

Мария Рыбалкина

***ВВЕДЕНИЕ В
НАНОТЕХНОЛОГИИ***

Глава 1

Введение

«Нанотехнологии произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией».

Ральф Меркле.

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

Поскольку всё передовое и перспективное часто популяризируется в обществе, то приставку "нано" в рекламных целях стали использовать все, кому не лень, 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. Именно таковы, по порядку величины, размеры отдельных молекул (поэтому часто нанотехнологию называют также молекулярной технологией). Для сравнения, человеческий волос приблизительно в шестьдесят тысяч раз толще одной молекулы.

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

Необходимо осмыслить цели и задачи нашего курса.

Помимо чисто учебной задачи, которая заключается в том, чтобы овладеть новой информацией, авторы также ставят перед читателями еще некоторые общие мировоззренческие задачи, кажущиеся наиболее актуальными в рамках данного учебного курса.

Если мы внимательно проанализируем историю развития науки (как и историю человечества в целом), то увидим, что многие революционные изменения в обществе всегда были связаны с особыми проблемами и трудностями, а именно – с нежеланием общества принять новую информацию, особенно, если эта информация противоречит уже устоявшейся, привычной большинству, картине мира.

Так, западная цивилизация благополучно просуществовала несколько столетий в твердом убеждении, что Земля плоская. И, хоть это не соответствовало действительности, но и не мешало людям составлять карты и вполне успешно ориентироваться в них. Утверждение Галилея и других ученых о том, что Земля круглая, дорого им обошлось. (Джордано Бруно в 1600 году был сожжен по приказу "святой" католической инквизиции как еретик, хотя еще в Ветхом Завете есть 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.¹). Обществу потребовалось еще около 200 лет для того, чтобы признать этот факт.

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

Аналогично более 2000 лет присутствовала уверенность в том, что атом является мельчайшей единицей всего сущего. И, когда в XX веке наука открыла субатомные (элементарные) частицы, это полностью изменило все базовые представления о Вселенной. Кстати, некоторые субатомные частицы (например, позитрон) были как бы "придуманы" физиками, то есть сначала вычислены умозрительно, а потом доказаны экспериментально, что еще раз говорит в пользу человеческой способности постигать разумом то, что невидимо.

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, утверждавший что какой-либо объект не может быть одновременно и "А" и "не А" и лежавший в основе всех научных исследований того времени, не мог объяснить тот феномен, что, например, световой фотон является одновременно и частицей, проявляя свойства частиц, и волной, проявляя волновые свойства. Квантовая наука вступила в спор с Аристотелем и смогла выиграть его, благодаря развитию теории корпускулярно-волнового дуализма.

Казалось, что механика великого Ньютона способна безупречно объяснить все видимые и невидимые законы Вселенной. И ничто в истории науки не предвещало создание теории относительности. Тем не менее, создание теории относительности привело к такому научному прорыву, о котором даже не мечтали - например, к овладению атомной энергией и коренному изменению представлений о мире.

Своей выдающейся работой Эйнштейн не отверг полностью ньютоновскую механику, но отвел ей более скромное место науки - частного случая, справедливого только для движений, медленных по сравнению со скоростью света. Как нельзя лучше описывает ситуацию, сложившуюся после открытия Эйнштейна в научных кругах, шутливое стихотворение:

*Был мир земной кромешной тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон!
Но сатана не долго ждал реванша:
Пришел Эйнштейн и стало все, как раньше ².*

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? Надеемся, что наш курс поможет дать вам утвердительный ответ на этот вопрос.

На нескольких примерах мы увидели, что человеческая мысль всегда искала новое знание, пытаясь понять и объяснить необъяснимые загадки природы. "Нащупав" в интеллектуальной темноте это знание, немногим удавалось донести его до окружающих, убедить общество в истинности этого знания.

² Авторство не установлено

Так что же заставляет разум одних людей искать и доказывать новое, а других – сопротивляться ему, охранять старое?

Эрик Дрекслер, перу которого принадлежит фундаментальный труд "Машины созидания", считается пионером в области нанотехнологий. В своей работе он в очень убедительной и яркой форме доказывает реальность существования наномашин, называемых им ассемблерами, и обрисовывает основные проблемы и перспективы развития будущих нанотехнологий.

В частности, он рассматривает проблему так называемых "мимов" (англ. "meme") – воспроизводящихся мысленных структур, или идей, подверженных, подобно живым существам, законам эволюции, а именно: борьбе за существование и стремлению к размножению.

Он говорит: "примеры мимов - мелодии, идеи, общеупотребительные выражения, мода в одежде, способы производства горшков и постройки арок. Так же, как гены размножаются в среде генов, перескакивая от тела к телу (от поколения к поколению) через сперматозоиды и яйцеклетки, так же и 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 селекции (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. Так как мимы формируют поведение, их успех или неудача - это жизненно важный вопрос.

Начиная с древних времён, мысленные модели и способы поведения передавались от родителя ребенку. Мимические структуры, которые помогают выживанию и воспроизводству, имели тенденцию распространяться. ("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 с разнообразными результатами. Год за годом кто-то умирал, в то время как остальные находили новые способы выживания и передавали их дальше. Гены построили мозги 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". Умственная иммунная система действует по тем же принципам, что и иммунная система нашего организма. Например, паразиты заставили организмы развивать иммунные системы, такие как ферменты, которые используют бактерии для отражения вторгающихся вирусов, или блуждающие белые клетки крови для уничтожения бактерий. Мимы-паразиты

заставляют разум вступить на подобный путь разработки систем мимов, которые служат умственными иммунными системами.

Старейшая и самая простая умственная иммунная система просто даёт команду: "верь старому и отбрасывай новое". Что-то вроде этой системы 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, и что это принесёт каким-то образом чудесное изобилие пищи и армии предков выгонят чужеземцев. (Этот пакет мимов заразил племя Ксоза из Южной Африки в 1856 году; к следующему году 68 000 человек умерли, большей частью от голода.)

Иммунная система вашего тела следует подобному правилу: она обычно принимает все типы клеток, присутствовавшие в начале жизни, и отторгает как инородные и опасные такие, как потенциальные раковые клетки и вторгающиеся бактерии. Эта простая система "отбрасывай новое" когда-то работала хорошо, однако в век трансплантации органов она может убить, так как операция трансплантации требует решения сложной проблемы совместимости тканей донора и реципиента.

Аналогично, в век, когда наука и технология - постоянно присутствующие и действующие факторы, негибкая умственная иммунная система становится опасной помехой.

При всех своих недостатках, тем не менее, принцип "отклоняй всё новое" прост и предлагает реальные преимущества. Традиция содержит многое, что испытано и истинно (или, если не истинно, то, по крайней мере, осуществимо). Изменение рискованно: как большинство мутаций носят отрицательный характер, так же и большинство новых идей неправильно.

Однако мимы, которые запечатывают разум против новых идей, защищают себя способом, вызывающим подозрения в обслуживании собственных интересов. Защищая ценные традиции от неуклюжего редактирования, они также могут ограждать паразитирующую бессмыслицу от испытания истиной. Во времена быстрых изменений они могут делать умы опасно косными.

Многое из 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.

Мы начали главу с указания на необходимость определить цели данного учебного курса, так почему же мы говорим обо всех этих вещах? Да потому, что пожалуй главной целью данного курса является подготовить наше сознание к неожиданностям любого рода, научиться спокойно принимать неожиданное и эффективно действовать в критических ситуациях. Мы также стремимся подвести читателей к пониманию и осознанию того, что тот, кто ориентирован на будущее, кому жить в этом будущем и творить его, должен уже сегодня в полной мере осознать высокую степень ответственности за принимаемые в будущем решения, а также иметь представление о той цене, которую нам придется заплатить за допущенные ошибки.

Мы призываем всех молодых людей обратить самое пристальное внимание на свое развитие и образование, потому что твердые знания и профессионализм сегодня, в начале XXI века, обретают такую актуальность, какую они вряд ли имели когда-либо в прошлом. Помните, что только ваш интеллект, вкупе с эрудицией и мобильностью, позволят вам отличить выгодные на самом деле идеи от смертельно опасных и помогут принимать правильные решения в жизни.

* * *

Работая при слабом свете свечи, трясясь на ухабах в деревянных повозках при переезде из города в город, мог ли человек прошлого мечтать о неких "таинственных силах", способных наполнить светом не только комнату, но и улицы ночного города, или передвигать железные "повозки" с такой скоростью, что за ночь преодолевались бы расстояния, на которые раньше уходили дни и недели? Мог ли мечтать человек? Кто-то, по-видимому, мог и, следуя своей мечте, мог совершать и соответствующие ей 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 в начале 70-х гг. прошлого столетия воспринимались многими почитателями его таланта всего лишь как красивая сказка, мечта из разряда научной фантастики. А между тем, и роботы и искусственный интеллект являются на сегодняшний момент одними из самых быстроразвивающихся областей научного знания.

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?

И все-таки, во все времена жили те великие люди, которые первыми находили то, чего не видели другие или первыми воплощали в жизнь то, что для всех казалось нереальным или невозможным. Что же заставляло этих первопроходцев постоянно искать чего-то нового и добиваться реализации своих "недостижимых идей"? Какие качества отличали их от всех остальных? Каждый должен сам подумать и ответить на поставленные вопросы. Авторам же видится, что это были следующие основные качества:

- самостоятельность мышления; нежелание принимать за истину то, что вызывает сомнение, даже вопреки авторитетному мнению большинства;
- вечное стремление к совершенствованию, ко все большему познанию мира;
- уверенность в своих силах и в правильности выбранного пути;

По нашему скромному мнению, это те три волевых качества, которые отличали и всегда будут отличать неординарный тип мышления от мышления обывательского.

Поэтому еще одной целью для тех, кто возьмется за изучение данного учебного курса является стремление выработать и закрепить в себе эти качества,

являющиеся необходимым основанием любого жизненного успеха. 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"...*

* * *

В начале 1950-ых первые компьютеры занимали собой целую комнату. Сегодня любой карманный компьютер в десятки тысяч раз превосходит по быстродействию и возможностям те первые компьютеры.

Легендарный Билл Гейтс, основатель компании MicroSoft и придумавший операционную систему DOS, в 1981 году авторитетно заявил: "640 килобайт должно хватить всем!". Мог ли он представить себе в тот момент, как далеко, благодаря его изобретениям, смогут продвинуться программные и технические возможности персональных компьютеров!

В 1959 году появился первый планарный (плоский) транзистор, или интегральная микросхема. В 1965-м уже выпускались микросхемы, состоящие из 50-60 элементов. На основании этого в 1965 году Гордон Мур, сооснователь фирмы Intell, заявил, что число элементов на интегральных микросхемах будет ежегодно увеличиваться вдвое. Согласно его прогнозу, эта тенденция должна была сохраниться в течение последующих 10 лет, и в 1975 году все с удивлением увидели, что прогноз сбился. Прогноз Мура остается актуальным и сегодня, и за последние 20 лет он получил широкую известность и приобрел статус "закона". Термин "закон Мура" стали употреблять для обозначения непрерывного роста функциональности интегральных схем с одновременным снижением их размеров и стоимости.

Обращаем ваше внимание, что в буквальном смысле предсказание Мура законом не является, поскольку оно не отражает природных закономерностей и не является следствием фундаментальных законов физики. К фундаментальным законам природы могут относиться, например, закон гравитации, сформулированный Ньютоном, или законы электромагнитного поля, описываемые уравнениями Максвелла. Они объективны по своей природе, то есть существуют независимо от наших знаний о них. Поэтому, говоря о законе Мура, следует еще раз подчеркнуть, что речь идет лишь об эмпирическом правиле или научном прогнозе.

Современная микроэлектроника сегодня изготавливает устройства меньшие, чем когда-либо, раскидывая группы атомов по поверхности кристалла так, чтобы образовывались связи и компоненты в одну десятую толщины тончайшего волоса. Для простого обывателя такие размеры могут показаться "нереальными" и "запредельными", но, освоив наш курс, Вы удостоверитесь, что и это еще не предел.

Принципы квантовой механики позволят с уверенностью говорить о возможности все большего увеличения быстродействия, надежности и качества технических изделий за счет непрерывного уменьшения их размеров.

Гонка технологий, подчиненная олимпийскому принципу "Быстрее! Выше! Сильнее!" диктует сегодня темпы развития информационных технологий, поэтому

для того, чтобы быть успешной современной личностью, сегодня нужно не просто шагать в ногу со временем, а нестись за ним в спринтерском броске.

Поэтому третьей задачей, которую мы перед собой поставим, для того, чтобы подготовиться к общественной нанореволюции, будет звучать так: "научиться быстрее учиться".

Возможно, кто-то из читателей увидит в формулировке этой задачи не что иное, как призыв тратить меньше времени на развлечения и просмотр бесконечных телевизионных программ, и больше – на собственное развитие? Если вы подумали так, то вы совершенно правы - это именно то, что мы имеем в виду.

Нисколько не умаляя ценность отдыха в жизни каждого человека, и понимая, что как бы ни приятно это было – проваляться весь вечер на диване, переключая каналы с одного ток-шоу на другое – мы все же должны признать, что цена успеха сегодня заключается в правильной расстановке приоритетов и правильном отношении ко времени, которого просто не хватит и на личное развитие и на всяческие "Окна". Чем-то придется жертвовать, иначе может получиться как в известной притче:

*"Немного поспишь, немного подремлешь, немного, сложив руки, полежишь. И придет, как прохожий, бедность твоя, и нужда твоя – как человек вооруженный"*³

Кстати, одному из авторов этой книги однажды довелось проводить исследование на тему современного американского сленга. Принимая во внимание жизненный уровень среднего американца и уровень государственного финансирования тех же нанотехнологий (правительство США приняло решение увеличить финансирование научных исследований в этой области до \$3,7 млрд. в течении четырех лет!), стоит ли удивляться тому что в их молодежной среде столь любимый нами "телек" величают не иначе, как "idiot box". Комментарии здесь, как говорится, излишни...

Основные понятия и элементы нанотехнологии

Несмотря на то, что идея о единстве природы не нова, любая наука, как правило, всегда обладает некоторой системой специальных понятий и терминов, определенных конкретно для неё.

Один и тот же объект, скажем, учащийся старших классов, будет вызывать совершенно разный профессиональный интерес у представителей различных профессий, таких как, например, врач, психолог или школьный учитель.

Для врача, вероятнее всего, старшеклассник будет "определяться" такими характеристиками, как вес, рост, группа крови, артериальное давление, наличие или отсутствие хронических заболеваний и т.д.

