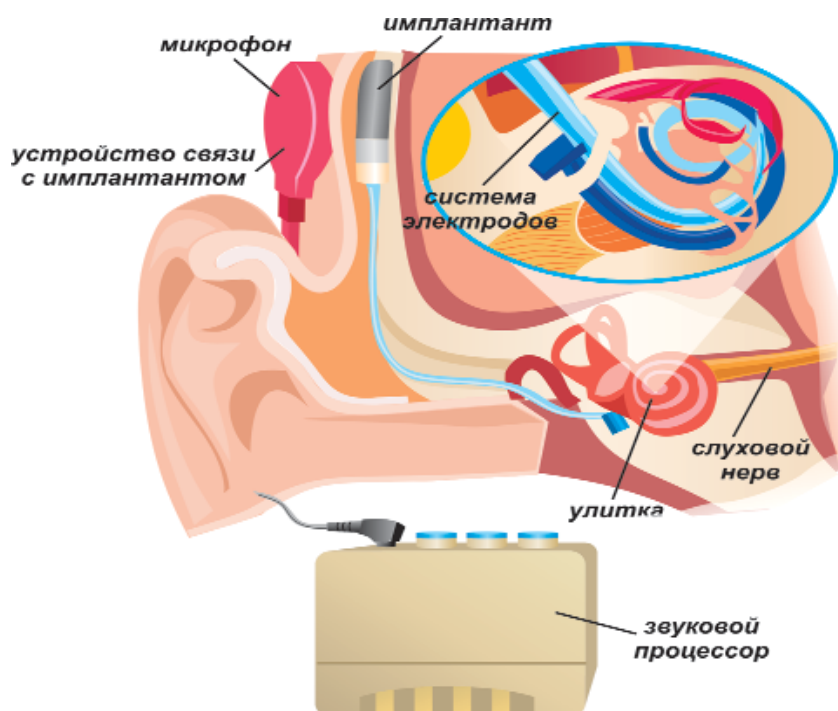


Рис 213. Схема действия кохлеарного имплантанта

Первая кохлеарная имплантация состоялась в 70-х годах XX столетия и постоянно совершенствовалась на протяжении 30 лет. Сегодня это миниатюрный аппарат с более чем 20-ю каналами стимуляции. Устройство настолько функционально, что его можно даже подключать к телевизору или магнитофону для улучшения качества звука. А вот еще один интересный факт: за время, пока писалась эта книга, ученым из Мичиганского университета удалось вместить все функциональные блоки имплантанта в миниатюрное МЕМС-устройство, такого же размера, как обычная ушная улитка.

Конечно то, что передает мозгу кохлеарный имплантант, отличается от привычных звуков и речи — все-таки количество электродов, вживленных в ухо, ограничено. Чтобы понимать обращенную к нему речь, человеку приходится несколько месяцев заниматься по специальной программе, однако это все же много лучше, чем вообще не иметь возможности слышать. Сейчас в мире около 30 000 людей с кохлеарными имплантантами, причем в России их всего несколько десятков, поскольку имплантация искусственного уха, к сожалению, стоит очень дорого — около 30 тыс. долларов.

Мы рассмотрели всего лишь два примера уже существующих и эффективно действующих нейроинтерфейсов. А сколько подобных проектов находятся на стадии разработок и лабораторных испытаний? Искусственные имплантаты печени, сердечного клапана, мочевого пузыря, поджелудочной железы — всего лишь малая часть известных разработок. Безусловно, с развитием науки и техники все больше имплантантов войдет в клиническую практику, а искусственные органы будут становиться все надежнее и совершеннее. Так же как сейчас покупают автомобили, в будущем станут приобретать более быстрые ноги, слышащие ультразвук уши и видящие радиоволны глаза. Плохо это или хорошо, судить сложно, но такая перспектива кажется вполне осуществимой.

Итак, вероятно, что в будущем перенос сознания на технический носитель окончательно сотрет различие между человеком и машиной и устранил любимую тему футурологов — опасность подчинения человека более развитым искусственным интеллектом: ведь тогда этим самым более развитым искусственным интеллектом и будет сам человек.

Однако подобный перенос сознания порождает ряд философских проблем, связанных, например, с появлением нескольких копий одного и того же сознания — одновременно в биологическом и машинном теле. После сканирования биологический человек останется тем же самым и впоследствии умрет своей смертью. Более того, он может быть отсканирован даже без его ведома и лично для него (биологического) не столь важна судьба его электронной копии, потому что его инстинкт самосохранения все равно не будет удовлетворен.

Эту проблему можно разрешить постепенным замещением биологических нейронов искусственными. Тогда непрерывность сознания во времени и пространстве сохранится и новый кибернетический человек будет той же личностью, что и его биологический предшественник, как в каждый момент переноса, так и после него. Таким образом, замена естественных нейронов искусственными не будет принципиально отличаться от естественного обновления атомов в нервных клетках. Это не обязательно потребует надстройки искусственных нейронов вместо удаленных живых, можно обойтись включением готовых нейронов на чипе по мере подсоединения интерфейсов к старым.

Принимая во внимание все вышесказанное, нет оснований предполагать, что человеческое сознание и человеческое общество являются наивысшими формами материи, выше которых она развиться уже не сможет. Но тогда мы должны будем рассматривать человека уже не как “венец творения”, а как лишь одну из ступеней в бесконечной лестнице развития. То, что будет стоять на более высоких ступенях, может оказаться во столько же раз сложнее человека, во сколько раз человек сложнее одноклеточного организма. Ну а если мы сконструируем искусственные носители сознания, то нет причин, почему они должны быть подвержены старости и смерти подобно биологическим.

Проект третий – криосохранение

С каждым днем все популярнее становится так называемая **криотерапия** — лечение холодом (от греч. *krios* — холод). В криотерапии используется самый что ни на есть экстремальный холод: -196°C (температура жидкого азота). Современные криотерапевтические методы позволяют эффективно лечить многие кожные заболевания, улучшают обменные процессы, стимулируют иммунитет и даже борются с артритом, радикулитом и ревматизмом.

Испокон веков холод использовали как эффективный способ хранения быстропортящихся продуктов. Глубоко замороженные мясо, рыба, овощи и фрукты могут храниться в морозильной камере годами, не разлагаясь и практически не теряя своих свойств. Это говорит о том, что в условиях глубокого холода все внутриклеточные процессы протекают очень медленно. При температуре жидкого азота эти процессы останавливаются полностью, а, значит, любая органическая ткань в таких условиях может храниться веками без каких-либо изменений. С помощью современных криобиологических методов медики замораживают донорские кожу, роговицу, костный мозг, сперму, эмбрионы и другие ткани, чтобы их можно было безопасно хранить и транспортировать в любую точку мира, после чего возможно их размораживание и возврат к нормальному состоянию.

Открытия 50-х годов в области молекулярной биологии в основном прояснили картину клеточной и молекулярной природы жизни. Это позволило высказать предположение о том, что повреждения клеток, происходящие и в начальные стадии смерти, и от замораживания, теоретически могут быть не нас-

только велики, чтобы наука будущего не могла их вылечить. Все это привело к идее *крионирования* умерших людей с целью заморозить их в будущем, когда наномедицина разовьется настолько, что сможет починить поврежденные ткани. Какие научные факты подтверждают такую возможность?

Личность человека определяется деятельностью его мозга. Причем как общие принципы обработки информации мозгом, так и индивидуальные особенности человека, его память в основном зависят от характера соединений между собой нейронов. Это значит, что для будущего оживления человека достаточно сохранить структуру связей нервных клеток между собой. Или, по крайней мере, сохранить столько информации об этих связях, чтобы восстановить их с достаточной точностью.

Во-вторых, экспериментальные данные свидетельствуют, что после смерти человека его нервные клетки разрушаются очень медленно. В течение нескольких часов после смерти еще хорошо сохраняются связи между нервными клетками. А многие нервные клетки еще живы. И, следовательно, есть шанс на оживление нервных клеток и восстановление функций всего мозга, всей памяти человека, если реанимацию проводить средствами медицины будущего, дающими возможность лечить нейроны на молекулярном уровне. Таким образом, то, что сегодняшняя медицина считает смертью человека, является лишь констатацией факта, что человека нельзя реанимировать современными методами. На самом деле человек действительно необратимо умирает лишь через несколько часов после остановки сердца и исчезновения электрической активности мозга. Поэтому существующая практика замораживания сразу после регистрации смерти по критериям современной медицины оставляет человеку шанс на реанимацию медициной будущего.

Уже сейчас можно замораживать и размораживать отдельные нервные клетки и небольшие кусочки мозга так, что после размораживания они оказываются живыми. Это означает, что и при замораживании целого мозга или тела многие его клетки сохраняют свою жизнеспособность, а те, которые умирают, скорее всего, разрушаются не полностью, а лишь частично. А когда замораживают органы целиком и анализируют повреждения, получаемые отдельными клетками при помощи электронной микроскопии, то этот анализ свидетельствует, что такие

повреждения в принципе могут быть восстановлены при использовании молекулярных роботов или другой медицинской технологии будущего.

Наибольшую опасность при замораживании представляет механическое повреждение мембран клеток образующимися кристаллами льда. Образуюсь как вне, так и, что гораздо опаснее, внутри клеток, они разрывают липидный бимолекулярный слой, формирующий эти мембраны. Для защиты клеток от повреждения при замораживании используют специальные вещества — *криопротекторы*. Они делятся на две группы: проникающие внутрь клетки (например, диметилсульфоксид, ацетамид, пропиленгликоль, глицерин, этиленгликоль), и не проникающие (полиэтиленгликоли и полиэтиленоксиды, фикоил, сахароза, трегалоза и др.), которые действуют снаружи, осмотически вытягивая из клетки воду.

Последнее выгодно: чем меньше в клетке останется воды, тем меньше потом образуется льда. Однако удаление воды приводит к повышению концентрации остающихся внутри клетки солей, вплоть до значений, при которых происходит денатурация белка. Криопротекторы же первого типа не только снижают температуру замерзания, но и разбавляют образующийся при кристаллизации «рассол», не давая белкам денатурироваться.

Использованием криопротекторов — еще не панацея от повреждающего воздействия льда. Дело в том, что высокие концентрации криопротекторов ядовиты, а низкие — малоэффективны. Устранить это противоречие предполагается путем поэтапного повышения концентрации криопротекторов по мере охлаждения, так как понижение температуры уменьшает отравляющее воздействие криопротекторов. Также ведутся поиски новых эффективных криопротекторов и условий замораживания.

Еще одной проблемой замораживания больших объектов является неоднородность биологических тканей, входящих в состав организма, что ведет к неравномерным скоростям замерзания различных участков тканей и органов, возникновению химических и механических напряжений. Результатом этого является образование многочисленных повреждений на клеточном (разрыв стенок клеток) и на тканевом (микротрещины) уровнях. Это делает простое размораживание, без предварительного исправления повреждений, невозможным. Однако

такие повреждения могут быть ликвидированы медицинскими нанороботами будущего.

Крионика как отдельное биомедицинское направление обязана своим возникновением профессору физики Роберту Эттинджеру — автору книги “Перспективы бессмертия”, изданной в США в 1964 году. В ней были представлены основные идеи крионики. Начиналась она с вывода, что большинство ныне живущих людей имеют хороший шанс на возобновление физической жизни после смерти. Этот вывод следовал из того факта, что замороженные тела подвержены лишь незначительным изменениям, и из предположения, что перспективные технологии в конечном счете позволят осуществить оживление и омолаживание замороженных организмов.

Публикация “Перспектив бессмертия” и ее последующий перевод на другие языки инициировало крионическое движение в США и в некоторых других странах. Стали создаваться крионические организации для пропаганды крионики и для обеспечения возможности практического осуществления замораживания (т. е. для привлечения финансовых средств и оборудования, покупки или строительства депозитариев для хранения замороженных тел, юридического и организационного обеспечения и т. д.).

1967 год ознаменовался замораживанием первого человека, произведенным «по всем правилам». Этим первым пациентом был американский профессор психологии Джеймс Бедфорд.

В настоящее время замораживание для продления жизни применяется рядом частных американских клиник. Сегодня ими заморожено около 100 пациентов. К процедуре замораживания в основном прибегают люди, которые хотят либо жить долго, либо получить шанс воспользоваться передовыми возможностями медицины будущего в случаях, когда бессильна современная медицина (если им грозит неизбежная смерть от рака, СПИДа, сердечно-сосудистых заболеваний и т. п.).

Поскольку при температуре жидкого азота никаких изменений в замороженном теле не происходит, теоретически замороженные пациенты могут храниться тысячи лет. Однако, по наиболее оптимистичным оценкам, технология для их оживления может появиться уже во второй половине следующего века. Поэтому, скорее всего, им предстоит храниться в течение пятидесяти-ста лет.

В общих чертах современная процедура крионирования выглядит так:

1. Человек заключает с крионической организацией контракт на криостаз. При этом он, как правило, становится членом этой организации (что подразумевает уплату членских взносов). Стоимость криостаза составляет от 30 000 до 150 000 долларов. Помимо всего прочего контракт предусматривает передачу всех прав на тело клиента крионической организации.

2. После получения организацией извещения о смерти клиента или об угрожающих ситуациях специально обученная бригада специалистов выезжает и начинает операции по подготовке клиента к заморозке (насыщает ткани раствором криопротектора и начинает постепенно охлаждать тело), после чего транспортирует его в депозитарий (хранилище), принадлежащее организации, где после завершения замораживания тело помещается в криостат (большой металлический термос), наполненный жидким азотом.

3. Тело хранится в депозитарии в течение срока, оговоренного в контракте. При используемом способе хранения происходит постоянное испарение жидкого азота из криостата, и его необходимо туда периодически добавлять. Для покрытия этих и других затрат по хранению тела в течение неопределенно долгого времени используется доход от вложения (в ценные бумаги, в банки под процент и т. п.) всех средств из стоимости криостаза, оставшихся после расходов на замораживание.

Итак, замороженное тело может храниться в жидком азоте в течение столетий практически без изменений. Возможность восстановления организма на молекулярном уровне в будущем связывают с развитием нанотехнологий, а именно молекулярных нанороботов в стиле Фрайтаса. Крионисты описывают гипотетическую процедуру размораживания следующим образом:

1. Замороженное тело, извлеченное из криостата, начинает постепенно оттаивать и в него внедряется огромное количество молекулярных роботов.

2. Они анализируют повреждения, возникшие в клетках организма при его смерти, замораживании и хранении, обмениваясь информацией между собой и с суперкомпьютером вне тела.

3. На основе этого анализа роботы производят исправление всех повреждений (восстанавливают клеточные мембраны и органеллы и т. д.). Кроме этого, они производят омолаживание

и лечение каждой клетки (а значит, и всего организма), т. е. оживлен будет не старый и больной организм, а здоровый и молодой.

4. По окончании работы молекулярные роботы покидают оживленное тело через кровеносную и дыхательную систему.

Каким бы фантастическим ни казался предлагаемый крионистами сценарий, главным аргументом в их пользу является то, что помимо замораживания сегодня нет никаких других методов, дающих шанс для достижения личного бессмертия. Поэтому над входом в лабораторию Института крионики (штат Мичиган, США), где хранятся замороженные тела людей, висит табличка с надписью “Обрети надежду, всяк сюда входящий”.

О некоторых этических вопросах бессмертия

Пока ученые пытаются выложить из льдинок слово “вечность”, многие любят пофилософствовать о грядущих благах бессмертия, нанотехнологий и т. п. Причем большинство считает само собой разумеющимся, что все эти блага будут доступны каждому, а на Земле тут же наступит рай. Повсюду будет царить мир, любовь, понимание, а люди займутся исключительно наукой и искусством.

Однако если взглянуть на вещи более трезво, то возникает несколько вопросов. Может ли бессмертие на самом деле быть доступным каждому или же его будут удостоены лишь избранные? Ведь плодами большинства научных открытий и изобретений, как правило, пользуется не каждый прохожий, а в большей мере та группа лиц или организация, которая их создала. Атомным оружием владеют только создавшие его правительства. Создатели суперкомпьютеров продают только устаревшие модели, да и то с большими ограничениями. Эффективные экономические и политические разработки и вовсе скрываются придумавшими их предприятиями как коммерческая тайна. Нанотехнологии, ИИ, бессмертие — гораздо более влиятельные технологии и наивно думать, что их изобретатели просто так поделятся такими возможностями со всеми желающими.

Кроме того, следует признать, что между мышлением талантливого ученого, посвятившего всю свою жизнь развитию науки, и мышлением завсегдатаев пивных баров и сельских танцулек существует непреодолимая пропасть. И первого вряд ли прельстит перспектива заполонить планету бессмертными реплицирующимися обывателями, функционально подобными “серой слизи”.

Ведь большинство людей, вопреки воззрениям утопистов, не станут заниматься наукой и искусством, а продолжат свои нынешние, куда менее возвышенные занятия, ибо человек выбирает занятие не по окружающим условиям, но по своему характеру.

Поэтому вполне вероятно, что с открытием “эликсира бессмертия” в обществе может возникнуть своеобразная “каста бессмертных”, для которой простые смертные со временем будут становиться все более досадной помехой, отсталыми дикарями, безрассудно расходующими жизненно важные ресурсы планеты. Какое развитие может получить подобный сценарий, даже страшно подумать.

Сама собой напрашивается аналогия с раковыми клетками — единственными бессмертными клетками в сложной многоклеточной системе, каковой является наш организм. Хотя раковые клетки и живут неизмеримо дольше обычных, но само их появление означает смерть для всего организма (в том числе и для самих “бессмертных”). Человеческое сообщество, состоящее из миллиардов единиц, взаимодействующих между собой — организм не менее сложный, и к чему может привести бессмертие отдельных его “клеток” вряд ли можно предсказать сегодня.

Итак, повторим еще раз!

- Биотехнология работает с биомолекулами, микроорганизмами, клетками и тканями растений и животных. Ее достижения применяются в самых разнообразных отраслях промышленности (пищевой, фармацевтической, нефтяной, экологии, энергетике, электронике, медицине, сельском хозяйстве и др.).
- Основная цель биотехнологии — получение биообъектов с заданными свойствами.
- В основе биотехнологии лежат процессы, протекающие в клетке. Клетки бывают двух типов — прокариотные (бактерии) и эукариотные (грибы, растения и животные).
- Типичная прокариотная клетка включает :
Геном (инструкция по сборке РНК и белков);
Механизм репликации ДНК (производство ее новых копий);
Рибосома (синтез белка);
Цитозоль (управление обменом веществ);
Мембрана (взаимодействие с внешней средой и синтез АТФ).

- Клетки существуют за счет *метаболизма* — постоянного обмена веществ клетки с внешней средой. Из среды в клетку поступают *субстраты* (углеродсодержащие соединения), а выделяются *продукты* (белки, ферменты, аминокислоты, витамины, гормоны, антибиотики и другие биологически активные соединения). Биотехнология обеспечивает сверхсинтез необходимого продукта.

