

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение

высшего образования

«Саратовский государственный технический университет

имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Сварка и металлургия»

**Тема: «Основные понятия нанотехнологий.  
Оборудование»**

Методические рекомендации по организации практической работы для  
студентов направления «Машиностроение» Профиль 2 «Новые материалы и  
упрочняющие технологии в машиностроении» (м2МНСТ11)

по дисциплине:

«Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроительном производстве »

Преподаватель: к.т.н., доц. Перинская И.В

“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.

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...

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.

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”, 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.

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 разумы 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 “мимов” – 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 мимов, 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 ограниченное пространство и ресурсы, так и мимы должны конкурировать за ограниченный ресурс человеческого 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.

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.

Всем известно, что первые компьютеры в начале 1950х 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 5060 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	386TM	275.000
1989	486TM 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

“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 какойлибо 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 назвать её высокой технологией, и был бы абсолютно прав. Ведь еще лет 1520 тому назад сотовые телефоны, например, считались устройствами типа “hightech”. Однако сегодня “мобилой” 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. “*nannos*” – “карлик”) означает одну миллиардную (10<sup>9</sup>) долю какойлибо 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.

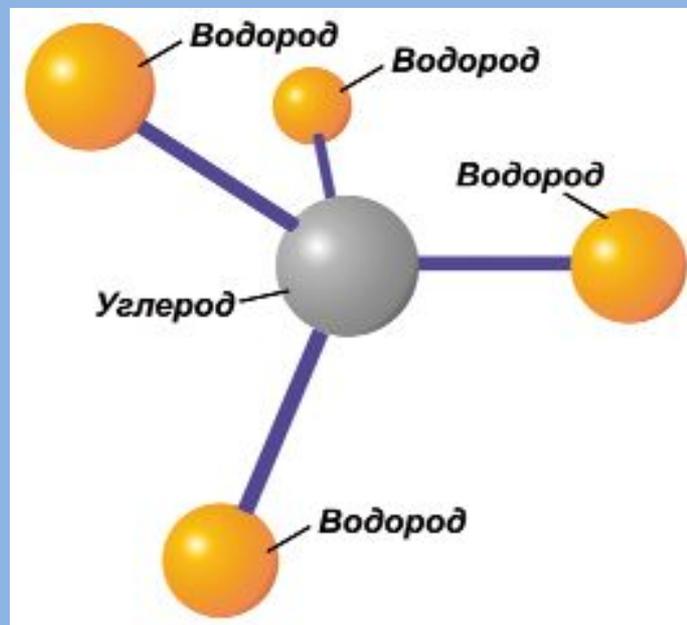
Атом – (от греч. “*atomos*” – “неделимый”) – это мельчайшая частица химического элемента, носитель его свойств, способный образовывать с другими атомами более сложные конструкции – молекулы.

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 наномшины, 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 шаров



Модель молекулы  
метана ( $\text{CH}_4$ )

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.

Без биоподобных структур очень трудно манипулировать отдельными атомами и молекулами. Поэтому наномшины - 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.

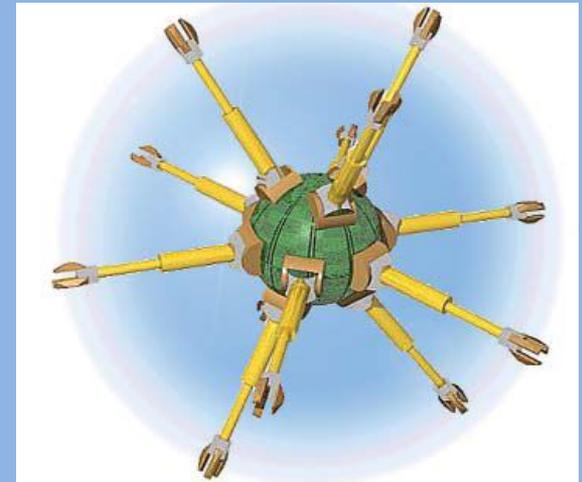
Внешний вид сборщика можно представить себе как “ящик” нанометрового размера с “рукой” манипулятором длиной в сотню атомов. Исходным материалом для манипулятора могут служить атомы, молекулы и химически активные молекулярные конструкции.

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.

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 нанокomпьютеры, 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.



Внешний вид ассемблера

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 так же 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.

## 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 нанообработки поверхностей.

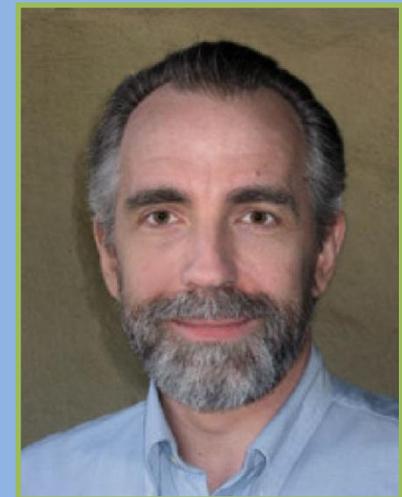
1974 Японский физик Норио Танигучи ввел в научный оборот слово “нанотехника”, предложив называть так механизмы размером менее 1 микрона.

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.

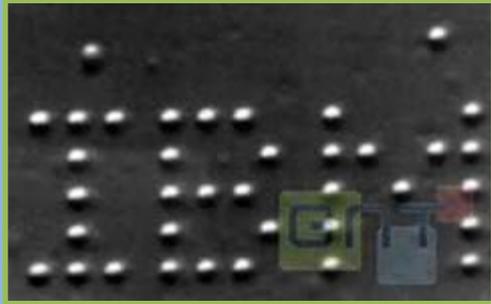
1985 Американский физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смолли создали технологию, позволяющую точно измерять предметы диаметром в один нанометр.

1986 Создан атомносиловой 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.

## 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, если 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 может. 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.



