
ФИЛОСОФИЯ О ЧЕЛОВЕКЕ И МИРЕ

**НАНОНАУКА И НАНОТЕХНОЛОГИЯ:
ИСТОРИЯ, ФИЛОСОФИЯ, ИННОВАЦИИ**

ЗЕЛЕНСКИЙ Олег Иванович – научный сотрудник Украинского государственного научно-исследовательского углехимического института Министерства промышленной политики Украины

ПУГАЧ Борис Яковлевич – доктор философских наук, профессор кафедры теории культуры и философии науки философского факультета Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина

*Нанотехнология – это действительно портал в новый мир.
Рита Колвел, директор Национального
научного фонда США*

Нанонаука, нанотехника и нанотехнология открывают новую эру в фундаментальных исследованиях, объединяя науку, технику и образование. Экономичный выпуск нанопродукции закладывает основы долговременного прогресса человечества. Сама возможность работы на атомарно-молекулярном уровне (с последующей «атомной» сборкой больших структур с принципиально новыми свойствами) создает беспрецедентные возможности для понимания природы этих основных «строительных блоков», а также для управления свойствами разнообразных природных и искусственных продуктов. Таким образом, речь идет о возможности создания на основе «атомной» сборки сложных структур и управления их функциональными характеристиками [1].

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 XX века [2]. Это представляет собой значительное событие в развитии научного познания в XXI веке.

Согласно широкому определению нанотехнология есть "совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм (1 нм = 10⁻⁹ м), имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба" [3]. Для сравнения можно сказать, что толщина волоса человека составляет 50000 нанометров. Согласно узкому определению, которого придерживается американский исследователь, изучающий возникновение новых технологий и их значение в будущем Эрик Дрекслер, нанотехнология есть конструирование вещества методом снизу вверх, с использованием нанороботов.

Приведем некоторые определения нанонауки и нанотехнологии имеющиеся в литературе.

Помощник директора Института нанотехнологии и нанопроизводства в Нортвестернском университете профессор Марк Ратнер определяет нанонауку как "изучение

фундаментальных принципов молекул и структур, по меньшей мере один размер которых равен от 1 до 100 нанометров. Данные элементы называются наноструктурами. Нанотехнология – это применение наноструктур в полезных наноскопических устройствах" [4].

В документе национального научного фонда под редакцией американского специалиста в области нанотехнологий Майка Роко (2001), подчеркивается, что "нанонаукой и нанотехнологией называется фундаментальное понимание и получаемые вследствие него технологические преимущества, возникающие при использовании новых физических, химических и биологических свойств систем, промежуточных по размеру между отдельными атомами и молекулами и массивными материалами, где можно контролировать свойства промежуточные между двумя граничными состояниями" [5].

В своём руководстве по нанотехнологии [2] американские ученые Чарльз Пул и Франк Оуэнс указывают, что "нанотехнология базируется на понимании того, что частицы размером менее 100 нанометров придают сделанным из них материалам новые свойства и поведение. Это происходит вследствие того, что объекты с размерами менее характерной длины (которая обусловлена природой конкретного явления) часто демонстрируют другую физику и химию, что приводит к так называемым размерным эффектам - новому поведению, зависящему от размера частиц".

Вот определение нанотехнологии, которое можно найти в книге Эрика Дрекслера "Машины созидания. Грядущая эра нанотехнологии" [6]: "Нанотехнология: технология, основанная на манипуляции отдельными атомами и молекулами для построения структуры к сложным, атомным спецификациям." Или другое: "Эта новая технология, будет оперировать отдельными атомами и молекулами с точностью и контролем, назовём её молекулярная технология"

Вообще говоря, основная идея нанотехнологии состоит в том, что практически любую химически стабильную структуру, которую можно описать, на самом деле, можно и построить. Эта идея берет свое начало еще в хрестоматийной речи Ричарда Фейнмана (1959) "Там внизу полно места" [7]. Но лишь после детального анализа, проведенного Эриком Дрекслером в начале восьмидесятых годов XX в., молекулярная нанотехнология стала самостоятельной областью науки и превратилась в долгосрочный технический проект. Последние несколько лет ознаменовались бурным ростом интереса к этой области и ростом инвестиций в нанотехнологию.

В современной нанонауке и нанотехнологии достаточно глубокие исторические корни. Отцом идеи нанотехнологии условно можно считать греческого философа Демокрита, приблизительно в 400 г. д. н. эры он впервые использовал слово "атом" (от греч "atomos" - "неделимый"), для описания самой малой частицы вещества.

Приведем некоторые исторические вехи основных фундаментальных открытий в развитии нанотехнологий, способствующих дальнейшему интенсивному становлению и развитию нанотехнологии и ее формированию как самостоятельной междисциплинарной отрасли современной науки и техники [8; 9]:

1905 – Выдающийся физик Альберт Эйнштейн (Нобелевская премия по физике, 1921) доказал, что размер молекулы сахара составляет примерно 1 нанометр.