- Общая схема биотехнологического процесса:

1. Подготовка питательной среды.
2. Получение чистых штаммов для внесения в ферментер.
3. Ферментация — особое “перемешивание” питательной среды вместе с микроорганизмами. По ее окончании образуется *культуральная жидкость* или *бульон*.

4. Выделение и очистка конечного продукта.

5. Получение товарных форм продукта.

- Примеры биотехнологических производств: *получение аминокислот, витаминов, органических кислот, антибиотиков, ферментов, иммунобиологических препаратов* (вакцин, иммунных сывороток и диагностикумов), *инсулина, соматотропина* (гормона роста), *интерферонов*;

- В основе генной инженерии лежит *технология рекомбинантной ДНК*, то есть встраивание гена одного биологического вида в ДНК другого (горизонтальный перенос генов). Примеры горизонтального переноса можно встретить и в природе, в среде микроорганизмов.

- Развитие ГИ способствовало открытию *трансдукции* — механизма горизонтального переноса генетического материала посредством вирусов (бактериофагов) у прокариот.

- **Вирусы** — мелкие неклеточные формы (до 100-200 нм), состоящие из ДНК или РНК, окруженные молекулами белка. Они занимают промежуточное положение между живой и неживой материей, поскольку не имеют клеточного строения, но способны к саморепликации.

- Функционирование вирусов: 1) прикрепление к клетке; 2) растворение ее оболочки; 3) проникновение внутрь клетки молекулы ДНК вируса; 4) встраивание ДНК вируса в ДНК клетки; 5) синтез молекул ДНК вируса и образование множества вирусов; 6) гибель клетки и выход вирусов наружу; 7) заражение вирусами новых здоровых клеток.

- С помощью генной инженерии удастся получать *трансгенные* растения и животных, обладающих улучшенными качествами и высокой стойкостью к разным стресс-факторам. Несмотря на явные успехи, противников у генной инженерии не меньше, чем сторонников, даже среди ученых.
- Одним из грандиознейший проектов биотехнологии - “Геном человека”, объединил ученых из разных стран и длился 12 лет. В результате был полностью расшифрован геном человека, состоящий из почти трех миллиардов пар нуклеотидов и установлены функции 29 181 генов. Это имеет огромное научное значение, поскольку исследователи получили возможность выяснить причины многих генетических заболеваний и найти способы их лечения.
- Расшифровка генома основана на процессе **секвенирования**. В общих чертах он представляет собой “нарезание” ДНК на отдельные участки посредством рестриктаз и их дальнейший анализ.
- С развитием биотехнологии тесно связано новое направление медицинской науки — молекулярная наномедицина. К ней относятся такие быстро развивающиеся проекты, как:
Лаборатории на чипе;
Адресная доставка лекарств;
Новые бактерицидные и противовирусные средства;
Диагностика заболеваний с помощью квантовых точек;
Нанороботы, ремонтирующие поврежденные клетки;
Нейроэлектронные интерфейсы и многое другое.
- Развитие нанобиотехнологий и наномедицины открывает перед человечеством удивительные возможности, включая в перспективе и достижение личного бессмертия. Это привело к популяризации нового философского течения — *трансгуманизма*, ратующего за личное бессмертие, достигаемое с помощью технического прогресса.

Глава 7. Нанобизнес

“Не верь, не бойся, не проси...”

Почему в этой книге нет главы “наноработа” или даже “на-нокарьера”, а только “нанобизнес”? Да потому, что в отечественной наноотрасли надо не работать или делать карьеру, а создавать бизнес. Если вы будете ждать, пока кто-то создаст для вас рабочие места, то можете не дожидаться этого никогда. Сегодня наноиндустрии нужны люди, способные не только делать выдающиеся открытия, но и производить продукцию, а также продвигать ее на рынки, преодолевая все возможные препятствия.

Что значит делать *бизнес*? Это значит придумать что-то новое, затем это что-то произвести, а после продать. Так вот, придумать нелегко, произвести еще труднее, но самое трудное — продать.

В США и странах Европы выдающиеся ученые и изобретатели люди далеко не бедные. Наши же российские ученые часто не обладают предпринимательской жилкой вообще. Как это ни парадоксально, но они создают технологии, приносящее очень большой экономический эффект, но совершенно не могут их продвигать и получать большие деньги за решение сложных задач. Более того, часто при выборе задач они и не сравнивают их с точки зрения экономического эффекта, а ведь интуитивно понятно, что новое техническое решение, позволяющее производителю сэкономить миллион долларов, будет оплачено намного выше, чем такое же с точки зрения времени и трудозатрат, но дающее копеечные выгоды.

Современная тенденция такова, что среди десяти самых богатых людей мира большинство — это люди, сделавшие капитал с нуля (взять хотя бы Билла Гейтса). Хотя еще несколько десятилетий назад самые богатые люди мира получали свой капитал по наследству. В основе каждого такого состояния лежат изобретения в области техники, производства или продаж.

Так почему же российские исследователи не могут применить свой изобретательский талант для продажи собственных открытий? Вот на эту тему мы и поразмыслим в рамках этой небольшой главы.

Инвестиции

Инвестиции — это на самом деле ни что иное, как вложения. Для развития любого бизнеса нужны вложения: денег, времени, способностей — с целью их дальнейшего приумножения.

В последнее время все больше дальновидных предпринимателей, понимающих перспективность и экономическую выгоду нанотехнологий, предпочитают вкладывать средства в высокотехнологичные проекты. Об этом хорошо свидетельствует следующая диаграмма:



Рис 214. Динамика роста мировых наноинвестиций

Мы уже говорили о “Национальной нанотехнологической инициативе” США, предусматривающей создание множества технологий частными компаниями в партнерстве с государством. Объем инвестиций в нанотехнологии в этой стране по разным оценкам составляет на сегодня от 50 до 60% от всех мировых инвестиций.

На Россию же приходится менее 1% мировых “наноинвестиций”. И в России не существует целевой государственной программы поддержки нанотехнологий. И что самое неприятное — государство само еще не определилось, нужны ли ему нанотехнологии. “Национальная нанотехнологическая инициа-

тива России” — сегодня звучит фантастично, поэтому тому, кто все-таки решил всерьез заняться нанотехнологиями у нас, надо иметь четкое представление о том, откуда берутся и куда уходят деньги в этой удивительной отрасли. Но сначала — немного о том, откуда берутся и куда уходят деньги вообще.

Доходность и риск

Необходимо понять и принять как должное одну простую истину: доход от инвестиций можно получить, только приняв на себя определенный риск.

В любом бизнесе чем большую прибыль вы хотите получить, тем на больший риск вам придется идти. Есть бизнесы устоявшиеся, с понятными правилами игры, понятными продуктами и понятными рынками сбыта. Для них заранее известна отдача на вложенный капитал и, как правило, она невелика, поскольку хорошая прогнозируемость этого бизнеса привлекает полчища конкурентов. К такого рода бизнесам относятся, например, эксплуатация автозаправочных станций или продажа электроэнергии. Здесь возможны убытки в отдельные неблагоприятные периоды, однако относительно общей величины вложенного капитала они невелики.

С другой стороны, существуют рискованные бизнесы, связанные с разработкой и продвижением на рынки *новых* продуктов. Разработка новых продуктов требует времени и денег, и поэтому заранее предсказать, получится ли разработать действительно хороший продукт и будет ли он затем принят потребителями, очень сложно. Риск неудачи такого бизнеса очень велик — вплоть до полной потери инвестированного капитала. Однако же в случае удачи можно оказаться первым и единственным производителем остро востребованного продукта и за счет этого получать в течение определенного времени очень высокие прибыли (чтобы догнать вас, конкурентам придется затратить немало времени и ресурсов).

В бизнесе доходность и риск идут рука об руку, существуют одновременно. Риск — это то, на что приходится идти, если хочешь добиться поставленной цели, но многие оказываются к нему просто психологически не готовы. Если инвестиции в банковские вклады имеют предсказуемый результат, то про нанотехнологические проекты этого сказать нельзя, поскольку жизненные повороты практически непредсказуемы.

Возникает справедливый вопрос: а как вообще можно вкладывать в непредсказуемое? Любой предприниматель подтвердит, что до 96% своего времени он тратит на борьбу с наступившими “рисками” — различными неувязками, сбоями и неожиданными осложнениями. Поэтому чтобы вкладывать средства в непредсказуемое, надо постараться все непредсказуемое просчитать. По словам одного мудрого человека, “тот, кто не учится предусматривать и предотвращать риски, рискует сам оказаться риск-фактором, отпугивающим партнеров, инвесторов и, конечно же, деньги”. Итак,

На этапе планирования бизнеса необходимо выявить все возможные риски и продумать меры их предотвращения, а на *практическом этапе* — суметь эти меры реализовать.

Откуда берутся риски? Конечно же, отовсюду. Количество рисков пропорционально количеству взаимосвязей проекта с окружающей средой. Поставщики могут продать плохое сырье, партнеры могут подвести, покупателям может не понравиться товар, налоговая тоже тут как тут...

В общем,

Чем автономнее проект, тем он надежнее.

По разным данным, десять лет назад в нашей стране доля успешных бизнес-проектов среди всех начинаемых составляла 5-10%. Сегодня этот показатель составляет менее 0,5%. Именно такова вероятность того, что время, силы и деньги, вложенные в проект, вернутся с прибылью. Так что занятие бизнесом в России, особенно нанотехнологическим — не для слабонервных. Впрочем, надеюсь, среди читателей таких немного.

Время = деньги

Чем больше у вас есть времени, тем на большую прибыль в перспективе можно рассчитывать. Это связано со многими факторами.

Во-первых, чем больше времени у вас в распоряжении, тем менее рискованную стратегию вы можете выбрать. Например, вам понадобился миллион долларов. Если он нужен вам не срочно, а, скажем, лет через 20, то существует много не очень рискованных стратегий: создать собственное дело, выучиться

на биржевого игрока, основать компанию “Мега-Хард”, стать зятем олигарха и т.п.. Однако если миллион нужен вам завтра, то остаются лишь очень рискованные варианты вроде выигрыша в казино или ограбления банка. Очевидно, что во втором случае вероятность “прогореть” тяготеет к 100%.

Второй важный фактор, усиливающий влияние времени на итоговую доходность — это эффект сложных процентов, когда полученная прибыль сама начинает генерировать дополнительную прибыль. Например, если вы приумножаете свои средства на 50% в год и не проедаете, а снова инвестируете прибыль, то за два года они увеличатся не на 100%, а на 125% и т.д.

Конкуренция

Конкуренция — это конфликтное соперничество за достижение относительно лучших условий существования, функционирования и развития. Хотим мы этого или нет, но мир устроен так, что многие люди не могут одновременно находиться в лучших условиях. “Всеобщее равенство”, о котором на протяжении всей человеческой истории грезят утописты, противоречит “естественному неравенству”, установленному природой. Все мы рождаемся разными, и относительно каждого человека на Земле есть кто-то сильнее, кто-то умнее и кто-то красивее. Природное неравенство приводит к выживанию более сильного, прогрессивного и отмиранию слабого, устаревшего. Поэтому хоть на первый взгляд конкуренция может показаться злом, на самом деле она — двигатель прогресса.

Конкуренция — это такое же древнее явление, как экспоненциальное развитие, более того, она неразрывно связана с ним. Если бы выживали не самые эффективные формы жизни, а все подряд, то не было бы не то что человека, а даже ДНК. Если бы неограниченно производились все изобретения, а не только самые нужные и эффективные, то все ресурсы планеты давно были бы исчерпаны на производство триллионов тонн ненужного хлама. Там, где нет конкуренции, образуется застой. Распад величайших цивилизаций всегда начинался с момента их полного расцвета. Поэтому всегда и везде люди, компании и государства будут конкурировать между собой — только так возможно продвижение вперед.

Но к чему я говорю все это? Никогда не инвестируйте в производство продукции, неконкурентоспособной на мировом

рынке. Как бы много времени и денег вы не потратили — все равно купят у конкурентов, а не у вас. Если нельзя сделать нечто лучше других, то лучше сделать нечто другое.

В то же время, если сегодня ваша продукция востребована рынком, то не факт, что завтра кто-то произведет то же самое, но дешевле и качественнее. Поэтому чтобы быть успешным в бизнесе, нужно не только создать и вести его, но и непрерывно развивать свои конкурентные преимущества:

- *Научно-технические преимущества* (качество научных исследований, возможность разработки и производства новых товаров, степень овладения существующими технологиями);

- *Производственные преимущества* (низкие затраты на производство продукции, качество продукции, полнота использования возможностей оборудования, выгодное местонахождение с точки зрения транспортировки, доступ к квалифицированной рабочей силе, высокая производительность труда, возможность производства различной продукции, возможность выполнения заказов потребителей);

- *Торговые преимущества* (широкая сеть сбыта, доступ покупателей к товару, наличие собственных магазинов, низкие расходы на продажу, скорая доставка);

- *Маркетинговые преимущества* (высокая квалификация сотрудников отдела продаж, техническая поддержка, аккуратное исполнение заказов, разнообразие продукции, искусство продаж, привлекательный дизайн и упаковка, гарантии);

- *Профессиональные преимущества* (особый талант, ноу-хау, компетентность, умение создавать эффективную рекламу, способность быстро переводить товары из стадии разработки в промышленное производство);

- *Организационные преимущества* (уровень информационных систем, способность быстро реагировать на изменяющуюся ситуацию, опыт);

- *Прочие преимущества* (благоприятный имидж и репутация, низкие затраты, выгодное расположение, приятные в общении и доброжелательные сотрудники, доступ на финансовые рынки, правовая защищенность) и т.д. и т.п.

Когда на рынке много конкурентов, каждому из них достается не так уж много прибыли, поэтому единственный способ сделать бизнес сверхэффективным — это избавиться от конку-

ренции и стать монополистом. Я имею в виду не те кровожадные методы, о которых вы подумали, а выдающееся изобретение — то, чего еще никто кроме вас не умеет делать.

Пока еще конкуренты разуждают, как это вам удастся, вы сможете сделать новое изобретение, и вас уже будет не догнать. Билл Гейтс так и сделал — он просто изобрел DOS в то время, когда никто об этом не задумывался. А когда успех DOS привлек множество конкурентов, он изобрел Windows и стал самым богатым человеком в мире.

Есть другой пример. Один российский ученый (не будем называть его фамилии) разработал метод производства необычайно эффективных квантовых устройств. Однако вместо того, чтобы основать многомиллионный бизнес, он попросту продал ее компании “Samsung” за несколько сотен долларов! А ведь подобных русских “умников” в крупнейших корпорациях, увы, совсем не мало.

Еще одна распространенная отечественная глупость — уехать работать за границу по контракту или гранту. В качестве примера можно привести одну печальную историю. Совсем недавно один русский физик два года проработал в американской компании, получив грант на разработку своего изобретения. Когда же работодатели поняли суть его технологии, то, вопреки ожиданиям изобретателя, не стали продлевать контракт, и бедняге пришлось вернуться в Россию. В итоге этот талантливый человек... попросту спился, поскольку для дальнейшего развития его технологии здесь не было никаких условий, да и догонять западных конкурентов — после того, как собственноручно раскрыл перед ними все карты — уже не имело смысла.

Не забывайте о том, что пока вы руководите своим бизнесом, ваши конкурентные преимущества — изобретения, способности, талант — работают на вас. Как только вы продали их чужой компании, вы становитесь наемным работником — пролетарием. Когда они разберутся в вашем изобретении, вы станете им не нужны и потеряете свои преимущества. Таков закон естественного отбора.

Информация

Доходы от инвестиций прямо пропорциональны качеству информации, которой вы владеете. Недаром Билл Гейтс сказал, что в новом мире успеха добьется тот, кто научится правильно обращаться с информацией, а уж он-то в этом деле понимает

как никто другой. Если вы знаете, акции какой компании вырастут в цене, а какие упадут — вы можете мгновенно заработать кучу денег, однако чтобы получить такую информацию, нужно досконально знать все, что творится в каждой компании.

Некоторые люди вообще воспринимают инвестиции как казино, а инвестиции в наноиндустрию — как казино в квадрате, что часто приводит к расцвету инвестирования практически “на авось”.

Как же этого избежать? Как получить желанную информацию, чтобы выгодно инвестировать свои деньги и время? Основой драгоценного знания является разведка. Разведка и еще раз разведка — разумеется, в рамках закона. Наноиндустрия обладает таким количеством взаимосвязей, что достаточно просто открыть глаза и “наострить уши”, чтобы узнать все необходимое и даже сверх того, при этом информация может попасть к вам в руки различными путями:

- Мониторингом СМИ, относящихся к нужной отрасли;
- Путем развития контактов с экспертами и аналитиками;
- Через сотрудничество с коллегами и инвесторами;
- Посредством изучения образцов продукции конкурентов;
- С помощью оперативной работы и из прочих источников.

Учтите, что противостоящие вам крупные корпорации имеют огромные разведывательные службы, сопоставимые (а часто и сросшиеся) с государственными. “Однако с ними же невозможно конкурировать!”, — подумаете вы, и будете неправы. Часто крупные компании бывают неповоротливы, а информация, призывающая к масштабным переменам в их деятельности, обычно доходит до их “мозгового центра” долго, проходя сквозь огромную бюрократическую систему аналитиков и секретарей (а то и вовсе игнорируется).

Маленькие же компании, состоящие из нескольких человек, чрезвычайно заинтересованы в развитии и расширении, поэтому способны мгновенно реагировать на поступающую извне информацию и использовать ее в своих интересах.

Не надо бояться конкурировать с гигантами только потому, что они большие. Динозавр может заметить добычу раньше, чем волк, но чтобы сдвинуться с места, ему надо затратить в тысячу раз больше энергии.

Получив информацию, ее надо еще *осмыслить*. Аналитик в наноиндустрии играет гораздо большую роль, чем, например, в сельском хозяйстве. Это связано с тем, что только *систематическое*

изучение всей мировой наноиндустрии в ее взаимосвязи и развитии может служить основой принятия решений.

Для успешного анализа надо уметь сопоставить множество аспектов проблемы — от фундаментальных научных основ до таможенных вопросов. Аналитик должен не только превосходно знать финансы и инвестиционный менеджмент, но и обладать междисциплинарными познаниями в самых различных областях: химия, физика, биология, информатика, электроника, математика, история, социология, психология, науковедение, технология, география, политология и т.п. Причем эти знания должны быть не разрозненными, а связанными в единое системное мировоззрение. Где найти такие кадры? Увы, стандартная система образования далека от подготовки таких специалистов, поэтому научиться можно только самостоятельно.