Психолог же примется выяснять тип его темперамента, тип мышления, коммуникативный уровень, самооценку или степень социализации.

А вот учителей математики или литературы вряд ли заинтересуют ваш темперамент или группа крови, если вы не выучили стихотворение или плохо написали контрольную. Скорее всего, они будут изучать и оценивать вас с точки

³ Книга притчей Соломоновых, гл. 24: 33-34

зрения владения материалом, глубины знаний и умений и вашего поведения на уроке.

И, хотя старшеклассник остается самим собой и в кабинете врача, и на приеме у психолога, и на уроке математики, мы видим, что его можно изучать под совершенно разными углами зрения. То же самое происходит и с любым другим объектом изучения. Так и природные явления, например, будут выглядеть по-разному, для эколога, биолога или физика.

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.

Научной задачей технологии является выявление физических, химических, механических и других свойств и закономерностей материала, с целью наиболее эффективного их применения на практике.

Так, выделяют "технологии машиностроения", "технологии химической очистки воды", "технологии пищевых производств", "информационные технологии" и т.д. Уже из приведенных выше примеров видно, что технологии в основе своей различаются природой первоначального материала. Именно значительная разница между таким "сырьем", как металлические конструкции, с одной стороны, и информации, с другой, определяет и существенные различия целей и методов их обработки и преобразования.

Перечисляя типы различных технологий, нельзя не вспомнить такое выражение, как "высокие технологии". Давайте подумаем, в чем же их суть? Мы привыкли к тому, что высокими в нашем обществе, называют технологии, появившиеся сравнительно недавно, весьма эффективные в применении, 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 мастерством, трудновоспроизводимым сегодня. 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 15-20 тому назад сотовые телефоны, например, считались устройствами типа "high-tech". 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^{-9}) долю какой-то единицы (в нашем случае - метра). Размер одного атома или мельчайшей молекулы порядка 1 нанометра.

Соответственно, **нанотехнологии** определяются как *совокупность методов и приемов манипулирования веществом на атомном и молекулярном уровнях с целью производства конечных продуктов с наперед заданной атомной структурой*.

Современные микросхемы, с размерами компонентов в одну десятую толщины тончайшего волоса могут считаться маленькими в стандартах тесальщиков кремния, но каждый транзистор все еще содержит триллионы атомов, и так называемые "микрокомпьютеры" (отдельные чипы) все еще видимы невооруженным глазом.

Древние приемы технологии, которые можно проследить от ручной обработки камня до кремниевых чипов, таковы, что обращаются с сырьем, представляющим из себя большие совокупности атомов и молекул. Этот стиль можно назвать балк-технологией (англ. "bulk" – "груда", "кипа").

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

Не лишним будет напомнить читателям, что **атом** – (от греч. "atomos" – "неделимый") – это мельчайшая частица химического элемента, носитель его свойств, способный образовывать с атомами того же элемента или других элементов более сложные химические комплексы – **молекулы**⁴. Количество атомов в молекулах может колебаться от нескольких единиц до десятков тысяч.

Обращаем ваше внимание на то, что "дословный перевод" слова "атом" неверен, и на самом деле атом состоит из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Однако, поскольку этот термин был введен в обращение еще в V веке до н.э. древнегреческим философом Демокритом, то и после открытия субатомных частиц, он был оставлен без изменения.

В связи с данным определением нанотехнологий, возникает естественный вопрос: *каким образом мы сможем манипулировать веществом на уровне атомов и молекул?* Ведь наши руки слишком громадны для пространства нановеличин.

Этот насущный вопрос является камнем преткновения всей современной нанотехнологической науки. Сегодня основным инструментом манипулирования атомами является зондовый микроскоп. Принцип его работы мы рассмотрим чуть позже в разделе, посвященном наноборудованию, а также в следующих лекциях.

Самый интересный и перспективный ответ на этот вопрос, самое изящное решение, способное совершить новую технологическую революцию, было предложено Эриком Дрекслером, в его монографии "Машины созидания". Для

⁴ Словарь иностранных слов. – 7-е издание, 1979г.

решения проблемы манипулирования атомами он ввел понятие специальных устройств – *наномашин* или *ассемблеров*.

Чтобы представить себе эти машины, нужно сначала дать наглядное представление о молекулах. Мы можем изобразить атомы как бусинки, а молекулы как группы бусинок, соединённые между собой кусочками нитки. На самом деле, химики иногда представляют молекулы наглядно, строя модели из пластмассовых бусинок (некоторые из которых связаны в нескольких направлениях чем-то, подобным спицам). Атомы имеют круглую форму подобно бусинам, и хотя молекулярные связи - не кусочки нитки, наша визуальная модель, как минимум, даёт важное представление о том, что связи могут быть порваны и восстановлены⁵.

Наномашинны должны уметь захватывать отдельные атомы или молекулы и соединять их между собой, причем не хаотично, а в соответствии с заданным наперед алгоритмом. Важно отметить, что такие машины уже тысячи лет превосходно функционируют в природе, и примером их работы может служить механизм биосинтеза белка рибосомами. Из курса общей биологии вы должны помнить каким образом молекула рибосомы конструирует белок, "считывая" из молекул РНК "инструкции" для построения белка определенного вида.

За более подробным описанием этого механизма мы отсылаем интересующихся к соответствующей специализированной литературе, нам же важно лишь вкратце напомнить читателям основные моменты этого процесса.

Белки – это обязательная составная часть всех клеток, обеспечивающая их жизнедеятельность. Роль белков в организме чрезвычайно разнообразна.

Так, различают *белки-гормоны*, участвующие в управлении всеми жизненными процессами организма, его ростом и размножением. На сетчатке нашего глаза возникает изображение видимых предметов благодаря особому светочувствительному белку – родопсину. Мы способны двигаться, потому что наши мышцы сокращаются и расслабляются благодаря сократительным белкам миозину и актину. Все химические процессы в организме протекают при участии специальной группы *белков-ферментов*. Без них невозможны пищеварение, усвоение кислорода, обмен веществ, свертывание крови и пр. Белки выполняют и защитные функции – при попадании в организм болезнетворных бактерий или инородных тел в организме вырабатываются *белки-иммуноглобулины*, призванные нейтрализовать вредное воздействие болезнетворных или токсичных веществ.

При знакомстве с таким разнообразием белков и их функций, весьма неожиданным оказывается тот факт, что все белки растительного и животного мира – от химически инертных до биологически активных - состоят из одних и тех же *аминокислот*, являющихся звеньями в цепи белковых молекул и соединенных между собой прочной химической связью, называемой *пептидной*. Внешне молекула белка (называемая *полипептидом*), подобна последовательности бусинок на нити, где роль бусинок выполняют молекулы аминокислот. В составе большинства белков находится в среднем до 300-500 таких "бусинок".

Количество существующих в природе аминокислот ограничено – всего 20 видов, поэтому их можно уподобить 20 "буквам" особого "химического алфавита", из которых составлены белки - "слова" длиной в 300-500 букв.

⁵ Э. Дрекслер "Машины созидания"

С помощью 20 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 20^{500} .

Полипептидная цепь каждого белка построена из свойственной *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 крайне важно 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 **геном**, поэтому информацию, хранящуюся в ДНК, называют *генетической*, а ген является единицей наследственного материала. В ДНК содержится до нескольких сот генов.

Молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) представляет собой две спирально закрученные одна вокруг другой нити. Ширина такой двойной спирали около 2 нм. Длина же – в десятки тысяч раз больше – она достигает несколько сотен тысяч нанометров. За открытие двойной спирали ДНК, несущей наследственную информацию, в 1962 году ученые Уотсон и Крик получили Нобелевскую премию.

Нити ДНК представляют собой цепи из последовательно расположенных **нуклеотидов**.

Нуклеотиды – это органические вещества, состоящие из трех соединенных друг с другом молекул: азотистого основания, пятиуглеродного сахара (пентозы) и остатка фосфорной кислоты. Названия нуклеотидам дают по имени одного из 4-х типов азотистых оснований, входящего в их состав – *аденин, гуанин, цитозин и тимин* (А, Г, Ц, Т).

Порядок расположение четырех типов нуклеотидов в цепях ДНК очень важен - он определяет порядок расположения аминокислот в белковых молекулах, то есть их структуру.

Чтобы понять, каким образом в ДНК запрограммирована первичная 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 код или шифр существует и в ДНК! Как в азбуке Морзе каждой букве соответствует определенное сочетание точек и тире, так в коде ДНК определенное сочетание последовательно расположенных нуклеотидов соответствует определенным аминокислотам в молекуле белка. Знать код ДНК – значит знать, какое сочетание нуклеотидов соответствует каждой аминокислоте.

Для того, чтобы закодировать все возможные цифры, буквы и знаки препинания нам хватает всего двух символов (точка и тире). Поскольку существует

всего 4 вида нуклеотидов (т.е. вдвое больше, чем шифрующих элементов в азбуке Морзе), и 20 видов аминокислот (что гораздо меньше, чем букв в алфавите, не говоря о цифрах и знаках препинания), то очевидно, что для того, чтобы закодировать одну аминокислоту, уникального сочетания из трех нуклеотидов будет вполне достаточно. (Из 4 нуклеотидов можно создать 64 комбинации, по три нуклеотида в каждой: $4^3=64$).

Такое сочетание называется *триплетом* или *кодоном*. 64 комбинаций с избытком хватает для кодирования 20 аминокислот,

Код ДНК обладает *однозначностью* (т.е. 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 установлен состав кодирующих ее триплетов.

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. Такая ошибка в информационной матрице ДНК будет повторяться всякий раз при синтезе конкретного белка, подобно тому, как ошибка на типографской матрице – шаблоне, с которого 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.

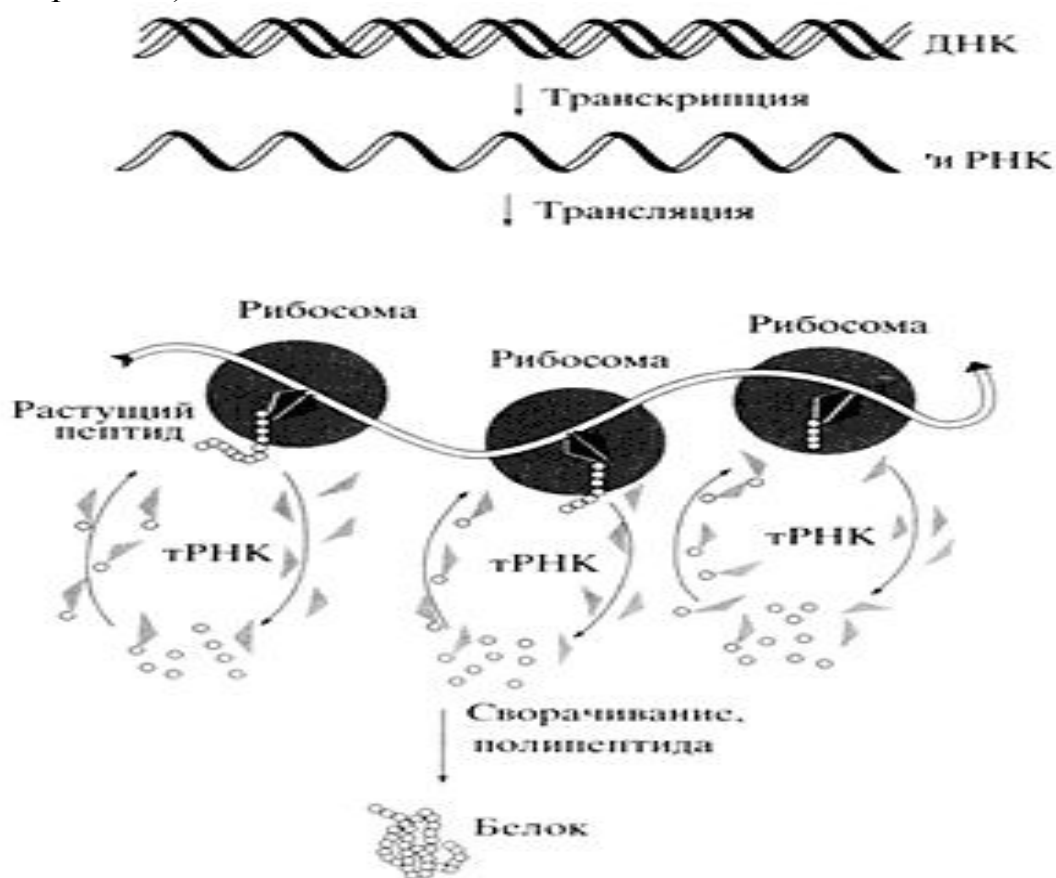
При синтезе белка, информация о его структуре сначала доставляется из ДНК к молекуле *рибосомы* – своеобразной фабрике по производству белков. Этот перенос информации осуществляется с помощью молекулы так называемой *информационной РНК* (рибонуклеиновая кислота), которая является точной копией – зеркальным 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 – полимераза, двигаясь вдоль ДНК последовательно считывает из нее 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.

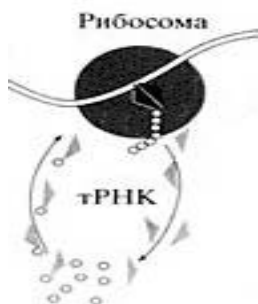
Таким образом, можно сказать, что в процессе синтеза белка и-РНК выполняет роль перфокарты, на которую записана "программа" для построения конкретного белка. (Перфокарта – это кусок или лента из твердой бумаги с дырочками для светового луча, пробитыми в определенных местах. В XIX веке перфокарты применялись 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).

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

Процесс синтеза 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). Когда рибосома достигает конца и-РНК, синтез окончен.



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 к себе для транспортировки к месту построения белка. Это происходит благодаря содержащемуся в ней триплету, комплементарного (подходящего) конкретной аминокислоте.

В том случае, если кодовый триплет т-РНК окажется комплементарным к триплету и-РНК (находящемуся в данный момент в рибосоме), то аминокислота, доставленная т-РНК, отделится от т-РНК и присоединится к строящейся цепочке белковой молекулы (к белковой цепочке добавится еще одна "бусинка").

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 полипептидная цепь.

Пройдя по всей длине и-РНК рибосома с образовавшимся 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 (так как 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 природной реализацией работы наномашин по производству определенных, наперед заданных молекулярных структур.

