

НАНОНАУКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ

Н.А. Азаренков, В.Д. Орлов, Н.И. Слипченко*, В.Г. Удовицкий**, В.И. Фареник**

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

**Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

***Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)*

Украина

Поступила в редакцию 27.01.2005

В обзоре рассмотрены современные достижения и перспективы развития таких наиболее динамично развивающихся сейчас направлений, как нанoeлектроника и наноматериалы, в частности, на основе недавно открытых новых структурных форм углерода – фуллеренов и нанотрубок. Обсуждаются вопросы, которые современная научно-техническая нанореволюция ставит перед системой подготовки кадров. На основе анализа передового опыта зарубежных стран высказаны предложения по развитию нанoобразования в системе высшего образования Украины.

ВВЕДЕНИЕ

Нанofизика, нанохимия, нанoeлектроника, наномедицина, наноматериалы, нанотехнология ... и еще много привычных терминов сейчас часто можно встретить с префиксом “нано” не только в специализированных научных журналах, но и в средствах массовой информации. Появляются новые “нано”журналы (например, “Journal of Nanoscience and Nanotechnology”, “Nanotechnology”, “Journal of Computational and Theoretical Nanoscience”, “NanoLetters”, “Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures”, “Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine” и др.), в старых солидных естественнонаучных журналах появляются новые “нано”разделы, по “нано”тематике проводятся сотни и даже тысячи научных конференций различного уровня, в университетах и институтах появляются новые “нано”факультеты, “нано”кафедры и “нано”специальности. Уже во многих странах приняты и продолжают приниматься приоритетные национальные программы научных исследований по “нано”тематике с значительными объемами финансирования. Все это – убедительные и наглядные подтверждения того, что в конце прошлого века началась новая научно-техническая революция, знаменующая собой вступление человеческой цивилизации в новую эру – эру нанонауки и нанотехнологий, которая уже в обозримом будущем способна существенно изменить облик мира.

Что же сейчас понимают под нанонауками и нанотехнологиями? Формально десятичная приставка “нано” обозначает одну миллиардную часть какой-либо величины, т.е. множитель 10^{-9} (в наноматериалах и нанотехнологиях имеется в виду одна миллиардная часть метра). В греческом языке, с другой стороны, слово “nanos” переводится как “карлик”. Поэтому суть различных нанонаук и нанотехнологий в том, что создаются, изучаются, используются на практике и производятся различные манипуляции с очень малыми материальными объектами, размеры которых хотя-бы вдоль одной из координат лежат в нанометровом диапазоне (100 нм и менее). Это существующий сейчас формальный размерный классификационный признак для определения нанообъектов и нанотехнологий. Принципиальным и главным является то, что свойства нанообъектов существенно определяются квантовыми закономерностями их поведения, в отличие от объектов макроскопических размеров, свойства которых определяются закономерностями классических наук.

В нанометровом диапазоне размеров исследователю и технологу приходится оперировать и изучать свойства уже не макросистем, а сравнительно небольших групп (кластеров) или даже отдельных атомов или молекул. Даже если исследуется макроскопических размеров образец из наноструктури-

рованного материала, то главным фактором, определяющим его свойства, является наноразмер его структурных единиц. Это происходит потому, что в свойствах наносистем главенствующую роль начинают играть квантовые размерные эффекты, которые возникают тогда, когда размеры системы становятся сравнимыми с длинами дебройлевских волн распространяющихся в них электронов, фононов или экситонов.

Отцом нанофизики и нанотехнологий многими, и вполне заслуженно, на наш взгляд, считается американский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии Р. Фейнман, который еще в 1959 году в своей знаменитой лекции с пророческим названием “Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики” [1] говорил:.. “При переходе к изучению самых маленьких объектов мы сталкиваемся со многими разнообразными явлениями, создающими новые возможности. Поведение отдельных атомов подчиняется законам квантовой механики и не имеет аналогов в макроскопическом масштабе, поэтому “внизу” мы будем постоянно наблюдать новые закономерности и эффекты, предполагающие новые варианты использования”. И еще: ...“Внизу располагается поразительно сложный мир малых форм и когда-нибудь (например, в 2000 г.) люди будут удивляться тому, что до 1960 г. никто не относился серьезно к исследованиям этого мира”. Прогнозы Р. Фейнмана блестяще сбылись. Однако, следует также отметить, что серьезные систематические исследования тонких пленок, в том числе и нанометровых толщин, которые Р. Фейнманом упоминались как один из объектов наномира, проводились в СССР и до 1960 года. Начало этих исследований связано с именами академика К.Д. Синельникова (Харьков) и академика С.А. Векшинского (Москва).

По нанотематике сейчас публикуется много различных статей и обзоров, но актуальность и важность данной темы делает это вполне оправданным. Цель данного обзора сформулирована, по существу, в его названии. Современная нанореволюция сейчас затрагивает уже практически все области науки и техники. Рассмотреть в одном обзоре достижения и перспективы развития по всем направлениям нанонаук и нанотехнологий не-

реально, да и вряд ли это стоит делать, т.к. любой обзор должен быть ориентирован на определенную группу специалистов. Авторы сделали акцент на наиболее быстро развивающихся сейчас нанонаправлениях – наноэлектронике и наноматериалах, в частности, новых углеродных наноматериалах, на которых уже сейчас имеются осязаемые достижения. Однако, помимо общего рассмотрения современного состояния и перспектив развития различных нанонаук и нанотехнологий, нам представляется сейчас очень важным широкое дискуссионное обсуждение вопросов, которые научно-техническая **нанореволюция** ставит сегодня перед системой подготовки кадров, в частности, системой высшего образования, т.е. проблем нанообразования как в мире, так и в Украине. Эти вопросы приобрели сегодня большую значимость и актуальность, т.к. революционные научные достижения последних лет требуют также существенных изменений в содержании и качестве образования, структура и содержание которого сложились в основном на базе научных достижений еще середины прошлого века. Изменения в системе высшего образования Украины необходимы также в связи с интеграцией нашей страны в международное образовательное и научно-техническое пространство. Своему видению этих вопросов мы также уделили внимание в данной работе.

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника и непосредственно зависящая от нее компьютерная техника – это те области, которые в значительной мере определяют научно-технический прогресс сейчас и фактически несколько последних десятилетий. Господствующим принципом в развитии твердотельной электроники, начиная от изобретения транзистора и до настоящего времени, был принцип уменьшения размеров транзисторов и повышения степени их интеграции на одной пластине. Этот принцип явился основанием эмпирического “закона Мура”, характеризующего динамику уменьшения размеров транзисторов и повышения степени их интеграции. Впервые он был высказан Гордоном Муром в 1965 году (так на-

зывается “ежегодное удвоение”) [2]. Затем этот закон эволюционировал и появились другие его формулировки – “два раза в два года”, а затем – “четыре раза в три года” (модифицированный закон Мура) [3].

Прогресс, достигнутый в микроэлектронике на сегодняшний день, действительно фантастический. Он хорошо был освещен самим Гордоном Муром в докладе “Ничто не бесконечно, но предел можно отодвинуть” на юбилейной 50-й международной конференции по твердотельным схемам (ISSC) [4]. В этом докладе отмечается, что за последние 30 лет объем ежегодного производства транзисторов вырос на 8 порядков, при этом обобщенный среднегодовой прирост составил 78%, а средняя отпускная цена в пересчете на один транзистор за этот период снизилась на 6 порядков, составив в 2002 году примерно 20 миллионных долей цента. Хорошо известно многим также более раннее “крылатое” выражение Мура: “Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня ролс-ройс мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку”.

Динамика уменьшения размеров транзисторов иллюстрируется графиком рис. 1. Данные этого графика за период 1969 – 1988 г. г. взяты нами из работы [5], а после 1990 г. пред-

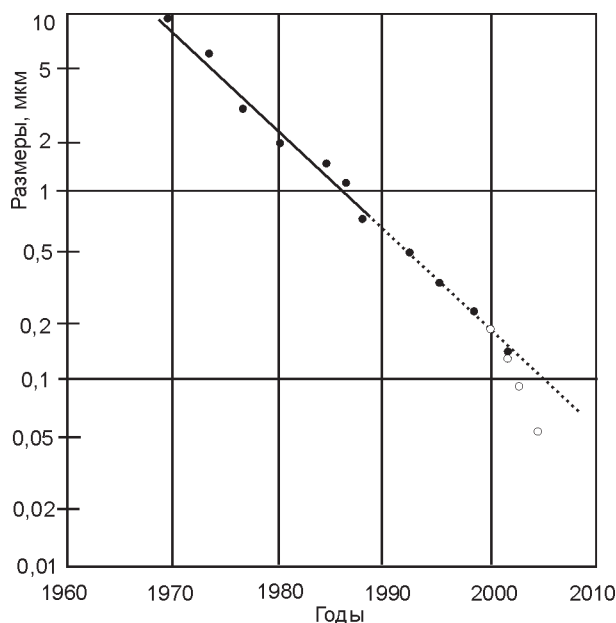


Рис. 1. Динамика уменьшения размеров отдельных транзисторов

ставлены достижения ведущих фирм-производителей микросхем по данным различных публикаций. Авторы [5] еще в 1988 г., экстраполируя зависимость на 2000 г., предсказали размер транзисторов 0,18 мкм. Поражает точность этого прогноза. В микропроцессоре Pentium 4 одной из ведущих корпораций Intel в 2000 году транзисторы производились именно с такими размерами [6]. После этого данная корпорация на основе внедрения нанотехнологий произвела транзисторы размером 90 нм и успешно ведет работы по внедрению в производство уже 50-нанометровых транзисторов. Последние достижения корпорации Intel показаны на графике незаштрихованными точками [7].

