

Курс лекций «Основы нанотехнологии» (Лекции – 30 ч.)

Лекция 1.

Введение

Приставка нано- (*от греческого NANNOΣ - карлик, гном*) вообще означает одну миллиардную (10^{-9}) чего-либо. Нанотехнология имеет дело с разнообразными структурами вещества, характерный размер которых - порядка миллиардных долей метра. Хотя слово нанотехнология является относительно новым, устройства и структуры нанометровых размеров не новы. На самом деле они существуют на Земле столько же, сколько существует сама жизнь. Моллюск морское ушко выращивает очень прочную, переливающуюся изнутри раковину, склеивая прочные наночастицы мела особой смесью белков с углеводами. Трещины, появляющиеся снаружи, не могут распространяться в раковине из-за наноструктурированных кирпичиков. Раковины являются природной демонстрацией того, что структуры, сформированные из наночастиц, могут быть намного прочнее материала, однородного в объеме. Как и почему наноструктурирование может дать более прочные материалы, будет обсуждаться в данном курсе.

В точности неизвестно, когда человек впервые начал использовать преимущества наноразмерных материалов. Есть сведения, что в четвертом веке нашей эры римские стекловары делали стекло, содержащее наночастицы металлов. Изделие этой эпохи, называемое чашей Ликурга, находится в Британском Музее. Чаша, изображающая смерть короля Ликурга, сделана из стекла на основе натровой извести, содержащего наночастицы серебра и золота. Цвет чаши меняется с зеленого на темно-красный при помещении в нее источника света. Огромное разнообразие прекрасных цветов витражей в средневековых храмах объясняется присутствием металлических наночастиц в стекле.

Потенциальная важность маленьких частичек - кластеров была осознана ирландским (по рождению) химиком Робертом Бойлем и обсуждена в его труде «Химик-скептик» в 1661 году. В нем Бойль критикует воззрения Аристотеля на материю, состоящую из четырех первооснов: земли, огня, воды и воздуха. Вместо этого он предполагает, что крошечные частички вещества соединяются разными способами и образуют таким образом то, что он называл корпускулами. Он описывает их как «крошечные массы, или кластеры, которым тяжело быстро разложиться на составляющие их частицы».

Фотография, зрелая и продвинутая технология, развитая в XVIII-XIX вв., основывается на образовании наночастиц серебра под действием света. Фотопленка - это эмульсия галогенида серебра, например, бромида серебра в желатине, нанесенная на основу из прозрачного ацетата целлюлозы. Свет разлагает галогенид серебра с образованием наночастиц чистого серебра, которые и являются пикселями изображения. В конце XVIII века английские ученые Томас Уэджвуд и сэр Хэмпфри Дэви смогли получить изображение, используя нитрат и хлорид серебра, но эти изображения не были долговременными. Множество французских и английских ученых работало над этой проблемой в XIX веке, в том числе Дагер, Ньепс, Толбот, Арчер, Кеннет. Интересно, что Джеймс Клерк Максвелл, создавший теорию электромагнитного поля, получил в 1861 году первую цветную фотографию. Около 1883 года американский изобретатель Джордж Истмэн, основавший впоследствии корпорацию «Кодак», сделал пленку из длинной бумажной полоски, покрытой галогенидом серебра. Потом он усовершенствовал пленку, сделав ее гибкой. Возможность скручивать пленку в рулон сделала фотографию широкодоступной. Таким образом, технология, основанная на использовании наноразмерных материалов, на самом деле не так уж нова.

В 1857 году Майкл Фарадей опубликовал статью в «Философских Трудах Королевского Общества», в которой он предпринял попытку объяснить, как металлические включения в витражном стекле влияют на его цвет, но первым объяснение зависимости цвета стекла от вещества металлических включений и их размера смог дать Густав Ми в работе, опубликованной в 1908 году в «Анналах Физики» в Лейпциге.