1928 – Г.А. Гамов, сотрудник Ленинградского технологического института, исследуя строение атомного ядра и явление радиоактивности, разработал основы теории туннельного переноса заряда.

1931 – Немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска (Нобелевская премия по физике «За фундаментальные работы в электронной оптике и создание первого электронного микроскопа» за 1986 г) создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать нанообъекты.

1932 – Знаменитый датский физик, лауреат Нобелевской премии (1922) Нильс Бор в своем Институте теоретической физики в Копенгагене прочитал перед своими учениками, в том числе будущими лауреатами Нобелевской премии по физике Львом Ландау и Вернером

Гейзенбергом, лекцию "Свет и жизнь". В этой лекции Бор говорит, что в конечном счете исследования покажут, что жизнь сводится к "элементарным актам" квантовой физики.

1934 – Венгерский математик Джон фон Нейман в статье "Логика квантовой механики" первым обратил внимание на возможность разработки квантовой логики, где излагается логическое исчисление со значениями истинности, непрерывно распределёнными от нуля до единицы.

1934 – Венгерский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии (1963) Юджин Вигнер теоретически обосновал возможность создания ультрадисперсного металла с достаточно малым числом электронов проводимости.

1943 – Появилась работа нейропсихолога Уоррена Маккалока и математика Уолтера Питтса "Логическое исчисление идей, относящееся к нервной деятельности". В ней сформулированы основные принципы построения искусственных нейронов и нейронных сетей.

1951 – Джон фон Нейман выделил принципы самокопирующихся машин, ученые в целом подтверждали их возможность.

1953 – Английский биолог, врач и нейробиолог Френсис Крик, совместно с американскими биологами Джеймсом Д. Уотсоном и Морисом Х. Ф. Уилкинсом (Нобелевские лауреаты по физиологии и медицине, 1962) открыли структуру ДНК, которая показала, как живые объекты передают инструкции, которые руководят их постройкой.

1958 – Известный американский учёный в области психологии, нейрофизиологии и искусственного интеллекта Фрэнк Розенблатт разработал модель перцептрона (от perception - восприятие). Его обучение требовало около получаса машинного времени на одной из самых мощных в то время ЭВМ IBM-704.

1959 – Американский физик-теоретик Ричард Фейнман (Нобелевская премия по физике, 1965) впервые опубликовал работу, где оценивались перспективы миниатюризации. Основные положения нанотехнологий были намечены в его легендарной лекции "Там внизу – много места" ("There's Plenty of Room at the Bottom"), произнесенной им в Калифорнийском Технологическом Институте [7]. Фейнман научно доказал, что с точки зрения фундаментальных законов физики нет никаких препятствий к тому, чтобы создавать вещи прямо из атомов. Но тогда еще не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами. Чтобы стимулировать интерес к этой области, Фейнман назначил приз в одну тысячу долларов, тому, кто впервые запишет страницу из книги на булавоочной головке, что осуществилось уже в 1964 году.

В 1960-е годы американский физик Р. Ландауэр, работавший в корпорации IBM, пытался обратить внимание научного мира на то, что вычисления – это всегда некоторый физический процесс, а значит, невозможно понять пределы наших вычислительных возможностей, не уточнив, какой физической реализации они соответствуют.

1961 – Мысль о существовании обратимых операций высказал впервые Р. Ландауэр. Позже в 1982 году специалист в области квантовых вычислений Ч. Беннет теоретически показал, что универсальный компьютер может быть основан на обратимых операциях так, чтобы энергия при вычислениях не тратилась. Дело в том, что именно квантовые элементы могут позволить создать компьютер на обратимых операциях.

1966 – Р. Янг (Национальное бюро стандартов, США) предложил идею пьезодвигателей, которые ныне обеспечивают позиционирование и перемещение подложки под острием туннельного зонда сканирующего туннельного микроскопа и нанотехнологического оборудования с точностью до 0,1 - 0,01 Ангстрем.

1968 – Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разработали теоретические основы нанообработки поверхностей.

1970 – Открытие русским химиком Алексеем Михайловичем Сладковым и сотрудниками его лаборатории новой формы углерода - белого, сферообразного или "карбина" [10]. Открытие было признано в 1971 году (заявка и приоритет 1960 года). А в

1968 году американские ученые А. Эль Гореси и Г. Донней обнаружили белый углерод в образцах породы метеоритного кратера (ФРГ, Бавария).

1974 – Японский физик Норио Танигучи ввел в научный оборот слово “нанотехника”, предложив называть так механизмы размером менее 1 микрона [11; 12].