Патрик Гельсингер, вице-президент корпорации Intel, характеризуя тенденции развития микроэлектроники, несколько лет назад сделал прогноз: “Если нынешние тенденции сохранятся, в 2005 году мы будем иметь процессоры, содержащие 425 млн транзисторов, а в 2010 году их число достигнет 1,8 млрд. По выделению энергии на единицу объема такой ЧИП будет примерно соответствовать активной зоне ядерного реактора” [8].

Совершенно очевидно, что принцип уменьшения размеров транзисторов и увеличения за счет этого количества элементов в одном кристалле традиционно используемых неорганических полупроводниковых материалов (в основном Si или GaAs) не может эксплуатироваться бесконечно долго и в настоящее время уже в значительной мере себя исчерпал. Высказываются мнения о предстоящей “смерти закона Мура” и кризисе микроэлектроники [3, 8].

Весь ход развития микроэлектроники, особенно в последние годы, а также вышеприведенные примеры и высказывания известных специалистов наглядно подтверждают актуальность и острую необходимость следующего логического шага – перехода от микро- к наноэлектронике, предполагающей как создание новых материалов и технологий, так и разработку новых принципов функционирования и соответствующих им конструктивных решений наноэлектронных приборов. На наш взгляд, именно в электронике, включая компьютерную технику, наиболее быстро сейчас реализуются новые достиже-

ния нанонауки (являющейся по своей сути междисциплинарной наукой) и нанотехнологий. Это, в свою очередь, содействует дальнейшему прогрессу в других отраслях науки и техники, медицине, экологии, военном деле и т.д.

Нанозлектроника развивается сейчас по многим направлениям, но среди них хорошо прослеживаются следующие два основных направления поисков:

1) разработки, основанные на переходе в область наноразмеров и, соответственно, новых наноэффектов, при использовании уже известных и применяемых в твердотельной электронике материалов и структур;

2) разработка новых наноматериалов и создание на их основе новых нанозлектронных устройств.

Многие разработки этих направлений довольно часто являются тесно увязанными и взаимопереплетаются друг с другом. По оценкам специалистов заметный прогресс в нанозлектронике уже в ближайшие годы может быть достигнут за счет разработки новых конструктивных и технологических решений при использовании известных материалов, т.е. за счет разработок, относящихся к первому из вышеуказанных направлений. Но в более отдаленном будущем значительный и даже революционный прогресс ожидается от использования новых наноматериалов, в частности, различных молекулярных материалов органической природы (проводников, полупроводников, диэлектриков) и новых углеродных материалов на основе фуллеренов и нанотрубок, являющихся основой развития молекулярной электроники.

Существенное улучшение характеристик Si-приборов ожидается и фактически уже во многом достигнуто сейчас в лабораториях, к примеру, за счет следующих технических решений [4, 7, 9, 10]:

– использования „напряженного кремния” (strained silicon), в котором носители тока обладают значительно большей подвижностью и длиной свободного пробега, а приборы на его основе – большим быстродействием;

– использования новой структуры затвора (транзисторы с двойным и тройным затвором), что позволяет эффективно увеличить

его площадь и уменьшить размеры транзистора;

– использования новых подзатворных материалов с лучшими по сравнению с SiO₂ диэлектрическими характеристиками (high k material), например, на основе т.н. обедненного кремния и пр., что позволяет уменьшить размер транзисторов и токи утечки в нем;

– использования нанопроводов, которые могут быть интегрированы с Si-технологией и позволят более успешно решать проблему межсоединений.

Нанозлектроника следующих поколений должна будет и конечно же реализует огромные перспективы практического использования квантовых структур – квантовых ям, нитей, точек, возможности которых приближаются к физическим пределам, определенным самой Природой, т.е. когда работать будет один электрон, один спин, квант магнитного потока, излучения и т.д. Это позволит достичь быстродействия приборов ~ ТГц, а плотности записи информации ~10³ Тбит/см². При такой плотности записи информации на жестком диске размерами с наручные часы можно будет разместить все фонды одной из крупнейших библиотек или фотографии, отпечатки пальцев, медицинские карты и биографии абсолютно всех жителей Земли [11]. Поэтому сейчас активно развиваются еще совсем молодые, но сулящие большие перспективы такие направления нанозлектроники, как одно- или моноэлектроника (single electronics), спинтроника, джозефсоновская электроника [11 – 15], открывающие реальные перспективы, в частности, создания квантовых компьютеров, которые будут обладать на несколько порядков лучшими характеристиками по сравнению с лучшими из существующих сейчас компьютеров на кремниевых микропроцессорах [16].

Переход на квантовый уровень является важным этапом в развитии нанозлектроники, однако создание искусственных квантовых гетероструктур, особенно большого интегрированного множества таких структур с идентичными характеристиками, в настоящее время представляет сложнейшие технологические трудности. Эти трудности сегодня и в обозримом будущем будут главным препятствием при решении задачи создания чи-

пов с многомиллионным количеством интегрированных элементов. Поэтому большое внимание ученых и разработчиков уделяется сейчас принципиально иному подходу, в основе которого лежит идея использования отдельных молекул или их групп в качестве активных наноэлектронных элементов, т.е. молекулярной электронике. Такая возможность была высказана еще в 1957 г. Р. Фейнманом [17], а позднее им было показано, что законы квантовой физики не ставят предела миниатюризации компьютеров до тех пор, пока плотность записи информации не превышает 1 бит/атом [18]. Практическое развитие молекулярной электроники началось с пионерских работ А. Авирама, М. Ратнера и Ф. Картера, предложивших первые конструкции устройств молекулярной электроники [19 – 22].

Имеется ряд веских причин для того, чтобы считать молекулярную электронику одним из основных направлений наноэлектроники будущего [20 – 22]. Во-первых, молекулы являются естественными, устойчивыми и стабильными квантовыми структурами с минимальными размерами и это обеспечивает принципиальную возможность построения на их основе предельно малых за размерами высокоэффективных квантовых устройств с низкой стоимостью и минимальным энергопотреблением. Во-вторых, существование большого разнообразия молекул и относительная простота их модификации, что дает практически неограниченные возможности получения различных физических и химических свойств, необходимых для создания конкретных приборов. В третьих, высокая воспроизводимость (практически полная идентичность) размеров и характеристик молекул и молекулярных ансамблей, поскольку самой Природой определены и являются довольно стабильными и длины химических связей между атомами в конкретных соединениях, и углы между связями, и энергии этих связей. Принципиально возможным поэтому является создание и интеграция в одной структуре миллионов и миллиардов однотипных молекулярных элементов с одинаковыми характеристиками. К примеру, плотность размещения молекулярных элементов в структурах на основе ЛБ-пленок достигает $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а их быстродействие $\sim 10^{-10} \text{ с}$ [23]. В четвертых,

возможность создания наномолекулярных устройств путем химической “самосборки” молекул и их ансамблей. Это позволит в будущем в корне изменить технологию и оборудование для производства наноэлектронных изделий. Отпадет необходимость в очень дорогом оборудовании и длительных трудоемких процессах литографии и пр. Успешно развивающиеся методы синтеза в супрамолекулярной химии позволят создавать с высокой производительностью и воспроизводимостью наноэлектронные устройства в химических цехах-лабораториях при использовании значительно более дешевого оборудования [24].

Производство наноэлектронных приборов на основе одиночных молекул или молекулярных ансамблей, так же, как и приборов одноэлектроники, является делом более отдаленного будущего. Для этого требуется решение еще многих проблем, в частности – как обеспечить надежный подвод информации к молекуле, управлять ее состоянием и снимать информацию с нее. Сейчас ведутся интенсивные теоретические разработки, касающиеся механизма работы таких устройств, создаются теоретические и экспериментальные модели, а также идет накопление экспериментальных результатов. Темп этих работ и полученные результаты внушают оптимизм.

Однако уже сегодня достигла высокого уровня развития молекулярная микроэлектроника, основанная на использовании широкого спектра органических материалов – металлов, полупроводников, диэлектриков, пьезоэлектриков, магнитных материалов, нелинейных оптических материалов и др. Часто это направление еще называют электроникой органических материалов или просто органической электроникой. На основе тонких пленок различных органических материалов уже созданы практически все приборы элементного базиса микроэлектроники – диоды, транзисторы, переключатели, ячейки памяти, фотовольтаические элементы, светоизлучающие диоды, сенсоры и др., а также полностью органические микросхемы [25 – 35]. Особо следует отметить значительные достижения в последние годы в области создания различных светоизлучающих устройств (диодов,

матриц, дисплеев) на основе мономерных и полимерных пленок различных органических соединений. Органические светоизлучающие диоды (OLED, Organic Light Emitting Diode) позволяют создавать различные дисплеи, которые существенно превосходят пока еще наиболее распространенные дисплеи на жидких кристаллах по яркости свечения, скорости обновления пикселей, качеству и видимости изображения под любым углом, потребляемой мощности и др. По оценкам специалистов рынок OLED-дисплеев уже в 2005 году составит 3 млрд евро, а в 2010 году он достигнет 20 млрд и будет полностью преобладать [36].

Большие перспективы для дальнейшего развития нанoeлектроники открываются в связи с открытием и очень широкими сейчас исследованиями новых структурных форм углерода – фуллеренов и нанотрубок. Несмотря на очень небольшое время, прошедшее после открытия этих своеобразных молекул, образованных атомами углерода (фуллеренов в 1985 г. [37], а нанотрубок – в 1991 [38]), уже сейчас они находят широкое применение при создании многих электронных устройств нанометрового размера, в том числе и одноэлектронных [39 – 43]. Интересным и ценным в плане применения в электронике свойством углеродных нанотрубок является то, что в зависимости от строения в них может быть получен металлический, полуметаллический или полупроводниковый характер электропроводности. Это делает их универсальным наноматериалом, на основе которого могут быть созданы практически все приборы элементного базиса нанoeлектроники.