Конечно, не обязательно заниматься этим самому — можно обратиться к профессионалам. Например, к аналитикам компании Nanotechnology News Network, ежедневно отслеживающей сотни открытых мировых источников в мировой наноиндустрии. Всего за год из еженедельной рассылки, которую делали два студента и читали 30 человек, эта компания выросла в настоящую информационную монополию: набрав в любой поисковой системе слово “нанотехнологии”, вы попадете на один из ее сайтов, а периодическую аналитику компании выписывают крупнейшие банки и промышленные предприятия.

Уже сегодня объем деловой информации, ежедневно циркулирующей в отрасли, составляет гигабайты. Однако, чтобы быть в курсе дел, вовсе не обязательно превращаться в “книжного червя”, забыв обо всем остальном. Вместо этого можно читать еженедельный отчет Nanotechnology Business Week Report, который на двух страничках на русском языке рассказывает обо всем важном, но ни о чем лишнем. Авторы отчета для составления этих двух страниц буквально “перелопачивают” более 200 (!) страниц сырой информации (всех мировых пресс-релизов и комментариев за неделю), зато чтение и понимание его занимает в сто раз меньше времени.

Также выходит отечественный журнал “Нанотехника”, посвященный практическому внедрению нанотехнологии в российскую промышленность, научно-популярный CD-ROM “Мир нанотехнологий” и множество других информационных изданий.

Наноэкономика

На первый взгляд, развитие техники может показаться линейным: вчера изобрели одно, сегодня — другое, завтра — третье и т.д. Большинство людей полагают, что будущее будет в основном похожим на их настоящее, которое, в свою очередь, не сильно отличается от их прошлого. Однако история учит нас тому, что это не так, и на самом деле развитие происходит по экспоненте.

Давайте вспомним, что такое экспонента. Хорошо иллюстрирует экспоненциальный рост легенда об изобретателе шахмат.

По преданию, императору эта игра очень понравилась, и он захотел щедро наградить ее изобретателя. “Проси, чего хочешь. Я достаточно богат, чтобы исполнить твое самое смелое желание”, – сказал император ученому. Изобретатель попросил, чтобы ему в награду дали столько зерен риса, сколько получится в сумме, если на 1-й квадрат шахматной доски положить одно зерно, на 2-ой квадрат – 2 зерна, на 3-й – 4 зерна и т.д., увеличивая число зерен каждый раз вдвое. Император рассмеялся такой, по его мнению, дешевой наградой и приказал немедленно выдать ученому требуемое количество риса.

1	2	4	8	16	32	64	128
256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768
65536	131072	262144	524288	1048576	2097152	4194304	8388608
$1,7 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^7$	$6,7 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^9$
$4,3 \cdot 10^9$	$8,6 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$2,7 \cdot 10^{11}$	$5,5 \cdot 10^{11}$
$1,1 \cdot 10^{12}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	$4,4 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{13}$	$3,5 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{14}$
$2,8 \cdot 10^{14}$	$5,6 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{15}$	$4,5 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$3,6 \cdot 10^{16}$
$7,2 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{17}$	$2,9 \cdot 10^{17}$	$5,8 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	$2,3 \cdot 10^{18}$	$4,6 \cdot 10^{18}$	$9,2 \cdot 10^{18}$

Рис 215. Количество рисовых зерен, на которые претендовал хитрый изобретатель

Пока он рассчитывался за первую половину доски, ничего особенного не происходило. Изобретателю выдавали рис сначала по зернышку, потом по два, затем ложками, чашками и бочками. К концу же первой половины шахматной доски изобретателю полагалось 4.294.967.296 зернышек, то есть примерно урожай большого рисового поля. Император насторожился.

Когда же принялись за вторую половину, стало очевидно, что награды ученому не видать. Полный подсчет показал, что после 63 удвоений ему надо было выдать 18.446.744.073.709.551.615 зерен риса. Математики подсчитали, что все это зерно весило бы около 700 миллиардов тонн. Такого урожая не собрать, даже если засеять рисом весь земной шар, включая океаны, а также Луну и Марс. Как видим, император при всем желании не мог выдать такую награду изобретателю шахмат.

Итак, сначала число зерен “растет” очень медленно и почти незаметно, но в какой-то момент резко становится невообразимо огромным. Удивительно, но такова суть экспоненциального роста.

Эффективность технологических инноваций, как то: быстрое действие компьютеров, разрешение микроскопов, скорость транспортировки грузов и т.п. — растет экспоненциально. А размеры, энергоемкость, и, самое главное, стоимость устройств, соответственно, экспоненциально уменьшаются.

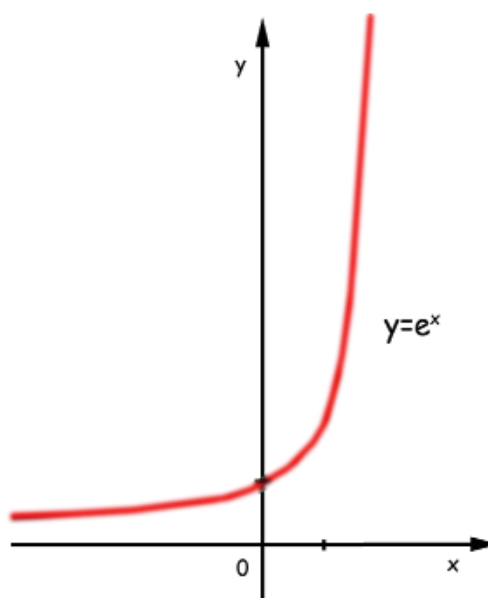


Рис 216. График экспоненты

Экспоненциальный рост присущ любому эволюционному процессу развития. Наши предки не замечали этого, так как жили на столь “пологом участке” экспоненты, что им казалось, что никакой тенденции не существует. Однако и по сей день большинство составителей прогнозов (в том числе экономических) значительно недооценивают темпы развития технологий, поскольку опираются на интуитивный линейный подход. Когда люди думают о будущем, безотчетно подразумевают, что текущие темпы прогресса сохранятся и далее.

Сегодня, когда в промышленности царит закон Мура, здравый смысл подсказывает, что следует ожидать экспоненциаль-

ного технологического прогресса и экономических изменений, которые он вызовет. Но будущее намного более неожиданно, и лишь очень немногие осознают, что и темп ускорения прогресса в свою очередь также ускоряется.

При более внимательном рассмотрении закон Мура оказывается частным случаем более общего эволюционного закона. Эволюция форм жизни потребовала миллиарды лет для создания примитивных клеток, после чего прогресс ускорился и появление принципиально новых форм жизни занимало лишь десятки миллионов лет. Человекоподобные обезьяны развились за миллионы лет, а человек — всего за сотни тысяч лет. Однако до сих пор эволюция шла медленным путем синтеза белков по информации, записанной в ДНК. С появлением человека, создающего технологии, темп развития ускорился и породил искусственные носители информации — книги, компьютеры, Интернет. Технология — это не просто создание инструментов, а процесс создания более мощных инструментов с использованием уже имеющихся. Этим человек отличается от других изготавливающих орудия существ.

Первые технологические шаги — топор, огонь, колесо — заняли десятки тысяч лет. Для людей, живших в ту эпоху, технология мало менялась даже за тысячелетия. В XIX веке мы видим больше технологических перемен, чем в девяти веках, ему предшествовавших. А за первые 20 лет XX века произошло больше перемен, чем за весь XIX век. Сегодня прогресс еще более ускоряется. Еще совсем недавно Интернет находился в зачаточном состоянии, мобильные устройства казались диковинкой, а про нанотехнологии и вовсе знал один Дрекслер.

Как видно, экспоненциальный рост не просто имеет место, но и ускоряется за счет того, что все более мощные и быстродействующие достижения каждого этапа эволюции используются для создания следующего, более совершенного этапа. Так, например, вычислительная мощность компьютеров (на единицу стоимости) в 1920-х удваивалась каждые три года, полвека назад — каждые два, а сегодня — каждый год. На этом основании Дрекслер предположил, что 100 лет прогресса в XXI веке будут эквивалентны 20.000 лет прогресса века XX.

Кстати, что касается, удвоения скорости компьютерных вычислений, мы сейчас находимся как раз примерно “посреди

шахматной доски”: со времен второй мировой войны быстродействие компьютеров удвоилось 32 раза. Размеры логических схем сравнивались с размерами нейронов, информация записывается чуть ли не отдельными атомами, ДНК служит инструментом биоинженеров... Ведущие эксперты уже предсказывают грядущую *конвергенцию (слияние) технологий*, в которой нанотехнологии, биотехнологии, нейроэлектроника и искусственный интеллект создадут эволюционирующую промышленность будущего — полностью автоматическую и развивающуюся по своим законам.



Рис 217. XXI век — век конвергентных технологий

Принципы наноэкономики

Принимая во внимание все вышесказанное, сформулируем основные принципы будущей наноэкономики:

- **Большой объем знаний позволяет создавать более эффективные машины.** Чем больше вы знаете, тем лучшие продукты вы можете создать. До изобретения двигателя внутреннего сгорания не было самолетов, а до открытия туннельного эффекта не могло быть СТМ.
- **Создание более эффективных инструментов открывает возможность создания еще более эффективных инструментов в большем количестве.** В биологической эволюции появление ДНК позволило “экспериментировать” с белковыми структурами гораздо быстрее и эффективнее. Также как изобретение компьютеров и САД позволило многократно ускорить и упростить разработку новых машин.

- *Чем быстрее компьютеры и чем их больше, тем быстрее делаются открытия и разрабатываются более эффективные машины.* Вспомните историю с расшифровкой генома человека или программы наномоделирования, возможности которых прямо зависят от производительности компьютеров.

- *Автоматизация и роботизация позволяет производить более эффективные продукты быстрее, дешевле и в большем количестве.* Представьте себе ручное производство сотен миллионов компакт-дисков или хотя бы одной нанотрубки.

Таким образом, каждое конкурентное преимущество помогает в развитии всех остальных конкурентных преимуществ - и наоборот, каждая слабость отражается на остальных сторонах бизнеса. В результате разрыв между государствами, компаниями и людьми, развивающимися с разной скоростью, увеличится чуть ли не больше, чем сегодня разрыв между людьми и животными.

Короче, вы уже поняли — эра нанотехнологий покажет, кто на что способен. Действуя быстро и с умом, в ней можно заработать миллиарды, а лентяй и беспечно попивая пиво - в одночасье стать неандертальцем.

Те, кто станут лидерами в применении нанотехнологии, станут лидерами в экономике и политике. Конкуренция в качестве, скорости и цене между заводами, использующими и игнорирующими нанотехнологии, будет подобна состязанию между гидравлическим прессом и средневековым кузнецом.

Эксперты оценивают мировой рынок нанотехнологической продукции в 1.000.000.000.000 (триллион!) долларов лишь к 2015 году. В мире существует более трех тысяч потребительских и огромное число промышленных продуктов, произведенных с помощью нанотехнологий и пользующихся спросом на мировом рынке. Функционирует свыше 16.000 нанотехнологических компаний, число которых удваивается каждые полтора года.

В России нанотехнология тоже начинает приносить свои первые плоды — в декабре 2004 года в г. Фрязино прошла первая конференция, посвященная промышленному использованию нанотехнологий, где ученые представили десятки мощных технологий, готовых к внедрению на производстве. Среди них новые материалы на основе нанотрубок, сверхпрочные покрытия,

антифрикционные составы, проводящие полимеры для гибкой электроники и т.д.

В конце XX века было модно инвестировать в “доткомы” (интернет-сайты .com) и многие на этом разорились. Некоторые опасаются, что инвестиции в нанотехнологии могут оказаться таким же “мыльным пузырем”. Но между этими отраслями есть фундаментальное различие. Вы не сможете развить нанокomпанию, которая базируется на одной идее. Вам нужны еще и реальные технологические достижения. Инвесторы, поверхностно интересующиеся развитием нанотехнологий, быстро утрачивают к ним интерес, так как это междисциплинарная область, и порой трудно понять, какие выгоды даст тот или иной нанопроduct. Однако нанотехнология позволяет создавать продукты, которые невозможно произвести никакими другими средствами.

Отрасли нанобизнеса

Нанотехнология — это технология общего назначения, то есть применимая во всех сферах производства, как когда-то же-лезо, паровая машина или электричество. Поэтому-то она и обещает радикальное преобразование промышленности и всей человеческой жизни в целом.

Один и тот же продукт нанотехнологий, например, нанотрубки или МЭМС-датчики, может найти применение во множестве отраслей. А какие вообще есть отрасли в промышленности, и что требуется им?

Авиация и космонавтика

Когда надо переместить что-то по воздуху или поднять на орбиту, каждый грамм требует дополнительного расхода топлива. Нанотехнология облегчит все детали аппаратов — от корпусов до батареек. Кроме того, наноэлектроника и МЭМС-датчики превратят самолеты в беспилотных роботов. Сверхпрочные и жаростойкие наноматериалы позволят им летать на огромных скоростях с нечеловеческими перегрузками, а наночастицы обеспечат экономию и повышение качества топлива. Скафандры космонавтов станут более удобными, солнечные батареи — эффективными, а ракеты — надежными.

Автомобилестроение

Автомобили будущего станут более комфортными и интеллектуальными, основанными на легких и прочных материалах, миниатюризации и новых энергетических установках. Практически каждая деталь автомобиля может быть усовершенствована при помощи нанотехнологий. Сегодня нанотехнологии внедряют несколько крупнейших производителей, но к 2010 году их будут использовать все автомобилестроители и большинство их поставщиков.

Уже сегодня антифрикционные и противоизносные покрытия продлевают срок службы трущихся деталей, стекла с управляемыми оптическими свойствами регулируют освещенность салона, а самоочищающиеся покрытия завоевывают награды. Toyota оснащает свои автомобили легким и прочным бампером с добавлением нанотрубок, а машины Kia и Hyundai ездят на экологичном водороде.

Пластиковые детали станут огнеупорными. Умные, сверхмягкие рессоры сгладят любые неровности дороги. На очереди — самовосстанавливающиеся покрытия, краска с программируемым цветом и искусственный интеллект — автопилот. Автомобиль будет узнавать своего владельца в лицо, а отслужив свой срок, уедет в лес и разложится на экологически чистые биodeградируемые вещества.

Аудио- и видеотехника

Меломаны по достоинству оценят имплантант-нейрочип, передающий музыку прямо в мозг с абсолютным отсутствием помех и искажений. Теперь можно будет очень вежливо не слушать людей, которые несут чушь — просто включите любимую композицию ;) Более того: можно будет записывать все услышанное, а потом просто прослушивать нужные моменты. Масивы МЭМС-микрофонов позволят направленно воспринимать звук — можно будет говорить по телефону в толпе или на концерте.

То же самое ждет и картинку — трехмерные видеоочки уже созданы, но они еще не дают полной иллюзии реальности. Уже испытываются экраны на нанотрубках с разрешающей способностью, превышающей разрешение сетчатки глаза. Многие

компании испытывают “электронную бумагу” и гибкие дисплеи. А вскоре видеокамера, фотоаппарат, телевизор и масса не менее полезных устройств будут умещаться в хрусталике глаза!

Но и это еще не все — нанотехника позволит записывать, передавать, воспроизводить и редактировать запахи и прикосновения. А потом биочипы смогут также передавать эмоции и настроения, управляя концентрацией в крови адреналина, эндорфинов и других веществ.

Безопасность

Еще в начале XIX века русский историк Н. Карамзин дал самое верное определение ситуации в нашей стране: “воруют”. Как видим, это определение ничуть не утратило актуальности. Что может этому противопоставить нанотехнология?

Биометрические системы позволяют использовать вместо ключей, паролей и документов естественные идентификаторы: отпечатки пальцев, радужную оболочку глаза и рисунок кровеносных сосудов под кожей. RFID — миниатюрные радиомаячки — заменят штрих-коды на товарах и позволят всегда точно знать местоположение каждого из них. Дома из наноматериалов будут неуязвимы для пожаров и террористов, а биосенсоры выявят малейшие признаки бактериологической угрозы. Подслушивающие и подсматривающие устройства тоже станут еще мельче, а квантовые точки могут надежно защитить деньги и документы от подделки.

Бытовая техника

Кондиционеры и стиральные машины уже сегодня убивают бактерии при помощи наночастиц. Наносенсоры позволяют посудомоечным машинам анализировать состояние посуды. Микроволновка сможет по запаху определить готовность пищи. Светильники станут беспроводными и с регулируемым спектром. Все это, разумеется, будет встроенным в стены домов будущего, проявляя свои свойства при необходимости. А мелкая утварь и вовсе будет производиться на месте по команде с компьютера.

Вооружение и военная техника

Несмотря на очевидные применения нанотехнологий в военном деле, заработать в этой области вряд ли удастся. Дело в

том, что у российских военных нет денег даже на обычное оружие, а если вы продадите военную нанотехнологию иностранцам, то вас ждут заслуженные неприятности со спецслужбами. Кроме того, очевидно, что слишком многие заинтересованы в слабой России и будут реагировать на военную нанокомпанию как бык на красную тряпку.

Горнодобывающая промышленность

Огромными эффектами нанотехнологии в горной промышленности будут, во-первых, новые виды ресурсов, которые можно будет использовать, а во-вторых — удешевление процессов их добычи и переработки. Также можно будет превращать одни ресурсы в другие. Переход древесины в каменный уголь в природных условиях занимает миллионы лет. Недавно нанотехнологам удалось сделать это за три дня.

Однако самым впечатляющим применением нанотехнологии в добывающей промышленности станет освоение автоматическими фабриками ресурсов Луны.

Городское и коммунальное хозяйство

Мы уже писали о грандиозных перспективах нанотехнологии в архитектуре. Развитие производства нанотрубок и нанокompозитов сделает реальными многоэтажные дороги и километровые небоскребы. Самоочищающиеся материалы сделают любой город чище, а тонкопленочные солнечные батареи сократят расходы на электроэнергию. Электронный нос почует малейшие утечки газа, а самовосстанавливающиеся оболочки трубопроводов избавят город от необходимости содержать тысячи работников ЖЭКа. Ультрагидрофобные покрытия канализационных труб сделают их сверхскользкими, препятствуя засорению. Биодegradируемые пластмассы сделают отвратительные свалки достоянием истории.

Индустрия красоты

Нанобиотехнологии позволят не подкрашивать, а отращать ресницы, ногти и волосы разных форм и расцветок. Более того — станет можно даже “переключать” их цвет. Новые духи можно будет скачать из Интернета и произвести в настольном синтезаторе, а украшения, такие как кольца, брошки и сережки, можно будет просто “напечатать” на трехмерном мини-

принтере по собственному дизайну. Ну и, конечно, одежда — гибкая, программируемая, меняющая размер и текстуру.