1980 – Выдающийся русский математик Юрий Иванович Манин, указал на необходимость разработки теории квантовых вычислительных устройств. В 1980-е годы эти же проблемы изучали американский физик П. Бенев, который раскрыл возможность квантовой системы производить вычисления, а также английский ученый Д. Дойч, теоретически разработавший универсальный квантовый компьютер, превосходящий классический аналог.

1981 – Немецкий ученый Г. Глейтер впервые обратил внимание на возможность создания уникальных по свойствам материалов, структура которых представлена кристаллитами наноразмерного интервала [13; 14; 15].

1981 – В Массачусетском технологическом институте защищена диссертация Эриком Дрекслером, посвященная молекулярной технологии.

1981 – Германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали микроскоп, способный показывать отдельные атомы. Впервые такую долгожданную для физиков картину наблюдали создатели этого прибора, работавшие тогда в Цюрихе, в фирме IBM.

1982 – Немецкий физик Г. Бинниг и швейцарский физик Г. Рорер создали первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) (Нобелевская премия 1986).

1983 – Одна из первых отечественных работ по консолидированному нанокристаллическому никелю [16].

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

1986 – Ричард П. Фейнман из Калифорнийского технологического института заинтересовал научную общественность идеей точного моделирования явлений квантовой физики на компьютере принципиально нового типа, который был назван квантовым.

1986 – Появился сканирующий атомно - силовой микроскоп (Atomic Force Microscope, AFM). В отличие от СТМ атомно - силовой микроскоп основан на контакте поверхности с подвижным зондом или балкой (кантилевером) и измерении отклонения зонда. Развитие техники СТМ и AFM привело к появлению большого ассортимента зондовых микроскопов – приборов, важнейших в арсенале нанотехники.

1986 – Нанотехнология стала известна широкой общественности. Американский футуролог Эрик Дрекслер опубликовал книгу "Машины созидания: пришествие эры нанотехнологии", в которой предсказывал, что нанотехнология в скором времени начнет активно развиваться.

1987-1988 – В Российском НИИ "Дельта" П.Н. Лускинович продемонстрировал в действии первую нанотехнологическую установку, где осуществлялась направленная термическая десорбция частиц с острого зонда. Усовершенствованные модели этой установки находятся в эксплуатации в России.

1989 – Сотрудник компании IBM Дональд Эйглер, выложил название своей фирмы атомами ксенона.

1989 – Стивен Беннер из Eidgenössische Technische Hochschule в Цюрихе создал ДНК, содержащую кроме четырёх известных букв генетического алфавита ещё две (аминокислоты отличные от природных).

1990 г – С помощью СТМ, произведённого фирмой IBM, были нарисованы три буквы (IBM) из 35 атомов ксенона на грани кристалла никеля. Этот эксперимент имел характер научной сенсации, поскольку присутствие или отсутствие на подложке постороннего атома можно в принципе интерпретировать как логический символ (TRUE или FALSE). Вместе с тем, эксперимент, проведённый в условиях глубокого вакуума при криогенной температуре, носил сугубо демонстрационный характер: все 35 атомов, будучи химически не связанными с подложкой, "убежали" со своих мест на никеле. Дальнейшие работы, проведённые в том

числе и в России, уверенно подтвердили возможность валентного "закрепления" атомов на поверхностях, выполненных из различных материалов без какого-либо применения криогенной техники.

1991. (Хьюстон (США), химический факультет университета Райса). В своей лаборатории доктор Р. Смолли (лауреат Нобелевской премии за 1996 год) с помощью лазера испарял под вакуумом графит, газовая фаза которого состояла из достаточно крупных крастеров: в каждом по 60 атомов углерода. На публикацию об этом откликнулся английский ученый Х. Кротто из Брайтона. Он посоветовал американцам обратить внимание на опубликованную статью сотрудников Института элементоорганических соединений, расчеты которых показывали, что кластер из 60 атомов более устойчив, так как имеет повышенную величину свободной энергии. Х. Кротто предположил, что этот кластер – структурное образование похожее на футбольный мяч и предложил назвать эту молекулу фуллереном.

1991 – Сотрудник лаборатории фирмы NEC в Японии Сумио Идзима исследовал продукты, образующиеся при разряде вольтовой дуги в атмосфере нейтрального гелия, впервые обнаружил углеродные нанотрубки, которые ранее были предсказаны за несколько месяцев до этого российским физиком Л. Чернозатонским и американцем Дж. Минтмиром.

1994 – Питер Шор из исследовательского подразделения AT&T Research описал специфичный квантовый алгоритм для факторизации больших чисел (разбиения их на простые множители), который оказался гораздо эффективнее существующих до этого алгоритмов, предназначенных для традиционных компьютеров.

К середине 1990-х годов теория квантовых компьютеров и квантовых вычислений утвердилась в качестве новой области науки.

1995 – П.Шор, разработал схему кодирования квантовых состояний и коррекции в них ошибок.