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Получение, исследование и практическое использование наноматериалов, т.е. материалов, размер структурных единиц которых лежит в нанометровом диапазоне, составляет сейчас одно из главных направлений нанонаук и нанотехнологий. Отличительной особенностью наноструктурированных материалов, которая определяет многие их уникальные свойства, является то, что у них существенно большая относительная доля по-

верхностных атомов. Такие атомы по сравнению с атомами объемной фазы имеют иное координационное число, симметрию локального окружения, энергетическое состояние и т.п. Поэтому в энергетическом аспекте уменьшение размера частицы приводит к возрастанию вклада поверхностной энергии в ее химический потенциал. Все эти особенности наноразмерных объектов существенно сказываются на их свойствах.

Существующие сейчас методы получения наночастиц можно классифицировать на две большие группы:

- получение наночастиц из макроскопических материалов путем использования различных методов диспергирования;
- получение наночастиц химическими или физическими методами синтеза с остановкой роста новой фазы на стадии наноразмеров.

Кратко рассмотрим наиболее распространенные методы, относящиеся к этим двум группам. Диспергирование можно осуществлять традиционными механическими методами в мельницах различной конструкции, однако существует предел механического измельчения, т.к. при уменьшении размеров частиц увеличивается их взаимодействие со средой диспергирования. Для диспергирования металлов и сплавов используется электроэрозия в среде диэлектрической жидкости. Эффективным является метод электрохимического генерирования, при котором происходит растворение материала анода с образованием в приэлектродном пространстве наночастиц. Среди физических методов синтеза наночастиц наиболее часто применяется конденсация из пара в вакууме или в различных средах с использованием различных методов испарения. Химические методы синтеза наночастиц сейчас достаточно хорошо развиты и продолжают совершенствоваться. К ним относятся: термолиз металлосодержащих соединений или их разложение под действием ультразвука, восстановление металлосодержащих соединений, синтез в обратных мицеллах, золь-гель метод, синтез путем окислительно-восстановительных реакций на границе двух сред (газовой и жидкой) и ряд других. Методы получения, свойства и применение уже хорошо известных материа-

лов в наноструктурированном виде достаточно полно освещены в ряде обзоров и монографий [44–47], но сейчас огромный интерес во всем мире вызывают еще совсем недавно обнаруженные новые углеродные материалы – фуллерены и нанотрубки, на свойствах и применении которых остановимся более подробно.

НОВЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Уже сейчас имеют разнообразные применения и обладают еще большей перспективой практического использования в высоких нанотехнологиях будущего новые углеродные материалы – фуллерены и нанотрубки. Фуллерены представляют собой замкнутые сфероидальные структуры, образованные атомами углерода. Способность углерода образовывать такие структуры была теоретически предсказана рядом ученых еще в 70-х годах прошлого столетия, а в 1985 г. эта способность была доказана экспериментально путем лазерного испарения графитовой мишени и последующей конденсации углеродного пара в гелиевой среде [37]. За открытие и исследование фуллеренов трем ученым – Смолли Р.Е., Керлу Р.Ф. и Крото Г. в 1996 г. была присуждена Нобелевская премия по химии. Интересная и захватывающая история открытия фуллеренов и исследования их свойств хорошо освещена в нобелевских лекциях лауреатов премии [48–50]. Фуллереновые молекулы, как оказалось, начиная от 20, могут содержать различное четное число атомов углерода, например, 20, 24, 28, 32, 36, 50, 60, 70 и т.д. (рис. 2), вплоть до гигантского количества, но наиболее стабильной и интересной является молекула C_{60} . В ней 60 атомов углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шестиугольников и 12 правильных

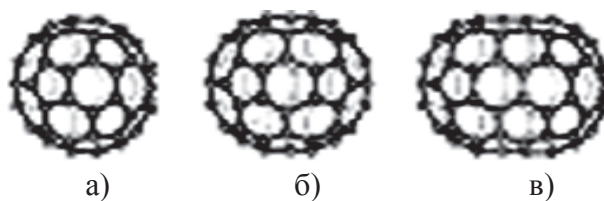


Рис. 2. Некоторые из фуллереновых молекул: C_{60} (а), C_{70} (б), C_{80} (в).

пятиугольников. Каждый атом углерода в молекуле C_{60} находится в вершинах двух шестиугольников и одного пятиугольника и имеет вследствие этого абсолютно равное с другими атомами энергетическое состояние. Молекула C_{60} является наиболее симметричной из известных сейчас молекул трехмерного мира. По форме она напоминает футбольный мяч, который был создан задолго до 1985 г., и поэтому ее иногда называют “бакиболл”.

Наиболее часто используемое и уже практически установившееся название “фуллерены” получили в честь американского архитектора Бакминстера Фуллера, который изобрел и использовал на практике куполообразные строительные конструкции, состоящие из пяти- и шестиугольных элементов. Фуллерены в конденсированном состоянии называют фуллеритами, а фуллериты, легированные металлическими и другими присадками, называются фуллеридами. Молекулы фуллеренов могут содержать внутри один или несколько неуглеродных атомов и тогда они называются эндофуллеренами или эндоэралами [51]. Вначале после открытия фуллерены были редкими и дорогостоящими объектами и исследованием их свойств занимались только в нескольких университетских лабораториях. Однако после открытия в 1990 г. эффективной методики синтеза, разделения и очистки фуллеренов [52] изучением их удивительных свойств начали заниматься очень многие специалисты в области физики, химии, материаловедения и пр. В 1991 г. японский ученый С. Иджима в исследованиях, связанных с получением фуллеренов в плазме дугового разряда между графитовыми электродами, сделал открытие углеродных нанотрубок [38]. Они представляют собой трубчатые структуры, созданные атомами углерода, образующими правильные шестиугольники по типу графитовых слоев. Углеродные нанотрубки могут быть однослойными (одиночными) и многослойными, т.е. состоять либо из вставленных друг в друга коаксиальных цилиндров, либо иметь форму скатанного рулона или свитка (рис. 3). Концы нанотрубок могут быть открытыми, либо закрытыми “шапочками” из атомов углерода, представляющими собой часть молекулы фуллерена, т.е. состоящими из пяти- и шести-

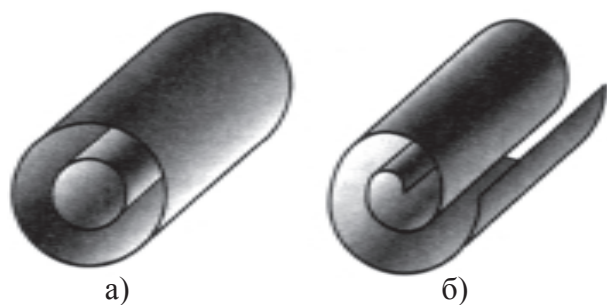


Рис. 3. Примеры строения нанотрубок: а) – двухслойной; б) – в виде свитка.

угольников. В последнее время были обнаружены также нанотрубки, имеющие сечение не в виде круга, а в виде шестигранника. С самого начала своего открытия фуллерены и нанотрубки попали в центр внимания мировой научной и инженерной общественности благодаря многим своим необычным и даже уникальным свойствам. Рассмотрим кратко основные физические и химические свойства этих nanoструктур, а также ряд применений, которые они уже нашли на практике. Для более полного знакомства заинтересованным читателям можно рекомендовать достаточно полные публикации, посвященные только этим объектам [38, 48 – 56].

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проводимость и сверхпроводимость. Фуллериты являются полупроводниками с шириной запрещенной зоны 1,5 – 1,95 эВ (C_{60}), 1,91 эВ (C_{70}), 0,5 – 1,7 эВ (C_{78}) и 1,2 – 1,7 эВ (C_{84}). Характерное время рекомбинации носителей в фуллерите C_{60} составляет $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ с [51, 57, 58]. Эти свойства определяют широкие возможности использования фуллеритов в быстродействующей полупроводниковой электронике. При легировании фуллерита C_{60} атомами щелочных металлов он приобретает металлический характер электропроводности, а при низких температурах в таких образцах обнаружен переход в сверхпроводящее состояние. Уже в первых экспериментах было установлено, что температура сверхпроводящего перехода T_c в легированном ионами K^+ фуллериде составляет $\sim 18 \div 19$ К, что намного выше, чем у интеркалированного графита (~ 1 К) [59]. Сверхпроводя-

щими свойствами обладают также фуллериды формулы A_3C_{60} и других щелочных металлов ($A - Rb, Cs, Na, Li$). Для системы $Rb-Tl-C_{60}$ температура перехода превышает 40 К, а для системы $Cu-C_{60}$ – температуру кипения азота [51, 59 – 63]. Особо важным является то, что фуллериды являются изотропными сверхпроводниками, что намного упрощает и расширяет возможности практического использования явления сверхпроводимости в этих материалах.

Сорбционные свойства. Фуллериты обладают высокой сорбционной способностью и как сорбенты по эффективности намного превышают широко используемый в настоящее время в качестве сорбента активированный уголь [64]. Хорошие сорбционные свойства дают возможность создавать на основе фуллеритов эффективные фильтры различного назначения, а также открывают новые перспективы широкого использования экологически чистого источника – водорода, т.к. на основе фуллеритов возможно создание высокоемких водородоаккумулирующих матриц. Согласно теоретическим расчетам после гидрирования всех двойных связей фуллерит $C_{60}H_{60}$ мог бы содержать до 7,7 мас. % легко высвобождаемого при определенных условиях водорода [65]. Получаемые практически уже сейчас гидриды фуллеренов $C_{60}H_{36}$ содержат до 6 мас. % водорода, а сорбционная емкость по водороду углеродных нанотрубок еще выше [60, 66].