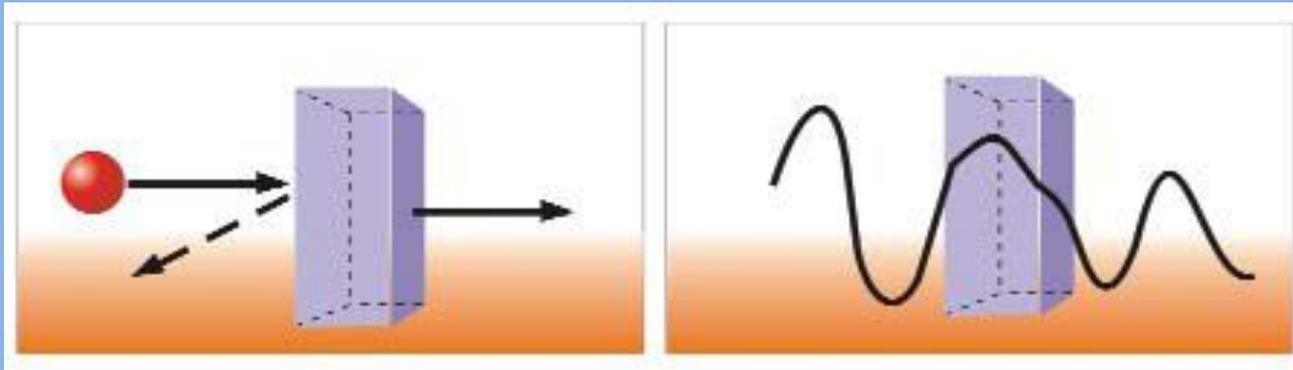
И вот в начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая визуально исследуемую площадь его поверхности, а как бы трогая её. Здесь пригодился открытый к тому времени туннельный эффект, на основе которого в 1981 году был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).



*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  $V_0 > E$ . Например, 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 туннель.

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.

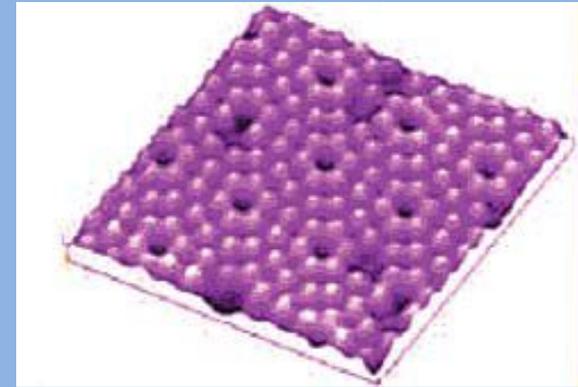


### Туннельный эффект

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 ( $0,11$  В), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется туннельным током.

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 научнопопулярные издания даже не хотели брать в печать статью Бининга и Рорера, содержащую описание изобретения, на основании того, что это якобы “недостаточно интересно”!



СТМ изображение  
поверхности  
монокристаллического  
кремния

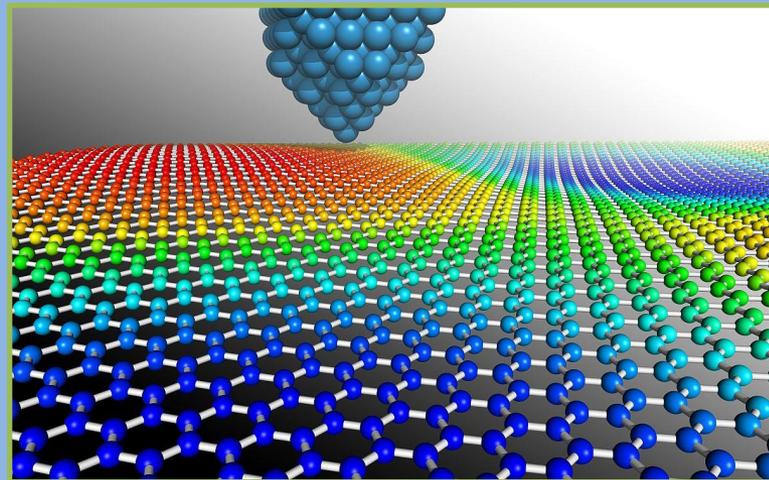
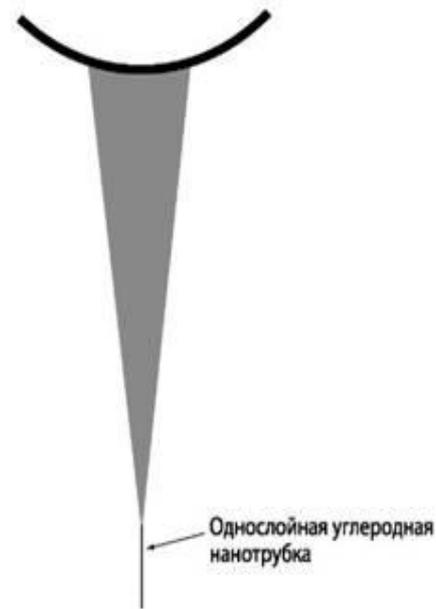


Иллюстрация иглы сканирующего туннельного микроскопа над слоем графена

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. 4.3.* Однослойная углеродная нанотрубка может существенно увеличить точность АСМ



*Рис. 4.4.* В атомно-силовой микроскопии более острая игла-зонд позволяет повысить точность измерений