1995 – Под руководством профессора Л.И. Трахтенберга (Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова) разработали на основе пленочного нанокompозита датчик, выявляющий различные вещества в атмосфере (аммиак, спирт, водяной пар).

1996 – Коллега П. Шора по работе в Lucent Technologies Л. Гровер предложил квантовый алгоритм быстрого поиска в неупорядоченной базе данных. (Пример такой базы данных – телефонная книга, в которой фамилии абонентов расположены не по алфавиту, а произвольным образом).

1997 – Ричард Е.Смолли, Лауреат Нобелевской премии (1996) в области химии, профессор химии и физики Rice University предсказал сборку атомов уже к 2000 г. и к этому же времени спрогнозировал появление первых коммерческих нанопроизведений. Этот прогноз оправдался в предсказанный срок.

1998 – Были экспериментально подтверждены зависимости электрических свойств нанотрубок от геометрических параметров. Зависимости электрических свойств нанотрубок от геометрических параметров были предсказаны на основе квантово-химических расчетов их зонной структуры.

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

1998 – В Калифорнийском университете Беркли создан первый в мире двухкубитный квантовый компьютер, в следующем году – трехкубитный образец, который с использованием алгоритма Гровера совершал поиск в базе данных, а еще через год был продемонстрирован метод упорядочения на квантовом компьютере с разрядностью 5 кубит.

1998 – Темпы развития нанотехники стали резко нарастать. Япония определила нанотехнологию как вероятную технологическую категорию XXI в. Их правительственное агентство MITI (Ministry of International Trade and Industry), как следует из отчета НАСА, имеет десятилетнюю Правительственную программу нанотехнологических исследований с бюджетом 200 млн. долл., которая в 90-х гг. была наилучшей в мире. Принятая в 1998 году японская десятилетняя государственная программа "Astroboy" предусматривает создание наноразмерной элементной, приборной и системной базы электроники, способной работать в

диапазоне температур от нескольких градусов Кельвина до 3000 градусов Цельсия в условиях, существующих на поверхности планет, в Космосе и при ядерных взрывах. Корпорация исследований (Research Development Corporation) совместно с MITI ведут дополнительно 6 программ объемом 75 млн. долл. [17].

1999 – Группа исследователей из Корнелльского университета, возглавляемая Карло Монтеманьо, построила интегрированную биоНЭМС (НЭМС – наноэлектромеханическая система) – биомотор вращательного действия на основе энзима АТФазы.

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

2000 – Администрация США поддержала создание Национальной Инициативы в Области Нанотехнологии – National Nanotechnology Initiative. Нанотехнологические исследования получили государственное финансирование. Тогда из федерального бюджета было выделено 500 млн. долл. В 2002 сумма ассигнований была увеличена до 604 млн. долл. На 2003 год "Инициатива" запрашивает 710 млн. долл.

2000 – Ф. Гиссибл (Германия) – разглядел в кремнии субатомные частицы.

Р. Магерле (Volkswagen) – идея нанотомографии – создание трехмерной картины внутреннего строения вещества с разрешением 100 нм.

2000 – Присуждение Жоресу Ивановичу Алферову Нобелевской премии за работы в области полупроводниковых гетероструктур.

2000 – Исследовательская группа фирмы "Хьюлетт-Паккард" создала с помощью новейших нанотехнологических методов самосборки молекулу-переключатель или минимикродиод. Через несколько месяцев объединенная группа Марка Рида и Джеймса Тура (из университетов Йеля и Раиса, США) продемонстрировала еще один класс молекул-переключателей.

2000 – Издательство Academic Press выпустило пятитомный справочник по наноструктурным материалам и нанотехнологии.

2000 – Начало эры гибридной наноэлектроники.

2001 – Получение конденсата Бозе-Эйнштейна (Нобелевская премия по физике, 2001). Речь идет об особом сверхконденсированном состоянии вещества, которое иногда именуется его "пятым" состоянием - наряду с твердым, жидким, газообразным и плазменным. Возможность перевода вещества в такое состояние путем охлаждения до температур, близких к абсолютному нулю, была предсказана Шатъендранатом Бозе и Альбертом Эйнштейном еще в первой трети XX века. Главная особенность конденсата Бозе-Эйнштейна состоит в том, что образующие его атомы при столь низких температурах как бы теряют свою самостоятельность и начинают вести себя как один гигантский атом. В результате все свойства вещества в таком состоянии резко меняются.

2001 – Было объявлено о решении задачи по разбиению на множители с помощью алгоритма Шора – наиболее сложной вычислительной задачи, решенной с помощью квантового компьютера. Однако компьютеру удалось всего лишь найти множители числа 15 (3 и 5).

2001 – Корпорация "Интел" (Intel) произвела первый кремниевый транзистор с элементами величина которых составила 20 нанометров.

