

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 13: НАНОТЕХНОЛОГИИ

Наведено короткий науково-історичний нарис про сучасний стан досліджень в галузі нанотехнологій і досягнень у них, що знайшли застосування в різних галузях науки і техніки.

Приведен краткий научно-исторический очерк о современном состоянии исследований в области нанотехнологий и достижениях в них, нашедших применение в различных областях науки и техники.

"Кто раньше овладеет нанотехнологиями, тот и займет ведущее место в техносфере будущего".

Эдвард Теллер (1908-2003 гг.) – один из "отцов" американской термоядерной бомбы.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно [1] "**технологией**" называется совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции. Составная часть наименования единиц физических величин "**нано**", равная 10^{-9} (миллиардной) доле исходных единиц, происходит от греческого слова "*nanos*" – "*карлик*" [1]. Принято считать, что впервые термин "**нанотехнология**", объединяющий указанные выше два понятия (те, что в кавычках), применил азиатский ученый Норио Танигути в 1974 году, использовавший его для обозначения производства супермалых изделий размером в несколько нанометров [2]. Поэтому в этом научно-историческом очерке, посвященном молодой науке, способной стать основой новой промышленной революции в мире, начнем с определения понятия "нанотехнология". Согласно [2, 3] под нанотехнологией следует понимать совокупность методов, обеспечивающих контролируемым образом создание и модификацию объектов с составными компонентами размером менее 100 нм (хотя бы в одном измерении), характеризующихся появлением из-за этого у них (объектов) принципиально новых качеств (свойств), и позволяющих осуществлять их (этих объектов) интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба (размера). Отметим, что практический аспект нанотехнологий включает в себя производство технических устройств и их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами, образующими указанные выше объекты. Причем, эти объекты не обязательно должны быть по размеру менее 100 нм. В качестве них могут выступать макрообъекты, атомарная структура которых либо контролируется создается человеком (роботом) с разрешением на уровне отдельных атомов, либо же содержит в себе отдельные нанообъекты. Рассматриваемое понятие охватывает также методы диагностики, характеристики и физических исследований таких объектов. Нанотехнология и в особенности ее главная составная часть – молекулярная технология являются новыми и мало исследованными на настоящее время научно-техническими дисциплинами, сформировавшимися в науке фактически за последние 20 лет [4]. Эти дисциплины принципиально отличаются от традиционных и хорошо изученных дисциплин и отраслей научно-технических знаний, использующих макроскопические подходы и технологии обращения с веществом. Так, если для

макрообъектов силы взаимодействия атомов и молекул вещества или силы Ван-дер-Ваальса, названные в честь автора их открытия – выдающегося нидерландского физика Йоханнеса Ван-дер-Ваальса (1837-1923 гг.), и квантовые эффекты не играют заметной роли и ими ученые зачастую просто пренебрегают, то для нанообъектов они становятся существенными и определяющими их физико-химические свойства. Использование в нанотехнологиях передовых научных достижений позволяет относить их к высоким технологиям. Разработка, синтез и практическое применение во многих наукоемких отраслях техносферы наноструктурных материалов (наноматериалов) и наноустройств становится сейчас важной составляющей мирового научно-технического прогресса [4].

1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О НАНОТЕХНОЛОГИЯХ И ИХ ИНСТРУМЕНТАРИИ

Нанотехнология как новая междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники изучает закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами [2, 3]. Поэтому главной особенностью нанотехнологии является то, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия в ней происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров. "Сырьем" в этой технологии являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие миллионы и миллиарды атомов и молекул. Работать "вслепую" с подобным "сырьем" – нанообъектами, как мы все прекрасно понимаем, нельзя. Для манипуляции и управления атомами, молекулами и наночастицами со стороны макромира, в котором находятся изучаемые их ученые и специалисты-нанотехнологи, последним как "воздух" был необходим соответствующий физический инструментарий. Заметим, что в 1986 году известный немецкий физик Эрнст Руска (1906-1988 гг.) за фундаментальные работы по электронной оптике и созданию им еще в 1931 году первого просвечивающего электронного микроскопа стал лауреатом Нобелевской премии по физике [5]. Именно здесь и сказала свое весомое научно-техническое "слово" передовая область электронной микроскопии – сканирующая туннельная и зондовая микроскопия [2, 3].

Значительную роль в неудержимом исследовании человечеством полного тайн наномира сыграли выдающиеся технические изобретения американских ученых и

© М.И. Баранов

инженеров – создание сканирующего (растрового) туннельного микроскопа (G. Binnig, G. Rohrer, 1982 год), разработчики и создатели которого (Г. Биннинг и Г. Рорер) были удостоены Нобелевской премии по физике за 1986 год, и сканирующего атомно-силового микроскопа (G. Binnig, K. Kuatt, K. Gerber, 1986 год) [2, 5]. Изобретение новых микроскопов подобного типа позволило уверенно наблюдать и исследовать ученым-физикам и химикам атомно-молекулярную структуру поверхности монокристаллов в нанометровом диапазоне размеров. Наилучшее пространственное разрешение этих физических приборов составляет сотую долю нанометра (при размере атома в десятую долю нанометра [6]) по нормали к изучаемой поверхности вещества. Отметим, что действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннелировании свободных электронов через вакуумный барьер исследуемого вещества [2, 3]. Высокая разрешающая способность в них (этих микроскопах) обусловлена тем, что туннельный электронный ток изменяется в монокристалле вещества на три порядка при изменении ширины данного барьера на размер атома, примерно равный 0,1 нм. Следует заметить, что теория квантового эффекта туннелирования электронов в веществе была заложена выдающимся американским (российским) физиком-теоретиком Георгием Антоновичем Гамовым (1904-1968 гг.) в 1928 году в его работах по радиоактивному α -распаду [2, 5]. Применив квантовую механику к объяснению α -распада, Г.А. Гамов показал, что микрочастицы даже с не очень большой энергией могут с определенной вероятностью проникать через потенциальный энергетический барьер. С помощью сканирующих микроскопов в настоящее время ученые наблюдают за атомной структурой поверхностей монокристаллов металлов, полупроводников, высокотемпературных сверхпроводников, органических молекул и биологических объектов. Новые микроскопы оказались весьма полезными не только при изучении атомно-молекулярной структуры вещества, но и пригодными для непосредственного конструирования наноструктур. Сканирующая зондовая микроскопия, использующая как оптические, так и неоптические методы исследования, нашла широкое применение при изучении и построении нанобъектов. На рис. 1 приведен внешний вид подготавливаемого к работе сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) атомного разрешения, установленного недавно в Институте металлофизики НАН Украины [7, 8]. Укажем, что работа СЗМ основана на взаимодействии иглы кантилевера (зонда) с поверхностью исследуемого нанобъекта.

С помощью определенных движений иглой (зондом) такого микроскопа удается создавать атомные структуры. На рис. 2 представлены последовательные этапы создания нанотехнологом логотипа всемирно известной американской компьютерной компании "IBM" из отдельных атомов ксенона Xe на грани монокристалла никеля Ni [2]. При этом движения острия наконечника СЗМ по грани монокристалла вещества при создании наноструктур из отдельных атомов напоминают хорошо знакомые каждому из нас приемы хоккеиста при продвижении им по льду шайбы с помощью клюшки. В этой связи для нанотехнологий особый интерес представляет создание компьютерных программ и математических алгоритмов, устанавливающих нетривиальную связь между движениями острия (зонда) сканирующего микроскопа и перемещениями манипулируемых атомов и молекул вещества на основе

соответствующих математических моделей. Математические модели и алгоритмы необходимы здесь также и для работы автоматических "сборщиков" (нанороботов) различных наноконструкций.