Ричард Фейнман был награжден Нобелевской премией в 1965 году за создание теории

квантовой электродинамики, предмета весьма далекого от нанотехнологии. Фейнман был также чрезвычайно одаренным и ярким учителем и лектором. Он считается одним из величайших физиков-теоретиков своего времени. Его интересы простирались очень широко, от игры на барабанах бонго до попыток расшифровки письменности майя. Можно составить свое представление о широте его интересов и остроумии, прочитав его замечательную автобиографическую книгу «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман». В 1959 году на собрании Американского Физического Общества он прочитал провидческую и пророческую лекцию под названием «*Там внизу еще очень много места*», где фантазировал на тему вероятности создания и потенциальных возможностей наноразмерных материалов. Он представлял себе гравирование линий шириной в несколько атомов посредством электронного пучка, предсказав таким образом осуществление электроннолучевой литографии, используемой сегодня для изготовления кремниевых чипов. Он предлагал манипулирование отдельными атомами для создания новых малых структур с очень разными свойствами (это, в самом деле, было недавно реализовано посредством сканирующего туннельного микроскопа). Он мысленно видел создание электрических цепей нанометровых масштабов для использования их в более мощных компьютерах. Как и многие современные исследователи в этой области, он осознавал существование наноструктур в биологических системах. Множество фейнмановских измышлений стало реальностью, однако его идеи не нашли отклика у ученых того времени. Возможно, из-за его репутации любителя пошутить, реакцию многих слушателей на услышанное лучше всего можно описать словами заглавия той самой книги, «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман». Сейчас среди исследователей в области нанотехнологии эта лекция, разумеется, является легендарной, но, как сказал один ученый, «она была столь провидческой, что не доходила до людей, пока до нее не дошла технология».

Были и другие провидцы. У Ральфа Ландоера, работавшего в 1957 году на IBM, были идеи о наномасштабной электронике. Он понимал важную роль, которую могут играть квантово-механические эффекты в таких устройствах.

Хотя Фейнман представил свою лекцию-предвидение в 1960 году, и в 50-х, и в 60-х годах проводились эксперименты на мелких металлических частицах. Тогда это не называлось нанотехнологией, да и не являлось ею по большому счету. Ухлир сообщил о первом наблюдении пористого кремния в 1956 году, но интерес к нему появился только после того, как в 1990 году в этом материале обнаружили фотолюминесценцию (флюоресценцию) при комнатной температуре. Другая работа того времени была связана с созданием наночастиц щелочных металлов посредством испарения натрия или калия с последующим осаждением на более холодной подложке. В 60-х годах были получены ферромагнитные жидкости, состоящие из наночастиц ферромагнетика, диспергированных в жидкости. Частицы создавались помолком в шаровой мельнице с жидкостью в присутствии поверхностно активного вещества. Другим активно развивавшимся в 60-е годы направлением был электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) электронов проводимости в металлических частицах наноразмеров, называемых в то время коллоидами. Частицы создавались посредством теплового разложения и облучения твердых тел с положительными ионами металлов и отрицательными молекулярными ионами (такими как азиды натрия и калия). В самом деле, тепловое разложение таких веществ является одним из методов получения наночастиц. Особенности структуры металлических наночастиц, такие как существование магических чисел, были обнаружены в 70-х годах при масс-спектропии в натриевых пучках. Херман с соавторами измерили ионизационный потенциал кластеров натрия в 1978 году и наблюдали его зависимость от размера кластера, что привело к созданию модели желе для кластеров.

Исследователи Bell Laboratories и IBM в начале 70-х годов создали первые двумерные квантовые ямы посредством выращивания тонких (эпитаксиальных) пленок, что позволяет формировать одноатомные слои полупроводника. Эта работа положила начало развитию промышленных методов получения нуль-мерных квантовых точек, которые в настоящее время развились в коммерческую технологию.

Однако только с появлением соответствующих методов формирования наноструктур в 80-х годах активность на этом поприще существенно возросла, что и привело к получению множества важных результатов. В 1981 году был реализован способ получения малых

металлических кластеров, использующий высокоэнергетичный сфокусированный лазерный луч для создания горячей плазмы при испарении металла. Поток гелия охлаждал пар, конденсируя атомы металла в кластеры разных размеров. В 1985 году этот метод был использован для получения фуллерена C_{60} . В 1982 году двое российских ученых, Екимов и Омущенко, сообщили о первом наблюдении квантовой локализации. В этом же десятилетии Г.К. Биннигом и Х. Роером был создан сканирующий туннельный микроскоп, за что в 1986 году им была вручена Нобелевская премия. Изобретение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) и атомно-силового микроскопа (АСМ), дало новые важные средства наблюдения, изучения и атомного манипулирования в нанообъектах.