2002 – Голландский физик Сеез Деккер объединил нанотрубку с ДНК, получив единый наномеханизм [18].

2003 – Японские ученые стали первыми в мире, кому удалось создать твердотельное устройство, в котором реализован один из двух основных элементов, необходимых для создания квантового компьютера. Финансируемая компанией NEC и японским Институтом физических и химических исследований группа ученых продемонстрировала квантовый вентиль НЕ (CNOT). Кроме него, в квантовых компьютерах используется так называемый однокубитный ротационный вентиль, но такие вентили научились делать еще в 1999 г.

2003 – Рочестерский университет – объединение наномашин, создающих вогнутую линзу, которая управляет прохождением света с различной длиной волны для фотонных

компьютеров. Нью-Йоркский университет – разработка наномашин в медицине по предотвращению образованию тромбов в кровеносной системе человека. Ф. Лью (университет Юты) – с помощью атомного микроскопа построил образы орбит электронов путем анализа их возмущения при движении вокруг ядра. Калифорнийский Универ Беркли – создан транзистор из одиночной молекулы углерода-60. Молекула имеет форму полой сферы. Для выращивания триода были использованы два золотых электрода с промежутком между ними 1 нм. За раз триод пропускает один электрон.

2004 – Был презентован "первый в мире" квантовый компьютер исследователями Висконсинского Университета в Мэдисоне. Они заявили о создании первой в мире симуляции архитектуры квантового компьютера, в которой была использована кремниевая технология изготовления, применяющая горизонтальное и вертикальное тунелирование через двойные верхние и нижние ворота.

2004 – Группа, возглавляемая американским физиком И. Чангом (IBM), объявила о сборке 5-битового квантового компьютера. Исследователями из корпорации IBM, Массачусетского технологического института, Калифорнийского и Оксфордского университетов был продемонстрирован простейший действующий квантовый компьютер, элементами которого служат атомы водорода и углерода в молекуле трихлорэтилена, а считывание результата осуществляется с помощью использования эффекта ядерного магнитного резонанса.

2004 – Администрация США поддержала "Национальную наномедицинскую инициативу" как часть National Nanotechnology Initiative.

2005 – знаменательная дата в истории устройств хранения данных. На выставке CeBit в Ганновере компания IBM представила работоспособный чип устройства квантового хранения данных – "Millipede" ("Многоножка").

Развитие нанотехнологий сущностным образом затрагивает ряд фундаментальных этических, социальных и культурно значимых проблем философской антропологии, связанных с возможностью создания самовоспроизводящегося искусственного интеллекта, построенного на основе нановычислений (квантовые, нанoeлектронные, ДНК-компьютеры), а также с невозможностью однозначного различения между естественным и искусственным в человеке и окружающей его интеллектуализированной и "очувствленной" средой [19]. Все эти проблемы имеют непосредственное отношение к прогнозированию будущего человеческой цивилизации, находящейся в кризисном состоянии "макросдвига", в котором центральное место занимает неуклонно углубляющийся экологический кризис. Расчеты и прогнозы показывают, что на данном этапе развития судьбу цивилизации определит ближайшее поколение людей и, возможно, нанотехнологиям как раз и принадлежит роль креативно-конструктивного, защитного фактора человеческого бытия.

Очень часто нанотехнологии ошибочно воспринимают лишь как количественный предел стремления к миниатюризации. Примером может служить уменьшение размера интегральных схем в микроэлектронике. На самом деле основная идея нанотехнологий – это исследование и применение качественно новых свойств материалов и устройств [20]. Установлено, что физическое поведение небольшого числа атомов и молекул очень сильно отличается от поведения их более многочисленных агломератов (скоплений). Для отдельных атомов и молекул на наномасштабном уровне законы квантовой механики начинают доминировать над законами классической физики. Поэтому нанотехнологии следует воспринимать как истинно квантовомеханические технологии управления свойствами и поведения вещества.

Нанотехнологическая революция 1990 – 2000-х гг. пришла на смену компьютерной революции 1980 – 1990-х гг. Это утверждение можно оспаривать только в отношении начала решительного прогресса в нанотехнологиях. Инвестиции в этой области за период с 1996 по 2004 г. увеличились почти в десять раз: с 800 млн долл. в 1997 г. до более 8 млрд долл. в 2005 г. Считается, что к 2015 г. рынок нанотехнологий составит более 1 000 млрд долл. с количеством персонала более 7 млн научно-технических работников [21; 22; 23].