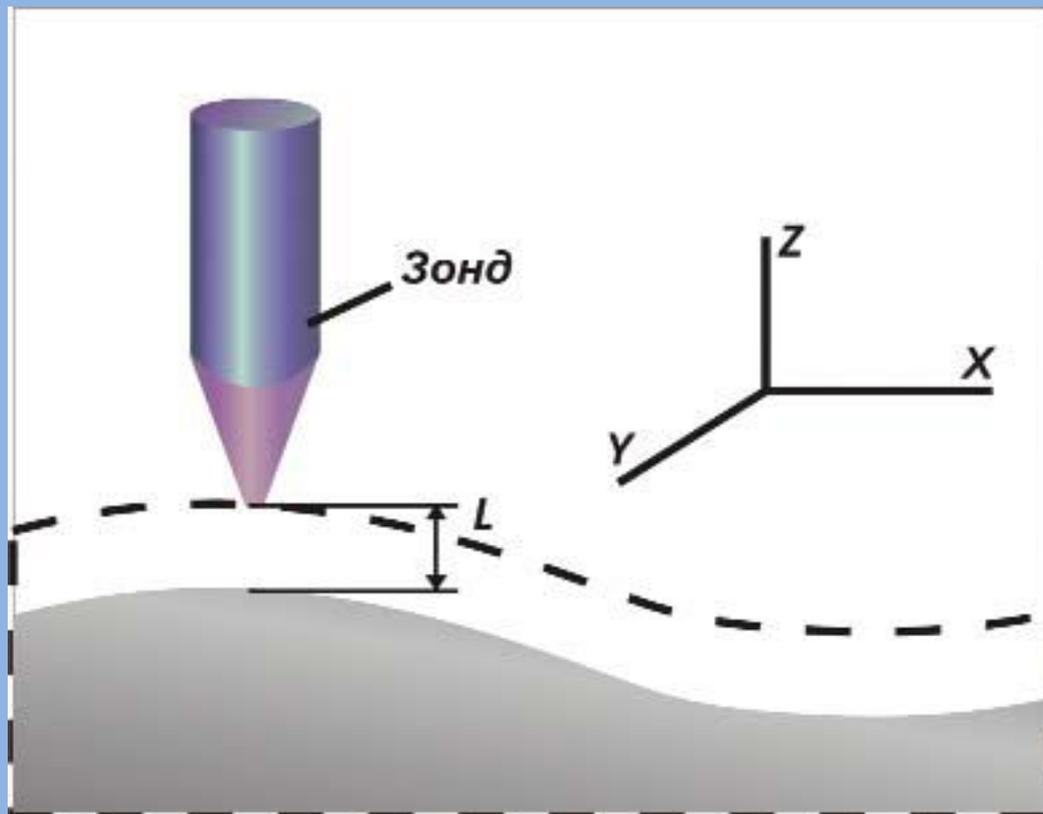
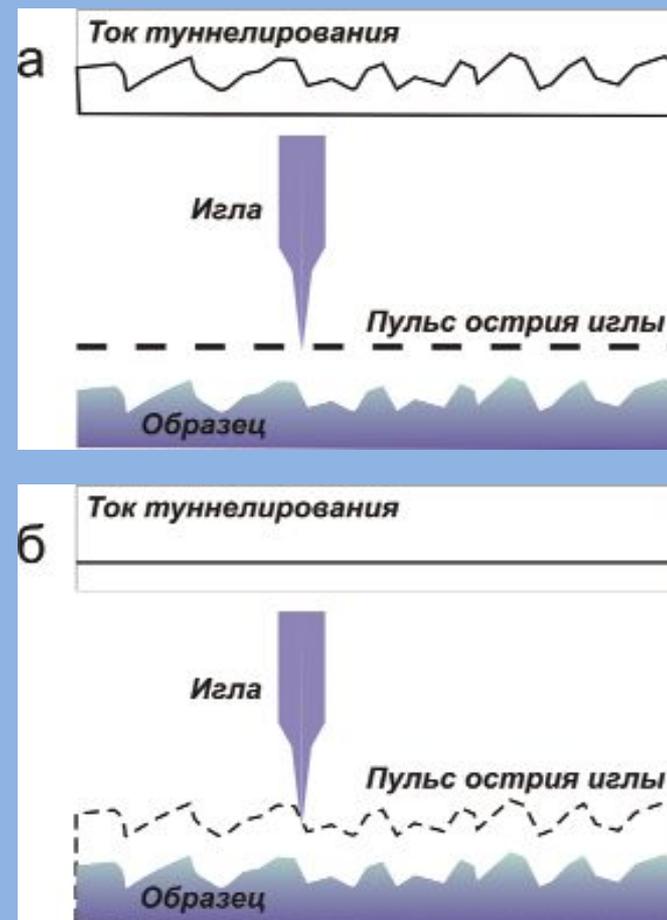


Схема работы СТМ

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.а). Исходя из данных о величине тока туннелирования, измеренной в каждой точке поверхности, строится образ ее рельефа.

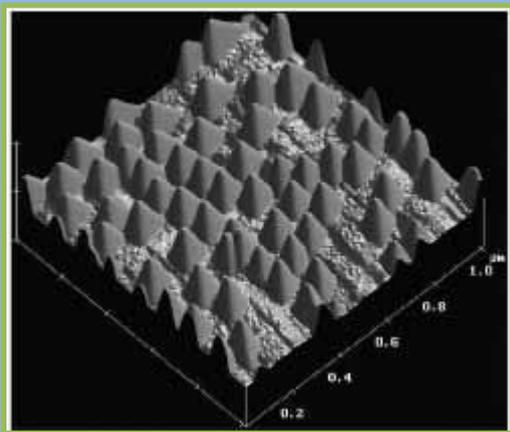
В *режиме постоянного тока* СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой ее точке (рис.б).



