

Курс лекций «Основы нанотехнологии»

Лекция № 4.

4.1. Создание объектов по принципу «сверху – вниз» и «снизу – вверх»

В этом разделе кратко рассмотрим одну из основных концепций, играющую важнейшую роль для развития нанотехнологии вообще. Речь идет о двух принципиально разных подходах к обработке вещества и созданию планируемых изделий. Эти подходы принято условно называть технологиями «сверху - вниз» и «снизу - вверх» (рис. 2.5).

Подход «сверху - вниз» основан на уменьшении размеров физических тел механической или иной обработкой, вплоть до получения объектов с ультрамикроскопическими, нанометровыми параметрами. В качестве простого примера можно указать некоторые полупроводниковые устройства, структура которых создается фотолитографической обработкой. При фотолитографии полупроводниковая заготовка подвергается обработке лазерным лучом, что позволяет получить в ней заранее спланированную конфигурацию схемы. Разрешающая способность (т. е. минимальный размер элементов изготавливаемой схемы) определяется при этом длиной волны лазерного излучения. В настоящее время самые короткие длины такого излучения позволяют осуществлять микрообработку с точностью до 100 нм, однако необходимо отметить, что эта технология является сложной и требует дорогого оборудования, вследствие чего она малопригодна для организации эффективного крупномасштабного производства.

Идея технологии «снизу - вверх» заключается в том, что сборка создаваемой «конструкции» осуществляется непосредственно из элементов «низшего порядка» (атомов, молекул, структурных фрагментов биологических клеток и т. п.), располагаемых в требуемом порядке. Этот подход можно считать «обратным» по отношению к привычному методу миниатюризации «сверху - вниз», когда мы просто уменьшаем размеры деталей.

Типичным примером подхода «снизу - вверх» может служить поштучная укладка атомов на кристаллической поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа или других устройств этого типа. Метод позволяет наносить друг на друга не только отдельные атомы, но и слои атомов. Конечно, в настоящее время описываемый подход характеризуется очень низкой эффективностью и производительностью, однако ему принадлежит будущее.

В живых организмах биологические клетки образуются в результате деления (митоза). С точки зрения предлагаемого подхода очень интересно, в какой степени и как атомы способны «самостоятельно» объединяться в более сложные вещества и материалы. Вообще говоря, сборка «снизу - вверх» (самоорганизация вещества) является довольно распространенным явлением. Все мы знаем, что разнообразные взаимодействия атомов и молекул способны приводить к образованию высокоупорядоченных состояний из исходных гомогенных смесей. Ярким примером являются живые организмы, способные усваивать «мертвые» клетки других организмов и перерабатывать их в новые «живые» клетки. Сейчас уже известно, что в живых организмах могут существовать также клеточные структуры в виде нанотрубок, кристаллов и т. п. Процессы самоорганизации, представляющие особый интерес для молекулярной химии, безусловно не могут протекать «сверху - вниз». Структурирование и сборка биологических тканей происходят на атомарно-молекулярном уровне, причем живые организмы осуществляют их с высокой эффективностью. Это означает, что низкая эффективность существующих процессов «снизу - вверх» (о которой говорилось выше) свидетельствует лишь о нашем недостаточном техническом мастерстве и может быть преодолена.

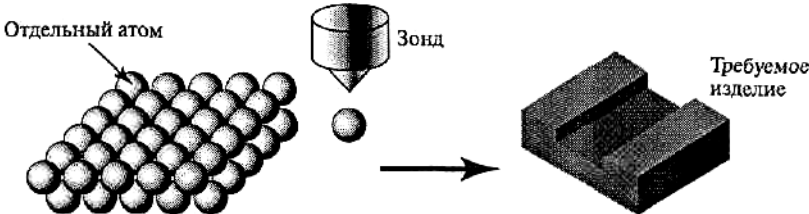
Подход «сверху - вниз», т. е. обработка вещества с последовательным уменьшением размеров до требуемых (манометровых) размеров		
Обрабатываемое физическое тело 	Требуемое изделие	Пример подхода: литография в полупроводниковой технике
Подход «снизу - вверх», т. е. получение нанометровых изделий или материалов методами сборки на атомарном уровне		
Отдельный атом 	Требуемое изделие	Пример подхода: обработка и самосборка элементов поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа.