Развитие нанотехнологий характеризуется следующими основными этапами [24]:

- развитие пассивных наноструктур, т.е. материалов с неизменными стабильными свойствами и функциями, например композиты с нановолокнами или электронные схемы с углеродными нанотрубками-контактами – с 2000 г.;
- создание активных наноструктур, т.е. материалов с изменяющимися свойствами и функциями, например биоактивные молекулы или электронные схемы с нанотранзисторами – с 2005 г.;
- формирование сложных наносистем, например самособирающиеся электросхемы или регенерирующиеся имплантированные живые ткани – предполагаемое начало с 2010 г.;
- развитие сложных наносетей, например самособирающиеся сети нанокomпьютеров и нанороботов или адаптивные генетические терапевтические лекарства – предполагаемое начало с 2015 г.

Обращая внимание на степень точности этих прогнозов, следует отметить, что инженеры уже приблизились к теоретическому пределу уплотнения электрических элементов в кремниевых микропроцессорах. Они могут создавать транзисторы величиной менее 50 нм. Однако курьез ситуации в том, что, несмотря на быстрое действие транзисторов, существенно снижается скорость передачи данных во всей схеме. Если в микросхемах вполне можно было бы применить оптоволоконные технологии, то в наносхемах это невозможно по фундаментальным причинам – размеры транзисторов (несколько десятков нанометров) в 10 раз меньше минимально возможной длины волны (несколько сот нанометров) оптического излучения, используемого в электронике. Трудность состоит в том, что, используя прежние приемы, ученые уже сейчас могут создать крошечные наносхемы, но они будут работать медленнее нынешних микросхем или вообще не будут работать.

Несмотря на многие принципиальные трудности, ученые смогли в последние годы найти альтернативные пути развития электроники. Они создали транзисторы, вентили, диоды, переключатели на основе мельчайших трубок, волокон и даже молекул. Более того, им удалось связать их в сложные электрические цепи. Принципиально новые наноустройства создаются согласно философии «снизу вверх» (от атомов и молекул к макроустройствам), а не как прежде – «сверху вниз» (от литографии к микролитографии и нанолитографии). Современная технология позволяет упаковать более 30 млн транзисторов на 1 см² с мельчайшим элементом около 130 нм, что в 50 тыс. раз больше характерного размера молекулы.

Специалисты в области нанотехнологий уделяют большое внимание углеродным нанотрубкам и фуллеренам.

Углеродные нанотрубки (рис. 1) являются уникальными макромолекулярными системами. Их весьма малый нанометровый диаметр и большая микронная длина указывают на то, что они наиболее близки по своей структуре к идеальным одномерным (1D) системам. Поэтому углеродные нанотрубки – идеальные объекты для проверки теории квантовых явлений, в частности, квантового транспорта в низкоразмерных твердотельных системах. Они химически и термически стабильны по крайней мере до 2000 К, обладают превосходной теплопроводностью, уникальными прочностными и механическими характеристиками [25].

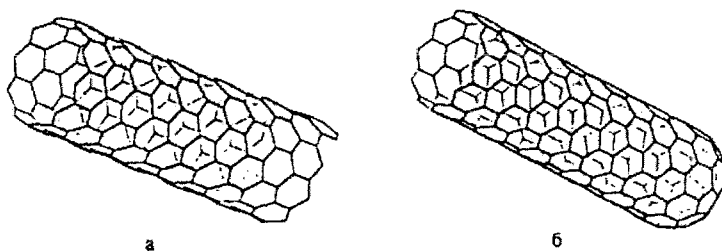


Рис. 1. Схема однослойной нанотрубки: а – открытой; б – закрытой с одной стороны

Углеродные нанотрубки обладают совершенной структурой на атомном уровне. Причем в зависимости от расположения атомов углерода в сечении трубки (по кругу или по спирали) можно управлять электрическими характеристиками нанотрубки: если атомы расположены по кругу, нанотрубка является проводником, а если по спирали, то полупроводником.

В отличие от сферических фуллеренов, особенности структуры нанотрубок могут затруднять их использование, так как при синтезе выделяются различные по строению нанотрубки. Значительно бóльшим разнообразием отличаются многослойные нанотрубки, поэтому в качестве основы для создания функциональных материалов преимущество имеют более однородные, однослойные нанотрубки, которые к тому же обычно содержат меньше дефектов [26].

Надо сказать, что химия нанотрубок заметно отличается от химии фуллеренов, хотя химические превращения этих веществ имеют и общие черты. Сказывается уникальная форма, особенности строения и малый диаметр нанотрубок. От фуллеренов нанотрубки отличаются сравнительно бóльшим объемом внутренней полости; молекулы устойчивых фуллеренов слишком малы, чтобы сдержать во внутренней полости больше трех-четырёх атомов других элементов [27].

Если каждый фуллерен представляет собой молекулу (которая может входить в состав молекулярных кристаллов), то углеродные нанотрубки нельзя рассматривать как отдельные молекулы (однослойные нанотрубки ближе к молекулам, многослойные – к углеродным волокнам), а сростки нанотрубок нельзя относить к обычным трехмерным кристаллам (отдельную нанотрубку принято рассматривать как одномерный, а сросток нанотрубки – как двумерный кристалл).