Оптические свойства. Фуллериты обладают фотопроводимостью. В работе [67] сообщается, что спектр поглощения пленок на основе поливинилкарбазола, насыщенного смесью C_{60} и C_{70} , лежит в диапазоне 280 ÷ 680 нм, а квантовый выход составляет $\sim 0,9$. По этим характеристикам рассматриваемый материал является одним из лучших органических фотопроводников. Обнадеживающие результаты достигнуты при использовании фуллеренсодержащих материалов в органических фотоэлектрических преобразователях. Солнечные батареи на основе двухслойных структур $PcCu/C_{60}$ показали высокую эффективность преобразования ($\sim 3,6\%$) с пиком квантовой эффективности 18% при 620 нм. В указанной структуре фуллерен C_{60} выполняет две функции – акцептора элект-

ронов, а также служит для транспорта носителей тока [68].

Эффект нелинейной оптической прозрачности пленок и растворов C_{60} используется [69, 70] для создания быстродействующих оптических затворов и ограничителей. Нелинейные оптические свойства фуллеритов позволяют использовать их при создании, например, оптических цифровых процессоров, устройств защиты оптических сенсоров и других преобразователей от интенсивного излучения и пр. Продемонстрирована возможность использования растворов фуллеренов в фоторезистах для высокоразрешающей (~20 нм) электронно-лучевой литографии [71]. Возможны также и другие применения интересных оптических свойств фуллереносодержащих материалов и сред.

Механические и трибологические свойства. Молекулы фуллеренов обладают высокой механической прочностью. Теоретические оценки модуля объемного сжатия B для отдельной молекулы фуллерена C_{60} дают величины ~720 ÷ 900 ГПа. У кристалла алмаза $B \sim 450$ ГПа, т.е. он в два раза более легко сжимаем, чем отдельные молекулы фуллерена C_{60} . Однако, вследствие слабости вандерваальсовских межмолекулярных связей в кристалле фуллерита C_{60} , имеющем при обычных условиях ГЦК-решетку, модуль B в нем составляет всего лишь ~18 ГПа, т.е. в 50 раз меньше, чем у отдельной молекулы [72].

Ценным свойством кристаллического фуллерита является возможность его структурной перестройки при повышенных температурах и давлениях с уменьшением межмолекулярного расстояния и образованием при этом прочных ковалентных связей между атомами углерода соседних молекул. При этом такой модифицированный фуллерит обладает высокой твердостью к скручивающей деформации, которая даже превышает соответствующее значение для алмаза [51]. Еще одним направлением исследований является возможность получения из фуллеренов искусственных алмазов. При этом требуются существенно более низкие температуры и давления, чем при получении искусственных алмазов из поликристаллического графита.

Фуллерены, главным образом C_{60} , открывают большие перспективы создания высокоэффективных смазочных материалов, как в виде твердых пленочных покрытий, так и в виде различных растворных композиций [60, 73 – 75]. Этому идеально способствуют сферическая форма молекул C_{60} , а также их высокая прочность на сжатие и слабые межмолекулярные связи в кристалле. Такие свойства фуллерена C_{60} дают все основания говорить о нем, как о молекулярном подшипнике. Уже достигнуто улучшение на порядок и более трибологических характеристик фуллереносодержащих смазок по сравнению с лучшими из ранее разработанных традиционных смазок. При этом такой молекулярный подшипник является универсальным – он может использоваться и в маслах, и в консистентных смазках, и в твердых покрытиях при различных нагрузках и скоростях движения трущихся поверхностей.

Применение фуллеренов и их производных в медицине. Огромные возможности и перспективы имеет применение фуллеренов и их производных в медицине для диагностических и лечебных целей [76 – 78]. Эндофуллерены, содержащие внутри молекулы атомы радиоактивных элементов, используются в диагностике как радиоактивные маркеры [79]. Аналогичным образом внутри фуллереновых молекул могут быть заключены атомы различных рентгено- и магнитоконтрастных веществ, которые вводятся в организм при рентгеновских исследованиях или магниторезонансной томографии. Оболочки из атомов углерода вокруг этих материалов исключают возможность их непосредственного взаимодействия с биохимическими субстанциями человеческого организма, что имеет место при использовании традиционных веществ и довольно часто вызывает вредные побочные эффекты. Вследствие способности проникновения сквозь клеточные мембраны многие водорастворимые производные фуллеренов обладают биологической активностью. Это открывает широкие возможности создания на их основе новых эффективных лекарственных препаратов. Обнаружено антивирусное и антибактериальное действие

фуллеренсодержащих производных [80], в том числе против ВИЧ [81] и бактерий, вызывающих заболевание менингитом [82]. Карбоксифуллерены обладают нейротекторным действием [83]. Хорошие результаты достигнуты также при использовании фуллеритов в качестве биосовместимых покрытий для эндопротезов [60], обладающих высокими функциональными характеристиками. Сейчас исследования возможностей применения фуллеренсодержащих соединений и материалов в медицине ведутся широким фронтом и, несомненно, уже в недалеком будущем дадут значительные достижения.

Химические свойства. Химические свойства фуллеренов и материалов на их основе удивительны и разнообразны, как и все другие. Многие химики считают молекулы фуллеренов, содержащие одинарные и двойные углеродные связи, трехмерными аналогами ароматических структур и связывают с ними возможный переворот в органической химии [51]. Вследствие высокой электроотрицательности фуллерены в химических реакциях выступают как сильные окислители, что предопределяет их поведение как химических реагентов. Они способны образовывать огромное количество различных соединений со всевозможными химическими свойствами. Найдена возможность синтеза полифуллеренов, в которых отдельные молекулы связаны уже не вандерваальсовскими, а более сильными ковалентными связями [84]. Следует также упомянуть о большом разнообразии свойств эндоэдралов, т.е. фуллереновых молекул, содержащих внутри себя различные неуглеродные атомы. Большой класс новых химических соединений образуют металлокарбоны (меткары), в которых отдельные атомы углерода молекулярного каркаса замещены атомами металлов. Химия фуллеренов является новым активно развивающимся направлением органической химии и содержит в себе огромные перспективы. В заключение этого подраздела уместно привести высказывание одного из первооткрывателей фуллеренов Гарольда Крото [85] об этих удивительных молекулах: “наиболее восхитительным

свойством этих молекул является присущая им харизма, которая связана с их элегантно простой и чрезвычайно симметричной структурой, непохожей ни на что другое. Именно эта харизма дарит восторг и изумление всем химикам, независимо от возраста”.

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Некоторое время после открытия углеродные нанотрубки (УНТ) рассматривали как один из видов фуллеренов, которые имеют продолговатую форму. Однако дальнейшие исследования показали очень широкое разнообразие структурных модификаций и свойств УНТ, а также были синтезированы нанотрубки из других (неуглеродных) соединений [86]. Кроме того, фуллериты хорошо вписываются в уже давно существующую классификацию конденсированного состояния вещества и относятся к классу молекулярных кристаллов. В отличие от фуллеритов в УНТ каждый углеродный атом практически является поверхностным. Поэтому в рамках традиционных физических представлений трудно четко ответить на вопрос: УНТ – это молекула или твердое тело? По сути УНТ занимают промежуточное положение между молекулярным и конденсированным состоянием вещества. Эта особенность обуславливает многие их экзотические свойства и обеспечивает большой и все возрастающий интерес к ним и как к объектам фундаментальной науки, и как к новому материалу с огромными возможностями практического применения.

Проводимость и сверхпроводимость. Электрические свойства одиночных УНТ, как уже отмечалось, существенным образом зависят от их геометрического строения, в частности – от диаметра и хиральности. Образование одиночной УНТ можно условно представить как сворачивание отдельно взятой графитовой плоскости в цилиндр (рис. 4). Для описания геометрического строения УНТ введена специальная система координат, показанная на рис. 4. Векторы a_1 и a_2 являются элементарными векторами графитовой плоскости. Если из показанной внизу на рис. 4 плоскости вырезать затемненный участок,

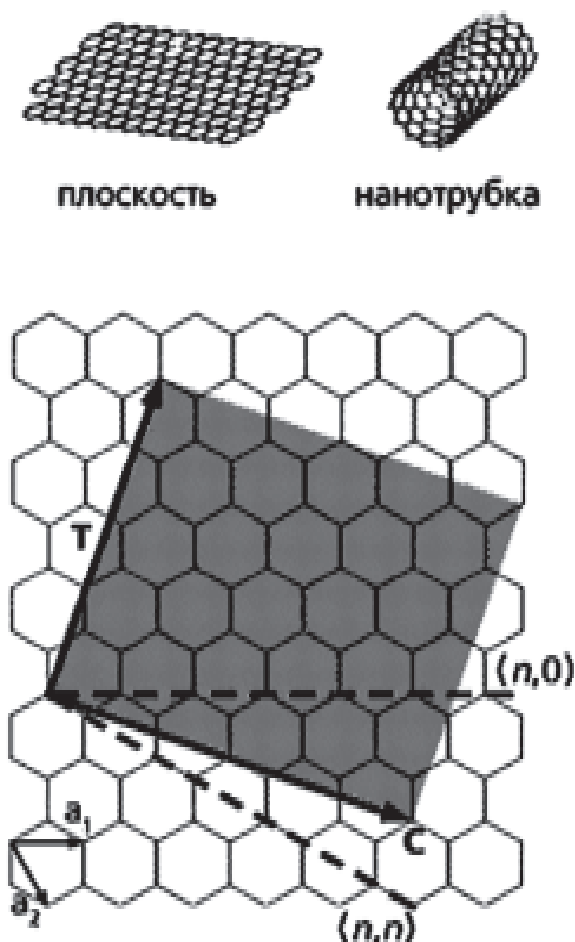


Рис. 4. Отдельно взятая графитовая плоскость и нанотрубка из нее (вверху), система координат и обозначения при описании структуры УНТ (внизу).