Генные инженеры сегодня пытаются построить первые экспериментальные искусственные наномашин, используя биологический природный материал: аминокислоты, ферменты, природные 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 (сворачивание белка), подвержены радиации, не могут обрабатывать твердый материал, действовать в химически агрессивных средах и т.п.

Поэтому было бы неразумно отказаться от грандиозных наработок человечества в сфере балк-технологии. Это все то, до чего "не додумалась" природа, начиная с колеса и кончая компьютером.

В то же время без биоподобных структур очень трудно манипулировать отдельными атомами и молекулами. Поэтому наномашинки должны представлять собой синтез живых и технических систем.

Таким образом, основным типом машин, по проекту Дрекслера, станет так называемый *ассемблер*, т.е. сборщик.

Дрекслер дает *ассемблеру* следующее определение: 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 - составление атомов и молекул в наперед заданном порядке.

Из любых нужных атомов и молекул 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, что ассемблер будет чем-то похож на паука, при этом одними "лапами" он будет держаться за субстрат (т.е. за основу), а другими складывать сложные молекулярные структуры атом за атомом. На рисунках представлены две популярные схемы наноассемблера.

Управлять сборщиками должны будут наноконьютеры, программируемые на каком-нибудь обычном языке управления промышленными роботами, и имеющие связь с обычным компьютером, управляемым человеком. Представим, что человек - оператор моделирует на компьютере некоторую конструкцию, причем особым образом задает её молекулярную структуру. "Нарисовав" нужный объект, человек передает команду ассемблерам, которые, в свою очередь, начинают атом за атомом создавать структуру объекта. И через некоторое время у конструктора появляется готовая вещь, и притом 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 того, чтобы создать копию 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 создать копию объекта сколь 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. Когда речь идет об эволюции, то репликатор – это объект, который способен сам себя скопировать, включая любые изменения, которым он мог подвергнуться (такой как ген, мим, или компьютерный вирус).

Реплицируется (размножается путём создания своей копии) ассемблер или по команде от 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 - начиная от "проживающих" в организме наноконピューтеров, убивающих раковые клетки и ремонтирующих поврежденные ткани и органы и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду.

Сегодня Foresight Institute – базис всей мировой нанотехнологии - обещает 250.000\$ тому, кто построит нано-манипулятор - "руку", которая сможет оперировать на молекулярном уровне и тому, кто создаст 8-ми битный сумматор, умещающийся в кубике со стороной в 50 нанометров (так что у вас еще есть все шансы неплохо подзаработать!).

Поэтому, 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.

Кратко об истории становления нанотехнологий ⁶

Отцом нанотехнологии можно считать греческого философа Демокрита. Примерно в 400 г. до н.э. он впервые использовал слово "атом" для описания самой малой частицы вещества.

⁶ Временная шкала, основана на материале статьи "О дивный новый мир", Computerra 1999г..

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

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

1959 год. Американский физик Ричард Фейнман впервые опубликовал работу, в которой оценивались перспективы миниатюризации. Основные положения нового направления нанотехнологий были намечены в его легендарной лекции "Там внизу - море места" ("There's Plenty of Room at the Bottom"), произнесенной им в Калифорнийском технологическом Институте

Тогда его слова казались фантастикой только лишь по одной причине: еще не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами на атомарном же уровне (подразумевается возможность опознать отдельный 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 год. Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разработали теоретические основы нанотехнологии при обработке поверхностей.

1974 год. Японский физик Норио Танигучи ввел в научный оборот слово "нанотехника", предложив описывать механизмы размером менее одного микрона. Греческое слово "nanos" означает "карлик".

1981 год. Германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали сканирующий туннельный микроскоп - прибор, позволяющий осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне. Четырьмя годами позже его создатели получили Нобелевскую премию

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

1986 год. Создание атомно-силового микроскопа, позволяющего, в отличие от туннельного микроскопа, осуществлять взаимодействие с любыми материалами, а не только с проводящими.

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

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

1998 год. Голландский физик Сеез Деккер создал транзистор на основе нанотехнологий.

1999 год. Американские физики Джеймс Тур и Марк Рид, определили, что отдельная молекула способна вести себя так же, как молекулярные цепочки.

2000 год. Администрация США поддержала создание проекта "Национальная Инициатива" в Области Нанотехнологии (National Nanotechnology Initiative). Нанотехнологические исследования получили государственное финансирование. Тогда из федерального бюджета было выделено \$500 млн. В 2002 сумма ассигнований была увеличена до \$604 млн. На 2003 год "Инициатива" запросила \$710 млн. В 2004 году правительство США приняло решение увеличить финансирование научных исследований в этой области до \$3,7 млрд. в течении четырех лет. В целом, мировые инвестиции по нано в 2004 году составят около \$12 млрд.

2004 год. Администрация США поддержала создание проекта "Национальная Наномедицинская Инициатива" как часть National Nanotechnology Initiative

Стремительное развитие нанотехнологий определяется, прежде всего, потребностями общества в быстрой переработке огромных информационных массивов.

Современные кремниевые чипы могут при всевозможных технических ухищрениях уменьшаться ещё примерно до 2012 года. Но при ширине дорожки в 40-50 нанометров наступит квантовомеханическая помеха: электроны начнут пробивать разделительные слои в транзисторах за счет туннельного эффекта, о котором 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 наноуровнях, не может обходиться без средств и методов 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 помощью линейки толщину волоса, то единственное, что можно будет сказать - это то, что волос очень тонкий, а это 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 удается наблюдать предметы с размерами порядка нанометра. Электронный оптический 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!

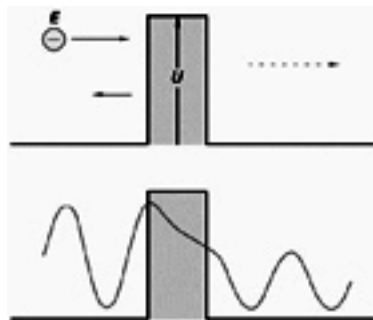
Поэтому когда все возможности данного устройства были исчерпаны, ученые принялись искать новые пути решения поставленной задачи. И вот в начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая исследуемую площадь его поверхности, а как бы дотрагиваясь до неё. Ее реализации помог, открытый к тому времени, *туннельный эффект*, на основании 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 квантово-механическим эффектом, не имеющим аналога в классической механике 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 преодоление высоты стоящего перед ним барьера, то он, ударившись о бетонную 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 как волна он проходит через эту преграду, подобно тому, как рентгеновские волны свободно проходят сквозь материальные объекты.

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 друг от друга $L=0,5$ нм и приложить к ним сравнительно малую разность потенциалов U ($0,1 \dots 1В$), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется **туннельным током** I_t .

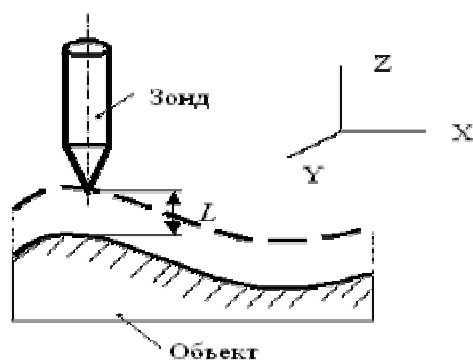
Если повторить тот же опыт, но к поверхности интересующего тела поднести острый предмет, например, очень тонкую иглу с кончиком в атом толщиной, то проводя иглой над изучаемым объектом (как бы сканируя его поверхность) можно получать информацию о строении материи объекта на атомном уровне.

В 1981 году на основе этого явления был построен первый сканирующий туннельный микроскоп, позволивший разглядеть атомы на поверхности золота, а затем и монокристаллического кремния. Это привело к началу бурного развития нанотехнологий.

Рабочим органом СТМ - зондом - служит токопроводящая металлическая игла (в первых вариантах это был вольфрам или сплав платины). Суть его работы заключалась в том, что зонд подводится к изучаемой поверхности на очень близкое расстояние L ($\approx 0,5$ нм) и, при подаче на зонд постоянного напряжения, между ними возникает туннельный ток.

Туннельный ток экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом. Поэтому при увеличении расстояния только на $0,1$ нм туннельный ток I_t уменьшаются почти в 10 раз. Это обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте рельефа поверхности вызывают существенное изменение туннельного тока.

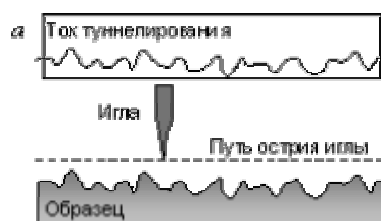
Поддерживая ток и расстояние постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над ней по осям X и Y , то опускаясь, то поднимаясь в зависимости от рельефа исследуемой поверхности.



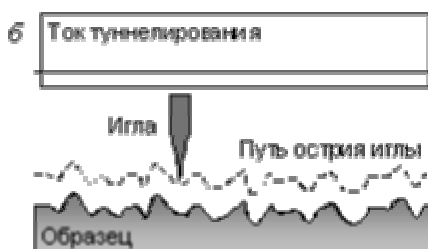
Информация об этом перемещении отслеживается компьютером, и программно визуализируется таким образом, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

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 величинах тока туннелирования, промеренных в каждой точке сканирования поверхности образца, строится образ топографии поверхности.



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



У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты более быстрый, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх и вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких поверхностей. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью измерять нерегулярные поверхности, но измерения занимают больше времени.

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

Но прогресс не стоит на месте, и в 1986 г в лаборатории цюрихского отделения IBM были созданы микроскопы второго 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.

Принцип действия атомного силового и туннельного микроскопов практически одинаковы, только в отличие от СТМ АСМ основан на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях (около одного ангстрема, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) между атомами двух тел действуют силы отталкивания, а на больших – силы притяжения.

В сканирующем атомном 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 такое отклонение регистрируется датчиком. Величина отклонения упругого элемента (пружинки) несет информацию о рельефе поверхности.

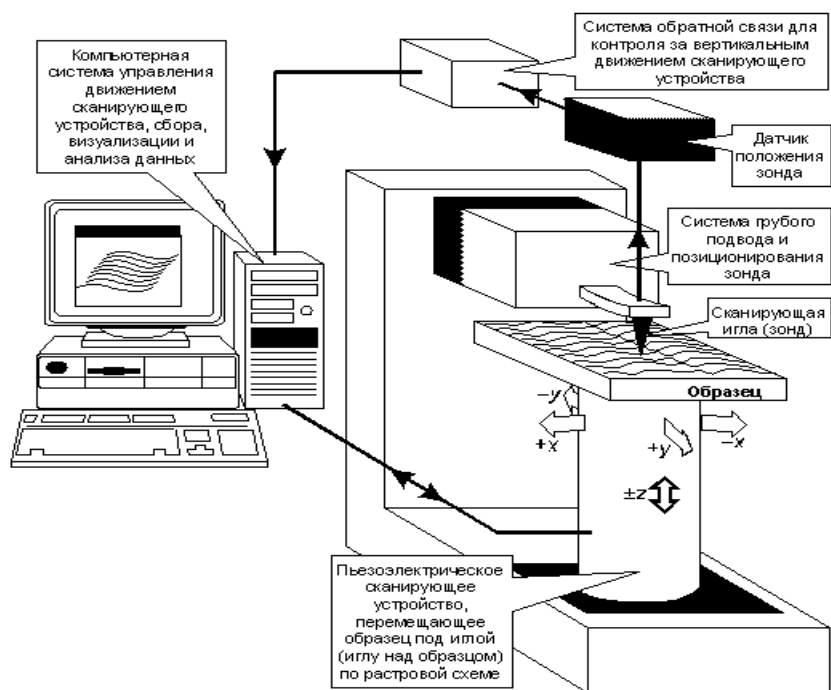
Поскольку АСМ не требует, чтобы образцы были проводящими, он позволяет исследовать свойства проводников и изоляторов, молекул ДНК и других мягких материалов.

Дальнейшее развитие зондовой микроскопии показало, что изложенный выше 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 разновидности СЗМ:

- зонды с туннельным эффектом
- атомные силовые зонды
- оптические зонды ближнего действия
- магнитные силовые зонды
- электростатические силовые зонды и др.

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

В конструкции каждого сканирующего зондового микроскопа есть свои отличия. Однако общая структура СЗМ остается более или менее одинаковой. В состав СЗМ-комплекса 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).

На сегодняшний день современные СЗМ являются основными инструментами нанотехнологий. 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 поверхности и др. и все это с нанометровым пространственным 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 тем самым 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. Процесс отрыва атома от поверхности контролируют по скачку тока. Разумеется, отрыв от поверхности и перетаскивание требует больших усилий, чем просто "перекатывание" атома по поверхности, как при горизонтальной манипуляции, но зато потом процесс переноса не зависит от встречающихся на поверхности образца препятствий (ступеней, ям, адсорбированных атомов).

После перемещения в необходимое место атом "сбрасывают", приближая острие к поверхности и переключая напряжение на игле.

В настоящее время 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 СЗМ-устройства промышленного производства 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 Nanotechnology MDT, НТЕ, Концерн Наноиндустрия и др.⁷

Кстати, интересный факт: в сказке Н. Лескова "Левша", первый русский нанотехнолог, сумевший подковать блоху, говорит что увидеть надписи на гвоздиках которыми подкована блоха можно только в мелкоскоп с увеличением в 5 миллионов раз - а это в точности увеличение современного СТМ!

Процессы нанотехнологии

В этом параграфе мы рассмотрим два основных нанотехнологических процесса, получивших за последнее время широкое распространение: процессы самосборки и литографии

Для того, чтобы материалы, создаваемые методами нанотехнологии, обладали улучшенными характеристиками, они должны быть хорошо структурированы на уровне атомов и молекул. Наиболее популярными способами создания таких наперед заданных структур являются *самосборка*.

Самосборка широко распространена в живой природе. Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток (синтез белка, например); структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул.

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 прикреплялись 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.

Одной из приоритетных областей применения нанотехнологий, является, конечно же, микроэлектроника.

Литография - это технология нанесения электронных компонентов (путей, по которым передается электрический ток) на кремниевой подложке.

Как основной способ "рисования" топологического рисунка на поверхности кремниевых пластин, литография является определяющим технологическим процессом производства интегральных микросхем (ИМС), и поэтому заслуживает отдельного внимания.

⁷ А.А.Суслов, С.А.Чижик "Сканирующие зондовые микроскопы (обзор)".

Многим известно, что основой первых ЭВМ служили электронные лампы, и что их производительность была крайне мала, а габариты и сложность обслуживания – чрезвычайно велики. Создание первых ИМС или планарных транзисторов (от англ. "planar" - плоский), имело революционное значение и привело к созданию микропроцессоров, что дало толчок бурному росту индустрии информационных технологий.

Удивительной особенностью транзисторов является то, что увеличение их производительности сопровождается уменьшением размеров. Современные транзисторы в 20 раз быстрее и в 100 с лишним раз меньше, чем те, что выпускались два десятилетия назад. Но для того, чтобы транзисторы продолжали уменьшаться в размерах, необходимо постоянное совершенствование методов литографии.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим вкратце технологию "выращивания" интегральной микросхемы (ИМС). Этот процесс происходит в несколько этапов:

1. Подготовка подложки.

Подложкой для микросхемы является полупроводниковая пластина из кристалла кремния (Si) - самого распространенного полупроводника на Земле. Для этой цели применяется химически чистый кремний, который переплавляется в большие цилиндрические заготовки. После множества дополнительных химических чисток монокристалл кремния разрезается на тончайшие пластины, которые в будущем послужат подложкой для изготовления процессоров.

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 SiO₂. Регулируя время воздействия кислорода и температуру кремниевой подложки, можно легко сформировать слой оксида нужной толщины. Диоксидная пленка отличается очень высокой химической стойкостью, большой механической прочностью и обладает свойствами хорошего диэлектрика, что обеспечивает надежную изоляцию расположенного под ним кремния и защищает его от нежелательных воздействий в ходе дальнейшей обработки.

2. Если некоторые области кремния, лежащие под слоем диоксида, необходимо подвергнуть обработке, то слой оксида необходимо предварительно удалить с соответствующих участков. Выделение таких участков на кремниевой подложке выполняется с помощью процесса, получившего название **литографии**. Целью этого процесса является перенос рисунков с фотошаблонов на поверхность пластины с тем, чтобы в дальнейшем создать на ней необходимые слои.

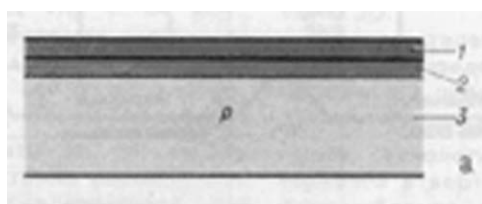


Рис а. Исходная полупроводниковая пластина с проводимостью p-типа, покрытая слоями SiO₂, и фоторезиста;

- 1 - слой фоторезиста,
- 2 - слой SiO_2 (диоксид кремния)
- 3 - полупроводниковая пластина,

Для этого на диоксидную пленку наносится слой **фоторезиста** (см. рис. а). Фоторезист – это светочувствительный материал, который после облучения становится растворимым в определенных химических веществах. Различают два типа фоторезиста - позитивный и негативный. Позитивные фоторезисты передают рисунок фотошаблона один к одному, негативные - формируют негативное изображение фотошаблона.

Фотошаблон представляет собой пластинку, состоящую из прозрачных и непрозрачных участков, и выполняет роль трафарета.

3. Третьим шагом при создании ИМС является **экспонирование** – пластина с наложенным на неё фотошаблоном подвергается облучению потоком соответствующего излучения. В результате экспонирования фоторезист, расположенный под "окнами" фотошаблона (прозрачными участками) засвечивается.

В результате засвеченный слой, чьи 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). См. рис. Б.

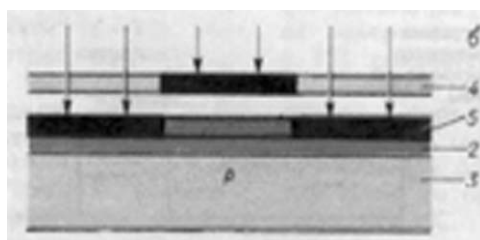


Рис б. Облучение фоторезиста через фотошаблон;
 2 - слой SiO_2 (диоксид кремния)
 3 - полупроводниковая пластина,
 4 - фотошаблон,
 5 - засвеченный участок фоторезиста,

4. Процесс удаления облученного фоторезиста и диоксидной пленки называется **травлением**. Этот процесс необходим для того, чтобы вскрыть окно для доступа к материалу подложки. Травление может быть химическим "жидкостным" или плазменным "сухим". Химическое жидкостное травление основано на растворении химическими веществами не защищенных фоторезистивной маской участков образца. Более эффективными являются "сухие" методы обработки, основанные на взаимодействии газозарядной плазмы с поверхностным слоем материала. Различают ионное травление, ионно-химическое травление и плазмохимическое травление.

Результатом процесса травления является полное удаление материала на участках, не защищенных фоторезистом. (рис. в.)

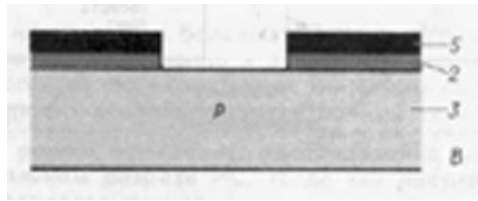


Рис в. Кремниевая пластина с "окном" в слое SiO_2 , образовавшимся в результате облучения и последующего травления;
 2 - слой SiO_2 (диоксид кремния)
 3 - полупроводниковая пластина,

5. Заключительным этапом формирования микросхемы являются процессы **эпитаксии, диффузии и металлизации**.

Эпитаксиальным процессом или эпитаксией называется ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки. Эпитаксиальное выращивание производят в особом реакторе. Если наращиваемые слои по составу не отличаются (или незначительно отличаются) от материала подложки, то говорят о *гомоэпитаксии* или *автоэпитаксии*. Процесс ориентированного наращивания эпитаксиальных слоев, существенно отличающихся по составу от вещества подложки, называют *гетероэпитаксией*. Эпитаксиальное выращивание позволяет создавать атомные слои, равномерно легированные (введенные в кремний) по пластине.

Диффузия является тем процессом, который чаще всего используют для направленного изменения параметров p- и n-областей пластин, предварительно подготовленных в процессе литографии. Для диффузии в кремний в качестве акцептора используется бор (В), а в качестве доноров - фосфор (Р) и мышьяк (As). Процесс заключается в нагреве пластины до температуры, не превышающей температуру плавления и внедрении вглубь пластины примесей (бор, фосфор, мышьяк) в виде ионов с высокой энергией.

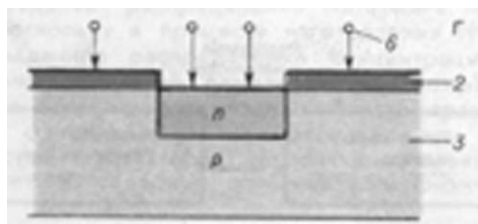


Рис в. Выращивание на поверхности пластины эпитаксиального n-слоя с помощью диффузии донорных примесей
 2 - слой SiO_2 (диоксид кремния)
 3 - полупроводниковая пластина,
 б - донорные атомы.

Процесс металлизации завершает изготовление ИМС. В ходе этого процесса осаждаются тонкие металлические пленки из алюминия, золота или никеля, которые образуют электрические соединения между активными областями и приборами, размещенными на кристалле. Слой металла еще раз подвергается методу литографии и травления, подобно описанному выше, в результате которой от всего

слоя металлизации остаются лишь токопроводящие линии и контактные площадки – те, что мы можем наблюдать на любой микросхеме.

Итак, процесс изготовления микросхем включает несколько технологических этапов: очистка, окисление, литография, травление, диффузия, осаждение, измерения. Очевидно, что для дальнейшего усовершенствования микроэлектроники, т.е. увеличения производительности за счет уменьшения размеров чипов (микросхем), ключевым моментом является именно усовершенствование методов литографии.

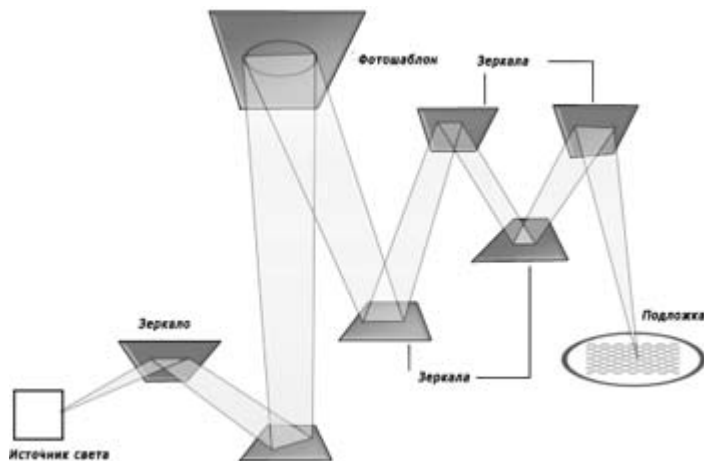
Очевидно, что для этого толщина линий, наносимых световым пучком на поверхности фоторезиста в момент формирования "рисунка" микросхемы, должна стремиться к уменьшению. То есть должна уменьшаться длина волны, поскольку именно она ограничивает точность операций вследствие явлений дифракции. Первоначально засветка производилась излучением с длиной волны, примерно соответствующей видимому свету - чуть более 1 микрона. Толщина линий, формируемых при помощи такого процесса, была больше, чем длина волны излучения.

В последние годы стандартными стали длины волн 435 и 365 нм соответственно. При помощи источника излучения с длиной волны 365 нм вычерчиваются 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. Сейчас полупроводниковая промышленность переходит на 0,18-микронную литографию. Достижение топологических размеров в 100 нм и меньше, таким образом, потребует уменьшения длины волны излучения, возможно за счет применения принципиально новых источников.

В настоящее время интенсивно ведутся исследования технологии, названной ***EUV-литографией*** (Extreme Ultra Violet) – литография в спектре жесткого ультрафиолета. Считается, что эта технология станет достойным приемником DUV-литографии уже к 2005-2006 году. Процесс производства по технологии EUV-литографии обеспечит толщину линий проводников в 0,07 микрон (70 нм), что примерно в тысячу раз меньше толщины человеческого волоса.

EUV-литография является обычной оптической литографией, но с использованием излучения с длиной волны 11 - 14 нм и отражательными оптикой и фотошаблонами.

Оптическая система (один из ее вариантов представлен на рисунке) содержит набор зеркал между источником света и маской.



Набор зеркал между маской и подложкой с резистивным обеспечивает уменьшение размера изображения в 4 раза позволяет рисовать линии с разрешением до 70 нм.

Чтобы дать наглядное представление о преимуществах EUV-литографии, приведем несколько примеров:

- EUV-технология ведет к появлению микропроцессоров в 30 раз быстрее существующих. Процессор в 10 ГГц, например, будет настолько быстрым, что, например, за время, за которое человек успевает только моргнуть (около 1/50 секунды), он сможет произвести порядка 400 млн. вычислений.
- EUV-литография предназначена для печати на кремниевой подложке элементов размером 0,07 мкм (70 нм) и менее. Это все равно как печатать 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.
- Сегодняшние литографические установки с применением глубокого ультрафиолетового излучения (DUV) - машины, используют источники света с длиной волны 248 нм. Длина волны EUV-излучения около 13 нм, т.е. примерно в 20 раз меньше. Для сравнения, длина волны видимого света находится в диапазоне от 400 до 700 нм.
- Элементы, нанесенные с помощью EUV- и DUV-литографии, примерно так же отличаются друг от друга, как две одинаковые линии, проведенные на бумаге шариковой ручкой (EUV) и маркером (DUV).

Переход к EUV литографии позволит перейти 100 нм рубеж, оставаясь в рамках традиционной фотолитографии. Однако сложная зеркальная оптика и дорогостоящая технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогостоящим и оставляет место для разработки литографических процессов основанных на иных физических принципах.

Мягкая литография.

Обычная фотолитография прекрасно зарекомендовала себя в случае, когда необходимо разместить как можно большее количество 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.

Техника, необходимая для размещения транзисторов на любых поверхностях и материалах, названа "мягкой литографией". Она нетребовательна 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.

Процесс изготовления выглядит следующим образом: сперва на выбранную поверхность последовательно наносят тонкие плёнки алюминия, кремния и нитрида кремния. Далее поверхность нагревается и на ней методами зондовой микроскопии "рисуют" на поверхности определенную наноструктуру с характерными размерами в десятки нм. Затем мягкую полимерную матрицу, форма которой штампована наноструктурой, подвергают облучению для затвердения.

Минимальные размеры элементов, создаваемых этими способами, составляют около 10 нм, что позволяет в принципе осуществлять очень плотную запись, но производительность и надежность оставляют желать много лучшего.

Многие проблемы ещё ждут своего разрешения, - в частности, оптимизация характеристик такой необычной схемы, - но уже сегодня ясно, что мягкую литографию ждёт большое будущее. Данная технология сравнительно проста и дешёва, а потому можно ожидать её широкого применения.⁸

Нанозффекты 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 передвигаются по оконному стеклу.

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

Сначала полагали, что весь секрет в уникальных присосках, которыми снабжены лапки животного. Но выяснилось, что в строении лап геккона нет ничего,

⁸ "Гнуптость не помеха" Computerra 2003 г.

похожего на присоски, которые, присасывались бы к стеклу и обеспечивали 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, что 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 сил 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 он опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинок 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 лапка 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 условиях невесомости (обычный скотч в космосе не работает).

Ведутся разработки нового поколения так называемых "сухих клеев" с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию ("прилипаемость") с помощью электростатического механизма.

Можно изготовить обувь, которая не скользит на льду и прочно держит человека на вертикальной стене. Она облегчила бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и нам, обычным людям⁹.

Фуллерены и углеродные нанотрубки. Их свойства и применение.

Еще древний грек Демокрит в своей атомистической концепции Вселенной обратил внимание на то, что та часть мироздания, которую называют материальным миром, состоит из множества "кирпичиков" - химических элементов и их соединений, различающихся между собой особыми свойствами и качествами.

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).

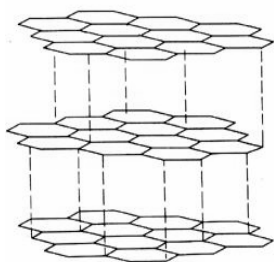
Третьи были открыты 100-200 лет тому назад, но приобрели первостепенную важность лишь в наше время. К ним относятся уран, алюминий, бор, литий, бериллий.

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 этой области. Кстати, Нобелевская премия по химии за 1996 год была присуждена именно первооткрывателям фуллеренов.

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, наверняка, известно, что углерод имеет два основных аллотропных состояния - графит и алмаз. Можно сказать, что фуллерен является третьим аллотропным состоянием углерода.

Рассмотрим структуры молекул графита, алмаза и фуллерена.

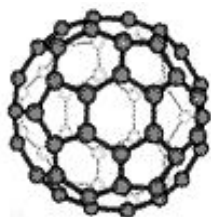
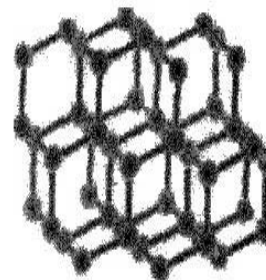


Графит обладает *слоистой структурой*. Каждый его слой состоит из атомов углерода, ковалентно связанных друг с другом в правильные шестиугольники. Соседние слои удерживаются вместе слабыми вандерваальскими силами. Поэтому слои легко скользят друг по другу. Примером этого может служить простой карандаш - когда вы проводите графитовым стержнем по бумаге, слои

⁹ В.А. Хамитов. Силы Ван дер Ваальса и "хитрый" геккон.
Галактион Андреев Процессор на лапу // Computerra Online

постепенно "отслаиваются" друг от друга и оставляют на ней тонкий след.

Алмаз имеет трехмерную *тетраэдрическую структуру*. Каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя другими атомами углерода. Вся структура алмаза в целом представляет собой, в сущности, одну макромолекулу. 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)

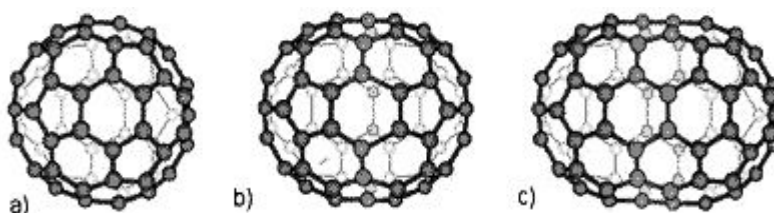


Фуллерены получили свое название в честь архитектора Бакминстера Фуллера, который придумал подобные структуры для использования их в своем архитектурном деле. Фуллерен имеет *каркасную структуру*, внешне напоминающую футбольный мяч, который состоит из заплаток 5-ти и 6-тиугольной формы. Если представить, что в вершинах этого многогранника находятся атомы углерода, то мы получим самый стабильный фуллерен С60.

В молекуле С60, 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 пустая полость, в которую благодаря капиллярным свойствам можно ввести атомы и молекулы других веществ, что дает, например, возможность их безопасной транспортировки.

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

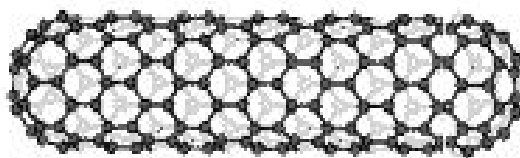


Представители фуллеренов: а) С60 б) С70 в) С80

Однако разнообразие углеродных каркасных структур на этом не заканчивается.

В 1991 году, Сумио Иидзима, профессор японского университета Мэйдзё обнаружил длинные, цилиндрические углеродные образования, получившие названия нанотрубок. Такая молекула с числом атомов углерода $C > 1\ 000\ 000$, представляют собой однослойную трубку с диаметром около нанометра и длиной в несколько десятков микрон. На поверхности трубки атомы углерода расположены в

вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести правильных пятиугольников.



Визуально структуру таких нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и "склеиваем" ее в цилиндр (на самом деле нанотрубки растут совсем по-другому). Казалось бы, что 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 удивительные нанотрубки в 50-100 тыс. раз тоньше человеческого волоса оказались на редкость прочным материалом.

По своей прочности нанотрубки превосходят сталь в 50-100 раз, и имеют в шесть раз меньшую плотность. Модуль Юнга - характеристика сопротивления материала осевому растяжению и сжатию - у нанотрубок в среднем вдвое выше, чем у углеродных волокон. То есть трубки не только прочные, но и гибкие, 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" и не "ломаются", а просто-напросто перестраиваются!

Международная группа ученых показала, что, опираясь на эти необычные свойства, нанотрубки можно использовать для создания искусственных мускулов, которые при одинаковом объеме могут быть втрое сильнее биологических, не боятся высоких температур, вакуума и многих химических реагентов.

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!

Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микронов - что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина нанотрубок, получаемых в лаборатории, постепенно увеличивается - сейчас ученые уже вплотную подошли к миллиметровому рубежу. Уже описан синтез многослойной нанотрубки длиной в 2 и даже в 4 мм. Поэтому есть все основания надеяться, что в скором будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в сантиметры и даже метры.

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 себе бесчисленное множество применений.

Нанотрубки бывают самой разнообразной 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, нанотрубки могут быть и проводниками, и полупроводниками. Электронные свойства нанотрубок можно целенаправленно менять путем их заполнения другими веществами

Может ли какой-либо иной материал с таким простым химическим составом похвастаться хотя бы частью тех свойств, которыми обладают нанотрубки?!

Спектр возможного применения нанотрубок очень широк. Разработано уже и несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Уже в ближайшем будущем могут появиться эмиссионные мониторы с плоским экраном, работающих на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, с другого конца начинают испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. Получающееся при этом зерно изображения будет фантастически малым: порядка микрона!

Другой пример - это использование нанотрубки в качестве иглы сканирующего туннельного или атомного силового 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 напряжение, 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. С использованием нанотрубок изготовлены новые элементы для компьютеров. Эти элементы обеспечивают снижение размеров 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 бесспорное 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.

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

Пустоты внутри фуллеренов и нанотрубок также привлекали внимание ученых. Экспериментальным путем было установлено, если внутрь фуллерена внедрить атом какого-нибудь вещества (этот процесс носит название

"интеркаляция", т.е. "внедрение"), то это может изменять электрические свойства фуллеренов и может 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 $Gd@C_{60}@SWNT$, что означает "Gd внутри C_{60} внутри однослойной нанотрубки (Single Wall NanoTube)".

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 при толчках 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, то 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 подогреванием такого «водородобака». Чтобы превзойти обычные газовые баллоны по массовой и объемной плотности запасенной энергии (масса водорода, отнесенная к его массе вместе с оболочкой или к его объему вместе с оболочкой), 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 она как бы втягивает в себя вещество. 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 ароматическое кольцо слишком узкое для большинства атомов. В таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. Попав в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца (а операции "запаивания" и "распаивания" концов нанотрубок уже вполне под силу современной технологии) и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это – не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях мира. Уже создана нанотрубка с одним закрытым концом.

И 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 времени. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы¹⁰.

Для внедрения данной технологии в массовом масштабе необходимо от 3х до 5 лет. Основной проблемой является отсутствие эффективных методов "открывания" таких механизмов и их интеграции в белковые маркеры клеток-мишеней.

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

Рассмотренные выше наноматериалы 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* – их размер колеблется от в пределах 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 имеют антибактериальный эффект, что делает их полезными для лечения многих болезней (это свойство серебра еще в древности заметили служителями церкви, используя серебро для приготовления "святой воды"). Это также говорит о том, что серебро в наноформе биологически активно.

Такие наночастицы углерода, как рассмотренные выше фуллерены и нанотрубки, своими удивительными свойствами также подтверждают тот факт, что многие вещества в наноформе не ведут себя так же, как они делают это в обыкновенном виде. Этот факт объясняется тем, что с уменьшением размеров частиц увеличивается их интенсивность взаимодействия с окружающей средой, что и приводит к изменению их газонасыщенности, окисленности, токсичности, взрывоопасности, плотности и т.д. по сравнению со свойствами тех же материалов в обычной форме.

¹⁰ Иванов И.П. Углеродные нанотрубки: их свойства и применение
Э.Г. Раков Удивительные нанотрубки: свойства.

Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно давно и используется в разных областях техники. Примерами могут служить широко применяемые 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 тонкодисперсные металлические частицы.

Суспензии металлических наночастиц (обычно железа или его сплавов) размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы¹¹.

Дисперсные материалы в большинстве случаев не являются материалами, встречающимися в природе в свободном состоянии, а представляют собой вторичный продукт. В настоящее время существует большое количество способов измельчения веществ, например: механическое дробление (для получения различных порошков), резание (получение стружки), измельчение в шаровых вращающихся, вибрационных и вихревых мельницах, измельчение ультразвуком и др.

Наночастицы получают при помощи нанотехнологии, в частности, методами туннельно-зондовой нанотехнологии (ТЗН) использующей возможности современных сканирующих микроскопов манипулировать отдельными атомами. И, конечно же, большие успехи в этом направлении будут достигнуты после создания первых ассемблеров - сборщиков атомных структур.

Дальнейшее развитие 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 исчезновения) при одновременном увеличении количества выполняемых ею функций. В идеале – технического устройства не должно быть, 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, создавать устройства всё меньших размеров, со все большими

¹¹ Гусев А. "Наноматериалы и нанотехнологии".// Наука Урала №24. 2002

функциональными возможностями. Взять, например, те же сотовые телефоны или ноутбуки: все меньше размер, все выше функциональность.

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 - такие, как незагрязняющиеся ткани и упаковки, 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, основанные на новейших материалах с необычными свойствами. Благодаря обработке на атомарном уровне, привычные материалы будут обладать улучшенными свойствами, постепенно становясь все легче, прочнее и меньше по объему. Согласно прогнозу большинства ученых, это произойдет уже через 10-20 лет.

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 должно четко представлять себе, что подобные "неудачные" опыты или халатность в будущем могут обернуться такой трагедией, ценой которой станет существование всего человечества и планеты в целом.

В связи с вышесказанным, становится понятно, почему с самого появления нанотехнологии, её развитию мешают страхи, часть из которых однозначно относятся к разряду научной фантастики, но некоторые, однако ж, вовсе не лишены основания. К сожалению, обсуждение этих проблем выходит за область этой 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 для 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 и искусственные клетки начинают чистить механическим и химическими путями Ваши сосуды¹².

Во-вторых, возможно создание нанороботов-врачей, которые способны "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, 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 улучшено 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 фуллерена или алмазоида), которые могут использоваться в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

Электроника, компьютерные технологии, робототехника.

¹² Свидиненко Юрий, "Медицинские нанороботы: перспективы развития"

С появлением новых средств наноманипулирования возможно создание механических компьютеров, способных в кубе 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 более, чем 1000 таких устройств могут 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 электронных 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 (особого нуклеотида, выполняющего во всех биологических системах роль универсального аккумулятора и переносчика энергии) 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, так как можно будет обрабатывать их с атомарной точностью.

Социальные последствия

По прогнозам Национальной Инициативы в Области Нанотехнологии США (National Nanotechnology Initiative), развитие нанотехнологий через 10-15 лет позволит создать новую отрасль экономики с оборотом в \$1.000.000.000.000 и примерно 2 млн. 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 мировому знанию, 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 способны будут производить пищу, заменив в этом качестве растения и животных. Для этого они будут использовать любое "подножное сырье": воду и воздух, где есть главные нужные элементы - углерод, кислород, азот, водород, алюминий и кремний; остальные, как и для 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 ассемблеры, созданные на основе нанотехнологий. Теоретически возможно, что они будут способны конструировать из готовых атомов любой предмет. Достаточно будет спроектировать в компьютеризированной системе 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 имеющий участок, к которым 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 иметь более, чем на 90 процентов меньшую массу.

Он выдерживает длительное и интенсивное использование, потому что прочные материалы позволили разработчикам включать большие запасы прочности. Поскольку ассемблеры позволили проектировщикам делать его материал таким, что он при приложении усилия течет до того, как ломается, двигатель не только прочен, но и износостоек.

При всем своем превосходстве, этот двигатель по сути 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 превратив 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 в 2050 гг.*). Возможность самосборки может привести к решению глобальных вопросов человечества: проблемы нехватки пищи, жилья и энергии.

В освоении космоса начнется новая эра.¹³

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 – так называется 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 Константин Циолковский, основоположник современной космонавтики. Он указывал на то, что принцип, положенный в основе современного ракетостроения не позволяет современным ракетносителям быть эффективным средством для доставки груза в космос. Причин тому несколько.

Во-первых, КПД современных ракет очень мал, 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. Так, стоимость вывода килограмма груза на низкую орбиту составляет в среднем около \$10 тыс.¹⁴

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.

Для того, чтобы отправлять грузы в космос более дешевым образом, исследователи из Лос-Аламосской национальной лаборатории предложили создать космический лифт. Цена запуска груза с помощью лифта по предварительным оценкам может снизиться с нескольких тыс. долларов до \$50-100 за кг. Ученые полагают, что космический лифт сможет в буквальном смысле перевернуть мир, дав человечеству совершенно новые возможности.

По своей сути, лифт будет представлять собой кабель, соединяющий орбитальную станцию с платформой на поверхности Земли. Кабинки на гусеничном

¹³ По материалу статьи Б. Понкратова "Что будем делать в третьем тысячелетии, или последняя технократическая утопия" / "Техника - молодежи", 1989, № 12

¹⁴ Будущее пилотируемой космонавтики ???
Михаил Висенс "По веревке в космос"

ходу, будут перемещаться по кабелю вверх и вниз, перенося спутники и зонды, которые нужно вывести на земную орбиту или дальше. 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, обеспечивающими энергию подъемника, либо кабины будут оснащены сравнительно небольшими фотоэлектрическими панелями, которые с Земли будут подсвечивать мощные лазеры.

Ученые предлагают разместить наземную базу космического лифта в океане, в восточных 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 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 кабель из нанотрубок длиннее, чем на метр, 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 далеком 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 массы 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.

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 проектировщики 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, после чего первый космический лифт будет готов.

Любопытные совпадения: в 1979 году писатель Артур Кларк в своем фантастическом романе "Фонтаны рая" выдвинул идею "космического лифта" и предложил заменить сталь на некий сверхпрочный "псевдоодномерный алмазный кристалл", 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 такими замечательными свойствами, с которыми мы уже познакомились.

И что совсем уж удивительно, так это то, что 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 достигнет 10 миллиардов долларов.

Политическая ситуация

Нанотехнологии имеют большое военное будущее. На военные nanoисследования в 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" (известны самолеты-невидимки, созданные на основе технологии stealth), 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 наноустройства. К примеру, армия США заказала компании Friction Free Technologies разработку военной формы будущего. Компания должна изготовить носки с использованием

нанотехнологий, которые должны будут выводить за пределы носков пот, но сохранять ноги в тепле, а носки в сухости.

Чрезвычайно интересен проект исследовательской организации "Институт нанотехнологий для солдат" при Массачусетском технологическом институте. На предстоящие пять лет институт получил гранд 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 технологического института, а также военные специалисты.

Униформа будущего "наносолдата" должна уметь отражать пули, самостоятельно лечить раны своего хозяина, повышать его способности, быть невидимыми и позволять ходить по отвесным стенам. В отличие от своих средневековых аналогов, "нанокольчуга" будущего, основанная на молекулярных технологиях 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 уничтожать последствия старых загрязнений - нанотехника восстановит озонный слой, очистит от загрязнений почву, реки, атмосферу, океаны, демонтирует заводы, плотины, рудники, запечатает радиоактивные отходы в вечные самовосстанавливающиеся контейнеры.

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 создать 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 в нашу жизнь, не стоит быть настолько наивным, чтобы не задуматься о возможных опасностях и проблемах. Поэтому многие крупные ученые современности не зря пытаются привлечь внимание общественности не только к позитивным перспективам будущего, но и к их возможным негативным последствиям.

Билл Джой, со-основатель и ведущий ученый Sun Microsystems в Пало Альто, штат Калифорния, утверждает, что исследования в области нанотехнологий и других областях должны быть остановлены перед тем, как это навредит человечеству.

Его опасения поддержала еще одна группа нанотехнологов, выпустив так называемый «Foresight Guidelines» т.е. «линии поддержки Института предвидения». Как и Джой, они считают, что стремительный рост нанотехнологий выходит из-под контроля. Но, вместо простого запрета на развитии исследований в этой области, они предложили установить правительственный контроль над опасными исследованиями. Такой надзор, они доказывали, сможет предотвратить случайную катастрофу в этой области.

Страхи перед нанотехнологиями начали появляться с 1986 года, после выхода в свет "Машин созидания" Дрекслера, где он не только нарисовал утопическую картину нанотехнологического будущего, но и затронул "обратную сторону" этой медали. Одну из проблем, которая представляется 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 их 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 малым. Однако неразумно полностью исключить опасность преднамеренного программирования ассемблера маньяком 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 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 намного больше нанометрических масштабов, 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 использованием нанотехнологий. На одной из встреч, посвященных обсуждению их развитию, представители научного общества, исследовательских центров и государственных агентств были собраны для обсуждения проблем в этой области, вызывающих беспокойство. Среди возможных проблем, 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 для того, 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 наноматерий, 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 пересворачивание 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, исследователи и 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 фундаментальное образование может обесцениться настолько, что станет не актуальным на рынке труда?

Конечно же 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 конечно будут занимать люди, обладающие фундаментальным образованием, основанным на междисциплинарном подходе.

Вероятно, что 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 естественно-научный профиль, но и гуманитарный?

Кстати, если говорить о связи нанотехнологий с фундаментальными науками, то можно увидеть, что практически любой предмет, из тех, что изучаются в школьном курсе, 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 (ИИ), 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, начиная от автоматических наносистем охраны окружающей среды и заканчивая сверхточным прогнозированием и борьбой 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 следующим за "информационным обществом" шагом 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 главные нравственно-этические категории, такие 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 именно в проявлении всех человеческих качеств, также оставила немало свидетельств подобного мировоззрения в произведениях искусства творческих гениев того времени.

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

Современное искусство также позиционирует себя как "искусство новых технологий" и использует все последние достижения 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 года 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 - 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. Ну почему бы этому бычку не положить начало новому направлению в области наноскульптуры?

Нанотехнологии, безусловно, подадут множество новых идей и в области архитектуры. Однотипные многоэтажные "коробки" канут в прошлое. Вместо них ассемблеры "вырастят" такие архитектурные ансамбли, которые будут в прямом смысле слова "парить в воздухе", поддерживаемые невидимыми, но суперпрочными опорами и тросами из нанотрубок. Архитектура будущего будет потрясать воображение красотой, надёжностью и индивидуальностью конструкций.

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 проводится около десятка конференций, посвящённых различным аспектам нанотехнологии. Опубликовано несколько тысяч статей и даже несколько 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 быстроедействием в миллионы раз выше существующих и более сложные робототехнические системы с распределёнными механическими устройствами: интегральная нанооптоэлектроника, позволяющая создать солнечные элементы с КПД в 2 раза большим 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, направленных на исследование и разработки квантовых функциональных схем. 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 по объёму финансирования работ в области нанотехнологии стало предметом государственного обсуждения, в результате которого объём финансирования только фундаментальных исследований каждый год стал удваиваться.

С целью форсирования работ именно на данном направлении в 2000 году по решению правительства США работы по нанотехнологии получили высший приоритет (top priority). В результате была создана программа Американской нанотехнологической инициативы, а при президенте организован специальный комитет координирующий работы по нанотехнологии в 12 крупнейших отраслях промышленности и военных 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 России фундаментальные научноисследовательские работы по нанотехнологии проводятся по нескольким программам. К наиболее крупным из них относятся: программа "Физика наноструктур", руководимая академиком Ж.И. Алферовым, и "Перспективные технологии и устройства в микро- и наноэлектронике", руководимая академиком К.А. Валиевым.¹⁵

По последним данным, о состоянии Российской nanoиндустрии 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 (фирма НТ-

¹⁵ Нанотехнология и наночипы Состояние работ по нанотехнологиям

МДТ, концерн “Наноиндустрия”, НТЕ, ГНЦ ГНИИ Физических проблем 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 разрабатывает 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 нанотехнологиях в областях микро электроники, микро- и наномеханических устройств, биосенсоров, биотехнологии¹⁶.

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 внедрению. 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.

К положительным факторам 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 работают в нанотехнических лабораториях по всему миру.

Часть 2. Введение в квантовую физику

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

Р.Фейнман

Квантовая физика (механика) как научная теория начала оформляться 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 и систем в пространстве и времени. Различие заключается в том, что в качестве объектов изучения выступают не макроскопические тела и системы, как в классической физике Ньютона, а микрочастицы 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. Согласно Демокриту, в мире существует всего четыре вида таких атомов: атомы земли, воды, воздуха и огня. Химия XIX столетия доказала существование огромного 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 иных, неизвестных сил, многократно превышающих все изученные к тому времени силы. Классическая механика оказалась неспособной адекватно описывать законы взаимодействия микрочастиц, находящихся в чрезвычайно малом объеме, а необходимость установления законов взаимодействия и движения этих частиц и привела к рождению "новой" физики, получившей название *квантовой*. Само слово "**квант**" в переводе с латинского означает *наименьшее количество*, на которое может измениться дискретная (прерывистая) природная физическая величина. Квантом также называют частицу-носитель свойств какого-либо типа, например *фотон* – это квант электромагнитного поля.

Но дело в том, что физика – это наука о природе по самому своему названию ("physis" – в переводе с греческого значит "природа"). И как единая природа, так единая и физическая наука, изучающая закономерности ее проявлений. Именно в силу такого единства, исторически возникшее разделение дисциплины на "классическую" и "квантовую" представляется нам не совсем правильным. Тем не менее, в некоторых случаях это оправданно – ведь для решения конкретной физической задачи, способы ее решения определяются видом тех законов и формул, которыми мы пользуемся, а они существенно различаются в классической и квантовой физике.

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 к тому, что в классической Ньютоновской физике положение тела вполне определенным образом задается в трехмерном пространстве, а для описания его движения (то есть 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 физическое тело движется по некоторой траектории, мы предполагаем, что оно не может в один и тот же момент перемещаться в пространстве еще каким-нибудь способом (согласитесь, довольно сложно представить себе, например автомобиль или самолет, двигающийся одновременно в двух противоположных 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 туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер, с которым мы познакомимся 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). Тем не менее, факт остается фактом: некоторые электроны все же "проскакивают" сквозь барьер, словно в "заборе" для них имелся специальный "туннель" (подобно тому, как рентгеновское излучение проходит сквозь твердые объекты), проявляя, таким образом, свои волновые качества.

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 (при нынешнем состоянии науки) неспособна. Поэтому следует понимать, что аналогия "электрон-мячик" – это всего лишь удобная мысленная модель, наглядное допущение, оправданное в данном случае. А подробнее о проблеме определения природы элементарных частиц мы поговорим чуть позже.

В квантовой физике такие "чудеса в решетке" 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 технических устройствах, туннельные микроскопы с 1985 года весьма продуктивно служат науке.

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 природы объекта конкретной задачи и необходимой точности ее решения.

О корпускулярно-волновом дуализме света

Когда же, а точнее с чего началось такое раздвоение физической науки? 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 свет потоком 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 необходимые для проведения опыта технические средства были недоступны. Скорость света в различных оптических средах смогли определить лишь в XIX столетии, и вплоть до XIX века свет считали потоком особых, световых частиц, только потому, что авторитет великого Ньютона "задавил" теорию Гюйгенса.

В начале XIX века французская Академия наук 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 (Надеюсь, что из курса школьной физики читатель помнит те характерные дифракционные и интерференционные картины, которые свидетельствуют о способности световых волн огибать препятствия, соразмерные длине волны. Поэтому мы не будем подробно останавливаться на опытах Френеля и продолжим повествование). 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 эксперимента, и маститые академики получили возможность убедиться в правоте Френеля (кстати говоря, это был один из редчайших случаев в науке, когда критикуемый автор смог доказать свою правоту, как говорится, "не отходя от кассы"). Появившаяся затем теория электромагнетизма Максвелла, из которой следовало существование в природе электромагнитных волн и эмпирическое обнаружение этих волн Герцем, доказавшим, что их свойства подобны свойствам света, окончательно убедили весь 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* – это термин, которым в теории теплового излучения называют тело, полностью поглощающее весь падающий на него поток излучения, независимо от длины его волны.

Как известно, свет, или видимое излучение представляет собой суперпозицию (совокупность) электромагнитных волн разной длины (примерно от 400 до 760 нм), воспринимаемых человеческим глазом. Вспомните хотя бы радугу – природную демонстрацию разложения белого света на "составляющие". Ни для кого не секрет, что наш глаз воспринимает различные цвета не потому, что объекты окружающей среды обладают некоторым абстрактным свойством "цвет", а потому, что они способны поглощать либо 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 из видимого диапазона, кроме тех, которые соответствует зеленой части спектра. Если бы было иначе, мы бы смогли различать цвета и при отсутствии света, а это не соответствует действительности (недаром возникла поговорка "ночью все кошки серы").

Абсолютно черное тело – это, конечно же, теоретическая абстракция, поскольку в природе не существует абсолютно черного цвета, поэтому наиболее близким приближением к абсолютно черному телу является, например, сажа или платиновая чернь. Для экспериментов по тепловому излучению в качестве абсолютно черного тела используется небольшой черный сосуд с отверстием. Луч, попавший в такой сосуд, через некоторое время полностью поглощается стенками сосуда, нагревая его.

Вслед за экспериментальным обнаружением теплового излучения последовали многочисленные попытки его теоретического обоснования, в связи с чем были построены различные теоретические модели теплового излучения. Наиболее адекватной оказалась модель Рэля и Джинса. При выводе своей формулы Рэлей и Джинс действовали *абсолютно строго*, не делая никаких упрощений, то есть опирались только на такие столпы физической науки, как теория о равномерном распределении энергии по степеням свободы и теория электромагнетизма Максвелла.

В результате сравнения экспериментальных данных с уравнениями, выведенными в рамках классического подхода, обнаружилось, что теория Рэля-Джинса правильно описывает спектр излучения только для самых малых частот, а в целом недопустимо сильно отличается от реальных данных. Согласно этой теории, чем больше частота излучения, тем больше энергии содержит спектр, то есть все тела должны излучать электромагнитные волны с бесконечно большой частотой (которая соответствует ультрафиолетовой части спектра). 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).

Как известно, физики в своей работе стараются обходиться без эмоций, а тут вдруг такое словечко – "катастрофа"! Разрешить данное противоречие сумел лишь в 1900-м году немецкий ученый Макс Планк, выдвинув гипотезу световых *квантов*.

Гипотеза Планка по своей сути сильно напоминает корпускулярную теорию Ньютона и хорошо согласуется с результатами, полученными экспериментально. Если одним из основных идеологических моментов классической физики было понятие *непрерывности*, то Планк ввел в физику понятие *дискретности*, предположив, что свет испускается отдельными порциями (квантами), которые он назвал **фотонами**. Интересен тот факт, 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.

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

$$E = h \cdot \nu$$

где E – энергия кванта света, называемого также фотоном;

ν – частота

$h = 1,054 \cdot 10^{-34}$ 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 ни что иное, как *квант действия*, то есть наименьшее по величине действие, возможное в природе. Ввиду малости величины h квантовый характер воздействия для макроскопических тел не проявляется.

Постоянная Планка – это фундаментальная физическая константа, определяющая границу между классическими и квантовыми представлениями. Если в условиях задачи физические величины действия значительно больше h , то применима классическая Ньютонская механика. В противном случае необходимо решать задачу в соответствии с законами 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.

Заметим, что сам Эйнштейн, сделавший принципиальные для квантовой физики открытия, так же, как и его предшественник Планк, выступал против ряда ее основополагающих идей. Всемирно известна фраза Эйнштейна из его переписки с Бором "Бог не играет в кости". Так Эйнштейн отзывался о вероятностной трактовке волновой функции, о которой речь пойдет ниже.

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 экспериментально изучаем законы фотоэффекта, 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 эмпирическим путем было установлено, что электроны представляют собой отрицательно заряженные частицы, являющиеся составной частью атома. Электрический ток является ничем иным, как упорядоченным движением электронов вдоль металлического провода, и в этом смысле электрон есть квант электричества.

Модель атома Резерфорда

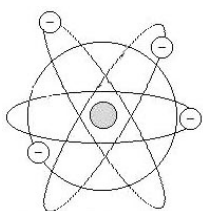


Рис 1. Модель Резерфорда

Исходя из такой информации, Э. Резерфорд предложил в 1910 г **планетарную модель атома**, согласно которой отрицательно заряженные электроны вращаются как планеты вокруг центрального положительно заряженного ядра, которое притягивает их подобно Солнцу (напомним, что заряды одинаковых знаков отталкиваются, а противоположных – притягиваются). Такая аналогия между атомом и Солнечной системы сразу же захватила воображение большинства людей. Она действительно позволяет очень наглядно создать зрительный образ атома и объяснить некоторые его свойства, например различия в величине зарядов электронов.

Однако пользоваться данной аналогией можно только до определенного предела. Основной недостаток этой модели 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, по законам 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).