Исследования свойств поверхности вещества с помощью СЗМ можно проводить на воздухе при атмосферном давлении, в вакууме и даже в жидкости. Рис. 3 иллюстрирует возможности СЗМ при исследовании молекулярного строения таких химических веществ как бензола (а) и полиэтилена (б) [2].

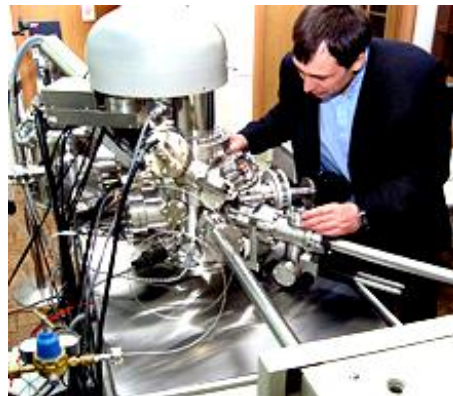


Рис. 1. Внешний вид элементов сканирующего зондового микроскопа Института металлофизики НАН Украины для комплексного исследования нанобъектов [8]

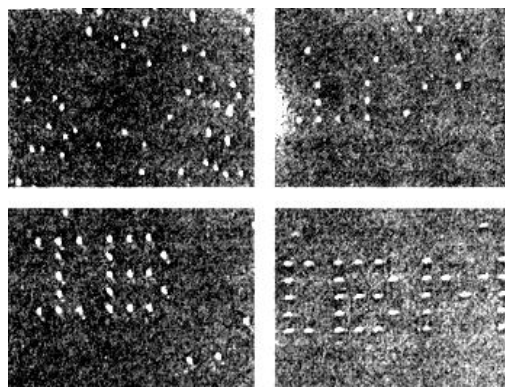


Рис. 2. Надпись "IBM" на грани (110) монокристалла никеля Ni из отдельных 35 атомов ксенона Xe, последовательно реализованная нанотехнологом при помощи зонда СЗМ [2]

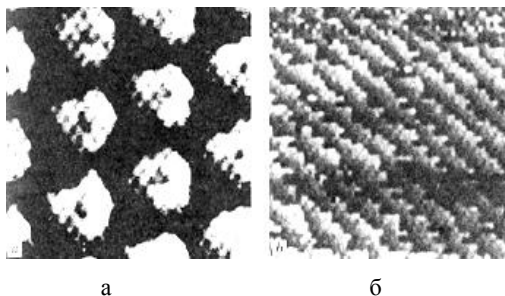


Рис. 3. Внешние виды отдельных молекул широко используемых химических веществ бензола (а) и полиэтилена (б), полученные на современном СЗМ [2]

Из данных рис. 3,а отчетливо видны объемные кольца упорядоченно размещенных молекул бензола C_6H_6 , а из рис. 3,б – последовательно выстроенные CH_2 -цепочки ("гребешки") полиэтилена. Интересным научно-историческим фактом является то, что открытие именно кольцевой структурной формулы бензола было произведено в 19-ом столетии извест-

ным немецким химиком А. Кекуле (1829-1896 гг.) [9]. Этот ученый интуитивно представил тогда углеродные цепи бензола в виде "змеи, кусающей себя за хвост". Так была открыта первая в мире кольцевая молекулярная формула вещества. Как видим, интуиция и воображение ученого-химика А. Кекуле не подвели. Отметим, что при помощи СЗМ не так давно был исследован процесс проникновения во времени вируса в живую биологическую клетку [2]. В ходе лабораторных исследований нанообъектов было установлено, что методы современной математической физики нуждаются в серьезном развитии и уточнении, учитывающем особенности нанообъектов [3].

2. ОСНОВНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Важной составляющей нанотехнологий, исследующих малоразмерные объекты в диапазоне от 1 до 100 нм, является разработка и синтез самих наноматериалов. На сегодняшний день в области нанотехнологий сформировалось два мощных направления в синтезе неорганических наноматериалов [4]. Первое направление – получение нанокристаллических материалов на основе ультрадисперсных частиц, которые условно можно назвать "*наноматериалами 1-го рода*". Этот род наноматериалов можно получать в замкнутых консервативных системах и процесс их получения может быть описан в рамках представлений классической термодинамики. Второе направление – получение синергетичных наноматериалов или "*наноматериалов 2-го рода*", изучаемых новой областью науки, называемой синергетика [4]. В этом случае процесс синтеза наноматериалов достигается в диссипативных системах и в экстремальных условиях, весьма далеких от термодинамического равновесия. При этом в материале возможно протекание сложных и малоизученных на сегодня самоорганизующих процессов, в результате которых возникают ранее не существовавшие в природе наноструктуры. Отметим, что в области нанотехнологий проблемой самоорганизующих процессов в нановеществе занимается супрамолекулярная химия [2, 3]. Данный раздел химии изучает не отдельные молекулы, а взаимодействия между молекулами, которые способны упорядочить молекулы вещества определенным способом, создавая новые материалы с новыми характеристиками.

Наноматериалы 1-го рода известны достаточно давно и нашли широкое применение в конце 20-го столетия в порошковой металлургии. Еще в 70-х годах прошлого века советский академик И.В. Тананаев впервые предложил дополнить классические диаграммы состояния вещества показателем (координатой) его дисперсности [4]. Их (этих материалов) новые физико-механические свойства базируются на известных размерных эффектах. Ведь с уменьшением размеров частиц вещества в замкнутой системе происходит увеличение их удельной поверхности, что приводит к увеличению свободной энергии системы при постоянных значениях температуры, давления и объема вещества. При этом в уравнение свободной энергии системы вводится дополнительное слагаемое, являющееся произведением коэффициента поверхностной энергии на величину прироста площади поверхности [4]. Вследствие чего в зависимости от степени дисперсности частиц вещества может изменяться температура его плавления или полиморфного фазового перехода. Оказалось, что значение удельной

поверхности частиц вещества резко возрастает по мере приближения их размеров к наномасштабному уровню. Связано это со значительным увеличением доли поверхностных атомов вещества по отношению к полному числу атомов, составляющих эти частицы. Многочисленные эксперименты показали, что уменьшение размеров частиц приводит не только к увеличению их удельной поверхности и свободной энергии, но и к изменению других физических и химических свойств материалов (например, магнитных, электрических, сверхпроводящих, механических, оптических, каталитических и др.) [4]. Опытным путем было установлено, что размерные эффекты для наноматериалов 1-го рода реализуются при геометрических размерах элементов структуры (зерен) конденсированной фазы вещества менее 100 нм [2-4]. Стало понятным, что отдельные (индивидуальные) наночастицы (рис. 4) отличаются и от свойств макроскопической фазы вещества и от свойств изолированных атомов (молекул) их (эти наночастицы) образующих.

Кроме того, выяснилась и другая важная особенность наночастиц – способность проявления ими новых свойств как в изолированном состоянии, так и в консолидированном состоянии при образовании вместе с другими наночастицами нанокристаллического материала [4]. Поэтому для наноматериалов 1-го рода роль среднего геометрического размера структуры того или иного нанокристаллического материала является главной и ключевой. Геометрический размер элемента внутренней наноструктуры (зерна или нанокристаллита) для этих представителей наноматериалов оказался соизмеримым с некоторыми хорошо известными в классической физике характеристическими размерными параметрами (например, с длиной λ_e свободного пробега электрона в твердом теле [10]).