определяемый векторами C и T , и свернуть его в цилиндр вдоль вектора T (ось трубки), то хиральность и диаметр этой трубки будут определяться направлением и длиной вектора C , а ее длина – длиной вектора T . Количественно вектор C можно описать выражением: $C_k = ma_1 + na_2$. Исходя из этого, задание двух векторов (a_1, a_2) и двух скалярных множителей (m, n) является достаточным для определения структуры УНТ. При $m = 0$ или $n = 0$ образуются особого вида трубки типа “зигзаг”, а в случае $m = n$ – типа “кресло”. Зонная структура УНТ в зависимости от их строения может быть аналогична зонной структуре металлов, полуметаллов или полупроводников. Трубки типа “зигзаг” имеют металлический характер электропроводности. Полупроводниковый характер электропроводности имеют УНТ, удовлетворяющие условию: $m - n \neq 3k$ (k – любое целое число). У таких трубок ширина запрещен-

ной зоны $\Delta E \sim 1/d$ (d – диаметр). В случае $m - n = 3k$ зонная структура трубок аналогична зонной структуре полуметаллов, т.е. имеет нулевую запрещенную зону [56]. В металлических УНТ может реализовываться баллистическая электропроводность и экспериментально полученная плотность тока в таких трубках без их разрушения достигала 10^9 А/см^2 [87], тогда как, к примеру, проводники из меди плавятся уже при плотности тока $\sim 10^6 \text{ А/см}^2$. Полупроводниковые свойства УНТ сейчас активно изучаются с целью создания на их основе различных наноэлектронных приборов. Установлено, что ширина запрещенной зоны полупроводниковых УНТ в зависимости от их строения может варьироваться в очень широких пределах – от 2 мэВ до 2 эВ [56]. Обычно наблюдается проводимость p – типа, но как и у других неорганических или органических полупроводников она может существенно варьироваться (вплоть до получения проводимости n – типа) за счет различных воздействий – химического легирования, полевого эффекта и пр. [43,88].

В УНТ существует также и явление сверхпроводимости. Вначале был обнаружен переход в сверхпроводящее состояние при температуре 0,55 К [89], а затем такой переход обнаружен в одиночных нанотрубках диаметром 0,4 нм уже при температуре ~ 15 К [90]. Сейчас во многих лабораториях мира идет погоня за лучшим результатом, т.е. обнаружением сверхпроводимости в трубках при более высоких температурах. Ожидается, что УНТ могут стать самыми высокотемпературными среди известных сейчас сверхпроводниками и поэтому исследования нанотрубок в этом направлении, впрочем, как и исследования их по многим другим направлениям, имеют не только научную, но и значительную коммерческую ценность.

Эмиссионные свойства. Вследствие таких характеристик УНТ, как большое aspectное соотношение (соотношение между длиной и диаметром), малый радиус кривизны на кончике трубки, высокие электропроводность, теплопроводность и химическая стабильность, они обладают прекрасными эмис-

сионными свойствами. На их основе уже сейчас созданы и продолжают интенсивно разрабатываться автоэлектронные эмиттеры для различных электронных приборов, например, мониторов, плоских кинескопов, катодно-лучевых осветительных ламп и пр. Такие эмиттеры могут иметь большую площадь, способны длительно работать в обычной воздушной среде, имеют низкое напряжение питания и энергопотребление, а в перспективе могут быть также более дешевыми по сравнению с традиционными автоэлектронными эмиттерами [54, 55, 91].

Механические свойства. Нанотрубки обладают многими рекордными на сегодняшний день параметрами, характеризующими механические свойства. Определенный экспериментально модуль Юнга E у них достигает 1,8 ТПа [92], тогда как у самых прочных сталей $E \sim 2$ ГПа. Высокая прочность УНТ, сочетающаяся с их низкой плотностью ($\sim 1,3$ г/см³), теоретически позволяют реализовать на практике идею создания космического кабеля-лифта для поднятия грузов в космос. Над реализацией этого уже работают специалисты НАСА в США. Такая идея была высказана Ф.А. Цандером еще в 1910 г., но прочных материалов для ее практического воплощения до открытия УНТ не было. Самый прочный промышленный волоконный материал “Спектра 1000” имеет прочность на разрыв ~ 3 ГПа и может выдержать собственный вес кабеля длиной всего ~ 315 км. Расчетное значение, согласующееся с экспериментальными результатами, предела прочности на разрыв специального волокна из нанотрубок достигает 150 ГПа [54], что достаточно для создания кабеля, хотя это и связано со значительными технологическими трудностями. Однако уже сейчас исключительно высокая прочность нанотрубок, сочетающаяся с их легкостью, находят многочисленные применения. Одно из важных направлений таких применений – создание особо прочных полимерных композитов, которые используются в авиационной и космической технике, а также при создании пуленепробиваемых жилетов, специальной одежды и снаряжения, деталей кузовов автомобилей,

ответственных элементов конструкций сейсмоустойчивых зданий и многого другого. Одиночные УНТ в силу своей прочности и высокого аспектного соотношения идеально подходят и уже используются для создания зондов (кантилеверов) сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, которые по своим характеристикам намного превосходят использовавшиеся до этого зонды из вольфрамовых игл.

Сорбционные свойства. Нанотрубки, как и фуллереновые материалы, обладают высокими сорбционными свойствами. Эти свойства значительно усиливаются возможностью заполнения различными веществами внутренних полостей одиночных трубок, а также и межтрубного пространства многослойных трубок. Причем заполнение внутренних полостей может осуществляться непосредственно при синтезе нанотрубок или целенаправленно из газовых и жидких сред уже после получения и очистки трубок. Заполняя внутренние полости атомами высокопроводящих металлов можно получать нанопровода в изоляционной оболочке, а если вводить атомы с различными магнитными свойствами можно получать магнитные наноматериалы с требуемыми характеристиками. Высокая сорбционная способность нанотрубок позволяет создавать на их основе эффективные фильтры с большой емкостью для очистки газовых и жидких сред от токсичных и радиоактивных примесей. При этом углеродная оболочка обеспечивает надежную защиту содержащегося в трубках вещества от внешнего химического и физического воздействия. Интенсивно и успешно ведутся исследования по разработке на основе нанотрубок устройств для хранения газообразного водорода [54, 55, 60, 66], что позволяет надеяться на создание новых, экологически безопасных источников энергии.

Другие свойства и применения. Химические свойства УНТ также удивительны и разнообразны и являются неисчерпаемым объектом проводимых сейчас многочисленных исследований. Химики уже научились УНТ окислять, хлорировать, фторировать, интеркалировать, прививать к ним различ-

ные функциональные группы, делать их производными растворимыми или образовывать на их основе стабильные коллоиды и дисперсии, замещать в них углеродные атомы атомами других элементов, внедрять внутрь трубок или в межтрубное пространство молекулы “гостей”, которые могут быть донорами или акцепторами электронов, и многое, многое другое. Ясно, что химическая модификация нанотрубок является действенным способом целенаправленного изменения их свойств и получения материалов с требуемыми характеристиками. Для углубленного знакомства с химией УНТ заинтересованным читателям рекомендуем обзор [54] и цитированные в нем многочисленные публикации.

В УНТ обнаружена связь между приложенной к ним механической нагрузкой и электрическими свойствами. Это позволяет использовать их для создания нанопреобразователей механического сигнала в электрический, и наоборот [93], в частности, открывается возможность создания искусственных мускулов. Зависимость электрических и оптических характеристик от адсорбции донорных или акцепторных газов дает возможность создания на основе нанотрубок чувствительных и быстродействующих газовых сенсоров [94–96]. Широкие перспективы открываются при использовании УНТ в фармакологии и медицине, в частности, как нанотранспортеров белков, фрагментов ДНК или различных лекарственных препаратов в требующий лечения конкретный орган человеческого организма или даже в отдельные клетки [97–99]. Для более глубокого знакомства с перспективами наномедицины, включая и применение в медицине различных наноматериалов, можно рекомендовать недавно опубликованные обзоры [76, 77]. Новые возможности практического применения в наноустройствах открывают т.н. “наностручки” – нанотрубки, содержащие внутри себя молекулы фуллеренов или эндофуллеренов.

Можно без особого труда привести еще много примеров уже реализованных или потенциальных возможностей применения новых углеродных наноматериалов – фуллере-

нов и нанотрубок. Ввиду ограниченности объема обзора были приведены, на наш взгляд, только самые яркие из них. Ясно, что за очень короткое время, прошедшее после открытия этих новых аллотропных форм углерода, они обоснованно стали одними из самых широко изучаемых объектов исследований различных нанонаук и нанотехнологий, а их практическое применение уже дало, а в будущем еще обязательно даст новые значительные достижения во многих областях науки и техники.

НАНООБРАЗОВАНИЕ

Исходя из всего вышеизложенного, совершенно очевидно, что успех в развитии нанонаук и нанотехнологий напрямую зависит от решения проблемы подготовки специалистов, которые должны будут развивать это новое направление, т.е. от nanoобразования. Поскольку уровень развития новейших, в том числе нанотехнологий, уже сейчас влияет, а в будущем, как ожидается, станет определяющим фактором научных и технических достижений любого государства и его положения в мировой экономике, то многие развитые государства уже сейчас уделяют самое пристальное внимание nanoобразованию. При этом максимальный успех может быть достигнут при комплексном подходе к решению этой проблемы, т.е. организации nanoобразования на всех уровнях обучения, начиная с дошкольного и заканчивая подготовкой научных кадров высшей квалификации. Кроме подготовки молодых специалистов в области нанотехнологий важным звеном nanoобразования является также переподготовка уже работающих во многих отраслях экономики специалистов и научных работников.