В 1987 году Б.Дж. ван Вис и Н. ван Хутен из Нидерландов наблюдали ступени на вольтамперных характеристиках точечных контактов. Подобные ступени наблюдали и Д. Варам и М. Пеппер в Кембридже. Это были первые наблюдения квантования проводимости. В это же время Т.А. Фултон и Г.Дж. Долан из Bell Laboratories создали первый одноэлектронный транзистор и наблюдали кулоновскую блокаду. Этот период отмечен развитием методов создания малых структур, таких как электронно-лучевая литография, дающая возможность делать 10-нанометровые структуры. Также в этом десятилетии были получены многослойные материалы с чередующимися магнитными и немагнитными слоями, демонстрирующие удивительные свойства гигантского магнетосопротивления. Эти материалы со слоями нанометровой толщины имеют важное применение для создания новых запоминающих устройств на магнитной основе.

Хотя концепция фотонных кристаллов возникла у теоретиков в конце 80-х годов, первый трехмерно периодический фотонный кристалл с совершенной запрещенной зоной (щелью) был изготовлен Яблоновичем в 1991 году. В 90-х годах Ижима получил углеродные нанотрубки, в фуллеренах C_{60} были открыты сверхпроводимость и ферромагнетизм, начаты попытки создания молекулярных переключателей и измерения электропроводности отдельных молекул, продемонстрирован полевой транзистор на углеродной нанотрубке (все вышеперечисленные открытия будут обсуждаются в этом курсе лекций). Интенсифицировалось изучение процессов самосборки молекул на металлической поверхности. Самосборкой называется самопроизвольное образование связей между молекулами и металлической подложкой с образованием упорядоченных структур молекул на ее поверхности. Наиболее широко исследовалась самосборка тиоловых и дисульфидных соединений на золоте.

В 1996 году группа правительственных учреждений США под началом Национального Фонда Науки организовала изучение текущего мирового состояния нанонауки и нанотехнологии, направлений и перспектив ее развития. Результатом деятельности группы явились детально разработанные рекомендации по развитию этой области знаний. Принимая во внимание эти рекомендации, правительство США начало щедро финансировать такие работы и сформировало долговременную государственную программу под названием «Национальная нанотехнологическая инициатива». Рис. 1.1 показывает увеличение финансирования нанотехнологии правительством США и планируемый рост согласно плану Национальной Нанотехнологической Инициативы. Это исследование позволило сделать два обобщения.

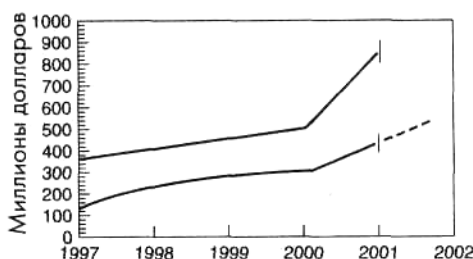


Рис. 1.1. Финансирование исследований по нанотехнологии по годам: верхняя линия отражает затраты правительств других стран, нижняя - правительства США.

Первым является то, что при наноструктурировании материалы могут получать новые свойства и необычные характеристики. В основе такого поведения лежит тот факт, что с каждым свойством вещества связана **характеристическая, или критическая длина**.

Например, электросопротивление вещества возникает в результате рассеяния электронов проводимости на колеблющихся атомах или примесях. Оно характеризуется длиной свободного пробега, то есть средним расстоянием, пролетаемым электроном между двумя отклонениями от прямолинейной траектории. Основные физические и химические свойства меняются, когда размеры твердых тел становятся сравнимыми с характеристическими длинами, большинство из которых лежит в нанометровом диапазоне. Один из наиболее важных примеров такого поведения демонстрируют частицы полупроводника с размерами порядка квантовой длины волны электрона или дырки в зоне проводимости. Это основа квантовых точек, одной из весьма развитых нанотехнологии, лежащей в основе лазеров на квантовых точках, использующихся сейчас для чтения компакт-дисков (CD).

Если размеры трехмерной наноструктуры имеют порядок нанометра только в одном измерении, такая структура называется **квантовым колодезцем**. Его электронная структура сильно отличается от таковой у образцов, имеющих нанометровые размеры по двум измерениям и называемых **нанопроволоками**. **Квантовые точки имеют** нанометровые размеры по всем трем измерениям. Зависимость электронных свойств от размера приводит к существенным изменениям оптических характеристик нанообразцов и их колебательных свойств.