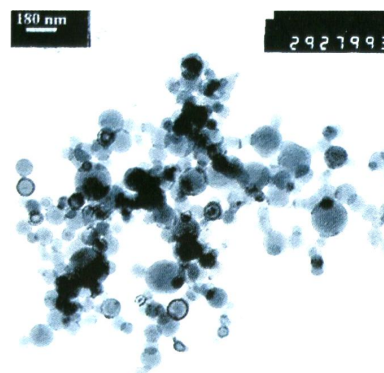


Рис. 4. Внешний вид представителей наноматериалов 1-го рода – ультрадисперсных наночастиц алюминия Al, полученный на СЗМ (слева сверху дан масштаб – 180 нм) [4]

Указанные выше физические представления стали на сегодня научно-технической основой для получения макроскопических кристаллических наноматериалов 1-го рода, предназначенных для практического конструкционного применения. Высокие физико-механические характеристики этих наноматериалов существенно зависят от геометрического размера образующих их зерен (кристаллитов). Отметим, что для получения таких наноматериалов используют [3, 4, 11]: компактирование нанопорошков методами порошковой металлургии; кристаллизацию объемных аморфных сплавов; интенсивную пластическую деформацию; явление электрического взрыва металли-

ческих проводников; различные методы нанесения на подложку наноструктурных покрытий. Следует указать, что к настоящему времени за счет создания объемных нанокристаллических структур и применения наноматериалов 1-го рода существенно повышены свойства ряда конструкционных материалов для машиностроения на базе сталей, алюминиевых сплавов, титана и его сплавов, керамик и интерметаллидов [2, 4]. Этот вид наноматериалов нашел весьма широкое применение также при модификации поверхностей изделий машиностроения, когда нанесенные на них наноструктурные покрытия выполняют антикоррозионные, упрочняющие и декоративные функции.

Наноматериалы 2-го рода радикально отличаются от наноматериалов 1-го рода как по свойствам, так и по своему внутреннему построению. Данные материалы не только имеют ультрадисперсную внутреннюю структуру, но и в ряде случаев порядок укладки в них атомов вещества не имеет аналогов в природе. Учеными было установлено, что наноматериалы 2-го рода могут возникать в диссипативных системах при одновременном выполнении следующих четырех условий [4]: во-первых, используемая для их получения система должна быть термодинамически открытой (в этой системе должны происходить процессы обмена энергией и веществом с окружающей внешней средой); во-вторых, рассматриваемая система должна быть существенно нелинейной (процессы в этой системе должны описываться нелинейными уравнениями состояния вещества); в-третьих, в данной системе отклонение от равновесия должно превышать некоторое критическое значение; в-четвертых, происходящие в указанной системе макроскопические процессы должны происходить согласованно. Особое место в этом классе наноматериалов занял исходный и хорошо всем нам известный материал – **графит** (углерод) ${}^6_{12}\text{C}$ [3, 6]. При измельчении графита тем или иным способом можно получить графитовый нанопорошок. Наночастицы и нанокристаллы такого порошка будут унаследовывать кристаллическую структуру макрографита (массивного куска графита), из которого их получили. Из нанопорошкового графита можно методами порошковой металлургии спечь массивный наноструктурный графит с новыми физико-механическими свойствами. Но этого, как установили ученые-нанотехнологи, можно и не делать. Как оказалось на практике уникальными свойствами обладает наноматериал, созданный на основе одного графитового слоя (одного слоя атомов графита). Эта супертонкая пленка (толщиной порядка 0,1 нм) получила название "**графен**" [3, 4]. Впервые графен был получен в октябре 2004 года в исследовательской лаборатории Манчестерского университета (Англия). Графен физически стабилен, гибок, механически прочен и проводит элементарные носители электричества – свободные электроны, обуславливающие в нем электрический ток проводимости. Причем, электрические свойства графена оказались весьма необычными. В прошлом российскими учеными-физиками Андреем Геймом и Константином Новоселовым было обнаружено замечательное свойство графена – способность изменять свое электрическое сопротивление при приложении к нему электрического поля [13]. По мнению многих зарубежных ученых обнаруженное свойство графена открывает в области электричества и преобразовательной техники новую

эру – эру графитовой полупроводниковой электроники [13]. На взгляд автора, такого замечательного электрического свойства от одной из форм химического элемента углерода ${}^6_{12}\text{C}$ прогнозировать следовало бы и ожидать. Ведь этот элемент принадлежит к четвертой группе периодической системы элементов Д.И. Менделеева, где расположены такие широко известные полупроводниковые материалы как кремний Si и германий Ge [6, 14]. Важно указать, что за получение двумерной графитовой пленки (графена) и экспериментальное изучение ее свойств наши бывшие соотечественники А. Гейм и К. Новоселов были удостоены Нобелевской премии по физике за 2010 год [13]. Еще более удивительные физико-механические свойства графена проявляются при сворачивании его монокристалла по толщине супертонкой пленки в подобие "наносвитка" – **углеродной нанотрубки** (рис. 5).

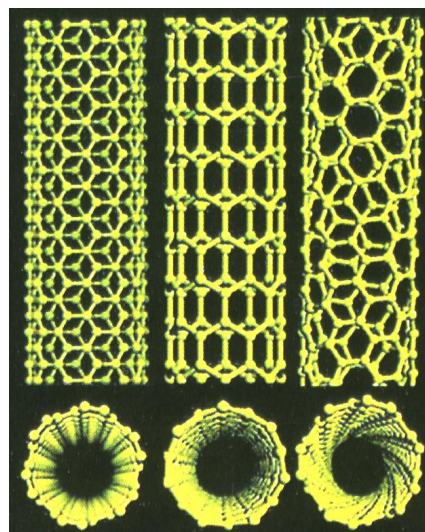


Рис. 5. Модели идеальных углеродных нанотрубок диаметром около 1 нм и длиной до 1 мм различной хиральности (вверху – вид сбоку, а внизу – вид с торца), открывших в науке и технике новый класс наноструктурных материалов – наноматериалов 2-го рода [4]

Заметим, что такие углеродные нанотрубки были впервые в мире синтезированы японским ученым-физиком С. Ишима [3, 4]. При этом они (эти углеродные трубки) были получены в термодинамически открытой электрофизической двухэлектродной системе с графитовыми электродами при дуговом электрическом разряде между ними в присутствии инертного газа аргона [2, 4]. Отметим, что углеродные нанотрубки стали первым синергетическим наноматериалом, полученным в диссипативной системе в условиях неравновесного фазового перехода в веществе. На рис. 6 приведен внешний аксонометрический вид изнутри модели идеальной углеродной нанотрубки.

Металлофизики и специалисты из области физики твердого тела установили, что углеродной нанотрубке нет места на равновесной фазовой диаграмме углерода ${}^6_{12}\text{C}$ в координатах "давление – температура". Сложное пространственное строение подобных наноматериалов не описывается существующими представлениями и теориями современной классической кристаллографии. Этот феномен в физике твердого тела получил название "кристаллографической катастрофы" [4]. К настоящему времени в мире учеными-нанотехнологами экспериментально получено

достаточно много наноматериалов 2-го рода [3, 4]: многослойные углеродные нанотрубки; нанопроволоки; коллоидные микросферы; магические кластеры и спирали; луковичные структуры; наночастицы в виде "колеса" (рис. 7) и др.

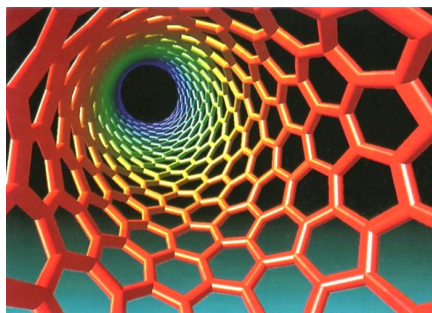


Рис. 6. Модель наноматериала 2-го рода – идеальной углеродной нанотрубки диаметром до 1 нм, толщиной стенки до 0,1 нм и длиной до 1 мм (вид изнутри данного нанообъекта, содержащего в стенке правильные шестиугольники) [4]

В настоящее время одним из наиболее перспективных наноматериалов 2-го рода в области нанотехнологий является тот, который базируется на углеродных наночастицах шарообразной структуры, получивших название "**фуллеренов**" [2-4, 12]. На рис. 8 представлен общий вид модели идеального фуллере-на, содержащего 60 атомов углерода ${}^6_{12}\text{C}$ и обозначаемого в нанотехнологии как C_{60} . Данные атомы в фуллеренах расположены на сфере с диаметром приблизительно в один нанометр, напоминающей мне как спортивному болельщику футбольный мяч. Фуллерены, как новая форма существования углерода ${}^6_{12}\text{C}$ в природе наряду с давно известными его формами (алмазом и графитом) и кстати его единственная растворимая форма, были открыты (Н. Kroto, J. Heath, S. O'Brien, R. Curl, R. Smalley, 1985 год) при попытках астрофизиков объяснить спектры межзвездной пыли. Укажем здесь одну интересную научно-историческую деталь: упомянутый нами в [15] выдающийся немецкий (русский) математик и механик 18-го столетия Л. Эйлер в своих математических сочинениях (теоремах) в свое время показал, что атомы углерода в своих кристаллических построениях могут образовывать 12 правильных пятиугольников и 20 правильных шестиугольников [2]. Эти результаты математических исследований Л. Эйлера, как оказалось в дальнейшем (автор на этом примере еще раз убеждается в том, что как все в мире взаимосвязано!), имеют определенное отношение к названию рассматриваемого в этом подразделе наноматериала. Новая сферическая наномолекула-наночастица углерода C_{60} (фуллерен) была названа в честь архитектора Р. Фуллера, построившего жилой дом из пятиугольников и шестиугольников Эйлера [2, 12]. Учеными было установлено, что фуллерены могут вступать в химические реакции и образовывать самые различные новые и неизученные соединения с новыми физическими и химическими свойствами. Фуллерены также могут образовывать и различные полимеры. Отметим, что в 1990 году в мире была изобретена технология их (фуллеренов) крупномасштабного производства [2]. Важно отметить, что за экспериментальное открытие фуллеренов Карл Р., Крото Г. и Смолли Р. были удостоены Нобелевской премии по химии за 1996 год [5]. Наномоле-

кулы углерода C_{60} , в свою очередь, могут образовать кристалл **фуллерита** с гранцентрированной кубической решеткой и достаточно слабыми межмолекулярными связями [2].

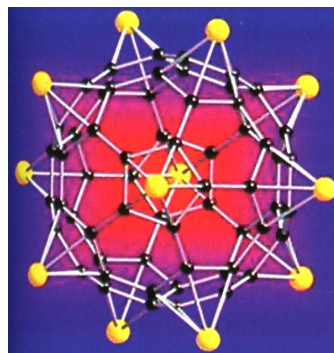


Рис. 7. Модель наночастицы вещества в форме "колеса", относящейся к наноматериалам 2-го рода [4]

В кристалле под названием фуллерит имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, в которых могут находиться посторонние атомы (атомы примеси). Если октаэдрические полости в фуллерите заполнены положительно заряженными ионами щелочных металлов (например, калия K , рубидия Rb , цезия Cs), то при температурах ниже комнатной (ниже $20\text{ }^\circ\text{C}$) внутренняя структура этих веществ перестраивается и образуется новый полимерный материал типа 1C_{60} . Если заполнить в фуллерите и тетраэдрические полости, то образуется сверхпроводящий материал типа 3C_{60} с критической температурой T_c в $20\text{-}40\text{ K}$ [2]. Отметим, что в настоящее время активное изучение сверхпроводящих свойств фуллеритов проводится в Институте теоретической физики, носящем имя выдающегося немецкого физика-теоретика Макса Планка (1858-1947 гг.), в г. Штутгарте (Германия) [12].

Высокая мировая активность в области нанотехнологий и в стимулируемой ими новой области химии – супрамолекулярной химии, занимающейся разработкой, синтезом и исследованием наноматериалов 2-го рода, привела к тому, что уже к 1997 году в мире насчитывалось более 9000 разновидностей фуллереновых соединений [2,12]. В чем же заключается уникальность наноматериалов 2-го рода? Остановимся ниже вкратце лишь на трех их важных свойствах, указанных в [2]. **Первое свойство – механическая сверхпрочность.** Так как связи между атомами углерода ${}^6_{12}\text{C}$ в тонком графитовом слое являются самыми сильными среди известных ученым, то бездефектные углеродные нанотрубки на два порядка будут прочнее трубок из металлической стали. При этом вдобавок они по весу будут примерно в четыре раза легче их стальных "сестер". В этой связи одной из важнейших задач нанотехнологии в области получения новых углеродных наноматериалов является создание нанотрубок неограниченной ("бесконечной") длины. Из таких углеродных нанотрубок можно будет изготавливать легкие композитные материалы предельной механической прочности для потребностей различной техники нового 21-го века, в том числе: силовых элементов мостов и иных технических сооружений, несущих конструкций летательных аппаратов (самолетов и ракетополетителей), силовых элементов турбин и двигателей с предельно малым удельным потреблением топлива и др.

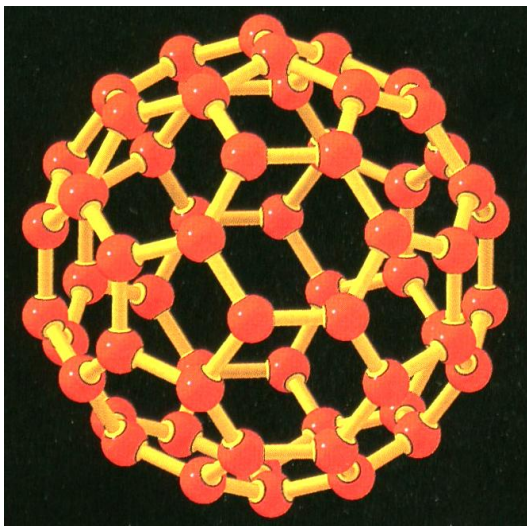


Рис. 8. Модель идеального фуллера – яркого и перспективного представителя сферических углеродных наночастиц, образующих наноматериалы 2-го рода [4]

Заметим, что в настоящее время лучшие специалисты-нанотехнологи научились изготавливать углеродные нанотрубки длиной всего в сотни микрон (до 1 мм) при их диаметре порядка одного нанометра. **Второе свойство – высокая электрическая проводимость.** Известным в классической физике фактом является то, что в кристаллическом графите электрическая проводимость вдоль плоскости слоя наиболее высокая среди известных науке материалов, а в направлении, перпендикулярном данному слою, она мала. Поэтому в недалекой перспективе ожидается, что токонесущие части электрических кабелей, изготовленные из продольно ориентированных углеродных нанотрубок, при комнатной температуре в 20 °С будут иметь удельную электропроводность на два порядка выше, чем у кабелей с медными жилами и оболочками. А раз так, то и активное сопротивление таких электрических кабелей с проводящими наноматериалами и соответственно паразитные тепловые потери электроэнергии в них будут существенно меньше, чем у обычных кабелей с традиционными проводящими материалами (медью и алюминием). Дело здесь остается за нанотехнологией, позволяющей производить углеродные нанотрубки достаточной для указанных целей длины и в достаточном количестве. **Третье свойство – нанокластерность.** Во множестве нанообъектов присутствуют сверхмалые частицы – нанокластеры, состоящие из десятков, сотен и тысяч атомов. Оказалось, что свойства нанокластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Выяснилось, что из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными физико-механическими и химическими свойствами и использовать их в каталитических химических реакциях, а также для разделения газовых смесей и хранения различных газов. Большой интерес представляют магнитные нанокластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантиноидов и актиноидов. Эти нанокластеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля. Примером такого

нанокластера является высокоспиновая металлоорганическая молекула $Mn_{12}O_{12}(CH_3COO)_{16}(H_2O)_4$. Эта достаточно изящная в микроархитектуре молекулярная конструкция состоит из четырех ионов марганца Mn^{4+} со спином 3/2, расположенных в вершинах тетраэдра, и восьми ионов марганца Mn^{3+} со спином 2, окружающих этот тетраэдр. Взаимодействие между указанными ионами марганца осуществляется ионами кислорода. Антиферромагнитные взаимодействия спинов ионов Mn^{4+} и Mn^{3+} приводят к полному весьма большому спину для этого нанокластера, равному 10. Ацетатные группы и молекулы воды в этой сложной молекуле вещества отделяют нанокластеры Mn_{12} друг от друга в молекулярном кристалле. Взаимодействие этих нанокластеров в рассматриваемом кристалле чрезвычайно мало. Наномагниты представляют интерес, прежде всего, для проектирования процессоров, используемых в квантовых компьютерах. Учитывая, что расстояние между указанными молекулами составляет около 10 нанометров, то плотность памяти в такой атомной системе может быть порядка 10 Гбайт на один см² [2]. Дополнительно к этому укажем тот важный научный факт, что в 2007 году Питер Грюнберг и Альберт Ферт получили Нобелевскую премию по физике за открытие и изучение GMR-эффекта (эффекта гигантского магнитного сопротивления наноматериала), позволяющего эффективно производить магнитную запись требуемых данных большого объема на жесткие диски компьютеров с обеспечением атомарной плотности на них информации [2, 12].

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МИРОВОГО РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Анализ текущего состояния бурно развивающейся во всем мире области нанотехнологий, выполненный на основе просмотренных автором литературных источников ограниченного количества [2-4, 7, 8, 12], тем не менее позволяет выделить в ней следующий ряд важнейших научно-технических направлений:

- **Материаловедение.** Создание "бездефектных" механически высокопрочных материалов, материалов с высокой электрической проводимостью и новых наноматериалов для нового поколения аккумуляторов и солнечных батарей с предельными энергетическими показателями. Создание супертонких металлических пленок, служащих основой для высококачественных магнитных материалов.
- **Молекулярный дизайн.** Манипулирование с отдельными атомами и молекулами, препарирование имеющихся молекул и синтез новых молекул с новыми свойствами в сильно неоднородных электромагнитных полях.
- **Приборостроение.** Создание усовершенствованных сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострижных систем для молекулярного дизайна и миниатюрных сверхчувствительных нанодатчиков для регистрации различных физических и биологических характеристик.
- **Электроника.** Конструирование нанометрической элементной базы для вычислительной техники следующего поколения, наноантенн, нанопроводов и нанокабелей, нанотранзисторов, нановыпрямителей, дисплеев и акустических систем на основе новых наноматериалов.

- **Электродинамика.** Моделирование динамики атомов и молекул в предельно неоднородных электромагнитных полях, создаваемых многоострийными системами сканирующих зондовых микроскопов. Расчет электрических и магнитных свойств синтезируемых наноматериалов.

- **Оптика.** Создание нанолазеров и синтез многоострийных физических систем с нанолазерами. Изучение гибридных систем "зонд + нанолазер". Моделирование механизмов излучения, распространения и поглощения света в нанобъектах.

- **Робототехника.** Создание на основе применения нанотехнологических материалов нанороботов, обладающих функциями движения, обработки и передачи информации.

- **Механика.** Исследование механических напряжений и деформаций в наноматериалах и нанобъектах, анализ в них трения. Моделирование движений зонда сканирующего зондового микроскопа при целевом манипулировании нанобъектом. Моделирование движений в наномеханизмах для наноустройств и расчет наноманипуляторов. Разработка систем управления нанороботами.

- **Химический гетерогенный катализ.** Разработка химических катализаторов с наноструктурными конструкциями для разных классов химических реакций селективного катализа.

- **Медицина.** Проектирование наноинструментария для изучения и уничтожения вирусов, изучение взаимодействия искусственных наночастиц с природными биологическими объектами наноразмеров (белками и нуклеиновыми кислотами), исследование возможности локального "ремонта" биологических органов человека, изучение новых методов высокоточной доставки необходимых нанодоз лекарств в определенные места живого человеческого организма.

- **Фармакология.** Осуществление промышленного синтеза молекул разнообразных лекарственных средств и фармакологических препаратов четко определенной внутренней наноструктуры.

- **Метрология.** Создание компьютерных моделей систем "прибор – нанобъект" и их калибровка. Автоматизация нанометрических измерений и создание компьютерных банков метрологических данных для нанобъектов.

- **Трибология.** Определение связи наноструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний при изготовлении перспективных пар трения для различных механических и электромеханических систем.

- **Теория самоорганизации.** Формулировка фундаментальных принципов самосборки наноконструкций. Создание компьютерных алгоритмов самосборки наноконструкций. Разработка вычислительных алгоритмов для качественного анализа моделей самосборки таких конструкций. Моделирование явлений пространственно-временной самоорганизации атомов и молекул вещества при создании наноматериалов.

- **Управляемые ядерные реакции.** Создание nanoускорителей элементарных частиц и проведение в физике высоких энергий нестатистических управляемых ядерных реакций.

4. УКРАИНА В МИРЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Сегодня стало общепринятым связывать будущее любой страны мира с тем, насколько она успешно продвигается в развитии и прикладном освоении современных нанотехнологий. Авторы работы [8], анализируя нынешнее состояние в области нанотехнологий, считают, что основным прорывным направлением практического использования материалов и приемов нанотехнологий в технике следует считать создание наноэлектронных приборов. В первую очередь это касается разработки на основе наноматериалов транзисторов и микросхем с многоплановой номенклатурой использования в вычислительной и микроволновой технике, метрологии, измерительной технике, аккумуляторах, солнечных батареях и фотоэкра-нах, а также в медицине в части инструментально контролируемого врачами-нанотехнологами вхождения человека с помощью наночастиц и наноустройств в структуру его биологических молекул и в молекулярное биостроительство его тканей и органов [8]. На какую же роль может рассчитывать Украина в мире нанотехнологий? Ответ на этот по сути шекспировский (гамлетовский) вопрос ("Быть или не быть?") кроется в современном состоянии соответствующих научных исследований и наноразработок в Украине. Здесь сразу требуется отметить, что украинские ученые существенно отстали за последние 20 лет от своих зарубежных коллег и их разработок в области нанотехнологий [8]. В нашей стране на сегодня согласно [7, 8] нет не то что технологической линейки создаваемых и выпускаемых наноматериалов, но даже хотя бы полного ряда современных инструментальных приборов высокого атомного разрешения, которые бы позволяли пусть даже на лабораторном уровне в полном объеме надежно манипулировать в пространстве микромира в области нанометра (об одном таком приборе – сканирующем зондовом микроскопе, установленном недавно в Институте металлофизики НАН Украины, было указано выше в подразделе 1). Тем не менее, следует отметить, что в отделе химии твердого тела Института общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины при изучении нанопроцессов в твердом теле были обнаружены новые редкие свойства неорганического наноматериала и разработаны на его основе новые керамические нагревательные элементы, не дающие электрической искры, которые в дальнейшем были использованы в промышленности [7, 8]. В Институте металлофизики НАН Украины не так давно был исследован новый физический эффект в многослойной структуре "ферромагнитный материал – пленка благородного металла толщиной в единицы нанометров – ферромагнитный материал" [8]. К этому следует добавить то, что в 2007 году самая престижная в научном мире Нобелевская премия по физике была присуждена зарубежному ученому за обнаружение эффекта гигантского магнитного сопротивления (GMR-эффекта, см. подраздел 2) именно в подобных слоистых магнитных средах, нашедших сейчас массовое применение в считывающих и записывающих магнитных головках жестких дисков компьютеров [2, 8]. Имеющийся пока в Украине интеллектуальный потенциал, а также несколько сохранившихся предприятий бывшего военно-промышленного комплекса при объединении своих усилий в рамках финансируемых государственных

программ по нанотехнологиям дают нам некий, хотя и весьма иллюзорный, но все же шанс на научно-технический прорыв на основе нанотехнологий в области микроволновой техники, солнечной электроники, метрологии и радиоастрономии [8]. Авторы краткого аналитического обзора по нанотехнологиям из [8] и автор данной статьи полагают, что необходимые интегрированные научно-производственные структуры для реализации в Украине отечественных и зарубежных наноразработок можно было бы создать на базе Института металлофизики НАН Украины, Института общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины, Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Научно-парка "Киевская политехника", Киевских ОАО "НПП «Сатурн»" и государственного НИИ "Орион", Донецкого "Топаз", Днепропетровского машиностроительного завода, Запорожского радиозавода, ряда Харьковских (например, ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" и Радиоастрономического института НАН Украины), Черновицких и Львовских институтов. На нашу "раскачку" в вопросе создания собственной национальной нанотехнологической базы у нас есть, по-видимому, не более 15 лет, по истечении которых уйдут в небытие пока еще существующие в Украине необходимые для решения этой комплексной научно-технической проблемы научные школы и инженерно-производственные коллективы, умеющие создавать и выпускать конкурентноспособную в мире продукцию.

5. НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

Международный опыт в области нанотехнологий показывает, что особую важность для нанотехнологических разработок имеют научные национальные нанотехнологические программы. На сегодня более 50-и развитых стран мира объявили о старте собственных нанотехнологических программ. В этом списке стран недавно появилась и Российская Федерация, но, к нашему большому сожалению, в нем по-прежнему нет Украины. Какие же проверенные практикой достижения уже можно уверенно отнести в актив нанотехнологий? Среди них следует назвать следующие технические изобретения и наноразработки [2, 12]:

- **Графен** – плоский монослой атомов углерода ${}^6_{12}\text{C}$, имеющий толщину порядка 0,1 нм [2-4]. Графен обладает высокой механической прочностью и подвижностью своих свободных электронов при комнатной температуре в 20 °С (см. подраздел 2). Благодаря последнему свойству, при окончательном решении научной проблемы формирования запрещенной зоны в этом полуметалле, графен как перспективный наноматериал может заменить хорошо послуживший в преобразовательной и электронной технике полупроводниковый материал кремний Si в выпрямителях, транзисторах и интегральных микросхемах. Недавно было установлено, что графен можно использовать и как детектор токсичных промышленных газообразных отходов – молекул двуокиси азота NO_2 [12]. Оказалось, что он позволяет детектировать приход и уход с его поверхности даже единичных молекул NO_2 .

- **Углеродные нанотрубки** – протяжённые ци-

линдрические углеродные наноструктуры (рис. 9), характеризующиеся в настоящее время диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной пока до нескольких миллиметров, и состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и обычно заканчивающиеся полусферической головкой (см. рис. 5) [2-4]. На поверхности углеродной нанотрубки атомы углерода ${}^6_{12}\text{C}$ расположены в вершинах правильных шестиугольников (см. рис. 6).

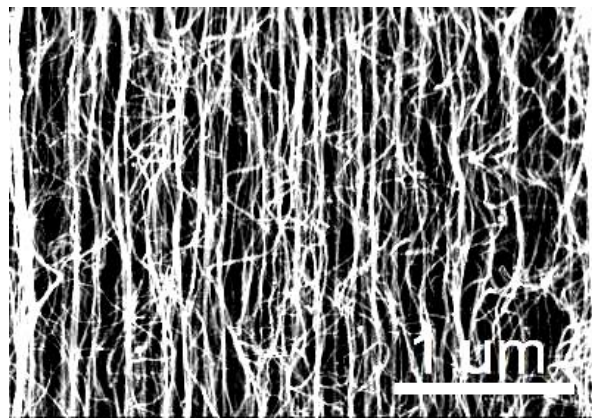


Рис. 9. Внешний вид углеродных нанотрубок при указанном на фотографии масштабе в 1 мкм [16]

Концы таких углеродных трубок закрыты с помощью правильных пятиугольников. Правильные шестиугольники являются ячейкой в плоском графитовом листе (графене), который можно свернуть в нанотрубки различной хиральности. Правильные пятиугольники (семиугольники) являются локальными дефектами в плоском графитовом листе, позволяющими получить его положительную или отрицательную кривизну. Комбинации правильных пяти-, шести- и семиугольников позволяют нанотехнологам получать разнообразные формы углеродных поверхностей в трехмерном пространстве. Геометрия этих наноконструкций, относящихся к наноматериалам 2-го рода, определяет их уникальные физические и химические свойства и соответственно возможность существования принципиально новых материалов на их основе и высоких технологий их промышленного производства. Для промышленного производства углеродных нанотрубок используются специальные химические катализаторы и дуговой электрический разряд в инертном газе [2]. Предсказание (возможный прогноз) физико-химических свойств новых углеродных наноматериалов на основе указанных нанотрубок учеными-химиками и физиками осуществляется как с помощью сложных квантовых расчетных моделей, так и приближенных оценок в рамках законов классической молекулярной термодинамики [6, 12].

- **Фуллерены** – шарообразные молекулярные соединения, принадлежащие к классу аллотропных форм углерода ${}^6_{12}\text{C}$ и имеющие размеры порядка 1 нм (см. рис. 8) [2-4]. Некоторые фуллереновые наноматериалы обладают сверхвысокой механической прочностью, высокой упругостью и гибкостью. Поэтому их можно использовать в качестве присадки для улучшения свойств уже существующих макроматериалов. Существуют легированные фуллерены, обладающие свойствами очень хорошего электрического изолято-

ра, а есть фуллерены, являющиеся замечательными проводниками электрического тока. Оказалось, что путем ионного напыления одного вида легированного фуллерена можно получить нанопроводник, а путем напыления другого вида легированного фуллерена – наноизолятор или нанорезистор. В результате подобных действий можно получить простейшую электрическую схему, размеры которой будут исчисляться размерами ряда отдельных молекул. Такие электронные наносхемы будут гораздо миниатюрнее, проще в изготовлении и менее энергоемкими, чем существующие микросхемы. Сейчас созданы фуллереновые соединения (эндофуллерены), обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, пьезоэффектом, диамагнетизмом, парамагнетизмом и даже сверхпроводимостью. В этой связи фуллерены и их соединения открывают путь к новой фуллереновой электронике и новым супермощным малогабаритным компьютерам, по объему памяти и быстродействию в тысячи раз превосходящими современные компьютеры. Замечательные возможности предоставляют гидрофуллерены (различные типы соединений фуллерена с водородом 1H). Благодаря компактному и безопасному хранению водорода 1H в этих наноматериалах, становится возможным переход на нашей планете к эпохе солнечно-водородной энергетики. Гидрофуллерены дают возможность непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую и применения водорода в качестве экологически чистого топлива и энергоносителя. Большое будущее ожидает фуллерены и в качестве нового класса полупроводниковых материалов. Работы в этом направлении уже позволили создать сверхпроводящие (с критической температурой T_c в 52 К [2]) дырочно-легированные углеродные наноструктуры, напоминающие полевой транзистор. Особенно интересны водорастворимые производные фуллеренов, применение которых в биологии и медицине может привести, по образному выражению академика РАН Ю.А. Осипьяна, к "революционным последствиям" [2]. По мнению специалистов-нанотехнологов фирмы "Приморье" (г. Санкт-Петербург, Россия) к возможным техническим областям применения фуллеренов в настоящее время и в ближайшем будущем можно отнести [12]:

- Создание новых конструкционных материалов с уникальными свойствами для использования в строительстве инженерно-технических сооружений и при изготовлении средств индивидуальной защиты. Это касается тканевых материалов специального назначения (лент, волокон, полотен, парусов, канатов и сверхпрочных нитей) на основе модифицированных фуллеренами полимерных молекул, а также радиозащитных материалов на основе нитей из графита, модифицированного фуллеренами, и бетонополимеров повышенной прочности. Здесь можно указать и сверхпрочные (выше твердости алмаза) насадки и покрытия для специального металлообрабатывающего инструмента и скважинного инструмента бурильного оборудования в геологоразведке.

- Улучшение эксплуатационных характеристик транспортных средств и других специальных механизмов. Касается это следующих материалов: присадок к маслам и смазкам, резко повышающим износостойчивость пар трения в машинах и механизмах; антизадирных составов для узлов, работающих в

условиях повышенных механических и тепловых нагрузок; композитов тормозных колодок скоростных транспортных средств наземного и воздушного транспорта с повышенной теплоотдачей и износостойчивостью; износостойких материалов в условиях сухого трения; смазочно-охлаждающих технологических составов, увеличивающих срок службы машин и механизмов.

- Получение новых композиционных материалов электротехнического назначения. В том числе: композиционных материалов сильноточных устройств и скользящих сильноточных электрических контактов с повышенным ресурсом работы; материалов электродов химических источников тока; элементов сверхпроводящих конструкций на основе фуллереновых интеркаляторов.

- Получение новых композиционных материалов для оптики и радиоэлектроники. Сюда можно отнести: материалы защитных экранов компьютеров; материалы для технологии "стелс"; материалы разветвителей в волоконно-оптических сетях, а также для нелинейной оптики и модуляторов света.

- Создание материалов и микроэлектронных изделий специального назначения: высококачественных алмазоподобных пленок; материалов для микросенсоров; высокостойких тонкопленочных защитных покрытий; субмикронных резисторов.

- Разработку новых технологий в медицине, включающих получение: материалов эффективного диализа; материалов для защиты от проникающей радиации, в том числе солнечной; высокоэффективных сорбентов медицинского назначения.

- Разработку покрытий и новых защитных технологий, повышающих адгезию лаков, обеспечивающих увеличение влагозащитных эффектов и ресурса покрытий на истирание и приводящих к упрочнению и стабилизации полимерных лакокрасочных материалов.

- Создание новых источников энергии, в том числе литиевых аккумуляторов с повышенной электрической емкостью и улучшенными удельными весогабаритными характеристиками.

- Модификацию латексных эмульсий на основе синтетических каучуков, приводящую к производству шин повышенной проходимости и стойких водэмульсионных красок.

- Модификацию полиэтиленов, обеспечивающую производство полиэтиленов с повышенным сроком эксплуатации и хранения, а также полиэтиленов трубных марок с повышенной прочностью и эластичностью.

- Получение новых смазочно-охлаждающих материалов, приводящих к повышению эффективности смазочно-охлаждающих технологических составов в металлообработке и созданию эффективных добавок в масла металлообрабатывающих станков.

- Нефтехимию при создании высокоэффективных катализаторов технологических процессов крекинга и риформинга.

- **Нанокapsулы лекарств.** В Украине НПП "Вита" разработана оригинальная технология адресной доставки в организме больных сахарным диабетом инсулина с помощью нанокapsул (автор изобретения – Игорь Верба) [17]. Подобная технология доставки лекарственных препаратов на сегодня не имеет аналогов в мире. Разработанные в Украине медицинские

препараты инсулина имеют высокую температурную стабильность, значительно лучшее структурно-метаболическое действие и гликемический контроль. Принципиально новый и щадящий метод ввода препарата в организм больного (на основе наноканалов) позволил на порядок уменьшить токсическое действие препарата, что позволяет избежать множества существующих осложнений инсулиновой терапии.

• **Молекулярные шестерни и насосы.** Данные модели наноустройств были недавно предложены К.Е. Drexler и R. Merkle из IMM (Institute for Molecular Manufacturing, Palo Alto) [2]. "Корпусами" нанощестеренок в коробке передач этих наноустройств являются плотно прилегающие друг к другу углеродные нанотрубки, а "зубцами" служат кольцевые молекулы бензола C_6H_6 (см. раздел 1 данной статьи). Характерные частоты вращения шестеренок данных наноустройств (рис. 10) составляют несколько десятков гигагерц. Устройства "работают" либо в глубоком вакууме, либо в инертной среде при комнатной температуре в 20 °С. Для "охлаждения" подобных наноустройств обычно используются инертные газы.

• **Наноаккумуляторы.** О создании этого нового источника электроэнергии в начале 2005 года объявила компания "Altair Nanotechnologies" (США) [2]. Данный источник электроэнергии нового поколения базируется на оригинальном нанотехнологическом материале для электродов новых литий – ионных аккумуляторов. Такие аккумуляторы с электродами из химического соединения $Li_4Ti_5O_{12}$ имеют время зарядки всего около 15 минут. В феврале 2006 года эта американская компания начала производство данных аккумуляторов на своём заводе в г. Индиана (США). В марте 2006 года фирма "Altairnano" и компания "Boshart Engineering" заключили соглашение о совместном создании электромобиля. В мае 2006 года успешно завершились испытания автомобильных наноаккумуляторов. В июле 2006 года указанная американская компания "Altair Nanotechnologies" получила первый реальный промышленный заказ на поставку литий – ионных аккумуляторов для электромобилей.

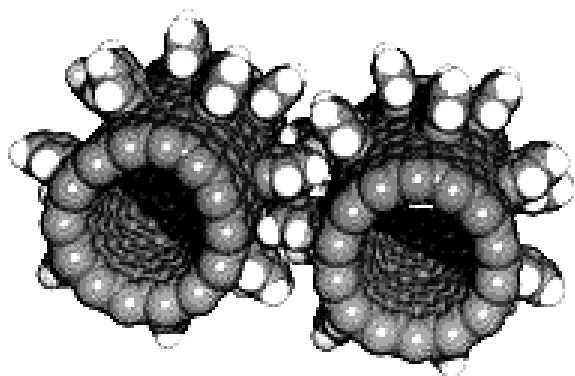


Рис. 10. Внешний вид модели совместно работающей пары молекулярных шестеренок, созданных на атомарно-молекулярном уровне методами нанотехнологии [2]

• **Нанопроцессоры.** Американская компания "Intel" 15 октября 2007 года заявила о разработке ею нового прототипа центрального процессора, содержащего наименьший структурный элемент размером примерно в 45 нм [2]. В последнее время в СМИ и

системе Интернет сообщалось, что в дальнейшем эта компания намерена достичь размеров структурных элементов нанопроцессора до 5 нм [12]. Отметим, что основной конкурент компьютерной компании "Intel" компания "AMD" также использует для производства своих процессоров нанотехнологические устройства, разработанные совместно с американской компанией "IBM". Характерным отличием их компьютерных наноустройств от наноразработок компании "Intel" является применение дополнительного изолирующего слоя SOI, препятствующего утечке электрического тока за счет дополнительной изоляции структур, формирующих транзистор. Уже существуют рабочие образцы нанопроцессоров этих мировых лидеров в создании компьютерной техники с транзисторами размером 32 нм и опытные образцы на 22 нм [2, 12].