Режимы работы СТМ

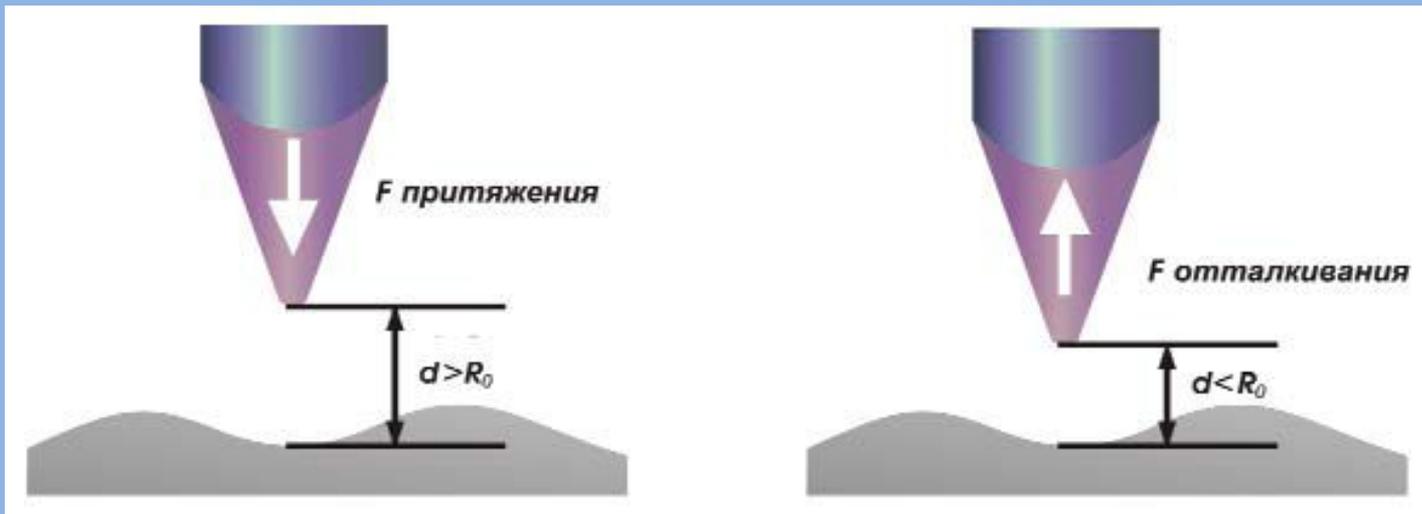
В 1986 г в лаборатории цюрихского отделения IBM были созданы микроскопы следующего поколения – *атомно-силовые (АСМ)*. АСМ тоже позволяет исследовать поверхности с атомной точностью, но уже вовсе не обязательно электропроводящие. Сегодня именно он представляет наибольший интерес для исследователей.

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, а на больших – силы притяжения.



Изображение поверхности слоя РbТе, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии





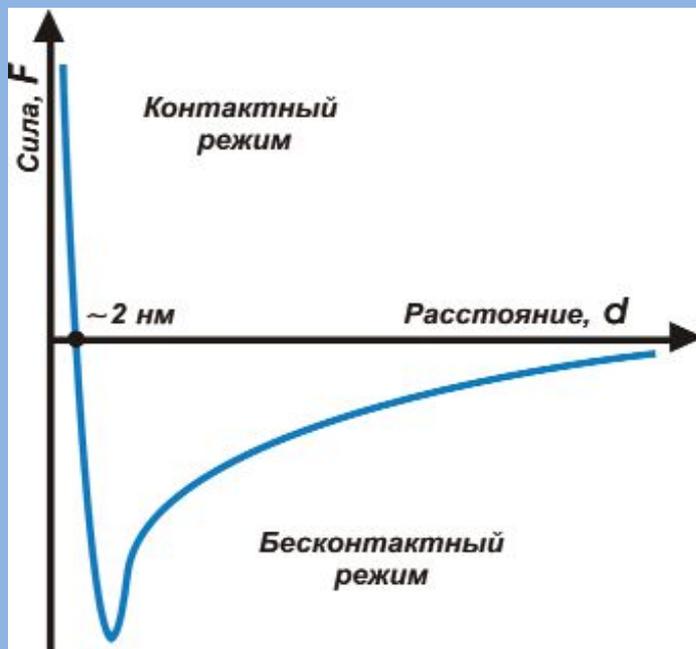
### Принцип действия АСМ

В сканирующем атомносиловом 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.

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 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 неподвижного 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 четырехсекционный фотодиод.



Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом

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 подвидов микроскопов, носящих общее название – сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Сегодня наиболее известны следующие их разновидности:

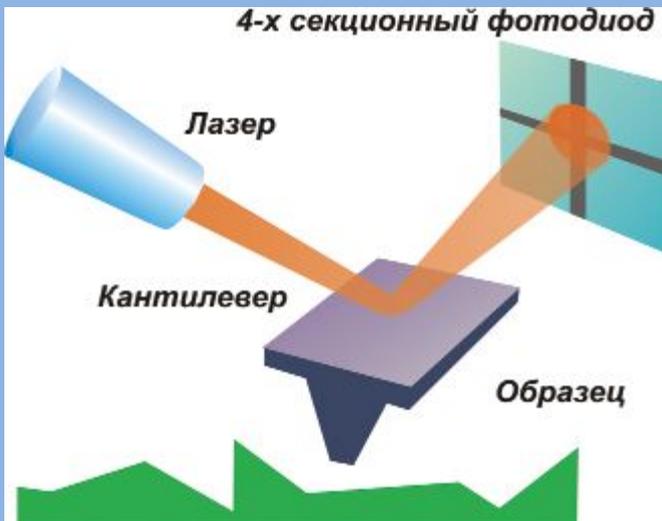
туннельные зонды;

атомно-силовые зонды;