Машиностроение

Дешевые, легкие и прочные наноматериалы со временем вытеснят большинство металлов и пластмасс. Углеродные нанотрубки в сто раз прочнее стали при том, что в десять раз легче ее и в тысячи раз электропроводнее. Toyota уже добавляет их в бамперы автомобилей, но массового применения пока еще нет. Это связано тем, что пока нанотрубки получают примитивными, малопроизводительными методами, что обуславливает их слишком высокую для повседневного применения цену: \$50-100 за грамм. Однако в лабораториях Концерна “Наноиндустрия” созданы образцы промышленного оборудования, производящего высококачественные нанотрубки себестоимостью на порядок меньше.

Медицина

Нанотехнологии обеспечат ускорение разработки новых лекарств, создание нанопрепаратов и способов доставки лекарственных средств к очагу заболевания. Широкие перспективы открываются и в области медицинской техники (разработка средств диагностики, проведение безболезненных операций, создание искусственных органов). Со временем нанобиотехнологии будут предоставлять все больше возможностей для продления человеческой жизни и профилактики болезней.

Наука

Нанотехнология позволит практически во всех науках проводить в миллионы раз более точные измерения, изучать различные процессы на атомно-молекулярном уровне и регистрировать их малейшие отклонения. Усовершенствованные нано- и нейроэлектронные компьютеры решат множество задач моделирования и обработки информации. Усовершенствованные космические зонды и сверхбыстрые ракеты помогут изучить просторы космоса, а наноманипуляторы и нейтронные микроскопы — проникнуть в глубины субатомных частиц.

Ну и, конечно же, сама нанотехнология нуждается в огромном количестве приборов и инструментов, которые устаревают практически ежедневно.

Сельское хозяйство

Применение нанопрепаратов с бактериородопсином показало увеличение в несколько раз урожайности практически всех культур, повышение их устойчивости к неблагоприятным погодным условиям. Нанобиотехнология позволит вносить в растения и животных целенаправленные изменения — например, создать растения не с зелеными, а с черными листьями — соответственно, поглощающие большую долю солнечного света и растущие быстрее.

Строительство

Сверхпрочные и легкие наноматериалы позволят создавать огромные небоскребы и принесут в архитектуру ранее недоступные формы, которые, будучи изготовлены из обычных материалов, попросту бы развалились. Новые технологии очистки воды и воздуха обезопасят жильцов от неблагоприятной экологической обстановки и терактов. Стены зданий смогут иметь программируемый цвет и текстуру и даже создавать иллюзию невидимости зданий или отдельных этажей. Уже сегодня производятся оконные стекла с самоочищающимися покрытиями — сначала они разлагают пыль и грязь, используя энергию солнечного света, а потом дождь легко смывает ее.

Телекоммуникации

Samsung собирается интегрировать нейроинтерфейсы в мобильные телефоны. То есть по SMS можно будет передавать не смайлики, а сами эмоции. Чтобы переслать друзьям красивый пейзаж из путешествия, не надо будет доставать телефон — можно будет просто взглянуть. Системы на основе нанотранзисторов, опытные образцы которых уже созданы в ряде лабораторий, обеспечат повышение производительности систем передачи, обработки и хранения информации в сотни и тысячи раз.

Экология

Использование фильтров и мембран на основе наноматериалов для очистки воды и воздуха, опреснения морской воды, а также биосенсоров для быстрого определения химических и биологических загрязнений, синтез новых экологически чистых материалов, новые методы утилизации и переработки отходов. Исследования, проведенные с образцами почв, пораженных ра-

диационно и химически (в том числе с черновбыльскими), показали возможность их восстановления с помощью нанопрепаратов до естественного состояния за несколько месяцев.

Энергетика

Многие возлагают надежды на нанотехнологии в решении проблемы энергетического кризиса. Нанотехнологии могут повысить эффективность солнечных батарей, помочь в улучшенном катализе нефти, создать новые источники хранения энергии и улучшить старые (аккумуляторы, батарейки, топливные элементы). Благодаря нанотехнологиям уже сделаны солнечные батареи, толщина которых не превышает толщины оберточной бумаги. Это поколение солнечных батарей отличается от аналогичных источников питания неизмеримо меньшим весом, большей гибкостью и долговечностью. Не забудем и про топливные ячейки. Эксперименты по переходу на экологически чистое водородное топливо в развитых странах проводятся уже сейчас.

Дальше продолжать видимо, нет смысла: читатель уже догадался, что перечислять направления применения нанотехнологии — все равно, что перечислять направления применений металла, компьютеров или электричества.

Принципы нанобизнеса

Хорошо, у вас есть изобретение или идея, или просто желание заработать на нанотехнологиях. Что дальше?

“Не верь”

Если вы, например, изобрели персональный компьютер и сумели его изготовить и продать, вы миллионер. Попытки же продавать патенты на изобретения, еще не приносящие прибыль, почти всегда кончаются неудачей. Если кто-то не хочет разбираться в премудростях бизнеса, чтобы заработать на своем изобретении, то каковы его шансы выгодно продать его западным компаниям со столетним опытом в деле дешевой скупки патентов? Правильно — нулевые.

Если вы хороший специалист своего дела, то вам ничего не стоит устроиться в какой-нибудь “Интел” или “Самсунг”. Кадры решают все, и понимающие это западные компании совсем

не прочь “прибрать к рукам” толковые российские кадры. Конечно, вам предложат сытную зарплату, не в пример хаотичным доходам отечественного предпринимателя. Но рассудим здраво: а не разумнее ли (и благороднее) использовать свои замечательные мозги для развития собственной страны? На это, конечно, многие возразят, что довольно глупо работать на государство за нищенский оклад научного сотрудника, при отсутствии необходимого оборудования и т.п., если результаты работ все равно никому не нужны. Действительно, это глупо. Но речь не идет о том, чтобы работать на тех, кому ничего не нужно. Вы вполне можете работать на себя — и тех, кто вам дорог — вместе с другими соотечественниками, выбравшими тернистый путь развития *здесь*.

Конечно, многие отмахнутся от моих слов и сейчас, но я снова попытаюсь дать вам некоторую пищу для размышлений. Мы много писали о выгодах автоматизации, нейротехнологиях, о преодолении ими ограничений человека-работника, об экспоненциальном росте вычислительной мощности на единицу стоимости и пр. Через сколько лет корпорации смогут автоматизировать *ваш* труд? И *что* вы тогда будете делать? И, может быть, самое главное: кому вы тогда *не будете мешать*?

“Не бойся”

Не бойся начинать работу по созданию собственного бизнеса. И вообще — не бойся никогда. Люди привыкли бояться *что-то делать* — а вдруг не получится? А вдруг накажут? А вдруг засмеют? И только в старости человек от этих страхов освобождается. Понимает он, что ничего не сделал, никто его не наказал и не засмеял — да так серой мышкой и прожил — как будто и не было его вовсе. А до того всю жизнь люди живут и боятся, а перестали бы бояться раньше — совсем другая жизнь была бы...

Конечно, нанобизнес, да еще в России,— дело непростое. Но уверяю вас, нет на Земле другого занятия, которое настолько способствовало бы вашему развитию! А что касается риска, то задумаемся в старую истину: тот, кто ищет миллионы, весьма редко их находит, но тот, кто их не ищет, не находит никогда.

Учтите, как только вы встанете на “тропу” нанобизнеса, каждый начнет вас от этого отговаривать, “вразумлять” и страшить. Почему это происходит, лично мне непонятно. Видимо, люди подсознательно чувствуют свою неправоту (неэффектив-

ность) и пример человека, который своей жизнью подчеркивает их неправоту, слишком раздражает. Возможно, вас даже сочтут безумцем, но, как сказал один мудрый человек, успех часто бывает единственной видимой разницей между гением и безумием.

Михайло Ломоносов пешком с рыбным обозом пришел в Москву и стал одним из ведущих мировых ученых своего времени. Джон Рокфеллер — сын бедняков, вечно живущих “в долг”, — стал самым богатым человеком в истории Америки. Такие примеры снова и снова показывают, что внешние обстоятельства — ничто, дело в самом человеке. Избегайте тех, кто старается подорвать вашу веру в себя — эта черта свойственна мелким людям. Великий человек, наоборот, внушает вам чувство, что и вы сможете стать великим.

Конечно, вы можете потерять уйму времени и денег, вложенных в создание и развитие бизнеса, если сдадитесь слишком быстро и бросите начатое. На вашем пути будет достаточно “убедительных” причин, чтобы сделать это. Однако, как сказал Сенека: “И после плохого урожая нужно сеять”, и с ним нельзя не согласиться. Есть время для принятия решений, когда полезны сомнения и варианты (семь раз отмерь), и есть время для их исполнения, когда промедление смерти подобно (один раз отрежь). Что бы ни случилось

Почитайте биографии многих великих людей, и вы поймете, что гарантированно достигнете своей цели, только если будете продвигаться к ней *что бы ни случилось*.

“Не проси”

Где взять ресурсы? Самое простое и очевидное решение всех проблем — попросить денег у спонсоров — не всегда самое правильное. Возможно, читатель удивится, но найти спонсоров на благотворительные проекты в нанотехнологии порой труднее, чем самому заработать эти деньги. Спонсор, обычно человек неглупый, понимает, что важно поддерживать то, что в будущем станет реальными достижениями, которые выведут страну на качественно новый уровень. Но бизнес есть бизнес, и благотворительность для многих — не более, чем дешевый способ рекламы. А реклама должна быть понятна большинству обывателей.

Что касается зарубежных фондов, то здесь ситуация еще интереснее: если уж ваш проект и достоин поддержки, то он

должен быть направлен на что-нибудь нереальное и бесполезное. Ведь каждая успешная реальная нанотехнологическая разработка в России сокращает “утечку мозгов” за рубеж и усиливает нашу страну — а зачем это нужно конкурентам?

Короче, бесплатный сыр — в мышеловке. И наоборот, осознание того, что тебе никто не поможет (и на везение не придется рассчитывать), удесятерит силы.

Ресурсом предпринимателя служит весь окружающий мир. То есть, если вы ориентируетесь только на те ресурсы (например, деньги), которые есть лично у вас, а у вас в кармане 100 долларов, то для того, чтобы заработать 10 тысяч долларов, вам, по оптимистичной оценке, понадобится 5-10 лет инвестирования этой сотни долларов и реинвестирования полученной прибыли.

Если же по-хозяйски оглядеть все, что есть в вашем городе, стране, наконец, в мире, то обнаруживаете миллионы долларов, в деньгах или имуществе, а также миллионы человеко-часов, используемых впустую, которые при помощи вашей разработки могут использоваться гораздо эффективнее. И далее вам остается предложить, как это сделать, и оговорить с собственником капитала, какую долю прибыли получите вы.

Проектирование бизнеса

Рост популярности нанотехнологий среди населения в сочетании с исконным стремлением к халяве, привлекает множество неграмотных и просто нечестных людей. Нанотехнологии представляются им этакой скатертью-самобранкой, с помощью которой можно обогатиться за ночь. Инвесторы уже по уши завалены чушью типа “вечных двигателей, черпающих энергию из наномира” и “оздоровительных брелков магнитных и нанотехнологий”. Так пусть же ваш проект будет для них глотком свежего воздуха.

Оценка технологии

Сначала важно правильно оценить изобретение, которое вы хотите сделать основой будущего бизнеса. Это самый важный шаг — от него зависит успешность всего проекта. Действительно стоящее изобретение — это то, что увеличивает полезный эффект продукта в десятки и сотни раз без существенного ухудшения остальных показателей.

В силу скоротечности технологических перемен в отрасли на самое изощренное изобретение может быстро найтись усовершенствованный заменитель, а то и вовсе в нем может пропасть необходимость в результате развития конкурентов. Поэтому неплохо иметь представление о ведущихся и планируемых чужих разработках, активности конкурентов, научных статьях и т.п. Для этого суть изобретения разбивается на мельчайшие компоненты. Среди них выделяются ключевые, составляющие “ноу-хау”, и они должны быть безусловно новыми, уникальными и по тем или иным причинам труднодостижимыми для конкурентов.

Это требует кропотливой работы, но зато риск, что завтра кто-нибудь представит устройство или материал, делающий продукцию предприятия ненужной, значительно снижается.



Рис 218. То что вчера было последним словом техники, завтра может оказаться никому не нужным

В России в силу низкого уровня развития законодательного регулирования отношений в сфере интеллектуальной собственности она зачастую должным образом не оформляется, но от этого никуда не исчезает, а продолжает присутствовать в том ином виде и сохраняет свою ценность для предприятия. А также для конкурентов, которые постараются ее раздобыть. Здесь эффект российского патентования, не подкрепленного международным, скорее отрицателен, так как вынуждает заявителя раскрыть многие детали технологии. В результате отечественный разработчик зачастую узнает полный экономический потенциал своей технологии уже в виде продукта конкурента на прилавке.

Что же делать? Одно из решений этой проблемы предложил еще 500 лет назад гениальный ученый Леонардо Да Винчи. Ситуация с защитой интеллектуальной собственности в средневе-

ковой Италии обстояла примерно так же, как в современной России, и, опасаясь, что проекты машин будут украдены и реализованы без его ведома — то есть без уплаты гонорара, — изобретатель намеренно вносил в свои чертежи небольшие ошибки.

Например, уже тогда он разработал проект “танка” — немного похожую на черепаху машину. Но если построить ее по исходным чертежам, она не сможет двигаться: шестерёнки будут просто блокировать друг друга. Современные инженеры, которые любопытства ради строят модели по проектам Леонардо, без особого труда находят ошибку в чертежах да Винчи, и машина действительно приходит в движение. Но это легко сделать при современном развитии науки, а для техников времён Возрождения такой “взлом” защиты был непосильной задачей.

То же самое можно посоветовать и отечественному нанотехнологу.

Оценка рынка

Как правило, сами создатели инновации не до конца представляют себе свойства полученного продукта вследствие недостатка времени и денег на детальные исследования. Поэтому необходимо доисследование самого полученного продукта, поскольку без знания свойств новинки (зачастую весьма неожиданных) риск совершения маркетинговой ошибки близок к 100%. Это нормально и поможет впоследствии грамотно организовать постоянное усовершенствование продукта в соответствии с нуждами клиентов.

Чем больше уникальных, полезных и замечательных свойств вы откроете и изучите в продукте, тем шире будет его рынок и меньше последует жалоб. Важной особенностью нанотехнологии как отрасли является ее многогранность и изобилие неожиданных направлений применения продуктов и технологий. Поэтому наличие хотя бы нескольких партнерских нанотехнологических производств при системном анализе потенциальных приложений их разработок позволяет достигать немалой экономии за счет *синергетического эффекта*.

Синергетический (системный) эффект — это увеличение суммарной эффективности двух процессов при их совместной работе.

Например, НТЦ “Конверс-ресурс” разработал технологию обработки узлов трения ремонтно-восстановительными составами на основе наночастиц. Помимо получения дохода от оказания услуг клиентам, применение этой технологии на самом предприятии позволило ему сэкономить значительные средства при эксплуатации и ремонте собственного оборудования.

Руководство концерна “Наноиндустрия” пошло в этом направлении еще дальше, поставив перед собой цель собрать критическую массу научно-технологических разработок, финансовых, кадровых и других ресурсов для развития наноиндустрии.

Но когда уже понятно, где и как производить, работа далеко не закончена. Как продвигать продукт на рынок? Кто-то отмахнется от этих вопросов, сказав, что это не его забота. Но это не так. Если проект прогорит, крайним будете вы. Конечно, если вы продали разработку и стали наемным работником, это не будет вас беспокоить... Но уж лучше прогореть.

Никто не станет покупать товары только потому, что они “нано”, скорее наоборот: услышав это, клиент вспомнит какую-нибудь статью о вреде фуллеренов для мышей, а “нанотехнологичность” продукции заинтересует разве что таможенника, но ведь это не тот интерес, которого вы хотите, правда?

Вы должны помнить, что чем воодушевленней вы относитесь к проекту, тем больше вероятность наличия в нем ускользнувших от внимания ошибок, рисков, противоречий.

Тщательнее всего следует проверять правильность суждений, которые кажутся нам очевидными.

Чтобы продукт принес прибыль, он должен обладать высоким спросом, то есть быть клиент-ориентированным. В мысленном диалоге с потенциальным потребителем убедитесь, что предлагаете решение его проблем, а не просто технологическую заморочку.

На самом деле, существуют два вида нанопродукции.

Одни продукты представляют собой усовершенствования обычных товаров — более долговечные мячи, более легкие и прочные ракетки, незатупляющиеся ножи и сверла, сверхмощные батарейки, более компактные дисплеи и т.п. Они имеют устойчивые рынки, и вы всегда знаете, кто будет покупателем и как продвигать продукцию. С другой стороны, здесь вам проти-

востоят огромные конкуренты, работающие в этой отрасли десятилетиями (а некоторые — даже столетиями).

Другие — не имеют аналогов на рынке. Самоочищающиеся покрытия, нанотрубки, антибактериальные наночастицы и сканирующие микроскопы мало похожи на все, что было ранее, и поэтому, с одной стороны, не всегда ясно, кому и как их предложить, а с другой — вы сами создаете новый рынок, на котором пока что никого нет (если, конечно, вы действуете достаточно быстро и охраняете секреты своей новинки).

Тем не менее, продукцию надо как-то продвигать на рынок. А ведь клиенты очень консервативны, и по статистике только 6% из них склонны покупать новинки, а 94% подождут, пока эти 6% все испытают, и тогда, может быть, купят. Но где искать эти 6%? В каждой отрасли они свои, а внутри большого предприятия — потенциального клиента — поди выясни, кто является “инноватором”. Хорошо бы просто собрать всех инновационно настроенных граждан и показать им товар, рассказав о его преимуществах. Но как?

Для этого, например, можно использовать специально созданный нами “Наномагазин” (www.nanoshop.ru), в котором каждый может приобрести различную нанопродукцию для себя и своей фирмы. Широкий спектр товаров — от самоочищающихся покрытий до нанолаборатории “УМКА” — привлекает людей, заинтересованных в использовании достижений нанотехнологии — потенциальных клиентов. Выставляя продукцию в “Нано-магазине”, разработчики не только знакомят с ней наиболее восприимчивую часть аудитории, но и получают ценные отзывы и предложения, позволяющие ее улучшить.

В том же “Наномагазине” можно приобрести различные импортные нанопродукты: например, наночастицы оксида цинка, придающие тканям свойства “стелс” — невидимости в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах. Или косметику, оптимизирующую белки, из которых состоит кожа на молекулярном уровне. Или теннисную ракетку из нанотрубок. Мы планируем сделать доступной в России практически всю нанотехнологическую продукцию отечественных и зарубежных компаний — чтобы каждый мог не только воспользоваться ею, но и сравнить свои разработки с аналогами. Конкурентоспособность на мировом рынке важна еще и потому, что тот же

“Наномагазин” посещают торговые компании со всего мира, которые всегда рады продавать хорошую продукцию в своих странах.