Время падения электрона порядка $10^{-9}c$, что, конечно же, противоречит 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 изложенных выше противоречий был достигнут Н. Бором в 1913 г., когда он распространил идеи Планка и Эйнштейна о квантовых свойствах электромагнитного излучения на атомы вещества. Бор ограничился рассмотрением атома водорода, так как 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 - постулатов Бора.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: электроны в отдельном атоме могут обладать лишь определенными (разрешенными) значениями энергии, или, другими словами, находится на определенных *энергетических уровнях*. Уровни энергии образуют дискретный энергетический спектр атома (см. рис).

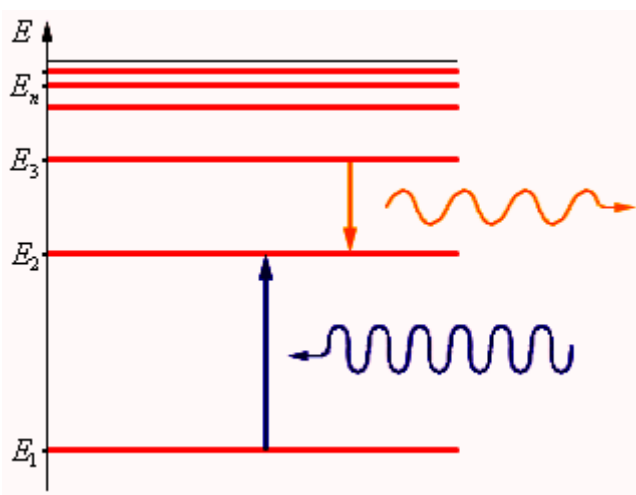


Рис 2. Энергетическая схема атомных уровней
Энергия E_1 соответствует основному состоянию, E_2 – возбужденному.

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 световой фотон.

Существует орбита с *наименьшей* возможной энергией, на которой электрон может находиться неограниченно долго – это его *основное* состояние. При переходе с одного энергетического уровня на другой, электрон возбуждается,

но при каждом удобном случае всегда стремиться вернуться из *возбужденного* состояния обратно в основное.

Каким же образом происходит переход электрона с одного уровня на другой? Предположим, атом находится в состоянии n и обладает энергией E_n . Чтобы вынудить электрон перейти на уровень m , мы должны каким-то образом "выбить" его из основного состояния, придав ему некоторую дополнительную энергию. Для этого мы будем "обстреливать" электрон световыми фотонами различной частоты. Напоминаем, что энергия фотона зависит от частоты излучения, поэтому энергия одного кванта света равна

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

где ν – частота

\hbar – 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:

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

При этом электрон поглотив световой фотон, перейдет на уровень, соответствующий энергии E_m .

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

Итак, электрон находится в возбужденном состоянии, из которого он в силу своей природы стремиться 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:

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

Таким образом, квантовая механика обнаружила то, что *атом обладает способностью поглощать и испускать фотоны света*, что в дальнейшем послужило основой для создания различного рода технических устройств, использующих этот принцип (например, лазеров).

Итак, сформулируем важный вывод из теории квантовой механики:

Физические величины в квантовом мире изменяются дискретно.

Принцип запрета Паули – один из главнейших квантомеханических принципов – гласит, что на каждом энергетическом уровне атома в данном состоянии может находиться только один электрон, при этом, чем выше уровень электрона, тем большая энергия ему соответствует. Электрон с данной энергией может двигаться только по замкнутой орбите вокруг ядра.

Строго говоря, орбита в квантовой механике понятие довольно условное. Из-за несовершенства современной аппаратуры и ввиду невозможности четко зафиксировать положение электрона в атоме, можно лишь приближенно говорить о некоторой "размытой" орбите электрона, а ее замкнутость означает только то, что "в среднем" электрон находится на определенном расстоянии от ядра.

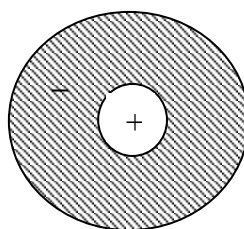


Рис 3. Условная схема атома водорода

Следует отметить, что и квантование энергии атома, и требование стационарности орбит связано с постоянной Планка. Отсюда делаем вывод:

Постоянная Планка и связанное с ней понятие элементарного кванта действия играют в квантовой физике фундаментальную роль при описании поведения микробъектов.

Принцип работы лазера.

Лазер (оптический квантовый генератор) – это замечательный пример практического применения умения электронов поглощать и излучать световые кванты. Это источник света, свойства которого резко отличаются от всех других источников (ламп накаливания, люминесцентных ламп, свечи и т.д.).

В настоящее время созданы лазеры, генерирующие излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн. За создание лазеров советские физики Н.Г. Басов и А. М. Прохоров вместе с американским физиком Чарльзом Таунсом в 1964 году получили Нобелевскую премию по физике.

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 (рис а).

- — невозбужденный атом с энергией E_i
- — возбужденный атом с энергией E_j

а) Поглощение



Из возбужденного состояния электрон всегда стремится вернуться в основное, поэтому время его пребывания в таком состоянии чрезвычайно мало — 10^{-8} с. Переход электрона на более низкий энергетический уровень сопровождается излучением кванта света. Такое самопроизвольное излучение принято называть **спонтанным** (рис б).

б) Спонтанное излучение



Однако существует и другой вид излучения, открытый А. Эйнштейном и называемый **вынужденным**, или **индуцированным**, или **стимулированным**. Индуцированное излучение происходит тогда, когда электрон, находящийся в *возбужденном* состоянии 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 в).

в) Вынужденное излучение



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

А теперь представить 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 этого атома, причем излученный фотон будет иметь такую же энергию и то же направление излучения, что и ударивший фотон. Таким образом, будут двигаться уже два одинаковых фотона. Один из этих фотонов 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. Таким образом, *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, т. е. излучение будет когерентным.

Рассмотренная схема получения когерентного (синхронного и синхфазного) излучения впервые была 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 (так как число фотонов, поглощенных невозбужденными атомами, будет превосходить число фотонов, излученных возбужденными атомами). Следовательно, для усиления света и получения когерентного излучения необходимо, чтобы число возбужденных атомов было больше числа атомов, 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 *инверсии населенности* энергетических уровней. При облучении вещества в этом случае 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 уровней называется *накачкой*. Методы накачки разнообразны и зависят от типа лазера (твердотельного, жидкостного, газового, полупроводникового и т.п.).

Рассмотрим процесс оптической накачки на примере трехуровневого рубинового лазера. Трехуровневым он называется 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 атома на этом уровне 10^{-3} с, что гораздо дольше, чем 10^{-8} с.

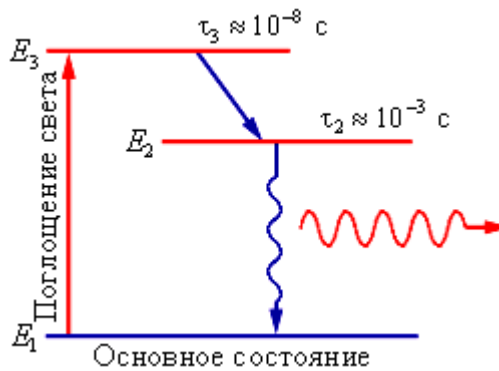


Рис 4. Трехуровневая схема оптической накачки.

Необходимость в наличии метастабильного уровня объясняется следующим: при оптической накачке атомы вещества сначала возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы–накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа 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, таким образом, требуемую *инверсию населенности*.

Однако, для нормального функционирования лазера такой процесс должен повторяться многократно и постоянно. Поэтому, для создания такого процесса активную среду помещают в оптический резонатор (систему, способную породить колебания определенной амплитуды и частоты), который представляет собой систему двух зеркал.

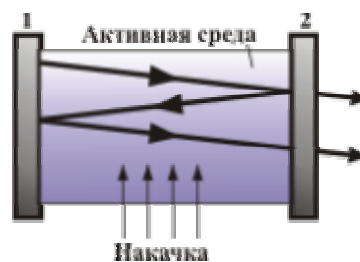


Рис 5. Принцип устройства лазера

В пространстве, заполненном активной средой, между двумя зеркалами, одно из которых полупрозрачное (на рисунке зеркало 2), движется поток излучаемых атомами фотонов от конца 1 к концу 2. *Большая часть* этого потока проходит через полупрозрачное зеркало и в виде когерентного луча излучается во внешнее пространство, а небольшая часть потока отражается, движется обратно.

В свою очередь эти фотоны вызывают вынужденный переход следующих 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.

Система зеркал (резонатор) позволяет выбрать преимущественное направление движения фотонов — вдоль оси, или точнее, под очень малыми углами к ней.

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 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. Такое излучение имеет ряд весьма важных особенностей.

Во-первых, очень малая расходимость лазерного излучения. Если, например, диаметр лазерного пучка 1 см, а длина волны 5×10^{-5} см, то угол расходимости составляет всего лишь $0,003^\circ$, то есть, фактически, получаем параллельный поток излучения. С помощью собирающих линз и зеркал лазерные лучи можно сфокусировать в точку размером 0,5 мкм (для видимого света). Если такой луч послать на Луну, то он высветит на её поверхности круг диаметром 30 м. Луч хорошего прожектора осветил бы поверхность диаметром 40 000 км.

Во-вторых, лазерное излучение обладает высокой монохроматичностью, т. е. практически излучение имеет одну единственную частоту и соответствующую ей одну единственную длину волны. Это объясняется тем, что у всех фотонов в лазерном пучке одинаковая энергия. Поэтому лазерное излучение занимает очень узкую полосу частот, примерно 10^{-3} Гц.

Третья особенность лазерного излучения состоит в том, что можно в широких пределах управлять длительностью излучения от сколь угодно длительных до сверхкоротких (всего лишь 10^{-14} - 10^{-15} с) импульсных вспышек. Импульсы света такой малой длительности имеют в пространстве ничтожно малую длину и огромную мощность. Современные лазеры излучают в одном 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 пучка может быть 10^{20} Вт/см² и более, и при этом напряженность электрического поля в луче достигает 10^{11} В/см. Под действием такого сильного поля у многих из веществ

происходит ионизация атомов: они расщепляются на электроны и положительные ионы

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 волоконно - оптических линиях связи для передачи и обработки большого объема информации. Наконец, применяя лазеры для нагрева плазмы, пытаются решить проблему управляемого термоядерного синтеза.

Корпускулярно-волновой дуализм элементарных частиц

Итак, мы уяснили, что свет представляет собой одновременно и частицу, и волну. В 1924 году французский ученый де Бройль распространил принцип квантово-волнового дуализма на *все* микрообъекты природы. Согласно де Бройлю, каждой частице, независимо от ее природы, следует поставить в соответствие волну, длина λ которой связана с импульсом p этой частицы. Согласно *де Бройлевской гипотезе о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма*, не только фотоны, но и все прочие частицы (электроны, протоны и т.д.) наряду с корпускулярными, обладают и волновыми свойствами, которые, в частности, должны проявляться в дифракции частиц. Просто когда мы изучаем свет, сначала бросаются в глаза его волновые свойства, а при более пристальном изучении – корпускулярные. При изучении же частиц любого рода наблюдается обратная картина.

В соответствии с известным соотношением Эйнштейна фотону с энергией $E = \hbar \cdot \nu$ соответствует энергия mc^2

$$mc^2 = \hbar \nu$$

здесь c - скорость света

ν - частота света.

Отсюда

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

Учитывая, что импульс фотона $p = mc$, а частота света ν связана с длиной волны λ соотношением: $\nu = 2\pi c / \lambda$ получим:

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

Данное уравнение является замечательной иллюстрацией двойственной природы света, поскольку связывает между собой длину волны света λ , то есть характеристику, 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.

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

где импульс частицы $p = m\nu$

m - масса частицы

ν - ее скорость

Гипотеза де Бройля впоследствии была подтверждена экспериментально. В частности, в опыте американских физиков К. Дэвидсона и Л. Джермера в 1927 году была обнаружена дифракция элементарных частиц – электронов. В данном опыте электроны, ускоренные электрическим полем напряжением в 100В, отражались от поверхности кристалла никеля. Позднее советский ученый Тартаковский в опытах по дифракции электронов, проходящих через тонкую металлическую фольгу, доказал, что волновые свойства присущи не только пучкам электронов, но и каждому электрону в отдельности.

Человеку, привыкшему к законам макромира обычно бывает трудно представить себе волновую природу электрона, как и другой элементарной частицы. Нам удобнее представлять себе электрон в виде воображаемого шарика в миниатюрной солнечной системе. Тем не менее, такое представление годится только для первоначального знакомства с понятием межатомных взаимодействий, и не подходит для дальнейшего изучения основ 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 виды резонаторов, могут колебаться только на определенной частоте. Поэтому, говоря об электронных орбитах, следует иметь в виду различные "моды", то есть виды колебаний. Меняя моду, электрон излучает световую волну с характерной частотой, зависящей от конкретного перехода.

Приведем еще одну аналогию, которая поможет преодолеть барьер недопонимания относительно волновой природы электрона. Вообразим серию волн, набегающих на пологий берег. Скорость этих волн вполне определенная и ее можно вычислить, зная время и расстояние между двумя последовательными

гребнями. Волна, однако, не особенно локализована, она занимает большое пространство. Электрон, скорость которого нам хорошо известна, в отличие от положения, которое мы знаем очень плохо, можно представить в виде волны такого типа.

Фундаментальные, принципиально непреодолимые квантовые пределы точности измерений

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

Датским физиком Нильсом Бором был сформулирован один из основополагающих принципов квантовой механики – так называемый *принцип дополненности*, согласно которому получение экспериментальной информации об одних физических величинах микрообъекта неизбежно связано с потерей информации о некоторых других величинах, дополнительных к первым. Фактически, суть таких взаимно дополнительных величин описывается *соотношением неопределенностей Гейзенберга*, которое утверждает следующее: *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 значения *координаты* частицы, а Δp – неопределенность значения *проекции импульса* частицы P на ось X , то произведение этих неопределенностей должно быть по порядку величины 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, если $\Delta p \rightarrow 0$, то $\Delta x \rightarrow \infty$

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 координату "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, тем не менее, она весьма показательна.

Рассмотрим еще несколько примеров на эту тему. Допустим, нам требуется определить координату Δx и импульс Δp электрона. Зная то, что электрон обладает волновыми свойствами, мы даже интуитивно чувствуем, что волна – это ускользающий объект, который "не дается в руки". Чтобы определить местонахождение электрона Δx последний должен рассеять хотя бы один фотон – иначе электрон не зафиксируешь. 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 по порядку величины 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?