Фуллерен представляет собой замкнутую полую сферу, образованную чередованием гексагонов (6-членных углеродных колец) и пентагонов (5-членных углеродных колец). Известны получаемые в достаточно больших количествах C_{60} , C_{70} , C_{76} и другие. Наиболее устойчивую форму имеет фуллерен C_{60} , сферическая полая структура которого состоит из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников (рис. 2) [28].

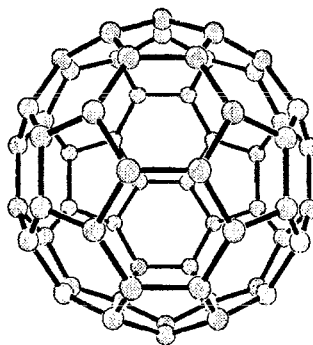


Рис. 2. Структура фуллерена C_{60}

Исследования в области углеродных нанотехнологий можно разделить на два основных направления: *применение* и *получение* наноструктур. Благодаря своим уникальным свойствам фуллерены и нанотрубки могут применяться во многих промышленных направлениях: создание новых материалов, полупроводники, устройства хранения, биотехнологии, полимеры, электрохимия, оптика и др (рис. 3).

Но сдерживающим фактором их широкого внедрения является отсутствие технологии получения в промышленных масштабах этих структур. Существующие способы производства фуллеренов и нанотрубок, такие как лазерный, дуговой, гибридные системы, производство в пламени, каталитическое разложение углеводородов, химические способы и др. позволяют получать лишь десятки граммов в час [29].

С точки зрения коммерциализации нанотехнологий инновационные предприятия делят на шесть больших групп, в соответствии с областью научных интересов и приложений [30]:

- 1) наноматериалы и их обработка;
- 2) нанобиотехнологии;
- 3) нанопроектирование в области программного обеспечения;
- 4) нанофотоника;
- 5) наноэлектроника;
- 6) инструментальная база нанотехнологий.



Рис. 3. Раздел рынка нанотехнологий по направлениям

Особый интерес для коммерциализации представляет первая из упомянутых категорий, поскольку многие компании, связанные с наноматериаловедением, уже выпускают множество материалов. Такие фирмы часто пытаются одновременно расширить производство и развить методы обработки или применения новых материалов исходя из их необычных свойств и возможностей, поскольку новые материалы действительно значительно превосходят существующие по важнейшим характеристикам (прочность, сопротивление нагрузкам и «царапанью», высокие коэффициенты электро- и теплопроводности, износостойкость и т.д.). Многие из таких материалов уже выпускаются коммерчески, вследствие чего большинство инновационных фирм в области нанотехнологий связано именно с материаловедением, хотя можно отметить, что по объему инвестиций сейчас лидируют фирмы, занятые наноэлектроникой, нанофотоникой и оборудованием для исследований в области нанонауки.

Нанобиотехнологией называют огромную область разнообразного применения нанотехнологий к биологическим системам, начиная с традиционных разделов биологии и медицины. Достигнутые в этом направлении успехи достаточно широко известны: новые методы терапии, направленная доставка лекарств в организме, диагностические датчики и т.п. В дальнейшем можно ожидать новых успехов не только в традиционных отраслях медицины, но и в принципиально новых направлениях, связанных с молекулярной биологией (детектирование и изучение генов, белков, фрагментов ДНК, отдельных молекул и т.д.), что будет означать существенный прогресс в развитии медицины в целом.

Весьма перспективным направлением является наноэлектроника, где уже сейчас создано множество интересных устройств, которые могут применяться отдельно или в сочетании с другими элементами. Новые электронные устройства значительно превосходят существующие по цене и важнейшим техническим характеристикам, включая очень низкое

энергопотребление (~наноВатт), исключительную плотность монтажа (~1 триллион элементов/см²) и сверхвысокое быстродействие (частота переключения ~1 тераГц). Кроме того, многие наноустройства обладают совершенно новыми функциональными особенностями, вследствие чего на их основе могут создаваться и новые типы приборов. В последнее время все большее внимание производителей привлекают логические элементы с большим числом состояний, многоцветные фотоизлучающие диоды с высоким квантовым выходом, энергонезависимые запоминающие устройства, лазеры на квантовых точках, датчики универсального типа и т.п.

Компании, связанные с фотоникой, все чаще начинают использовать наноматериалы и нанотехнологии для выпуска оптических устройств с высокой степенью интеграции, работающих на парциальных волнах. Новые устройства позволяют объединить электронные и фотонные компоненты в одном чипе за счет достаточно дешевых технологических операций. В перспективе можно ожидать скорого появления на рынке дешевых и высокоэффективных оптоэлектронных устройств разного типа, включая преобразователи длин волн, перестраиваемые фильтры, устройства совмещения поляризации пучков, перестраиваемые мультиплексоры, оптические приемопередатчики и т.п.