Второе наблюдение правительственной комиссии США касается того факта, что этим полем деятельности занимается множество разных отраслей знаний. Работы по нанотехнологии можно найти как на университетских отделениях физики, химии, экологии, так и на отделениях инженерных дисциплин, таких как электротехника, механика, химическая технология. Междисциплинарная природа этой области исследований несколько осложняет понимание и использование исследователями в одном из разделов нанонауки результатов, полученных в другом разделе. Как верно заметил Фейнман, биологические системы производят функционирующие наноустройства начиная с самого возникновения жизни, и мы можем почерпнуть из биологии много новых идей об их создании. Но как может физик-твёрдотельщик или материаловед, занимающийся созданием наноустройств, но не видящий разницы между белком и аминокислотой, искать идеи в биологических системах?

Область нанотехнологии слишком велика, касается слишком многих дисциплин и слишком быстро меняется. Потенциал практического использования наноструктурированных материалов безусловно является главной причиной повышенного интереса к предмету. Уже существует множество коммерческих применений разработок в этой области. Например, начато коммерческое использование гигантского магнетосопротивления наноструктурированных материалов. Наноструктурирование носителя для увеличения плотности записи на магнитную ленту в настоящее время активно изучается. Еще одна область повышенной активности - это приложение нанотехнологии к уменьшению размеров триггеров, являющихся базовыми элементами компьютера. В частности, проводятся исследования, направленные на получение молекулярных триггеров наноразмеров. Другая потенциальная область применения открывается при использовании наноструктурирования для изменения механических свойств материалов, например, получение наноматериалов компактированием наноразмерных зерен. Их механические свойства существенно отличаются от однородного образца, например, повышается предел текучести.

Создание широкомасштабных недорогих методов получения наноструктурированных материалов - это одна из наиболее сложных ключевых задач, стоящих перед нанонаукой, так как ее решение необходимо для технологического использования полученных результатов. Например, однослойные углеродные нанотрубки имеют огромное количество потенциальных применений, простирающихся от датчиков концентрации газов до триггеров в быстрых компьютерах. Однако для технологического воплощения этих идей еще необходимо придумать метод производства нанотрубок в больших количествах.

Михаэль Руке, работающий в области наноэлектромеханических устройств, сформулировал еще несколько. Одна большая проблема относится к взаимодействию макро- и наноустройств. Например, собственная частота колебаний жесткого стержня увеличивается при уменьшении размеров стержня. Для наноразмеров частоты могут достигать 10 ГГц, а

амплитуда колебаний лежать в диапазоне пикометров (10^{-12}) или фемтометров (10^{-15}). Сенсор должен быть способным обнаруживать такие малые смещения и работать на таких высоких частотах. Оптические отклоняющие системы, подобные используемым в сканирующем туннельном микроскопе, не будут работать из-за дифракционного предела, становящегося проблемой при приближении размера отражателя к длине волны отражаемого света. Другое существенное препятствие, которое необходимо будет преодолеть, состоит во влиянии поверхности на наноструктуры. У кремниевого стержня длиной 100 нм и толщиной 10 нм почти 10% атомов находятся в приповерхностном слое. Такое количество приповерхностных атомов существенно повлияет на механические свойства стержня (прочность, гибкость и т.д.), хотя и не вполне понятным ныне образом.

Таким образом, в последние несколько лет нанотехнология стала рассматриваться не только как одна из наиболее многообещающих ветвей высокой технологии, но и как системообразующий фактор экономики 21 века - экономики, основанной на знаниях, а не использовании природных ресурсов или их переработке. Помимо того, что нанотехнология стимулирует развитие новой парадигмы всей производственной деятельности («снизу-вверх» – от отдельных атомов к изделию, а не «сверху-вниз», как традиционные технологии, в которых изделие получают путем отсечения излишнего материала от более массивной заготовки), она сама является источником новых подходов к повышению качества жизни и решению многих социальных проблем в постиндустриальном обществе. По мнению большинства экспертов в области научно-технической политики и инвестирования средств, начавшаяся нанотехнологическая революция охватит все жизненно важные сферы деятельности человека (от освоения космоса -до медицины, от национальной безопасности -до экологии и сельского хозяйства), а ее последствия будут обширнее и глубже, чем компьютерной революции последней трети 20 века.