Одним из мировых лидеров по развитию нанотехнологий является США. В этой стране уже сейчас не только в технических, но и в классических университетах повсеместно создаются и эффективно реализуются на практике различные nanoобразовательные программы и курсы для студентов, аспирантов, научных работников и преподавателей колледжей и ВУЗов [100]. При этом решение задач nanoобразования в тесной интеграции

с учебными заведениями возлагается также и на специализированные научно-исследовательские институты и центры, которые обладают современным оборудованием и занимаются исследованиями и разработками в области нанонаук и нанотехнологий. Следует также отметить, что нанообразование, как в США, так и в других развитых странах, не является самостоятельной обособленной задачей, а входит в качестве одной из наиболее приоритетных задач в национальные программы по развитию нанонаук и нанотехнологий. В США такая программа была принята в 2000 году и называется “Национальная нанотехнологическая инициатива” [101]. Аналогичные программы приняты и финансируются на высоком уровне в Японии, Южной Корее, Китае, а также странах Евросоюза (Шестая рамочная программа развития науки). В общем уже более 40 стран на такие программы расходуют ежегодно около 2 млрд. долларов государственного финансирования, а частные фирмы даже больше этой суммы. В результате ожидается, что объем продукции наноиндустрии в ближайшие 10 – 15 лет превысит триллион долларов.

В связи с высокой актуальностью и финансово-экономическими перспективами можно утверждать, что сейчас в наиболее передовых странах возникла и со временем будет только усиливаться новая парадигма образования, которая ориентирована на получение обучающимися новых и быстро обновляющихся междисциплинарных знаний в области нанонаук и нанотехнологий. В связи с быстрой обновляемостью знаний обучение в этих областях не должно заканчиваться после окончания учебного заведения, а должно быть непрерывным. При этом широкие возможности непрерывного обучения дают новые технологии образования, основанные на возможностях глобальных сетей Интернет – т.н. электронного образования (E-learning), которое сейчас очень широко внедряется за рубежом. Многие вопросы, касающиеся национальных программ наноисследований, а также организации нанообразования, в частности, в США, хорошо освещены в [102].

Развиваются нанонауки и нанотехнологии и в странах бывшего СССР. В 2002 г. в России

приняты “Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу” [103], в которых нано направления занимают важное место. В 2003 г. в РФ введено также новое направление подготовки специалистов в ВУЗах – 658300 “Нанотехнология”, в составе которого открыты две специальности – 202000 “Нанотехнология в электронике” и 073800 “Наноматериалы” [104]. В Украине за последние годы нанотематика в нормативных документах, планах и программах, научных исследованиях и технологических разработках также получила определенное развитие, в том числе и в сотрудничестве с Россией. Еще в 1999 г. были разработаны и подписаны концепция, структура и меморандум совместной российско-украинской программы “Нанофизика и наноэлектроника”. Она приобрела в Украине официальный статус и начала реализовываться уже в 2001 г. после принятия распоряжения Кабинета Министров № 85р “Про міжвідомчу російсько-українську програму “Нанофізика і наноелектроніка”. В рамках выполнения этой программы в сентябре 2005 г. планируется проведение уже 6-го Международного украинско-российского семинара “Нанофизика и наноэлектроника” [105]. В 2003 г. принят Закон Украины “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні” [106], которым определены следующие приоритетные направления инновационной деятельности на период 2003 – 2013 годы:

- модернизация электростанций, новые и возобновляемые источники энергии, новейшие ресурсосберегающие технологии;
- машиностроение и приборостроение как основа высокотехнологичного обновления всех отраслей производства, развитие высококачественной металлургии;
- **нанотехнологии**, микроэлектроника, информационные технологии, телекоммуникации;
- усовершенствование химических технологий, новые материалы, развитие биотехнологий;
- высокотехнологичное развитие сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности;

- транспортные системы: строительство и реконструкция;
- охрана и оздоровление человека и окружающей среды;
- развитие инновационной культуры общества.

Нанотехнологии прямо указаны в третьем пункте как одно из приоритетных направлений, но фактически в каждом из вышеперечисленных направлений применение нанотехнологий в будущем может дать значительный положительный эффект, например, в создании новых источников энергии, новых покрытий для машиностроения, новых нанодисперсных материалов различного назначения, новых лекарств и методов диагностики и лечения, новых методов и технологий защиты окружающей среды и т.д. Следовательно, можно утверждать, что нанотехнологии потенциально являются одним из важнейших факторов достижения существенного прогресса на законодательно определенных стратегических приоритетных направлениях инновационного развития Украины. В 2004 г. НАН Украины принята комплексная Программа фундаментальных исследований “Наносистемы, наноматериалы та нанотехнології”, основной целью которой является достижение Украиной мирового уровня в нанотехнологии, участие в глобальных экономических и технологических процессах и решение важных социальных, экологических проблем [107]. Руководитель данной программы первый вице-президент НАН Украины академик Шпак А.П. в своем интервью под образным названием “Цей карлик зробить світ невпізнаним” рассказал о первых достижениях в реализации программы и отметил, что она также предполагает вовлечение молодых специалистов, подготовку и переподготовку кадров, разработку и методическое обеспечение учебных курсов по наносистемам [108]. Однако программы национального уровня по развитию нанонаук и нанотехнологий в Украине, как и в России, пока еще нет. Вместе с тем, задачи образования в стране, начиная от дошкольного, и заканчивая подготовкой научных кадров высшей квалификации, в основном решаются в системе учебных заведений Министерства

образования и науки. Более половины докторов и кандидатов наук также работают в ВУЗах и научных учреждениях Министерства образования и науки. Исходя из этого, не будет преувеличением утверждение о том, что успех в развитии нанонаук и нанотехнологий, а тем более нанообразования в стране, существенным, если не определяющим образом, зависит от решения этих задач в учебных заведениях и научных учреждениях Министерства образования и науки.

Авторы, исходя из собственного опыта и видения проблемы, а также анализа опыта стран-лидеров в области нанотехнологий, считают возможным высказать свои предложения по организации нанообразования, ряд из которых носит дискуссионный характер. Во многом эти предложения являются результатом размышлений под нанотематическим углом зрения над вопросами, поднятыми в докладе “Вища освіта і наука – найважливіші сфери відповідальності громадянського суспільства та основа інноваційного розвитку”, сделанном Министром науки и образования Николаенко С.Н. на итоговой коллегии министерства 24.03. 2005 г. [109].

1. Сейчас активно ведется работа по обновлению содержания высшего образования и подготовке нового списка направлений и специальностей подготовки специалистов в ВУЗах. Следует в новый перечень ввести направление “нанотехнология” и в рамках этого направления новые наноспециальности, например, “наноэлектроника”, “наноматериалы” и др. Со временем перечень наноспециальностей, естественно, должен дополняться.

2. При решении затронутого министром в [109] и дискутируемого сейчас вопроса о соотношении академической и профессиональной составляющих подготовки магистра и бакалавра, т.е. – разделять ли образование на классически-академический сектор и сугубо профессиональный или сохранить бинарную схему совмещения академического и профессионального образования в интересах нанообразования следует, несомненно, сохранить и даже развить бинарную схему. Исходя из этого, не бояться “технизации” классических университетов и по примеру зарубежных университетов создавать в них но-

вые структурные единицы – институты, центры, кафедры и даже факультеты, ориентированные на решение задач нанообразования.

3. Следует развернуть активную работу по подготовке новых курсов, учебных и методических пособий, а также практикумов по нанонаукам и нанотехнологиям. При введении кредитно-модульной системы обучения предусмотреть для заинтересованных студентов возможность выбора более индивидуальной траектории обучения. Для этого дать право и обеспечить возможность посещения, сдачи и включения в общий зачет нанотематически ориентированных курсов, дополняющих и расширяющих друг друга, но читаемых на различных факультетах (например, студентам химического факультета курс “квантовая механика”, читаемый на физическом факультете, а студентам физического факультета курс “наноматериалы и методы их получения”, которые, как правило, читаются на химических факультетах в элитных зарубежных университетах, и т.д.).

4. Поскольку качественная подготовка специалистов по нанонаукам и нанотехнологиям является делом дорогостоящим, т.к. требует значительных вложений в создание современной учебно-материальной базы, следует шире вовлекать в решение задач нанообразования научные учреждения Министерства образования и науки, а также НАН Украины, и создавать межвузовские нанотехнологические центры, лаборатории, которые также должны быть интегрированы с крупнейшими высокотехнологичными предприятиями промышленности.

5. Шире развивать учебные и научные связи с зарубежными ВУЗами и научными центрами, которые активно занимаются наноисследованиями и нанообразованием и имеют для этого современные приборы и оборудование.

6. Активнее вовлекать в процесс нанообразования факультеты гуманитарного профиля, в частности, – юридический, экономический, социологический, факультет психологии и др., т.к. появление новых нанотехнологий внесет существенные изменения в жизнь общества. Наряду с преимуществами социального и экономического характера возмож-

ны также и отрицательные последствия разработки нанотехнологий и незаконного их использования во вред обществу (терроризм, клонирование человека или целенаправленное изменение его психики, производство и реализация непроверенных или опасных генно-видоизмененных продуктов питания, несанкционированный доступ к информации и многое другое).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанотехнологии и нанообразование в наиболее развитых странах уже прошли этап зарождения и сейчас находятся на этапах роста и совершенствования. В нашей стране нанонаукам и нанотехнологиям также уделяется с каждым годом все больше внимания даже в условиях очень ограниченного и явно недостаточного финансирования науки, но нанообразование находится еще на этапе зарождения. Сегодня, к сожалению, можно встретить много “экспертов”, утверждающих, что мы навсегда отстали от передовых стран в науке и высоких технологиях. Они в своих прогнозах очень заблуждаются и будущее это подтвердит. При правильном анализе и понимании современных достижений, а также тенденций и перспектив инновационного развития и сосредоточении человеческих и материальных ресурсов на его ключевых направлениях, Украина обязательно войдет в число наиболее развитых стран мира. И одним из обязательных условий этого, по нашему глубокому убеждению, является становление, рост и совершенствование нанонаук, нанотехнологий и нанообразования, чему уже сегодня следует уделять пристальное внимание на всех уровнях.