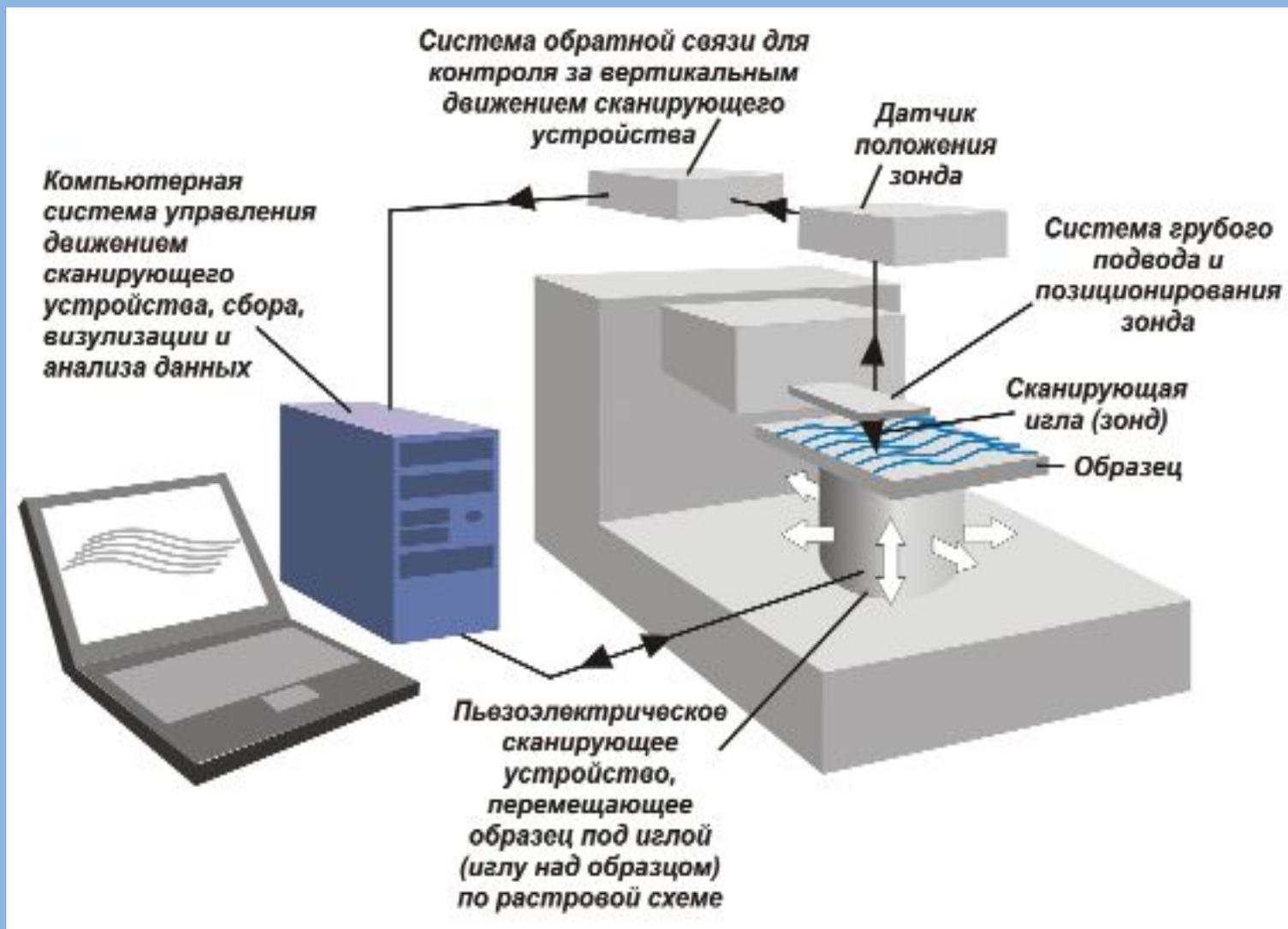
оптические зонды ближнего поля;

магнитные силовые зонды;

электростатические силовые зонды и др.



Регистрации отклонения лазерного луча от начального положения

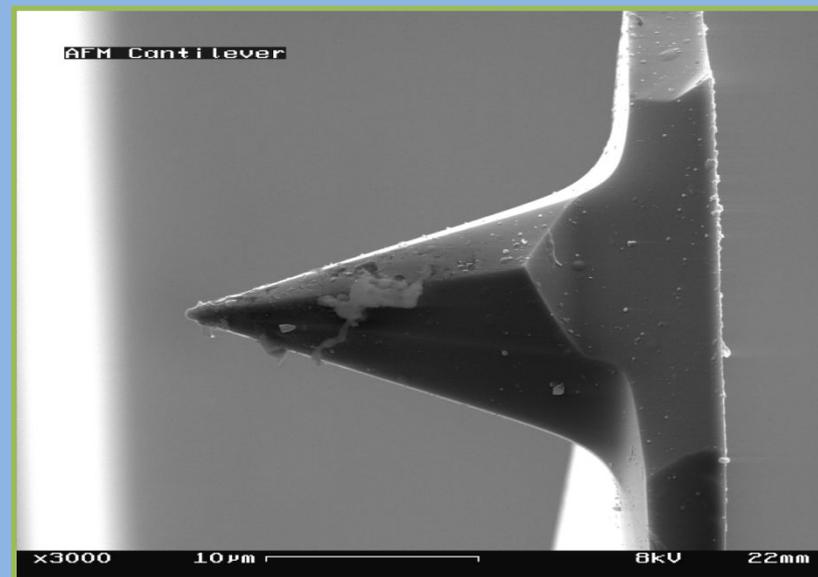
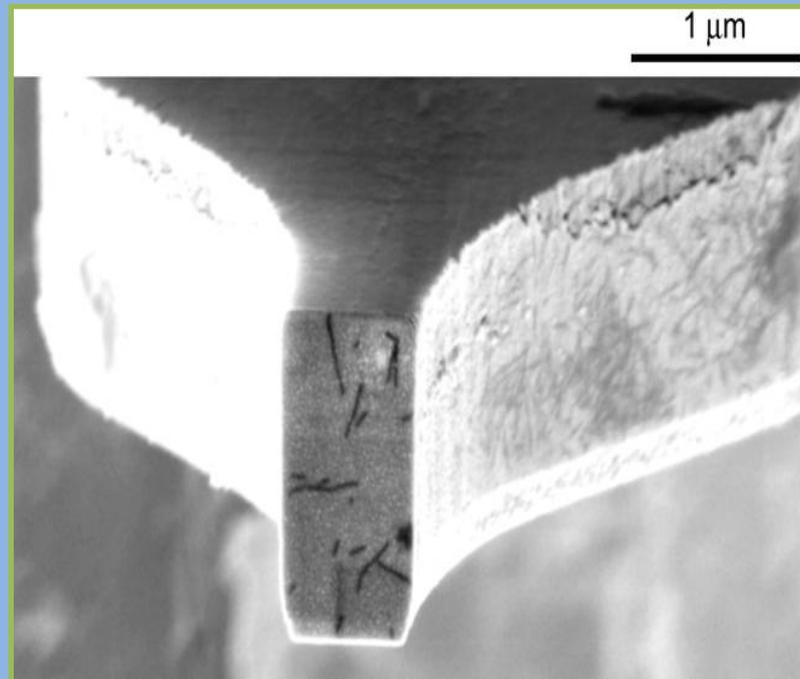
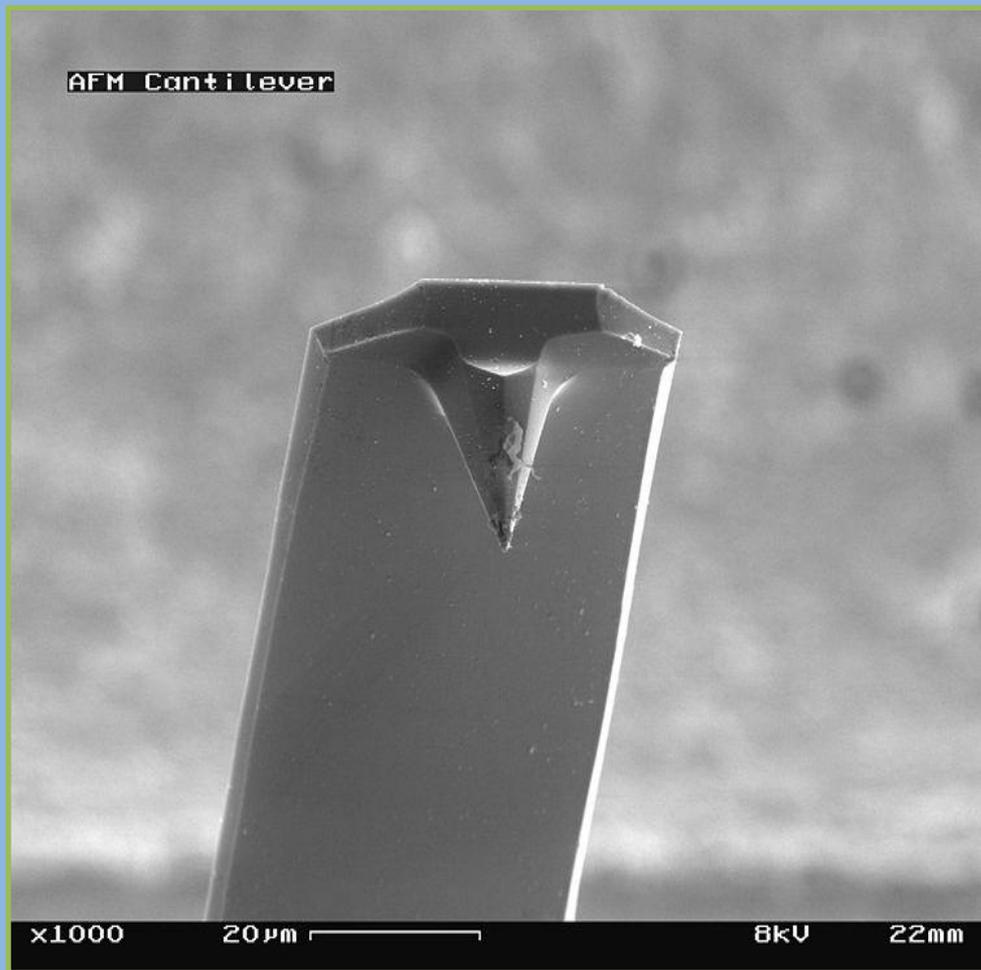


Общая схема работы СЗМ

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.



Кантилевер

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 “перекатывание” 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 сканирующие зондовые микроскопы (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 НанотехнологияМДТ, Концерн Наноиндустрия и др.

## Самосборка

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

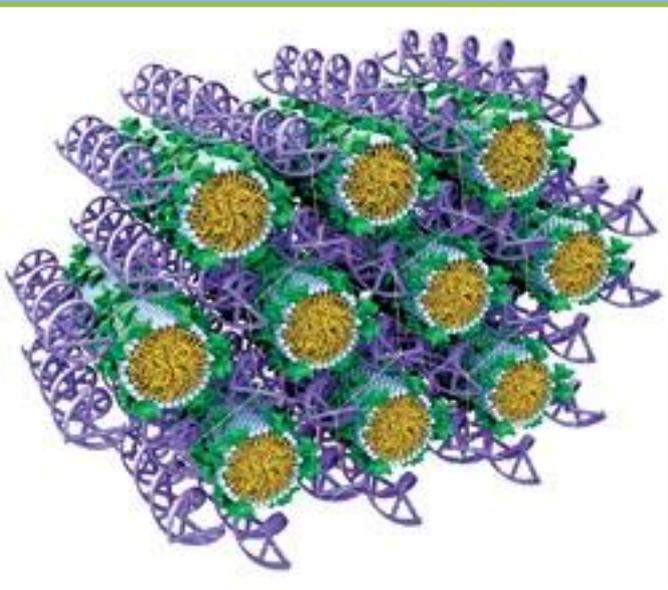
Одним из нанотехнологических способов создания таких заданных структур является самосборка.

Самосборка широко распространена в живой природе.

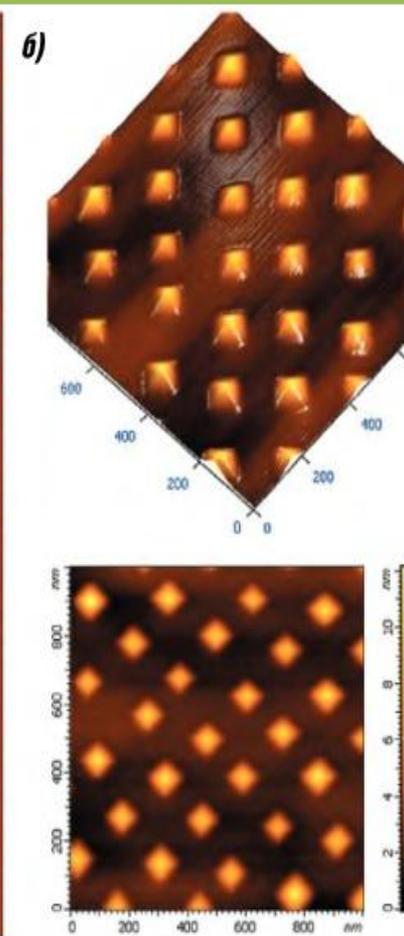
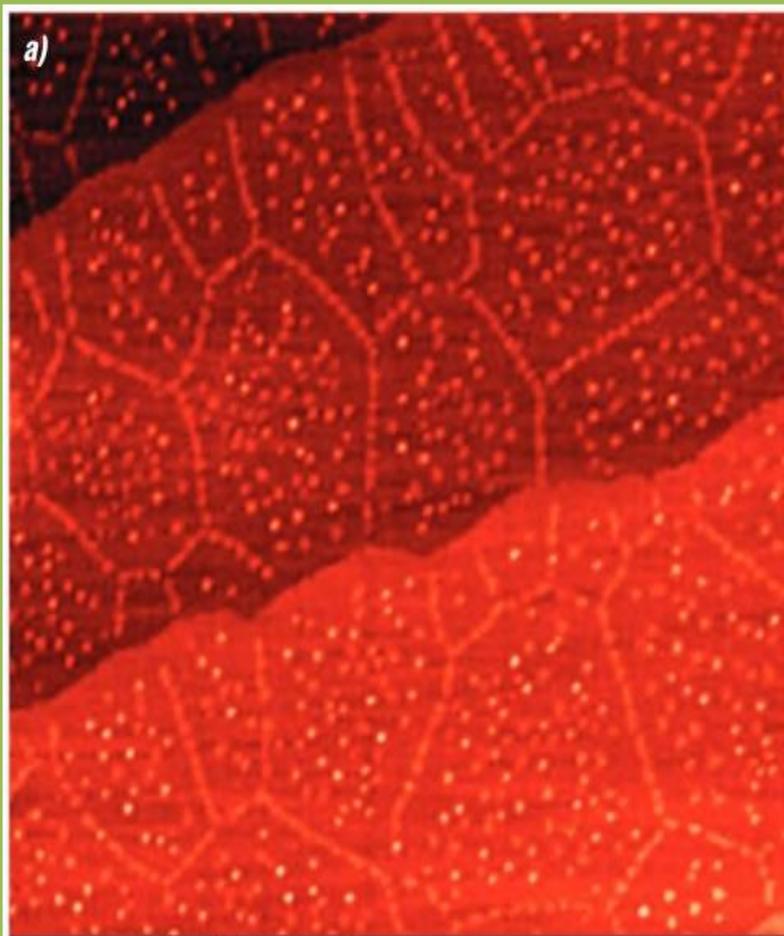
Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток, структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул и т.д.

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.



ДНК - отличный наноматериал,  
способный к самосборке



**Примеры формирования поверхностных наноструктур путём самоорганизации:**  
**а) Эти островки на кремниевой пластине имеют высоту 0,3–0,6 нм. Изображение и образец предоставлены Е.Е. Родякиной, С.С. Косолюбовым, Д.В. Щегловым, А.В. Латышевым. Институт физики полупроводников СО РАН, Россия;**  
**б) Массив упорядоченных пирамидальных островков на германиево-кремниевой подложке. Изображение получено М.В. Шалевым, Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия. Образец предоставлен А.В. Новиковым, И.Ю. Шулешовым, М.В. Шалеевым, Институт физики микроструктур РАН**

## 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 бегают по совершенно гладкому вертикальному стеклу, непадая 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 бегаёт 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 ни каких 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 ВандерВаальса 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 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 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

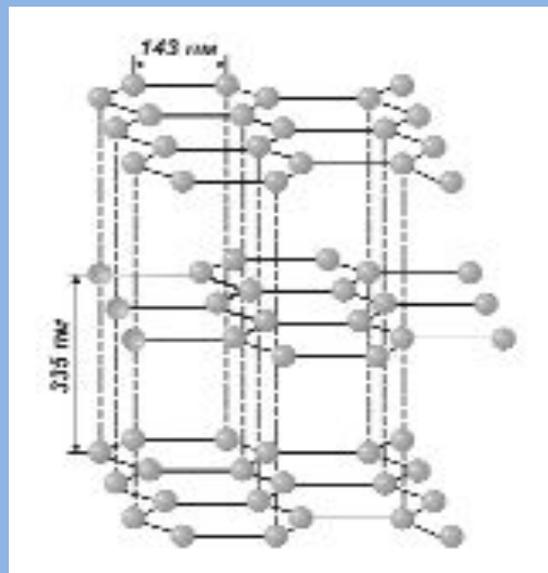
Еще Демокрит в своей атомистической концепции Вселенной обратил внимание на то, что мир состоит из множества “кирпичиков” химических элементов и их соединений, различающихся между собой особыми свойствами. Как неодинаковы свойства каждого из “кирпичей мироздания”, так неодинаковы и их истории. Одни элементы, 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 100200 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*.

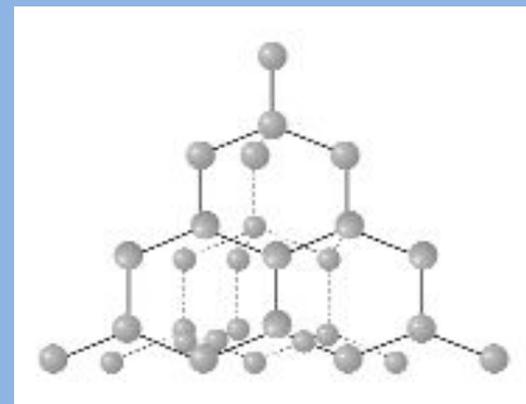
Каждый его слой состоит из атомов углерода, ковалентно связанных друг с другом в правильные шестиугольники.

Соседние слои удерживаются вместе слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами. По этому они легко скользят друг по другу. Примером этого может служить простой карандаш когда вы проводите графитовым стержнем по бумаге, слои постепенно “отслаиваются” друг от друга, оставляя на ней след.



Структура графита

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.

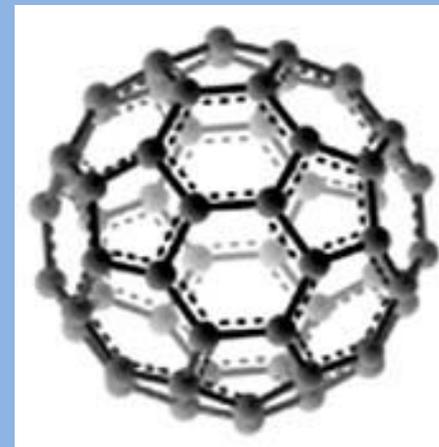


Структура алмаза

**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<sub>60</sub>.

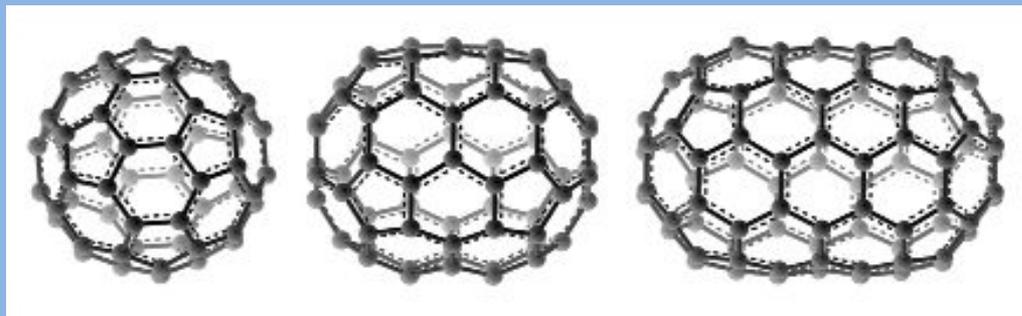
В молекуле C<sub>60</sub>, которая является наиболее известным, а также наиболее симметричным представителем семейства фуллеренов, число шестиугольников равно 20. При этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет три общие стороны с шестиугольниками и три с пятиугольниками.

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.



Структура  
фуллерена

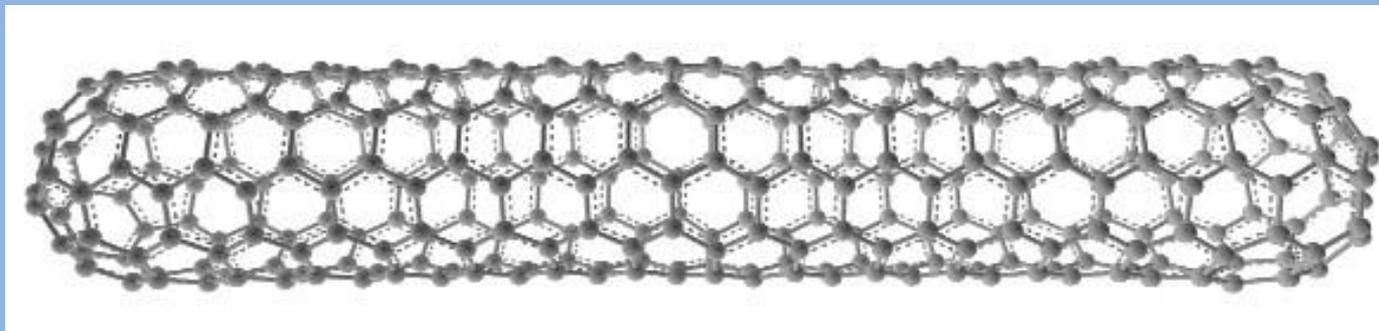
По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены их молекулы, содержащие различное число атомов углерода от 36 до 540.



Представители фуллеренов а) C<sub>60</sub>; б) C<sub>70</sub>; в) C<sub>90</sub>

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.



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 50100 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 поведению не ломкие соломинки, а жесткие резиновые трубки. Под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки ведут себя довольно экстравагантно: они не “рвутся”, не “ломаются”, а простонапросто 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. Нанокабель 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!

Получены 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!

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.

## 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 идеале – 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.

## Небывалые возможности. Медицина

Медицина изменится неузнаваемо. Впервых, наночастицы могут использоваться в медицине для точной доставки лекарств и управления скоростью химических реакций. Наночапсулы 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 возникновение. Последовательно проверяя и, если надо, “исправляя” молекулы, клетку за клеткой, орган за органом, наномашинки 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 научнотехническая 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

Применение нанотехнологий в микроэлектронике (т.е. теперь уже наноэлектронике) позволит перейти от планарной технологии изготовления процессоров (с количеством транзисторов  $10^8$  шт. на  $\text{см}^2$ ) к 3D технологии, то есть к  $10^{12}$  транзисторов на  $\text{см}^3$  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/ $\text{см}^2$ . Это позволит создать компьютеры и микропроцессорные системы гораздо большей производительности, чем существующие сейчас.



Планируется создание нанороботов размером всего 12 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 микроскопы, 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 классноурочная система канет в прошлое, изменятся учебные программы. Игровые и учебные наномашины 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".

## Экология

Нанотехнологии способны также стабилизировать экологическую обстановку. Новые виды промышленности не будут производить отходов, отравляющих планету, а нанороботы смогут уничтожить последствия старых загрязнений – нанотехника 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 чернобыльских), 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.