1.1. Чему соответствует единица «нано»?

В последнее время термин «нанотехнология» (сокращенно нанотэк) стал очень популярным. Он объединяет разнородные представления и подходы, а также разные методы воздействия на вещество. Поэтому, прежде чем перейти к описанию собственно нанотехнологий, следует очень кратко пояснить, о каких объектах и размерах пойдет речь в предлагаемом курсе. Легко заметить, что название новой науки возникло просто в результате добавления к весьма общему понятию «технология» приставки «нано», означающей изменение масштаба в 10^{-9} (миллиард) раз, т. е. 1 нанометр = 1 нм = 10^{-9} м, что составляет одну миллионную привычного нам миллиметра (для наглядности можно указать, что 1 нм примерно в 100 тысяч раз меньше толщины человеческого волоса). Разумеется, человеческое воображение и используемые нами слова, образы или термины почти не способны сколько-нибудь адекватно описывать «мир» со столь крошечными объектами.

В табл. 1.1 приведены размеры некоторых известных естественных и искусственных созданий природы в диапазоне размеров от 10 метров до 1 ангстрема.

Напомним, что 1 ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) в 10 раз меньше нанометра и соответствует диаметру самого маленького из атомов (атома водорода). К нанотехнологии принято относить процессы и объекты с характерной длиной от 1 до 100 нм. Верхняя граница нанообласти соответствует минимальным элементам в так называемых БИС (больших интегральных схемах), широко применяемым в полупроводниковой и компьютерной технике. С другой стороны, интересно, что многие вирусы имеют размер 10 нм, а 1 нм почти точно соответствует характерному размеру белковых молекул (в частности, радиус знаменитой двойной спирали молекулы ДНК равен именно 1 нм).

Таким образом, нанотехнология как бы объединяет все технические процессы, связанные непосредственно с атомами и молекулами. Именно поэтому она представляется весьма перспективной для получения новых конструкционных материалов, полупроводниковых приборов, устройств для записи информации и т. д., для применения в медицине биологии и многих других областях.

1.2. Что такое нанотехнология?

Нанотехнологию можно определить как набор технологий или методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами (т. е. методик регулирования структуры и состава вещества) в масштабах от 1 до 100 нм. Использование характерных особенностей веществ на расстояниях порядка нанометров создает дополнительные, совершенно новые возможности для создания технологических приемов, связанных с электроникой, материаловедением, химией, механикой и многими другими областями науки. Получение новых материалов и развитие новых методик обещает, без преувеличения, произвести настоящую научно-техническую революцию в информационных технологиях, производстве конструкционных материалов, изготовлении фармацевтических препаратов, конструировании сверхточных устройств и т. д.

Классическим примером достижений нанотехнологий стала разработка сканирующих туннельных микроскопов (СТМ). Первый такой микроскоп был создан в лаборатории фирмы IBM Бихи и Роллером для исследования особенностей и неоднородностей поверхности монокристаллов кремния. Рассмотрим общие представления о принципе действия СТМ (рис. 1.2). Экспериментатор подводит тончайший золотой щуп (зонд, пробник) на расстояние около 1 микрона (10^{-6} м) к поверхности исследуемого образца, в результате чего между зондом и поверхностью возникает электрический ток, обусловленный квантово-механическим туннельным эффектом, величина которого меняется в зависимости от состояния изучаемой

поверхности (например, из-за наличия на поверхности впадин или выступов). Замеряя величину туннельного тока или, наоборот, сохраняя ее постоянной (за счет регулирования потенциала зонда), экспериментатор может «сканировать» поверхность и получать ее прямое «изображение», подобно тому, как электронный луч создает изображение, сканируя поверхность экрана обычного телевизора. Этот метод позволяет не только изучать атомарную структуру поверхности, но и проводить разнообразные и весьма ценные физические эксперименты (например, можно проверять теоретические расчеты, относящиеся к изменению поверхности в определенных условиях и т. п.).