ПРИМЕЧАНИЕ

При подготовке обзора одной из главных и трудоемких задач является всесторонний поиск публикаций по теме, особенно совсем новых. В этом авторы использовали возможности современных технологий, а именно – возможности Интернет-сети. За доброжелательную и действенную помощь в этом выражаем глубокую благодарность руководителю Центра интернет-технологий ЦНБ ХНУ им. В.Н. Каразина Журавлеву С.Г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фейнман Р. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики //Рос. хим. журн. – 2002. – т. 46. – № 5. – С. 4-6.
2. Moore G. Cramming more Components onto Integrated Circuits// Electronics. – 1965. – Vol. 38. – № 8. – P. 114-117.
3. Сейсян Р.П. Скрытый кризис микроэлектроники на пороге XXI века (edu.ioffe.ru/wmw/n1/pdf/seisjan.pdf.).
4. Мур Г. Ничто не бесконечно, но предел можно отодвинуть //Chip News. – 2003. – № 2. – С. 14-16.
5. Буа Д., Розеншер Э. Физические границы возможного в микроэлектронике //Физика за рубежом 1990, Сер. А, сб.статей. – М.: Мир, 1990. – 184 с.
6. Карпенко А. Закат кремниевой эпохи//СНП. – 2001. – № 11. – С. 3.
7. Сунлинь Чжоу. Нанотехнологии гарантируют будущее полупроводниковых технологий// Chip News. – 2003. – № 8. – С. 23-25.
8. Головных А. Пациент скорее жив...//СНП. – 2001. – № 4. – С. 90.
9. Растягивая кремний //СНП. – 2001. – № 8. – С. 12.
10. Knight W. Hybrid nano-wires provide link to silicon //Nature . – 2004. – Vol. 430. – P. 61.
11. Головин Ю.И. Нанотехнологическая революция стартовала // Природа. – 2004. – № 1. – С. 25-36.
12. Koguchi Nobuyuki, Tokano Jan-Ichiro Trends in the research on single electron electronics – it is possible to break through the limits of semiconductor integrated circuits? //Sci. and Technol. Trends: Quart. Rew. – 2003. – № 7. – P. 47-53.
13. Likharev K.K. Single-electron devices and their applications //Proc. IEEE. – 1999. – Vol. 87. – № 4. – P. 606-632.
14. Von Molnar Stephan, Read Dun New materials for semiconductor spin electronics //Proc. IEEE. – 2003. – Vol. 91. – № 5. – P. 715-726.
15. Стенин В.Я. Современное состояние элементной базы наноэлектроники //Электроника, микро- и наноэлектроника: Сб. научн. тр. – М.: МИФИ, 2001. – С. 145-151.
16. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления //УФН. – 2005. – Т. 175. – № 1. – С. 3-39.
17. Feynman R.P. Miniaturization /Eds. Gilbert H.D. – N. Y., 1961. – P.282-286.
18. Фейнман Р. Квантовомеханические ЭВМ//УФН. – 1986. – Т. 149. – №. – С.671-688.
19. Molecular Electronics: Science and Technology. Ed. by A. Aviram and M. Ratner//Annals N.Y. Acad. Sci. – 1988. – Vol. 852.
20. Ratner M.A. Introducing molecular electronics//Materials Today. – 2002. – Vol. 5.– № 2. – P. 20-27.
21. Кригер Ю.Г. Молекулярная электроника. Состояние и пути развития//Ж. структ. хим. – 1993. – Т. 34. – № 6. – С. 75-85.
22. Heath J.R., Ratner M.A. Molecular Electronics // Physics Today. – 2003. – Vol. 56. – № 5. – P. 43-49.
23. Литовченко В.Г., Попов В.Г. Физика поверхности и микроэлектроника. – М.: Знание, 1990. – 64 с.
24. Лен Ж. Супрамолекулярная химия. – Новосибирск: Наука, 1998. – 333 с.
25. Metzger R.M. Monolayer rectifiers//J. Solid State Chem. – 2002. – Vol. 168. – № 2. – P. 696-711.
26. Dodalapur A. Organic geterostructure field-effect transistor //Science. – 1995. – Vol. 269. – № 5230. – P. 1560-1562.
27. Schauer F., Zhivkov I., Nespurek S. Organic phthalocyanine films with high mobilities for efficient field effect transistor switches //J. Non-Cryst. Solids. – 2000. – P. 1006-1010.
28. Reed M.A., Chen J. Molecular access memory cell //Appl.Phys.Lett. – 2001. – Vol. 78. – № 23. – P. 3735-3737.
29. Brabec Cristoph J., Sariciftci N.Serder, Hummel Jan C. Plastic solar cells //Adv. Funct. Mater. – 2001. – № 1. – P. 15-26.
30. Юппе Т.А., Рудая Л.И., Климова Н.В. и др. Органические материалы для фотовольтаических и светоизлучающих устройств //ФТП. – 2003. – Т. 37, вып. 7. – С. 835-843.
31. Slipchenko N.I., Udovitsky V.G., Orlov V.D. Thin films of organic semiconductor for gas sensor development//Funct.Mater. – 2003. – Vol. 10 – № 3. – P. 559-564.
32. Sirota Yasuhico Organic materials for electronic and optoelectronic devices //J. Mater. Chem – 2000. – Vol. 10 – № 1. – P. 1-25.
33. Angelopoulos M. Conducting polymers in microelectronics//IBM J. Res. Dev. – 2001. – Vol. 45 – № 1. – P. 57-75.
34. Gelinck G.N., Geuns T.C.T., de Leeuw D.M. High-performance all-polymer integrated circuits//Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77. – № 10. – P. 1487-1489.
35. Hamers R.J. Flexible electronic futures //Nature. – 2001. – Vol. 412. – № 6846. – P. 489-490.

36. Головных А. Мониторы завтрашнего дня// ЧИП. – 2004. – № 3. – С. 46-49.
37. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C. et al. C₆₀: Buckminsterfullerene // Nature. – 1985. – Vol. 318. – P. 162-163.
38. Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon // Nature. – 1991. – Vol. 354. – P. 56-58.
39. Cuniberti G.L., Gutierrez R., Fagos G. et al. Fullerene based devices for molecular electronics// Physica, E. – 2002. – Vol. 12. – № 1. – P. 749-752.
40. Menon M., Srivastava G., Saini S. Fullerene-derived molecular electronic devices// Semicond. Sci. Technol. – 1998. – Vol. 13. – P. A51-A54.
41. Tsukagoshi K., Yoneya N., Uryu S. Carbon nanotube devices for nanoelectronics // Physica, B. – 2002. – Vol. 323. – № 1-4. – P. 107-114.
42. Hoenlein W. New Prospects for Microelectronics: Carbon Nanotubes // Jap. J. Appl. Phys. – 2002. – Vol. 41. – P. 4370-4374.
43. Won Bong Choi, Eunja Bae, Donghum Kang et al. Aligned carbon nanotubes for nanoelectronics // Nanotechnology. – 2004. – Vol. 15. – P. S512-S516.
44. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Рос. хим. журн. – 2002. – Т. 46. – № 5. – С. 50-55.
45. Шпак А.П., Куницкий Ю.А., Карбовский В.Л. Кластерные и наноструктурные материалы. – К.: ИД "Академкнига", 2001. – 588 с.
46. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б. и др. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Усп. химии. – 2005. – Т. 76. – № 6. – С. 539-574.
47. Гусев А.И., Рампель А.А. Нанокристаллические материалы – М.: Физматлит, 2000. – 222 с.
48. Смолли Р.Е. Открывая фуллерены // УФН. – 1998. – Т.168. – № 3. – С. 323-330.
49. Керл Р.Ф. Истоки открытия фуллеренов: эксперимент и гипотеза // УФН. – 1998. – Т.168. – № 3. – С. 331-342.
50. Крото Г. Симметрия, звезды и C₆₀ // УФН. – 1998. – Т.168. – № 3. – С. 343-358.
51. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // УФН. – 1995. – Т. 165. – № 9. – С. 977-1009.
52. Krutshmer W., Lamb L.D. Fostropoulos K. et al. Solid C₆₀: a new form of carbon // Nature. – 1990. – Vol. 347. – P. 354-358.
53. Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. Physical Properties of Carbon Nanotubes. London. Imperial College Press, 2000. – 258 p.
54. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Усп. хим. – 2001. – Т. 70. – № 10. – С. 934-973.
55. Елецкий Е.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 4. – С. 401-438.
56. Liu X., Lee C., Han S. et al. Carbon Nanotubes: Synthesis, Devices, and Integrated Systems. In Molecular Nanoelectronics Ed. by Reed M.A. and Lee T. M., American Science Publishers, 2003.
57. Saito S., Oshiyama A. Cohesive Mechanism and Energy Bands of Solid C₆₀ // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 66. – № 20. – P. 2637-2640.
58. Sheville R.A., Halas N.J. Time-resolved carrier relaxation in solid C₆₀ thin films // Phys. Rev., B. – 1992. – Vol. 45. – P. 4548-4550.
59. Локтев В.М. Легированный фуллерит – первый трехмерный органический сверхпроводник // Физ. низк. темп. – 1992. – Т. 18. – № 3. – С. 217-237.
60. Шпилевский М.Э., Шпилевский Э.М., Стельмах В.Ф. Фуллерены и фуллереноподобные структуры – основа перспективных материалов // Инж.-физич. журн. – 2001. – Т. 74. – № 6. – С. 106-112.
61. Shun J.N. New Phenomena in High Mobility Organic Semiconductors // Phys. Stat. Sol., B. – 2001. – Vol. 226. – № 2. – P. 257-270.
62. Shun J.N., Cloc Ch., Batlogg B. Superconductivity at 52K in hole-doped C₆₀ // Nature. – 2000. – Vol. 408. – P. 549.
63. Мастеров В.Ф., Приходько А.В., Коньков О.И. и др. Температурные аномалии наносекундного электрического транспорта в Cu_nC₆₀ // ФТТ. – 1996. – Т. 38. – № 5. – С. 1401-1406.
64. Березкин В.И., Викторovsky И.В., Вуль А.Я. и др. Фуллереновые микрокристаллы как адсорбенты химических соединений // ФТП. – 2003. – Т. 37, вып. 7. – С. 802-810.
65. Тарасов Б.П., Гольдшлегер Н.Г., Моравский А.П. Водородсодержащие углеродные наноструктуры: синтез и свойства // Усп. химии. – 2001. – Т. 70. – № 2. – С. 149-166.
66. Hircher M., Becher M. Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes // J.Nanosci. Nanotechn. – 2003. – Vol. 3. – № 1/2. – P. 3-17.
67. Wang Y. Photoconductivity of fullerene doped polymers // Nature. – 1992. – Vol. 356. – P. 585-587.
68. Nelson J. // Sol. St. Mater. Sci. – 2002. – Vol. 6. – № 1. – P. 20.
69. Ganeev R.A., Rysnyansky A.I., Redkorechev V.I. et al. Nonlinear Optical Characteris-