Рис. 4.1. Два главных нанотехнологических принципа обработки материалов

4.2. Фантастические возможности нанотехнологии

Рассмотрим кратко конкретные примеры устройств, основанных на объектах и различных процессах в нанометровом масштабе, которые будут созданы на основе принципов подхода «сверху - вниз» и «снизу - вверх».

Сверхмощные и сверхминиатюрные компьютеры

В близком будущем можно ожидать значительного уменьшения размеров ЭВМ (одновременно с ростом их рабочих характеристик), что позволит создать сверхмалые или даже микроскопические вычислительные системы. Нанотехнологии позволяют производить транзисторы, электрический ток в которых соответствует движению очень небольшого числа электронов (от десятков до нескольких тысяч), в результате чего переключения типа включено-выключено (on-off) станут возможными за счет поведения отдельных электронов. Практически это будет означать возможность уменьшения размеров электрических цепей (и больших вычислительных систем) до предельно малых размеров, а также использование в их работе новых принципов (физических закономерностей микромира, т. е. квантовой механики).

Сверхчувствительные и высокостабильные биодатчики

Действие используемых в настоящее время биологических датчиков основано, главным образом, на разнообразных специфических реакциях с участием кислорода, в результате чего происходят химические реакции, регистрируемые соответствующими электрическими сигналами. Однако следует вспомнить, что биологические молекулы вовсе не «тратят» кислород на регистрацию воспринимаемых изменений или явлений. Нанотехнологии позволят нам создать «искусственные» молекулы, реакции которых не будут связаны с окислительными процессами.

Высокоэффективные топливные элементы

Известно, что выхлопные газы автомобилей (углекислый газ и т. д.) относятся к важнейшим факторам возникновения парникового эффекта и загрязнения окружающей среды, вследствие чего во всем мире ведутся активные поиски новых источников энергии, способных заменить бензин в двигателях внутреннего сгорания. Наиболее перспективными в этом смысле представляются так называемые топливные элементы, особенно водородные (поскольку при

сгорании водорода образуется лишь экологически безвредная вода). Развитие таких «экологически безопасных» процессов всегда сдерживалось их низкой эффективностью. Однако в последние годы химики научились создавать новые кристаллические формы углерода (так называемые нанотрубки), способные адсорбировать значительные количества водорода, что позволяет надеяться на быстрый прогресс в этом направлении.

В дальнейшем более подробно рассмотрим разнообразие методов и применений нанотехнологий, позволяющее считать их основой промышленного производства будущего.

4.3. Основные научные термины и определения

В основе системы знаний об объекте исследований безусловно лежит анализ его вещественно-материального базиса, структурного упорядочения и устойчивости, пространственно-временной организации, а также количественное и качественное проявление традиционных и ранее неизвестных свойств в зависимости от условий синтеза и функционирования.

Как отмечалось во введении, применительно к индустрии наносистем границы геометрического фактора в отношении возникновения новых нетрадиционных свойств, не присущих макро- и микросистемам, формально достаточно часто определены в интервале от единиц до 100 нанометров. Однако, вполне очевидно, что некоторый характеристический размер, идентифицирующий изучаемый объект по геометрическому параметру (толщина пленки, диаметр кластера или нанотрубки), должен рассматриваться не просто как абсолютная величина, а в отношении к определенным фундаментальным параметрам материалов, имеющим аналогичную метрическую размерность. Особенно сложно определить границы геометрического фактора применительно к биоорганическим объектам, обладающим многообразием связей и конформаций. Поэтому приставка «нано» - скорее особое обобщенное отражение объектов исследований, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, чем просто характеристика протяженности базового структурного элемента.

В то же время, наиболее характерными проявлениями «наномира», даже по сравнению с традиционными объектами с микроскопическими характеристическими размерами, следует признать:

- появление нетрадиционных видов симметрии и особых видов сопряжения границ раздела, конформаций с динамически перестраиваемой структурой;
- доминирование над процессами искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации, отражающих проявление эффектов матричного копирования и особенностей синтеза в условиях, далеких от равновесных;
- высокая «полевая» (электрическая, магнитная) активность и «каталитическая» (химическая) избирательность поверхности ансамблей на основе наночастиц, включая интегрированные композиции неорганической и органической природы;
- особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и носящих признаки кооперативного синергетического процесса.