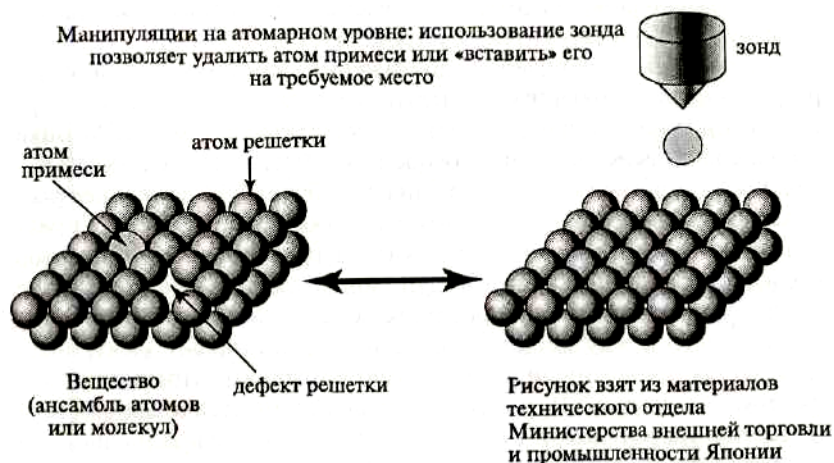


Рис.1.2. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)

Работая со сканирующим микроскопом описываемого типа, экспериментаторы неожиданно вышли на следующий этап развития, а именно стали проводить прямые технологические операции на атомарном уровне. Прикладывая к зонду СТМ соответствующее напряжение, его можно использовать в качестве своеобразного атомного «резца» или гравировального инструмента. Впервые это удалось сделать сотрудникам Армаденской лаборатории IBM под руководством Д. Эйглера, которые сумели выложить на поверхности монокристалла никеля название своей фирмы (IBM) из 35 атомов ксенона, как показано на фотографии внизу рис. 1.3. Это стало своеобразным рекордом в методах миниатюризации записи «текста». Позднее, в 1991 году из этого выросла методика перемещения атомов ксенона вверх-вниз (относительно поверхности монокристалла), названная атомным переключением (atomic switch). В целом, описанная техника создает много возможностей как для манипуляций на уровне отдельных атомов, так и для изучения их структур и поведения.

Пример обработки вещества при помощи сканирующего туннельного микроскопа. На фотографии изображены самые маленькие буквы на свете (надпись из 35 атомов ксенона образует название фирмы IBM)

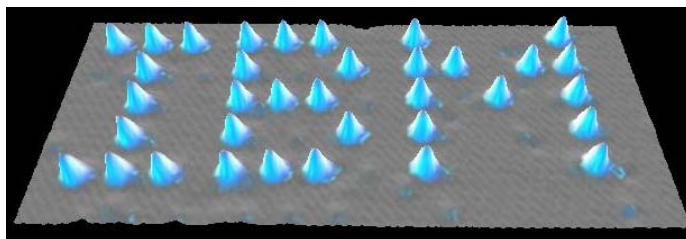


Рис.1.3. Возможности нанотехнологии при манипуляции на уровне атомов

1.3. Как возникла нанотехнология?

Нанотехнология возникла из-за революционных изменений в информатике!

В 1947 году был изобретен транзистор, после чего началась эпоха расцвета полупроводниковой техники, при которой размеры создаваемых кремниевых устройств постоянно уменьшались (интегральные схемы, большие интегральные схемы, сверхбольшие интегральные схемы, и т.д.). С другой стороны, одновременно непрерывно возрастали быстродействие и объем магнитных и оптических запоминающих устройств. В частности, плотность записи на жестких магнитных и оптических дисках в настоящее время уже достигает 1 гигабит/кв. дюйм. Без преувеличения можно сказать, что в полупроводниковых технологиях (иногда их называют просто кремниевыми) вот уже более полувека происходит непрерывная революция.

Однако, как отмечалось выше, по мере приближения размеров полупроводниковых устройств к 1 микрону ($1 \text{ мкм} = 10^6 \text{ м}$), в них начинают проявляться квантово-механические свойства вещества, т. е. необычные физические явления (типа туннельного эффекта). Можно с уверенностью предположить, что при сохранении нынешних темпов развития вся кремниевая технология (и связанная с ней промышленность полупроводников) примерно через 5-10 лет столкнется с проблемами принципиального характера, так как быстродействие и степень интеграции в ЭВМ достигнут некоторых «принципиальных» границ, определяемых известными нам законами физики. Таким образом, дальнейший прогресс науки и техники требует от исследователей существенного «прорыва» к новым принципам работы и новым технологическим приемам.