- tics of C60 Thin Films//Full. Nanotub. Carb. Nanostruct. – 2004. – Vol. 12. – № 1-2. – P. 327-333.
70. Mishra S.R., Rawat H.S., Joshi M.P. et al. The role of non-linear scattering in optical limiting in C₆₀ solutions //J. Phys., B. – 1994. – Vol. 27. – № 8. – P. L157-L158.
 71. Tada T., Kanayama T. Nanolithography Using Fullerene Films as an Electron Beam Resist //Jpn. J. Appl. Phys, Pt. 2. – 1996. – Vol. 35. – P. L63-L.65.
 72. Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Превращения фуллерита C₆₀ при высоких давлениях и температурах // УФН. – 1996. – Т. 166. – № 8. – С. 893-897.
 73. Bhyshan V., Gupta V.K., Van Cleef et al. Fullerene (C₆₀) films for Solid Lubrications //Tribol. Trans. – 1995. – Vol. 36. – № 4. – P. 573-580.
 74. Гинзбург Б.М., Байдакова М.В., Киреевко О.Ф. и др. Влияние фуллерена C₆₀, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов //ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып. 12. – С. 87.
 75. Гинзбург Б.М., Красный В.А., Козырев Ю.П. Влияние фуллерена C₆₀ на изнашивание металлов при фреттинге //Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 1-5.
 76. Gareth A. Hughes PhD. Nanostructure-mediated drug delivery //Nanomedicine: Nanotechn., Biol., Medic. – 2005. – Vol. 1. – № 1. – P. 22-30.
 77. Kralj M., Pavelic K. Medicine on a small scale//EMBO reports. – 2003. – Vol. 4. – № 11. – P. 1008-1012.
 78. Haberzettl C.A. Nanomedicine: destination or journey?//Nanotechnology. – 2002. – Vol. 13. – P. R9- R13.
 79. Cagle D.W., Kennel S.J., Mirzadeh S. et al. In vivo studies of fullerene-based materials using endohedral metallofullerene radiotracers //Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1999. – Vol. 96. – P. 5182-5187.
 80. Piotrovsky L.B., Kiselev O.I. Fullerenes and Viruses //Full. Nanotub. Carb. Nanostruct. – 2004. – Vol. 12. – № 1-2. – P. 397-403.
 81. Simon H. Friedman, Dianne L.DeCamp, Rint P. Sijbesma et al. Inhibition of the HIV-1 Protease by Fullerene Derivatives: Model Bulding Studies and Experimental Verifications //J. Am. Chem. Soc. – 1993. – Vol. 115. – № 15. – P. 6506-6509.
 82. Tsao N., Kanakamma P.P., Luh T.-Y. et al. Inhibition of Escherichia coli-Induced Meningitis by Carboxyfullerene//Antimicrob Agents chemotherap. – 1999. – Vol. 43. – № 9. – P. 2273-2279.
 83. Dugan L.L., Turetsky D.M., Du C. et al. Carboxyfullerenes as neuroprotective agents //Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1997. – Vol. 94. – P. 9434-9439.
 84. Zhao Y.B., Poirier D.M., Pechman R.I. et al. Electron stimulated polymerization of solid C₆₀ //Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 64. – P. 577-579.
 85. Kroto H.W., Rao C.N.R., Osava E. The Charisma of C60 Buckminsterfullerene //MRS Bulletin. – 1994. – Vol. 19. – № 11. – P. 21.
 86. Ивановский А.Л. Неуглеродные нанотрубки: синтез и получение //Усп. химии. – 2002. – Т. 71. – № 3. – С. 204-224.
 87. Berger C., Poncharal P., Yan Yi et al. Ballistic Conduction in Multiwalled Carbon Nanotubes //J. Nanosci. Nanotechnol. – 2003. – Vol. 3. – № 1-2. – P. 171-177.
 88. McEuen P.L., Fuhrer M.S., Park H. Single-Walled Carbon Nanotube Electronics//IEEE Trans. Nanotechnol. – 2002. – Vol. 1. – № 1. – P. 78-85.
 89. Kociak M., Kasumov A.Yu., Gueron S et al. Superconductivity in Ropes of Single-Walled Carbon Nanotubes //Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 2416.
 90. Wilson E. Superconducting nanotubes// Science. – 2001. – Vol. 79. – № 27. – P. 8.
 91. Saito Y. Carbon Nanotube Field Emitter //J. Nanosci. Nanotechnol. – 2003. – Vol. 3. – № 1-2. – P. 39-50.
 92. Salvetat J.P., Bonard J.M., Thomson N.H. et al. Mechanical properties of carbon nanotubes// Appl. Phys. A. – 1999. – Vol. 69. – № 3. – P. 255-260.
 93. Reulet B., Kasumov A.Yu., Kociak M. et al. Acoustoelectric Effects in Carbon Nanotubes // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85. – № 13. – P. 2829-2832.
 94. Penza M., Gassano G., Aversa P. Carbon nanotube acoustic and optical sensors for volatile organic compound detection //Nanotechnol. – 2005. – Vol. 16. – № 11. – P. 2536-2541.
 95. Moulton S.E., Minett A.I., Wallace G.G. Carbon nanotube Based Electronic and Electrochemical Sensors // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3. – P. 183-189.
 96. Wongwiriyapan W., Honda S., Konishi H. et al. Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Sensor for Ultrasensitive Gas Detection //Jpn. J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 44. – № 16. – P. L482-L484.

97. Shi Kam N.W., Jessop T.C., Wender P.A. et al. Nanotube molecular transporters: internalization of carbon nanotube-protein conjugates into mammalian cells // J. Am. Chem. Soc.– 2004. – Vol. 126. – P. 6850-6851.
98. Gao H., Kong Y., Cui D. Spontaneous insertion of DNA oligonucleotides into carbon nanotubes // Nano Letters. – 2003. – Vol. 3. – P. 471-473.
99. Panhuis M. Vaccine delivery by carbon nanotubes // Chem. Biol. – 2003. – Vol. 10. – P. 897-898.
100. University Education (<http://www.nano.gov/html/edu/edunder.html>).
101. National Nanotechnology Initiative and its Implementation Plan, Washington, D.C., 2000. – 141 p.
102. Роко М. Перспективы развития нанотехнологии: национальные программы, проблемы образования // Рос. хим. журн. – 2002. – Т. 46. – № 5. – С. 90-95.
103. Алфимов С.М., Быков В.А., Гребенников Е.П. и др. Развитие в России работ в области нанотехнологий (<http://www.micro-systems.ru/files/publ/753.html>).
104. Алферов Ж., Таиров Ю., Астахов М. И др. Новое направление подготовки – «нанотехнология» // Высшее образ. в России. – 2004. – № 6. – С. 82-90.
105. Шестой международный украинско-российский семинар “Нанофизика и нанoeлектроника” (<http://www.nauka.kiev.ua/mode=page&id=300>).
106. Закон України “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні” від 16 січня 2003 р. № 433-IV.
107. Комплексна Програма фундаментальних досліджень “Наносистеми, наноматеріали та нанотехнології” (http://www.imp.kiev.ua/NANO/Ukr/Main/main_conception_ukr.html).
108. Шпак А. Цей карлик зробить світ невпізнаним // Президентський вісник. – 2004 р. – № 48. – С. 5.
109. Ніколаєнко С.М. Вища освіта і наука – найважливіші сфери відповідальності громадянського суспільства та основа інноваційного розвитку. Доповідь на підсумковій колегії МОН 24 березня 2005 р. (<http://www.mon.gov.ua/education/higher>).

**НАНОНАУКИ І НАНОТЕХНОЛОГІЇ:
СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ,
ПЕРСПЕКТИВИ, ПРОБЛЕМИ
І ЗАДАЧІ РОЗВИТКУ**

**М. Азаренков, В. Орлов, М. Сліпченко,
В. Удовицький, В. Фареник**

В огляді розглянуті сучасні досягнення і перспективи розвитку таких напрямків, що найбільш динамічно зараз розвиваються, як наноелектроніка та наноматеріали, зокрема, на основі недавно відкритих нових структурних форм вуглецю – фулеренів і нанотрубок. Обговорюються питання, які сучасна науково-технічна нанореволюція ставить перед системою підготовки кадрів. На основі аналізу передового досвіду закордонних країн висловлені пропозиції стосовно розвитку наоосвіти в системі вищої освіти України.

**NANOSCIENCE AND
NANOTECHNOLOGIES: MODERN
ACHIEVEMENTS, PERSPECTIVES,
DEVELOPING PROBLEMS AND TASKS**

**N. Azarenkov, V. Orlov, N. Slipchenko,
V. Udovitskiy, V. Farenik**

This review contains information about modern achievements and developing perspectives of such most intensively developing now directions as nanoelectronics and nanomaterials, in particular based on recently discovered structural form of carbon-fullerenes and nanotubes. The questions put by scientific-technical nanorevolution in front of the personnel training system are discussed. Assumptions about development of nanoeducation in the system of High Educational Institutions in Ukraine are made on the basis of analysis of the foreign countries leading experience.