Все большее значение приобретает разработка и производство контрольно-измерительной аппаратуры для нанонауки. Приборы и инструменты, позволяющие изучать химический состав и строение вещества в необходимом диапазоне (значительно ниже 100 нм), можно разделить на две группы. Первая включает хорошо известную и широко применяемую микроскопическую технику: сканирующие и трансмиссионные электронные микроскопы, атомно-силовые микроскопы и т.д. Ко второй группе можно отнести новейшую технику, прежде всего нанолитографию, а также атомные зондовые микроскопы, позволяющие изучать трехмерную структуру и атомарный состав твердых тел и пленок. Такие инструменты и приборы сейчас используются практически во всех нанотехнологических исследованиях.

Особое положение занимает новая область программного обеспечения нанософтвэа (panosoftware), которую можно разделить на связанную с моделированием и расчетом новых материалов хеминформатику (cheminformatics) и биоинформатику (bioinformatics), относящуюся к специализированной разработке средств изучения и тестирования новых биотехнологических препаратов. Разумеется, деление программного обеспечения для сложных и бурно развивающихся нанотехнологий является довольно условным, поэтому в последнюю категорию иногда зачисляют также разработки архитектуры электронных и фотонных устройств, методы моделирования и автоматической обработки данных по электронным структурам, квантовое моделирование и т.п. Кроме того, в эту же категорию можно занести и разрабатываемые сейчас программы по автоматическому управлению приборами и микроскопами в нанотехнологических исследованиях, программы по обработке данных, получаемых на приборах нового типа [31].

Таким образом, нанотехнологические инновационные разработки обещают возникновение множества прорывных бизнес-проектов, которые могут существенно улучшить социальный уровень. В ближайшее время человечеству придется, по-видимому, пережить период бурного, экспоненциального роста новых технологий, связанного со слиянием целого ряда традиционных наук (особенно биологии, информатики и т.д.) и их взаимным обогащением.

Литература.

1. Роко М. Перспективы развития нанотехнологии: национальные программы, проблемы образования // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002, т. XLVI, № 5, с. 90-95.
2. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
3. <http://www.nsu.ru/materials/ssl/text/news/Physics/135.html>.

4. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. – М.: «Вильямс», 2007. – 240 с.
5. Нанотехнология в ближайшем десятилетии (под ред. М. Роко, пер. с англ. под ред. Р.А. Андриевского). – М.: Мир, 2002. – 295 с.
6. <http://mikeai.nm.ru/russian/eoc/eoc.html>.
7. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman/html>.
8. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. Большое в малом. – М., 2005. – 436 с.
9. Бобровский С. Сколько же места там, внизу? Нанотехнологии: от отрицания до признания - за четыре года // PC Week/RE. - 2003. - № 44 - 45. - с. 52 - 55.
10. Сладков А.М., Кудрявцев Ю.П. Алмаз, графит, карбин - аллотропные формы углерода // Природа. 1969. №5. - С. 37-44.
11. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. Уч. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
12. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы – состояние разработок и применение. // Перспективные материалы. 2001. №6. - С. 5–11.
13. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure.// Acta mater., 2000. V.48. - P. 1-29.
14. Алымов М.И. Механические свойства нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
15. Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. - М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
16. Яковлев Е.Н., Грязнов Г.М., Сербин В.И. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 4. - С. 138-141.
17. Technology Directions for the 21st Century, vol. IV, NASA/CR-1998-207408, Lewis Research Center, May 1998.
18. <http://microtm.narod.ru/byspm/2008/pdf/byspm2008-01-p003-010.pdf>.
19. Абрамян А., Аршинов В., Беклемышев В. и др. Философские проблемы развития и применения нанотехнологий // Наноиндустрия. 2008. № 1. - С. 4-11.
20. http://shp.by.ru/sci/fullerene/shp/full_mat.
21. <http://www.nanohub.org>.
22. <http://nanotube.msu.edu>.
23. <http://www.ieee-virtual-museum.org>.
24. <http://www.sciencemag.org>.
25. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. – М.: Техносфера, 2003. – 336 с.
26. Раков Э.Г. Методы получения углеродных нанотрубок // Успехи химии. – 2000. – 69 (1). – С. 41-59.
27. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. – 2001. – 70 (10). – С. 934-973.
28. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. 1993. – Т.163. – № 2. – С. 33-60.
29. <http://www.sciencemag.org>.
30. Силантьев С.О. Нанотехнології – найпродуктивніші інновації сучасного та майбутнього економічного розвитку // Хімічна промисловість України. 2008. № 5. с. 59-70.
31. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.

УДК 330.101; 541:001. Поступила в редколлегию 6.03.2009 г.