Скажем сразу, что 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 невозможно. Во-вторых, неопределенность, предсказанная Гейзенбергом, уменьшается с увеличением массы рассматриваемого объекта, пока не становится совершенно незаметной в случае макроскопических тел.

Итак, мы убедились, что:

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

Вслед за Бором, принцип дополнительности часто объясняют влиянием измерительного прибора на состояние микрочастицы. С одной стороны, это оправданно, поскольку большинство измерительных приборов так или иначе является макроскопическими, грубыми по отношению к размерам квантовых объектов. Понятно, что чем технически несовершеннее измерительный прибор, 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. Например, измеряя длину стержня, я прикладываю к нему линейку, тем самым, воздействуя на него и, следовательно, изменяя его свойства, в том числе и длину.

Даже когда мы определяем силу тока в цепи с помощью амперметра, в идеале нужно изолировать от всех внешних факторов, например, в том числе делать это 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 нормальный человек не станет учитывать подобные тонкости в макромире, но когда речь идет о квантовом пространстве без этого просто не обойтись.

Классические и квантовые размерные эффекты

В нашей вводной лекции мы познакомились с понятием ультрадисперсности и убедились, что с уменьшением размера частиц какого-либо вещества могут существенно меняться его физические и химические свойства. 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 происходят - 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 сделать это легче мотоциклисту, а не водителю тяжелого КАМАЗа.

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

В зависимости от размеров исследуемого образца различают классические и квантовые размерные эффекты, которые могут влиять практически на любое физическое или химическое свойство вещества. Понятно, что для нанометровых объектов, где размеры частиц сравнимы с де Бройлевской длиной волны электрона, характерны именно квантовые размерные эффекты, определяющие такие свойства вещества, как теплоемкость, электропроводность некоторые оптические свойства и т.п.

Туннельный эффект

Самым ярким представителем квантовых размерных эффектов является туннельный эффект — явление, играющее важную роль и в нанопроцессах, и в нанотехнологиях, и в наноинструментарии. Сущность туннельного эффекта заключается в преодолении микрочастицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера. Это явление чисто квантовое, так как *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.

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

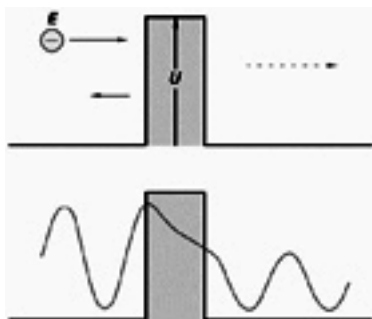


Рис 6. Условная схема туннельного перехода

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

Волновая функция и вероятностный характер поведения квантовых объектов

Классическая механика Ньютона решает задачи, в которых физическая система может быть описана однозначно и достоверно, поскольку человечеству уже известны все необходимые для этого законы макромира. Квантовой же механике приходится иметь дело с объектами, изучение которых ограничено принципом неопределенности, описанным выше.

Если в классическом мире мы выбираем некоторый переменный объем dV и решаем задачу поиска местонахождения частицы (например, решаем задачу нахождения телевизора в комнате), то для получения точного решения в этом случае имеются только две вероятности:

- либо частица находится в данном объеме (вероятность нахождения частицы равна 1)
- либо частицы нет в данном объеме (вероятность нахождения частицы равна 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 той же 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 более вероятно обнаружить в нем искомую частицу. (Если, например, заранее известно, что телевизор находится в комнате, то, увеличивая объем той части комнаты, в котором 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 в этой формуле $|\psi|^2$ – 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" эта функция получила потому, что уравнение, определяющее эту функцию (уравнение Шрёдингера, о котором речь пойдет далее), внешне похоже на уравнение, описывающее волновые процессы (функция типа Sin, Cos или, в общем виде, экспонента). 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.

Для того, чтобы обеспечить понимание волновой функции, нам необходимо познакомиться с основными положениями 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 с нами в повседневной жизни и влияющих на наши решения и поступки. Философу Леониду Ионину принадлежат замечательная фраза: "Биография человека определяется тысячью случайностей: случайностью места и времени рождения, случайностью родителей, случайностью школы, вуза, места работы. Выбор профессии всегда случаен... тысячи случайностей определяют течение жизни".

Теория вероятностей не занимается предсказанием того, произойдет или не произойдет какое-то реальное событие. Она предлагает математический аппарат для анализа и прогнозирования *вероятности* его появления. Предмет изучения теории вероятностей – это объективные вероятностные закономерности случайных событий, существующие объективно, то есть вне зависимости 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. Так, исходными понятиями здесь являются понятия "случайное событие" и "испытание" (опыт, эксперимент).

Случайное событие – это явление, или процесс, или факт, которое при одних и тех же условиях может или произойти, или не произойти. Обычно обозначаются прописными латинскими буквами – A, B, C, D и т.д.

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

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

| № | Испытание | События |
|---|----------------------------|--|
| 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 |

Говоря об испытании, в теории вероятностей обычно подразумевается не какой-то реальный опыт, а *мысленный эксперимент*, то есть мысленной моделирование той или иной ситуации.

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

A – "Выпадение какой-либо стороны монеты" будет достоверным, а B – "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. В рамках данного курса 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 событию 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 могут быть реализованы на практике: иногда приходится решать задачи, в которых число исходов постоянно меняется или бесконечно велико. Кроме того, далеко 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, очевидно, что 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 число, примерно равное частоте 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 числу 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 вводятся понятия функции *плотности распределения вероятности* $p(x)$ вид 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:

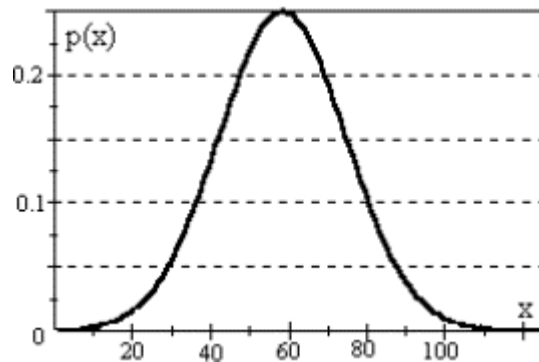


Рис 7. График функции плотности вероятности при нормальном распределении

Следующий пример наглядно иллюстрирует данный закон распределения: предположим, мы высыпая мешок гороха на пол, держа его в одном и том же вертикальном положении. В принципе, после этого существуют некоторая вероятность обнаружить какую-нибудь горошину в любом месте комнаты, закатись она даже в самый дальний угол. Однако, вероятность обнаружения горошины 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 стреляющие стреляют не просто так, наобум, а прилагая все усилия, чтобы попасть в "яблочко", то вероятность обнаружения следа от пули будет возрастать с приближением к центру мишени.

Но "вернемся к нашим баранам". Мы остановились на том, что 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 определяет место ее нахождения в точке с координатами x, y, z .

В атоме водорода, единственный электрон как бы образует вокруг ядра электронное облако – облако отрицательного заряда, плотность которого в данной области внутри атома характеризует вероятность нахождения там электрона.

Итак, мы усвоили третью важную особенность квантовой механики:

Поведение частиц носит вероятностный характер, описываемый волновой функцией

Чтобы определить волновую функцию частицы для конкретной задачи физики решают **уравнение Шредингера**. Дело в том, что волновая функция описывает движение частицы безотносительно к воздействию каких-либо внешних сил. Однако, в природе микрочастицы движутся, как правило, в некотором электромагнитном поле. Уравнение Шредингера как раз и учитывает влияние электромагнитных сил на движение элементарной частицы. Это дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка. Его решение потребует знаний, которые не может обеспечить школьная программа по математике, поэтому мы не будем приводить его в нашем курсе. Заметим лишь то, что для квантового мира уравнение Шредингера играет ту же роль, что законы Ньютона для мира классического при описании состояния любой физической системы.

Почему нельзя смешивать законы классической и квантовой физики

В квантовой механике широко используется **принцип суперпозиции** – допущение, согласно которому если квантомеханическая система может находиться в различных состояниях, описываемых, соответственно, волновыми функциями $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_m$, то физически допустимой будет и суперпозиция (суммирование, наложение) этих состояний, то есть состояние, изображаемое волновой функцией

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

то есть любая сложная волновая функция может быть представлена в виде совокупности нескольких более элементарных 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 чисто 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 таких противоречий демонстрирует предложенный Э.Шредингером парадокс, который получил название "*парадокса кошки*":

Пусть в замкнутой системе, ограниченной некоторым непроницаемым "ящиком", находится кошка. На кошку направлен ствол заряженного пулей ружья (см. рис). И ружье и кошка – это классические объекты. Запустим теперь в этот ящик движущуюся микрочастицу, обладающую волновыми свойствами. При попадании этой квантовой частицы в курок ружья, ружье стреляет, и кошка погибает.

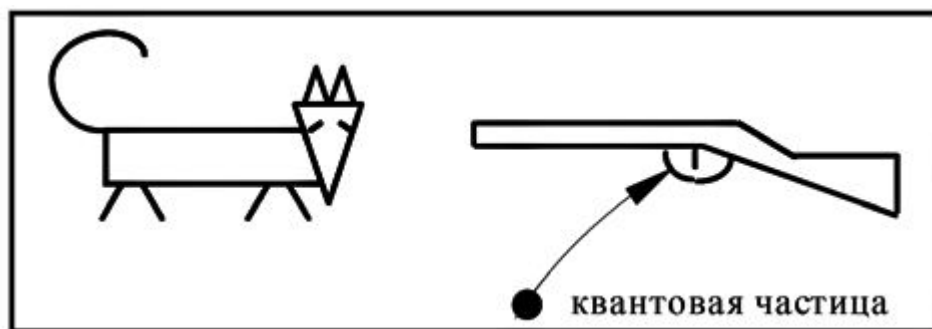


Рис 9. Кошка Шредингера в непроницаемом ящике

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

Есть другое состояние частицы, описываемое волновой функцией Ψ_2 . В этом квантовом состоянии вероятность нахождения частицы в области вблизи курка ружья велика и практически равна единице. Неудивительно, что 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, естественно, возникает коварный вопрос: *Жива или мертва кошка в состоянии микрочастицы, описываемом волновой функцией?*

Ведь кошка не может находиться в состоянии, которое является суперпозицией жизни и смерти (то есть одновременно быть не живой, не 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 однозначного ответа, что кошка мертва, не могло быть. Неужели мы убили кошку тем, что открыли ящик?

На все поставленные вопросы нет ответов только потому, что была рассмотрена некорректная система, которая формально объединяла 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, микросекунды и т.д. к величинам порядка нано (10^{-9}) – нанометр, наноампер, наносекунды и т.д. Такой переход требует контроля основных единиц измерения физических величин системы СИ и обеспечение реализации эталонов основных единиц.

Система единиц физических величин строится на основе физических теорий, отражающих существующих в природе взаимосвязь между физическими величинами. При определении единиц системы выбирается такая последовательность физических соотношений, в которой каждое следующее выражение содержит только одну новую физическую величину.

Это позволяет определить единицу физической величины через совокупность ранее определенных единиц, и, в конечном счете, через основные (независимые) единицы системы. В качестве *основных* выбирают единицы, 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 или измерительные комплексы, 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.

1. Эталон метра. Согласно принятому в 1960 году Генеральной конференцией по мерам и весам определению метр – это длина, равная $1650763,73$ длины волны излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнем $2p_{10}$ и $5d_5$ 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.

2. Атомная секунда, воспроизводимая цезиевыми эталонами частоты и времени, равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия $^{133}_{55}\text{Cs}$. Данный эталон позволяет воспроизводить время с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-12}$ секунды.
3. Эталоны, основанные на эффекте Джозефсона. Суть эффекта состоит в протекании сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Эффект предсказал теоретически английский студент-физиком Б. Джозефсон в 1962 г., за что в 1973 г. он получил Нобелевскую премию. А экспериментальное подтверждение эффекта Джозефсона произошло в 1963 г. Эффект позволяет чрезвычайно точно измерять слабые магнитные поля (до 10^{-18} Тл), малые токи (до 10^{-10} А) и напряжение (до 10^{-15} В).

Другие эталоны системы СИ не связаны с квантовыми эффектами, поэтому в данном курсе рассматриваться не будут.

Квантовые точки, проволоки и плоскости

Одно из промышленных и коммерческих применений нанотехнологий, несомненно, связано со сверхрешетками (квантовыми плоскостями).

Квантовая плоскость – это многослойная твердотельная структура, состоящая 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 сверхрешетки, что позволяет произвольным образом менять физические и химические свойства таких веществ.

Пионером в области создания приборов на сверхрешетках явился 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 в монокристалле из любого

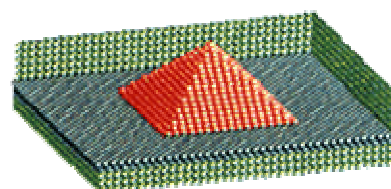


Рис 10. Модель квантовой точки

материала. Их еще называют "искусственными атомами", так как размер одной квантовой точки составляет единицы - десятки нанометров. 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 уже существуют, пока, правда, только в лабораторном варианте. Тем не менее, они прекрасно работают, подтвердив 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 сотрудники 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 блюдец, 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, что позволяет 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 искусственные квантовые точки привлекают все большее внимание ученых. Электрон в квантовой точке локализован, 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, 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 *собственный момент вращения*, который называется *спином* (от англ. "spin" – вращение). 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).

Наличие соответствия между знаком спина электрона, с одной стороны, и логическими переменными (нулями и единицами) - с другой, само по себе 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 ограничено во всех трех направлениях, и энергетический спектр является полностью дискретным, как в отдельно взятом атоме.

Таким образом, дискретность электронных состояний в квантовой точке и наличие у электрона собственного вращательного момента – спина – могут быть использованы при конструировании сверхминиатюрных логических элементов, которые в скором времени, будем надеяться, станут основой нового поколения ЭВМ.

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, как и Шредингер и де Бройль, которые были творцами новой механики, высказывались против понимания сущности теории на основе принципа неопределенности.

Но в своей работе физики всегда имеют дело с несовершенными теориями, справедливыми только для ограниченного круга явления, 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, скорее всего, также описывались лишь в терминах вероятности.

В настоящее же 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, приоткрыв перед людьми завесу неопределенности, скрывающую сегодня тайны квантового мира.