• **Наноантенны.** В научно-исследовательской лаборатории Бостонского университета (США) 9 февраля 2005 года была создана антенна-осциллятор с габаритными размерами порядка 1 мкм [2]. Это радиотехническое устройство с наноустройствами насчитывает в себе около 5 миллиардов атомов проводящего электрический ток вещества и способно осциллировать с частотой 1,49 ГГц, что позволяет передавать с её помощью огромные объёмы полезной информации [2, 12].

• **Нанопипетты.** Японский ученый Наоки Коматсу (Shiga University of Medical Science) в 2007 году изобрел химический "нанопипетт", способный различать хиральные изомеры углеродных нанотрубок диаметром до 1 нм [18]. Известно, что углеродные нанотрубки по своей хиральности (термин "хиральность" происходит от греческого слова "cheir" – "рука" и обозначает вид объекта, который не тождественен своему зеркальному отражению [1]) разделяются на лево- и правоспиральные. Заметим, что с помощью современных методов синтеза в диссипативных системах при экстремальных условиях однослойных углеродных нанотрубок возможно приготовить лишь смесь, содержащую в равных пропорциях лево- и правоспиральные нанотрубки. Данная смесь нанотрубок одинаково сильно поглощает свет с правой и левой поляризациями. Для использования этих нанотрубок в оптоэлектронике необходимы только оптически активные нанотрубки, по-разному поглощающие свет с круговой поляризацией. Поэтому синтезированные углеродные трубки перед их использованием в оптоволокне должны быть разделены по своей хиральности. До важного изобретения Н. Коматсу в области нанотехнологий были известны способы сортировки углеродных нанотрубок лишь по их диаметру и длине [2, 12]. Разделение этих нанотрубок – стереоизомеров по своим различным хиральностям и соответственно по их различным оптическим свойствам являлось в мире рассматриваемых нами в этом разделе книги высоких технологий труднорешаемой научной задачей. В этой связи созданный японским ученым-нанотехнологом эффективный химический метод разделения стереоизомеров углеродных нанотрубок по различным хиральностям является важным шагом на пути к использованию оптически активных углеродных нанотрубок в таких передовых технических областях как нано- и оптоэлектроника, фотоника и квантовая оптика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате краткого рассмотрения и определенного анализа новой и интенсивно развивающейся в передовых странах мира весьма перспективной научной области, занимающейся нанотехнологиями и прикладным применением их научно-технических достижений, можно сформулировать ряд выводов:

1. Нанотехнология как междисциплинарная дисциплина охватывает очень широкий круг научно-технических специальностей из различных областей человеческих знаний, начиная от квантовой физики, электронной микроскопии и заканчивая супрамолекулярной химией и молекулярной биологией. Для достижения успехов в этой высокой технологии, базирующейся на вероятностных закономерностях наномира, требуются национальные нанотехнологические программы и интегрированные научные центры, финансируемые как государственным бюджетом, так и заинтересованными крупными частными инвесторами, а также специалисты высшей квалификации широкого профиля и новейшее микроскопическое оборудование с высоким атомным разрешением.

2. Украинские ученые и инженеры на сегодня серьезно отстают от своих коллег из передовых стран мира в вопросах разработки и практического применения новых материалов и конструкций, основывающихся на технических возможностях нанотехнологий.

3. Имеющиеся на сегодня в мире научно-технические достижения в области нанотехнологий и их лабораторно обоснованные технические возможности позволяют надеяться нам на то, что синтезированные в промышленных условиях новые наноструктурные материалы и наноустройства с уникальными физическими и химическими свойствами приведут в ближайшее время к подлинным революционным преобразованиям в мировой технической сфере, включающей промышленность и быт трудящихся в ней людей, и в медико-биологической сфере нашего развивающегося общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. <http://www.fund-intent.ru/science/sinr003.shtml>.
3. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
4. Шулаев В.М. О природе неорганических наноматериалов // Оборудование и инструмент. – 2007. – № 6 (95). – С. 96-99.
5. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. <http://www.zn.ua/3000/3100/63683/>.
8. Якименко Ю., Нарытник Т., Цендровский В. Место Украины в мире нанотехнологий / Газета "Зеркало недели", № 29 (708) от 9-15 августа 2008 г.
9. Склярченко В.М., Сядро В.В. Открытия и изобретения. – Харьков: Веста, 2009. – 144 с.

10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
11. Лернер М.И. Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения. Автореферат дис ... докт. техн. наук (01.04.07). – Томск, 2007. – 31 с.
12. <http://nano.com.ua/content/view/56/32/>.
13. Шакирзянов Ф.Н. Графен и фоторезистивный эффект / Электричество. – 2011. – № 1. – С. 65-66.
14. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 1: Открытие периодического закона химических элементов // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 3-9.
15. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 11: Классическая механика // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 3-13.
16. <http://prostonauka.com/uglerodnye-nanotrubki-pozirovali-pered-kameroj>.
17. <http://www.ukrsmb.info/vita-1.html>.
18. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007/khimicheskii>.

Bibliography (transliterated): 1. Bol'shoj illyustrirovannyj slovar' inostrannyh slov. - M.: Russkie slovari, 2004. - 957 s. 2. <http://www.fund-intent.ru/science/sinr003.shtml>. 3. Pul Ch., Ou`ens F. Nanotehnologii / Per. s angl. pod red. Yu.I. Golovina. - M.: Tehnosfera, 2007. - 376 s. 4. Shulaev V.M. O prirode neorganicheskikh nanomaterialov // Oborudovanie i instrument. - 2007. - № 6 (95). - S. 96-99. 5. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. - Kiev: Feniks, 2006. - 1176 s. 6. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Отв. ред. В.К. Tartakovskij. - Kiev: Naukova dumka, 1989. - 864 s. 7. <http://www.zn.ua/3000/3100/63683/>. 8. Yakimenko Yu., Narytnik T., Cendrovskij V. Mesto Ukrainy v mire nanotehnologii / Gazeta "Zerkalo nedeli", № 29 (708) от 9-15 avgusta 2008 g. 9. Sklyarenko V.M., Syadro V.V. Otkrytiya i izobreteniya. - Har'kov: Vesta, 2009. - 144 s. 10. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polya. - M.: Mir, 1972. - 391 s. 11. Lerner M.I. `Elektrovzryvnye nanoporoshki neorganicheskikh materialov: tehnologiya proizvodstva, harakteristiki, oblasti primeneniya. Avtoreferat dis ... dokt. tehn. nauk (01.04.07). - Tomsk, 2007. - 31 s. 12. <http://nano.com.ua/content/view/56/32/>. 13. Shakirzyanov F.N. Grafen i fotorezistivnyj `effekt / `Elektrichestvo. - 2011. - № 1. - S. 65-66. 14. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 1: Otkrytie periodicheskogo zakona himicheskikh `elementov // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2011. - № 2. - S. 3-9. 15. Baranov M.I. Antologiya vydayuschihysya dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 11: Klassicheskaya mehanika // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2012. - № 6. - S. 3-13. 16. <http://prostonauka.com/uglerodnye-nanotrubki-pozirovali-pered-kameroj>. 17. <http://www.ukrsmb.info/vita-1.html>. 18. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2007/khimicheskii>.

Поступила 29.08.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния"

Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт".

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 13: Nanotechnologies.

A brief scientific and historical essay on the state-of-the-art research on nanotechnologies and accomplishments in this field implemented in various fields of science and technology.

Key words – essay, nanotechnologies, accomplishments, implementations.