Наконец, необходимо трезво оценить объем рынка — соответствует ли предполагаемая выручка планируемыми затратам?

Разработка проекта

Изучив все аспекты будущего бизнеса, постарайтесь оценить спектр возможных сценариев развития событий и соответствующее распределение вероятности доходов и рисков.

После этого начинается самая творческая часть — разработка проектной стратегии. А точнее, системы стратегий, варианты которых ограничены только вашей изобретательностью и деловой этикой. Это может быть как простое кредитование, так и сложная система операций по слиянию-поглощению, передаче технологий, созданию совместных предприятий и т.п. Каждая стратегия имеет систему сценариев, по которым могут развиваться события (если некий параметр контролируете вы, то его вариации порождают разные стратегии, если его контролируют силы вам не подвластные, то его вариации порождают разные сценарии). Суть задачи в том, чтобы на каждый сценарий, которым повернется к вам судьба, вы имели свою эффективную стратегию. Разумеется, различные стратегии и сценарии оказываются хитрым образом переплетены.

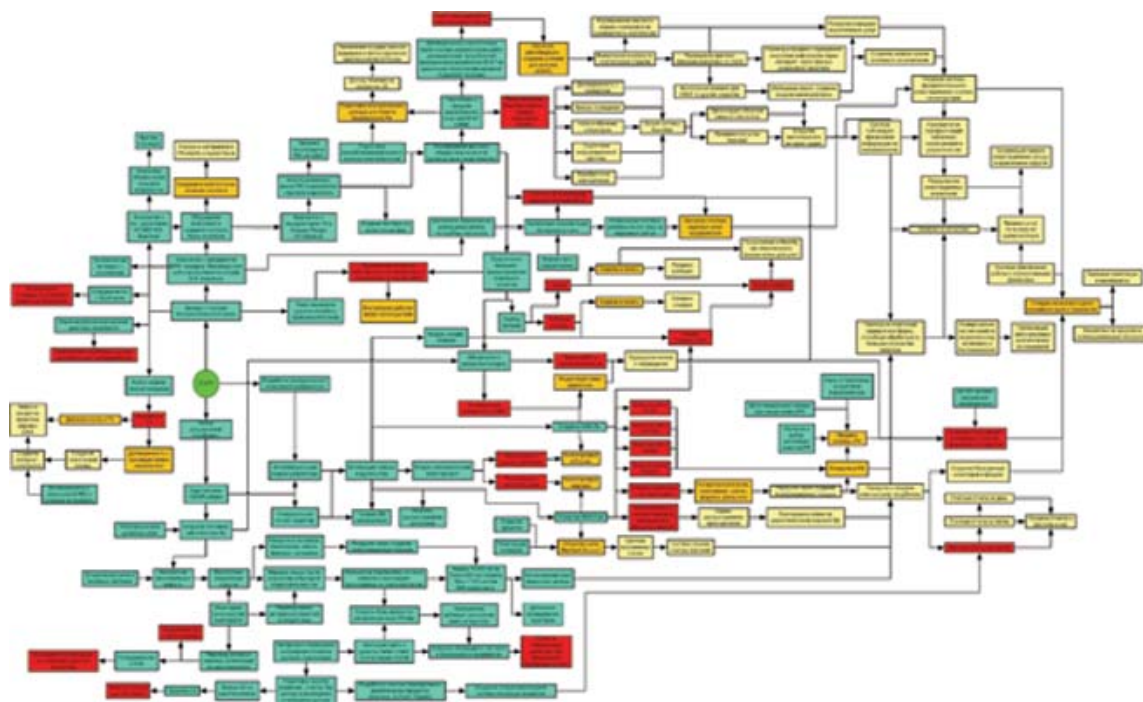


Рис 219. Планирование нанобизнеса - дело непростое

Безопасность

Несомненно, в XXIII веке нанотехнологии приведут ко всеобщему изобилию, люди подобрают и поумнеют, а бизнес в России станет легким и безопасным... Но не раньше.

Помимо индифферентности правительства и убогости законодательства, в России есть еще одна проблема, мешающая развитию отечественной nanoиндустрии. Нанотехнологии еще в годы перестройки были отнесены к технологиям двойного назначения, экспорт которых подлежит суровым ограничениям. Таможенники используют такие ограничения для личного обогащения, а ученые, понимая, что российскую нанопродукцию будет очень проблематично экспортировать, предпочитают продать за рубеж саму технологию и получить хоть копейки, но зато реальные и не зависящие от произвола чиновников. А российский рынок пока слишком беден, чтобы обеспечить достойный спрос на нанопродукцию.

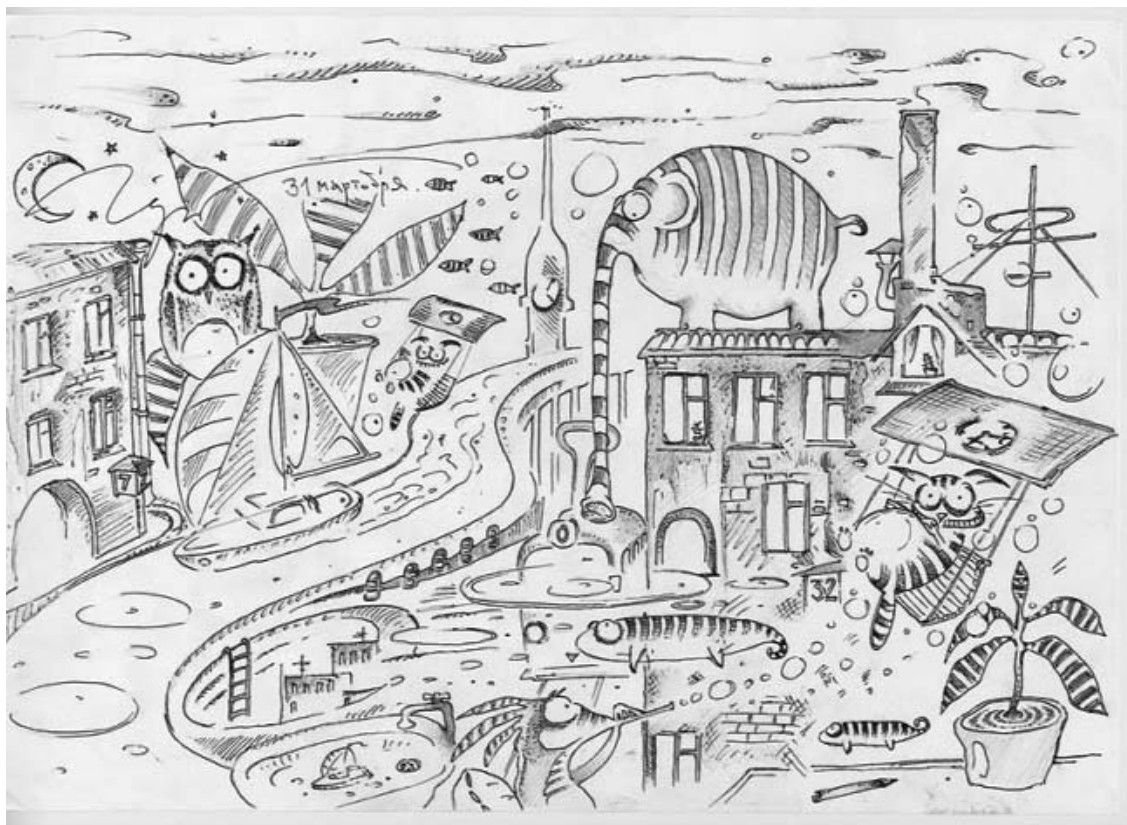


Рис 220. Законодательство и условия, в которых приходится действовать российскому предпринимателю, немного напоминают дурдом*

Ситуация усугубляется еще и тем, что зарубежные конкуренты российских высокотехнологичных компаний прилагают

* Картинка “31 марта”, художник – Илья Черт, солист группы “Пилот”

усилия к тому, чтобы данное положение дел продолжало существовать — им только выгодно ненормальное возрастание “таможенных расходов”, повышающее цены и соответственно снижающее конкурентоспособность российских аналогов их продукции.

В марте 2005 прошло расширенное заседание Торгово-промышленной палаты РФ — круглый стол “Нанотехнологии — бизнесу: Проблемы. Интересы. Прибыль”, участники которого выдвинули инициативу, чтобы вывести ситуацию из порочного круга, однако последнее слово остается за руководством страны.

Будьте готовы предусмотреть сотни юридических, конкурентных, налоговых, таможенных и криминальных рисков — и на каждый заготовить достойный отпор. Это не самая приятная часть дела, но объективная ситуация такова, что на кон поставлена ваша свобода и даже шкура. Лучше сначала немного подумать, чем потом долго посидеть или навеки прилечь.

Осуществление проекта

После того как инвестиционное решение принято, инвестор вероятнее всего поручит вам выполнение разработанной вами стратегии. При этом активность вашего управления проектом может варьироваться от тихого наблюдения до строительства наукограда, смены местной администрации и круговой обороны до попыток западных и восточных конкурентов прикрыть ваш проект. Впрочем, этому невозможно научить в книге — как и плаванию или боевому искусству. Можно только начать и научиться самому.

И, наконец, разрабатывая инвестиционные проекты, не забудьте про птицу удачи. Эд Роберт, изобретатель первого персонального компьютера, никогда не ожидал продать более 800 штук в год, когда в 1975 году отправился в банк за кредитом в \$65.000. И только потом он понял, что вместе со своими партнерами по программному обеспечению — Биллом Гейтсом и Полом Алленом — они находились на старте революции информационных технологий.

Перспективы наноиндустрии в России

Выдающимся примером развития нанотехнологического бизнеса вопреки всем препятствиям является концерн “Нано-

индустрия”, руководимый доктором технических наук М.А. Ананяном. После того, как перестройка разрушила советскую молекулярную электронику, ему удалось создать в 1996 году Институт нанотехнологий, а в 2001 - концерн. Цель концерна — собрать критическую массу научно-технологических разработок, финансовых, кадровых и других ресурсов и создать базу развития nanoиндустрии — принципиально новой отрасли промышленности.

8 — 9 декабря 2004г. в подмосковном городе Фрязино впервые в России прошла международная конференция “Нанотехнологии — производству 2004”, организованная Минпромнауки Московской области, концерном “Наноиндустрия” и другими при поддержке Комитета по промышленному развитию и высоким технологиям Торгово-промышленной палаты России.

В работе конференции приняли участие более 160 участников из России, Беларуси, Германии, Италии и Канады, 24 городов России, 54 институтов, 13 университетов, представители 20 предприятий различных отраслей (электронной, радиотехнической, ракетной, авиакосмической, атомной, энергетической, химической, судостроительной, легкой) и экологи, бизнесмены и представители администраций городов Московской области.

На выставке, организованной во время конференции, были представлены образцы керамических изделий из нанопорошков (Томский политехнический университет) и нетканых материалов, наполненных наноэлементами (“НИИ нетканых материалов”, г.Серпухов); обучающий прибор. “Nanoeducator” и сканирующая зондовая лаборатория “Ntegra” (компания “Нанотехнология МДТ”, г. Зеленоград); зондовый микроскоп “НаноСкан” (ФГУП Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, г. Москва) и образец нанокристаллической гидроокиси алюминия “Бемит” (Фирма “РИКОМ СПб”, г. Санкт-Петербург).

“Но ведь это целые институты и концерны, — скажете вы. — А простому смертному никак нельзя зарабатывать на нанотехнологиях?”. Оказывается, можно. Сложно, но можно.

Осенью 2003 года три студента — энтузиаста нанотехнологий — создали на сайте Молодежного Научного Общества “проект Нанобот”: небольшой раздел, где впервые в отечественной истории переводились и размещались еженедельные новости

нанотехнологии и нанобизнеса на русском языке. Благодаря четкой системе публикации и интересным подборкам новостей он быстро завоевал популярность и в январе 2004 года переехал на постоянный адрес www.nanobot.ru.

В феврале был создан Консультативный Совет проекта из признанных экспертов отечественной нанотехнологии.

В марте налажен полуавтоматический мониторинг сотен мировых источников новостей нанотехнологии — и по количеству новостей сайт занял первое место в мире. Кроме новостей стали публиковаться авторские и переводные статьи, эксклюзивные интервью, справочники, базы данных. Начата подготовка аналитических материалов для отечественных и зарубежных клиентов и первая коммерческая реклама отечественных нанопродуктов. Установлены контакты с мировыми лидерами нанонауки и международными отраслевыми организациями.

В апреле совместно с Молодежным Научным Обществом и концерном “Наноиндустрия” был организован “Первый конкурс молодежных проектов по созданию отечественной молекулярной нанотехнологии”. За месяц читатели обратились к сайту 70 тысяч раз. Создан каталог ресурсов Рунета по нанотехнологии.

В мае 2004 заработали профессиональные российская (www.nanonewsnet.ru) и международная (www.nanonewsnet.com) редакции сайта и была зарегистрирована компания Nanotechnology News Network LTD. К этому времени опубликовано свыше 2200 новостей в 90 выпусках русско-английского интернет-журнала Nanotechnology & Nanobusiness Daily. Персонал компании расширился до 5 человек.

В июне 2004 Роберт Фрайтас, ведущий мировой ученый в области наномедицины, ответил на вопросы наших читателей по наномедицинской тематике. Компания занялась профессиональной маркетинговой и инвестиционной оценкой нанопроектов. Тогда же были написаны и опубликованы первые главы этой книги, а также цикл статей по нанотехнологии для самых маленьких.

В июле 2004 компания начала продажу периодических и специализированных тематических аналитических отчетов по нанотехнологической отрасли. Опубликовано ряд статей в печатных СМИ (“Компьютерра”, “Поиск”, “Хакер”, “Конфи-

дент”, и пр.) Сайт www.nanonewsnet.com был признан рядом мировых экспертов лучшим источником информации по нанотехнологии в мире. При поддержке Юниаструм-банка награждены победители “Конкурса молодежных проектов отечественной молекулярной нанотехнологии”. Заработала уникальная автоматическая система, позволяющая клиентам самим размещать новости и пресс-релизы.

С августа компания предоставляет консультации по разработке, оценке и сопровождению инвестиционных проектов в нанотехнологии. Успешно выполнен ряд исследований нанотрасла для отечественных компаний.

В ноябре 2004 года Nanotechnology News Network объявила II Всероссийский конкурс молодежных проектов в области нанотехнологии. Его цель — широкомасштабное привлечение талантливой молодежи к развитию нанотехнологии в своей стране, а не за рубежом. Этот конкурс является отличным способом довести изобретение до реального бизнеса, а также получить бесплатные консультации и поддержку профессионалов.

В январе 2005 начинает работу проект “Наномагазин”, где россияне могут приобрести настоящие нанопродукты. Nanotechnology News Network заключила соглашения о продвижении в России продукции ряда мировых наноконпаний.

Как видим, нанотехнологии в России, вопреки всему, все-таки набирают ход. Их развитие даст нашей стране *единственный* шанс вернуться в число мировых лидеров в научной, экономической и политической сфере, а также решить многие экономические, территориальные и демографические проблемы.

Итак, повторим еще раз!

- Сделать бизнес на нанотехнологиях — значит придумать что-то новое, затем это что-то произвести, а после продать.
- Объем мировых инвестиций в наноиндустрию за последние 8 лет возрос в 10-11 раз и составил к концу 2004 года порядка 12 млрд. долларов. На Россию приходится менее 1% все мировых "наноинвестиций".
- Доходность любого бизнеса пропорциональна риску, на который приходится идти. Есть устоявшиеся бизнесы, с понятными продуктами и рынками. Риск "прогореть" в них предсказуем, и, обычно, невелик. Соответственно, невелика и до-

ход-ность. Бизнес в наноиндустрии — всегда венчурный. Но доходность в случае удачи может быть на порядки выше обычного бизнеса.

- Сегодня чтобы создать успешный бизнес, требуется непрерывно развивать свои конкурентные преимущества.

- Доходы от инвестиций прямо пропорциональны качеству информации, которой вы владеете. В нанобизнесе только система-тическое изучение всей мировой наноиндустрии в ее взаимосвязи и развитии может быть основой принятия верных решений.

- На первый взгляд, развитие техники кажется линейным, однако на самом деле имеет место экспоненциальный рост.

- Ведущие эксперты предсказывают *конвергенцию технологий*, в которой нанотехнологии, биотехнологии, нейроэлектроника и искусственный интеллект создадут эволюционирующую промышленность будущего - полностью автоматическую и развивающуюся по своим законам.

- Нанотехнология применима во всех сферах производства. Поэтому перечислять отрасли применения нанотехнологии - то же что перечислять отрасли применения металлов или электричества.

- Прежде чем начаать нанбизнес в России, надо четко усвоить три главных правила: "Не верь, не бойся, не проси".

Глава 8. Нанотехнологии и общество

“Мы знаем, что белому человеку непонятны наши традиции... Он относится к земле как к врагу, а не как к брату, поэтому он движется дальше, когда покорит часть ее... Он крадет землю у своих детей, и ему все равно. Он относится к своей матери-земле так, как будто ее можно продавать, грабить, покупать... Его аппетит опустошит землю и оставит позади лишь пустыню...

Я — краснокожий, и мне не понять этого...

Все мы живем единым дыханием — зверь, дерево, человек — все. Белый человек, похоже, не замечает воздуха, которым он дышит. Как человек, который уже давно умирает, он не чувствует запахов...

Я — дикарь и мне не понять ценности вашей цивилизации...

Я видел сотни гниющих туш бизонов в прерии, где они были подстрелены белыми людьми из проходящего поезда. Я дикарь, и мне не понять, как стальная, изрыгающая дым лошадь может быть важнее бизона, который не способен на убийство, кроме как для самосохранения.

Что такое человек без животных? Если исчезли бы все животные, человек умер бы от тоски и одиночества. Поскольку все, что происходит с животными, вскоре происходит и с человеком. Все вещи связаны между собой”.

Вождь индейского племени Сиэтл.

Послание американскому президенту, 1854 г.

Мы начали главу с этой цитаты не случайно. С нее же началась одна из всемирных научных конференций, посвященных проблемам развития человеческой цивилизации в XXI веке.

Тогда, в далеком 1854 году, это была лишь скорбная речь побежденного перед победителем, превосходящим его во всем — начиная техникой и заканчивая образованием. Но сегодня мы видим, что автор послания — отнюдь не безграмотный дикарь, а мудрец, увидевший глубинную суть природы, осознавший ее целесообразность и организованность — “Все вещи связаны между собой”. В рамках этой главы мы поговорим о социальном значении нанотехнологий, об их роли в дальнейшем развитии человечества.

Мы убедились, что стремительное развитие нанотехнологий приведет, в конце концов, к созданию общества нового типа — общества, где практически вся промышленность будет

поставлена на нанотехнологическую основу. Но то, каким будет это нанотехнологическое будущее, напрямую зависит от настоящего. Поэтому в следующих параграфах мы постараемся с максимальной объективностью изложить факты, касающиеся настоящего, чтобы дать читателю возможность как можно правильнее оценить перспективы нашего дальнейшего развития.

“Над пропастью во лжи” или в погоне за смертью

Наше общество считает себя цивилизованным. Мы гордимся уровнем наших знаний об окружающем мире, умением применять их на практике, гордимся совершенством своей техники, уровнем своего быта по сравнению с “отсталыми” племенами, порой встречающимися еще среди африканских джунглей или снегов дальнего Севера.

Но если хорошенько подумать, что есть цивилизация? И как мы определяем “степень цивилизованности” того или иного общества? Традиционно под цивилизацией понимается степень удаленности народа от состояния дикости, уровень достигнутого им развития. При этом прогресс цивилизации неизменно должен сопровождаться ростом материального благополучия общества, развитием его культуры, искусства, науки, религии и т.д. С этой точки зрения, конечно, любой человек западной цивилизации превосходит дикаря из какого-нибудь племени “Тумба-Юмба”. Но не страдает ли подобный подход некоторой однобокостью, негибкостью мышления? Ведь располагая все народы мира по какому-то критерию (или совокупности критериев) на некой шкале, мы автоматически упускаем из виду многие важные факторы.

Сторонники этого “линейного” подхода главным критерием цивилизованности, как правило, считают уровень научно-технического развития общества. Но тот, кто выигрывает в одном, как правило, неизбежно проигрывает в другом (а недостатки часто являются продолжениями достоинств). Успехи индустриального развития при недальновидном управлении приводят к потребительскому отношению к жизни и оборачиваются экологическими и гуманитарными потерями. Чрезмерная индивидуализация сознания неизбежно влечет за собой разрушение устойчивых социальных связей, утрату общественной солидарности, взаимопомощи и пр.

И, кроме того, при данном “линейном” подходе “лидерство” или “отставание” того или иного народа изначально определяется исключительно по европейским меркам, в основе которых лежат западные, потребительские ценности, чуждые для сознания большей части народов планеты. Поэтому при таком подходе они фактически обречены быть вечными аутсайдерами, а родная культура, традиции и образ жизни таких стран однозначно определяются как “отсталые”, “дикие”, “требующие изменений”. За этой шумной риторикой неизменно следует преобразование жизни таких стран, иногда насильственного характера, но не всегда к “прогрессу и процветанию”, а чаще к доходам западных корпораций и расширению влияния их правительств.

Но не заблуждаются ли представители западной цивилизации, будучи так уверены в собственном превосходстве и единственно возможной правильности своего образа жизни? Ведь мало кто из них задумывается о таких “прелестях” своей цивилизации, как:

- многократно возросшее подавление личности бюрократизированной машиной общества, фактическое отсутствие личной свободы;
- наличие во многом коррумпированного “права”, опирающегося на силу оружия и принуждения;
- тенденции к стандартизации и окостенению воспитания и образования — стремление сломать и подогнать развивающееся существо под уготованную ему ячейку общественного конвейера;
- повсеместное распространение различных средств психологического давления, стремящихся подчинить сознание и волю человека своим задачам (информационное манипулирование, политическая пропаганда, сектантство);
- атрофия здоровых жизненно необходимых качеств человека (сила, ловкость, реакция, красота, чувства слуха, зрения, обоняния, способность выживать в неблагоприятных условиях);
- атрофия природного чувства красоты и способности наблюдать ее в окружающей среде и самих себе;
- постепенная деградация инстинктов самосохранения и размножения (суициды, гомосексуализм), многократно возросшее число психических нарушений;

- разрыв прямой связи между действиями человека и их результатом (таким образом, в нашем обществе могут быть успешными стратегии паразитизма, лени, “пофигизма”, пораженчества, жалобности, лакейства — не только вредные для общества, но и превращающие их носителя в нечто отвратительное);
- подмена здоровых потребностей и удовольствий (здоровая пища, чистые вода и воздух, любознательность, возможность свободного выражения своих чувств) искусственными и деструктивными (обжорство, пьянство, курение, наркотики, ханжество, превращение любви в шоу) и т.д. и т.п...

Еще только в 70-е годы XX столетия экологическое будущее нашей планеты представлялось сильным мира сего безоблачным — и в социалистическом, и в капиталистическом обществе. Однако уже в то время ученых по обе стороны океана весьма тревожила угроза надвигающейся экологической катастрофы. Речь идет о так называемом *парниковом эффекте* и связанным с ним глобальным потеплением климата. Причина парникового эффекта заключается в чрезвычайно повышенной концентрации промышленных газов в атмосфере Земли. В результате неразумного природопользования XX века эти газы скапливаются в верхних слоях атмосферы и создают парниковый эффект.

Обоснованные опасения экологов привели в 1970 году к появлению в Риме так называемого Римского клуба, объединившего в себе авторитетных ученых, бизнесменов и политиков с мировыми именами. Римский клуб собирал деньги на финансирование глобальных экологических исследований, результатом которых стал долгосрочный прогноз мирового развития Дж. Форрестера, опубликованный в 1970 году в его книге “Мировая динамика”.

Эта книга не могла не вызвать оглушительного отклика в мировой общественности, а некоторые даже стали упрекать Форрестера в паникерстве. И неудивительно, ведь в ней Форрестер на основе фактических данных доказывает то, что темпы увеличения промышленных выбросов в атмосферу намного опережают темпы роста населения.

Согласно его расчетам, уже к 2020 году начнется катастрофическое снижение численности населения нашей планеты из-за недопустимого загрязнения среды обитания, а загрязнения

начнут уменьшаться только тогда, когда население вымрет до численности примерно 1/10 от исходного количества. Но трагедия заключается в том, что к тому моменту отравление среды уже окажется смертельным (“Поскольку все, что происходит с животными, вскоре происходит и с человеком”!).

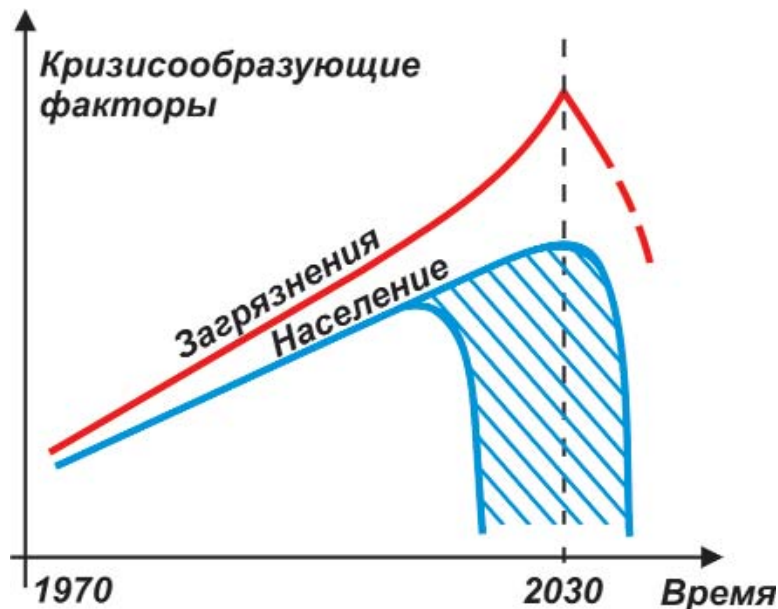


Рис 221. Схема наступления экологической катастрофы 2020 года по Дж. Форрестеру

Такое тревожное представление о грядущей экологической опасности общепланетарного масштаба наконец-то заставило обратить на нее внимание политиков и олигархов. Вопросами экологической безопасности планеты всерьез занялась ООН. В 1983 году при ООН была создана международная комиссия по окружающей среде, которая изучает проблемами оценки допустимого развития экономики, то есть такого развития, которое не влекло бы за собой необратимого пагубного изменения экологических условий обитания человека. Комиссия сформулировала принцип “sustainable development” — “устойчивого развития”, речь о котором пойдет чуть позже.

Но в чем же причина такого экологического кризиса? Специалисты в области общественных наук в один голос заявляют, что причина очевидна — это потребительское отношение к природе, провоцирующее жажду сиюминутной наживы в ущерб будущему и не имеющее механизмов торможения.

В таблице отражена динамика некоторых мировых показателей, которые говорят сами за себя:

Показатели	Начало XX века	Конец XX века
Прирост общей площади пустыни	—	156 млн. га
Общая площадь лесов	57,5 млн. га	50,1 млн. га
Потребление пресной воды	360 км³	4 000 км³
Сокращение числа биологических видов	—	20%
Потребление чистой первичной продукции биоты	1%	40%
Площадь пахотных земель	750 млн. га	1 500 млн. га
Площадь нарушенной хозяйственной деятельности суши (без учета Антарктиды)	20%	60%
Мощности мирового хозяйства	1 ТВт	10 ТВт
Валовый мировой продукт	60 млрд. долларов	20.000 млрд. дол.
	1992 год	2001 год
Деградация коралловых рифов (показателей состояния земной экосистемы)	10%	27%
Рост суммарных расходов на вооружение во всех странах	—	2 млрд. долларов в день

Табл 11. Показатели деструктивного влияния человека на природу

Комментарии здесь, как говорится, излишни...

Так кто же из этих двоих “дикарь”: индеец, живущий в гармонии с природой, или “цивилизованный” обыватель западного общества? И можно ли назвать “цивилизованным” общество, уничтожающее все вокруг ради удовлетворения своих сиюминутных потребностей?

Научно-технический прогресс — это, конечно, развитие, проявление творческого начала, постоянная победа человеческого разума над собственной ограниченностью. Но! Наука и производство оправданы только тогда, когда они способствуют улучшению жизни на планете, а не убивают ее. Пока же получается, что один из биологических видов — человек — самолично присвоил себе право роскошествовать за счет других, уничтожая среду их обитания.

Все, что производит человек, он изготавливает из природы. Можно даже сказать, что человек лишь перерабатывает то, что дает ему природа. И пока общество будет ориентироваться на

исключительно потребительские ценности, общий уровень человеческого быта одних людей будет повышаться — другие же (и природа) будут гибнуть с ускорением.

Кроме проблемы повышенного количества промышленных отходов, нельзя не вспомнить о резком увеличении в последние два десятилетия бытовых отходов. С расцветом *потребительского бума* возросла индустрия рекламы, продукция которой изначально предназначена “на выброс”. Здесь имеются в виду различные рекламные буклеты, упаковка и прочие вещи, созданные исключительно для привлечения внимания клиентов, ведь из огромного разнообразия однотипной продукции, представленной на прилавках супермаркетов, человек, естественно, выберет ту, что “выглядит лучше”, то есть имеет более привлекательную упаковку.

С точки зрения производителя, заинтересованного в реализации своего продукта, необходимость в дополнительной рекламе понятна: ему нужно зарабатывать деньги. С точки зрения человечества вообще, затраты на производство такого огромного количества и разнообразия пищевой и бытовой промышленности представляется, мягко говоря, неразумным. В одной из медицинских телепередач приводились результаты социального опроса среди населения, показавшие, что средний россиянин потребляет в 11 раз! больше сахара, чем это требуется для нормальной работы организма (в виде конфет, шоколада и всевозможных кондитерских изделий). И если хорошенько задуматься, ведь многое из того, что потребляет современный человек, от пищевых деликатесов до телевизионных программ, является не просто излишним, но даже вредным, отвлекающим от более выгодных и нужных вложений времени и денег.

Более того, сама природа человека противится такому излишеству: по статистике, каждый четвертый житель США (стране, где производство потребительской продукции сегодня имеет самый высокий уровень) страдает ожирением, являющимся причиной многих серьезных заболеваний сердечно-сосудистой системы. Проблема ожирения и связанных с ним болезней остро касается и остальной части “цивилизованного” мира. Но даже такой протест природы — “изнутри человеческого тела” — сегодня, увы, не способен образумить затуманенный рекламой человеческий разум. Мы продолжаем бездумно тра-

тить и уничтожать животворящие природные ресурсы, которые уже перешли в категорию *невозобновляемых*: землю, воду, воздух... Согласно одному меткому определению, современное человечество можно сравнить с динозавром, которому грозит вымирание: такая же маленькая головка и такое же большое туловище. Естественно, туловище это требует много-много “еды” — энергии, а вот для самоорганизации ради выживания мозгов явно не хватает.

А ведь еще со времен Ньютона известно, что чем больше масса тела и чем выше его скорость, тем большей инерционностью оно обладает. Поэтому, хорошенько разогнавшись, такое тело уже не может быстро затормозить и изменить свой курс, даже осознав в критический момент необходимость изменения (как, например, железнодорожный состав, несущийся на огромной скорости в сторону обвалившегося участка железной дороги). Человечество как социальная система с огромным “туловищем” массой в 6 млрд. людей в своей стремительной погоне за излишествами потребительства подобно глупому динозавру, несущемуся в пропасть и разрушающему все на своем пути.

В чем причина такого поведения? Маловат общечеловеческий “мозг”? Или ему нет особого дела до других “функциональных частей” человеческого организма? А ведь задача для “общечеловеческого мозга” сложнейшая: необходимо снова научиться жить в гармонии с Природой. Её возможности по переработке наших промышленных отходов крайне ограничены. *Человечество должно научиться тратить деньги не на войны, казино и прочие дорогостоящие излишества, а на создание экологически чистых энергосберегающих технологий*, где решающую роль могут сыграть нанотехнологии, с помощью которых можно повысить эффективность солнечных батарей, помочь в улучшенном катализе нефти, создать новые источники энергии.

Кроме того, научные прорывы в нанотехнологии и создание нанотехнологической промышленности будущего даст человечеству принципиально новый способ экологически чистого “выращивания” продуктов из атомов и молекул, что поможет решить проблему экологического и энергетического кризиса. А развитие таких технологий, особенно на начальном этапе, не рыночно, ибо требуют больших затрат на образование, научные исследования и их техническую реализацию

О концепции устойчивого развития

Наша планета для нас как космический корабль, но производимый на этом корабле мусор нельзя выбросить за борт. Создавая комфортные жизненные условия в одном отсеке корабля, мы в значительно большей мере загрязняем другие его отсеки. В конечном счете это приведет к загрязнению всего его пространства.

Как уже было сказано, прогноз Форрестера побудил ООН заняться проблемой экологии более серьезно. К чему это привело? В 1992 году в столице Бразилии Рио-де-Жанейро состоялась конференция ООН по окружающей среде и развитию. На конференцию прибыли государственные деятели из 179 стран с целью обсудить глобальные проблемы взаимоотношений природы и общества. Был продекларирован *принцип стратегии устойчивого развития*, под которым стоит понимать развитие, не нарушающее целостности экосистемы и не ведущее к ее деградации.

Однако полученные результаты не оправдали надежд ученых-экологов. Хотя участниками конференции были высокие политические деятели, они все же не сумели подняться на достаточный научный уровень и рискнуть посмотреть правде в глаза. Чисто меркантильные политические интересы представителей наиболее развитых стран не позволили отказаться от бытующих представлений и честно признать, что мы находимся на краю бездны. Вместо решения о кардинальном изменении пагубного пути были приняты решения о проведении локальных экологических мероприятий (очень важных, но не способных качественно изменить экологическую ситуацию или снизить риск катастрофического развития событий).

В марте 1997 года в рамках всемирной конференции “Рио+5” международная организация “Совет Земли” приняла решение о разработке проекта “Хартии Земли” — официального документа, где были бы перечислены права Земли, имеющие юридическую силу, наподобие декларации прав человека. Однако дальше разговоров дело не пошло и никакие кардинальные меры, нацеленные на изменение экологической обстановки в лучшую сторону, на этом всемирном форуме не рассматривались.

Все, чего добились организаторы той конференции, — это подписание 64 государствами-участниками так называемого *Киотского протокола*, направленного против глобального по-

тепления. Киотский протокол требует, чтобы промышленно развитые страны в период с 2008 по 2012 годы снизили уровень промышленных отходов (“парниковых газов”) на 5,2% от уровня 1900 года (другими словами, сократили свое промышленное производство).

Киотское соглашение нашло полную поддержку в подавляющем большинстве стран. Единственным противником Киотского протокола до последнего времени остаются США, производящих сегодня основную часть — 36,1% — от мирового уровня вредных промышленных выбросов (для сравнения, Россия имеет долю в 17,4%, что тоже немало). Но чтобы протокол вступил в действие, необходимо согласие стран, на которых в сумме приходится 55% выбросов. Американский президент Джордж Буш обосновал свой отказ подписать предложенное тем, что налагаемые им ограничения могут подорвать американскую экономику.²⁰

В июне 2002 г. по этим же причинам отказалось подписывать его и правительство Австралии (при этом оно еще пошло и на прямое сокрытие фактов о состоянии собственной природной среды).

Такое наплевательское отношение правительств развитых стран к рекомендациям и мнению ученых ставит Киотский протокол под угрозу срыва. Все это может привести к тому, что Концепция устойчивого развития в конце концов превратится в ничего не значащий документ.

Кроме экологических проблем, в рамках Концепции затрагиваются и некоторые социальные проблемы развития мирового сообщества, усугубляющие трудности реализации стратегии устойчивого развития. Камнем преткновения здесь является такой острый вопрос, как “кто из ныне живущих на Земле народов будет иметь право на существование в ближайшем будущем”? Именно этот вопрос в скрытой и опосредованной форме выступает в качестве подоплеки многих глобальных конфликтов.

На практике вызванная им напряженность выливается в международный терроризм и способствует нарастанию противостаний между развитыми и развивающимися странами. Существующие сегодня значительные различия в их социально-экономическом развитии и уровне жизни населения могут

²⁰ Вот уж где воистину уместна легендарная цитата Мефистофеля “Сатана там правит бал: люди гибнут за металл”!

серьезно повлиять на согласованность совместных действий по осуществлению рекомендаций Концепции, как это уже происходит с выполнением Киотского протокола. Ведь на долю 3/4 населения Земли сегодня приходится всего лишь 1/7 часть мирового дохода.

В то время как на одном конце планеты 25% населения страдает от ожирения, половине населения мира приходится думать над тем, как прожить менее чем на два доллара в день, а примерно 1,2 млрд. человек вынуждены существовать менее чем на 1 доллар в день. И если даже наиболее развитые государства планеты не желают поступиться своим экономическим ростом ради предотвращения глобального экологического кризиса, то чего же можно ожидать от развивающихся стран, составляющих большую часть населения планеты?! Уж они-то тем более не станут строго следовать рекомендациям по рациональному использованию природных ресурсов и охране окружающей среды, стремясь как можно быстрее сократить гнетущий научно-технический и социально-экономический разрыв, делающий их беззащитными перед лидерами.



Рис 222. Творческое выражение протеста против аморального отношения к планете *

Это наглядно подтвердил и прошедший в 2002 г. в Южной Африке (Йоханнесбург) 2-й Всемирный Саммит по устойчивому развитию, который оказался еще менее успешным, чем 1-й бразильский. Он сразу же был назван “саммитом упущенных возможностей”, поскольку не смог наметить никаких созидательных путей ни для решения проблем бедности, ни для охраны окружающей среды.

* Художник - Евгений Коваль

Йоханнесбургский саммит ясно показал, как мало общего в понимании мировых проблем у развитых и развивающихся стран. Широко пропагандируемые первыми идеи так называемой *глобализации*, то есть унификации всех мировых социально-экономических процессов под стандарты западной цивилизации, “окультуривание” отстающих государств, на самом деле являются замаскированной формой экономической и технологической экспансии. О “непонимании” отстающими государствами таких методов “окультуривания” наглядно свидетельствуют события 11 сентября 2001 и последовавшая вслед за ними военная антитеррористическая операция, вовлекшая в международный конфликт множество стран...

Наш мир многомерен и многовариантен, к нему нельзя применять единые стандарты и единые образцы, даже если они и представляются кому-то наилучшими. Реализация глобальной Концепции должна происходить без ущемления прав и интересов всех сообществ и народов, вне зависимости от их численности, экономического уровня или политического режима — только тогда этот процесс может быть конструктивным и устойчивым. Иначе идея устойчивого развития грозит превратиться в очередную утопию, как это произошло с марксистской теорией коммунизма.

Говоря об устойчивом развитии, нельзя не упомянуть замечательного русского ученого, академика В.И.Вернадского, который одним из первых осознал глобальные проблемы развития человечества в единстве с природой. В своих работах он писал о *ноосфере* — сфере разума, которая представляет собой философски осмысленный образ желаемого будущего, того, что мы теперь называем устойчивым развитием. Под ноосферой Вернадский понимал такое состояние общества, при котором истинными ценностями являются не меркантильные, а нравственно-духовные идеалы и знания человека, живущего в гармонии с окружающей средой.

Кстати, к такому переводу термина “sustainable development” как “устойчивое развитие”, у многих ученых имеется ряд обоснованных претензий, главным образом потому, что он может сформировать у читателя иллюзорное представление о возможности решить современные экологические проблемы относительно простыми правительственными мерами. Многие сходятся во мнении, что более адекватно раскрывал бы суть пред-

ложенного термина такой перевод, как “сбалансированное” или “гармоничное” развитие, то есть развитие, направленное на повышение уровня жизни населения всей планеты путем удовлетворения его основных потребностей в условиях гармоничного взаимодействия с окружающей средой и ориентированного на соблюдение интересов будущих поколений.

Помимо этого, у автора есть еще одно возражение против перевода “sustainable development” как “устойчивое развитие”. На наш взгляд, говорить об “устойчивости” развития в такой сложной ситуации не совсем уместно — преодоление надвигающегося экологического и социального кризиса, если оно возможно в принципе, потребует от человечества максимального напряжения и усилий каждой отдельно взятой личности. Банальный жизненный опыт показывает, что в основе любого развития лежит некоторый кризис, конфликт между желанием и возможностями или даже необходимость бороться за выживание. И степень развития того или иного человека, как правило, напрямую зависит от сложности преодоленных им препятствий. Поэтому человечеству стоит быть готовым к тому, что в будущем ему предстоит преодолевать многочисленные кризисы, взлеты и падения, победы и поражения. По нашему мнению, это будет путь не “устойчивого развития”, а напряженного поиска выхода из той ловушки, в которую мы сами себя загнали.

К несчастью, понимает это только очень небольшой процент мировой общественности, при этом те из них, кто живут в развитых странах, не хотят ничего менять, а в развивающихся — пока не могут (когда развивающиеся страны не захотят жить по-старому, а развитые не смогут этому воспрепятствовать, это будет уже другая ситуация). Большая же часть человечества предпочитает пребывать в “счастливом неведении”, послушно пережевывая “пищу”, предлагаемую им правительствами и подвластными им средствами массовой информации. Слишком мала и недальновидна, увы, голова у общечеловеческого “динозавра”, поэтому одной из главных механизмов выхода из глобального кризиса должна стать именно научно-образовательная система, способная увеличить количество извилин в общечеловеческой голове.

Россия всегда отличалась своим высоким интеллектуальным потенциалом, поэтому немалый вклад в это могут внести российские мыслители и ученые. Главной же целью образова-

ния должно стать воспитание новой личности, ориентированной на систему экологических и духовных ценностей, а не на ценности общества потребления. Ибо развиваться устойчиво будет способно только общество, состоящее из людей с новым мировоззрением. Какова же реальная ситуация и каковы перспективы появления такого общества в нашей стране?

О положении России в контексте устойчивого развития

Известен такой психологический феномен: то, что дается человеку с трудом, требует от него значительных усилий — волевых, физических, интеллектуальных — человек ценит выше, чем то, что он получает в дар. “А потерявши — плачем”, говорит народная мудрость...

Так уж сложилось исторически, что богатейшие природные ресурсы мы получили от своей Родины “даром”. Но сегодня, обладая потенциальными шансами быть в числе представителей цивилизации будущего, Россия ведет себя как мот, получивший богатое наследство. После распада Советского Союза россияне заразились от Америки и Запада опасной и крайне трудноизлечимой болезнью — ничем не обузданным нецелесообразным потребительством, непреодолимой тягой к вещам, многие из которых даже не имеют практической значимости.

Думая о сиюминутных выгодах, Россия безбожно разбазаривает свои природные богатства в обмен на западные яркие пустышки. В чем причина? Не умеет производить те же самые товары, не уступающие в качестве зарубежным? Как показывает анализ соответствующих материалов, разговоры о том, что отечественные производство и техника навсегда отстала от западной — не более чем миф. Причина сегодня не в отсутствии идей, и даже не в отсутствии денег на финансирование инновационных научных разработок и их внедрение в производство, а в элементарных нежелании и лени людей.

Преимущество в качестве товаров, которое США, Европа, Япония и другие имеют сегодня, сложилось во многом за счет более ранней автоматизации их производства. Так что если адекватно спланировать и проинвестировать сегодня развитие инструментов и оборудования Российской промышленности, то мы очень скоро сможем догнать и Запад и США — интеллектуальный потенциал наших инженеров еще, слава Богу, доста-

точно высок, а новаторских идей, вполне вероятно, даже больше, чем у них (даже с учетом всех перебежчиков). Однако наша сырьевая экономика, несмотря на очевидную бесперспективность, продолжает за копейки вывозить природные богатства России. Такое “слабоумие” нашего правительства, в погоне за сиюминутной выгодой не утруждающего себя задачей обеспечить следующие поколения россиян ресурсами в той же мере, в какой обеспечены ими мы сегодня, вызывает лишь недоумение и досаду...

В идеале стоимость любой производимой продукции должна определяться ее ценностью, а ценность — понятие субъективное. Вряд ли человек в здравом рассудке поменяет фамильное бриллиантовое кольцо на стакан чистой воды в жаркий летний день. Но та же “сделка” в условиях пустыни, когда от стакана чистой воды зависит жизнь человека, не будет выглядеть нелепой. Всего лет сто назад никто из наших предков и не подумал бы покупать чистую воду в полиэтиленовых бутылках. Сегодня же мы покупаем такую воду по 20 рублей за литр, и все знают почему. Учитывая нынешние “ударные” темпы загрязнения водоемов промышленными отходами, не стоит удивляться, если лет через 10-15 за глоток чистой воды люди будут готовы отдать все самое ценное, что у них есть...

Ценность, заключенная в природных ресурсах (например, в нефти, газе, лесных, морских ресурсах и пр.) значительно превышает таковую в промышленной продукции. Рыночная же стоимость природных ресурсов значительно ниже стоимости промышленных товаров. Экономическая теория объясняет этот парадокс следующим образом: стоимость любой продукции определяется количеством вложенного в нее труда — физического и интеллектуального. Соответственно, чем сложнее изготовить тот или иной товар, тем выше его рыночная стоимость, поскольку помимо сырьевых затрат она включает в себя и оплату труда высококвалифицированных специалистов.

А поскольку природные ресурсы считаются дармовыми, то их рыночная стоимость определяется не истинной энергетической ценностью, а лишь трудом, вложенным в их добычу и транспортировку. При этом даже не всегда учитывается труд, затрачиваемый на поиски, разведку и охрану того или иного ресурса.

Вот и получается, что если продажа на мировом рынке 1 кг сырой нефти приносит 2-2,5 цента прибыли, то 1 кг бытовой

техники дает 50 долларов, 1 кг авиационной техники — 1000 долларов, а 1 кг электроники и информационной техники — до 20.000 долларов. Поэтому тот, кто обменивает промышленную продукцию на сырьевую — нефть, газ, лес и пр. — получает экономический выигрыш, по сравнению с теми, кто добывает эти ресурсы. Не говоря уже о том, что, покупая промышленные товары за рубежом, мы вкладываем в развитие чужой науки и промышленности деньги, которые могли бы пойти на создание отечественных аналогов.

Поэтому нет ничего удивительного в том, что Япония или, например, Китай и страны юго-восточной Азии в последние десятилетия быстрыми темпами наращивают свою экономику. В Китай, Японию и др. страны ввозятся преимущественно нефть, газ, уголь, лес, цемент, металлы. Это вся та продукция, использование которой дает стране значительный экономический рост и улучшение социального положения населения. Россия же ввозит продукцию широкого потребления, включая и интеллектуально емкую, а экспортирует сырьевую, что ведет к обеднению населения нашей Родины и понижению ее потенциальной энергетической ценности.

Романтики и поэты, обладающие от природы восприимчивым сердцем, лучше других понимают боль и горечь своей матери-России. Поэтому в заключение этого параграфа приведем пример искреннего сочувствия к положению своей страны — стихотворение молодого оренбургского поэта Дмитрия Морозова. Надеемся, что читатель сможет прочувствовать хотя бы малую толику той душевной горечи, что заставила этого талантливого молодого человека написать следующие строки:

*Гордый свет ее очей
Давно потух от кумачей
Ее давно к Земле прибило -
Так, что дыханье перекрыло.
Наша Россия, наша Мать...
Что ей осталось? Умирать?!
Ведь ее дети всё пропили,
Иль их давно уже купили,
В тепло на запад заманили -
Чтоб Мать родную позабыли...*

*И все на радостях — туда!
Но стонет русская земля...
Та, что когда-то породила
Светил великих и умов,
Всех молоком своим поила
И отбивала от врагов...*

*Она полна родных степей,
Озер и рек, болот, лесов...
Вся красота Вселенской жизни -
Все в ней одной — в моей Отчизне!*

*Пока осталось еще время,
Не понимают дети то,
Что кроме Матери живыми
Не хочет видеть их никто.
И лишь рассеется туман
Заокеанских обещаний,
Поймут они, что Мать продали
В обмен на западный дурман...*

*И хоть сыны ее живут во лжи,
Родную Мать продав за деньги,
Она их любит и простит —
(Какие б ни были, а дети...)*

Роль молодежи в современном обществе

Итак, проведенный нами анализ поведения современного человечества показал, что сегодня переход к устойчивому развитию представляется крайне маловероятным — слишком низок уровень сознания и ответственности за свои поступки у мировой общественности. Наша планета испытывает острую необходимость в формировании нового общества, более развитого и интеллектуально, и духовно. Только такое общество будет способно предвидеть последствия своих поступков и воздерживаться от их совершения, если последствия эти будут негативными. Принципиально новые типы машин и оборудования, новейшие технологии, системы управления могут быть созданы и конструктивно применены только людьми нового, нетрадиционного типа мышления.

Как известно, многие глобальные изменения в обществе произошли именно благодаря молодым. Не секрет, что большинство своих открытий ученые с мировым именем делали в возрасте до 35 лет. Этому способствовали ряд причин:

Молодежь — это критические взгляды и настроения в отношении существующей действительности, это новые идеи и та энергия, которые особенно нужны в момент коренных реформ.

Молодежь — это носитель огромного интеллектуального потенциала, особых способностей к творчеству (повышенная чувственность, восприятие, образность мышления, и т.п.).

Молодежь — это ускоритель внедрения в практику новых идей, инициатив, новых форм жизни, ибо она противник консерватизма и застоя по своей природе.

Молодежь — это наиболее здоровая физически часть населения, это жизненная сила общества, сгусток энергии, нерастраченных интеллектуальных и физических сил, требующих выхода. За счет этих сил общество может быть оживлено.

Ценность молодости в современном мире увеличивается и в связи с повышением значимости образования и профессиональных навыков, необходимых в условиях научно-технической революции. В молодости человек легко приобретает основные знания, умения и навыки. Молодых поэтому не пугает необходимость непрерывного образования.

Но каково же отношение нашего общества к молодым и талантливым? Есть ли у современных “ньютонов” возможность творческой самореализации в нашей стране? По словам ректора МГУ академика В.А.Садовниченко, подготовка одного специалиста в этом вузе стоит около 400 тыс. долл. Покидая Россию, только выпускники МГУ ежегодно “вывозят” за границу 120 млн. долларов. И это — не считая научных разработок. По последним данным, стоимость “утечки мозгов” из России за последние 10 лет оценивается в несколько *сот миллиардов* долларов!

Молодых ученых, эмигрирующих на Запад, можно понять — высокий интеллект, честолюбие и желание достойной счастливой жизни гонит их прочь из страны, где укоренился стереотип нищего, никому не нужного изобретателя, годами прозябающего в своей лаборатории.

Но какими бы тяжелыми ни были современные условия, именно сейчас у России появился реальный шанс снова встать

с колен. Несмотря на трудности, лидер отечественного нанотехнологического бизнеса Концерн “Наноиндустрия” сегодня стремительно набирает обороты, выстраивая долгосрочные партнерские отношения с Китаем, Индией и странами Запада. Успешно реализовываются первые коммерческие продукты, созданные с применением нанотехнологий, возрастает спрос на высококвалифицированные талантливые кадры, способные работать в сфере нанотехнологий.



Рис 223. Логотип I-го конкурса

Для привлечения интереса молодежи к этой перспективной области в апреле 2004 года компания Nanotechnology News Network совместно с Концерном “Наноиндустрия” при поддержке КБ «Юниаструм Банк» успешно провели I Всероссийский конкурс молодежных проектов по созданию отечественной молекулярной нанотехнологии, вызвавший неподдельное восхищение российских ученых.

Победители конкурса представили интереснейшие разработки. I место занял коллектив молодых ученых под руководством Галины Поповой (РХТУ им. Д.И. Менделеева), создавший биометические (подобные живым) материалы для оптических наносенсоров, молекулярной электроники и биомедицины. Второе место заняла аспирантка Марина Фомина с системой направленной доставки лекарств к нужным тканям, а третье —



Рис 224. Командная фотография с награждения победителей I-го конкурса

школьник Алексей Хасанов с технологией создания нанокерамических материалов с уникальными свойствами. Победители получили ценные призы и финансирование своих проектов.

Nanotechnology News Network решила придать подобным конкурсам статус традиционных и в декабре 2004 года объявила начало II Всероссийского конкурса молодежных проектов в области нанотехнологии. На этот раз организаторы решили мобилизовать всех, кто способен и готов принять участие в развитии нанотехнологий. Для этого конкурс получил самое широкое освещение в СМИ и образовательных учреждениях.

К слову об отношении к конкурсу со стороны общественности: найти спонсоров для поддержки молодежных проектов в области нанотехнологии оказалось гораздо труднее, чем представлялось организаторам. Из 500 крупнейших компаний страны, приглашенных войти в спонсорский комитет, на предложение откликнулись лишь Юниаструм Банк, довольный результатами первого конкурса, и Powerscom — международный производитель источников бесперебойного питания — организации, заинтересованные в богатой и высокотехнологичной России.

Если меценат, обычно человек опытный, с широким кругозором, понимает, что важно поддерживать то, что в будущем станет реальными достижениями, способными вывести страну на качественно новый уровень, то руководители PR-отделов предпочитают тратить деньги на благотворительность, рассчитанную на обывательское мышление, жаждущее “хлеба и зрелищ”. К сожалению, в нашей стране все еще считается более благородным утешать жертв голода, болезней и терактов, чем поддерживать создание средств для их предотвращения...

Несмотря на это, благодаря содействию спонсоров и руководству Концернa "Наноиндустрия" призовой фонд второго конкурса пополнился новыми уникальными призами. В частности, участник, занявший I место, получит новейшую российскую нанотехнологическую лабораторию "УМКА", созданную в октябре прошлого года концерном "Наноиндустрия". В отличие от зарубежных аналогов, стоящих \$50-100 тысяч, она не требует для работы специальных помещений и холодильных установок.

Направления проектов чрезвычайно разнообразны - от перспективных наноматериалов для автомобилестроения и авиации до имплантантов и нейротехнологических интерфейсов. Конкурсная комиссия представлена выдающимися учеными и опытными промышленниками.



Рис 225. Логотип II-го конкурса

Работы принимаются до 1 июля, и организаторы уже получили ряд интересных проектов. Мы надеемся, что конкурс станет доброй традицией и активность российской молодежи в нанотехнологиях наконец-то перестанет снижаться и начнет расти. Мы полагаем, что если те люди, которым предстоит жить и работать в XXI веке, смогут в ближайшем будущем поднять производство и экономику своей страны на мировой уровень, если вывоз леса, нефти и газа из страны не будет “оправдан” низким качеством отечественных товаров, то у России есть все шансы снова стать одной из экономических сверхдержав.

Яркий пример этому — Япония. После второй мировой войны эта голодная, обнищавшая страна бросила все силы на развитие науки и производства и... вышла в мировые экономические лидеры. Если мы сегодня возьмем пример с Японии и откажемся от своей бестолковой сырьевой экономики, то, учитывая количество нефти в недрах нашей страны, можно прогнозировать, что она закончится у нас позже всех на планете. В истории России нет периодов, когда она одновременно бы экспортировала сырье и была великой державой.

А пока ситуация сильно напоминает эпизод из кинофильма “Белое солнце пустыни”, где беспечные деды раскуривают кальян на ящике с динамитом. У России, как говорится, две беды... Третья беда в том, что число людей, не способных видеть дальше своего носа, превышает все допустимые нормы.

Нанотехнологии и безопасность страны

Было бы неправомерно рассматривать развитие нанотехнологии только с точки зрения науки или экономики и совсем не упомянуть о такой важной проблеме, как национальная безопасность и оборона страны.

Несмотря на бурное развитие нанотехнологий по всему миру, нередко доводится слышать скептические замечания лиц, “не верящих в нано”, приводящих убедительные аргументы в пользу принципиальной невозможности эры нанотехнологий.

Ну что ж, история показывает, что такие ситуации ей уже знакомы. Когда-то некоторые ученые считали и аргументировано доказывали принципиальную невозможность создания ядерной бомбы (мол, где взять столько урана). Взрывы в Хиросиме и Нагасаки — не достаточно ли “убедительный” контраргумент против подобных ретроградов, не желающих развивать науку и технику для защиты своей страны?

Часто политическая недалёковидность, погоня за личной наживой или банальная безграмотность отдельных людей, стоящих у власти и определяющих направление развития всего народа, подкрепленная корыстными интересами представителей бесперспективных направлений экономики, обходилась народу слишком дорого.

Примером этому может служить пренебрежительное отношение Наполеона к проекту первого парохода, предложенному Робертом Фултоном. В 1803 году изобретатель продемонстрировал в Париже на Сене опытный образец - 20-метровое судно, приводившееся в движение паровым двигателем и развивающее скорость до 2,9 мили в час. Не сумев тогда разглядеть очевидных выгод нового изобретения, Франция не проявила к нему никакого интереса. Зато через 4 года Фултон успешно построил в Америке первый настоящий пароход, способный преодолевать значительные расстояния, а Франция лишилась больших экономических выгод.

Или взять, к примеру, СССР. В чем причина такого катастрофического отставания России от США в сфере информационных технологий? Ведь на самых первых порах отечественные разработки в этой области ничуть не уступали западным аналогам (а в некоторых аспектах даже во многом превосходили их)? Не в том ли, что кто-то “умный” объявил в свое время кибернетику — прародительницу современной информатики — “капиталистической лженаукой”?

Да что далеко ходить? Российский академик Ж.И.Алферов — основатель нанонауки в РФ — получил за свое открытие квантовых точек и гетероструктур сначала Нобелевскую, а только потом государственную премию. Этот факт говорит сам за себя: до сих пор в нашей стране к научным открытиям не относятся, увы, с должным уважением.

История полна таких примеров, и мы снова призываем читателей задуматься об ответственности перед будущими поколениями россиян. Сегодня весь мир стоит на пороге нанотехнологической революции, где наша активность или же пассивность в области нанотехнологий являются решающими факторами, навсегда определяющими нашу дальнейшую жизнь.

Это не просто слова, ведь нанотехнологический прорыв обещает пионерам в этой области не только материально-экономическое, но и военно-политическое превосходство. Жизнь такова, что за рубежом большая часть всех научных открытий автоматически попадает на службу Министерства Обороны и используется в военных целях — для производства оружия, средств связи и т.п. К сожалению, отношения людей вообще и международные отношения в частности сегодня чрезвычайно далеки от той утопической картины всеобщего равенства и благоденствия, о которой мечтают романтики и идеалисты, а больше соответствуют формуле “человек человеку волк”. Грустно, но правда: находясь в зависимости от постоянно растущих потребностей, стремясь к обогащению за счет чужих природных и территориальных ресурсов, каждая страна стремится увеличить свой военный потенциал любыми доступными средствами, в том числе и за счет усовершенствования военной техники.

Почему это происходит на протяжении многих веков? Что заставляет одних людей стремиться подчинить себе других? Ответы на эти вопросы носят глубокий социальный и психологический характер, и мы, естественно, не будем рассматривать их в данном курсе. Но нравится нам это или нет, факт остается фактом: так называемое “равновесие страха”, когда мир между странами-конкурентами обуславливается лишь отсутствием у одной из них ярко выраженного военного преимущества, зачастую является главной (если не единственной) основой международной стабильности. Так было в период “холодной войны”, когда агрессию одной из сторон сдерживала лишь боязнь ответного ядерного удара. Так продолжается и поныне. Когда данный баланс страха нарушается, это позволяет более сильной стороне безнаказанно использовать свое военное преимущество для достижения собственных целей.

В связи с этим политологи и социологи говорят о тех опасностях внешне и внутривнутриполитического характера, которые таит в себе дальнейшее развитие молекулярной технологии.



226. Издавна идеалисты надеялись, что с развитием технологий люди станут гуманнее... *

* Перепечатано с <http://macroevolution.narod.ru> (художник Николай Ковалев) и <http://www.army.mil>

Во-первых, это появление нестабильности между конкурирующими сторонами. Прорыв в нанотехнологиях и развитые системы искусственного интеллекта приведут к созданию высокотехнологичного оружия массового поражения, не имеющего аналогов в истории. Это позволит странам, владеющим таким оружием, диктовать свою волю зависимым государствам, отстающим в техническом отношении. Не исключено, что конкуренция между лидирующими странами в такой ситуации может привести к возврату некоторых форм империалистического национализма.

Во-вторых, развитие нанотехнологий может привести к стремительной гонке вооружений, чреватой накоплением в мире огромного количества оружия массового поражения, подобно тому, как это происходило в период холодной войны. Это, в свою очередь, таит в себе опасность нестабильности первого удара. Если у одной из сторон появляется раннее преимущество в наращивании вооружений на основе саморепликации, если она имеет более быстрые репликаторы или более совершенное оружие, то это позволит ей внезапно нанести первый удар и уничтожить противника еще до того, как он сможет ответить.

Эту проблему усугубляет факт “невидимости” нового оружия, то есть возможность скрыть сам факт его существования (что было очень сложно делать, например, с ядерным оружием). Кроме того, молекулярная сборка сделает оружие более легким, оборонительные системы более надежными, а высоко развитые системы искусственного интеллекта позволят уничтожать обнаруженного противника самонаводящимся оружием. Эти и другие факторы могут привести все народы к гонке “в никуда”, то есть к ситуации, когда говорить об устойчивости развития просто бессмысленно.

Что касается внутривнутриполитических проблем, то самыми острыми, на наш взгляд, здесь являются проблемы борьбы с терроризмом. Не могут ли достижения нанотехнологии и биотехнологии ввиду их невидимости и дешевизны стать легкодоступным средством для проведения терактов или разработки опасных микроорганизмов? Одним из наиболее частых опасений в связи с этим является геноцидный репликатор, способный убивать людей с определенным шаблоном ДНК. Такое оружие не представляет никакой пользы в борьбе против нанотехническо-

го противника и к тому же опасно для самих создателей. Но разве могут психически здоровые люди логически опровергнуть безрассудные мотивы террористов-камикадзе?

Итак, с развитием нанотехнологии в технологии вооружения произойдут грандиозные изменения, и, естественно, ни одна страна (со здравомыслящим руководством) не захочет оставаться бессильной против потенциального агрессора. А поскольку военный потенциал страны будет всецело зависеть от ее места в технологической гонке, то в настоящее время наноэлектроника, молекулярное производство, нанобиотехнология и другие отрасли нанотехнологии представляют не только научный и экономический, но и политический интерес.

Американские военные заявляют, что ни одна страна не может сказать, что она является лидером в гонке по созданию молекулярных самовоспроизводящихся сборщиков, так как пока что никто не подошел достаточно близко к этой проблеме. Но, по прогнозам аналитиков, такая гонка начнется в ближайшие несколько лет, когда будет решена проблема репликаторов. Пока же США тратит сотни миллионов долларов на одни только военные разработки в сфере нанотехнологий, не забывая, что кроме собственно репликаторов, военное применение имеют и промежуточные достижения нанотехнологии — боевые роботы, микроскопические летательные аппараты, искусственный интеллект, новые болезнетворные вирусы, гибриды живых и искусственных устройств. Ежегодные военные расходы США составляют более 450 млрд. долларов (для сравнения: весь бюджет России в 2005 году составит около 100 млрд. долларов).

Что же можно сказать о положении других мировых держав и России в данной ситуации? Гонка за лидерство в создании молекулярных сборщиков требует дорогостоящих проектов с участием многих групп лучших ученых и инженеров. Несмотря на серьезные достижения отечественной науки в области нанотехнологии, сегодня Россия вынуждена сокращать военные расходы и финансирование долгосрочных научных разработок ввиду нестабильной социально-экономической ситуации в стране. В прошлом году впервые за долгое время Президент принял решение о повышении оборонного бюджета на 40% в первую очередь за счет роста финансирования высоких технологий, в т.ч. нано-технологий. Это вселяет надежду в будущее возрождение России.

Между тем, все передовые государства выводят проблему развития нанотехнологий на национальный уровень, отводя ей одно из первых мест в бюджете страны. Например, в США и Японии программы развития нанотехнологий во всех крупнейших отраслях промышленности и вооруженных силах приобрели высший государственный приоритет и соответствующую строку финансирования. Одна только фирма Intel в прошлом году на разработки в области нанотехнологий было потратила более \$1 млрд. (более подробно этот вопрос рассматривался в первой главе).

Даже Южно-Африканская Республика вкладывает в развитие нанотехнологий деньги, вырученные от продажи алмазов.

Поэтому в ближайшие годы даже самый непатриотичный человек может сколько угодно ругать Россию, возмущаться ее политикой и экономикой, но бороться за улучшение ситуации в своей стране он будет вынужден в любом случае, ибо там, на Западе в самой ближайшей перспективе он будет нужен еще меньше, чем здесь.

Рост образованности и развитие нанотехнологии как возможность выхода из глобального кризиса

Уже не раз мы подчеркивали роль образования для развития нанотехнологий в нашей стране. Знание — это сила в буквальном смысле слова, это научный, экономический и военный потенциал государства, это умение побеждать в интеллектуальной борьбе.

На Западе большой популярностью пользуется концепция человеческого капитала, а инвестиции в сферу образования многие исследователи определяют как один из главнейших факторов устойчивого экономического роста. Роль образования в экономическом росте может проявляться в различных формах:

- повышается производительность труда;
- улучшаются предпринимательские способности человека;
- ускоряется научный и технический поиск и т.д.

Вложения в человеческий капитал, по существующим оценкам, гораздо эффективнее, чем вложения в другие эконо-

мические фонды. Так, в США в послевоенный период нормы прибыли от вложений в образование располагались в интервале 8-12%, тогда как средняя прибыльность обычных вложений составляла всего около 4%.

Установлена прямая зависимость между экономическим ростом страны и коэффициентом образования населения: ***чем ниже коэффициент образования населения, тем беднее страна.***

Если население в стране грамотное и образованное, страна — богата. Считается, что, тратясь сегодня на образование и профессиональную подготовку людей, завтра государство получит от них максимальный вклад в ВВП. Это логично: за новыми знаниями следуют новые технологии, а прогрессивные технологии рождают инновационные и успешно реализуемые товары. Устаревшие же технологии, как известно, убыточны. Они не приносят дохода, а товары, произведенные в рамках таких технологий, невозможно продать по высокой цене.

Когда затихает интеллектуальное обновление, экономика становится загнивающей, и вопрос о том, когда ее обойдут более активные конкуренты — всего лишь вопрос времени. Давайте, обратившись к статистике, посмотрим, верна ли эта закономерность на примере нашей многострадальной России:

Факт: Общее число людей, занятых в научной сфере сократилось за период с 1990 по 2005 гг. более чем в два раза. Резкое сокращение финансирования науки привело к тому, что самые сильные и умные специалисты разбрелись по более доходным отраслям: торговля, сфера услуг, развлечения и т.п.

Следствие 1: С этого момента начинается серьезное отставание от других стран по уровню использования наукоемких технологий в промышленности.

Следствие 2: Производство ведется на устаревшем оборудовании и по старым технологиям (образца 70 - 80-х годов). Для сравнения: в развитых странах до 50% всей промышленной продукции изготавливают станки с электронными системами управления, а к 2015 г. их будет 100%.

Следствие 3: Продукция, производимая по устаревшим технологиям, сильно уступает в качестве западным аналогам и, следовательно, не может пользоваться большой популярностью у потребителей. Все это ведет к вытеснению отечественной продукции с собственного же рынка, не говоря уже об экспорте.

Выводы: Россия хронически отстает в производстве наукоемкой продукции от развитых стран. Для выхода из сложившейся ситуации ей потребуются новые кадры — не люди с опытом челноков и агентов по продажам и даже не инженеры, получившие устаревшие технологические знания. Нужны специалисты нового поколения, способные ликвидировать отставание и развить “прорывные” новые технологии. Следовательно, необходима кардинальная реорганизация всей сферы образования, направленная на повышение скорости обновления преподаваемых студентам знаний.

При этом меньше всего имеется в виду та “модернизация” образования, которая проводится сейчас в нашей стране. Модная теперь “гуманитаризация образования” и перевод на так называемые “элективные курсы” приводят к тому, что предметы конкурируют за время школьников. Суть элективных курсов сводится к тому, что после 9-го класса, традиционно преподаваемые в старших классах дисциплины вроде физики, химии, математики, биологии и др. переходят в разряд “необязательных”. Конечно, при такой системе большинство школьников выберет легкие и заманчивые гуманитарные предметы и мало кого прельстят физика и математика, требующие напряжения ума, но в России низкооплачиваемые.

А между тем вся физика 20 века изучается в 11 классе (а вся физика 18-19 веков - в 10-м), органическая химия - в 10-м, классическая литература - в 10-м, дифференциальное и интегральное исчисление - в 10-м и 11-м... Похоже, что без сознательного сопротивления очередной “антиобразовательной” реформе, лет через 10 наша страна превратится в населенный лингвистами и психологами “каменный век”, а развивать науку будут другие...

Для иллюстрации принципиальной возможности успешной модернизации образования в современной России можно взять пример постколониальной Великобритании.

1) В 60-х годах в Великобритании появилась кризисная тенденция — падение ее доли на мировых рынках. Была принята комплексная программа реформирования образования.

2) Логика предложенного решения задачи по повышению качества инженеров проста до гениальности:

- английские товары хуже покупают, т.к. их качество уступает другим;
- качество товаров неважное потому, что инженеры их плохо проектируют;
- проектируют их плохо потому, что национальная система образования недостаточно хорошо учит инженеров это делать;
- следовательно, нужно развивать инженерное образование.

Но для этого британцам пришлось основательно поработать. За 30 с лишним лет они изменили многое: не только всю систему образования (как дошкольного, так и университетского), но и общественную систему ценностей. В частности, модернизация заключалась в развитии деятельностного подхода к построению учебных планов. Что это значит?

Традиционно в учебный план включаются дисциплины, состав и порядок которых определяются логикой прошлого развития наук. Например, в наших школах в курсе изучения, допустим, физики современные школьники успевают “основательно познакомиться” с работами ученых XVII-XVIII веков — Ньютона, Архимеда, Галилея и др., “слегка пройти” по физическим теориям XIX века — Максвелла, Френеля и т.д., и “услышать краем уха” об открытиях начала XX века — в лучшем случае о теории относительности Эйнштейна (Что уж тут говорить о нанотехнологиях!).

А ведь жить и работать нашим школьникам в XXI веке...

При деятельностном подходе в план включаются предметы, формирующие умения выполнять необходимые для будущей работы процедуры инженерной деятельности, то есть аккумулирующие весь накопленный за годы развития научной мысли опыт. Кроме чисто практических “плюсов” такого подхода можно выделить и педагогический: любому школьнику гораздо интересней изучать что-то актуальное и современное, чем всякое “научное старье” (да простят мне великие ученые прошлого).

Заключение

Работая над последней главой, я не раз ловила себя на мысли, что затронутая тема звучит слишком пессимистично: и современная ситуация, и перспективы ее дальнейшего развития, прямо сказать, не радужные. А поскольку изначально книга предназначена для довольно юной аудитории, то, чтобы не

“наводить тоску” на читателя, признаюсь, чуть было не вычеркнула некоторые “душераздирающие” факты и цифры. Не сделать этого помогло в последний момент мудрое изречение: “предупрежден — значит вооружен”. И в самом деле, мы не сможем изменить свое положение, не осознав в полной мере его катастрофичность...

Не буду питать иллюзий, что, прочтя эти строки, все сразу же проникнутся стремлением изменять жизнь к лучшему. Многие, как всегда, ограничатся лишь тем, что, охая и сокрушаясь о плачевном положении человечества, просто умоют руки. Но тем, кому не наплевать на свое будущее, кто чувствует в себе силы повлиять на ход событий, хочется напоследок сказать: не ищите виновных, не пребывайте в унынии — этим вы ничего не добьетесь и лишь потеряете драгоценное время. Помните, что спасение утопающих — дело рук самих утопающих. Понимая всю опасность, которую таит в себе бездействие и невежество, не будьте пессимистами. Ведь история полна примеров того, как люди совершали невозможное и поднимали свои страны из руин к процветанию и силе.

Были же в истории случаи, когда глобальные модели-прогнозы, скрупулезно просчитанные на основе точнейших математических законов, не сбывались из-за какого-то технического изобретения, предсказать появление которого исследователи в свое время просто не могли. Например, курьезный случай прогноза Герберта Уэллса, который в начале 20 века рассчитал, что, учитывая существующую в то время тенденцию развития гужевого транспорта, через 50 лет конский навоз покроет улицы Лондона до второго этажа. Тогда Уэллс просто не мог учесть возможность появления технического транспортного средства.

Сегодня, правда, Лондон задыхается от выхлопных газов, но, тем не менее — прогноз не оправдался! Так что, будем надеяться, российские нанотехнологи не будут сидеть сложа руки, а изобретут какой-нибудь новый антикризисный “автомобиль”. И, быть может, молодежь сыграет в этом не последнюю роль!

Полезные ссылки:

На русском языке:

www.mno.ru — Молодежное Научное Общество

www.nanonewsnet.ru — нанотехнологии

www.nanobot.ru — интернет-магазин нанотоваров

www.microbot.ru — робототехника, киборги, МЭМС

www.neuroelectronics.ru — нейроэлектроника

www.cbio.ru — биотехнология

www.robotclub.ru — робототехника

www.aicomunity.org — искусственный интеллект

www.mno.ru/books/eoc/eoc.php — “Машины созидания” Дрекслера

www.mno.ru/books/laz.php — повесть А.Лазаревича “Нанотех”

www.prognosis.org.ua — “Цивилизация богов” А. Капация. Прогноз развития науки и техники в 21 веке

На английском языке:

www.nanonewsnet.com — новости нанотехнологии и нанобизнеса

www.rfreitas.com — сайт Р.Фрайтаса и его книги по наномедицине

www.kurzweilai.net — сайт Р.Курцвейла с виртуальной хозяйкой Рамоной (хорош для изучающих английский язык)

www.e-drexler.com — сайт Э.Дрекслера

www.foresight.org — Институт Предвидения

www.nano.gov — Нанотехнологическая инициатива США

www.sani.org.za — Нанотехнологическая инициатива ЮАР

www.nasa.gov — Аэрокосмическое агентство США (NASA)

www.crnano.org — Центр Ответственных Нанотехнологий (CRN)

www.darpa.mil — Агентство перспективных военных разработок США (DARPA)