Такой революционный прорыв может быть осуществлен только за счет использования нанотехнологии, которая позволяет создавать целый ряд принципиально новых производственных процессов, материалов и устройств на их основе. Расчеты показывают, что использование нанотехнологии может повысить основные характеристики полупроводниковых вычислительных и запоминающих устройств на три порядка, т. е. в тысячу раз! Это станет, безусловно, настоящей революцией в области информационных технологий и окажет огромное воздействие на экономическое и социальное развитие общества в XXI веке.

Однако нанотехнологию не стоит сводить только к локальному революционному прорыву в указанных областях (электроника, информационные технологии). Уже сейчас в нанотехнологии получен ряд исключительно важных результатов, позволяющих надеяться на существенный прогресс в развитии многих других направлений науки и техники (медицина и биология, химия, экология, энергетика, механика и т. п., рис.1.4). Например, при переходе к нанометровому диапазону (т. е. к объектам с характерными длинами около 10 нм) многие важнейшие свойства веществ и материалов изменяются существенным образом. Речь идет о таких важных характеристиках, как электропроводность, коэффициент оптического преломления, магнитные свойства, прочность, термостойкость и т. п. На основе материалов с новыми свойствами уже сейчас создаются новые типы солнечных батарей, преобразователей энергии, экологически безопасных продуктов и т. п. Возможно, что именно производство дешевых, энергосберегающих и экологически безопасных материалов станет наиболее важным последствием внедрения нанотехнологий. Уже созданы высокочувствительные биологические датчики (сенсоры) и другие устройства, позволяющие говорить о возникновении новой науки - нанобиотехнологии и имеющие огромные перспективы практического применения. Нанотехнология предлагает новые возможности микрообработки материалов и создания на этой основе новых производственных процессов и новых изделий, что должно оказать революционное воздействие на экономическую и социальную жизнь грядущих поколений.

Примеры практического применения нанотехнологий

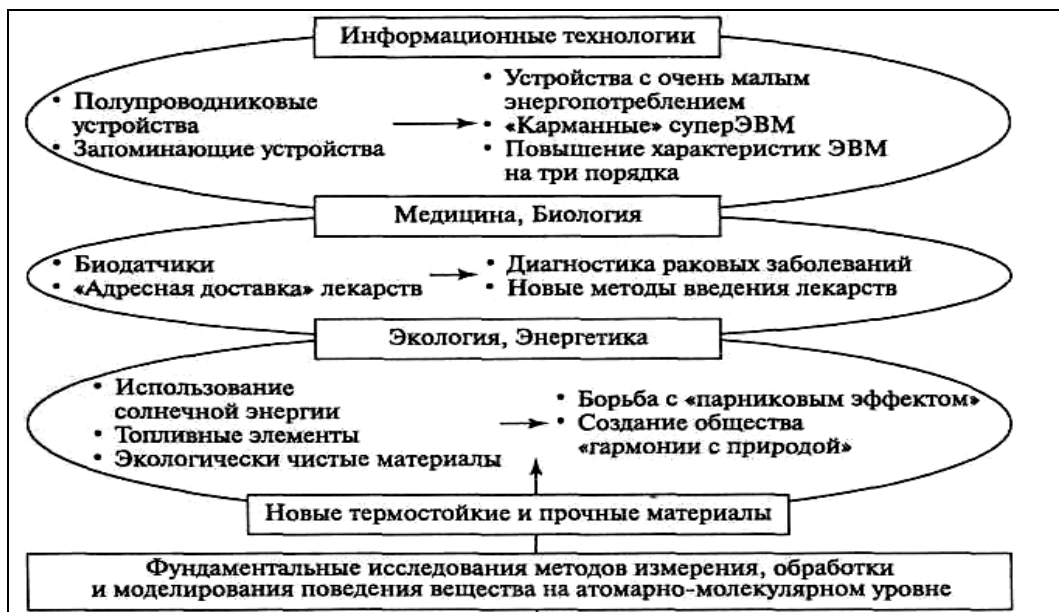


Рис. 1.4. Прогноз экономических и социальных последствий внедрения нанотехнологий.