Можно предположить, что причинами появления вышеуказанных особенностей в условиях «наномира» являются:

- изменение отношения вклада в различные процессы поверхности частицы по отношению к объему при переходе к наноразмерным системам;
- энергетическая, полевая и «вещественная» неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц;
- усиление роли различных видов размерных эффектов из-за значительной площади границ раздела в условиях наноконпозиций;
- проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетрадиционных механизмов упорядочения, переноса энергии и заряда;
- малые характеристические размеры частиц и особый характер их упорядочения,

обеспечивающие энергетическую и пространственную доступность транспорта заряда, энергии и конформационных изменений.

Таким образом, базисом индустрии наносистем являются новые, ранее не известные свойства и функциональные возможности материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемых особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании, то есть при переходе к объектам, представляющим собой интеграцию искусственно или естественно упорядоченных наносистем.

Последнее утверждение непосредственно связано с достаточно частым обращением в литературе по нанотехнологии к парадигме: «Сверху-вниз или снизу-вверх». Формально речь идет о двух возможных направлениях достижения конечного результата в условиях создания объектов индустрии наносистем. Первое направление - это фактически физический редукционизм - «от большого к малому» путем многократного уменьшения исследуемого (создаваемого) объекта. Так развивается классическая нанотехнология интегральных микросхем, которая в настоящее время преодолела 100-нанометровый рубеж. Однако, конструирование сложного многоэлементного многоуровневого изделия (например, микросхемы) требует интеграции для придания целостности системе. Другое направление реализуется в рамках целостного, так называемого, холического подхода (от греческого - целый, весь), когда исследуют системные свойства искусственно синтезируемого или самоорганизующегося объекта, что типично для технологии наноматериалов. Последнее направление имеет много общего с первым, так как в рамках эволюционного развития первого направления технологически будут достигнуты элементы с такими размерами, при которых их интеграция приведет к возникновению функциональных свойств аналогичных кооперативным целостным системам на основе наноэлементов.

Анализируя научные публикации, а также развивая и обобщая представления об индустрии наносистем, введем базовые понятия с приставкой «нано», наиболее полно отражающих именно проявление функционально-системных свойств, а не чисто геометрических особенностей (параметров) объектов.

Наносистема – материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта новых свойств, проявляющихся в виде квантово-размерных, синергетически-кооперативных, «гигантских» эффектов и других явлений и процессов, связанных с проявлением наномасштабных факторов.

Наноматериалы – вещества и композиции веществ, представляющие собой искусственно или естественно упорядоченную или неупорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими характеристическими размерами и особым проявлением физического и (или) химического взаимодействий при кооперации наноразмерных элементов, обеспечивающих возникновение у материалов и систем совокупности ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, теплофизических и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Нанотехнология – совокупность методов и способов синтеза, сборки, структуро- и формообразования, нанесения, удаления и модифицирования материалов, включая систему знаний, навыков, умений, аппаратное, материаловедческое, метрологическое, информационное обеспечение процессов и технологических операций, направленных на создание материалов и систем с новыми свойствами, обусловленными проявлением наномасштабных факторов.

Нанодиагностика – совокупность специализированных методов исследований, направленных на изучение, структурных, морфолого-топологических, механических, электрофизических, оптических, биологических характеристик наноматериалов и наносистем, анализ нанокolicеств вещества, измерение метрических параметров с наноточностью.

Наносистемотехника – совокупность методов моделирования, проектирования и конструирования изделий различного функционального назначения, в том числе наноматериалов, микро- и наносистем с широким использованием квантово-размерных, кооперативно-синергетических, гигантских эффектов и других явлений и процессов,

проявляющихся в условиях материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами элементов.

В настоящее время в качестве фундаментальных проблем индустрии наносистем можно выделить следующие направления исследований:

- малые ансамбли молекул, межмолекулярные взаимодействия и молекулярная динамика;
- размерные и функциональные свойства наночастиц, конформации, межфазные границы;
- наномасштабирование и квантово-размерные эффекты;
- неравновесные процессы и синергетические явления в наноструктурированных материалах;
- теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы.