

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына

Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

*Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности:*

010701.65-физика и направлению 010700.62-физика

Москва
Университетская книга
2008

УДК 629.72:62-022.53(075.8)

ББК 39.62-03яз73 +30.6я73

Н73

Н73

Новиков Л.С., Воронина Е.Н. **Перспективы применения наноматериалов в космической технике.** Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.

ISBN 978-5-91304-090-9

В пособии рассмотрены физические основы нанотехнологии, описаны наиболее важные виды наноматериалов, методы их получения и исследования, проанализированы условия эксплуатации материалов в космической среде и определяемые ими требования к материалам космической техники, показаны возможные преимущества наноматериалов перед традиционными материалами космической техники, приведены сведения о существующих программах и перспективах внедрения наноматериалов в космическую отрасль и конкретных разработках в этой сфере.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов высших учебных заведений, а также для использования при переподготовке кадров по новым перспективным направлениям науки и техники.

ISBN 978-5-91304-090-9

© Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина, 2008

© НИИЯФ МГУ, 2008

© Обложка. Издательство «КДУ», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	13
1.1. Размерные эффекты	13
1.2. Влияние размерных эффектов на свойства наноматериалов	23
1.3. Углеродные наноструктуры	42
1.4. Формирование и развитие нанотехнологии	55
2. МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ СТРУКТУРЫ	61
2.1. Получение наночастиц	61
2.2. Создание наноструктурных материалов	66
2.3. Особенности исследования структуры наноматериалов	68
3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ.	76
3.1. Этапы развития нанотехнологии	76
3.2. Направления развития исследований и применения про- дукции нанотехнологий	81
4. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	86
4.1. Конструкционные и функциональные материалы	86
4.2. Конструкции космических аппаратов	88
4.3. Орбиты космических аппаратов	93
4.4. Условия эксплуатации космических аппаратов	95
4.5. Воздействие космической среды на материалы и элементы оборудования космических аппаратов	109
4.6. Выбор материалов космических аппаратов	117

5. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ	121
5.1. Программы и перспективы	121
5.2. Наноматериалы космической техники	130
5.3. Элементы бортового оборудования космических аппаратов	138
5.4. Применение наноматериалов в перспективных космических проектах	153
6. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА НАНОСТРУКТУРЫ.	167
6.1. Общие принципы моделирования	167
6.2. Примеры результатов моделирования	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	186
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	187

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX–XXI столетий сформировалась новая стремительно развивающаяся научно-техническая область, которую можно охарактеризовать сочетанием трех понятий: нанонаука, нанотехнология, nanoиндустрия.

Нанонаука изучает фундаментальные свойства объектов нанометровых размеров (*нанообъектов*) и связанные с ними явления. К нанообъектам относят материальные объекты различной конфигурации: частицы (зерна), волокна, трубки, пленки и др., хотя бы один линейный размер которых лежит в диапазоне 1–100 нм, т.е. 10^{-9} – 10^{-7} м. Со стороны малых значений этот диапазон непосредственно смыкается с областью размеров атомов и молекул, а его верхняя граница, отделяющая нанообъекты от микрообъектов, установлена достаточно условно. В общем случае ее нельзя однозначно связать с какими-либо характерными размерными параметрами, определяющими свойства вещества, например, с размерами магнитных доменов, длиной свободного пробега носителей заряда или с длиной волны де Бройля, поскольку для разных веществ значения этих параметров могут существенно отличаться.

Нанотехнология решает задачи создания самих нанообъектов, которые в зависимости от их конфигурации называют *наноструктурными элементами* или *наноструктурами*, материалов

на их основе, называемых соответственно *наноструктурными* (*наноструктурированными*) *материалами* или просто *наноматериалами*, и законченных изделий, в составе которых используются наноматериалы. Применением термина «нанотехнология» во множественном числе обычно подчеркивают многообразие направлений в данной области или обозначают комплекс каких-то конкретных технологий.

Наноиндустрия должна обеспечить достаточно масштабное производство наноматериалов и содержащих их изделий для применения в самых различных областях человеческой деятельности.

Как мы видим, понятия нанонаука, нанотехнология и наноиндустрия тесно связаны между собой. Поэтому часто для обозначения рассматриваемой научно-технической области используют только один термин – «нанотехнология», подразумевая, что он охватывает научные основы технологии и производственные аспекты. Такой подход представляется наиболее правильным. Хотя в зарубежной литературе термин «*nanoscience*» используется достаточно часто, все же, строго говоря, нанонаука не является самостоятельным научным направлением, а основывается на фундаментальных положениях и методах исследований физики, химии, биологии, математики и ряда технических и гуманитарных наук, что свидетельствует о ярко выраженной междисциплинарности нанотехнологии.

Очень важно отметить, что нанотехнология призвана создавать материалы и законченные изделия с принципиально новыми эксплуатационными свойствами, которые не могут быть достигнуты с помощью традиционных технологий. На это прямо указывается в развернутом определении термина «нанотехнология», приводимом в тексте принятой в ноябре 2004 г. «Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года»: «нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально

новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба». Там же указывается, что наноматериалы обладают «качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками».

Наноматериалы весьма разнообразны. Так, совокупность наночастиц, т.е. нанопорошок, может использоваться как самостоятельный материал, например, в качестве катализатора. Путем спекания или прессования нанопорошков из них можно получать высокопрочные твердые материалы. В качестве наполнителей нанопорошки могут входить в состав различных композиционных материалов, имеющих уникальные механические, тепловые или электрофизические характеристики.

Почему же наноматериалы обладают столь замечательными свойствами? Кратко на этот вопрос можно ответить следующим образом: во-первых, при переходе от микро- к нанообъектам увеличивается отношение числа атомов, находящихся на поверхности, к числу атомов в объеме, вследствие чего растет влияние сил поверхностного взаимодействия и границ раздела на свойства вещества, а во-вторых, с уменьшением размеров частиц все в большей степени проявляются квантовые эффекты. Роль первого фактора является определяющей, например, при получении наноматериалов с уникальными механическими свойствами, а второго – при создании элементов наноэлектроники.

Таким образом, можно констатировать, что наноструктурированное вещество приобретает новые свойства, отличные от физико-химических свойств, присущих веществу в его объемном состоянии. Переход в такое качественно новое состояние, называемое часто *наносостоянием*, для большинства веществ начинается как раз при размерах структурных элементов менее 100 нм.

Еще одним важнейшим отличием нанотехнологий от существующих микро- и макротехнологий является возможность реализации принципа «снизу–вверх», который предполагает создание требуемых структур, материалов и изделий путем их сборки из отдельных атомов и молекул. При этом значительная роль от-

водится процессам самоорганизации и самосборки наноструктур за счет межатомных и межмолекулярных взаимодействий, подобно тому как это происходит в живых системах. Очевидно, что указанный принцип, который называют также «восходящим», кардинально отличается от традиционного технологического принципа «сверху–вниз» («нисходящего»), реализуемого через процессы механической обработки материалов, их химического травления, дробления и т.д.

Впервые идея создания веществ с требуемыми свойствами путем выстраивания отдельных атомов в нужном порядке была высказана нобелевским лауреатом Р. Фейнманом в прочитанной им в декабре 1959 г. на заседании Американского физического общества лекции под названием «There is plenty room in the bottom», название которой на русский язык обычно переводят как «Там внизу еще очень много места». Эта идея была развита американским ученым Э. Дрекслером, опубликовавшим в 1986 г. книгу «Машины созидания: пришествие эры нанотехнологии», в которой он рассмотрел возможность создания различных механизмов путем их сборки из отдельных атомов и молекул. Следует, однако, отметить, что впервые термин «нанотехнология» был в явном виде использован в 1974 г. японским ученым Н. Танигучи, хотя и в несколько ином смысле: в его трактовке этот термин обозначал прецизионную обработку материалов с точностью до десятых долей нанометра, т.е. до размеров атомов или простых молекул.

Но в течение достаточно длительного времени нанотехнологические идеи не находили практического воплощения, прежде всего из-за отсутствия необходимой технической базы. Качественный скачок в ее создании был обусловлен изобретением в 1981 г. сканирующего туннельного микроскопа, а в 1986 г. – атомно-силового микроскопа. Работа обоих устройств основана на использовании тонкого зонда с радиусом острия ~ 10 нм, приближаемого к поверхности исследуемого объекта на расстояние около 1 нм и перемещаемого над ней с очень высокой точностью. В первом случае информацию о рельефе поверхности несет элект-

рический ток, возникающий между зондом и находящимся под ним участком поверхности за счет квантовомеханического эффекта – туннелирования электронов через потенциальный барьер, а во втором – сила взаимодействия зонда с атомами поверхности. Разрешение обоих микроскопов достигает десятых долей нанометра, что позволяет идентифицировать отдельные атомы и с высокой точностью определять их положение на поверхности.

Примечательно, что изобретение зондовых микроскопов и их последующее совершенствование не только значительно расширило возможности изучения структуры вещества, но и обеспечило исследователей принципиально новыми технологическими средствами, позволившими, в частности, реализовать идею манипулирования отдельными атомами. В качестве яркого примера практического воплощения этой идеи обычно указывают выполненный в 1990 г. сотрудниками компании *IBM* эксперимент, в котором они выложили на поверхности монокристалла никеля название своей компании из 35 атомов ксенона, перемещавшихся с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Перемещение атомов осуществлялось за счет их электростатического притяжения к острию зонда при определенной величине приложенного к зонду напряжения.

Создание новой экспериментальной базы значительно интенсифицировало исследования в области нанотехнологии. С начала 1990-х гг. наблюдается быстрый рост числа научных публикаций по данной тематике, посвященных анализу свойств наноматериалов, методов их получения и применения. Перспективы, открываемые широким внедрением наноматериалов в различные сферы человеческой деятельности столь масштабны, что многие эксперты называют становление нанотехнологии очередной научно-технической революцией.

Для скорейшего развития нанотехнологий и координации проводимых работ во многих промышленно развитых странах приняты специальные программы, определяющие приоритетные направления исследований и прикладных разработок, области использования получаемых результатов, сроки выполнения работ и

основные принципы их финансирования. Так, в США в 2000 г. была утверждена долгосрочная программа «Национальная нанотехнологическая инициатива», согласно которой исследования в области нанотехнологии, отнесенные к высшим приоритетам развития науки и техники, должны привести к кардинальным преобразованиям в создании и производстве материалов, электронике, вычислительной технике, космонавтике, биологии и медицине, энергетике, охране окружающей среды и т.д. Подобные программы приняты также в Японии, Китае, Южной Корее, во многих европейских государствах.

В нашей стране в 2007 г. была провозглашена президентская инициатива «Стратегия развития nanoиндустрии», четко определившая основные задачи развития nanoиндустрии в России, последовательность их решения и ожидаемые результаты. В этом документе отмечается, что «мир вступает в новую эпоху развития, связанную с разработкой и практическим использованием достижений науки в области нанотехнологий», при этом «Россия может и должна сыграть значительную роль в осуществлении и продвижении соответствующих разработок и основанных на них инновационных проектов для мировых рынков». А в числе будущих достижений, связанных с внедрением нанотехнологических разработок, указывается, что «новые системы управления, легкие и прочные конструкционные материалы значительно увеличат надежность и снизят стоимость летательных аппаратов всех типов, прежде всего самолетов и космических кораблей».

Для реализации президентской инициативы разработана «Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года», проект которой был одобрен Правительством РФ в январе 2008 г., и выполняется утвержденная в 2007 г. Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 годы». Обеими программами предусматривается внедрение наноматериалов и нанотехнологий в космическую отрасль. Эта задача решается также с помощью действующей «Федеральной космической программы России на 2006–2015 годы».

Космическая отрасль традиционно интегрирует лучшие научно-технические достижения многих областей: материаловедения, электроники, вычислительной техники, биологии, медицины и т.д. При этом с учетом экстремальных условий эксплуатации космической техники для нее создаются уникальные материалы и изделия на их основе, что, в свою очередь, является мощным стимулом для развития смежных областей. Недаром словосочетание «космические технологии» используется для характеристики наиболее совершенных технических разработок и промышленных изделий. Таким образом, рассматривая перспективы применения наноматериалов и нанотехнологий в космической технике, следует принимать во внимание не только специализированные разработки, предназначенные для ее создания, но и многие другие идеи и достижения в области нанотехнологий, которые могут быть востребованы космической отраслью.

Выше уже отмечался междисциплинарный характер нанотехнологии. В этой связи важнейшей задачей, от решения которой во многом зависит успех развития работ в данной области, является подготовка специалистов, обладающих необходимым комплексом знаний и практических навыков. Для решения этой задачи в конце 2007 г. подготовлена концепция программы развития в Российской Федерации системы образования в области нанотехнологий. Ведущую роль в разработке этой концепции сыграли преподаватели и ученые Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова под руководством ректора МГУ академика В.А. Садовниченко.

В крупных классических университетах, ведущих фундаментальную подготовку специалистов по широкому кругу дисциплин и располагающих необходимым профессорско-преподавательским персоналом и современной высокоразвитой исследовательской базой, можно обеспечить наиболее благоприятные условия для осуществления образовательного процесса в области нанотехнологий. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, безусловно, входит в число таких университетов.

В МГУ создан Научно-образовательный центр по нанотехнологиям. Специалистами Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ и преподавателями ряда кафедр Физического факультета в составе этого центра организована лаборатория по изучению наноматериалов космической техники. На базе лаборатории могут готовиться специалисты высшей квалификации соответствующего профиля и проходить переподготовку работники космической отрасли.

Предлагаемое учебное пособие подготовлено для обеспечения образовательного процесса по данному направлению. В пособии рассмотрены физические основы нанотехнологии, описаны наиболее важные виды наноматериалов, методы их получения и исследования, проанализированы условия эксплуатации материалов в космической среде и определяемые ими требования к материалам космической техники, показаны возможные преимущества наноматериалов перед традиционными материалами космической техники, приведены сведения о существующих программах и перспективах внедрения наноматериалов в космическую отрасль и конкретных разработках в этой сфере.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов высших учебных заведений, а также для использования при переподготовке работников промышленности по новым перспективным направлениям науки и техники.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность директору НИИЯФ МГУ, заведующему Отделением ядерной физики и кафедрой физики космоса Физического факультета МГУ профессору М.И. Панасюку за инициативу и поддержку развития исследований и учебной работы по рассматриваемому в настоящем пособии научному направлению.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

1.1. Размерные эффекты

Свойства вещества определяются, в первую очередь, его химическим составом и структурой. Достаточно вспомнить многообразие свойств химических элементов в периодической системе Д.И. Менделеева и различных их соединений, а также общеизвестный пример разительного отличия свойств алмаза и графита, которые состоят только из атомов углерода, но имеют разную кристаллическую структуру.

Однако при переходе вещества в наносостояние его свойства, как уже указывалось во Введении, начинают сильно зависеть от размера составляющих его нанообъектов, что является следствием происходящего при уменьшении размера объектов изменения их свойств и характера взаимодействия с другими объектами. В этом заключаются *размерные эффекты*, которые возникают, когда размер объекта становится сопоставимым с каким-то параметром вещества, оказывающим значительное влияние на протекание тех или иных процессов в веществе и, соответственно, на его свойства. Этот параметр может характеризовать процессы, описываемые в рамках классической физики, либо на основании квантовомеханических представлений. Для классических размерных эффектов в качестве указанного параметра могут рассматри-

Раздел 1

ваться длина свободного пробега заряженных частиц в веществе, диффузионная длина, диаметр траекторий скольжения дислокаций в кристаллических структурах (петель Франка–Рида) и др., а для квантовых размерных эффектов, называемых также *квантоворазмерными*, соответствующим параметром чаще всего служит длина волны де Бройля.

При оценке возможного влияния размерных эффектов на свойства нанобъекта важным показателем является отношение числа атомов, находящихся на поверхности, к их общему количеству в объекте. Для нанобъектов с кристаллической структурой их размер и количество содержащихся в них атомов образуют дискретный ряд согласно числу заполненных слоев, состоящих из элементарных ячеек кристаллической решетки. Размеры этих ячеек характеризуются, в свою очередь, *постоянной решетки*, которая равна расстоянию между центрами ато-

Таблица 1.1. Соотношение между числом атомов на поверхности и в объеме для наночастиц Au

n	d , нм	N	N_s	N_s/N , %
1	0,29	1	1	100
2	0,86	13	12	92,3
3	1,44	55	42	76,4
4	2,01	147	92	62,6
5	2,59	309	162	52,4
10	5,47	$2,87 \cdot 10^3$	812	28,3
18	10,08	$1,79 \cdot 10^4$	$2,89 \cdot 10^3$	16,1
25	14,11	$4,09 \cdot 10^4$	$5,76 \cdot 10^3$	11,7
50	28,51	$4,04 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^4$	5,9
100	57,31	$3,28 \cdot 10^6$	$9,80 \cdot 10^4$	3,0
150	86,11	$1,11 \cdot 10^7$	$2,22 \cdot 10^5$	2,0
180	103,39	$1,93 \cdot 10^7$	$3,20 \cdot 10^5$	1,7
200	114,94	$2,65 \cdot 10^7$	$3,96 \cdot 10^5$	1,5

мов, находящихся в ее узлах, и составляет для разных материалов примерно 0,4–0,6 нм.

В табл. 1.1 приведены некоторые возможные значения размеров d наночастиц золота, имеющего гранецентрированную кубическую решетку, и данные о соотношении общего количества атомов N в таких частицах и количества атомов N_s , находящихся на поверхности, при разном числе заполненных слоев n . Указанные параметры связаны между собой несложными математическими выражениями, вид которых зависит от типа кристаллической решетки.

Значению $n = 1$ соответствует один атом Au, а $d = 0,29$ нм равно диаметру этого атома. При $n = 2–3$, как видно из таблицы, размер частиц d лежит вблизи нижней границы нанодиапазона. Наночастицы, диаметр которых не превышает ~ 10 нм, относят к *кластерам*. Указанному размеру частиц Au соответствуют значения $n = 18$ и $N \sim 10^4$. Верхней границы нанодиапазона размеры частиц достигают при $n = 180$ и числе атомов в частице $N \sim 10^7$.

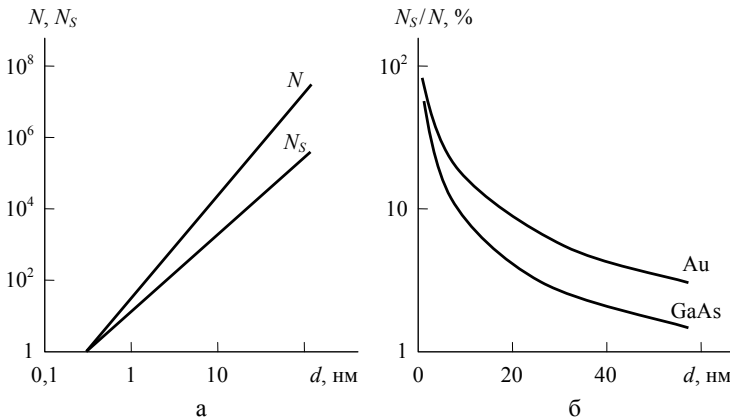


Рис. 1.1. Зависимость от размера наночастицы d полного числа атомов N и числа атомов на поверхности N_s для Au (а) и доли поверхностных атомов для Au и GaAs (б)

На рис. 1.1а приведены абсолютные значения полного числа атомов N и числа атомов на поверхности N_s для наночастиц золо-

та разных размеров, а рис. 1.1б показывает зависимость доли атомов, находящихся на поверхности, от размера частицы для золота и арсенида галлия (GaAs), имеющего другую кристаллическую структуру. Видно, что при размерах частиц менее 10 нм доля поверхностных атомов начинает быстро расти. На обоих рисунках соответствующие зависимости для наглядности представлены сплошными линиями.

На свойства веществ с зернистой структурой, которая характерна для металлов, большое влияние оказывает содержание

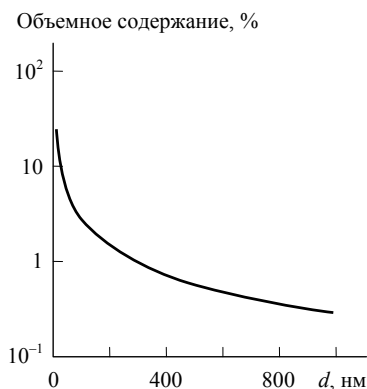


Рис. 1.2. Зависимость объемного содержания поверхностей раздела от размера зерен d

в объеме вещества поверхностей раздела между зернами (кристаллитами). На рис. 1.2 показано изменение этого параметра в зависимости от размера зерен при предполагаемой толщине приграничной зоны 1 нм. При размерах зерен 100 нм объемная доля поверхностей раздела становится заметной (около 3%), а при 10 нм и менее она измеряется уже десятками процентов.

При анализе квантово-размерных эффектов удобно использовать параметр наноструктур, называемый *размерностью* или *наноразмерностью*. Размерность наноструктур определяется числом измерений, в которых размеры рассматриваемого объекта лежат вне нанодиапазона и в которых, следовательно, не проявляются какие-либо особенности, связанные с размерными эффектами. По этому параметру все объекты можно разделить на четыре группы:

- ♦ 3D-объекты – объекты микро- и макродиапазонов (объемные материалы);
- ♦ 2D-объекты – нанопленки;

- ♦ 1D-объекты – нановолокна, нанотрубки и т.п.;
- ♦ 0D-объекты – наночастицы, нанокристаллы, квантовые точки.

Здесь в числе 1D- и 0D-объектов указаны играющие очень важную роль в нанотехнологии нанотрубки и квантовые точки, о которых подробнее будет рассказано ниже.

Приведенную классификацию часто распространяют также на материалы, состоящие из объектов соответствующих групп.

Квантовые эффекты проявляются, как уже указывалось, если размеры объекта становятся сопоставимыми с длиной волны де Бройля частиц, движущихся внутри объекта. Для электронов, движущихся в кристаллической структуре, длина волны де Бройля λ определяется выражением:

$$\lambda = \frac{h}{m^* v} = \frac{h}{\sqrt{2m^* E}},$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; m^* , v , E – эффективная масса, скорость и кинетическая энергия электрона соответственно.

Путем введения эффективной массы m^* учитывается влияние атомов кристаллической структуры на движение электрона. В металлах эффективная масса электрона мало отличается от его массы покоя ($m^* \approx m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг), но в полупроводниках этот параметр может изменяться в достаточно широких пределах (например, для Si $m^* = 0,92m_0$, а для GaAs $m^* = 0,07m_0$).

Помимо эффективной массы, электроны, движущиеся в металлах и в полупроводниках, существенно отличаются по энергии. Для металлов электронный газ является вырожденным при температурах ниже температуры плавления, и в переносе заряда участвуют только электроны с энергиями, близкими к уровню Ферми ($E \approx 5$ эВ). Для полупроводников при комнатной температуре $E \approx 0,026$ эВ.

В результате для металлов получим $\lambda \approx 0,55$ нм, т.е. значение, близкое к постоянной кристаллической решетки. Поэтому в случае металлов квантоворазмерные эффекты могут проявляться лишь для чрезвычайно малых объектов. Для полупроводников же

λ может достигать десятков нанометров, например, для Si она равна 8 нм, а для GaAs – 30 нм. Вследствие этого наноструктуры, действие которых основано на квантовых эффектах, создаются обычно на полупроводниковых структурах.

О влиянии квантовых эффектов на свойства материалов (химические, электрические, оптические, тепловые) можно судить по распределению плотности электронных состояний $g(E)$, т.е. по зависимости числа квантовых состояний, приходящихся на единичный энергетический интервал, от энергии электронов E .

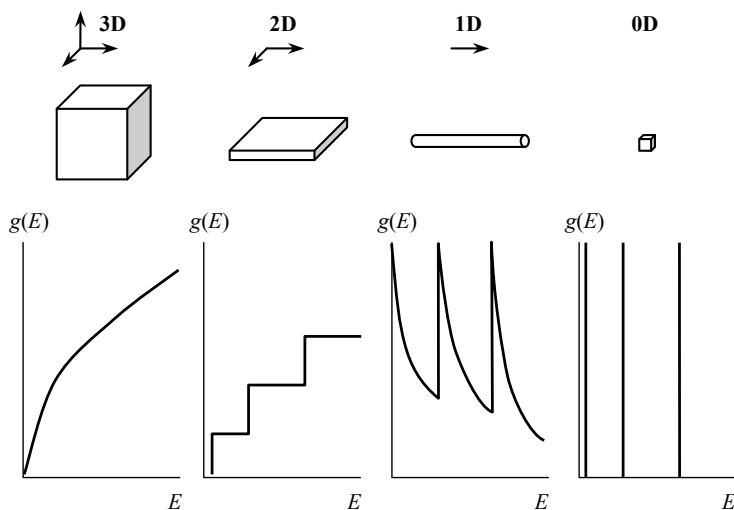


Рис. 1.3. Зависимости $g(E)$ для объектов различной размерности

На рис. 1.3 приведены зависимости $g(E)$ для объектов различной размерности. В 3D-объекте электроны могут свободно перемещаться во всех трех измерениях. Если рассматривать пленку, толщина которой соизмерима с длиной волны де Бройля λ (2D-объект), то в этом случае электроны смогут свободно перемещаться только в плоскости пленки, а в третьем измерении их движение будет ограничено потенциальным барьером, высота которого определяется разностью между работой выхода и энер-

гией теплового движения электронов. Для полупроводников работа выхода лежит в диапазоне 1–6 эВ. Эта величина велика по сравнению с указывавшейся выше энергией теплового движения электронов ($\sim 0,026$ эВ). Таким образом, в направлении, перпендикулярном плоскости пленки, электроны окажутся в глубокой потенциальной яме, и энергия их движения в этом измерении будет квантоваться в сочетании с непрерывными энергетическими спектрами электронов в направлениях, лежащих в плоскости пленки, что дает ступенчатую зависимость $g(E)$. Исходя из этого, 2D-объект принято называть *квантовой ямой* (*quantum well*).

Если наложить квантовое ограничение на движение электронов еще в одном измерении, то получим 1D-объект, который принято называть *квантовой проволокой* (*quantum wire*). В этом случае зависимость $g(E)$ представляется совокупностью достаточно узких пиков.

Если и в третьем измерении размер объекта будет близок к длине волны де Бройля, то он превратится в *квантовую точку* (*quantum dot*) с наноразмерностью 0D, в которой, подобно отдельным атомам, электроны могут иметь только дискретный набор энергетических состояний. Благодаря этому на основе квантовых точек могут с успехом создаваться лазеры и различные элементы наноэлектроники. Типичные размеры полупроводниковых квантовых точек составляют 5–15 нм, а количество содержащихся в них атомов измеряется единицами–десятками тысяч, но разработаны технологии получения и более крупных квантовых точек. Следует отметить, что уже сейчас полупроводниковые квантовые точки наиболее эффективно создаются по технологии «снизу–вверх» в виде самоорганизующихся структур, которые возникают при осаждении атомов или молекул полупроводникового материала на поверхность другого материала с более широкой запрещенной зоной (рис. 1.4). Контролируемое осаждение частиц на подложку осуществляется с помощью одного из методов, объединяемых названием *молекулярно-лучевая эпитаксия*.

Общее представление о типичных объектах нанодиапазона и положении их среди объектов других размеров дает табл. 1.2.

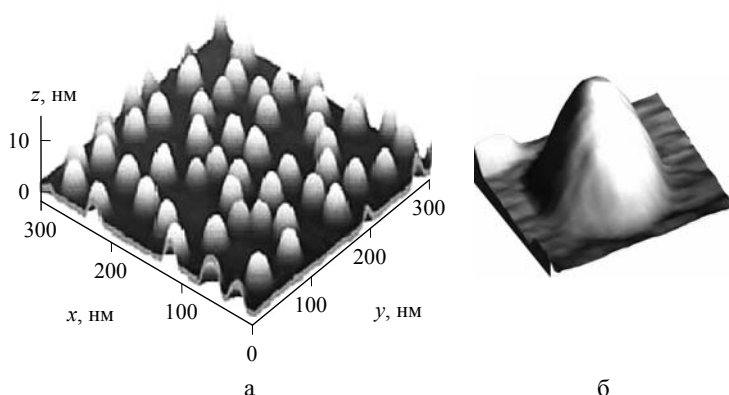


Рис. 1.4. Совокупность квантовых точек на подложке (а) и увеличенное изображение отдельной квантовой точки (б)

Из таблицы видно, что в нанодиапазон попадают размеры многих распространенных биологических структур, например, знаменитой двойной спирали ДНК (молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты) и белков. Такие структуры находят применение в нанотехнологии как самостоятельно, так и в сочетании с неорганическими структурами. Активно изучаемыми и уже достаточно широко используемыми нанообъектами являются однослойные

и многослойные углеродные нанотрубки (УНТ). Топологические элементы современных интегральных микросхем занимают место в верхней части нанодиапазона. Пока происходит процесс их дальнейшего уменьшения, который, однако, неизбежно будет ограничен квантоворазмерными эффектами и необходимостью перехода к принципиально новым элементам наноэлектроники.

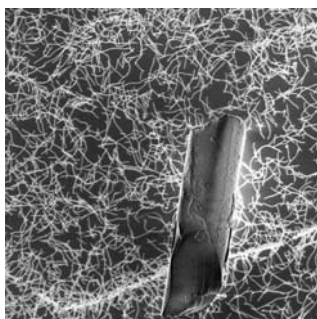


Рис. 1.5. Фрагмент человеческого волоса в окружении углеродных нанотрубок

Размеры вирусов лежат на границе между нано- и микродиапазонами. В некоторых классификациях граничную область размеров 0,1–1 мкм выделяют в самостоятельный субмикронный диапазон. Бактерии и эритроциты измеряются уже единицами нанометров, а размеры живых клеток достигают 100 мкм и более. Человеческий волос, попадающий по поперечному размеру в группу микробъектов, кажется гигантским в сопоставлении с углеродными нанотрубками, диаметр которых равен нескольким

Таблица 1.2. Примеры объектов, относящихся к разным размерным диапазонам

Диапазон размеров	Объект	Размер, единицы
Микро 10^{-1} – 10^3 мкм	Шарик авторучки	мкм 500–1000
	Волос человека	50–100
	Живые клетки	1–100
	Эритроциты	5–8
	Бактерии	0,5–10
	Вирусы	0,02–0,3
Нано 1–100 нм	Топологические элементы микросхем	нм 50–100
	Белки (протеины)	4–50
	УНТ многослойные	5–25
	Квантовые точки	5–15
	Клеточная мембрана	7–10
	УНТ однослойные	1–5
	Спираль ДНК:	
	шаг	3,4
	диаметр	2,0
Менее 1 нм Простые молекулы, атомы	Фуллерен C ₆₀	нм 0,71
	N ₂	0,34
	H ₂ O	0,28
	Fe	0,25
	Si	0,24

нанометрам (рис. 1.5). Отметим, кстати, что скорость роста волос составляет около 10 нм в секунду. Наконец, хорошо знакомый нам шарик, используемый в пишущем узле авторучки, имеет чаще всего диаметр 0,7–0,8 мм с некоторыми отклонениями в обе стороны в зависимости от марки ручки.

Частицы диаметром более 1 мм относят к макрообъектам. Этот граничный размер, разделяющий макро- и микродиапазоны, используется, в частности, при классификации метеорных частиц и присутствующих в околоземном космическом пространстве техногенных частиц, сведения о которых приводятся в разд. 4.

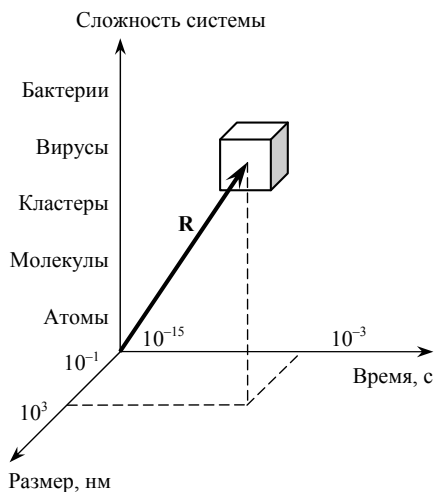


Рис. 1.6. Взаимосвязь характеристик объекта

Заканчивая классификацию нанообъектов и рассмотрение их положения среди объектов, относящихся к смежным размерным диапазонам, очень важно подчеркнуть, что размер является далеко не исчерпывающим признаком, характеризующим свойства объектов. При изменении размеров объектов происходят изменения количества содержащихся в них элементов, т.е. их

сложности, и характерных времен протекания различных физических процессов с участием этих объектов. Такие взаимные связи могут быть проиллюстрированы рис. 1.6, на котором положение объекта в некотором гипотетическом трехмерном пространстве «размер–время–сложность» характеризуется радиус-вектором **R**. Изображенное пространство по степени сложности охватывает структуры от атомов до микрообъектов, что определяет диапазоны размеров и времен на горизонтальных осях.

1.2. Влияние размерных эффектов на свойства наноматериалов

Температура плавления

Одно из наиболее ярких проявлений влияния размера зерен на свойства наноструктурированных материалов – изменение процесса их плавления.

На основании представлений, изложенных в предыдущем разделе, будем рассматривать наночастицу как объект, состоящий из поверхностного слоя и внутреннего ядра. В твердой частице атомы плотно упакованы, и их отклонения от состояния равновесия малы. При нагревании частицы атомы получают дополнительную энергию, вследствие чего амплитуда их колебаний возрастает. Можно считать, что плавление начинается при достижении определенного значения среднеквадратичного смещения атома $\langle x^2 \rangle$. Очевидно, что атомы, находящиеся на поверхности, будут колебаться более активно, потому что рядом с ними находится меньше атомов и их движение менее ограничено по сравнению с атомами ядра. Поэтому для первого элемента частицы – поверхности – плавление должно начаться при более низкой температуре (T_1), чем для второго элемента – ядра (T_2). Этот эффект иллюстрируется рис. 1.7, где кривая 1 соответствует поверхности, а кривая 2 – ядру.

Такая простейшая модель позволяет понять особенности плавления наноматериала, которые наблюдаются экспериментально и подтверждаются в рамках более сложных моделей. Из нее следует, что в определенном диапазоне температур

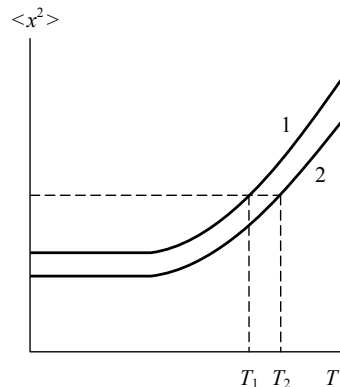


Рис. 1.7. Зависимость $\langle x^2 \rangle$ для атомов поверхности (1) и ядра (2) наночастицы от ее температуры

(между T_1 и T_2 на рис. 1.7) можно говорить о пребывании материала наночастицы одновременно в жидком и твердом состояниях (ядро еще не расплавилось, а плавление на поверхности уже началось).

Рассмотренный эффект приводит к возникновению зависимости температуры плавления наночастиц от их размера, кото-

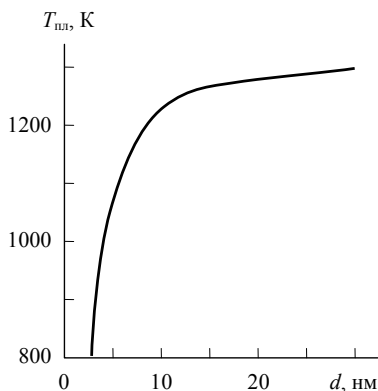


Рис. 1.8. Зависимость температуры плавления $T_{пл}$ наночастиц Au от их диаметра d

рая показана на рис. 1.8. С уменьшением размера частицы температура плавления сначала медленно снижается (для наночастицы диаметром 10 нм, содержащей, как показано в табл. 1.1, порядка 10^4 атомов, можно считать, что она близка к температуре плавления объемного материала), а затем резко уменьшается. Из сопоставления рис. 1.8 с рис. 1.1б видно, что такое изменение температуры плавления хорошо коррелирует с зависи-

мостью доли поверхностных атомов от размера частицы. Подобная зависимость характерна и для других металлов.

По той же причине – из-за увеличения числа поверхностных атомов, способных совершать колебания с *большой* амплитудой, – наблюдается увеличение теплоемкости нанокристаллических материалов при снижении размера зерен до 5–15 нм.

Механические свойства

Наиболее важными механическими характеристиками материалов, определяющими особенности их применения и обработки, являются: прочность – способность выдерживать без разрушения прилагаемые механические нагрузки, пластичность –

способность необратимо деформироваться под действием нагрузок, и твердость, которая характеризуется сопротивлением материала вдавливанию в него более твердого эталонного материала.

В целом наноматериалы обладают более высокими механическими характеристиками по сравнению с обычными объемными материалами. Это объясняется значительными силами взаимодействия между атомами, находящимися на поверхности наноразмерных зерен, малым количеством структурных дефектов в таких зернах и препятствиями, создаваемыми границами раздела для распространения упоминавшихся выше дислокаций – областей нарушения кристаллической структуры, размеры которых значительно превышают параметр решетки.

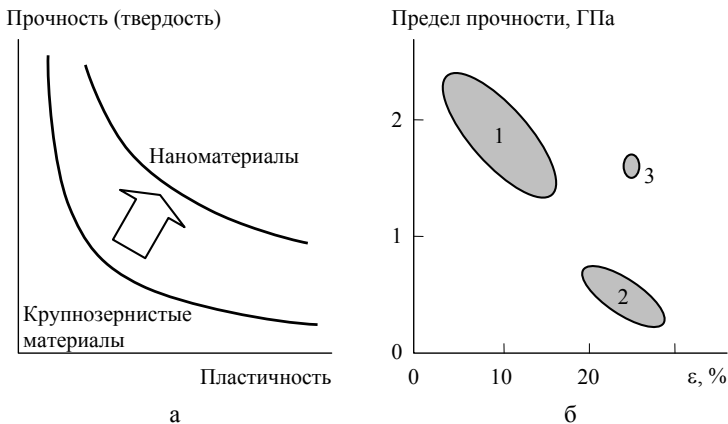


Рис. 1.9. Качественная связь между прочностью (твердостью) и пластичностью материалов (а) и соотношение между механическими параметрами для различных сталей (б): 1 – высокопрочные; 2 – низкоуглеродистые; 3 – нанокристаллические

Качественно преимущества наноструктурированных материалов перед крупнозернистыми материалами иллюстрируются рис. 1.9а, который показывает соотношение между прочностью (твердостью) и пластичностью материалов. Для наноматериалов наблюдается улучшение всех параметров. Рис. 1.9б демонстрирует

количественные соотношения между механическими параметрами образцов сталей разных марок. Здесь по оси абсцисс отложены значения относительного удлинения образцов до разрушения, а по оси ординат – значения предела прочности, измеряемого в гигапаскалях ($1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}$, $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$).

Увеличение твердости при переходе размера зерен в нанодиапазон для металлов может достигать 500–600%, а для хрупких

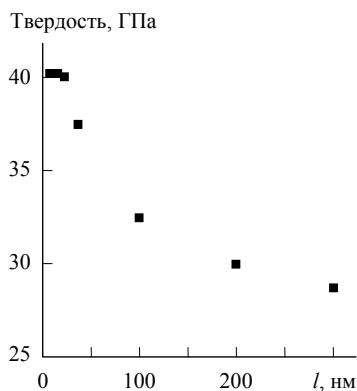


Рис. 1.10. Зависимость твердости многослойной структуры от ее периода l

материалов, например, для керамик – 200–300%. Очень высокой твердостью обладают некоторые многослойные материалы, состоящие из чередующихся пленок разного состава, толщина которых лежит в нанодиапазоне, т.е. из 2D-объектов. Высокая твердость обеспечивается за счет несовпадения кристаллических структур соседних слоев, что препятствует перемещению дислокаций между слоями. На рис. 1.10 приведена зависимость твердости много-

слойной структуры из пленок TiN/NbN от периода структуры, равного суммарной толщине двух указанных пленок. Твердость здесь также выражена в ГПа, но в данном случае величина прикладываемого усилия делится на площадь отпечатка, оставленного в испытуемом материале алмазной пирамидкой определенного размера, называемой *индентором*.

Однако для некоторых сплавов наблюдается снижение твердости при очень малых (5–10 нм) размерах зерен. Это может объясняться разрушением границ зерен внутри сплава и превращением его из наноструктурированного в аморфный материал. Подобные эффекты в значительной степени зависят от способа получения наноматериалов.

Другие механические свойства наноструктурированных материалов тоже сильно зависят от расположения и взаимной ориентации элементов структуры. Эта характеристика, носящая название *упорядоченность*, особенно важна для нанокompозитов, сведения о которых приводятся в разд. 5.

Таким образом, необходимо дальнейшее тщательное изучение механических свойств наноматериалов различного состава, изготовленных разными способами.

Химические свойства

На химические свойства отдельных наночастиц достаточно малых размеров могут оказывать влияние квантоворазмерные эффекты, связанные с особенностями электронной структуры частиц, от которой зависит их способность вступать в химические реакции. Например, для малых металлических кластеров, содержащих 10–30 атомов, получены немонотонные зависимости скорости реакции кластеров с газовыми средами от числа атомов в кластере, что является свидетельством влияния электронной структуры кластеров на их реакционную способность.

Для более крупных наночастиц реакционная способность зависит от количества поверхностных атомов. Вследствие этого наночастицы некоторых веществ, считающихся в обычных условиях химически неактивными, проявляют высокую реакционную способность. Так, наночастицы Au размером 3–5 нм демонстрируют заметную каталитическую активность. Подобные данные получены и для частиц Pt.

Химические свойства наноструктурированных материалов также зависят от размера зерен вследствие влияния этого параметра на реакционную способность вещества и процессы диффузии в его объеме. Направленно влияя на эти характеристики наноматериалов, можно, по-видимому, повышать их коррозионную стойкость. Обнаружено, например, что наноструктурированный сплав $\text{Fe}_{73}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, состоящий из наночастиц диаметром около

30 нм, обладает повышенной стойкостью к окислению при температурах 200–400°C. Этот факт объясняют происходящим выделением на границах зерен атомов Si, которые затем диффундируют к поверхности образца и создают на ней пленку SiO₂, препятствующую процессу дальнейшего окисления.

Путем введения наночастиц в объемный материал принципиально возможно повысить его стойкость и к воздействию атомарного кислорода, который является более активным окислителем по сравнению с молекулярным кислородом. Экспериментально было показано, что введение металлических наночастиц в приповерхностный слой материала создает своеобразный барьер, препятствующий проникновению атомов кислорода в глубь материала. Подобные результаты представляют значительный интерес для специалистов космической отрасли, поскольку атомарный кислород является одним из главных факторов, вызывающих повреждения материалов внешней поверхности низкоорбитальных космических аппаратов. Подробнее об этом будет рассказано в разд. 4.

Оптические свойства

Пожалуй, наиболее часто приводимым историческим примером неосознанного использования нанотехнологии является придание необычных оптических свойств стеклам за счет введения в них при варке наноразмерных металлических частиц. Эта технология была известна еще мастерам, создававшим витражи средневековых соборов. Сейчас разнообразные цветовые эффекты, возникающие в таких стеклах при их подсветке, объясняются на основании представлений о возбуждении волной падающего света высокочастотных колебаний электронов проводимости металлических наночастиц в силовом поле их кристаллической решетки. Частота возбуждаемых колебаний зависит от размера частиц — чем они меньше, тем выше частота колебаний. Этим определяется влияние размера частиц на положение на шкале длин волн

максимума спектра оптического поглощения стекла с включенными в него металлическими наночастицами (рис. 1.11) и, следовательно, на цвет стекла. Кроме того, для подобных оптических сред, представляющих собой прозрачную стеклянную матрицу с встроенными в нее металлическими наночастицами, может наблюдаться нелинейная зависимость коэффициента преломления от интенсивности падающего света, что также влияет на распространение света в таких средах.

Зависимость положения и вида спектра оптического поглощения от размера частиц наблюдается и для полупроводниковых наночастиц, которые при достаточно малых их размерах обладают свойствами обсуждавшихся в разд. 1.1 квантовых точек. При анализе квантоворазмерных эффектов для полупроводниковых наночастиц в качестве критерия их проявления часто используется соотношение размера частиц с радиусом *экситона* – своеобразной квазичастицы, образованной в полупроводнике достаточно сильно связанными между собой электроном и дыркой. Экситон можно рассматривать как водородоподобный атом, обладающий собственным набором энергетических уровней. Если размер полупроводниковой наночастицы сопоставим с радиусом экситона, который характеризует размер области локализации электрона и дырки и, например, для GaAs составляет приблизительно 11 нм, то в спектре оптического поглощения частиц появляются пики, положения которых определяются энергетическими уровнями экситона.

В общем случае вид и положение на энергетической шкале спектра оптического поглощения полупроводниковых нано-

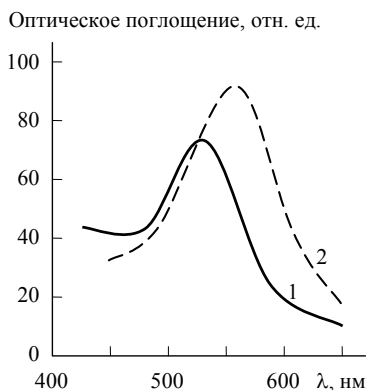


Рис. 1.11. Влияние размера частиц Au на спектр поглощения стекла: 1 – 20 нм; 2 – 80 нм

частиц (рис. 1.12) зависят от ширины запрещенной зоны, которая растет с уменьшением размера частиц, и наличия пиков экситонного поглощения. С уменьшением размера частиц спектр смещается в сторону более высоких энергий фотонов, соответствующих меньшим длинам волн, как это показано на рис. 1.12 для частиц CdS. Такой сдвиг спектров в коротковолновую область называют *голубым смещением*.

Способность полупроводниковых квантовых точек поглощать и излучать свет на разных длинах волн, которые можно менять в определенных пределах путем изменения размера частиц, и возможность достижения высокой интенсивности излучения за счет достаточно большого количества атомов в частицах делают кван-

товые точки очень перспективными для разработки лазеров на их основе.

Дополнительные широкие возможности для создания не только оптических квантовых приборов, но и электронных приборов, открывает использование так называемых *полупроводниковых сверхрешеток* – кристаллических структур, в которых на периодический потенциал кристаллической решетки наложен потенциал со значительно *большим* периодом (10–50 нм), создаваемый чередующимися полу-

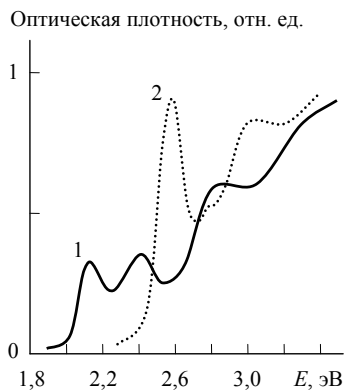


Рис. 1.12. Спектры оптического поглощения частиц CdS различных размеров: 1 – 40 нм; 2 – 20 нм

проводниковыми нанопленками разного состава или нанопленками, отличающимися по типу проводимости. Таким образом, можно сказать, что сверхрешеткам присущ определенный тип упорядоченности.

Периодические наноразмерные полупроводниковые структуры обладают двумя очень важными свойствами. Во-первых, в них

возможен *резонансный туннельный эффект*, значительно повышающий вероятность преодоления электроном потенциального барьера. Он возникает, когда значение энергии электрона, находящегося в потенциальной яме, совпадает с одним из энергетических уровней соседней потенциальной ямы. А во-вторых, в энергетических диаграммах подобных структур появляются так называемые *минизоны*, на которые расщепляются валентная зона и зона проводимости исходных полупроводниковых кристаллов в периодическом потенциале сверхрешетки.

Параметры энергетической диаграммы сверхрешетки можно варьировать, изменяя толщину используемых полупроводниковых пленок и их состав. При уменьшении ширины потенциальной ямы происходит увеличение энергетических зазоров между минизонами и ширины запрещенной зоны, а уменьшение ширины потенциального барьера вызывает расширение минизон.

Благодаря этим замечательным свойствам полупроводниковых сверхрешеток на их основе можно создавать разнообразные оптические приборы: фотоприемники, светодиоды и лазеры, в том числе работающие в инфракрасном диапазоне.

Очень важной разновидностью сверхрешеток являются *фотонные кристаллы* – структуры, в которых периодически изменяется коэффициент преломления. Такое изменение возникает, когда период сверхрешетки сравним с длиной волны света, и оно может наблюдаться в одном, двух и трех измерениях. Соответственно, различают 1D, 2D и 3D фотонные кристаллы.

Главным с практической точки зрения свойством фотонных кристаллов является наличие в них разрешенных и запрещенных пространственных зон для распространения фотонов определенных энергий, причем эти зоны могут иметь различную конфигурацию и ориентацию внутри кристалла. Вводя в кристаллы дефекты, можно создавать локальные зоны с особыми оптическими свойствами. На основе фотонных кристаллов строятся оптические фильтры, волноводы, резонаторы и некоторые уникальные оптические устройства, к которым можно отнести *суперлинзы*, позволяющие уменьшать область фокусировки света до размеров,

меньших длины волны. С использованием фотонных кристаллов можно конструировать также различные логические и запоминающие устройства, что делает их одним из базовых элементов *фотоники* – области физики и техники, занимающейся проблемами генерации, регистрации и управления движением фотонов для решения широкого круга научных и прикладных задач. Одним из важнейших разделов фотоники является *оптоинформатика*, изучающая фотонные технологии передачи и обработки информации. Применение этих технологий позволяет значительно повысить быстродействие логических элементов и создаваемых на их основе устройств, в частности, компьютеров, по сравнению с традиционными электронными устройствами, в которых в качестве носителя информации используется электрический заряд.

Заканчивая рассмотрение оптических свойств наноматериалов, следует упомянуть еще о *пористом кремнии* (PoSi), который получают из обычного кремния путем химического травления, приводящего к образованию в нем пор диаметром около 10 нм. В 1990-х гг. было выяснено, что пористый кремний обладает достаточно интенсивной фотолюминесценцией при энергиях излучаемых фотонов 1,5–1,6 эВ, в то время как обычный кремний демонстрирует слабую люминесценцию с энергиями фотонов 1,0–1,2 эВ, близкими к ширине запрещенной зоны Si.

Особенности люминесценции PoSi объясняются совокупностью ряда факторов: возникновением различных поверхностных состояний и дефектов поверхности, образованием квантовых точек и т.п. Люминесценция PoSi может происходить также под действием приложенного напряжения (электролюминесценция) или при бомбардировке заряженными частицами (катодолуминесценция), что позволяет создавать на его основе различные преобразователи и источники излучения.

Описанные выше фундаментальные физические принципы создания новой элементной базы имеют первостепенное значение для построения различных аппаратурных комплексов перспективных КА.

Электрические и магнитные свойства

На электропроводность материалов оказывают влияние как классические, так и квантовые размерные эффекты. В проводнике электроны, совершающие хаотическое тепловое движение, сталкиваются с колеблющимися ионами решетки, проходя между столкновениями некоторое среднее расстояние, называемое *длиной свободного пробега*. Если к проводнику приложена разность потенциалов, то на хаотическое движение электронов накладывается их упорядоченный дрейф в электрическом поле со скоростью около 10^{-3} м·с⁻¹, которая на несколько порядков ниже скорости теплового движения. Главную роль в возникновении электрического тока в металлах играет не дрейфовая скорость электронов, а их высокая концентрация (10^{28} – 10^{29} м⁻³).

Длина свободного пробега электронов для разных металлов составляет приблизительно 10–100 нм, что много больше постоянной кристаллической решетки. Тем не менее, если размеры проводника достаточно велики (3D-объект), то электрон на пути между контактами, к которым приложена разность потенциалов, претерпевает значительное число столкновений с ионами решетки. Такой режим движения электрона называется *диффузионным*.

Если же размеры проводника лежат в нанодиапазоне и оказываются меньше длины свободного пробега электронов, то почти все электроны пролетают расстояние между контактами без промежуточных столкновений. В этом случае реализуется *баллистический* режим их движения.

В обоих режимах дополнительные препятствия движению электронов в нанопроводниках создаются поверхностями раздела между зернами, объемное содержание которых увеличивается с уменьшением размера зерен (см. рис. 1.2). Соответственно, увеличивается удельное сопротивление наноматериалов, что подтверждается приведенными на рис. 1.13 температурными зависимостями удельного сопротивления ρ образцов никеля, отличающихся размерами зерен. Подобные зависимости получены также для нанопленок.

Отметим, что аналогичное влияние размер зерен оказывает на теплопроводность металлических материалов. Поскольку для металлов электронная составляющая теплопроводности является

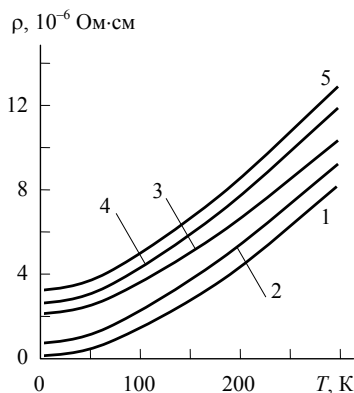


Рис. 1.13. Зависимости $\rho(T)$ для образцов Ni при размерах зерен, [нм]: 1 – $3 \cdot 10^5$; 2 – 55; 3 – 30; 4 – 27; 5 – 22

преобладающей, то дополнительное рассеяние электронов на границах зерен, связанное с уменьшением их размера, вызывает снижение теплопроводности. Например, для серебра наблюдалось ее снижение в 3–4 раза при переходе от крупнозернистой структуры к структуре с размерами зерен 20–50 нм.

Когда размеры баллистического нанопроводника становятся сопоставимыми с длиной волны де Бройля, на перенос заряда между контактами начинает оказывать

влияние квантование электронных состояний, рассмотренное в разд. 1.1. В данном случае с уменьшением сечения нанопроводника будет происходить скачкообразное снижение его проводимости, определяемое дискретностью плотности электронных состояний, степень которой зависит от размеров нанопроводника. Теоретически показано, что минимальная величина такого скачка проводимости, называемая *квантом проводимости*, составляет $2e^2/h$ (e – элементарный заряд; h – постоянная Планка). Обратная ей величина получила название *квант сопротивления* – $h/2e^2 \approx 12,9$ кОм. Отметим, что экспериментально квантование проводимости можно наблюдать только при температурах, близких к абсолютному нулю, поскольку этот эффект размывается тепловым движением электронов.

Используя эффект квантования электрического тока, проходящего через наноразмерные структуры, можно создавать элементы

наноэлектроники, работа которых управляется чрезвычайно малыми электрическими зарядами, вплоть до заряда одного электрона, в то время как для современных элементов микроэлектроники требуется величина заряда 10^5 – 10^6 электронов.

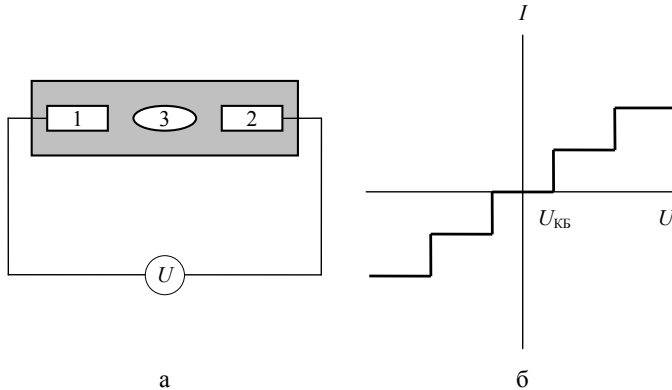


Рис. 1.14. Схема наноразмерной структуры с квантовой точкой (а) и ступенчатая вольт-амперная характеристика (б)

На рис. 1.14а изображена наноразмерная структура, состоящая из двух металлических электродов (1, 2), разделенных диэлектрической средой, в которую помещена квантовая точка (3). В такой структуре может протекать электрический ток за счет туннелирования электронов сквозь потенциальные барьеры между квантовой точкой и электродами. При определенных параметрах потенциальных барьеров, определяемых размерами элементов структуры и свойствами их материалов, зависимость тока I , текущего между электродами, от приложенного к ним напряжения U имеет ступенчатый характер, показанный упрощенно на рис. 1.14б. Такой вид вольт-амперной характеристики обусловлен эффектом *кулоновской блокады*, который состоит в том, что при наличии на квантовой точке электрона проникновение последующих электронов через потенциальный барьер становится невозможным из-за кулоновского отталкивания. При напряжении U_{KB} обеспечивается преодоление кулоновской блокады.

При добавлении одного электрона на квантовую точку ее потенциал изменяется на величину $\Delta\varphi = e/C$, определяемую емкостью C квантовой точки относительно окружающих элементов. Расчеты показывают, что для квантовой точки из GaAs размером 10 нм величина $\Delta\varphi \approx 11$ мВ. Этой дополнительной разности потенциалов достаточно, чтобы создать препятствие для туннелирования на квантовую точку следующего электрона. Таким образом, рассмотренная структура способна пропускать электроны по одному.

Для обеспечения режима одноэлектронного туннелирования необходимо выполнение двух условий:

- ♦ электростатическая энергия квантовой точки при наличии на ней одного электрона значительно превосходит тепловую энергию частиц

$$\frac{e^2}{2C} \gg kT,$$

- ♦ туннельное сопротивление потенциального барьера R_T существенно больше кванта сопротивления

$$R_T \gg \frac{h}{2e^2}.$$

Приложение к квантовой точке дополнительного потенциала через емкостную связь расширяет возможности управления током в рассмотренной наноструктуре, превращая ее фактически в *одноэлектронный полевой транзистор*.

Магнитные свойства материалов также зависят от размера их структурных элементов. Если вещество поместить в магнитное поле с напряженностью H , то в общем случае магнитная индукция B внутри него будет отличаться от исходной индукции магнитного поля B_0 на величину $\Delta B = B - B_0$, которую называют *намагниченностью* M и определяют следующим выражением:

$$M = \chi\mu_0 H,$$

где χ – магнитная восприимчивость; $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ В·с·А⁻¹·м⁻¹ – магнитная постоянная.

Степень изменения магнитной индукции характеризуется относительной магнитной проницаемостью $\mu = B/B_0$.

Для *ферромагнетиков*, типичными представителями которых являются Fe, Co и Ni, $\mu \gg 1$ и $\chi > 0$, т.е. для них наблюдается значительное усиление магнитного поля в объеме вещества. Это объясняется тем, что в ферромагнетиках магнитные моменты отдельных атомов в пределах определенных областей, называемых *доменами*, ориентированы в одном направлении, обеспечивая доменам исходную намагниченность. В магнитном поле векторы намагниченности отдельных доменов ориентируются вдоль его силовых линий, что и приводит к усилению поля.

Важнейшими параметрами ферромагнитных материалов, с помощью которых описывается петля гистерезиса, являются: *индукция насыщения* B_s , характеризующая максимальную намагниченность материала, *остаточная индукция* B_r , показывающая степень намагниченности материала после снятия внешнего магнитного поля, и *коэрцитивная сила* H_C – напряженность внешнего магнитного поля, при которой остаточная индукция принимает нулевое значение. Все эти параметры зависят от размера кристаллитов, из которых состоит ферромагнетик.

На рис. 1.15 показано усредненное для различных ферромагнетиков изменение коэрцитивной силы при варьировании размера кристаллитов в широком диапазоне значений. Представленная зависимость имеет ярко выраженный немонотонный характер.

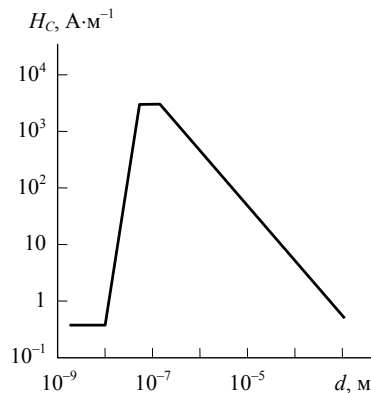


Рис. 1.15. Зависимость коэрцитивной силы H_C от размера кристаллитов d

С уменьшением размера кристаллитов от 10^3 мкм до значений, лежащих в субмикронной области, наблюдается увеличение коэрцитивной силы. В этом размерном диапазоне значения d превышают ширину доменных стенок (40–70 нм) – границ раздела между доменами, в пределах которых происходят изменения ориентации вектора намагниченности. Поскольку перемагничивание материала сопряжено с движением доменных стенок, то с уменьшением размеров кристаллитов перемагничивание затрудняется из-за роста объемного содержания стенок и увеличения потерь энергии при их движении. Максимальному значению H_C соответствуют размеры d , близкие к толщине доменных стенок.

При приближении значений d к верхней границе нанодиапазона и дальнейшем их уменьшении происходит перестройка структуры ферромагнетика от многодоменной к однодоменной, сопровождающаяся снижением H_C . В случае однодоменной структуры магнитные моменты всех атомов в кристаллитах ориентированы одинаково, и каждый кристаллит представляет собой отдельный домен.

Снижение размера зерен до 1–10 нм приводит к переходу материала в *суперпарамагнитное состояние*, заключающееся в том, что при указанных размерах зерен они начинают вести себя как отдельные атомы в *парамагнетике* – веществе, в котором магнитные моменты атомов ориентированы случайным образом. Таким образом, зерна указанных размеров могут рассматриваться как своеобразные крупные квазиатомы подобно описанным выше квантовым точкам. Для обычных парамагнетиков, типичными представителями которых являются Pt и Al, $\mu > 1$, $\chi > 0$, т.е. для них наблюдается усиление магнитного поля внутри вещества, но оно весьма мало. Для суперпарамагнетиков достигается намного большая намагниченность при чрезвычайно узкой петле гистерезиса, что позволяет перемагничивать их практически без потерь энергии. Благодаря изменению эксплуатационных параметров в широких пределах наноструктурированные магнитные материалы могут использоваться при создании самых различных наноприборов.

Например, интересной разновидностью суперпарамагнетиков являются *ферромагнитные жидкости*, представляющие собой *коллоидные растворы* (называемые также *золями*) – взвеси твердых частиц диаметром 1–100 нм (в данном случае частиц ферромагнетика). При наложении на такую жидкость магнитного поля магнитные моменты отдельных частиц, первоначально ориентированные случайным образом, выстраиваются вдоль поля, а при снятии поля они возвращаются к произвольной ориентации, и жидкость вновь становится немагнитной, т.е. она проявляет свойства суперпарамагнетика. При намагничивании жидкости в ней формируются своеобразные цепочки твердых частиц, что влияет на оптические и механические свойства жидкости. Варьируя концентрацию и размеры частиц, а также напряженность и направление внешнего магнитного поля, можно создавать на основе ферромагнитных жидкостей оптические затворы, управляемые дифракционные решетки, герметики, демпфирующие устройства и т.д.

С помощью магнитных наноструктур реализуется еще один очень важный в практическом отношении эффект – *гигантское магнетосопротивление*. Магнетосопротивлением называется явление изменения сопротивления проводника при воздействии на него магнитного поля. Это явление связано с искривлением под влиянием магнитного поля траекторий свободных электронов в проводнике, вследствие чего затрудняется их направленный дрейф.

В обычных металлах при комнатной температуре относительное изменение сопротивления под действием магнитного поля не превышает, как правило, 3–5%. Гигантское магнетосопротивление характеризуется приблизительно в 100 раз *большой* величиной такого изменения. Этот эффект реализуется в слоистых наноструктурах, состоящих из чередующихся слоев ферромагнетика и немагнитного проводника, для которого значения χ и μ очень малы.

В простейшем случае эффект может быть реализован в трехслойной ячейке, показанной на рис. 1.16, где слои (1) и (3)

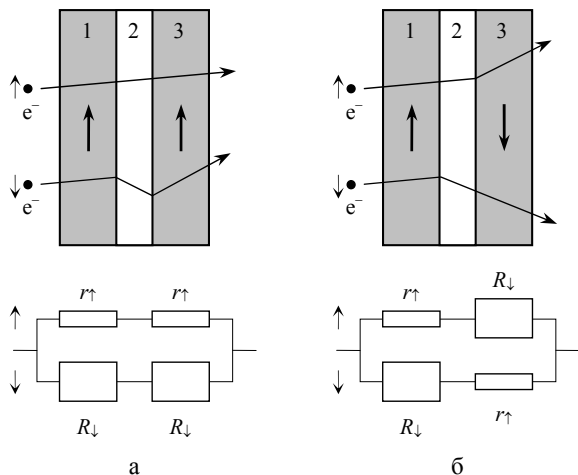


Рис. 1.16. Возникновение гигантского магнетосопротивления в трех-
слойной наноструктуре

являются ферромагнитными (Co), а слой (2) – немагнитным (Cu). Толщина каждого из слоев измеряется единицами нанометров. В основе гигантского магнетосопротивления лежит зависимость вероятности преодоления электроном границ между слоями от ориентации его спина относительно направления намагниченности ферромагнетика. Если ориентация спина совпадает с направлением магнитного поля внутри ферромагнитного слоя, то электрон достаточно легко проходит через границу. При противоположной ориентации спина электроны с большой вероятностью рассеиваются на границе раздела слоев. Следовательно, если ферромагнитные слои (1) и (3) намагничены в одном направлении (рис. 1.16а), то электроны, ориентация спина которых совпадает с этим направлением, легко преодолевают обе границы. Электроны с противоположным направлением спина претерпевают рассеяние на обеих границах. Если ферромагнитные слои (1) и (3) намагничены в противоположных направлениях (рис. 1.16б), то каждый электрон вне зависимости от ориентации его спина рассеивается на одной из границ раздела слоев. Таким образом, для токов, создаваемых электронами с противоположно

ориентированными спинами, электрическое сопротивление изображенной трехслойной структуры различно, что иллюстрируется эквивалентными схемами, приведенными в нижней части рис. 1.16. Если $r \ll R$, то отличие суммарного сопротивления в эквивалентных схемах для случаев (а) и (б) достаточно велико и можно говорить о переходе ячейки из проводящего состояния в запертое. Поэтому иногда такие структуры называют *спиновым клапаном* (*spin valve*).

Обычно переключение ячейки из проводящего состояния в непроводящее и обратно осуществляется путем изменения ориентации вектора намагниченности в одном из ферромагнитных слоев с помощью электромагнита. Эффект усиливается в многослойных структурах, он может наблюдаться и при движении электронов вдоль немагнитного проводника. Следует отметить, что аналогичный эффект проявляется также в немагнитных материалах с встроенными наночастицами из ферромагнетика. Здесь он связан с изменением характера рассеяния электронов проводимости на границах наночастиц при наложении внешнего магнитного поля. Влияние магнитного поля усиливается с уменьшением размера частиц и увеличением их концентрации.

Описанные ячейки могут иметь очень малые размеры, что позволяет создавать на их основе запоминающие устройства большой емкости. Образцы таких запоминающих устройств – магнитной оперативной памяти (MRAM, *magnetoresistive random-access memory*) – уже созданы. Их достоинством является энергонезависимость – способность сохранять записанную информацию в отсутствие источника питания. Кроме того, ячейки магнитной памяти нечувствительны к воздействию ионизирующих излучений, что делает их чрезвычайно привлекательными для использования в электронном оборудовании космических аппаратов. Возможно, применение подобных устройств позволит решить проблему возникновения одиночных сбоя в бортовых компьютерах космических аппаратов, которые возникают под действием отдельных заряженных частиц космического излучения. Подробнее эта проблема будет рассмотрена в разд. 4.

1.3. Углеродные наноструктуры

Развитие нанотехнологии в значительной степени связано с открытием, изучением и уже начавшимся практическим использованием трех углеродных наноструктур: *фуллеренов*, *углеродных нанотрубок* и *графена*. Поэтому в данном разделе мы рассмотрим их основные свойства.

Фуллерены

Фуллерены представляют собой шарообразные молекулы, состоящие из 60, 70, 76 (C_{60} , C_{70} , C_{76} соответственно) и более атомов углерода. Самым изученным является фуллерен C_{60} , который был открыт в 1985 г. в экспериментах по лазерному испарению графитовой мишени. Масс-спектрометрический анализ продуктов испарения показал, что в их составе есть частицы с массовым числом 720, соответствующим 60 атомам С.

Интересно отметить, что открытие фуллеренов было связано с космофизическими исследованиями, направленными на изу-

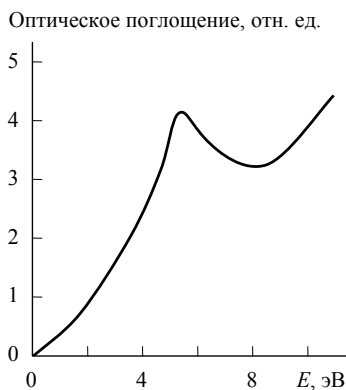


Рис. 1.17. Спектр света звезд, прошедшего через космическую среду

чение образования линейных углеродных молекул в атмосферах звезд и поглощения света звезд в космическом пространстве, при котором в спектре поглощения наблюдается пик для фотонов с энергией $\sim 5,6$ эВ (рис. 1.17), соответствующей длине волны ~ 220 нм. Последний эффект связывался с наличием в космическом пространстве неизвестных малых частиц углерода. Желание более строго объяснить наблюдаемые

явления и привело к экспериментальному обнаружению в лабораторных условиях молекул фуллерена C_{60} , существование которых теоретически предсказывалось задолго до этого.

Поверхность молекулы C_{60} представляет собой многогранник, состоящий из 20 шестиугольных и 12 пятиугольных граней (рис. 1.18). Диаметр молекулы C_{60} составляет, как уже указывалось в разд. 1.1, около 0,7 нм, а диаметр ее внутренней полости – около 0,5 нм.

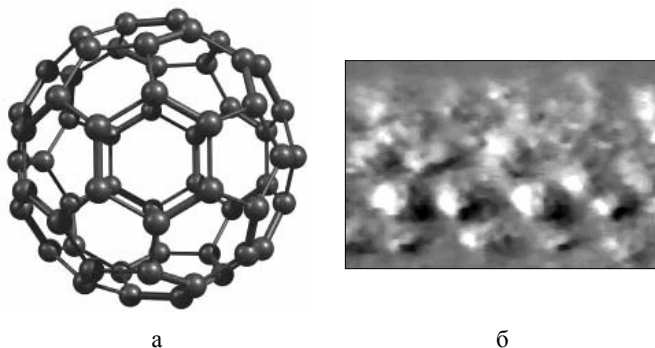


Рис. 1.18. Структура молекулы фуллерена C_{60} (а) и изображение молекул C_{60} на подложке, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (б)

Фуллерен C_{60} способен присоединять атомы многих элементов, которые могут размещаться и в его внутренней полости. Это позволяет направленно влиять на свойства фуллерена. Так, при легировании его атомами щелочных металлов он приобретает достаточно высокую электропроводность. Путем легирования молекул C_{60} им можно придавать также избирательные сорбционные свойства, что позволяет, например, использовать фуллерены при разработке компактных хранилищ водорода для топливных элементов энергоустановок космических аппаратов, о чем рассказывается в разд. 5.

Фуллерены уже находят применение при производстве аккумуляторных батарей, изучаются возможности создания на их основе оптических затворов, устройств для записи информации и

элементов солнечных батарей. Молекулы C_{60} пригодны также для применения их в качестве добавок при создании различных наноматериалов и присадок для ракетного топлива.

Из фуллеренов при определенных условиях могут образовываться молекулярные кристаллы (рис. 1.19) – *фуллериты*, являющиеся, по существу, новым классом материалов. Фулле-

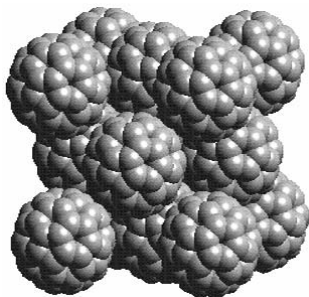


Рис. 1.19. Молекулярный кристалл фуллерита

риты имеют низкую плотность ($1,7 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) по сравнению с графитом и алмазом ($2,3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ и $3,5 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ соответственно), но их твердость сопоставима с твердостью алмаза. Фуллериты, как и фуллерены, легко поддаются легированию различными элементами, что позволяет, в частности, широко варьировать их электрические свойства. Обычный кристалл фуллерита является полупроводником с шириной за-

прещенной зоны 1,5 эВ. Легирование щелочными металлами увеличивает проводимость фуллерита на несколько порядков. Таким путем удалось получить даже сверхпроводящие кристаллические пленки C_{60} , для которых эффект сверхпроводимости наблюдался при температурах около 10–40 К. Основные направления применения фуллеритов схожи с направлениями применения фуллеренов. Следует ожидать, что по мере расширения производства и снижения стоимости обоих материалов области их применения будут расширяться.

Углеродные нанотрубки

Углеродная нанотрубка (УНТ) является фактически свернутым в цилиндр диаметром 1–5 нм моноатомным слоем графита, который и называется графеном. На рис. 1.20а показано изображение фрагмента боковой поверхности УНТ, полученное с помощью

сканирующего туннельного микроскопа, а на рис. 1.20б – схематическое изображение торцовых частей трубки, которые закрыты полусферическими колпачками, похожими на половинку молекулы фуллерена.

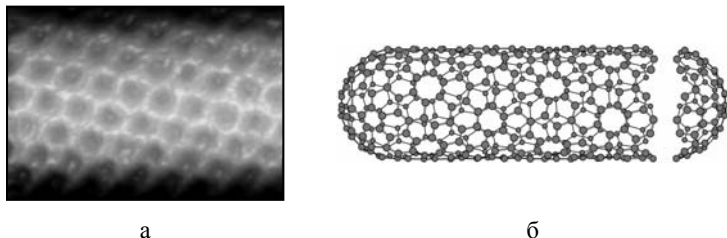


Рис. 1.20. Изображение УНТ, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (а) и схема торцевых участков УНТ (б)

Впервые УНТ были обнаружены в 1991 г. при высокотемпературном разрушении графитовых электродов зажигаемой между ними электрической дугой. Затем образование УНТ наблюдалось и в экспериментах по лазерному испарению графита, подобных тем, в которых были открыты фуллерены, а фуллерены, в свою очередь, были получены электродуговым методом.

Помимо однослойных (*single-walled*) УНТ, существуют многослойные (*multi-walled*) трубки, которые представляют собой несколько вложенных друг в друга однослойных нанотрубок. Диаметр многослойных УНТ достигает 20–25 нм, а расстояние между слоями равно 0,34 нм, что соответствует расстоянию между атомами углерода в графите. Длина УНТ, полученных электродуговым методом и лазерным испарением графита, обычно не превышает 10–100 мкм. Разработанные позднее методы получения УНТ путем химического осаждения из паров углеводородов дают возможность получать значительно более длинные УНТ – до 2–3 см.

На рис. 1.21 схематически изображен лист графена, который может быть свернут в нанотрубку. Если сворачивать трубки относительно различных направлений, то можно получать УНТ с

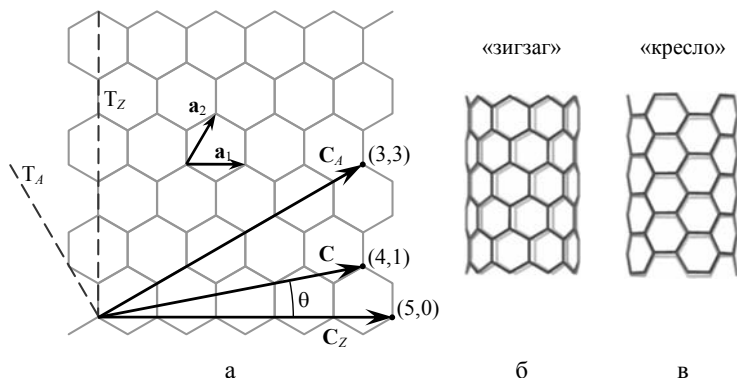


Рис. 1.21. Схема формирования УНТ (а) и примеры зигзагообразной (б) и кресельной (в) структур УНТ

принципиально различающейся структурой и, как следствие, с разными физическими свойствами. Направление сворачивания листа графена задается вектором \mathbf{C} , который описывается набором целых чисел (n, m) , являющихся его координатами в базисе локальных векторов \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 , т.е. $\mathbf{C} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$, как показано на рис. 1.21а. На этом рисунке изображены три вектора \mathbf{C} , характеризующиеся разными наборами (n, m) . Ось УНТ перпендикулярна направлению сворачивания листа, т.е. вектору \mathbf{C} , а диаметр УНТ, как несложно показать, определяется формулой:

$$D = \frac{|\mathbf{C}|}{\pi} = \frac{a\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2},$$

где $a = 0,142$ нм – расстояние между атомами в гексагональной ячейке.

Набор чисел (n, m) определяет важнейшую характеристику УНТ, носящую название *хиральность*. Ее можно описать также с помощью угла хиральности θ , который задается как угол между векторами \mathbf{C} и \mathbf{a}_1 (см. рис. 1.21а):

$$\theta = \arctg\left(\frac{m\sqrt{3}}{2n+m}\right) = \arccos\left(\frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+nm+m^2}}\right).$$

Угол хиральности изменяется от 0° до 30° , и его предельным значениям соответствуют две особые конфигурации нанотрубок, для которых на рис. 1.21а изображены векторы \mathbf{C}_Z и \mathbf{C}_A . Там же пунктирными линиями показаны направления оси УНТ для этих двух случаев. В первом случае $\mathbf{C}_Z = n\mathbf{a}_1$, и получившаяся трубка будет характеризоваться числами $(n, 0)$. Такие трубки принято называть *зигзагообразными* (*zigzag*), в них ось трубки направлена параллельно одной из пар С–С связей в шестиугольниках решетки (рис. 1.21б). Во втором случае $\mathbf{C}_A = n(\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2)$, и ось УНТ перпендикулярна одной из пар С–С связей. Такие трубки называют *кресельными* (*armchair*, рис. 1.21в).

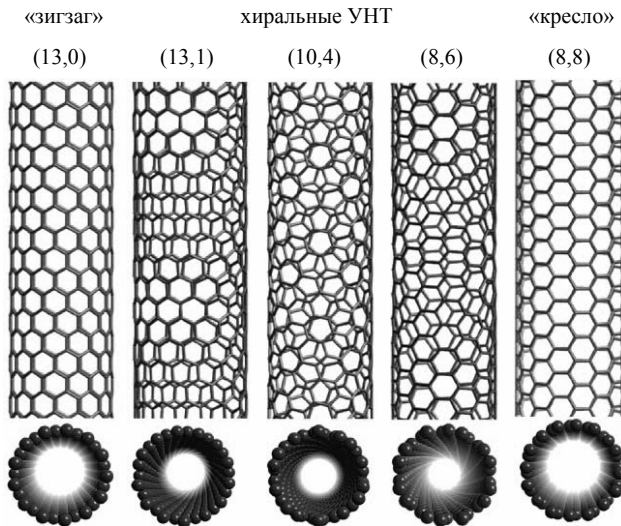


Рис. 1.22. Структура различных УНТ

Примеры УНТ, описываемых различными комбинациями чисел (n, m) , приведены на рис. 1.22. Здесь две крайние УНТ соответствуют структурам, приведенным на рис. 1.21б и 1.21в, которые описываются соответственно наборами чисел $(n, 0)$ и $(n, m = n)$. Промежуточные УНТ называются *хиральными*, они, как видно из рис. 1.22, характеризуются той или иной степенью закручивания гексагональных ячеек вокруг оси трубки. От угла θ

сильно зависят электрические и магнитные свойства УНТ, но влияние этого параметра на механические свойства нанотрубок не обнаружено.

Нанотрубки обладают очень хорошими механическими характеристиками. Предел прочности однослойных УНТ по разным оценкам составляет от 50 до 150 ГПа, что в десятки раз выше прочности стали. Поскольку плотность УНТ достаточно низка ($1,3\text{--}1,4\text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$), то удельная прочность материала, изготовленного из нанотрубок, достигает рекордных значений. Относительное удлинение УНТ до разрушения составляет 10–15%, т.е. они обладают и достаточно высокой пластичностью.

Многослойные УНТ имеют некоторые отличительные особенности. Считается, что предел прочности и упругость многослойных УНТ выше по сравнению с однослойными, однако их гибкость падает с ростом числа слоев. Еще одним интересным, но пока малоизученным свойством многослойных УНТ является способность внутренней нанотрубки выдвигаться из многослойной УНТ, а затем втягиваться обратно под действием сил Ван-дер-Ваальса подобно пружине. Математическое моделирование и эксперименты показывают, что такое перемещение внутренней УНТ происходит практически без трения. Силы трения, возникающие при вращении внутреннего слоя относительно внешних, также очень малы, что позволяет рассматривать многослойную УНТ как почти идеальный подшипник. Это замечательное свойство многослойных УНТ используется при построении на их основе различных наномеханизмов, некоторые из которых описаны в разд. 5.

Высокие механические параметры УНТ обусловлены двумя основными факторами. Во-первых, в нанотрубках концентрация дефектов, приводящих к ухудшению механических свойств, значительно ниже по сравнению с традиционными материалами, а во-вторых, УНТ обладают способностью к перестройке углерод-углеродных связей под нагрузкой, в частности при изгибе. За счет последнего эффекта шестиугольные ячейки стенок УНТ могут перестраиваться в пятиугольные или семиугольные, что

приводит к изменению не только механических, но и электрических свойств УНТ.

Проводимость УНТ зависит от угла хиральности. В этом отношении нанотрубки могут проявлять металлические или полупроводниковые свойства. Обычно критерием наличия металлической проводимости является следующее соотношение между индексами:

$$(n - m) = 3q,$$

где q – произвольное целое число. Из этого соотношения следует, что в получаемой обычно смеси УНТ при их производстве примерно третья часть трубок обладает металлическими свойствами, а две трети – полупроводниковыми.

Считается, что чисто металлическими свойствами обладают кресельные УНТ, а остальные, удовлетворяющие приведенному выше соотношению, – *полуметаллическими*. Электронные состояния последних не образуют одной широкой непрерывной энергетической зоны проводимости, а разбиваются на отдельные подзоны.

Теоретически доказано, что ширина запрещенной зоны полупроводниковых УНТ обратно пропорциональна диаметру трубки, поэтому изменение диаметра может привести к снижению или увеличению проводимости УНТ. Многослойные УНТ обычно проявляют металлические и полуметаллические свойства, даже если они состоят из полупроводниковых нанотрубок. Причина этого заключается во влиянии сил взаимодействия между трубками, которое приводит к значительному сокращению энергетической щели между валентной зоной и зоной проводимости.

Нанотрубки с металлическим типом проводимости могут пропускать ток плотностью до 10^9 А·см⁻², что примерно в 1000 раз больше по сравнению с традиционными металлическими проводниками. Это объясняется тем, что УНТ при не слишком большой их длине являются баллистическими проводниками. Прямыми измерениями, выполненными при частичном погружении УНТ в ртуть, было показано, что при длине УНТ до 10 мкм

их сопротивление не зависит от длины и близко к 12,9 кОм, т.е. к рассмотренному выше кванту сопротивления.

Благодаря малому диаметру и уникальным электрическим и механическим характеристикам нанотрубок на их основе можно создавать высокоэффективные автоэмиссионные катоды. Даже при сравнительно низких приложенных потенциалах напряженность электрического поля у конца УНТ становится достаточной для возникновения автоэлектронной эмиссии. Автоэмиссионные (холодные) катоды на основе УНТ уже применяются для создания сверхминиатюрных рентгеновских трубок и других устройств. Такие работы ведутся, в частности, в НИИЯФ МГУ.

При деформациях УНТ может происходить изменение электронной структуры и, соответственно, электрических свойств УНТ. Например, при изгибе кресельной УНТ ее сопротивление растет с увеличением угла изгиба, а закручивание нанотрубки вызывает появление в электронной структуре запрещенной зоны, ширина которой зависит от угла закручивания. Этот эффект может использоваться при создании элементов наноэлектроники на основе УНТ.

Ширина запрещенной зоны полупроводниковой УНТ может значительно изменяться под действием внешнего магнитного поля, что влечет за собой изменение проводимости УНТ. Путем наложения и снятия определенного магнитного поля можно изменять проводимость УНТ от металлической до полупроводниковой. Подобный эффект вызывается также воздействием на УНТ поперечного электрического поля, что используется при построении полевых транзисторов на УНТ.

Подобно графиту и алмазу УНТ обладают высокой теплоемкостью и теплопроводностью. При этом они проводят тепло только вдоль оси трубки, что связано с баллистической теплопроводностью за счет электронов. Экспериментально измеренное значение коэффициента теплопроводности УНТ составляет около $3 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. По некоторым оценкам, УНТ способны выдерживать без разрушения температуры до 2800°C в вакууме и до 750°C на воздухе.

Высокая удельная (по отношению к массе) площадь поверхности и особенности электронного строения УНТ определяют их высокую чувствительность к химическим воздействиям. Большой внутренний объем УНТ позволяет использовать их для создания хранилищ водорода, о которых уже упоминалось при обсуждении фуллеренов.

Графен

После открытия фуллеренов и УНТ классификация аллотропных форм углерода с точки зрения наноразмерности приобрела следующий вид:

- ♦ 3D – алмаз, графит, карбин;
- ♦ 1D – УНТ;
- ♦ 0D – фуллерены.

При рассмотрении этой классификации естественно возникает вопрос о возможности существования углеродных 2D-объектов. В течение длительного времени считалось, что двумерные кристаллы термодинамически неустойчивы, этот тезис был доказан теоретически и неоднократно подтверждался экспериментально. Поэтому несмотря на то, что особенности строения отдельных слоев графита тщательно анализировались, а сделанные выводы использовались при изучении фуллеренов и УНТ, полагалось, что монослой графита не могут существовать отдельно от кристалла. Это положение удалось экспериментально опровергнуть только в 2004 г., когда усилиями российских и английских ученых был получен графен в виде изолированного монослоя атомов углерода методом микромеханического скалывания слоев графита. После этого началось интенсивное изучение свойств графена.

Графен (*graphene*), как уже указывалось, представляет собой изолированный моноатомный слой графита, т.е. слой атомов углерода, размещенных в узлах гексагональной двумерной кристаллической решетки (рис. 1.23). В определенной степени

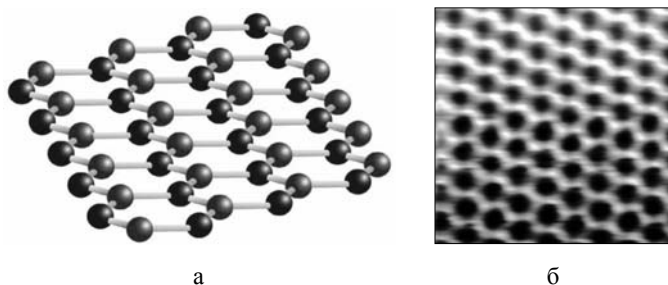


Рис. 1.23. Структура (а) и изображение (б) листа графена, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа

графен можно рассматривать в качестве исходного материала для построения других углеродных форм, как это показано на рис. 1.24. Из фрагмента листа с искаженными шестиугольниками можно построить молекулу фуллерена, лист графена, свернутый

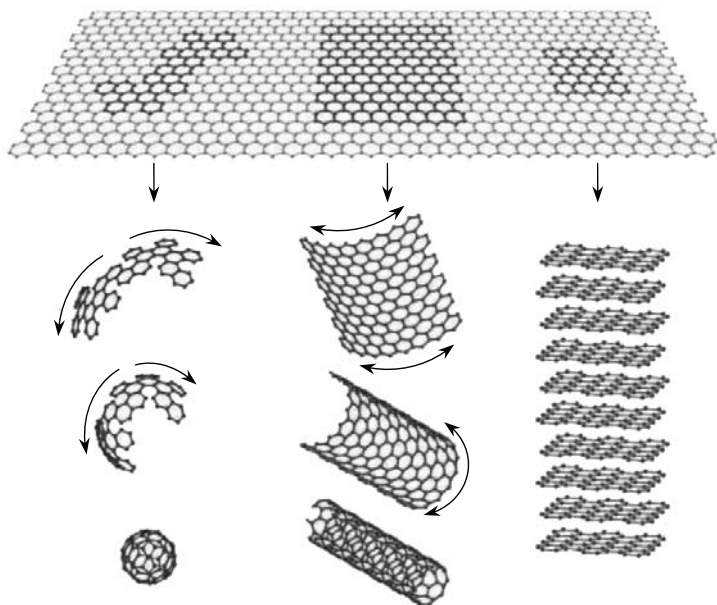


Рис. 1.24. Разновидности углеродных структур

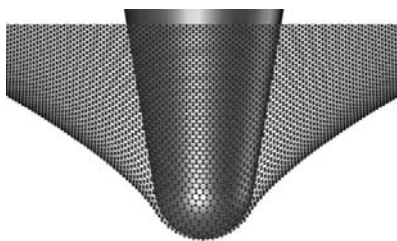


Рис. 1.25. Эксперимент по измерению прочности графена

в цилиндр, образует нанотрубку, а из сложенных в стопку листов получается графит. Однако, такие простые модели следует рассматривать только в качестве иллюстративных. Экспериментально показано, что молекула фуллерена выстраивается из отдельных атомов углерода.

Свойства графена во многом уникальны. Так, на основании произведенного в середине 2008 г. экспериментального измерения прочности графена на разрыв (рис. 1.25) он был отнесен по этому параметру к наиболее прочным материалам. Графен имеет очень высокий коэффициент теплопроводности при комнатной температуре – около $5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, что почти в 15 раз выше по отношению к меди и в 1,5 раза превышает аналогичный показатель для УНТ.

Электрические свойства графена определяются особенностями его электронной структуры. На рис. 1.26 приведено пространственное изображение структуры энергетических зон графена. Вертикальная координата трехмерной фигуры служит шкалой энергий, а перпендикулярная ей плоскость соответствует плоскости листа графена с гексагональными ячейками, фрагмент которого также изображен на рис. 1.26. Рассмотрение пространственной структуры энергетических зон показывает, что валентная зона касается зоны проводимости в точках, соответствующих вершинам шестиугольника, т.е.

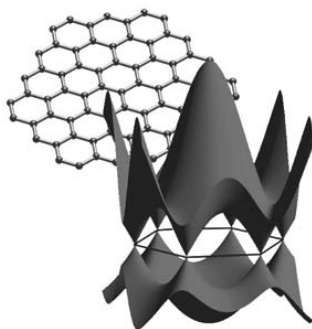


Рис. 1.26. Зонная структура графена и схема фрагмента его листа

узлам кристаллической решетки. Вблизи этих точек энергия электронов линейно зависит от волнового вектора в отличие от параболического закона дисперсии для периодических структур, согласно которому энергия носителя пропорциональна квадрату волнового вектора.

Такие особенности зонной структуры приводят к необычному поведению носителей заряда в графене при прохождении через потенциальный барьер. Если при обычном туннелировании вероятность проникновения частицы в область за барьером уменьшается с ростом его высоты и ширины, то в графене электрон или дырка, движущиеся перпендикулярно барьеру, преодолевают его с единичной вероятностью вне зависимости от значений высоты и ширины. Подвижность носителей заряда достигает в графене $(1,5-2,0) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, что приблизительно на порядок выше по сравнению с кремнием.

Из-за рассмотренных особенностей зонной структуры графена управление движением носителей заряда в нем внешним электрическим полем затруднено. Это создает трудности при построении транзистора на основе графена. Для их преодоления предложено использовать графеновые наноленты (*nanoribbons*) – узкие полоски графена, в которых на движение носителей в направлении, перпендикулярном продольной оси полосок, накладываются квантовые ограничения. Компьютерное моделирование показывает, что, вырезая ленты с кресельной или зигзагообразной структурой, можно изменять их проводимость, т.е. получать ленты с металлической или полупроводниковой проводимостью подобно рассмотренным выше УНТ. Для полупроводниковых графеновых нанолент экспериментально подтверждена обратная зависимость ширины энергетической щели от поперечного размера ленты.

В настоящее время некоторые исследователи считают графеновые наноленты наиболее перспективным заменителем кремния в качестве полупроводникового материала для наноэлектроники. Такие наноленты могут использоваться наряду с УНТ и фуллеренами в качестве добавок при создании новых материалов.

1.4. Формирование и развитие нанотехнологии

Хотя нанотехнология стала предметом интенсивных научных исследований и широкого общественного обсуждения только в последние 10–15 лет, ее формирование явилось результатом длительного развития многих областей науки и техники. В этом развитии, иллюстрируемом рис. 1.27, можно проследить на протяжении десятилетий как совершенствование технологий «сверху–вниз», обеспечившее последовательное снижение размеров создаваемых технических устройств, так и формирование основ технологий «снизу–вверх» по мере возникновения и становления ряда новых направлений в химии, физике, биологии.

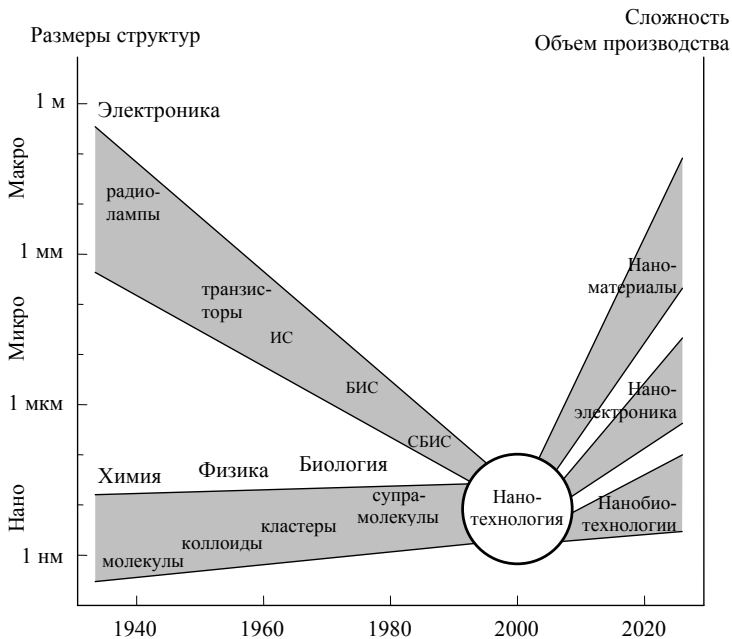


Рис. 1.27. Схема формирования и развития нанотехнологии

Электроника, на примере которой показано развитие по пути миниатюризации изделий, прошла этапы применения радиоламп,

дискретных полупроводниковых приборов, интегральных микросхем (ИС) с низкой степенью интеграции, повышение которой привело к созданию больших интегральных схем (БИС), а в настоящее время находится на этапе применения сверхбольших интегральных схем (СБИС) с чрезвычайно высокой степенью интеграции (свыше 10^9 транзисторов на чипе) и постепенного перехода к применению элементов нанoeлектроники. Развитие интегральной микroeлектроники довольно точно описывается сформулированным одним из основателей корпорации *Intel* Г. Муром законом, согласно которому каждые 1,5–2 года происходит удвоение числа транзисторов на полупроводниковых чипах, т.е. удвоение плотности монтажа микросхем. При этом происходит соответствующее уменьшение размеров самих транзисторов.

К 2000 г. размеры транзисторов СБИС снизились до 100 нм, т.е. достигли верхней границы нанодиапазона. В настоящее время ведущие мировые производители СБИС перешагнули этот рубеж и поставляют СБИС, изготовленные по проектным нормам 65 нм, с наметившимся уже переходом к нормам 45 и 32 нм, а в недалеком будущем – к 22 нм. Пока закон Мура, который является, конечно же, не физическим законом, а лишь очень точно подмеченной и сформулированной эмпирической закономерностью, выполняется довольно строго. Однако при уменьшении элементов микросхем до 10 нм и ниже придется пересматривать принципы их работы с учетом квантовых эффектов и, соответственно, технологии изготовления, т.е. микroeлектроника начнет трансформироваться в нанoeлектронику. В какой степени закон Мура окажется справедлив для нанoeлектроники, покажет будущее.

Нижний сектор в левой части рис. 1.27 показывает формирование фундамента для реализации технологий «снизу–вверх», предусматривающих манипулирование отдельными атомами и молекулами и широкое использование процессов самоорганизации и самосборки наноструктур. Хотя формально провозглашение основных принципов этих технологий связывают со знаменитой лекцией Р. Фейнмана, в их основе лежат результаты

многолетних исследований в различных областях химии, физики и биологии.

Изучение молекулярного строения вещества, коллоидных систем, кластеров, супрамолекул – сложных образований из двух и более молекул, органических и биологических структур позволило накопить огромный объем знаний о свойствах наноразмерных объектов, а также создать методы их получения и исследования, многие из которых положены в основу нанотехнологии в ее современном понимании. То же самое можно сказать о многих методах и технологических приемах микроэлектроники, одним из примеров которых является упоминавшаяся уже молекулярно-лучевая эпитаксия. Можно отметить, что изобретение сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов, описание которых дано в разд. 2, также тесно связано с разработками в области микроэлектроники.

Таким образом, развитие и последовательное сближение различных областей науки и техники как в отношении размеров изучаемых и практически используемых объектов, так и в отношении применяемых методов исследований и технологий, привело к формированию в конце 1990-х – начале 2000-х гг. нанотехнологии как самостоятельной научно-технической области.

Развитие нанотехнологии характеризуется постепенным обособлением в ее рамках ряда направлений, которое достаточно отчетливо прослеживается уже в первом десятилетии XXI в. Некоторые наиболее важные из этих направлений: наноматериалы, наноэлектроника и нанобиотехнологии показаны в правой части рис. 1.27. Представленное графически развитие этих направлений в виде восходящих секторов следует соотносить с правой вертикальной шкалой, отражающей рост сложности создаваемых продуктов и объемов их производства. Конечно, приведенные примеры не отражают всего многообразия формирующихся направлений нанотехнологии и последующего ветвления этих направлений по мере их развития. К приведенным примерам можно добавить создание разнообразных наносенсоров, наномеханизмов, выделение в самостоятельное направление

интеллектуальных материалов, специальные разработки по созданию эволюционирующих систем и технологий самосборки, а также многие другие направления, которые получат быстрое развитие в ближайшие годы.

Здесь лишь проиллюстрируем главный принцип нанотехнологий – манипулирование отдельными атомами, провозглашенный Р. Фейнманом и представленный Э. Дрекслером в виде проектов целого ряда механизмов, собираемых по технологии «снизу–вверх». Некоторые из механизмов, идея построения которых была предложена Э. Дрекслером более 20 лет назад, показаны на рис. 1.28. Современные достижения нанотехнологии блестяще подтвердили реальность создания подобных механизмов, как и возможность реализации многих других идей в области нанотехнологии, казавшихся еще совсем недавно фантастическими.

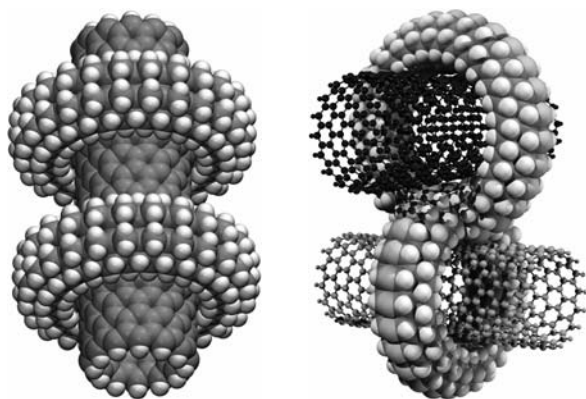


Рис. 1.28. Модели механизмов, собранных по технологии «снизу–вверх»

В табл. 1.3 приведены в хронологическом порядке некоторые наиболее важные достижения, события и организационные мероприятия, оказавшие значительное влияние на формирование нанотехнологии и ее развитие. Часть указанных событий уже обсуждалась во Введении и в настоящем разделе, дополнительная информация о других будет дана в последующих разделах.

Таблица 1.3. Важные даты в истории формирования и развития нанотехнологий

Год	Достижения и события
1959	Лекция Р. Фейнмана, в которой была выдвинута идея создания веществ путем манипулирования отдельными атомами
1974	Японским исследователем Н. Танигучи предложен термин «нанотехнология»
1981	Создание Г. Биннигом и Г. Рорером сканирующего туннельного микроскопа
1985	Открытие Г. Крото и Р. Смолли фуллеренов
1986	Создание с участием Г. Биннига сканирующего атомно-силового микроскопа
1986	Выход в свет книги Э. Дрекслера «Машины созидания: пришествие эры нанотехнологии», в которой рассмотрена возможность создания различных механизмов путем их сборки из отдельных атомов и молекул
1990	Демонстрационный эксперимент сотрудников компании <i>IBM</i> , в котором название компании было выложено из 35 атомов Хе на поверхности кристалла Ni
1991	Открытие УНТ японским исследователем С. Ииджима
1991	Начало разработки в США и Японии первых научных программ по проблемам нанотехнологии
1994	Появление первых коммерческих продуктов на основе наночастиц: нанопорошков, нанопокровов и т.п.
1997	Организация в Великобритании Института наноструктурных материалов
1999	В Японии начала действовать «Национальная программа работ по нанотехнологии»
2000	В США утверждена долгосрочная программа «Национальная нанотехнологическая инициатива»
2002	Для содействия развитию нанотехнологий в странах Европы создана некоммерческая организация «Европейская ассоциация нанобизнеса»
2004	Группой российских и английских ученых под руководством А. Гейма и К. Новоселова получен графен
2004	Создание С. Деккером наномеханизма на основе молекулы ДНК, соединенной с УНТ

Раздел 1

Таблица 1.3. Важные даты в истории формирования и развития нанотехнологии. Продолжение

Год	Достижения и события
2004	Принята «Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года»
2007	В Российской Федерации провозглашена президентская инициатива «Стратегия развития nanoиндустрии»
2007	Утверждена Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 годы»
2007	В РАН создано Отделение нанотехнологий и информационных технологий под руководством Е.П. Велихова
2007	Для содействия реализации государственной политики в сфере нанотехнологий, развития инновационной инфраструктуры в этой сфере и создания перспективных нанотехнологий и nanoиндустрии учреждена «Российская корпорация нанотехнологий» (РОСНАНО)
2008	Одобрена «Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года»
2008	В Москве состоялся Первый Международный форум по нанотехнологиям, на котором были обсуждены перспективы и пути развития нанотехнологий в России и в мире

2. МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ СТРУКТУРЫ

2.1. Получение наночастиц

Вначале рассмотрим методы получения наноразмерных частиц и структур, которые используются в качестве «строительных блоков» при создании различных наноматериалов.

Наночастицы можно получать хорошо известным методом измельчения материалов с помощью шаровых, вибрационных и иных мельниц. Таким путем удастся изготавливать порошки с размерами зерен от 5–10 до 100–200 нм, причем не только чистых веществ, но и некоторых их соединений. В последнем случае исходные компоненты могут вводиться в мельницу отдельно, но в процессе перемалывания за счет сильного разогрева зерен и возникновения в них нестационарных механических напряжений с разрывом химических связей обеспечиваются условия для химического взаимодействия компонентов – протекает *механохимический синтез*. Этим методом были получены, например, частицы TiC, ZrC, VC, NbC, WC–Co диаметром около 10 нм.

Однако описанный процесс получения наночастиц весьма длителен (помол производится в течение ~50–100 часов) и энергоемок, а кроме того, получаемый порошок загрязняется материалами элементов конструкции мельницы. Более перспективными являются *конденсационные методы* получения наночастиц, в

основе которых лежат последовательно реализуемые процессы дезагрегации (диспергирования) исходных веществ до уровня отдельных атомов, молекул или кластеров и сборки из них (агрегации) требуемых наночастиц. В зависимости от способов осуществления указанных процессов и среды, в которой они протекают, выделяют ряд конденсационных методов. Они отличаются способами получения исходных диспергированных веществ (путем испарения и термического разложения вещества с использованием электронагревателей, лазерного и электроразрядного распыления, ионно-лучевого распыления и др.) и средой, в которой происходит конденсация частиц (в вакууме, инертном газе, плазме, жидкости). Но все эти методы объединены общим принципом – обеспечением сочетания высокой скорости возникновения центров зарождения частиц с малой скоростью их роста. Важно, что при изготовлении нанопорошков конденсационными методами удастся путем варьирования условий протекания процессов направленно изменять параметры получаемых наночастиц.

Наиболее часто конденсационные методы реализуются в газовой среде. В простейшем варианте (рис. 2.1) исходное вещество (1) испаряется в вакуумную камеру (2) через диафрагму в испарителе (3), нагреваемом с помощью электрической спирали (4). Выходящий из испарителя молекулярный пучок (5) конденсируется на охлаждаемом коллекторе (6), образуя требуемые наночастицы. Такой источник молекулярного пучка, называемый эффузионным, обеспечивает не очень высокую плотность потока молекул $\sim 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Повысить ее до $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ можно с помощью сопла, формирующего сверхзвуковой молекулярный пучок.

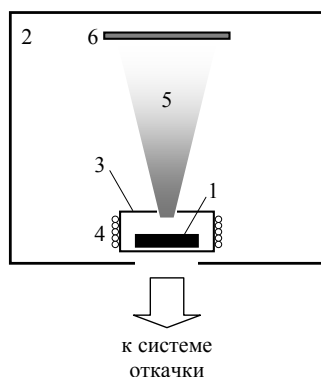


Рис. 2.1. Схема получения наночастиц испарением вещества с последующей конденсацией

Разновидностями описанного устройства являются установки, в которых испарение исходного материала осуществляется в электрической дуге, зажигаемой между двумя электродами, или при воздействии на материал импульсного лазерного луча (рис. 2.2). В обоих случаях испаряемые частицы выносятся в область конденсации потоком инертного газа (He, Ar, Xe). Путем варьирования состава газовой среды можно изменять размеры конденсирующихся частиц. Именно такими способами, как обсуждалось выше, были получены фуллерены и УНТ.

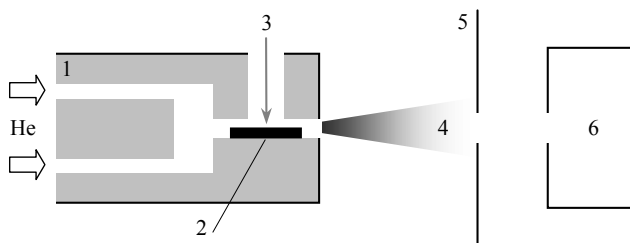
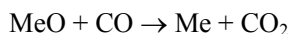


Рис. 2.2. Схема установки для получения металлических наночастиц лазерным испарением: 1 – испарительная камера; 2 – металлический образец; 3 – луч лазера; 4 – поток кластеров; 5 – сепаратор; 6 – масс-спектрометр

Наноразмерные частицы металлов можно получать путем термического разложения (термолиза) в вакууме различных соединений. Например, получение частиц Li размером ~5 нм возможно при нагревании азида лития LiN_3 до температуры ~400°C. При такой температуре LiN_3 разлагается с выделением N_2 , а свободные атомы Li объединяются в частицы указанных размеров. В этом методе для получения наночастиц металлов используют также термическое разложение различных солей или восстановление оксидов металлов водородом или окисью углерода в соответствии с реакциями:



В этой общей записи Me означает «металл», в качестве которого могут выступать Fe, W, Ni, Mo, Cu, Co.

Еще одним вариантом конденсационного метода получения наночастиц в газовой среде является *плазмохимический синтез*, который проводится в специальных плазменных реакторах – плазмотронах. Плазма с температурой 4000–8000 К создается внутри реактора путем зажигания высокочастотного газового разряда или электрической дуги в Ag, N₂, NH₃ и других газах. Схема одного из вариантов плазмотрона показана на рис. 2.3. Плазмообразующий газ напускается в камеру через патрубки (1). Патрубки (2), (3) служат для ввода в камеру реагентов и холодного газа. С помощью системы электродов (5) и электромагнита (6) в камере зажигается электрическая дуга (7). При горении дуги в камере образуется поток плазмы (8). Продукты синтеза выводятся из камеры через патрубок (4).

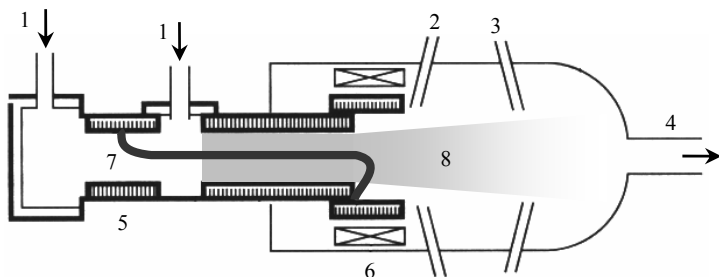


Рис. 2.3. Схема плазмотрона: 1, 2, 3 – патрубки для ввода в камеру плазмообразующего газа, реагентов и холодного газа; 4 – патрубок для вывода продуктов синтеза; 5 – система электродов; 6 – электромагнит; 7 – электрическая дуга; 8 – поток плазмы

В плазме протекают химические реакции с участием исходных веществ, которые могут находиться в газообразном, жидком или твердом состоянии. При этом плазмообразующие газы участвуют в реакциях. Далее, как и в предыдущих конденсационных методах, осуществляемых в газовой среде, производится конденсация продуктов реакций при их охлаждении.

Отметим, что рассмотренные процессы осаждения наноматериалов в газовой среде, включая осаждение нанопленок, принято делить на две группы: физическое осаждение (*Physical Vapor*

Deposition – PVD) и химическое осаждение (*Chemical Vapor Deposition* – CVD). PVD-процессы осуществляются в вакууме и в инертных газах, а CVD-процессы – в химически активных газовых средах.

В жидкой среде наночастицы также могут быть получены различными способами. Один из них (электрохимический метод) основан на процессе электролиза молекул путем пропускания постоянного электрического тока между двумя электродами, помещенными в раствор или расплав электролита. В такой системе на отрицательном электроде происходит восстановление катионов с образованием осадка, который в зависимости от состава электролита и режима проведения процесса может быть уже наноструктурированным, либо представлять собой исходный продукт для получения наночастиц, легко поддающийся механическому измельчению. Достоинством метода является высокая чистота получаемых продуктов.

Осаждение твердых частиц из жидких сред (растворов или расплавов) может производиться и другими способами, например, путем охлаждения среды или введения в нее специальных веществ (осадителей), снижающих растворимость определенного продукта. В этом случае также можно непосредственно осаждавать наноразмерные частицы либо агрегаты, пригодные для последующего измельчения.

Широко используется так называемый *золь-гель метод* получения наноструктур из водных или органических растворов исходных веществ. Сначала из раствора с помощью различных химических процессов получают упоминавшийся уже выше золь – жидкую коллоидную систему с твердой дисперсной фазой. Затем путем удаления части жидкости золь переводится в гель – структурированную систему, в которой твердые частицы образуют рыхлую пространственную сетку из трехмерных ячеек, содержащих жидкую фазу. Гели непосредственно используются для создания пленок или объемных материалов, а через промежуточные процессы сушки и дробления – для получения порошков.

Существуют и некоторые другие менее распространенные способы получения наночастиц, например, путем воздействия на исходный материал взрывной ударной волной (ударно-волновой синтез). К этой группе можно отнести и электрический взрыв проволок диаметром 0,1–1 мм, осуществляемый пропусканием через них мощного импульса электрического тока (10^4 – 10^6 А·мм⁻² при длительности импульса 10^{-7} – 10^{-5} с). Таким путем получены, например, частицы Cu и Al со средними размерами ~20 и 50 нм соответственно.

2.2. Создание наноструктурных материалов

Основные методы получения наноструктурных материалов, применяемых преимущественно в качестве конструкционных, указаны в табл. 2.1.

Комплекс методов, объединенных общим названием *порошковая технология*, предназначен для изготовления твердых наноструктурных материалов из нанопорошков путем их *компактирования* (*консолидации*). Основными способами компактирования нанопорошков являются прессование и спекание, а также их сочетания: прессование при повышенных температурах (горячее прессование) и спекание под давлением.

Помимо традиционно применяемого в промышленности статического прессования, проводимого в пресс-формах, при компактировании нанопорошков используются более эффективные способы прессования:

- ♦ динамическое (магнитно-импульсное, взрывное);
- ♦ вибрационное (ультразвуковое);
- ♦ всестороннее (изостатическое), подразделяющееся по типу среды, через которую передается давление, на гидростатическое и газостатическое.

Величины давления при различных способах прессования лежат в диапазоне 0,01–1,0 ГПа, а продолжительность приложения давления составляет от 10 до 10^4 с. Исключение составляет

Таблица 2.1. Методы получения наноструктурных материалов

Метод	Технологические способы	Получаемые материалы
Компактирование нанопорошков	Прессование и спекание, в том числе при повышенных температурах и давлениях	Металлы, сплавы, композиты, керамика
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Кристаллизация аморфных сплавов Консолидация аморфных порошков с последующей кристаллизацией	Аморфные материалы
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование Деформация кручением при высоких давлениях Всесторонняя ковка	Металлы, сплавы
Нанесение наноструктурных покрытий	Электролитическое осаждение Химическое и физическое осаждение из газовой фазы Золь-гель метод	Металлы, сплавы, композиты, керамика

прессование с помощью взрыва, при котором давление достигает 10–100 ГПа при длительности воздействия $\sim 10^{-6}$ с.

Температура спекания нанопорошков, при которой обеспечиваются оптимальные соотношения параметров изготавливаемого материала: плотности, пористости и размеров зерен, выбирается в пределах $\sim 500\text{--}1100^\circ\text{C}$ (ниже температуры плавления используемых компонентов). Путем приложения к спекаемому порошку давления $\sim 0,1\text{--}0,3$ ГПа ее удастся снизить в 1,5–2 раза при сохранении требуемых параметров материала.

Интенсивная пластическая деформация используется для придания нанокристаллической структуры металлам и сплавам. Она осуществляется различными механическими воздействиями на исходный материал (кручением, знакопеременным изгибом и т.п.), обеспечивающими высокую интенсивность и немонокотность деформации. В результате такого воздействия материал приобретает равномерную нанокристаллическую структуру.

Кристаллизация аморфных сплавов может производиться непосредственно из расплава или с использованием твердых заготовок: гранул с поперечными размерами 1–4 мм, стержней диаметром 2–4 мм, лент толщиной 30–50 мкм при надлежащем выборе температурных и временных характеристик процесса. Такие способы используются для получения нанокристаллических магнитных материалов, а также материалов для изготовления режущего инструмента и износостойких деталей.

В заключение этого раздела подчеркнем, что в нем описаны технологии получения наноструктурных материалов, уже находящие применение в промышленности, либо приближающиеся по уровню их проработки к промышленному использованию. Специфические методы и приемы нанотехнологий, такие как манипулирование отдельными атомами, процессы самосборки (*self assembling*), включая темплатную сборку (*template synthesis*), т.е. сборку по исходным шаблонам, будут рассмотрены ниже.

2.3. Особенности исследования структуры наноматериалов

Для изучения строения и свойств вещества используется обширный арсенал методов микроскопии, спектроскопии и масс-спектрометрии. При создании наноструктур и наноразмерных изделий чрезвычайно важна возможность их визуального наблюдения и измерения, обеспечиваемая методами микроскопии. Очевидно, что оптические микроскопы непригодны для работы с нанообъектами размером 1–100 нм, поскольку длины волн оптического излучения (400–800 нм) существенно превышают указанные величины. Предельное разрешение оптических микроскопов, ограничиваемое дифракцией волн, составляет ~200 нм. Повысить разрешение до 10–20 нм позволяют оптические микроскопы ближнего поля, действие которых основано на зондировании поверхности исследуемого образца с помощью заостренного волоконного оптического волновода, окруженного непрозрач-

ным экраном (рис. 2.4). При условии, что диаметр заостренного конца волновода d и расстояние h , на которое зонд приближается к исследуемой поверхности, меньше длины волны распространяющегося по волноводу света (стрелка), в очерченной пунктиром области между зондом и поверхностью образца формируется сложная волновая структура, благодаря которой снимается дифракционное ограничение на разрешение. В качестве источника света в таких микроскопах используются гелий-неоновые или аргонные лазеры, а кванты света, уходящие из области ближнего светового поля, регистрируются фотоэлектронными умножителями, которые могут располагаться как перед исследуемым образцом, так и позади него.

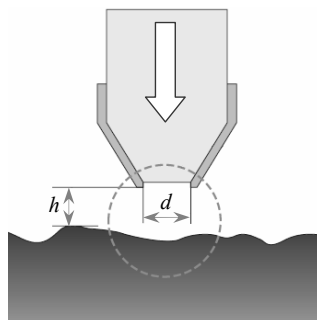


Рис. 2.4. Схема оптического зонда ближнего поля

Применение электронных микроскопов, в которых изображение исследуемого объекта строится с помощью хорошо сфокусированных электронных пучков, также позволяет преодолеть указанный выше предел дифракционного ограничения. Для электронов, движущихся в вакууме, выражение, определяющее длину волны де Бройля λ (см. разд. 1.1), можно записать в виде:

$$\lambda = \frac{1,226}{\sqrt{E}},$$

где $[\lambda]$ – нм, $[E]$ – эВ.

Следовательно, уже при $E = 100$ эВ получим $\lambda \sim 0,1$ нм. Реально электронные микроскопы работают при энергиях электронных пучков в десятки–сотни килоэлектронвольт.

Электронные микроскопы делятся на два типа:

- ♦ просвечивающие, в которых пучок электронов проходит сквозь достаточно тонкий (~ 100 нм) исследуемый объект, а

изображение строится с помощью приемника электронов, помещаемого позади образца;

- ♦ растровые (сканирующие), позволяющие исследовать достаточно протяженные участки поверхности образца путем сканирования электронного пучка с регистрацией отраженных от поверхности электронов приемником, располагаемым над облучаемой поверхностью.

Разрешение просвечивающих электронных микроскопов достигает 0,2 нм, а растровых – 1–2 нм, поэтому микроскопы обоих типов могут использоваться и реально применяются для изучения наноструктур. Подробная информация об устройстве электронных микроскопов содержится в рекомендуемой литературе.

Здесь дадим более детальное описание уже упоминавшихся выше сканирующих зондовых микроскопов: туннельного и атомно-силового, изобретение которых в первой половине 1980-х гг. в значительной степени способствовало развитию исследований в области нанотехнологии. Разрешение обоих микроскопов таково, что с их помощью можно видеть отдельные атомы на поверхности исследуемого образца, а с помощью сканирующего туннельного микроскопа – не только видеть, но и, что чрезвычайно важно, перемещать атомы. Таким образом, изобретение сканирующего туннельного микроскопа сделало реальностью идею Р. Фейнмана о манипулировании отдельными атомами, высказанную в его знаменитой лекции и впоследствии развитую Э. Дрекслером.

Сканирующий туннельный микроскоп был создан в 1981 г. сотрудниками исследовательской лаборатории компании *IBM* в Цюрихе Г. Биннигом и Г. Рорером. О значимости этого изобретения свидетельствует тот факт, что уже в 1986 г. им за него была присуждена Нобелевская премия совместно с одним из создателей электронного микроскопа Э. Руска, чьи первые работы в этой области относятся еще к началу 1930-х гг.

Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (рис. 2.5) основан на хорошо известном в физике квантовомеханическом эффекте туннелирования электронов через потенци-

альный барьер, уже упоминавшемся выше в разд. 1. Если заостренный зонд приблизить к исследуемой поверхности на расстояние ~ 1 нм, то между зондом и находящимся под ним участком поверхности возникает туннельный ток ~ 1 нА (светлая стрелка), регистрируемый во внешней электрической цепи, в которую включен источник постоянного напряжения $U = 0,1\text{--}10$ В. Величина туннельного тока экспоненциально зависит от расстояния между острием зонда и поверхностью, а следовательно, она весьма чувствительна к рельефу поверхности и может служить параметром для его описания.

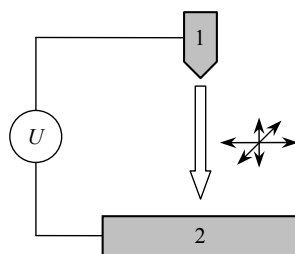


Рис. 2.5. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа: 1 — зонд; 2 — образец

Перемещение зонда над поверхностью исследуемого образца, включая перемещение по вертикали, осуществляется с помощью специального трехкоординатного механизма, исполнительный элемент которого изготовлен из пьезоэлектрика. Прикладывая к такому элементу определенные электрические потенциалы, можно его деформировать требуемым образом и в результате с высокой точностью перемещать жестко связанный с ним зонд. Для управления механизмом перемещения используется имеющаяся в измерительной схеме цепь обратной связи. С помощью такого механизма можно также производить перемещение образца относительно зонда.

Используются два режима работы микроскопа:

- ♦ при поддержании постоянной величины туннельного тока за счет перемещения зонда по вертикали в соответствии с рельефом исследуемой поверхности;
- ♦ при постоянной высоте зонда относительно поверхности.

Работа микроскопа в этих двух режимах иллюстрируется рис. 2.6. В первом случае информацию о рельефе поверхности несет сигнал, пропорциональный вертикальным перемещениям

зонда, а во втором – величине туннельного тока над каждой точкой поверхности. Разрешение зондового микроскопа зависит, в

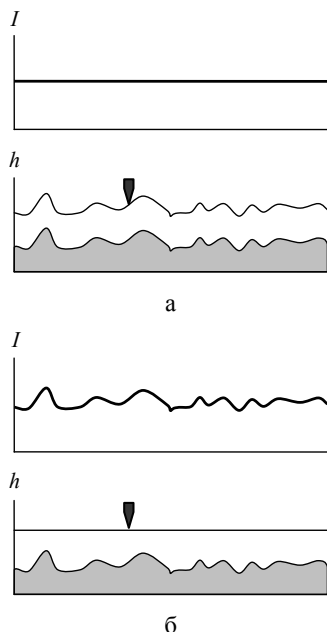


Рис. 2.6. Режимы работы туннельного микроскопа: а – постоянный ток; б – постоянная высота зонда

первую очередь, от радиуса острия зонда, который обычно не превышает 10 нм, а в предельном случае соответствует размерам одного атома.

С помощью сканирующего туннельного микроскопа можно изучать только проводящие объекты. Изобретение в 1986 г. атомно-силового микроскопа, одним из создателей которого вновь являлся Г. Бинниг, позволило распространить зондовый метод исследований на непроводящие вещества. В атомно-силовом микроскопе зонд, перемещение которого в горизонтальной плоскости над исследуемой поверхностью производится так же, как в сканирующем туннельном микроскопе, закреплен на упругом элементе, за которым даже в

русскоязычной литературе утвердилось название «кантилевер» (от англ. *cantilever* – консоль, кронштейн). В этом устройстве информацию о рельефе поверхности дают вертикальные смещения зонда, вызываемые силами его взаимодействия с находящимися на поверхности атомами. Регистрация смещений обычно производится с помощью отраженного от конца кантилевера лазерного луча, который воспринимается фотодиодной матрицей (рис. 2.7). Достоинствами зондовых микроскопов являются их относительная простота и компактность.

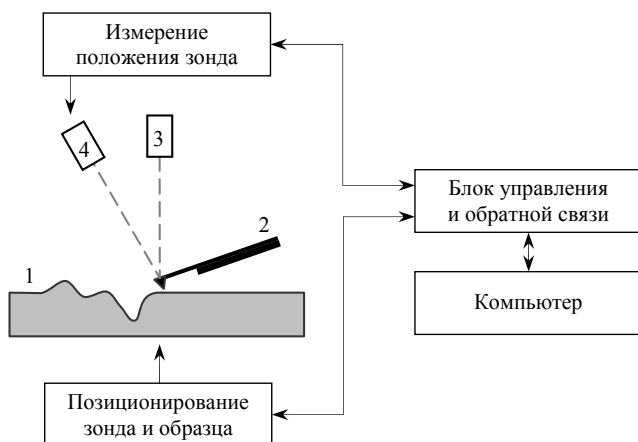


Рис. 2.7. Схема атомно-силового микроскопа: 1 – исследуемый образец; 2 – кантилевер с зондом; 3 – лазер; 4 – фотоприемник

Зонды обычно изготавливаются из тугоплавких металлов. Микрофотография зонда, изготовленного из вольфрама, приведена на рис. 2.8а. В качестве зондов могут использоваться также УНТ с металлической проводимостью. Изображение закрепленного на кантилевере зонда с УНТ на его конце показано на рис. 2.8б. Использование зондов с УНТ позволяет повысить разрешение микроскопа.

Описанные зондовые микроскопы обеспечивают значительно лучшую по сравнению с электронными микроскопами прора-

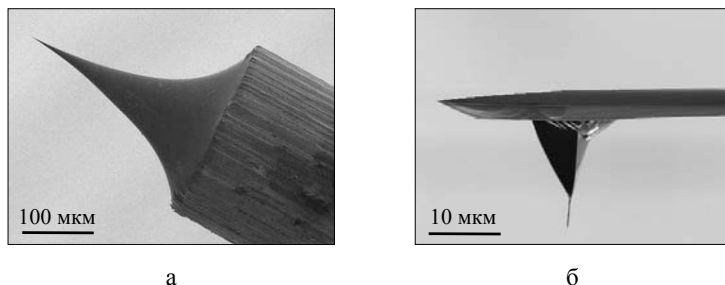


Рис. 2.8. Изображение обычного зонда (а) и зонда с УНТ на конце(б)

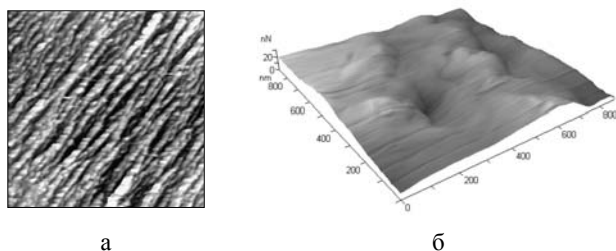


Рис. 2.9. Изображение поверхности полиимидной пленки (а) и локальной области, поврежденной в результате воздействия потока атомарного кислорода (б)

ботку изображений по вертикальной координате, что позволяет получать высококачественные изображения структуры поверхности. На рис. 2.9а показано полученное в НИИЯФ МГУ с помощью атомно-силового микроскопа изображение поверхности полиимидной пленки, на котором отчетливо видна упорядоченная структура полимерных молекул. Рис. 2.9б демонстрирует локальную область поверхности пленки, поврежденную в результате воздействия потока атомарного кислорода, который, как будет показано в разд. 4, является одним из главных факторов, приводящих к ухудшению свойств материалов внешней оболочки низкоорбитальных космических аппаратов.

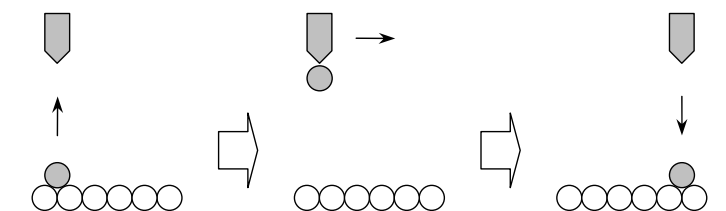


Рис. 2.10. Схема перемещения атома с помощью зонда

Методика создания наноструктур зондовыми методами иллюстрируется рис. 2.10. Прикладывая к зонду сканирующего туннельного микроскопа определенный потенциал, можно захватить атом, первоначально находившийся на поверхности, а

после переноса поместить его на другой участок путем снятия приложенного потенциала. Именно таким способом сотрудники компании IBM в 1990 г. выложили ее название на поверхности монокристалла Ni из 35 атомов Xe (рис. 2.11). Этот эксперимент, повторенный позднее в различных вариантах многими другими исследователями, является эффектной демонстрацией возможностей метода. Однако совершенно очевидно, что его производительность крайне низка. Пока можно говорить лишь о его использовании для создания отдельных сравнительно простых наноструктур и наноразмерных изделий. Тем не менее обсуждаются возможности создания управляемых компьютерами многозондовых сборочных механизмов (ассемблеров), которые смогут выполнять значительно более сложные технологические операции при достаточно высокой производительности.

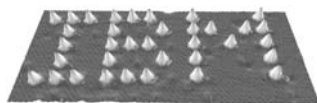


Рис. 2.11. Изображение названия компании *IBM*, выложенного из атомов Xe на поверхности монокристалла Ni

В заключение необходимо отметить, что зондовые методы начинают активно использоваться в традиционных технологиях — например, в литографии при производстве электронных чипов с высокой степенью интеграции. Применение этих методов является одним из путей создания элементной базы нанoeлектроники, необходимой для разработки перспективных космических аппаратов.

3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

3.1. Этапы развития нанотехнологии

В уже цитировавшемся выше программном документе «Стратегия развития наноиндустрии» выделены три этапа развития нанотехнологий в нашей стране.

«На первом этапе стоит задача кардинального увеличения объемов производства уже выпускаемой и востребованной продукции нанотехнологий, насыщения соответствующих рынков в ближайшие три–четыре года». Указывается, что на этом этапе в результате применения наноматериалов и изделий на их основе будет повышено качество медицинского обслуживания населения, улучшена экологическая ситуация за счет использования новых средств очистки и переработки отходов, достигнуто снижение материало- и энергоемкости промышленной продукции.

«Задача второго этапа – разработка и доведение до промышленного производства новых видов продукции нанотехнологий, которые должны появиться на рынке через три–пять лет». На этом этапе будет продолжено решение социально-экономических задач, значительное внимание будет уделено применению нанотехнологий в медицине и их использованию для повышения уровня индивидуальной безопасности на транспорте, в промышленности, в быту за счет применения принципиально новых сенсорных систем дистанционного контроля и управления.

«Задача третьего этапа – опережающее развитие принципиально новых направлений в области нанотехнологий, обеспечивающих создание в стране надотраслевой научно-образовательной и производственной среды в перспективе на ближайшие 10–20 лет». На этом этапе планируется широкое развитие нанобиотехнологий, создание гибридных систем с использованием биоэлементов и биоробототехнических систем.

Выделение этих этапов и формулировки задач, решаемых на каждом из них, основываются на анализе уже достигнутых результатов в области технологий и перспектив дальнейших исследований. Сотрудники МГУ академик РАН Ю.Д. Третьяков и чл.-корр. РАН Е.А. Гудилин при рассмотрении процесса развития нанотехнологий делят их на три группы, приблизительно соответствующие указанным выше трем этапам развития.

К первой группе отнесены уже известные нанотехнологии, являющиеся прежде всего логическим продолжением работ по созданию ультрадисперсных порошков и материалов на их основе. Промышленная реализация технологий этой группы позволит в короткие сроки наладить выпуск новых конструкционных материалов, включая композиционные материалы различного состава, строительных и лакокрасочных материалов, материалов и изделий социального назначения.

Вторая группа включает нанотехнологии, «основанные на генерации новых знаний, прорывных идей, использовании самого современного синтетического и аналитического оборудования». В качестве основных областей потребления продукции нанотехнологий этой группы рассматриваются медицина, экология, энергетика, электроника, фотоника, информатика. Сроки внедрения результатов оцениваются в 3–10 лет.

Нанотехнологии третьей группы – «это развитие фундаментальных исследований в области нанотехнологий на отдаленную перспективу, поиск новых эффектов, принципов функционирования, пока еще не существующих материалов, работа на опережающее развитие нанотехнологий в Российской Федерации».

Отмечается, что в выполнении этих работ очень важную роль играет их информационное обеспечение.

В рамках реализации упоминавшейся программы США «Национальная нанотехнологическая инициатива» выделены четыре поколения продуктов нанотехнологий, приход каждого из которых связывается с созданием первого коммерческого образца продукта:

- ♦ 2000 г. – пассивные наноструктуры, сохраняющие свои свойства при эксплуатации: порошки, покрытия, композиционные материалы с включением наночастиц, наноструктурированные металлы, полимеры, керамика;
- ♦ 2005 г. – активные наноструктуры, которые могут изменять структуру, состояние и свойства в процессе эксплуатации: биоструктуры, программируемые лекарственные средства, элементы нанoeлектроники;
- ♦ 2010 г. – наносистемы – пассивные и активные наноструктуры, интегрированные в системы: 3D-сети с новой иерархической архитектурой, робототехника;
- ♦ 2015–2020 гг. – молекулярные наносистемы – искусственно создаваемые системы, в которых главным компонентом являются молекулярные приборы.

Подобное разделение на этапы с указанием краткосрочных (до 2 лет), среднесрочных (3–5 лет) и долгосрочных (5–10 лет) перспектив дается и в нанотехнологических программах Евросоюза.

В ряде аналитических обзоров, подготовленных отечественными экспертами в 2006–2008 гг., также приводятся сроки появления различных групп материалов на мировых рынках:

- ♦ 1–4 года – ткани, покрытия, смазочные материалы, сенсоры, композиты;
- ♦ 5–8 лет – катализаторы, краски, лекарственные препараты, материалы для энергетики;
- ♦ 9–14 лет – солнечные элементы, компактные энергосистемы, биоматериалы;
- ♦ более 15 лет – квантовые компьютеры, молекулярные процессоры, нанoeлектромеханические системы.

Отличительные особенности и характеристики наиболее важных из перечисленных выше материалов и устройств будут описаны в последующих разделах.

Общее развитие нанотехнологий в ближайшие годы будет, по-видимому, описываться хорошо известным в науке и технике законом «S-образных» кривых (рис. 3.1), отражающих соотношение между затрачиваемыми усилиями и финансовыми вложениями (ось абсцисс) и достигаемыми результатами (ось ординат). На некотором начальном этапе достижения растут достаточно медленно, но затем накопленные научные знания и созданные технологические заделы значительно ускоряют рост. Однако на определенном уровне рост вновь замедляется, что свидетельствует о необходимости поиска принципиальных новых идей и подходов к решению проблемы. Согласно оценке, представленной на рис. 3.1, после 2010 г. развитие нанотехнологий должно значительно ускориться с достижением к 2020 г. максимальных темпов развития.

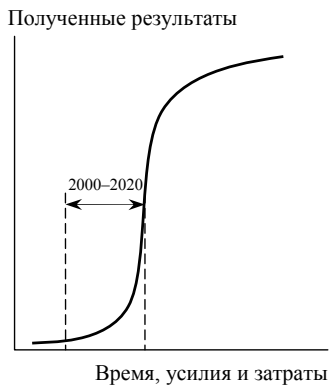


Рис. 3.1. Закон «S-образной» кривой

3.2. Направления развития исследований и применения продукции нанотехнологий

Существуют различные подходы к классификации нанотехнологий и наноматериалов, определению направлений исследований и разграничению областей применения нанотехнологий и создаваемой с их помощью продукции. В разд. 1 были выделены некоторые наиболее важные наноструктуры и изготавливаемые на их основе материалы, исходя из фундаментальных физических

принципов, особенностей структуры и состава материалов, а в разд. 3.1 структуры и материалы объединены в группы с учетом сроков создания промышленных образцов, при этом в каждой группе представлены материалы различного назначения.

В практическом отношении важно на основании экспертных оценок правильно определить наиболее значимые и перспективные направления исследований и области применения наноматериалов. Однако критерии, используемые при проведении таких оценок, также весьма различны: реальные запросы науки и промышленности, количество публикаций и патентов, объемы финансирования и т.д.

На текущем этапе программы США «Национальная нанотехнологическая инициатива» (2006–2010 гг.) в качестве главных разделов работ указываются:

- ◆ фундаментальные исследования в области нанотехнологий;
- ◆ наноматериалы;
- ◆ наноразмерные приборы и системы;
- ◆ разработка исследовательской аппаратуры, метрология и стандартизация;
- ◆ нанопроизводство;
- ◆ обеспечение исследований оборудованием и инструментами;
- ◆ окружающая среда, здравоохранение и безопасность;
- ◆ образовательные и социальные программы.

При этом определены области использования продукции нанотехнологий, наиболее важные из которых приведены в табл. 3.1 с указанием министерств и ведомств (агентств), работающих в соответствующих областях. Здесь темными значками обозначены агентства, играющие главную роль в организации работ, а светлыми – играющие вспомогательную роль.

Совместное рассмотрение табл. 3.1 с опубликованными данными о государственном бюджете программы «Национальная нанотехнологическая инициатива» на 2008 г., в котором при общем финансировании 1445 млн. долларов выделено для NASA 24 млн. долларов (т.е. ~1,7%), позволяет понять, что реальные вложения в аэрокосмическую область США значительно больше

Таблица 3.1. Основные области применения продукции нанотехнологий

Область \ Агентство	NASA	DOD	DOE	DOT	NIST	NSF	NIH
Аэрокосмическая отрасль	■	■	□	□	□	□	
Национальная безопасность	□	■	□	□	□	□	□
Энергетика	□	■	■	□	□	□	
Охрана окружающей среды		□	□		□	■	□
Информационные технологии	□	■	□		□	■	□
Медицина и здравоохранение	□	□	□		□	□	■

NASA (National Aeronautics and Space Administration) – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства

DOD (Department of Defense) – Министерство обороны

DOE (Department of Energy) – Министерство энергетики

DOT (Department of Transportation) – Министерство транспорта

NIST (National Institute of Standards and Technology) – Национальный институт стандартов и технологии

NSF (National Science Foundation) – Национальный научный фонд

NIH (National Institutes of Health) – Национальные институты здравоохранения

за счет бюджетов других ведомств: NSF ~390 млн., DOD – 375 млн., DOE – 330 млн. и др.

Страны, входящие в Европейский Союз, совместно реализуют принимаемые на период в несколько лет Рамочные программы по исследованиям и технологическому развитию. В 6-ю (2002–2006 гг.) и 7-ю (2007–2013 гг.) Рамочные программы ЕС в качестве самостоятельных разделов включены работы в области нанотехнологий. В 7-й Рамочной программе соответствующий раздел носит название «Нанонаука, нанотехнологии, материалы и новые производственные технологии».

Направление «Нанонаука и нанотехнологии» предусматривает получение новых знаний о свойствах наноструктур и наноматериалов, изучение фундаментальных принципов нанотехнологии, включая процессы самосборки и создания наномеханизмов и наносистем, разработку методов и технических средств для исследования наноразмерных объектов и манипулирования ими.

На базе результатов фундаментальных исследований предполагается создать целый ряд устройств и технологий, которые внесут существенный вклад в решение социальных проблем.

При изучении наноматериалов основное внимание направлено на высокоэффективные покрытия и материалы для создания новых продуктов и производственных процессов. В числе перспективных новых материалов указываются нанокompозиты, биоматериалы и гибридные материалы, состоящие из органических и неорганических элементов. Отмечается важность создания совершенных средств для контроля производственных процессов и исследования характеристик получаемых материалов, а также важность развития методов математического моделирования наноструктур.

Результаты исследований и разработок в области нанотехнологий должны привести к созданию новых промышленных технологий и производств для обеспечения таких областей, как строительство, транспорт, энергетика, охрана окружающей среды, информатика и связь, здравоохранение, производство продуктов питания и др.

Приоритетные направления исследований и прикладных разработок в области нанотехнологии, проводимых в нашей стране, определены в ряде экспертных документов и в утвержденных программах развития нанотехнологий. Активную роль в формировании государственной политики в развитии нанотехнологий играет Российская академия наук. В 2006 г. группой экспертов РАН, руководимой академиком М.В. Алфимовым, определены следующие приоритеты:

- ♦ углеродные наноматериалы;
- ♦ новые материалы и технологии для нанoeлектроники, оптоэлектроники и спинтроники;
- ♦ органические и гибридные наноматериалы;
- ♦ полимеры и эластомеры;
- ♦ кристаллические материалы со специальными свойствами;
- ♦ мехатроника и микросистемная техника;
- ♦ композиционные и керамические материалы;

- ♦ мембраны и каталитические системы;
- ♦ биосовместимые материалы;
- ♦ нанодиагностика и зондовые методы.

В декабре 2007 г. на общем собрании РАН был рассмотрен подготовленный Комиссией РАН по нанотехнологиям, руководимой лауреатом Нобелевской премии академиком Ж.И. Алфёровым, проект программы Фундаментальных исследований в области нанотехнологий, содержащий следующие основные разделы:

- ♦ физика наноструктур;
- ♦ нанoeлектроника;
- ♦ наноматериалы;
- ♦ нанобиотехнологии;
- ♦ нанодиагностика;
- ♦ образование.

Намеченные направления детализированы в «Программе развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года», которой предусматривается к 2011 г. формирование конкурентоспособного сектора исследований и разработок в области nanoиндустрии, а к 2015 г. – формирование условий для масштабного наращивания объема производства новых видов продукции nanoиндустрии. Одним из важнейших результатов выполнения этой программы явится создание Национальной нанотехнологической сети как совокупности предприятий различных организационно-правовых форм, обеспечивающих и осуществляющих скоординированную кооперативную деятельность по разработке и коммерциализации нанотехнологий, включая проведение фундаментальных и прикладных исследований, подготовку кадров, развитие инфраструктуры nanoиндустрии, организацию производства и непосредственное производство нанотехнологической продукции.

В Федеральной целевой программе «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии Российской Федерации на 2008–2010 годы» предусмотрены следующие тематические направления:

- ♦ nanooeлектроника;
- ♦ nanoинженерия;

Раздел 3

- ♦ функциональные наноматериалы и высокочистые вещества;
- ♦ функциональные наноматериалы для энергетики;
- ♦ функциональные наноматериалы для космической техники;
- ♦ нанобиотехнологии;
- ♦ конструкционные наноматериалы;
- ♦ композитные наноматериалы;
- ♦ нанотехнологии для систем безопасности.

Для обеспечения работ по указанным направлениям предусматривается:

- ♦ регулирование в сфере метрологии и стандартизации;
- ♦ разработка классификатора продукции наноиндустрии;
- ♦ исследования проблем безопасности при производстве и потреблении продукции наноиндустрии;
- ♦ обмен информацией между участниками Национальной нанотехнологической сети.

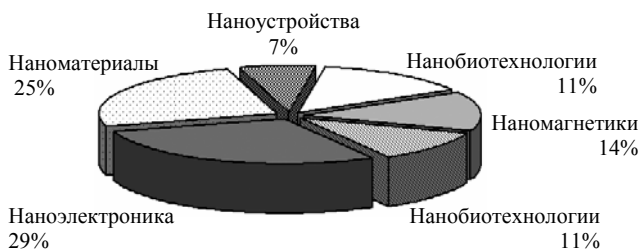


Рис. 3.2. Распределение патентов в области нанотехнологий в 2003 г.

Интегральными показателями развития крупных направлений в нанотехнологии и соотношений между ними могут служить данные о получаемых патентах (рис. 3.2) и о структуре мирового рынка продукции нанотехнологий (рис. 3.3). Согласно представленному на рис. 3.3 прогнозу, сделанному в 2002 г., общий объем рынка продукции нанотехнологий к 2015 г. достигнет 1,1 трлн. долларов. В некоторых более поздних прогнозах (2006–2008 гг.) объем мирового рынка к указанному сроку оценивается в 2–2,9 трлн. долларов.

Области применения наноматериалов

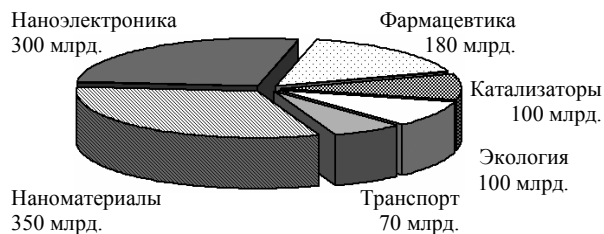


Рис. 3.3. Прогноз структуры мирового рынка нанотехнологий в 2015 г. (цифры указывают объем секторов рынка в долларах США)

Как мы видим, выборы приоритетов и прогнозы в области нанотехнологии основываются часто на различных подходах и критериях. Это представляется вполне естественным в силу сложности проблемы и зависимости конечного результата от большого числа разнородных факторов. Тем не менее совокупность приведенных сведений позволяет достаточно корректно оценить тенденции развития и соотношения между крупными областями нанотехнологии и объем нанотехнологических разработок для космической отрасли. При этом, как уже неоднократно подчеркивалось, следует учитывать широкое использование в космической отрасли новейших достижений материаловедения, электроники, биологии и медицины.

4. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

При определении требований, предъявляемых к материалам космических аппаратов (КА), необходимо учитывать особенности конструкции КА, условия их эксплуатации в космическом пространстве, зависящие прежде всего от типа орбит, планируемые сроки активного существования КА и, конечно же, возможные изменения характеристик материалов и изготовленных из них элементов оборудования под действием окружающей космической среды.

4.1. Конструкционные и функциональные материалы

По назначению все материалы принято разделять на две группы: *конструкционные* и *функциональные*.

Конструкционные материалы предназначены для изготовления элементов изделия, воспринимающих механические нагрузки. Такие элементы обеспечивают необходимую прочность изделия и сохранение его конфигурации в условиях эксплуатации и служат для установки на них других элементов и узлов, вследствие чего их часто называют несущими, или силовыми элементами

конструкции. В качестве конструкционных материалов чаще всего используются металлы, сплавы и различные композиционные материалы, которые подробнее будут описаны в разд. 5.

С помощью функциональных материалов, обладающих определенными физико-химическими свойствами, изделиям придается необходимые эксплуатационные характеристики и решаются разнообразные технические и технологические задачи. Круг функциональных материалов очень широк. К ним относят электротехнические материалы, материалы микроэлектроники и сенсорной техники, оптические материалы, компаунды и герметики, лакокрасочные материалы, специальные покрытия, наносимые на поверхность конструкционных материалов, и т.д.

Разновидностью функциональных материалов являются так называемые «интеллектуальные» материалы (*smart materials*), способные изменять свои свойства в соответствии с изменениями условий эксплуатации. Например, интеллектуальные оптические материалы могут изменять свою прозрачность в зависимости от освещенности, а электротехнические материалы – проводимость и магнитные свойства при изменении внешних электрических и магнитных полей. С помощью интеллектуальных материалов принципиально возможно создание целых интеллектуальных систем, обладающих функциями диагностики, адаптации и управления, благодаря чему может обеспечиваться сохранение или программируемое изменение характеристик изделия при изменении внешних условий.

Очевидно, что в ряде случаев одни и те же материалы могут использоваться как в качестве конструкционных, так и в качестве функциональных. Кроме того, некоторые интеллектуальные материалы в определенных приложениях следует, по-видимому, рассматривать как конструкционные. Примером может служить применение сплавов с эффектом памяти формы для развертывания антенн КА.

Наноматериалы, благодаря их уникальным свойствам и многообразию, безусловно, найдут применение во всех указанных сферах.

4.2. Конструкции космических аппаратов

В составе конструкции КА принято выделять ряд основных элементов, аппаратурных комплексов и систем, способ компоновки которых определяет облик КА и в значительной степени – его габаритно-весовые характеристики.

На протяжении длительного времени, начиная с разработки первых КА, использовалась главным образом *моноблочная* конструктивно-компоновочная схема, предусматривающая наличие у КА прочного герметичного корпуса, который выполняет роль несущей (силовой) конструкции. Внутри корпуса устанавливается большая часть аппаратуры, а на его внешней поверхности размещаются солнечные батареи, антенны, различные датчики и т.п. На рис. 4.1 показан выполненный по такой схеме КА «Горизонт»,



Рис. 4.1. Конструкция геостационарного КА «Горизонт»

максимальные габаритные размеры которого составляют около 10 м, а масса ~2 000 кг. Этот аппарат, созданный для ретрансляции телевизионных программ и обеспечения радиосвязи, имеет несколько антенн и солнечные батареи большой площади с системой их ориентации на Солнце. Недостатком моноблочной схемы явля-

ется большая масса конструкции и необходимость герметизации внутренних отсеков с поддержанием в них требуемых параметров атмосферы.

В последние годы все шире используется *свободнонесущая* компоновка КА, при которой силовой конструкцией является жесткая рама (ферма), служащая для закрепления на ней блоков аппаратуры, агрегатов и систем КА. Применение такой схемы

позволяет снизить массу КА и его стоимость, однако в этом случае из-за отсутствия защитного герметичного корпуса материалы и элементы оборудования КА должны обладать более высокой стойкостью к воздействию космической среды. Тем не менее построение негерметизированных КА по свободнонесущей схеме является перспективным и экономически оправданным.

Каждый конкретный КА создается для решения определенных задач с помощью устанавливаемой на нем *целевой аппаратуры*, которую называют также целевой (полезной) нагрузкой. В состав целевой аппаратуры научных КА, предназначенных для исследования космического пространства, входят приборы, регистрирующие различные компоненты космического корпускулярного и электромагнитного излучения, метеорные частицы, потоки плазмы и т.д. Аппараты прикладного назначения, используемые для метеорологических наблюдений, изучения природных ресурсов, обеспечения радиосвязи и телевизионного вещания, решения геодезических, навигационных и многих других задач, имеют в составе целевой аппаратуры оптические и радиолокационные средства наблюдения, необходимые радиотехнические комплексы, средства записи и предварительной обработки информации.

Функционирование КА обеспечивается с помощью ряда *служебных систем*, главными из которых являются системы энергоснабжения, терморегулирования, ориентации и стабилизации, радиотелеметрии, а для пилотируемых КА к этому перечню добавляется чрезвычайно важная система обеспечения жизнедеятельности космонавтов.

В широком смысле почти все КА работают в тех или иных информационных системах. С их помощью собирается обширная информация (о состоянии космической среды, метеорологической обстановке, характеристиках земной поверхности и т.д.), либо передаются большие массивы данных. В подтверждение этого можно привести сведения о соотношении секторов мирового рынка космических услуг по состоянию на 2002 г. (рис. 4.2).

В связи с начавшимся в 1990-х гг. быстрым ростом объемов информации, используемой в различных сферах человеческой

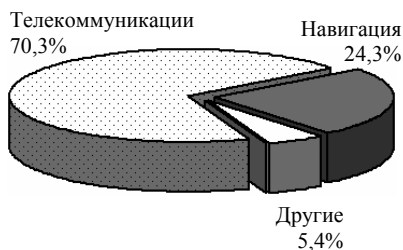


Рис. 4.2. Структура рынка космических услуг в 2002 г.

деятельности, появилась новая концепция создания спутниковых систем. Согласно этой концепции, для охвата одновременными наблюдениями обширных областей космического пространства и практически всей земной поверхности предполагается создавать многоспутниковые

«кластерные» системы («созвездия» спутников), в которых десятки аппаратов, находящихся на разных орбитах, будут работать по согласованным программам и обмениваться информацией не только с наземными пунктами слежения, но и между собой. Необходимость создания таких систем продиктована современными требованиями к спутниковым измерениям, для обозначения которых в научно-технической литературе даже появился специальный термин – «ГНОТ-факторы» (глобальность, непрерывность, оперативность, тотальность).

Кластерные системы должны состоять из малогабаритных легких КА, которые, тем не менее, обладают высокими функциональными возможностями, приближающимися к возможностям современных тяжелых КА. Совершенно очевидно, что успех создания подобных КА всецело определяется уровнем используемых технологий, наличием в распоряжении конструкторов новых материалов с требуемыми эксплуатационными характеристиками и степенью миниатюризации элементной базы, применяемой в бортовой аппаратуре. Поэтому реализация и дальнейшее развитие обсуждаемой концепции тесно связаны с прогрессом в области нанотехнологий.

В настоящее время работы по созданию малых КА, удовлетворяющих указанным требованиям, уже широко ведутся. Предложена классификация таких КА по их массе, представленная на рис. 4.3. Правда, в данном случае понятия «микро», «нано» и

«пико» используются чисто условно, они не связаны с абсолютной величиной массы и не отражают соотношений масс КА, отнесенных к разным группам.

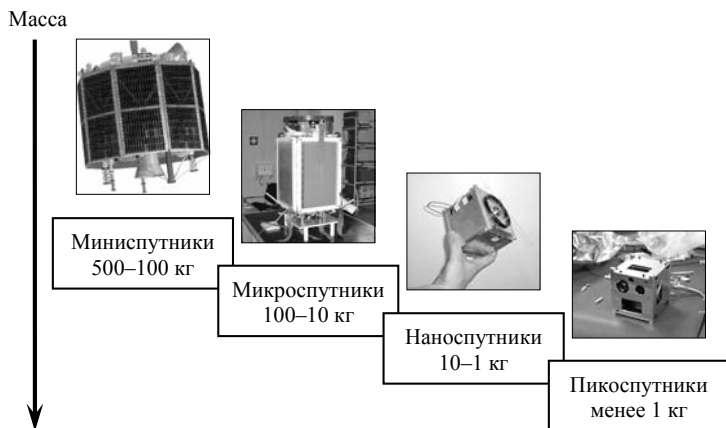


Рис. 4.3. Классификация малых спутников по массе

Сравнительная простота конструкции, невысокая стоимость и достаточно короткие сроки создания малых КА (1–2 года) сделали их доступными для разработки образовательными учреждениями и использования в учебных целях. К отмечавшемуся в январе 2005 г. 250-летию юбилею Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова был запущен созданный сотрудниками НИИЯФ и других подразделений МГУ с активным участием студентов и аспирантов научно-учебный спутник «Университетский–Татьяна», успешно проработавший на круговой орбите с высотой около 1000 км более 2 лет. Масса этого спутника составила 31,6 кг, поэтому согласно представленной классификации он относится к микроспутникам, и его изображение приведено на рис. 4.3 в качестве примера конструкции КА данной группы.

Следует отметить, что малые КА неоднократно создавались и в прошлом. Первый советский искусственный спутник Земли, запуск которого 4 октября 1957 г. ознаменовал начало космиче-

ской эры, имел массу 83,6 кг, т.е. он по современной классификации являлся микроспутником. Масса первого американского спутника *Explorer-1*, запущенного 1 февраля 1958 г., составляла 8,3 кг, а следующего американского спутника *Vanguard-1* (17 марта 1958 г.) – всего лишь 1,5 кг. Таким образом, оба эти аппарата попадают в группу наноспутников. Но в те годы подобной классификации не существовало, а ограничения массы и габаритов спутников были обусловлены трудностями создания и вывода на орбиты тяжелых крупногабаритных аппаратов. Однако достаточно быстро эти трудности были преодолены, и масса КА стала стремительно расти. Так, уже в середине 1960-х гг. в нашей стране было запущено четыре исследовательских КА «Протон», масса которых составляла от 12,2 до 17 тонн. С помощью этих КА, большая часть научной аппаратуры которых была создана в НИИЯФ МГУ, выполнены уникальные эксперименты по изучению галактических космических лучей, о природе и составе которых будет рассказано ниже.

Возвращаясь к малым КА, можно констатировать, что сейчас они кардинально отличаются от упоминавшихся КА начала космической эры. Если основной полезной нагрузкой первых спутников были радиопередатчики и в очень небольшом количестве – научные приборы, то современное поколение малых КА обладает, как уже указывалось, весьма широкими функциональными возможностями. К тому же, сейчас в значительной степени решены проблемы с запуском малых КА. Они могут выводиться на орбиту в качестве попутной нагрузки или с помощью легких ракет, причем одновременно может запускаться несколько КА, что важно при создании кластерных систем.

Продвижение концепции создания многоспутниковых систем, состоящих из малых КА, не означает отрицания тяжелых КА предыдущих поколений и вновь разрабатываемых КА этого класса. Такие КА будут продолжать работать в течение длительного времени, срок их активного существования по современным требованиям должен составлять 12–15 лет. Кроме того, решение многих задач, к которым относятся прежде всего осуществление

пилотируемых полетов, включая межпланетные полеты, создание энергетических и производственных комплексов на околоземных орбитах, космических обсерваторий и т.п., возможно только с помощью тяжелых КА. Таким образом, развитие космонавтики будет идти по пути гармоничного сочетания применения крупногабаритных тяжелых КА с созданием систем малых КА, при этом нанотехнологии будут играть значительную роль в совершенствовании КА обеих групп.

4.3. Орбиты космических аппаратов

Орбиты КА, используемых для решения тех или иных научных или прикладных задач, имеют различные высоты и наклонения относительно экваториальной плоскости (табл. 4.1). Полеты пилотируемых КА, в частности Международной космической станции (МКС), проходят на высотах около 350–400 км при сравнительно малом наклонении орбит. Одним из важных критериев при выборе орбит пилотируемых КА является требование минимизации радиационных воздействий на экипажи, о чем подробнее будет сказано ниже.

Таблица 4.1. Примеры характерных орбит с различными параметрами

Орбита	Высота, км	Наклонение, град.
Орбита МКС	350–400	51,6
Солнечно-синхронная орбита	800–1000	98–100
Геостационарная орбита	35 790	0
Орбита спутников системы ГЛОНАСС	19 100	64,8
Высокоэллиптическая орбита спутника типа «Молния»	500/39 660	65

Солнечно-синхронная орбита обеспечивает в каждый момент времени одинаковые условия освещения участков земной

поверхности, наблюдаемых приборами КА, что делает ее очень удобной для проведения фотосъемки с целью изучения состояния почв, лесов и водных объектов.

Геостационарная орбита замечательна тем, что выведенный на нее КА имеет одинаковую угловую скорость с расположенной под ним точкой земной поверхности и, следовательно, он постоянно находится над этой точкой (отсюда название орбиты), создавая тем самым очень удобные условия для ретрансляции через него радиосигналов. Поэтому геостационарные КА, к числу которых относится обсуждавшийся выше КА «Горизонт», работают преимущественно в космических системах радиосвязи и телевизионного вещания, хотя некоторые из них используются для решения геофизических и метеорологических задач.

Орбита глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, в составе которой должны работать 24 КА, выбрана из соображений обеспечения высокой точности измерения координат объектов на земной поверхности и в околоземном пространстве.

На базе спутников «Молния» с высокоэллиптической орбитой была создана в конце 1960-х гг. первая в нашей стране космическая система связи. Ее недостатком по сравнению с системами, базирующимися на геостационарных КА, является необходимость непрерывного изменения ориентации наземных антенн в соответствии с перемещением спутника по высокоэллиптической орбите.

Для некоторых научных КА выбираются эллиптические орбиты со значительно *большой* высотой апогея. Так, апогей орбиты астрофизической обсерватории «Спектр-Р», разработанной российскими специалистами в рамках международного проекта «Радио-Астрон», лежит на высоте около 330 000 км, а перигей – на высоте 600 км.

Особую категорию составляют траектории полета межпланетных КА, параметры которых определяются задачами выполняемых исследований.

На основании параметров орбит анализируются условия эксплуатации КА и оцениваются возможные воздействия космической среды на материалы и элементы оборудования, о чем рассказывается ниже.

4.4. Условия эксплуатации космических аппаратов

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы КА играет стойкость их материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. Согласно существующим экспертным оценкам, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры КА обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства (ФКП).

На КА в полете воздействует обширный комплекс ФКП: потоки электронов и ионов высокой энергии, холодная и горячая космическая плазма, солнечное электромагнитное излучение, метеорная материя, твердые частицы искусственного происхождения (так называемый «космический мусор») и другие факторы. В результате этого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем.

Для выполнения прогностических оценок прежде всего необходимо располагать данными о характеристиках космической среды на орбите функционирования КА. Абсолютное большинство КА научного и прикладного назначения функционирует в *околоземном космическом пространстве* (ОКП). Поэтому далее мы будем рассматривать преимущественно физические характеристики космической среды в ОКП.

Физические условия в околоземном космическом пространстве

Строго говоря, *околоземным пространством* называется пространство, ограниченное сферой, радиус которой равен среднему расстоянию от Земли до Луны (380 тыс. км). Но часто с этим понятием отождествляют пространство внутри *магнитосферы* Земли – области локализации геомагнитного поля, поскольку физические условия в магнитосфере значительно отличаются от условий за ее пределами. Поперечные размеры магнитосферы в меридиональной плоскости составляют 200–250 тыс. км, а в направлении на Солнце – около 60 тыс. км.

Вакуумные условия в ОКП

Характеризуя космическую среду, прежде всего следует указать на ее крайнюю разреженность. Воздействие всех внешних факторов на КА происходит в вакууме. Кроме того, вакуум космического пространства сам является фактором, оказывающим существенное влияние на материалы и оборудование КА. В окрестности Земли вакуумные условия определяются параметрами верхней атмосферы. В табл. 4.2 приведены средние значения давления, плотности, температуры и концентрации газовых частиц в атмосфере Земли, начиная с высоты 200 км, которая обычно принимается за нижнюю границу орбитальных полетов, до 10 000 км. Значения параметров верхней атмосферы, представленные в табл. 4.2, являются результатом усреднения с учетом времени суток, гелиогеофизических условий и координат точки наблюдения, их можно использовать для ориентировочных оценок вакуумных условий на разных высотах. Более точные оценки производятся с помощью существующих эмпирических и теоретических моделей верхней атмосферы Земли, которые позволяют рассчитывать высотные распределения ее параметров для различных уровней солнечной и геомагнитной активности.

Таблица 4.2. Усредненные значения параметров атмосферы Земли в диапазоне высот 200–10 000 км

Высота, км	Давление, Па	Плотность, кг·м ⁻³	Температура, К	Концентрация частиц, м ⁻³
200	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	1290	$1,0 \cdot 10^{16}$
300	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$	1650	$1,5 \cdot 10^{15}$
400	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	1730	$4,0 \cdot 10^{14}$
500	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	1750	$1,3 \cdot 10^{14}$
600	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	1760	$4,9 \cdot 10^{13}$
800	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	1770	$8,6 \cdot 10^{12}$
1000	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-14}$	1770	$2,0 \cdot 10^{12}$
1500	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	1770	$2,3 \cdot 10^{11}$
2000	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-16}$	1770	$8,9 \cdot 10^{10}$
3000	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-16}$	1900	$1,9 \cdot 10^{10}$
5000	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$4,5 \cdot 10^{-17}$	3000	$4,6 \cdot 10^9$
10000	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-17}$	15000	$1,0 \cdot 10^9$

До высоты ~100 км состав атмосферы мало меняется. Выше этого уровня существенным становится процесс диссоциации молекул кислорода, вследствие чего в интервале высот ~200–700 км атомарный кислород является основной атмосферной составляющей. Выше 1000 км в составе атмосферы начинает преобладать гелий, а на высотах в несколько тысяч километров атмосфера состоит преимущественно из атомов водорода, причем выше 20 000 км она практически полностью ионизована. Вопрос о газовом составе верхней атмосферы Земли является важным для нашего рассмотрения, так как на низких околоземных орбитах одним из наиболее значимых механизмов повреждения материалов, находящихся на поверхности КА, является их эрозия под действием химически активного атомарного кислорода.

Реально давление в непосредственной близости от КА может значительно (иногда на несколько порядков) превышать давление в окружающем космическом пространстве за счет формирования

вокруг аппарата газовой оболочки, которую называют *собственной внешней атмосферой* (СВА) КА. Образование СВА обусловлено процессами газовой выделением с поверхности и из объема материалов, утечками газов из внутренних отсеков КА, работой ракетных двигателей разных типов и действием некоторых других источников. В состав СВА входят также твердые частицы, отделяющиеся от поверхности КА и выбрасываемые ракетными двигателями. СВА из-за ее высокой плотности и сильно отличающегося от естественной космической среды химического состава обычно рассматривается как самостоятельный фактор, воздействующий на КА.

Холодная плазма в ОКП и плазма солнечного ветра

Холодной плазмой в магнитосфере Земли называется плазма со средней кинетической энергией частиц менее 10 эВ. Такая плазма присутствует в *ионосфере* Земли, которая определяется как область атмосферы на высотах 30–1000 км, содержащая частично ионизованную холодную плазму. Указанная верхняя граница ионосферы введена условно, поскольку вблизи нее параметры ионосферной плазмы не претерпевают каких-либо резких изменений, и ионосфера плавно переходит в *плазмосферу*.

Температура ионосферной плазмы составляет около 10^3 К (этой температуре соответствует энергия теплового движения частиц $\sim 0,1$ эВ), а концентрация электронов и ионов меняется в диапазоне $\sim 10^6$ – 10^{12} м⁻³. В плазмосфере происходит постепенное уменьшение концентрации частиц и увеличение температуры плазмы до 10^4 К (~ 1 эВ). Верхняя граница плазмосферы – *плазмопауза* – находится на геоцентрическом расстоянии $L \sim 4$, которое отсчитывается от центра Земли и измеряется в ее радиусах.

За пределами магнитосферы Земли на КА воздействует *солнечный ветер* – поток плазмы, непрерывно вытекающий в межпланетное пространство из внешней полностью ионизованной газовой оболочки Солнца – *короны* – и состоящий преимущественно из электронов и протонов.

Не останавливаясь на рассмотрении процессов взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем и той важнейшей роли, которую он играет в формировании магнитосферы Земли, поддержании баланса заряженных частиц внутри магнитосферы и солнечно-земных связях, отметим, что в воздействии солнечного ветра на материалы КА главную роль играет ионная составляющая плазмы солнечного ветра, вызывающая распыление материалов и другие эффекты.

Температура плазмы солнечного ветра близка к 10^5 К, но кинетическая энергия протонов солнечного ветра (~ 1 кэВ), определяемая скоростью направленного движения плазмы в окрестности Земли (~ 500 км·с⁻¹), значительно превышает их тепловую энергию, что важно при анализе воздействия солнечного ветра на КА. Средняя концентрация электронов и протонов в плазме солнечного ветра составляет $\sim 7 \cdot 10^6$ м⁻³. Это обеспечивает за счет скорости направленного движения плазмы плотность потока частиц $\sim 3,5 \cdot 10^{12}$ м⁻²·с⁻¹. Отметим, что для ряда материалов коэффициент распыления под действием протонов максимален как раз при энергии протонов $\sim 10^3$ эВ, характерной для солнечного ветра. Указанные параметры солнечного ветра изменяются в зависимости от уровня гелиогеофизической активности, во время сильных возмущений его скорость может возрастать до ~ 1000 км·с⁻¹.

Горячая магнитосферная плазма и авроральная радиация

Горячей плазмой в магнитосфере Земли называется плазма со средней кинетической энергией частиц более 100 эВ. Воздействию такой плазмы подвергаются главным образом КА, функционирующие на высоких орбитах, например, на геостационарной орбите и орбитах КА ГЛОНАСС и «Молния» (см. табл. 4.1). В высокоширотных областях горячая плазма (*авроральная радиация*) может присутствовать на низких орбитах, в частности, на солнечно-синхронных орбитах. Однако в этом случае зоны выпадения авроральных электронов и протонов часто разнесены в

пространстве, поэтому их потоки можно рассматривать отдельно. Характерные энергии частиц горячей магнитосферной плазмы лежат в диапазоне 1–100 кэВ, а значения концентрации частиц составляют 10^5 – 10^7 м⁻³.

Наиболее опасным следствием взаимодействия КА с магнитосферной плазмой является *электризация* аппарата – накопление на его поверхности электрического заряда и, соответственно, возникновение потенциала относительно невозмущенной плазмы. Поскольку величина потенциала пропорциональна температуре окружающей плазмы, это явление рассматривается чаще всего применительно к условиям полета КА в горячей плазме, в частности, на геостационарной орбите.

Заряженные частицы высокой энергии в космическом пространстве

В данном рассмотрении под частицами высокой энергии будем понимать электроны и ионы с энергией выше $\sim 10^6$ эВ, способные проникать в материалы КА на глубину более нескольких десятков микрометров, вызывая в объеме вещества ионизацию атомов, формирование локальных электрических зарядов, образование дефектов, ядерные превращения и другие процессы.

Вне магнитосферы Земли главными факторами, оказывающими радиационное воздействие на КА, являются *галактические космические лучи* (ГКЛ) и *солнечные космические лучи* (СКЛ). ГКЛ – это изотропный поток протонов и более тяжелых ядер, приходящий из удаленных областей нашей Галактики или из-за ее пределов. Энергия частиц ГКЛ заключена в диапазоне 10^8 – 10^{20} эВ. Под СКЛ принято понимать потоки заряженных частиц (в основном протонов) с энергиями $\sim 10^6$ – 10^{10} эВ, которые испускаются Солнцем во время интенсивных вспышек. В некоторых случаях при анализе радиационных воздействий на приповерхностные слои материалов внешней оболочки КА, функционирующих вне магнитосферы, следует учитывать также воздействие потока плазмы солнечного ветра.

Проникновение частиц ГКЛ и СКЛ внутрь магнитосферы ограничивается экранирующим действием геомагнитного поля. Тем не менее эти частицы могут вносить заметный вклад в суммарное радиационное воздействие на КА внутри магнитосферы, особенно в полярных областях. Кроме того, в результате взаимодействия ГКЛ и СКЛ с атомами верхней атмосферы образуется *вторичная радиация (альbedo)*, в составе которой в значительном количестве присутствуют нейтроны. Это дополнительное излучение следует учитывать при оценке радиационных условий на низких околоземных орбитах (ниже 1000 км).

Внутри магнитосферы основным фактором, оказывающим радиационное воздействие на КА, являются частицы *радиационных поясов Земли* (РПЗ) – захваченные геомагнитным полем электроны, протоны и более тяжелые ионы, первичными источниками которых являются плазма солнечного ветра, ионизованные частицы верхней атмосферы (ионосферы) и упоминавшиеся частицы альbedo. Характерные значения энергии электронов и протонов РПЗ лежат в диапазоне $\sim 10^5$ – 10^8 эВ. С момента открытия РПЗ их принято разделять на внутренний, центр которого в экваториальной плоскости находится на высоте около 3 000 км, и внешний с центром на высоте 15–20 тыс. км. В настоящее время такое разделение часто не производится, а для обозначения РПЗ используется также термин *область захваченной радиации*. В тонких приповерхностных слоях материалов и покрытий, находящихся на внешней оболочке КА, дополни-

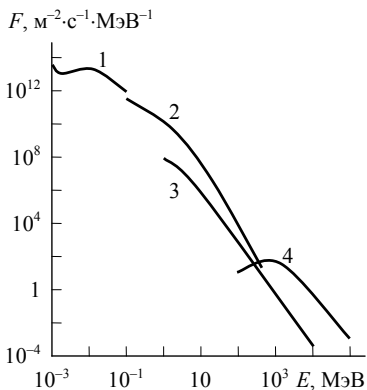


Рис. 4.4. Обобщенный энергетический спектр протонов космического излучения: 1 – горячая магнитосферная плазма; 2 – РПЗ; 3 – СКЛ; 4 – ГКЛ

Раздел 4

тельная поглощенная доза может создаваться за счет воздействия горячей магнитосферной плазмы.

Усредненные параметры частиц ГКЛ, СКЛ, РПЗ и горячей плазмы приведены в табл. 4.3, а на рис. 4.4 показан обобщенный энергетический спектр протонов указанных составляющих космического корпускулярного излучения.

Таблица 4.3. Усредненные параметры потоков частиц ГКЛ, СКЛ, РПЗ и горячей магнитосферной плазмы

Вид корпускулярного излучения	Состав излучения	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Галактические космические лучи	протоны ядра гелия более тяжелые ядра	10^2 – 10^{15} (для всех групп ядер)	$1,5 \cdot 10^4$ $1,0 \cdot 10^3$ $1,2 \cdot 10^1$
Солнечные космические лучи	протоны	1 – 10^4	10^7 – 10^8
Радиационные пояса Земли	протоны	1 – 30 > 30	$3 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^8$
	электроны	$0,1$ – $1,0$ $> 1,0$	$1 \cdot 10^{12}$ $1 \cdot 10^{10}$
Горячая магнитосферная плазма	протоны	10^{-3} – 10^{-1}	10^{11} – 10^{14}
	электроны		

Приведенные значения энергии и плотности потока частиц позволяют произвести лишь ориентировочную оценку возможных радиационных воздействий на КА. Для достаточно точных расчетов, которые реально необходимы при анализе радиационных эффектов в материалах и элементах оборудования КА, следует использовать модели, описывающие пространственно-временные вариации параметров космической радиации, обусловленные изменениями солнечной активности и связанными с ними изменениями межпланетной среды и геомагнитного поля.

Солнечное электромагнитное излучение

Плотность потока энергии солнечного излучения составляет $1,4 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (эта величина называется *солнечной постоянной*). Около 9% энергии в солнечном спектре приходится на ультрафиолетовое (УФ) излучение с длинами волн от 10 до 400 нм. Остальная энергия разделена приблизительно поровну между видимой (400–760 нм) и инфракрасной (760–5 000 нм) областями спектра. Плотность потока излучения Солнца в рентгеновской области (0,1–10 нм) весьма мала ($\sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и сильно меняется с изменением уровня солнечной активности.

В видимой и инфракрасной областях спектр электромагнитного излучения Солнца близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 6 000 К. Эта температура соответствует температуре видимой поверхности Солнца – фотосферы. В УФ- и рентгеновской областях спектр солнечного излучения описывается другими закономерностями, поскольку излучение этих областей исходит из хромосферы ($T \sim 10^4 \text{ К}$), расположенной над фотосферой, и короны ($T \sim 10^6 \text{ К}$) – внешней оболочки Солнца. В коротковолновой части солнечного спектра на непрерывный спектр наложен целый ряд отдельных линий.

С точки зрения повреждающего воздействия солнечного излучения на материалы особый интерес представляет УФ-излучение с длинами волн короче 200 нм – *вакуумное ультрафиолетовое излучение*, энергия квантов которого (более 6 эВ) достаточна для разрыва молекулярных связей в материалах.

Метеорная материя и космический мусор

К метеорным телам (их называют также *метеороидами*) относят движущиеся в Солнечной системе тела с поперечными размерами от нескольких десятков метров до долей микрометра. Скорости метеорных тел относительно Земли лежат в интервале $\sim 10\text{--}70 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от направления прихода. При определении скорости столкновения КА с метеорным телом необхо-

димо принимать во внимание также собственную орбитальную скорость КА ($\sim 8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) и угол между векторами скорости сталкивающихся объектов. С учетом распределения метеорных тел по скоростям и данных об их пространственном распределении в ОКП рекомендовано использовать при оценке опасности столкновения КА с метеорными телами среднее значение относительной скорости $20 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. При входе в атмосферу Земли большая часть метеорных тел сгорает в интервале высот $\sim 60\text{--}110 \text{ км}$.

Помимо метеорных тел в ОКП присутствуют объекты искусственного происхождения, не выполняющие полезных функций, которые, как уже указывалось, называют *космическим мусором* (*space debris*). В состав космического мусора входят прекратившие работу КА, остающиеся на орбитах последние ступени ракет-носителей, монтажные элементы, сбрасываемые защитные крышки и т. п., а также фрагменты разрушившихся изделий и образующиеся при разрушении и эксплуатации КА мелкие частицы. Поскольку на околоземных орбитах все искусственные объекты движутся с близкими скоростями ($\sim 8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$), скорости столкновения объектов могут лежать в диапазоне $\sim 0,1\text{--}16 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от взаимной ориентации их орбит. Для моделирования и оценки опасности столкновений КА с телами, входящими в состав космического мусора, рекомендовано использовать значение средней относительной скорости $10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

С точки зрения воздействия на КА все космические тела естественного и искусственного происхождения можно разделить на две группы: способные вызвать катастрофическое разрушение КА, например, его разгерметизацию, и создающие локальные повреждения поверхности. К первой группе относят тела с поперечными размерами свыше $0,5\text{--}1 \text{ см}$, а ко второй – более мелкие.

Частицы диаметром меньше 1 мм , которые принято называть *микрочастицами*, рассматриваются как регулярный фактор, характеризующий плотностью их потока (для самых мелких частиц она может достигать $10^3\text{--}10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), а опасность для КА крупных частиц оценивается на основании вычисления вероятности столкновения с ними.

Условия полетов на Луну и к планетам Солнечной системы

В настоящее время большое внимание уделяется изучению особенностей воздействия космической среды на материалы, оборудование и экипажи КА при осуществлении крупнейших космических проектов первой половины XXI века, в число которых входят строительство обитаемых баз на Луне, пилотируемый полет на Марс и полет автоматических КА к Юпитеру с посадкой на некоторые его спутники. Во всех трех случаях большую опасность представляют радиационные воздействия.

Согласно программам, объявленным рядом космических держав, создание долговременных обитаемых баз на Луне планируется в 2025–2030 гг.

Луна, в отличие от Земли, практически лишена атмосферы и магнитного поля, вследствие чего ее поверхность подвергается воздействию неослабленных потоков ГКЛ и СКЛ. Для их описания применимы те же модели, с помощью которых обычно описываются характеристики этих излучений за пределами магнитосферы Земли. Однако в результате воздействия первичных частиц ГКЛ и СКЛ на лунный грунт – *реголит* – образуется значительное количество нейтронов, которые могут давать заметный дополнительный вклад в величину поглощенной дозы вблизи лунной поверхности.

На рис. 4.5а показан энергетический спектр нейтронов, образующихся при бомбардировке лунного грунта первичными частицами ГКЛ и СКЛ, а на рис. 4.5б представлены результаты расчета зависимости поглощенной дозы от толщины защиты, в качестве материала которой рассматривается реголит. Видно, что вторичные нейтроны дают существенный вклад в величину поглощенной дозы. Здесь приведена эквивалентная доза, которая определяется с учетом биологических эффектов, вызываемых воздействием ионизирующих излучений, и измеряется в зивертах (Зв). Величина эквивалентной дозы получается

Раздел 4

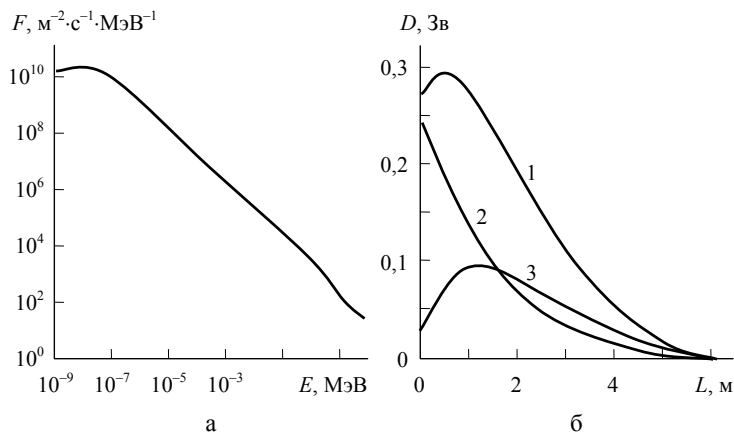


Рис. 4.5 а – энергетический спектр нейтронов, образующихся при бомбардировке реголита частицами ГКЛ и СКЛ; б – зависимость эквивалентной дозы D от толщины защитного слоя реголита: 1 – суммарная доза; 2 – от частиц ГКЛ и СКЛ; 3 – от вторичных нейтронов

умножением поглощенной дозы, измеренной в греях (1 Гр = 1 Дж·кг⁻¹), на коэффициент качества излучения, который

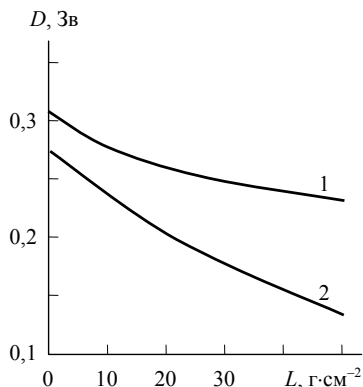


Рис. 4.6. Зависимость эквивалентной дозы от толщины стенок КА на поверхности Марса: 1 – годовая доза от ГКЛ; 2 – доза от солнечной вспышки

зависит от вида излучения и в некоторой степени – от энергии частиц, входящих в его состав. Например, для электронов коэффициент качества равен 1, а для протонов с энергией меньше 10 МэВ – 10. Для космического излучения, имеющего сложный состав и широкие энергетические спектры различных компонентов излучения, среднее значение коэффициента качества для условий полета на низких околоземных орбитах составляет 2–3.

При осуществлении пилотируемого полета на Марс наибольшую радиационную опасность для оборудования и экипажей создают потоки частиц ГКЛ и СКЛ. На рис. 4.6 показаны зависимости эквивалентной дозы внутри КА на поверхности Марса от толщины стенок аппарата (Al), рассчитанные для ГКЛ и СКЛ с учетом дополнительной защиты, которая создается марсианской атмосферой – $16 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ (CO_2). При оценке радиационных условий на поверхности Марса также принимаются во внимание вторичные нейтроны, возникающие в марсианском грунте.

Следует отметить, что проблема дополнительного радиационного воздействия, обусловленного вторичными нейтронами, существует и для тяжелых КА, таких, например, как МКС, функционирующих на низких околоземных орбитах.

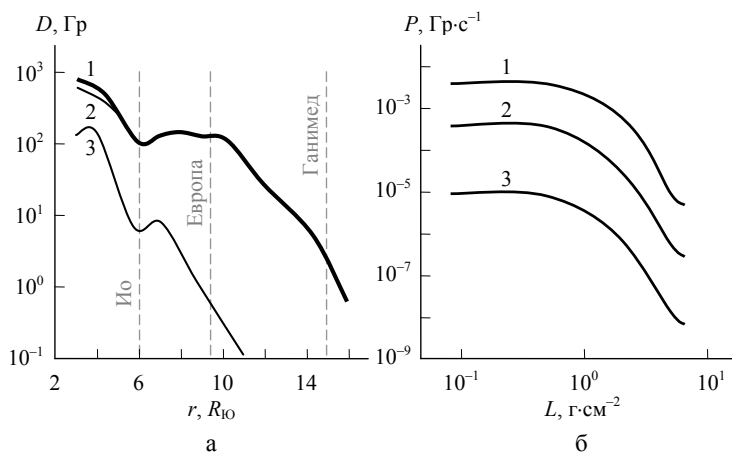


Рис. 4.7. а – величина поглощенной дозы за защитным экраном толщиной 8 мм (Al) в магнитосфере Юпитера на разных расстояниях от него: 1 – суммарная доза; 2 – от электронов; 3 – от протонов; б – зависимость мощности поглощенной дозы от толщины защитного экрана (Al) для орбит трех спутников Юпитера: 1 – Европа; 2 – Ганимед; 3 – Каллисто

Юпитер обладает значительно более мощными и протяженными радиационными поясами по сравнению с Землей. На рис. 4.7а приведены значения поглощенной дозы, создаваемой за защит-

ным экраном толщиной 8 мм (Al) частицами радиационных поясов Юпитера на разном расстоянии от него, которое выражено в радиусах планеты ($R_{\text{Ю}} = 71,5$ тыс. км), там же указаны положения орбит трех спутников Юпитера: Ио, Европы и Ганимеда, исследованию которых отводится значительное место в программе планируемого на период 2015–2030 гг. полета нескольких КА к Юпитеру. Рис. 4.76 показывает зависимость мощности поглощенной дозы от толщины защитной оболочки КА для орбит Европы и Ганимеда, а также еще одного спутника – Каллисто, удаленного от Юпитера на расстояние $\sim 26,8 R_{\text{Ю}}$.

Поскольку Луна, как уже указывалось, не имеет атмосферы, ее поверхность подвергается непосредственному воздействию метеороидов. Распределение метеороидов по скоростям и массам в окрестности Луны в целом подобно аналогичным распределениям, используемым для оценки опасности столкновений с метеороидами КА, функционирующих на околоземных орбитах. Удары метеороидов о лунную поверхность создают вторичные частицы, разлетающиеся из области удара по баллистическим траекториям со скоростями $0,1\text{--}1 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. Такие частицы следует рассматривать как дополнительный фактор, существующий в окрестности Луны.

Кроме того, весьма специфическим фактором является находящаяся на лунной поверхности пыль, частицы которой диаметром $\sim 0,1\text{--}100$ мкм, как было показано экспериментально и теоретически, могут подниматься на достаточно большие высоты над поверхностью, создавая низкоскоростные ($v < 0,1 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$) пылевые потоки. Причиной формирования таких потоков является электризация поверхности Луны под действием плазмы солнечного ветра и солнечного электромагнитного излучения, физические механизмы которой в целом подобны механизмам упоминавшейся выше электризации КА. Освещенная поверхность Луны приобретает положительный потенциал порядка 5–100 В, а неосвещенная заряжается до отрицательного потенциала $\sim 50\text{--}200$ В.

В результате электризации в окрестности Луны образуется электрическое поле сложной конфигурации, имеющее ярко вы-

раженные вертикальные составляющие над освещенной и неосвещенной частями поверхности, а в области терминатора (границы «свет–тень») – сильную горизонтальную составляющую.

Частицы лунной пыли, находящиеся на поверхности, приобретают электрический заряд того же знака, что и поверхность в целом, вследствие чего под действием вертикальной составляющей электрического поля они поднимаются над поверхностью, а в области терминатора образуют интенсивные горизонтальные пылевые потоки.

Отметим, что низкоскоростные пылевые потоки наблюдаются и на Марсе. Однако там они формируются за счет ветровых движений в марсианской атмосфере, вызывающих *пылевые бури*, во время которых с поверхности Марса поднимаются и переносятся частицы грунта размером 1–10 мкм. Скорость частиц достигает $100\text{--}150\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а плотность потока переносимой массы вещества – $10^{-5}\text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

4.5. Воздействие космической среды на материалы и элементы оборудования космических аппаратов

В табл. 4.4 представлены сведения о наиболее важных эффектах, возникающих при воздействии космической среды на КА, вместе с данными, характеризующими ФКП, которые были рассмотрены в предыдущем разделе. В левом столбце таблицы даны названия воздействующих факторов и их основные параметры. В среднем столбце указаны области локализации этих факторов в космическом пространстве или их происхождение, а в правом – возникающие эффекты.

В нижней части таблицы выделены *вторичные (индуцированные) факторы*. Особенность факторов этой группы заключается в том, что они возникают в результате воздействия первичных ФКП на КА, но каждый из них имеет собственные характеристики и физические механизмы воздействия на материалы.

Раздел 4

Таблица 4.4. Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты

Факторы космического пространства	Области локализации и происхождения	Вызываемые эффекты
Поток нейтральных атомов (О): $F \sim 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ Вакуум $P \sim 10^{-4} - 10^{-11} \text{ Па}$	Верхняя атмосфера Земли, межпланетное пространство	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Сублимация материалов. ♦ Эрозия и потеря массы полимерных материалов
Электромагнитное солнечное излучение: $F = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Межпланетное и околоземное пространство	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Усиление потерь массы. ♦ Изменение механических, оптических и электрофизических свойств материалов. ♦ Фотоэлектронная эмиссия. ♦ Нагрев, термоциклирование
Холодная плазма: $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ К}$ $n \sim 10^6 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$	Ионосфера и плазмосфера Земли	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Заряжение материалов: $\varphi \sim 0,1 - 10 \text{ В}$. ♦ Токи утечки. ♦ Свечение в окрестности КА
Плазма межпланетного пространства: $T \sim 10^5 \text{ К}$, $n \sim 10^7 \text{ м}^{-3}$ $v \sim 5 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	Солнечный ветер	<ul style="list-style-type: none"> ♦ То же, что холодная плазма, а также радиационное воздействие на приповерхностные слои материалов
Горячая магнитосферная плазма: $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ эВ}$ $n \sim 10^6 \text{ м}^{-3}$	Магнитосфера Земли: область ГСО, плазменный слой, авроральные области	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Заряжение материалов: $\varphi \sim 1 - 30 \text{ кВ}$. ♦ Радиационные эффекты
Электроны и ионы РПЗ: $E \sim 0,1 - 30 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^8 - 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Область захваченной радиации внутри магнитосферы Земли	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Радиационные эффекты (эффекты дозы и мощности дозы): изменение электрофизических, оптических и механических свойств
Протоны солнечных вспышек: $E \sim 1 - 10^4 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	СКЛ	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Радиационные эффекты

Таблица 4.4. Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты. Продолжение

Факторы космического пространства	Области локализации и происхождения	Вызываемые эффекты
Потоки ядер высоких энергий: $E \sim 10^3 - 10^{14} \text{ МэВ}$ $F \sim 10^2 - 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	ГКЛ	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Локальные радиационные повреждения. ♦ Сбои в элементах микроэлектроники. ♦ Световые вспышки
Потоки твердых частиц и тел: $F \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ $v \sim 10^3 - 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	Метеороиды, газопылевые оболочки ядра комет, космический мусор в ОКП	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Образование кратеров, эрозия поверхности, сквозной пробой стенок. ♦ Образование вторичных продуктов, эмиссионные явления, инициирование электрических разрядов
Вторичные (индуцированные) факторы: <ul style="list-style-type: none"> ♦ электризация КА $\varphi \sim 0,1 - 10^4 \text{ В}$; ♦ объемное зарядение диэлектриков; ♦ собственная внешняя атмосфера КА 	Область пространства в окрестности КА, поверхность КА и его внутренние отсеки	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Электрические разряды: электромагнитные помехи, паразитные сигналы в кабелях, разрушение элементов оборудования и конструкции. ♦ Загрязнение поверхности, рассеяние света в окрестности КА, снижение электрической прочности оборудования. ♦ Окисление и коррозия элементов электронного оборудования

К вторичным факторам иногда относят также температурный режим КА, характерной особенностью которого может являться *термоциклирование* – периодическое изменение температуры участков поверхности КА и элементов оборудования в диапазоне приблизительно от -70 до $+100^\circ\text{C}$ вследствие изменения условий освещения КА Солнцем, например, при вращении аппарата.

Совокупное рассмотрение ФКП вместе с вызываемыми ими эффектами позволяет производить классификацию ФКП и наблюдаемых эффектов по различным признакам.

Так, по расположению зоны оказываемого воздействия ФКП могут быть разделены на два класса.

1. *Факторы поверхностного воздействия*, представляющие опасность для открытых элементов аппаратуры и приповерхностных слоев (толщиной до нескольких сотен микрометров) материалов КА:
 - ♦ космический вакуум;
 - ♦ поток атомарного кислорода верхней атмосферы Земли;
 - ♦ собственная атмосфера КА;
 - ♦ заряженные частицы низкой энергии (частицы холодной и горячей магнитосферной плазмы и плазмы солнечного ветра);
 - ♦ солнечное УФ-излучение;
 - ♦ микрочастицы метеорной материи и космического мусора.
2. Проникающие *факторы*, оказывающие воздействие на глубокие слои материалов и элементы оборудования, находящиеся во внутренних отсеках КА:
 - ♦ электроны и ионы РПЗ, СКЛ и ГКЛ;
 - ♦ крупные частицы метеорной материи и космического мусора.

Можно также классифицировать эффекты воздействия ФКП на КА по степени их критичности для конкретных аппаратов. Очевидно, что такая классификация должна проводиться с привлечением рассмотренных выше данных, которые характеризуют орбиты КА (см. табл. 4.1), особенности конструкции аппаратов и установленного на них оборудования.

В вакууме любой материал выделяет газы и пары, адсорбированные на поверхности и находящиеся в объеме материала (абсорбированные). В последнем случае процессу газовой выделения предшествует диффузия атомов и молекул к поверхности. Аналогичным образом происходит испарение из материалов различных примесей и добавок. И, наконец, с поверхности происходит испарение основного материала. Для вакуумных условий характерен переход вещества из твердой фазы в газообразную, минуя жидкую, – *сублимация*.

Скорость испарения (сублимации) характеризуется массой вещества, испаряющегося в единицу времени с поверхности материала. Скорость испарения возрастает при увеличении температуры поверхности, она зависит также от условий отвода паров от поверхности: чем ниже давление паров над поверхностью по отношению к давлению насыщенного пара испаряющегося вещества, тем выше скорость испарения.

Очевидно, что для использования на открытых поверхностях КА нужно выбирать материалы с низкой скоростью испарения при той температуре, до которой они могут нагреваться в условиях космического пространства.

На материалы внешней поверхности КА, функционирующих в интервале высот 200–1000 км, существенное влияние может оказывать набегающий поток атомарного кислорода верхней атмосферы Земли. Атомарный кислород обладает высокой химической активностью, которая усилена кинетической энергией сталкивающихся с поверхностью атомов (~ 5 эВ), обусловленной орбитальной скоростью КА. Под действием потока атомарного кислорода происходит распыление (потеря массы) материалов. Продукты распыления вносят существенный вклад в формирование СВА КА и пленок загрязнений на его поверхности. В результате воздействия атомарного кислорода могут также значительно изменяться механические, оптические и электрофизические свойства материалов. В наибольшей степени подвержены разрушающему воздействию атомарного кислорода полимерные материалы. Для них толщина уносимого с поверхности слоя может достигать нескольких десятков и даже сотен микрон в год.

В последнее время интерес к исследованию физических процессов, протекающих на поверхности КА, значительно возрос. Это обусловлено тем, что на КА стали проводиться длительные и весьма тонкие научные эксперименты с использованием высокочувствительной аппаратуры, а также применением негерметизированных КА. Поэтому более критичными стали такие, например, процессы как загрязнение элементов оборудования продуктами СВА или возникновение даже относительно слабых

электромагнитных помех, генерируемых *электростатическими разрядами* (ЭСР), которые являются следствием электризации КА.

Поскольку электризация КА вызывается космическими излучениями той или иной природы, это явление иногда называют *радиационной электризацией*. Используется также термин *заряжение КА*, причем в англоязычной литературе применяется исключительно последний термин (*spacecraft charging*).

При анализе возможности возникновения и характеристик ЭСР необходимо исследовать локализацию электрических зарядов на КА, в том числе локализацию зарядов в объеме диэлектриков. При заряджении диэлектрических материалов КА в горячей магнитосферной плазме глубина проникновения электронов плазмы с характерными энергиями до 50 кэВ составляет ~20–30 мкм, в то время как электроны РПЗ с энергиями ~2–10 МэВ проникают в толщу диэлектриков на глубину ~0,5–2 см.

Эти два случая электризации принято разделять при исследовании ЭСР: первый случай называют *поверхностной электризацией* (*surface charging*), а второй – *объемной электризацией* (*bulk charging*). Объемную электризацию диэлектриков называют также *внутренней электризацией* (*internal charging*). Однако последний термин часто используется в ином смысле – для обозначения электризации элементов конструкции, находящихся во внутренних отсеках КА за защитной оболочкой. При этом могут рассматриваться и металлические элементы, изолированные от общего корпуса КА.

Как при поверхностном, так и при объемном заряджении диэлектрических материалов КА значительную роль в установлении равновесного состояния играет собственная (темновая) и *радиационно-стимулированная* (*радиационная*) *проводимость* (*radiation induced conductivity*) диэлектриков. Поэтому при анализе заряджения КА и природы ЭСР вопросам изменения собственной проводимости диэлектриков в условиях космического пространства и роли в переносе зарядов радиационной проводимости уделяется значительное внимание.

Радиационные эффекты, обусловленные воздействием на КА потоков заряженных частиц высокой энергии, зависят от величины полной поглощенной дозы космической радиации и от мощности поглощенной дозы. Существуют также эффекты, вызываемые воздействием одиночных заряженных частиц. Такие эффекты, являющиеся весьма критичными для элементов микроэлектроники и оптоэлектроники, иногда рассматривают как разновидность эффектов, зависящих от мощности дозы, поскольку их возникновение связано с большим энерговыделением в ограниченном объеме вещества за короткий промежуток времени. С величиной полной поглощенной дозы связано постепенное ухудшение свойств материалов и характеристик оборудования КА, например, солнечных батарей. Мощность дозы оказывает влияние на процессы люминесценции материалов при облучении и возникновение в них радиационной проводимости. Обратимые и необратимые изменения свойств материалов происходят за счет всех радиационных эффектов, наблюдаемых в твердом теле: ионизационных эффектов, эффектов переноса заряда и эффектов смещения. Наиболее чувствительны к воздействию космической радиации полупроводниковые и оптические материалы, в меньшей степени – полимерные материалы, самую высокую стойкость к воздействию радиации имеют металлы.

Следует особо отметить, что проблема возникновения радиационных эффектов в элементах бортового электронного оборудования КА в результате воздействия отдельных заряженных частиц, входящих в состав ГКЛ или РПЗ, является в настоящее время чрезвычайно острой для КА с орбитами любых типов. Существует несколько видов таких эффектов, но наиболее часто возникают обратимые *одиночные сбои* (*single event upsets – SEU*). Появление этой проблемы, как ни парадоксально, явилось следствием технологического прогресса в микроэлектронике. В современных интегральных схемах с высокой степенью интеграции электрические заряды, управляющие их работой, оказались сопоставимыми с зарядами, образующимися в материале микросхемы при прохождении тяжелых ядер ГКЛ или высокоэнергети-

ческих протонов РПЗ. Эти внесенные электрические заряды при перемещении их в электрических полях внутри микросхемы и приводят к возникновению сбоев. Для элементов наноэлектроники эта проблема может стать еще более актуальной.

Солнечное УФ-излучение воздействует в равной степени на КА, находящиеся на разных орбитах, поскольку оно практически без ослабления проникает в верхнюю атмосферу Земли до высоты ~200 км. Воздействие метеорных частиц на КА также мало зависит от высоты орбиты, а частицы космического мусора распределены в ОКП неравномерно: наиболее значительна их концентрация в области высот ~800–1000 км.

При одновременном или последовательном воздействии на материалы КА нескольких факторов возможно проявление *неаддитивности воздействия*, когда конечный эффект не равен сумме эффектов от воздействия отдельных факторов, причем комплексное воздействие ФКП может как усиливать, так и ослаблять повреждение материалов. Эффекты неаддитивности, которые называют также *синергетическими эффектами*, применительно к воздействию ФКП на материалы изучены пока недостаточно.

Многообразие факторов, воздействующих на КА, сложные энергетические спектры космических корпускулярных и электромагнитных излучений, возможность воздействия ФКП в различных сочетаниях и в разной временной последовательности – все это значительно затрудняет прогнозирование поведения материалов и бортовых систем КА в условиях космической среды.

По отношению к наноматериалам и изготовленным из них элементам оборудования подобный прогноз еще более труден из-за практически полного пока отсутствия данных о воздействии ФКП на наноструктуры. Поэтому при внедрении наноматериалов в космическую технику особую важность приобретает создание методов и технических средств для исследования в лабораторных условиях разнообразных воздействий ФКП на наноматериалы, а также методов математического моделирования таких воздействий. Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в разд. 6.

4.6. Выбор материалов космических аппаратов

Номенклатура конструкционных и функциональных материалов, используемых при создании КА, очень широка. В качестве конструкционных материалов космической техники, которые должны быть очень прочными при достаточной пластичности, термостойкими и возможно более легкими, используют сплавы на основе Al, Mg, Ni, Co, Ti и других металлов, высококачественные легированные стали, а также углепластики и стеклопластики, керамику, полимеры и различные композиционные материалы на металлической и неметаллической основе. Типичным примером применения высокопрочных сплавов является изготовление корпусов и несущих ферм КА, а различные неметаллические материалы широко используются при изготовлении антенн, каркасов солнечных батарей, разворачиваемых конструкций и т.д.

Функциональные материалы могут быть металлическими и неметаллическими. Они используются при создании всех систем КА, обеспечивая необходимые тепловые, оптические, электрические, магнитные и другие характеристики изделий. На основе функциональных материалов строится измерительная и электронная аппаратура КА.

Все материалы КА, как конструкционные, так и функциональные, должны обладать достаточной стойкостью к воздействию космической среды. Поэтому методология отбора материалов включает обширный комплекс лабораторных испытаний и математическое моделирование их поведения в условиях космического пространства.

В разд. 4.5 были рассмотрены возможные влияния различных составляющих космической среды на материалы и элементы оборудования КА во время его пребывания на орбите. К этому следует добавить, что при запуске КА, а для возвращаемых аппаратов – и при спуске с орбиты, материалы подвергаются значительным механическим нагрузкам. Материалы внешней оболочки КА испытывают в последнем случае огромные тепловые нагрузки, воз-

никающие при входе в атмосферу. В этих условиях температура внешней поверхности КА может достигать $\sim 1500^{\circ}\text{C}$. Материалы некоторых элементов ракетных двигателей подвергаются воздействию еще более высоких температур ($\sim 3\,500^{\circ}\text{C}$).

При анализе пригодности материалов для работы в составе конструкции КА используют три группы методов:

- ♦ наземные лабораторные эксперименты и испытания образцов материалов, элементов и узлов оборудования, уменьшенных макетов КА и полномасштабных аппаратов;
- ♦ теоретические исследования и компьютерное моделирование;
- ♦ натурные (летные) эксперименты в космосе на борту КА.

Эти методы тесно связаны между собой и часто используются совместно, что может быть проиллюстрировано с помощью рис. 4.8 на примере изучения радиационной стойкости материалов и оборудования КА.

Исходными данными для формулировки задач и выбора методов исследований являются:

- ♦ модели и стандарты космической радиации (1);
- ♦ типы орбит и сроки активного существования КА (2);
- ♦ конструкция КА, используемые материалы и бортовое оборудование (3).

На основании указанных данных формулируются требования к лабораторному испытательному оборудованию, математическим моделям и программам, которые должны использоваться для исследования воздействия космической радиации (4). Затем с учетом этих требований выбираются наиболее подходящие экспериментальные методы и установки (5) и / или математические модели и программы (6).

Часто экспериментальные и математические методы используются совместно и дополняют друг друга: выбор параметров лабораторных установок производится с использованием результатов математического моделирования, а результаты лабораторных исследований радиационных эффектов являются входными данными для моделирования.

Требования к материалам космических аппаратов



Рис. 4.8. Схема организации исследований воздействия космической радиации

Комплексные космические эксперименты (7), в которых одновременно изучаются характеристики внешней космической среды, радиационные условия внутри КА и радиационные эффекты в различных материалах, организуются с учетом результатов как лабораторных исследований, так и математического моделирования.

Совокупность данных, получаемых всеми методами, используется для построения моделей деградации материалов и элементов оборудования КА в различных условиях эксплуатации (8) и разработки на их основе методов прогнозирования надежности и срока активного существования КА (9), а также рекомендаций по его защите от радиационных воздействий (10).

На основании результатов лабораторных испытаний и математического моделирования определяются уровни ухудшения (деградации) свойств материалов, которые сопоставляются с установленными техническими требованиями.

Таким образом, к материалам КА предъявляется целый комплекс разнообразных требований, одновременное соблюдение которых сопряжено с большими трудностями или невозможно. Основным путем преодоления этих трудностей является создание новых материалов, обладающих требуемым комплексом эксплуатационных свойств: механических, тепловых, электрофизических, оптических и других. Наноматериалы должны сыграть в ближайшем будущем главную роль в решении этой проблемы.

5. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

5.1. Программы и перспективы

Практически одновременно с подготовкой рассмотренной в разд. 3 общей программы работ в области нанотехнологий в США под эгидой NASA была разработана программа развития нанотехнологий и создания наноматериалов для аэрокосмической техники. Структура этой программы представлена на рис. 5.1. Ее основными разделами, которые показаны в нижней части рисунка, являются наноматериалы, элементы бортовой электроники, сенсоры различного назначения и нанокomпоненты оборудования КА. В верхней части рисунка указаны возможности, открываемые применением новых материалов и элементов, при этом на начальных этапах, завершение которых планируется к 2011 г., достижения связываются в основном с применением многофункциональных материалов, а в дальнейшем – с применением интеллектуальных материалов и биосистем.

Рис. 5.2 показывает соотношение капиталовложений NASA в различные разделы программы и фундаментальные исследования в области нанотехнологий по состоянию на 2002 г. Видно, что большая часть средств направлена на создание элементов наноэлектроники для бортовых систем КА. Работы по созданию



Рис. 5.1. Программа NASA развития нанотехнологий

сенсоров в совокупности с компонентами оборудования и наноматериалов финансируются в равных долях. Приблизительно четверть бюджета NASA была израсходована на фундаментальные исследования общего характера в области нанотехнологий.

С учетом быстрого развития нанотехнологий и изменения представлений о возможностях их использования в космических исследованиях приведенная на рис. 5.1 программа была скорректирована в 2004 г. В этой программе можно выделить шесть основных направлений развития

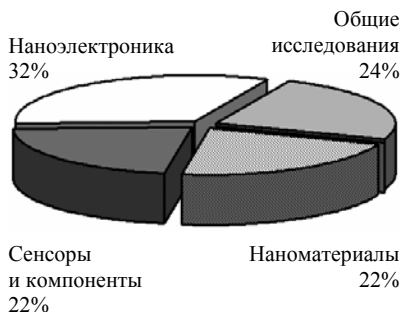


Рис. 5.2. Структура финансирования программ NASA в 2002 г.

нанотехнологий, которые показаны на рис. 5.3. При этом в качестве важнейших перспективных задач, для решения которых необходимо использование нанотехнологий, указываются:

- ♦ увеличение удельных (по отношению к массе) размеров конструкции для изготовления антенн диаметром более 25–50 м, солнечных батарей и т.п.;
- ♦ повышение в 10–100 раз удельной прочности материалов для новых систем запуска КА, обитаемых космических сооружений и др.;
- ♦ расширение функциональных возможностей устройств при минимизации массы и потребляемой энергии для создания систем квантовых сенсоров, биохимических «лабораторий на чипе», малых КА;
- ♦ повышение уровня удельного информационного обеспечения и уровня «интеллекта» систем КА для организации автономного медицинского обслуживания экипажей и создания комплексных развивающихся космических систем.

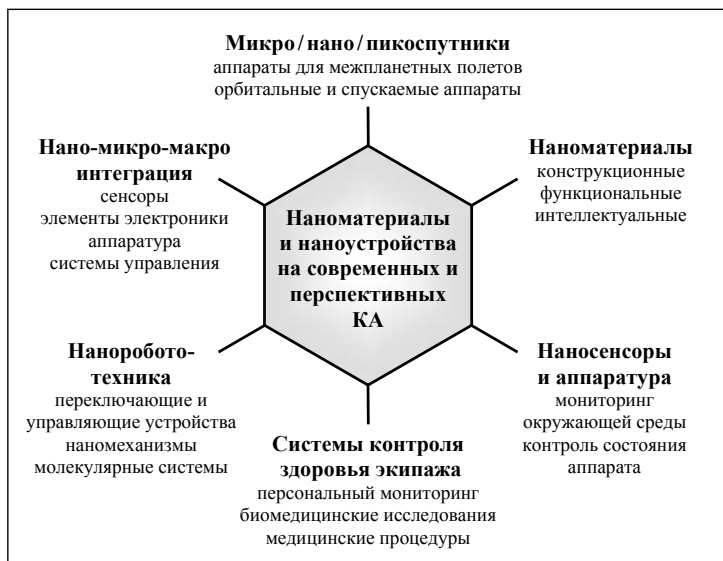


Рис. 5.3. Основные направления развития нанотехнологий для космической техники

Анализ этих и других имеющихся данных позволяет сделать прогноз развития космических технологий, представленный на рис. 5.4. На этом рисунке горизонтальная шкала отражает рост потенциальных возможностей космических систем на разных временных этапах, а движение вверх по вертикальной шкале показывает повышение уровня сложности и интеграции систем. Каждый новый шаг по шкале времени, приведенной в верхней части рисунка, предполагает появление более сложных нанообъектов, а также возникновение и развитие новых областей знаний и технологий или функций.



Рис. 5.4. Прогноз развития космических нанотехнологий

Как можно видеть из приведенной прогностической схемы, в ближайшие годы (до 5 лет) ожидается появление и даже начало практического применения нескольких классов наноматериалов. Прежде всего, речь идет о новых конструкционных материалах на основе наночастиц и нанотрубок, которые позволят резко снизить вес КА без ущерба для его прочности. Другим успешно развиваемым направлением является наноэлектроника с использованием УНТ и иных наноструктур. В дальнейшем планируется создание стойких к воздействию космической радиации молеку-

лярных компьютеров и биокомпьютеров, реализация известного проекта строительства «космического лифта» на основе сверхпрочного троса протяженностью от земной поверхности до геостационарной орбиты, разработка биосенсоров, использующих эффект «молекулярного распознавания», создание сенсорных сетей для диагностики состояния среды в окрестности Земли и других планет, а также систем нанороботов, способных выполнять масштабные работы, в том числе направленные на улучшение окружающей среды.

Европейские исследователи также уделяют значительное внимание анализу возможных направлений развития космических нанотехнологий. Один из вариантов подобных прогностических оценок показан на рис. 5.5. В целом представленная картина развития космических нанотехнологий схожа с рассмотренной программой США, хотя ее структура несколько иная. Европейские исследователи в качестве наиболее важных направлений работ в области нанотехнологий для аэрокосмической отрасли выделяют приводимые ниже.

1. Многоцелевые конструкционные и функциональные материалы, включая интеллектуальные материалы.
2. Элементы наноэлектроники.
3. Материалы и изделия для систем энергообеспечения КА (накопители энергии, топливные элементы, солнечные батареи и т.д.).
4. Оборудование КА и научная аппаратура с использованием наносенсоров, электромеханических наносистем и т.д.
5. Системы обеспечения жизнедеятельности.
6. Перспективные космические проекты, реализуемые с помощью нанотехнологий.

Принадлежность изделий, представленных на рис. 5.5, к перечисленным направлениям, показана соответствующими цифрами.

Рис. 5.6 характеризует соотношения между различными направлениями исследований в области космических нанотехнологий для США (а), стран Европы (б) и стран Азиатско-Тихоокеанского региона (в). Здесь дано более детальное по сравнению с



Рис. 5.5. Схема развития космических нанотехнологий согласно прогнозу европейских экспертов

рис. 5.2 описание направлений исследований. Кроме того, представленные данные охватывают совокупность исследований, выполняемых всеми ведомствами. Этим объясняется некоторое отличие цифр, приводимых на рис. 5.2 и рис. 5.6а. Из рис. 5.6 видно, что достаточно серьезное внимание уделяется фундаментальным исследованиям процессов самосборки наноструктур и наноустройств, применению УНТ в космических технологиях, а также созданию наноэлементов для оптики и фотоники, о чем подробнее будет рассказано ниже.

Нанотехнологии, безусловно, рассматриваются как один из ключевых моментов при реализации перспективных космических проектов. На рис. 5.7 показана разработанная NASA программа применения нанотехнологий при освоении Луны, Марса, Венеры

и создании крупных спутниковых систем для научных исследований и мониторинга состояния Солнца и космической среды.

На рассматриваемом временном интервале до 2035 г. предполагается непрерывное совершенствование основных систем КА за счет применения нанотехнологий и наноматериалов. Это позволит уже в ближайшие годы использовать созвездия малых спутников для мониторинга Земли, околоземной космической среды и Солнца, а позднее – ввести в строй подобные созвездия

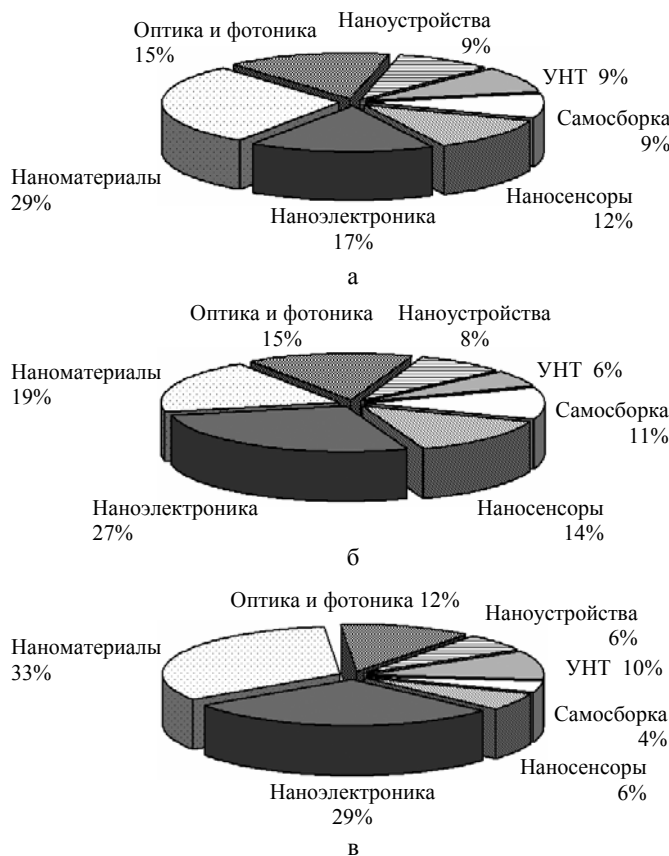


Рис. 5.6. Соотношения между различными направлениями исследований в области космических нанотехнологий: а – США; б – Европа; в – Азиатско-Тихоокеанский регион



Рис. 5.7. Программа NASA применения нанотехнологий при освоении планет Солнечной системы

для изучения дальнего космоса и построить космические телескопы с большой апертурой. Роботы, созданные с применением нанотехнологий и наноматериалов, будут играть важную роль при изучении Марса, а также Венеры и планет-гигантов Солнечной системы, в окрестности и на поверхности которых КА должны работать в экстремальных условиях. И конечно же, осуществление таких крупных космических проектов как строительство обитаемых баз на Луне и пилотируемый полет на Марс, немыслимо без нанотехнологий и наноматериалов, начиная от использования конструкционных и функциональных материалов с уникальными свойствами и заканчивая применением разнообразных устройств и систем, обеспечивающих диагностику состояния здоровья и жизнедеятельность космонавтов.

Оценки российских специалистов достигнутого уровня и перспектив развития нанотехнологий для космической отрасли охватывают, как и рассмотренные выше программы, вопросы создания

на основе наноструктур принципиально новых конструкционных и функциональных материалов, защитных покрытий, элементов электронных систем КА, источников электроэнергии, сенсоров, высокопроизводительных бортовых компьютеров и интеллектуальных систем на их основе.

При проведении оценок отмечается, что нанотехнологии имеют первостепенное значение для создания сверхмалых КА и перспективных космических систем. При этом указываются следующие важные продукты нанотехнологий:

- ◆ квантовые электронные усилители с низким уровнем шумов, позволяющие повысить помехоустойчивость систем связи и увеличить дальность их действия;
- ◆ сверхширокополосные оптические приемники, работающие без охлаждения;
- ◆ градиентные концентраторы, значительно увеличивающие эффективность солнечных батарей;
- ◆ высокопроизводительные бортовые системы обработки информации на основе молекулярной электроники;
- ◆ сенсорные устройства с высокой чувствительностью и селективностью.

Существенное позитивное влияние на дальнейшее развитие и совершенствование космической техники с применением наноматериалов и наносистем может оказать широкое внедрение так называемых *CALS-технологий*, представление о которых возникло в первой половине 1980-х гг. До настоящего времени используются разные расшифровки приведенной аббревиатуры: *Continuous Acquisition and Life-cycle Support*, *Computer-Aided Acquisition and Logistics Support* и некоторые другие. Все они трактуют CALS-технологии как непрерывную информационную поддержку жизненного цикла изделий с использованием компьютерных методов.

Внедрение CASL-технологий предполагает создание интегрированной информационной среды, обеспечивающей единообразное основанное на применении стандартов и нормативных документов управление процессами проектирования, производства и

эксплуатации технически сложных наукоемких изделий, к которым, безусловно, относятся изделия ракетно-космической техники. Очевидно, что роль такого подхода будет возрастать по мере расширения номенклатуры используемых в космической технике наноматериалов и наноустройств и построенных на их основе систем.

Работы по созданию нанотехнологий и наноматериалов для космической отрасли включены в Федеральную целевую программу «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 годы» и в «Федеральную космическую программу».

5.2. Наноматериалы космической техники

В космической отрасли найдут применение практически все основные виды наноматериалов, создаваемых для различных областей науки и техники. Но многие материалы разрабатываются специально для решения тех или иных задач, возникающих при конструировании КА. Рассмотрим подробнее различные возможности применения наноматериалов в космической технике.

Металлы и сплавы

В качестве конструкционных материалов для изготовления корпусов и несущих ферм КА, а также элементов ракетных двигателей найдут применение нанокристаллические легкие металлы (Al, Mg, Ti) и сплавы на их основе. Такие нанокристаллические материалы, как показано в разд. 1, благодаря малым размерам зерен имеют значительно лучшие механические характеристики по сравнению с обычными материалами того же химического состава. Тугоплавкие металлы Nb, Ta, Mo, W, значения температуры плавления которых лежат в диапазоне 2500–3400°C, и их сплавы необходимы для изготовления деталей и узлов, работаю-

щих при очень высоких температурах, например, сопел ракетных двигателей. Привлекательными с точки зрения использования в космической технике свойствами обладает Ве. Хотя его температура плавления не очень высока (1300°C), он легок, прочен и имеет высокую теплоемкость, причем его характеристики остаются практически неизменными в широком интервале температур.

Нанокompозиты и нанокерамики

Композиционные материалы (композиты) состоят из нескольких материалов разных видов, при этом в объеме композиции сохраняются границы разделов материалов. Свойства композитов определяются химическим составом их компонентов, распределением в объеме и взаимной ориентацией компонентов, их размерами. При этом композиция всегда приобретает новые свойства, не присущие каждой из ее составляющих в отдельности.

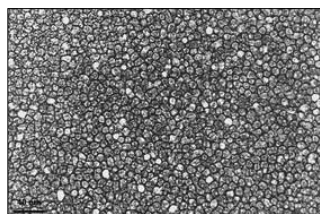
По структуре композиты делятся на три группы:

- ♦ матричные, в которых один из компонентов является матрицей (металлической или неметаллической), а другие – включениями в эту матрицу, которые называют также наполнителями;
- ♦ каркасные (взаимопроникающие), все компоненты которых представляют собой жесткие монолиты;
- ♦ однокомпонентные поликристаллы, состоящие из анизотропных структурных элементов одинакового состава с различной ориентацией главных осей анизотропии.

Керамика относится к поликристаллическим материалам, ее получают спеканием неметаллических порошков (Al_2O_3 , SiO_2 , Si_3N_4 , SiC , TiCN и др.). Различные виды керамики можно использовать как в качестве матрицы, так и в качестве наполнителя композитов.

С помощью нанотехнологий создаются главным образом матричные композиты. Роль материалов матрицы могут играть

полимеры (эпоксидные смолы, нейлон, полиимид и др.), металлы и сплавы, углеродные материалы и различные керамики,



а



б

Рис. 5.8. Образцы нанокомпозитов

а роль наполнителей – углеродные нанотрубки, фуллерены, графеновые ленты, металлические и неметаллические наночастицы, нановолокна и нанопленки. На рис. 5.8 приведены полученные с помощью электронного микроскопа изображения образцов композитов, в одном из которых матрицей является сплав NiAl, а наполнителем служат зерна WC диаметром около 1 нм (а), в другом же в качестве матрицы используется полистирол, а в качестве наполнителя – графеновые ленты (б).

Создаваемые с помощью нанотехнологий композиты разделяют на два вида: нанокомпозиты и нано-нанокомпозиты. К первым относят композиты, в которых используются наноразмерные включения, но матрица не является наноструктурированной, а ко вторым – имеющие помимо нановключений наноструктурированную матрицу.

Разработке нанокомпозитов на основе полимерных матриц уделяется значительное внимание. В частности, ведутся исследования так называемых «*POSS-полимеров*», при создании которых в качестве наполнителя используются нановолокна полиэдрального олигомерного силсесквиоксана (ПОСС), состоящие из органических и неорганических объектов и имеющие нанопористую структуру. Такие полимеры обладают повышенной термостойкостью, а также стойкостью к радиационным и химическим воздействиям, что делает их весьма перспективными для применения в космической технике. Высокая стойкость POSS-полимеров

к воздействию ФКП уже подтверждена результатами испытаний образцов таких материалов на борту Международной космической станции.

Применение наноразмерных элементов для создания композитов позволяет существенно улучшить их свойства. Образно говоря, если при использовании элементов с размерами, лежащими в микродиапазоне, свойства компонентов композита складываются, то при переходе в нанодиапазон происходит их умножение за счет более сильного взаимодействия включений с матрицей и между собой.

Путем варьирования сочетаний матриц и наполнителей нанокompозитам можно придавать самые различные свойства, что делает их пригодными для применения в качестве как конструкционных, так и функциональных материалов. То же можно сказать о керамиках. При выборе керамических материалов для изготовления нагружаемых элементов конструкции учитывается, что они, как правило, обладают высокой твердостью и термостойкостью, но их общим недостатком является хрупкость. Хрупкое разрушение керамик связано с наличием в них микроскопических дефектов, которые служат центрами зарождения трещин. Использование нанопорошков в качестве исходных компонентов как раз и позволяет достичь их плотной упаковки при спекании керамики, что уменьшает количество дефектов.

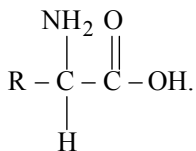
В ближайшем будущем нанокompозиты и нанокерамики, безусловно, найдут широкое применение при создании КА, постепенно заменяя многие элементы конструкции, изготавливаемые из металлических материалов. Одним из важнейших направлений их применения является создание покрытий, выполняющих различные функции: механическую и радиационную защиту, тепловую защиту при входе в атмосферу и обеспечение требуемого теплового режима КА в полете, придание поверхности КА необходимых оптических и электрических характеристик и т.д.

Обсуждаемые материалы благодаря разнообразию и уникальности их свойств будут использоваться также при создании бортовой аппаратуры КА, включая интеллектуальные системы.

Наноразмерные биологические и биоподобные материалы

Элементы живой материи обладают множеством замечательных свойств, которыми ученые и конструкторы давно пытаются наделить различные неорганические материалы и технические устройства. Нанотехнологии открывают реальную возможность не только подражания живой природе, т.е. имитации каких-то характерных принципов построения и функционирования биологических объектов, но и непосредственного использования таких объектов в качестве элементов наноматериалов и наносистем наряду с неорганическими элементами. В этой связи отметим, что размеры важнейших биологических структур лежат как раз в нанодиапазоне (см. табл. 1.2 в разд. 1). Так, молекула ДНК человека представляет собой двойную наноцепь, свернутую в спираль диаметром 2 нм с шагом 3,4 нм. Простые белки (*протеины*), которые строятся только из аминокислот, являются наночастицами с размерами от 4 до 50 нм.

Химическая структура всех 20 аминокислот, используемых организмами при синтезе белков, одинакова:



В нее входят: кислотная группа $-\text{COOH}$, аминогруппа NH_2 , атомы C и H, а также группа R, которая характеризует конкретную аминокислоту. В простейшем случае (глицин) группа R представлена одним атомом водорода, а в наиболее сложном (триптофан) – сопряженным двойным кольцом.

Соединения, содержащие сравнительно небольшое количество аминокислотных звеньев (до нескольких сотен) называют *пептидами*. Они, в свою очередь, делятся на несколько классов по длине цепей. Помимо простых белков (протеинов), состоящих из упакованных сложным образом длинных пептидных цепей, суще-

ствуют сложные белки, в состав которых входят также нуклеиновые кислоты и углеводы. На рис. 5.9а показан фрагмент пептидной цепи, а рис. 5.9б иллюстрирует принцип упаковки цепей.

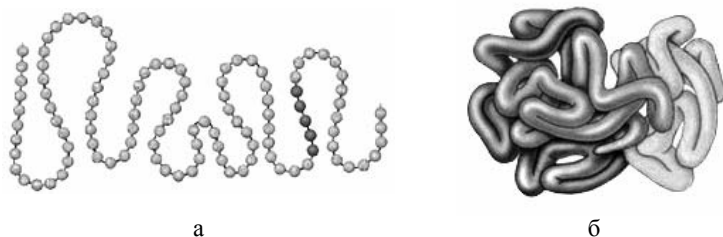


Рис. 5.9. Фрагмент пептидной цепи (а) и принцип упаковки цепей (б)

При создании упоминавшихся уже в разд. 3 гибридных наноматериалов, представляющих собой сочетание органических и неорганических элементов, в качестве первых используют протеины, пептиды и молекулы ДНК, а в качестве вторых – двумерные и трехмерные объекты из металлов, полимеров, двуокиси кремния и других материалов. Разработке таких наноматериалов в настоящее время уделяется очень большое внимание.

При синтезе подобных комбинаций во многих случаях предполагается использование принципа самосборки, а при их применении – *эффекта молекулярного распознавания*. Путем упорядочения в процессе самосборки органических наноэлементов на неорганической подложке можно создавать биосенсоры, биочипы для использования в наноэлектронике, нанокompозиты, а также придавать поверхности подложки принципиально новые свойства.

На основе протеинов и пептидов, используя процессы самосборки, можно получать решетчатые плоские и объемные структуры для применения в качестве «молекулярных сит» и устройств для направленной доставки лекарств, а также формировать наностержни, нанотрубки, нановолокна и т.п. Комбинации биологических объектов с полупроводниками рассматриваются как перспективные материалы для изготовления оптических наносенсоров,

жидкокристаллических дисплеев и элементов наноэлектроники. На основе молекул нуклеиновых кислот возможно построение нанорезисторов, наноконденсаторов, транзисторов и т.п.

Перспективным направлением является создание с помощью нанотехнологий материалов и систем, имитирующих биологические объекты и использующих принципы их функционирования (*biomimetic materials and bioinspired systems*). Такие материалы и системы могут строиться только на основе неорганических элементов или с применением биологических объектов, причем при их создании также могут реализовываться процессы самосборки.

Известно, что в живой природе при построении костей реализуется процесс биоминерализации, который заключается в последовательном сорбировании неорганических кальцийсодержащих соединений мягкими живыми тканями с их последующим преобразованием в костные структуры, состоящие из нанокристаллов диаметром около 5 нм и длиной 20–200 нм. Для имитации подобных процессов используются технологии создания многослойных наноструктур путем осаждения слоев в электролитах или с помощью напыления. Чрезвычайно важная для космических конструкций функция самовосстановления или самоизле-

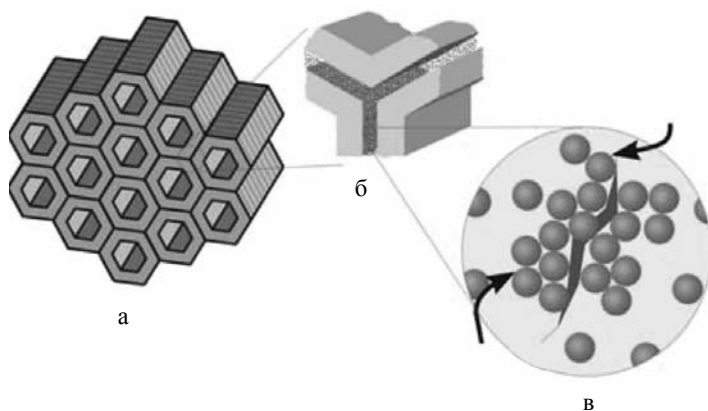


Рис. 5.10. Биоподобный самоизлечивающийся материал: а – материал, состоящий из пространственных ячеек; б – коллоидный раствор между стенками ячеек; в – связывание трещины наночастицами

чения (*self-healing*) может осуществляться также путем введения в материалы коллоидных растворов, содержащих наночастицы. Коагуляция растворов в области повреждения ликвидирует возникший дефект (рис. 5.10).

Интересно отметить, что подобный принцип устранения механических повреждений был ранее реализован в лабораторных условиях путем введения в материал стеклянных трубочек диаметром 60 мкм, заполненных раздельно жидкостями, которые при смешивании вследствие разрушения трубочек в зоне повреждения быстро затвердевают.

Еще одним направлением работ по созданию самоизлечивающихся материалов аэрокосмической техники является применение нанокompозитов, содержащих в качестве наполнителя УНТ с металлическим типом проводимости. Путем измерения электропроводности материала можно определить область его механического повреждения, а затем подачей мощного электрического импульса частично расплавить полимерную матрицу в зоне повреждения, что приведет к ликвидации возникшего дефекта.

Самовосстанавливающиеся материалы и структуры, способные быстро устранять глубокие кратеры и сквозные отверстия, очень нужны для защиты КА от ударного воздействия твердых частиц естественного и искусственного происхождения. Тонкие эластичные материалы, обладающие такими свойствами, найдут применение при создании космических скафандров. Подобные материалы могут использоваться также для изготовления защитной одежды космонавтов или наноситься непосредственно на тело (так называемая «вторая кожа»).

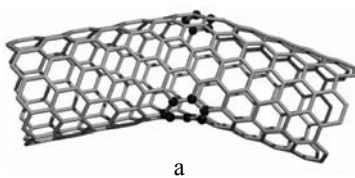
Как перспективный метод защиты КА от ударных воздействий можно рассматривать применение эластичных оболочек, заполненных содержащей множество наночастиц жидкостью, которая при поглощении энергии ударной волны переходит в твердое состояние. На основе таких структур уже разработаны бронежилеты. Препятствием для использования подобных систем в качестве защитных экранов КА пока является достаточно длительное время (10^{-4} – 10^{-3} с) перехода жидкости в твердое состояние.

5.3. Элементы бортового оборудования космических аппаратов

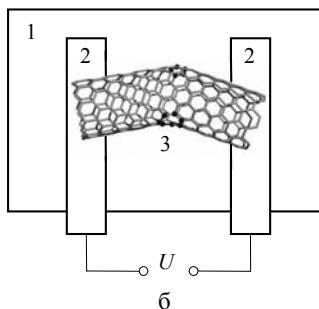
Элементы нанoeлектроники

Выше отмечалось, что размеры топологических элементов современных кремниевых интегральных микросхем, изготавливаемых традиционными методами литографии, уже могут быть менее 100 нм, т.е. формально такие объекты попадают в категорию наноразмерных объектов. Однако к элементам нанoeлектроники принято относить диоды, транзисторы и различные логические устройства, построенные на основе каких-либо наноструктур, в первую очередь – на основе УНТ.

Как уже указывалось в разд. 1, тип проводимости УНТ определяется ориентацией их продольной оси относительно шестиугольных ячеек, образующих поверхность трубок. В зависимости от этого признака нанотрубок, который характеризуется углом



а



б

Рис. 5.11. Изогнутая УНТ (а) и схема диода на ее основе (б)

хиральности (см. разд. 1), УНТ по типу проводимости могут относиться к металлам или полупроводникам. В первом случае проводимость УНТ может быть приблизительно на 3 порядка выше, чем у меди, а во втором проводимость сильно зависит от воздействующего на трубку поперечного электрического поля. Эти свойства УНТ делают их очень удобными для создания на их основе диодов и транзисторов, при изготовлении которых учитывается также, что величина проводимости УНТ зависит от их диаметра.

Простейший диод на основе УНТ можно представить в виде двух соединенных нанотрубок с различным типом проводимости. Одна из возможностей построения диода на УНТ заключается в использовании изогнутой трубки, состоящей из двух частей с различными углами хиральности (рис. 5.11а). К концам трубки прикладывается электрическое напряжение через металлические (Au) контакты, как показано на рис. 5.11б. В зоне изгиба таких трубок структура нарушена за счет появления пятиугольных и семиугольных ячеек. Такое сочетание трубок с металлической и полупроводниковой проводимостью образует типичный для диодных структур гетеропереход «металл–полупроводник».

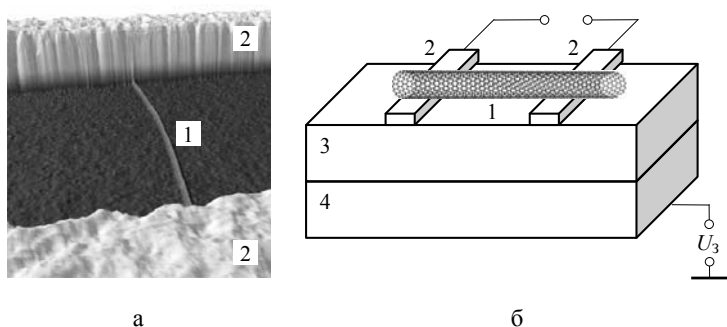


Рис. 5.12. Изображение (а) и схема (б) полевого транзистора на УНТ

При создании простейшего транзистора на УНТ (рис. 5.12) трубка (1) помещается между двумя металлическими контактами (2), изолированными с помощью оксидного слоя SiO_2 (3) от проводящей подложки Si (4), которая выполняет роль затвора как в обычном полевом транзисторе. Меняя напряжение на затворе U_3 и, соответственно, воздействующее на УНТ поперечное электрическое поле, можно варьировать в широких пределах ток, протекающий через трубку. Такие транзисторы могут использоваться как в аналоговых, так и в цифровых схемах.

Развитие технологии изготовления УНТ позволило получить разветвленные Y-образные и T-образные трубки (рис. 5.13). Такие структуры представляют собой фактически готовые полевые

транзисторы. Если использовать «ствол» структуры в качестве затвора, а «ветви» – в качестве истока и стока, то удастся получить характерные для полевого транзистора вольт-амперные характеристики.

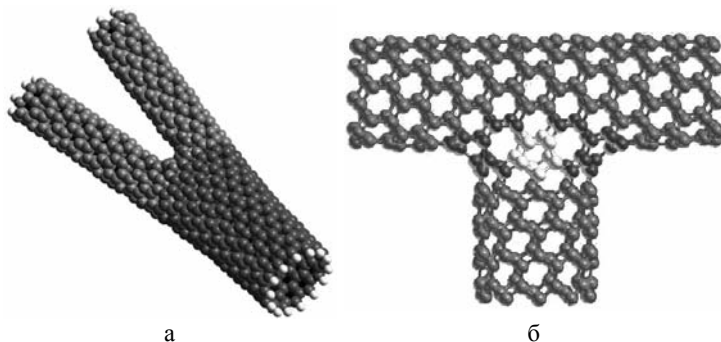


Рис. 5.13. Разветвленные УНТ: Y-образная (а) и Т-образная (б)

Описанные устройства могут строиться на основе одиночных УНТ и с использованием пучков трубок, а также с использованием графеновых лент вместо нанотрубок.

Для построения миниатюрных высокопроизводительных компьютеров, применение которых позволит значительно расширить функциональные возможности малых КА и будет способствовать реализации многих перспективных космических проектов, необходимы переключающие устройства с высокой степенью упаковки на чипе. Применение нанотрубок является одним из путей решения этой задачи.

На рис. 5.14а схематически показана ячейка переключающего устройства (рис. 5.14б) из пересекающихся УНТ, между слоями которых имеется некоторый зазор. Путем варьирования токов (I_1 – I_3), пропускаемых через трубки, можно осуществлять их замыкание и размыкание в точках пересечения, выполняя тем самым требуемые логические операции. Предполагается, что на 1 см^2 удастся разместить 10^{12} переключателей, что на 3–4 порядка превышает достигнутую в настоящее время плотность упаковки. Кроме того, скорость переключения должна возрасти в 100

раз по сравнению с существующими устройствами. Расширить функциональные возможности подобных узлов на УНТ можно за счет использования чередующихся слоев металлических и полупроводниковых трубок.

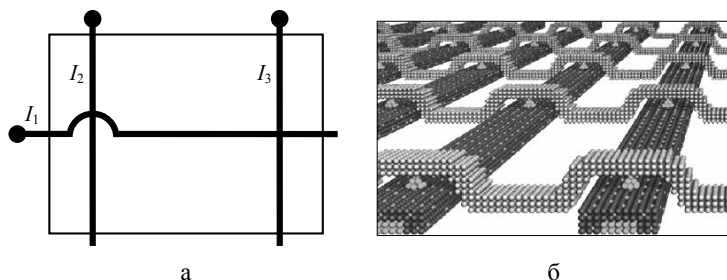


Рис. 5.14. Схема (а) и предполагаемая структура (б) переключающего устройства на основе УНТ

Нанотрубки, благодаря их высокой электро- и теплопроводности, можно использовать в качестве соединительных проводников в чипах с плотной упаковкой. Значительная удельная поверхность УНТ позволяет рассматривать их как материал для создания сверхминиатюрных конденсаторов большой емкости (*суперконденсаторов*), которые можно применять не только при создании электронных устройств, но и в качестве накопительных элементов в системах электропитания КА.

При анализе путей развития элементной базы для построения бортовых систем будущих КА следует указать на важность развития двух очень перспективных направлений – *спинтроники* и *фотоники*, о которых уже говорилось в разд. 1. Спинтроника, в отличие от традиционной электроники, строящейся на регистрации зарядов, оперирует спином электрона и связанным с ним собственным магнитным моментом электрона, которые могут иметь лишь две ориентации. На основе этого квантового эффекта возможно построение различных логических ячеек, элементов памяти и переключателей, аналогичных в известном смысле переключателям на ферромагнитных элементах, но обладающих значительно **большим** быстродействием и низким энергопотреб-

лением. Уже сейчас разрабатываются запоминающие устройства и устройства записи и считывания информации, действие которых основано на регистрации спиновых состояний электронов. В перспективе рассматриваются возможности создания функциональных элементов спинтроники и с использованием других заряженных частиц.

Фотоника использует в качестве носителей информации кванты света, что принципиально обеспечивает целый ряд преимуществ по сравнению с традиционной зарядовой электроникой в отношении быстродействия, помехоустойчивости, энергопотребления и тепловыделения. Конечно же, давно создано и широко используется множество оптических устройств: источников и приемников света, модуляторов, фильтров, световодов и т.д. Достаточно вспомнить повсеместно применяемые оптоволоконные линии связи. Однако говорить о фотонике как об альтернативе микроэлектронике можно лишь создав сопоставимые по размерам оптические элементы и чипы. Нанотехнологии позволяют решить эту задачу. Оптические наноустройства изготавливаются как на основе широко применяемых полупроводниковых материалов (Si, GaAs), так и на основе новых наноматериалов. Важно, что при создании элементной базы фотоники можно использовать хорошо отработанные технологии полупроводниковой микроэлектроники. Это дает возможность достаточно просто создавать гибридные электронно-фотонные чипы, обеспечивающие совместимость принципов и технических приемов построения сложных функциональных систем на двух различных элементных базах.

Наносенсоры

Нанотехнологии и созданные с их помощью наноматериалы открывают совершенно новые возможности для разработки разнообразных сенсоров – датчиков для регистрации и определения параметров широкого круга физических объектов. Примечательно, что в большинстве своем наносенсоры отличаются от существующих датчиков не только своими малыми размерами,

но и значительно лучшими характеристиками. Например, они позволяют обнаруживать в газовой смеси отдельные молекулы определенного вида и измерять их массу.

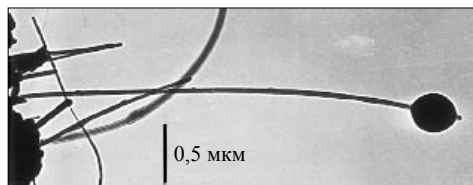


Рис. 5.15. Простейшие нановесы

Для создания наносенсоров широко используются нанотрубки и наностержни в сочетании с органическими и неорганическими молекулами. Простейший датчик представляет собой УНТ с закрепленной на ее конце молекулой (рис. 5.15). Проводящую нанотрубку можно заставить совершать колебания в высокочастотном электромагнитном поле и при этом измерить ее собственную резонансную частоту, которая зависит от размеров трубки и, соответственно, от ее массы. Если произвести такое

измерение до закрепления молекулы на конце трубки и после, то по разности резонансных частот можно определить массу молекулы. Такой датчик, который можно назвать «нановесами», позволяет измерить массу достаточно крупных биологических молекул.

Повысить чувствительность нановесов на УНТ можно, используя конструкцию, показанную на рис. 5.16. В этом датчике УНТ (1) закреплена между двумя электродами из золота (2, 3), помещенными на изолятор (4) с

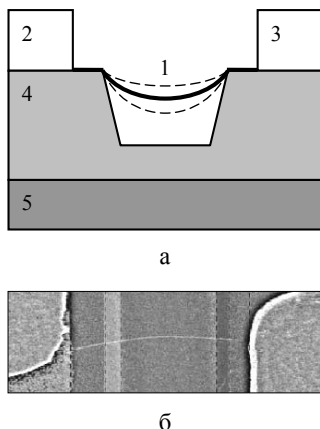


Рис. 5.16. Схема (а) и изображение (б) резонансных нановесов

канавкой шириной ~ 500 нм в его центральной части. Под изолирующим слоем находится еще один металлический электрод (5), т.е. такая структура представляет собой фактически полевой транзистор на УНТ, рассмотренный ранее. Однако в данном случае вновь используется эффект механических колебаний трубки, возбуждаемых путем подачи на электроды необходимых напряжений. В представленной системе обеспечивается более точное измерение резонансных частот и, следовательно, массы молекул, помещаемых на боковую поверхность УНТ.

Еще одна разновидность резонансного датчика на УНТ показана на рис. 5.17. В данном случае о характере колебаний трубки, один конец которой

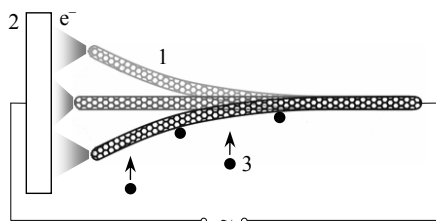


Рис. 5.17. Резонансный датчик на УНТ:
1 – нанотрубка; 2 – металлический электрод; 3 – атомы вещества

жестко закреплен, а другой расположен на некотором расстоянии от металлического электрода, судят по величине тока автоэлектронной эмиссии, протекающего между колеблющимся концом трубки и электродом. Регистрируя из-

менения этого тока, можно с высокой точностью измерять массу атомов вещества, оседающего на поверхности УНТ.

Расширить функциональные возможности резонансных датчиков можно за счет эффекта молекулярного распознавания. Так, нанотрубка с закрепленной на ее конце молекулой, показанная на рис. 5.15, способна за счет этого эффекта селективно захватывать и взвешивать другие молекулы. Многоэлементные конструкции из подобных датчиков с различными исходными молекулами на чувствительных элементах будут являться газоанализаторами, способными определять с высокой селективностью заданный набор компонентов газовой смеси.

Существуют газоанализаторы, действие которых основано на изменении проводимости чувствительных элементов при оседа-

нии на них регистрируемых молекул. В таких анализаторах в качестве чувствительных элементов используют нанопроволоки с нанесенными на их поверхность проводящими полимерами или выполняющими роль катализаторов атомами металлов. Исследуются также возможности создания гибридных газовых сенсоров на основе протеинов, из которых строятся рецепторы запахов в живой природе.

Функционирование газоанализаторов, конструируемых на основе многоэлементных нанодатчиков, может организовываться по принципу нейронных сетей с «обучением» анализаторов на эталонных образцах. Предполагается, что подобные устройства, которые иногда называют «электронными носами», будут способны различать до нескольких тысяч газовых составляющих («запахов»). Такие устройства окажутся чрезвычайно полезными для контроля состава атмосферы в отсеках пилотируемых космических кораблей и обитаемых космических баз, первые из которых, как уже указывалось, предполагается построить на Луне в ближайшие десятилетия.

Рассмотренные селективные сенсоры можно использовать для решения самых разнообразных задач: поиска биологических молекул (в частности, при работе автоматических аппаратов или космонавтов на поверхности Марса), обнаружения болезнетворных молекул и вирусов, контроля технологических процессов и т.д.

Нанотехнологии позволяют создавать также высокочувствительные датчики механических воздействий, ускорений, электромагнитных полей. Возвращаясь к рассмотрению рис. 5.15–5.17, нетрудно понять, что изображенные на них датчики принципиально пригодны и для таких измерений. Особенностью описанных датчиков является наличие подвижных частей, что позволяет с их помощью получать электрический сигнал в ответ на механическое воздействие, и наоборот – механическую реакцию на электрическое воздействие. По этому признаку указанные датчики можно отнести к *нанoeлектромеханическим системам*, рассматриваемым ниже.

Наноэлектромеханические системы

Достаточно давно конструируются и применяются микроэлектромеханические системы (МЭМС), при создании которых используются технологии многослойного напыления, обычные для микроэлектроники. Размеры элементов МЭМС таковы, что они могут встраиваться в микроэлектронные чипы. При этом МЭМС-устройства могут выполнять функции как датчиков, так и исполнительных механизмов. В качестве элемента МЭМС можно рассматривать кантилевер, используемый в атомно-силовом микроскопе.

Разработка наноэлектромеханических систем (НЭМС) является естественным продолжением процесса миниатюризации МЭМС-устройств на основе нанотехнологий. Однако такой переход характеризуется не только уменьшением размеров. Как уже говорилось в разд. 1, при переходе в нанодиапазон растет отношение числа атомов на поверхности элементов к числу атомов в их объеме. В результате существенно возрастает роль

сил трения, молекулярного притяжения и электростатического взаимодействия. Эти особенности используются при создании НЭМС-устройств, некоторые из которых весьма схожи с наномашинами Э. Дрекслера, изображения образцов которых были приведены в разд. 1.

Идеи многих элементов НЭМС заимствованы у живой природы. Действительно, биологические клетки способны совершать как поступательное, так и вращательное движение за счет преобразования ими химической энергии.

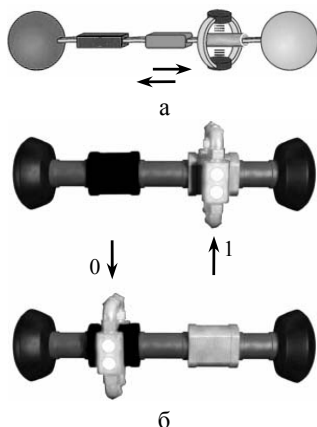


Рис. 5.18. Модель молекулы ротаксана (а) и ячейки памяти на ее основе (б)

При создании элементов НЭМС часто используются органические молекулы. Синтезируются вещества, называемые *ротаксанами*, с молекулами, структуру которых можно представить в виде «оси» с утолщениями на концах, продетой сквозь кольцо (рис. 5.18а). Образования на концах оси, которые называют центрами

распознавания, взаимодействуют с окружающей средой. На них, в частности, могут происходить процессы окисления и восстановления. Чередование этих процессов приводит к перемещению кольца из одного крайнего положения в другое, как это показано на рис. 5.18б. Такое перемещение можно вызывать также, прикладывая к концам оси знакопеременный электрический потенциал или воздействуя на молекулу светом.

Важно, что при смещении кольца изменяются электрические и оптические параметры молекулы. Поэтому описанная структура пригодна для создания на ее основе ячеек памяти и логических элементов, для которых состояния «0» и «1» соответствуют нахождению кольца в крайних положениях на оси (рис. 5.18б).

Если перемещающееся кольцо жестко связать с каким-то конструкционным элементом, получится механический привод (актюатор), один из вариантов которого показан на рис. 5.19. В



Рис. 5.19. Модель актюатора на основе ротаксана

этом устройстве используется более сложная молекула ротаксана, имеющая две кольцевые структуры.

На рис. 5.20 показана модель наномотора, представляющего собой две УНТ с закрепленными на их поверхности в виде зубьев молекулами бензола. Вра-

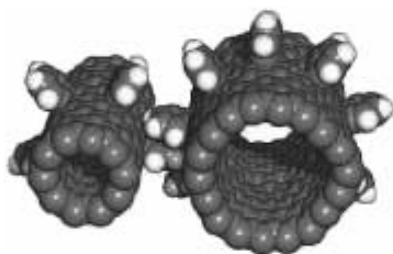


Рис. 5.20. Наномотор

чение трубок происходит за счет электростатического взаимодействия между молекулами.

Сконструированы и испытаны даже своеобразные наноавтомобили, способные перемещаться по поверхности твердого тела. На рис. 5.21а изображена модель наноавтомобиля, находящаяся на образованной атомами поверхности, а на рис. 21б приведена сделанная с помощью электронного микроскопа фотография множества наноавтомобилей.

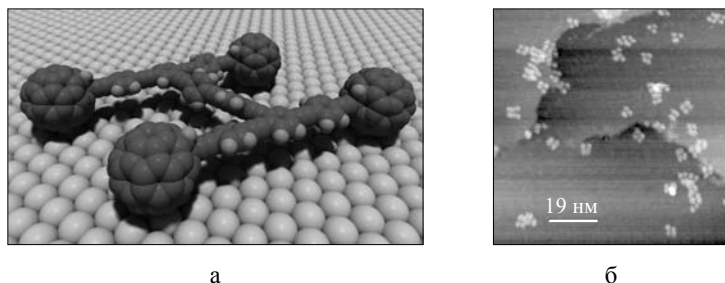


Рис. 5.21. Модель (а) и фотография (б) наноавтомобилей

Весьма интересным механизмом является газовая нанотурбина, построенная основе многослойной УНТ (рис. 5.22). Газовый поток вращает внешнюю нанотрубку, а внутренние остаются

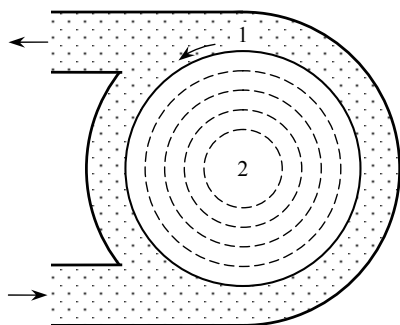


Рис. 5.22. Схема нанотурбины: 1 – вращающаяся нанотрубка; 2 – неподвижные нанотрубки

неподвижными, поскольку сила трения между нанотрубками весьма мала. Такую структуру можно использовать также в качестве насоса, питаемого от источника электроэнергии.

Разработаны наноустройства для управления потоками жидкости в каналах. На рис. 5.23 показана схема нановентили,

построенного на основе кремниевой однослойной нанотрубки, которая выполняет роль канала. Канал перекрывается и открывается под действием изготовленной из кремния консоли с нанесенным на ее поверхность органическим слоем, зарядовое состояние которого меняется в зависимости от химического состава жидкости в управляющем резервуаре. При изменении заряда консоли она изгибается, сдавливая канал, либо возвращается в исходное положение. Разновидностью такого вентиля является конструкция с перегибаемой нанотрубкой.

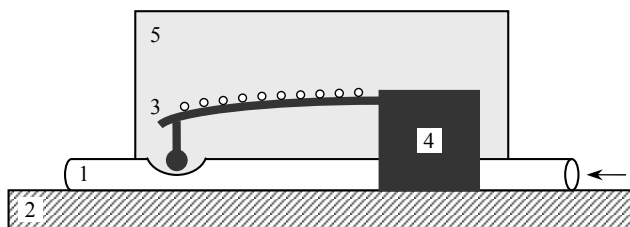


Рис. 5.23. Устройство нановентиль: 1 – нанотрубка; 2 – основание; 3 – консоль; 4 – держатель; 5 – резервуар

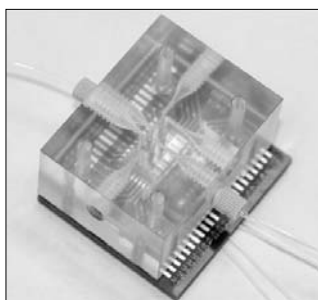


Рис. 5.24. Лаборатория на чипе

Сочетание на одном чипе электронных и электромеханических наноустройств, включая устройства для управления потоками жидкости и газа, позволяет создавать весьма сложные функциональные системы, получившие название «лаборатория на чипе» (*lab-on-chip*). Отличительной особенностью подобных чипов является развитая трехмерная архитектура (рис. 5.24).

Результатом развития рассмотренных конструкторских идей является создание «КА на чипе», относящихся к классу пикоспутников, различные варианты которых уже обсуждаются.

Высокоэффективные элементы систем энергоснабжения космических аппаратов

Топливные элементы

Топливными элементами называют электрохимические источники тока, для работы которых, в отличие от аккумуляторов и гальванических элементов, требуется непрерывный подвод к электродам топлива и окислителя. Электрическая энергия вырабатывается в таких элементах за счет окислительно-восстановительных реакций на внешней поверхности пористых электродов, погруженных в электролит. Вместо жидкого электролита могут использоваться полимерные ионообменные мембраны, не препятствующие перемещению ионов между электродами. Наибольшее распространение получили топливные элементы, в которых в качестве топлива используют водород, а в качестве окислителя – кислород. Продуктом химических реакций в этом случае является вода, выводимая из топливного элемента. Она может использоваться для различных технических нужд.

Водородно-кислородные элементы компактны, имеют малую массу, а их коэффициент полезного действия достигает 60–70%. Кроме того, водородная энергетика является экологически чистой. Эти качества делают водородно-кислородные топливные

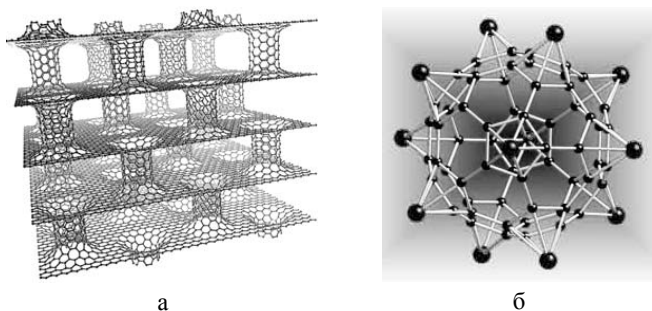


Рис. 5.25. Структура «графен с колоннами» (а) и молекула фуллерена с присоединенными к ней атомами Li (б)

элементы весьма привлекательными для применения в системах энергоснабжения КА. Подобные элементы применялись, например, на американских КА «Аполлон» при осуществлении пилотируемых полетов к Луне в 1968–1972 гг.

Однако при использовании на КА топливных элементов возникает проблема хранения необходимых для их работы газов, особенно водорода. Одним из решений этой проблемы является создание хранилищ водорода на основе углеродных наноматериалов. На рис. 5.25а показана структура, состоящая из слоев графена с разделяющими их УНТ, которая получила название «графен с колоннами» (*pillared graphene*).

Благодаря большой удельной поверхности такая структура способна сорбировать значительное количество водорода. Путем введения в нее атомов Li можно, как показали теоретические исследования, дополнительно увеличить емкость по отношению к водороду, доведя ее до 6–6,5 масс.% при комнатной температуре, что считается очень хорошим показателем. Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют также о возможности создания хранилищ водорода с использованием кластеров, представляющих собой молекулу фуллерена C_{60} с присоединенными к ней 12 атомами Li. Такой кластер изображен на рис. 5.25б, где атомы лития показаны крупными темными шариками, а атомы углерода – мелкими шариками. Расчеты показывают, что данный кластер способен удерживать 60 молекул H_2 .

Фотоэлектрические преобразователи на квантовых точках и углеродных нанотрубках

Несмотря на достигнутые успехи в создании топливных элементов, основными источниками электроэнергии на современных КА остаются солнечные батареи, что стимулирует поиск путей повышения их эффективности. Значительным шагом в этом направлении явилось создание многослойных каскадных фотоэлектрических преобразователей. Такие преобразователи содержат 3–5 *p-n* переходов, сформированных в слоях полупроводниковых

материалов разного состава. Материалы выбираются таким образом, что ближний к освещаемой поверхности слой поглощает коротковолновое солнечное излучение, а по мере удаления слоев от поверхности длина волны поглощаемого излучения увеличивается. В результате достигается более полное использование солнечного спектра и, соответственно, повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей. Например, трехкаскадный преобразователь со структурой GaInP–GaAs–Ge (первым указан ближний к поверхности слой) позволил получить КПД около 35%, что приблизительно в 2 раза выше по сравнению с выпускаемыми промышленностью кремниевыми преобразователями.

Весьма перспективными фотоэлектрическими преобразователями являются преобразователи на квантовых точках, высокая эффективность которых достигается также за счет более полного поглощения энергии солнечного излучения. Но в данном случае это обеспечивается введением в базовую область преобразователя нескольких слоев квантовых точек разного размера. Рост их размеров по мере удаления от облучаемой поверхности влечет за

собой увеличение длины волны поглощаемого излучения. На рис. 5.26 показано устройство такого преобразователя, в базовую область которого, заключенную между слоями p и n -типов (1, 2) введены квантовые точки разных размеров (3), а на внешних поверхностях созданы омические контакты (4), причем облучаемая сторона преобразователя имеет просветляющее покрытие (5).

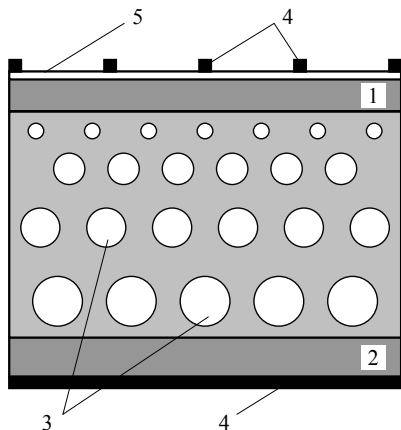


Рис. 5.26. Устройство фотоэлектрического преобразователя на квантовых точках

Возможность плавного изменения размеров квантовых точек и использования для их создания различных материалов (CdTe, CdSe, CuInS₂ и др.) позволяет более точно «подстраивать» создаваемые на разных глубинах слои под длины волн поглощаемого солнечного излучения. Теоретические оценки показывают, что КПД таких преобразователей при их эксплуатации на КА может достигать 60–65%.

Представляют интерес попытки создания тонкопленочных гибких фотоэлектрических преобразователей на основе УНТ. В одной из предлагаемых конструкций используется полупроводниковая пленка из многослойных УНТ, помещаемая на поверхность аморфного слоя Si *n*-типа, который, в свою очередь, нанесен на гибкую металлическую подложку. Пока на образцах подобных преобразователей достигнут КПД лишь 1–2%, однако исследуются возможности повышения их эффективности.

Цилиндрические структуры из нанотрубок, формируемые на лицевой поверхности преобразователей, могут быть использованы для повышения их КПД за счет обеспечения более полного поглощения падающего света. УНТ с достаточно высокой электропроводностью могут применяться в качестве токосъемных элементов преобразователей. В упомянутой конструкции преобразователя пленка из УНТ выполняет и эту функцию.

5.4. Применение наноматериалов в перспективных космических проектах

Все описанные выше наноматериалы и устройства на их основе найдут в той или иной мере применение при разработке перспективных КА и реализации космических проектов XXI столетия. В этом разделе рассмотрим некоторые конкретные примеры использования наноматериалов и нанотехнологий при создании новых образцов космической техники, предназначенной для исследования околоземного и межпланетного пространства, и осуществления перспективных космических проектов.

Новые космические корабли многоразового использования

Внимание специалистов разных стран привлекает задача создания нового поколения космических кораблей многоразового использования, которые должны прийти на смену кораблям *Space Shuttle*, эксплуатируемым с начала 1980-х гг.

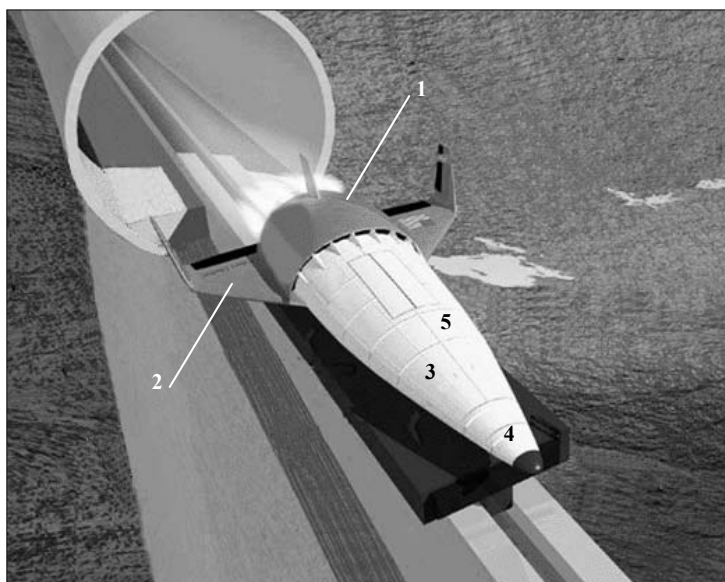


Рис. 5.27. Макет нового космического корабля многоразового использования

На рис. 5.27 изображен макет одного из разрабатываемых новых космических кораблей многоразового использования с обозначением элементов конструкции и систем, характеристики которых могут быть значительно улучшены за счет применения нанотехнологий и наноматериалов. Корабль оснащается кислородно-водородными жидкостными ракетными двигателями (1) с внешним расширением, получившими за рубежом название *Aerospike*. Отличительной их особенностью является наличие в

сопле центрального тела (штыря), обтекаемого сверхзвуковой газовой струей, внешняя поверхность которой взаимодействует с окружающей средой. Такие двигатели пригодны для работы в широком интервале высот в атмосфере Земли, что очень важно при использовании их на космических кораблях, а кроме того, они малогабаритны. Наноматериалы могут применяться для создания как элементов конструкции двигателей (1), так и хранилищ топлива (2).

Внешняя оболочка корпуса корабля, изготовленная с применением интеллектуальных и самоизлечивающихся нанокомпозитов, обеспечит возможность непрерывной автоматической диагностики состояния корпуса и высокий уровень защиты от ударов метеороидов и частиц космического мусора, а также от воздействия космической радиации. Нанокомпозиты будут использоваться и при создании теплозащитных элементов, устанавливаемых в носовой части корабля (4).

В бортовых компьютерах и электронных системах корабля (3), располагаемых внутри корпуса корабля, предполагается широкое использование элементов наноэлектроники. Наряду с уже существующими хорошо апробированными микроэлектромеханическими системами (МЭМС) будут разрабатываться и внедряться наноэлектромеханические системы (НЭМС), некоторые элементы которых описаны выше.

Энергоснабжение корабля обеспечивается с помощью новых высокоэффективных литиевых батарей и топливных элементов (5), при конструировании которых, как было показано, значительную роль могут сыграть углеродные наноматериалы.

По мере развития нанотехнологий будут создаваться все более совершенные материалы с требуемыми свойствами, что позволяет уже сейчас рассматривать концепцию обеспечения с помощью одного экрана, изготовленного из нанокомпозитов, тройной защиты – тепловой, радиационной и противоударной. Эта концепция, получившая в зарубежной литературе название TRIPS (*Thermal, Radiation, Impact Protective Shield*) обсуждается не только в связи с созданием космических кораблей многоразового использования,

но и применительно к аппаратам, проектируемым для освоения Луны и полетов к планетам Солнечной системы.

Новые космические корабли многоразового использования предполагается оснащать своеобразными «черными ящиками», общая концепция применения которых заимствована из авиации. Однако «черный ящик» космических кораблей будет представлять собой фактически малый КА диаметром около 30 см и весом порядка 1 кг (рис. 5.28). Во время полета космического корабля «черные ящики», которых может быть несколько, закреплены на внешней поверхности корабля, а при его посадке на определенном участке траектории снижения они отделяются от корабля и передают по радиотелеметрическим каналам на пункты наблюдения и управления данные о состоянии корабля и экипажа.

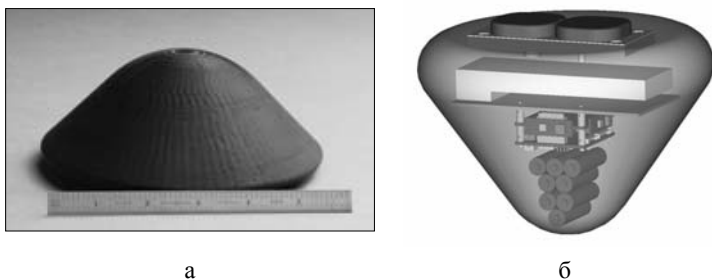


Рис. 5.28. Оболочка (а) и схема расположения оборудования (б) космического «черного ящика»

Такие аппараты, которые согласно классификации, приведенной в разд. 4, следует отнести к наноспутникам или даже к пикоспутникам, предполагается оснастить многочисленными сенсорами, системой записи данных, радиомаяком и радиопередатчиком с необходимыми антеннами, системой ориентации и другими служебными системами. Очевидно, что решить эту задачу без применения нанотехнологий и наноматериалов практически невозможно.

Подобные КА могут быть с успехом применены также при исследованиях Луны и планет Солнечной системы.

Солнечные космические электростанции

Первые проекты создания на геостационарной орбите солнечных электростанций для снабжения энергией наземных и космических объектов путем передачи ее с помощью пучков лазерного или СВЧ-излучения были выдвинуты еще в середине 1970-х гг. Предполагалось, что мощность таких электростанций может достигать 5–10 ГВт. Для сопоставления укажем, что максимальная мощность Красноярской гидроэлектростанции, являющейся одной из крупнейших в нашей стране и в мире, составляет 6 ГВт. Столь мощные космические электростанции должны были иметь солнечные батареи площадью 50–100 км², при этом поперечные размеры всей конструкции оценивались в 20–30 км, а ее масса – в 100 тыс. тонн. Сборку этих огромных конструкций планировалось производить на низкой околоземной орбите, а затем доставлять их на геостационарную орбиту с помощью межорбитальных буксиров, оснащенных жидкостными ракетными двигателями или электроракетными двигателями, которые создают тягу за счет испускания плазменных струй.

Строительство и эксплуатация подобных объектов сопряжены с серьезными техническими, экономическими и экологическими трудностями. Последние возникают в связи с выбросом в околоземную среду большого количества продуктов сгорания ракетного топлива при доставке грузов на низкую монтажную орбиту и при транспортировке собранной станции на геостационарную орбиту, а также в связи с воздействием мощного лазерного или СВЧ-излучения на верхнюю атмосферу и ионосферу Земли.

Достаточно вспомнить, что мощные ракеты-носители «Протон», «Сатурн», *Ariane-5*, стартовая масса которых измеряется сотнями тонн, выводят на низкую орбиту полезный груз в 20–25 тонн, а на геостационарную, используя дополнительную ступень (так называемый разгонный блок), – всего 2,5 тонны. При этом в атмосферу Земли выбрасывается 180–250 тонн продуктов сгорания ракетного топлива (CO₂, H₂, NH₃). Стоимость же доставки на орбиту 1 кг груза составляет около 20 тыс. долларов США.

Применение нанотехнологий и наноматериалов при строительстве космических электростанций позволит преодолеть многие из указанных трудностей. Описанные выше новые фотоэлектрические преобразователи обеспечат необходимую электрическую мощность при значительно меньших габаритах и массе солнечных батарей. Если с применением нанотехнологий удастся создать высокоэффективные гибкие батареи и тонкопленочные излучатели, разворачиваемые на геостационарной орбите, то можно будет значительно снизить трудоемкость и продолжительность этапов сборки электростанции на низкой орбите и последующей ее транспортировки на геостационарную орбиту, а в перспективе – полностью отказаться от них.

В качестве первых реальных шагов на пути создания космической солнечной энергетики рассматривается строительство на геостационарной орбите электростанций в 1000 раз меньшей мощности по сравнению с первыми проектами. Схематическое изображение одной из предполагаемых современных конструкций солнечной космической электростанции показано на рис. 5.29. Сборка подобных электростанций может производиться непосредственно на геостационарной орбите с помощью роботов. Но даже при строительстве на первых этапах электростанций мощностью порядка 10 МВт потребуется доставить на геостационарную орбиту большое количество грузов.

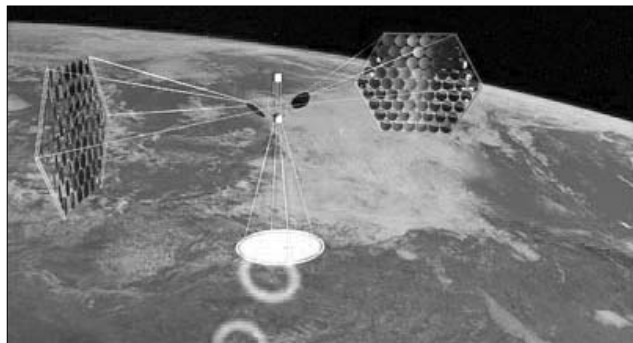


Рис. 5.29. Предполагаемая конструкция космической электростанции

Выше отмечалось, что для геостационарных КА большую опасность представляет их электризация, возникающая за счет взаимодействия аппаратов с окружающей космической плазмой. Конструкции, содержащие крупногабаритные тонкопленочные элементы, могут повреждаться и выводиться из строя не только в результате обусловленных электризацией разрядов, но и за счет появления электростатических сил, способных нарушить конфигурацию объекта.

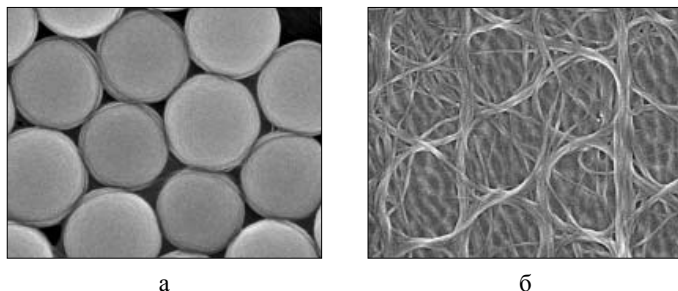


Рис. 5.30. Коллоидный кристалл (а) и сетка из УНТ, остающаяся после удаления коллоидных частиц (б)

Широко применяемым методом борьбы с негативными проявлениями эффектов электризации является обеспечение эквипотенциальности поверхности КА путем нанесения на нее прозрачных проводящих покрытий из окислов индия и олова. В будущем такие покрытия могут быть заменены обладающими большой гибкостью и прочностью прозрачными сетками из УНТ с металлической проводимостью. Уже разрабатываются различные технологии нанесения подобных сеток на подложку. Одна из них заключается в получении коллоидных кристаллов, в которых УНТ располагаются в промежутках между частицами, с последующим удалением частиц (рис. 5.30). Кристаллы получают из суспензии, содержащей взвешенные коллоидные частицы и УНТ. Путем изменения диаметра частиц можно менять размер ячеек получаемой сетки для достижения ее оптимальных оптических и электрических характеристик.

Космический лифт

Хотя применение нанотехнологий и наноматериалов позволяет значительно снизить габариты и массу КА, проблема увеличения грузопотоков на трассах «Земля–Космос» остается актуальной. Поэтому ищутся новые способы доставки грузов на орбиты. Одним из наиболее широко обсуждаемых и реалистичных является проект строительства космического лифта, курсирующего от земной поверхности до геостационарной орбиты. Идея, лежащая в основе проекта, достаточно проста: поскольку геостационарный КА постоянно находится над одной точкой поверхности Земли, то можно протянуть между КА и этой точкой трос, по которому в обоих направлениях будет перемещаться грузовая капсула (рис. 5.31а). Трос растягивается под действием двух противоположно направленных сил: гравитационной и центробежной, первая из которых уменьшается по мере удаления от Земли, а вторая увеличивается. На высоте геостационарной орбиты эти силы взаимно уравниваются, однако для обеспечения необходимого натяжения троса требуется, чтобы

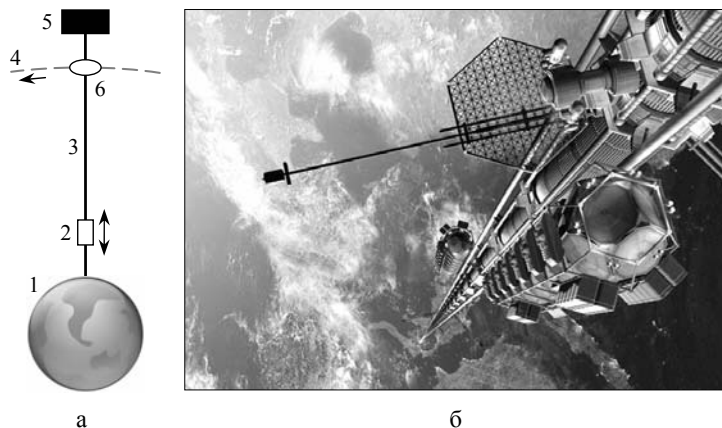


Рис. 5.31. Схема функционирования (а) и один из проектов (б) космического лифта: 1 – Земля; 2 – грузовая капсула; 3 – трос; 4 – ГСО; 5 – противовес; 6 – КА

центробежная сила преобладала. Для этого конец троса с закрепленным на нем дополнительным космическим объектом, выполняющим роль своеобразного противовеса, должен находиться несколько выше геостационарной орбиты. Грузовая капсула, оснащенная служебным и научным оборудованием (рис. 5.31б), будет приводиться в движение с помощью электромоторов или иных устройств, которые могут получать энергию от солнечной космической электростанции.

Возможность создания подобных космических конструкций рассматривалась еще К.Э. Циолковским. Правда, он описал башню, поддерживаемую в устойчивом состоянии действием гравитационной и центробежной сил. Проекты создания космических лифтов с использованием троса стали появляться в 1960–1970-х гг. сначала как научно-популярные публикации, а затем с достаточно серьезным техническим обоснованием. Главной трудностью при осуществлении всех предлагаемых проектов является изготовление троса с требуемой прочностью. Согласно расчетам, стальной трос разорвется под действием силы тяжести при длине 50–70 км. Использование композиционных материалов позволяет увеличить длину троса до 150–300 км. С учетом уравновешивающего действия центробежной силы нагрузка на трос снижается в 4–5 раз, но и этого совершенно недостаточно для решения проблемы.

Надежды ученых и конструкторов здесь вновь связаны с применением УНТ, прочность которых (~100 ГПа) в десятки раз превышает прочность лучших легированных сталей при значительно меньшей удельной массе. Результаты математического моделирования показали, что материал троса космического лифта должен обладать прочностью около 20 ГПа и быть вдвое легче алюминия. УНТ принципиально удовлетворяют этому требованию. Однако для изготовления троса нужно научиться создавать из УНТ, максимальная длина которых пока не превышает 2–3 см, своеобразную пряжу, свиваемую затем в жгуты. Первые образцы таких жгутов уже получены, но их прочность еще далека от прочности самих УНТ. Тем не менее можно ожидать, что техно-

логический прогресс приведет к созданию троса из УНТ с требуемыми прочностными характеристиками.

При всех существующих трудностях, в числе которых нужно особо выделить проблему обеспечения стойкости троса к воздействию ФКП и околоземной среды, включая грозовые явления и ветры в тропосфере, а также помехи, которые трос будет создавать другим космическим объектам и самолетам, и потенциальные опасности, связанные с аварийным обрывом троса, некоторые проекты создания космических лифтов уже финансируются. Суммарные затраты на строительство лифта оцениваются в 10 млрд. долларов США при сроке ввода его в эксплуатацию к 2020 г. Предполагается, что грузоподъемность лифта будет достигать нескольких десятков тонн при снижении стоимости доставки груза на геостационарную орбиту более чем в 100 раз по сравнению с использованием мощных ракет-носителей.

Создание обитаемых баз на Луне

Для обеспечения возможности длительного пребывания людей на Луне и безотказного функционирования техники как внутри лунной базы, так и вне ее, требуется решить проблемы защиты от воздействия радиации, метеорных тел, выбиваемых ими вторичных частиц лунного грунта и лунной пыли (см. разд. 4.4). Наноматериалы и нанотехнологии, безусловно, сыграют важную роль в решении этих проблем, особенно при конструировании защитных скафандров и оборудования, используемого космонавтами при работе на поверхности Луны (рис. 5.32). В данном случае вновь можно говорить о применении создаваемых на основе нанокomпозитов универсальных экранов, обеспечивающих комплексную защиту от воздействия космических факторов, т.е. об использовании упоминавшейся выше TRIPS-концепции создания защиты.

Специфическим для условий пребывания на Луне воздействием фактором являются обсуждавшиеся уже в разд. 4.4

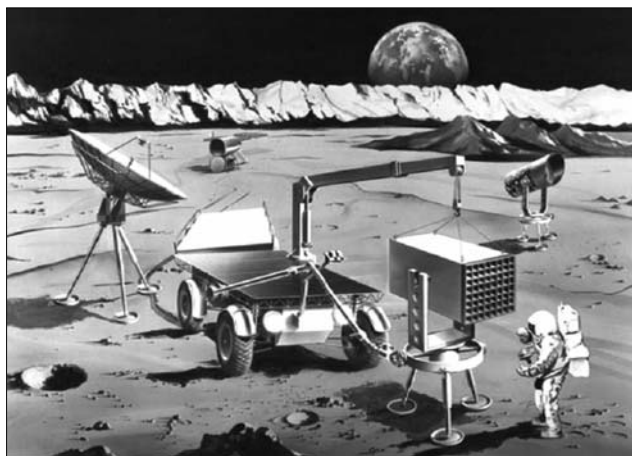


Рис. 5.32. Возможное расположение оборудования на лунной поверхности

низкоскоростные потоки частиц лунной пыли. Оценки показывают, что загрязнение оптических элементов частицами лунной пыли может значительно ухудшать их характеристики. Например, снижение в результате такого загрязнения прозрачности защитных стекол солнечных батарей, используемых для энергоснабжения лунной базы, представляет для них наибольшую потенциальную опасность по сравнению с другими воздействующими факторами (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Оценка деградации солнечных батарей лунной базы за счет действия различных ФКП

Воздействующий фактор	Ожидаемое снижение эффективности солнечных батарей за год, %
Метеорные частицы	0,2–0,3
Вторичные частицы	< 1
Лунная пыль	10–15
Космическая радиация	1,5–2
Электромагнитное излучение Солнца	0,5

Загрязнение пылью может являться также причиной увеличения коэффициента поглощения солнечного излучения терморегулирующими покрытиями лунных аппаратов, снижения электрической прочности высоковольтных изоляторов и абразивного повреждения узлов трения, в том числе повреждения оболочек скафандров в местах сгибов. Во всех перечисленных случаях весьма эффективным может оказаться применение разрабатываемых самоочищающихся покрытий на основе комбинации органических и неорганических микро- и наноструктур, а также пучков УНТ.

Нанотехнологии найдут применение и при создании научного оборудования, предназначенного для использования на Луне. Одним из интересных проектов является строительство на Луне телескопа с жидким зеркалом диаметром до 100 м, отражающая поверхность которого образована пленкой из наночастиц серебра, нанесенной на слой так называемой ионной жидкости.

Идея создания жидких зеркал для телескопов, в основе которой лежит способность жидкости принимать параболическую форму при вращении, не нова и была многократно реализована. Однако практически во всех случаях в качестве отражающей жидкости использовалась ртуть, которая тяжела, токсична и, кроме того, замерзает при -38°C . Предлагаемая в качестве основы зеркала органическая ионная жидкость намного легче ртути, замерзает при более низкой температуре (-98°C), мало испаряется в вакууме из-за сильного взаимного притяжения противоположно заряженных частиц и хорошо удерживает на поверхности серебряную пленку, имеющую высокий коэффициент отражения в инфракрасной области.

Низкая гравитация на Луне способствует получению весьма совершенной формы поверхности зеркала, фокусное расстояние которого можно менять путем изменения скорости вращения жидкости или с помощью магнитного поля, создаваемого встроенным в сосуд с жидкостью электромагнитом. Такой телескоп, установленный на Луне, позволит наблюдать объекты в 100–1000 раз более слабые по сравнению с лучшими оптическими телескопами, устанавливаемыми на КА.

Исследования планет Солнечной системы

При разработке пилотируемого марсианского корабля и автоматических КА для межпланетных полетов проблема обеспечения надежной комплексной защиты экипажа и оборудования от воздействия ФКП остается одной из важнейших. И в этих случаях TRIPS-концепция защиты, реализуемая с помощью наноматериалов, может оказаться весьма плодотворной.

Как показывают результаты расчетов, наиболее эффективно радиационную защиту марсианского космического корабля можно обеспечить с помощью сверхпроводящего электромагнита, отклоняющего заряженные частицы ГКЛ и СКЛ, в сочетании с поглощающими экранами. Использование наноматериалов в такой конструкции позволит значительно уменьшить ее габариты и массу. Безусловно, для обеспечения жизнедеятельности экипажа марсианского корабля на протяжении 2–3 лет полета будет использован весь арсенал новейших средств, создаваемых с помощью нанотехнологий: рассмотренные выше сверхчувствительные газоанализаторы, лаборатории на чипе, средства адресной доставки лекарств и т.д.

При подготовке пилотируемого полета на Марс разрабатываются новые методы и приборы на основе различных наносенсоров для изучения образцов марсианского грунта. Одним из проектов предусматривается даже доставка на Марс атомно-силового микроскопа.

Важным направлением при изучении планет является применение малых КА и роботов различной степени сложности для получения данных об условиях на поверхности планет и в околопланетном пространстве с передачей их в пилотируемый корабль или на Землю. Подобные устройства достаточно давно используются в космонавтике. Однако нанороботы последующих поколений будут обладать значительно более широкими функциональными возможностями. Их можно будет объединять в самоорганизующиеся системы (рис. 5.33), обеспечивающие

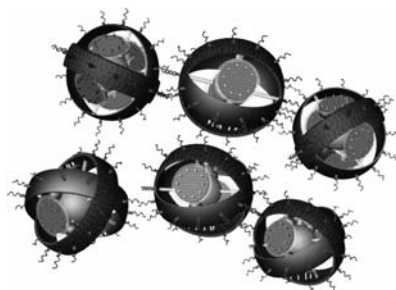


Рис. 5.33. Система нанороботов

информационную поддержку космических миссий, управление полетом КА, подготовку места посадки, обследование и ремонт КА и даже снабжение КА материалами и продуктами, которые могут производиться роботами из окружающих их химических элементов, и выполнение

многих других функций. Несмотря на кажущуюся фантастичность подобных проектов, они вполне могут быть осуществлены в ближайшие 20–30 лет.

6. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА НАНОСТРУКТУРЫ

6.1. Общие принципы моделирования

Внедрение наноматериалов, обладающих принципиально новыми свойствами, в изделия ракетно-космической техники сопряжено с необходимостью всестороннего изучения их поведения в экстремальных условиях космоса. Общий подход к проведению исследований, основанный на сочетании методов лабораторного и математического моделирования с натурными экспериментами, который был рассмотрен в разд. 4.6 применительно к традиционным материалам космической техники, остается наиболее эффективным и для наноматериалов. Однако в случае использования наноматериалов требуется пересмотреть многие физические представления о процессах, вызываемых воздействием ФКП, и создать новые методы исследования этих процессов.

Например, при радиационных воздействиях на наноматериалы и наноструктуры уход продуктов ядерных взаимодействий из области столкновения частиц существенно меняет количество

вещества в рассматриваемой структуре и пространство выделения энергии первичного излучения. Следовательно, в данном случае отчасти утрачивает физический смысл понятие «поглощенная доза» в традиционной его трактовке, и требуется на основании исследования специфики протекающих процессов разработать новые физические понятия и термины, которые могут быть использованы в «нанодозиметрии».

Аналогичные замечания можно сделать в отношении ионного распыления наноматериалов, их распыления нейтральным атомарным кислородом верхней атмосферы Земли, ударного воздействия частиц космической пыли и других процессов.

Очевидно, что в лабораторных установках, предназначенных для исследования воздействия ФКП на материалы, практически невозможно воспроизвести характеристики космической среды в полном соответствии с условиями космического пространства. Так, даже для достаточно грубого воспроизведения характеристик РПЗ необходимо совместное использование электронного и протонного ускорителей на энергии $\sim 1\text{--}10$ МэВ, что является непростой технической задачей. При этом следует учитывать, что ускорители создают моноэнергетические пучки частиц, в то время как в космическом пространстве потоки заряженных частиц характеризуются распределенными энергетическими спектрами (см. рис. 4.4). Разработаны, правда, некоторые специальные технические устройства и методы управления работой ускорителей, позволяющие получать в лабораторных условиях потоки электронов и протонов с заданными спектральными характеристиками. Но их применение еще более усложняет эксперимент и требует значительных материальных затрат.

Поэтому при лабораторном моделировании воздействия космической среды на материалы и элементы оборудования КА вводятся различные упрощения. Обычно на основании тех или иных исходных предположений и сведений о физических механизмах повреждения исследуемого объекта производится выбор одного или нескольких ФКП, оказывающих наибольшее повреждающее воздействие. Испытания проводятся, как правило, ускоренно

при сокращении их длительности в 100–1000 раз по отношению к периоду эксплуатации материалов и аппаратуры в космосе и соответствующем увеличении интенсивности воздействующих излучений. Часто практикуется также применение моноэнергетических источников излучений и замена излучений одних видов другими. Данный подход, помимо выигрыша во времени, дает значительный экономический эффект. Однако он требует знания специфики физических механизмов воздействия ФКП на испытываемые объекты, поскольку недостаточная научная обоснованность ускоренных испытаний и указанных выше замен может привести к получению ошибочных результатов.

По отношению к традиционным объемным материалам, используемым в составе изделий космической техники, описанная методика лабораторных испытаний хорошо отработана, хотя она, безусловно, варьируется в зависимости от типа исследуемых материалов и предполагаемых условий их эксплуатации. Для наноматериалов, свойства которых, как было показано выше, во многом отличаются от свойств объемных материалов, подобную методику еще предстоит создать.

Математическое моделирование воздействия ФКП на наноструктуры, наноматериалы и изготовленные из них элементы конструкции и оборудования КА также имеет целый ряд особенностей. Вызываемые воздействием ФКП изменения свойств материалов определяются структурными параметрами и процессами, относящимися к различным пространственным масштабам: от размеров атомов и молекул до размеров рассматриваемых изделий. При этом для наноматериалов определяющую роль в указанной размерной последовательности играют входящие в их состав наночастицы и наноструктуры. Следовательно, при математическом описании свойств и поведения в условиях космического пространства объектов, созданных с использованием наноматериалов, необходимо принимать во внимание и уметь моделировать процессы, протекающие в наноразмерных структурах, а также выявлять и учитывать в моделях разнообразные связи указанных процессов с процессами, характерными для

других пространственных масштабов. Линейные размеры исследуемых объектов, как было отмечено выше (см. рис. 1.6 в разд. 1.1), находятся в тесной связи с их сложностью, т.е. с числом входящих в их состав атомов, и временными характеристиками протекающих процессов.

Таким образом, в общем случае приходится использовать *многомасштабное (multiscale) моделирование*, основанное на применении некоторой совокупности расчетных методов, размерно-временная иерархия которых представлена на рис. 6.1.

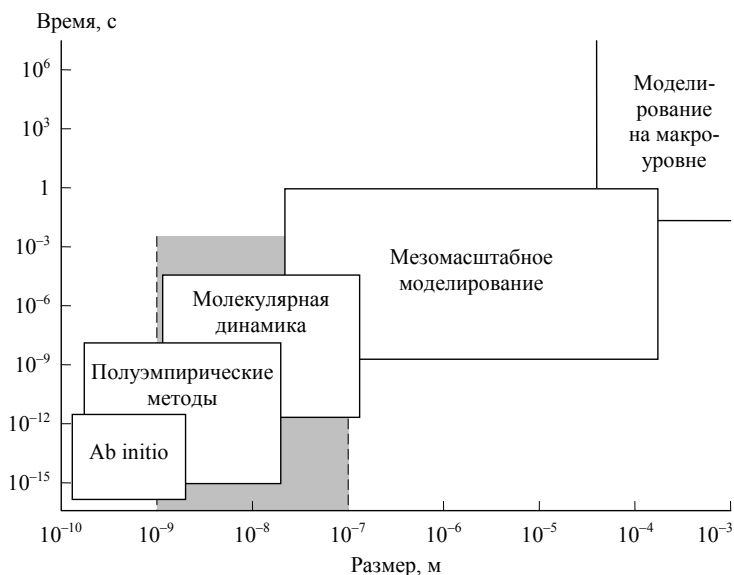


Рис. 6.1. Иерархия расчетных методов при многомасштабном моделировании

К настоящему времени достигли высокого уровня надежности и точности методы, относящиеся к противоположным краям показанного на рис. 6.1 размерного диапазона. Для моделирования процессов и объектов на макроуровне с успехом применяются *методы механики сплошных сред* и различные методы описания и исследования объектов с помощью пространственных сеток.

Методы макро моделирования используются для анализа объектов и явлений с характерными размерами более нескольких десятков микрон при характерных временах протекания процессов от долей секунды до часов и лет. Эти методы основаны на статистических закономерностях и предполагают возможность усреднения параметров расчетов в пределах заданных размеров ячеек.

Одним из наиболее часто употребляемых методов этой группы является *метод конечных элементов*. Этот метод был использован, в частности, специалистами NASA при разработке ряда моделей электризации КА. Применительно к проблеме электризации метод конечных элементов основан на минимизации функционала энергии электрического поля:

$$\chi = \frac{1}{2} \int \left((\nabla U(\mathbf{r}))^2 - 8\pi \rho(\mathbf{r}) U(\mathbf{r}) \right) dV,$$

где $U(\mathbf{r})$ – потенциал в точке, определяемой вектором \mathbf{r} ; ρ – плотность пространственного заряда.

В соответствии с алгоритмом этого метода область интегрирования разбивается на большое число элементов простой формы (как правило, призм или тетраэдров), в каждом из которых используется кусочно-линейная аппроксимация потенциала U . Полученная триангуляционная сетка может быть нерегулярной, состоять из элементов различных типов и иметь весьма сложную форму, отражающую особенности конфигурации КА.

Минимум функционала χ достигается при выполнении условий

$$\frac{\partial \chi}{\partial U_k} = 0,$$

образующих систему линейных уравнений относительно значений потенциала U_k в узлах триангуляционной сетки. Размерность решаемой системы уравнений определяется вычислительными возможностями используемых компьютеров и в настоящее время может достигать 10^5 и более.

В математической модели электризации КА, разработанной в НИИЯФ МГУ, используется *метод интегральных уравнений*,

называемый также *методом граничных элементов*. В этом методе пространственное распределение потенциала описывается интегральным уравнением относительно плотности поверхностного заряда $\sigma(\mathbf{r})$. Для численного решения этого уравнения поверхность КА разбивается на элементы, в качестве которых удобно использовать треугольники. Плотность поверхностного заряда σ_j на каждом элементе считается постоянной. В результате такой дискретизации из упомянутого интегрального уравнения получается система линейных уравнений относительно плотностей зарядов элементов σ_j :

$$\sum_j \mathbf{A}_{ij} \sigma_j = U_i^*,$$

где \mathbf{A}_{ij} – элементы матрицы кулоновского взаимодействия; U_i^* – эффективный потенциал поверхности i -го элемента, определяемый через дипольный момент двойного электрического слоя вблизи поверхности. Решение этой системы позволяет найти потенциалы в каждой точке пространства, положение которой задается вектором \mathbf{r} .

На противоположном краю представленного на рис. 6.1 размерного диапазона – в области $\sim 10^{-10}$ – 10^{-9} м – используются *квантовомеханические методы* расчетов, основанные на численном интегрировании уравнений квантовой механики, в частности, уравнения Шредингера, и не требующее для их использования каких-либо эмпирических предположений. Поэтому такие методы часто называют методами «из первых принципов» (от лат. *ab initio* – от начала). Методами «из первых принципов» обычно удается моделировать системы, содержащие не более 100 атомов.

Для увеличения числа частиц, включаемых в расчетные модели, методы *ab initio* дополняются некоторыми упрощающими предположениями и параметрами, использование которых позволяет сократить объем вычислений. Весьма эффективным является метод *теории функционала плотности* (*density functional theory, DFT*). В этом методе описание исследуемой системы с помощью многоэлектронной волновой функции заменяется ее описанием

через распределение электронной плотности. Значительное сокращение объема вычислений обеспечивается за счет того, что для описания распределения электронной плотности достаточно трех координат, тогда как многоэлектронная волновая функция для системы из N электронов зависит от $3N$ переменных.

Полуэмпирические методы расчетов предполагают использование тех или иных параметров, полученных на основе экспериментальных данных. В числе полуэмпирических методов следует указать часто применяемый метод сильной связи (*tight-binding method*), который предполагает, что электрон, захваченный ионом кристаллической решетки, находится вблизи этого иона достаточно длительное время и практически не испытывает влияния со стороны других ионов. Благодаря этому подходу гамильтониан в уравнении Шредингера может быть параметризован, что значительно упрощает вычисления.

Еще одним широко распространенным полуэмпирическим методом является *метод молекулярных орбиталей*, основанный на описании каждого электрона молекулы своей волновой функцией (молекулярной орбиталью), которая может строиться как линейная комбинация атомных орбиталей. Обычно для оптимизации расчетов учитывается ограниченное число орбиталей (например, в первоначальном виде этот метод предполагал учет только π -электронов). Данный метод наиболее часто используется в *квантовой химии*.

В теории твердого тела достаточно часто применяется *метод псевдопотенциала*. В рамках этого метода предполагается, что основной вклад в формирование характеристик атома вносят валентные электроны, поэтому расчеты производятся только для волновых функций таких электронов. Внутренние электроны и ядро считаются неизменными и представляют собой некий остов, который в целом формирует эффективный заряд. Такое приближение фактически приводит к замене сильного электрон-ионного потенциала довольно слабым псевдопотенциалом, который в интервале энергий валентных электронов дает правильный электронный спектр.

Подобные полуэмпирические методы допускают моделирование систем с числом частиц до 10^3 – 10^4 , при этом, как видно из приведенного выше рис. 6.1, размеры исследуемых объектов частично попадают в нанодиапазон.

Дальнейшее продвижение в сторону больших размеров обеспечивается с помощью методов *молекулярной динамики*, которые позволяют довести размер моделируемых объектов до верхней границы нанодиапазона, а число содержащихся в них частиц – до 10^6 – 10^7 . В основе этой группы методов лежит численное решение уравнений движения частиц в замкнутом объеме, т.е. уравнений не квантовой, а классической механики – уравнений Ньютона. При выполнении таких расчетов важно правильно выбрать потенциал взаимодействия, который определяет силы, действующие между частицами, и оказывает значительное влияние на результаты расчетов.

Трудность математического моделирования наноструктур связана с тем, что они слишком велики (т.е. содержат слишком много атомов) для моделирования с помощью квантовомеханических методов и слишком малы для того, чтобы применять статистические приближения. По указанным причинам еще более трудным является моделирование в *мезодиапазоне*, занимающем промежуточное положение между нанодиапазоном и макродиапазоном. Один из методов мезомасштабного моделирования основан на использовании *решеточных моделей*, в которых частицы исследуемой системы располагаются в узлах правильной пространственной решетки и взаимодействуют только с соседними частицами. Применяются также методы, основанные на решении обобщенного уравнения Ланжевена для движения частиц в среде, методы теории поля и другие.

Для уменьшения объема вычислений как при квантовомеханических расчетах, так и при мезомасштабном моделировании, применяются различные разновидности метода Монте-Карло, с помощью которых численно решаются системы уравнений и вычисляются многомерные интегралы.

При реализации многомасштабного моделирования главной проблемой является передача данных, полученных при моделировании на некотором размерном уровне, в модель более высокого размерного уровня, где они используются в качестве исходных данных (в том числе совместно с другими привлекаемыми данными) при проведении расчетов. Дополнительные сложности возникают в связи с тем, что зависимость макроскопических свойств материалов от особенностей структуры материалов на более низких размерных уровнях и характера процессов, протекающих на этих уровнях, часто оказывается нелинейной или сложно определяемой.

Общие пространственно-временные масштабы области моделирования, диапазоны ее разбиения, используемые на разных уровнях расчетные методы, а также требования к детализации и точности расчетов на каждом уровне выбираются, исходя из конечных задач моделирования и набора параметров исследуемого объекта, которые должны быть получены. Хотя при многомасштабном моделировании используются алгоритмы и методы, сокращающие объем вычислений, для решения задач данного класса необходимы очень мощные компьютеры, относящиеся к классу *суперкомпьютеров*.

В МГУ уже функционируют два суперкомпьютера. Один из них – *Blue Gene/P* – обеспечивает производительность до 28 терафлопс, т.е. $28 \cdot 10^{12}$ операций в секунду, а другой – СКИФ МГУ «Чебышев» – до 60 терафлопс. В самом ближайшем будущем в МГУ предполагается ввести в строй значительно более мощный суперкомпьютер с производительностью до 500 терафлопс (0,5 петафлопс).

Для повышения эффективности использования суперкомпьютеров они объединяются в сети с организацией удаленного доступа по телекоммуникационным каналам. В нашей стране для обеспечения работ в области нанотехнологий создается Грид-система Национальной нанотехнологической сети (ГридННС). Активное участие в ее создании принимают сотрудники НИИЯФ

МГУ совместно с сотрудниками Российского научного центра «Курчатовский институт».

Описанные выше суперкомпьютеры, несмотря на использование при их создании самых современных элементов микроэлектроники, являются весьма крупногабаритными и потребляют



Рис. 6.2. Суперкомпьютер СКИФ МГУ «Чебышев»

значительное количество электроэнергии. Например, суперкомпьютер «Чебышев», часть которого показана на рис. 6.2, размещается в двадцати монтажных шкафах на площади около 100 м^2 и потребляет мощность до 400 кВт. В определенном смысле применение компьютеров с такими габаритами и потребляемой

мощностью является возвращением к конструкциям ЭВМ 20–30-летней давности. Но конечно, производительность тех компьютеров прошлых лет была на несколько порядков ниже. Можно указать для сопоставления, что одна из лучших машин так называемой Единой серии – ЕС 1066, созданная в 1986 г., – имела производительность $4,5 \cdot 10^6$ операций в секунду.

В дальнейшем, безусловно, будет происходить снижение габаритов и потребляемой мощности суперкомпьютеров. Немалую роль в этом сыграет обеспечиваемое нанотехнологиями развитие молекулярной электроники, спинтроники и фотоники с созданием соответствующей элементной базы, обсуждавшейся в разд. 5.

Применение новой элементной базы значительно ускорит практическую реализацию идеи квантовых вычислений, которая активно обсуждается с начала 1980-х гг., и построение на ее основе *квантовых компьютеров* разных типов. Одна из возможностей создания квантового компьютера состоит в использовании в качестве бита информации состояния спина электрона ($\pm 1/2$),

отождествляя с одним из них логический ноль, а с другим – логическую единицу. Поскольку спин является квантовой величиной, описываемой с помощью волновой функции, в процессе вычислений учитываются оба его значения, чем обеспечивается параллельное проведение вычислений. Этим *квантовый бит*, кратко обозначаемый термином «кубит» (*q-bit*), принципиально отличается от классического бита информации. Система из N кубитов находится в суперпозиции 2^N квантовых состояний и позволяет проводить одновременные вычисления для такого числа состояний. Принцип распараллеливания вычислений, изначально заложенный в основу работы квантовых компьютеров, открывает перспективы для достижения чрезвычайно высокой производительности.

Квантовые компьютеры, несомненно, могут быть эффективно использованы в будущих космических проектах XXI столетия, реализация которых сопряжена с необходимостью быстрой обработки больших объемов информации непосредственно на борту КА. Но для подобных компьютеров вопросы воздействия космической радиации и защиты от такого воздействия пока совершенно не изучены и ждут своего решения.

6.2. Примеры результатов моделирования

При проведении теоретического анализа и компьютерного моделирования воздействия ФКП на наноструктуры необходимо располагать программными средствами, позволяющими строить нужные структуры из отдельных атомов и исследовать некоторые их свойства. Существует ряд пакетов компьютерных программ для этих целей, основанных главным образом на расчетных методах квантовой химии и молекулярной динамики. В числе этих программ можно указать пакет *Vienna ab-initio simulation package* (VASP), с помощью которого моделировались, в частности, процессы образования тонких пленок на поверхности твердого тела и исследовались свойства УНТ и фуллеренов.

В настоящее время разрабатываются и уже используются различные программы с хорошо развитым интерфейсом, предоставляющие возможность создавать разнообразные трехмерные структуры из произвольно выбираемых атомов и с помощью подключаемых расчетных модулей определять как их фундаментальные свойства (структуру электронных уровней, концентрацию носителей и т.д.), так и важнейшие эксплуатационные свойства (электропроводность, оптические параметры и др.). На рис. 6.3 приведены в качестве примеров наноструктуры, построенные в программе *Virtual Nanolab*, которая включает в себя расчетный модуль *Atomistix Toolkit*.

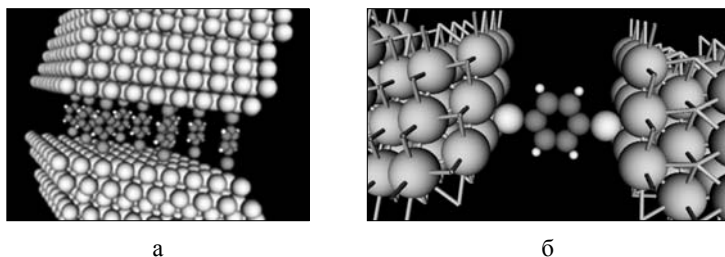


Рис. 6.3. Наноструктуры, построенные с помощью программы *Virtual NanoLab*

Еще один перспективный пакет программ *NanoEngineer* позволяет производить трехмерное моделирование сложных композитных структур и органических молекул (включая ДНК), а также разнообразных наномеханизмов и наноустройств. Например, с помощью *NanoEngineer* легко построить модель наномотора, показанную выше на рис. 5.20. Другие примеры построения подобных структур приведены на рис. 6.4.

Пакет программ *NanoEngineer* позволяет применять при проведении расчетов как *ab initio* методы, так и методы молекулярной динамики. Такой подход дает возможность сочетать достоинства различных методов, используя их для исследования механических, химических и электрофизических свойств построенных трехмерных структур. Например, встроенная библиотека программ МРQC позволяет проводить расчеты «из первых

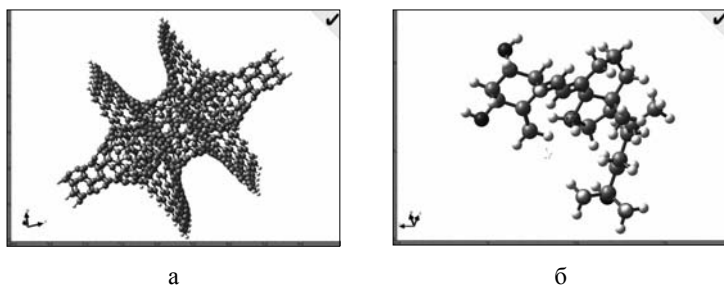


Рис. 6.4. Построение наноструктур с помощью программы *NanoEngineer*: а – элемент наномеханизма; б – сложная органическая молекула

принципов» проводимости структур и распределения электростатического потенциала, а пакет GROMACS, основанный на методах молекулярной динамики, дает возможность моделировать процессы взаимодействия частиц внутри созданных структур и изменение структур под действием внешних факторов.

Программа *Nano-Hive* используется для изучения динамики процессов на уровне атомов и молекул и предполагает совместное использование пакета *NanoEngineer* и различных расчетных модулей. В этой программе реализованы более широкие возможности описания сложных систем и задания условий воздействия на них. Рис. 6.5 иллюстрирует моделирование процесса взаимодействия сложных молекул в трехмерной области.

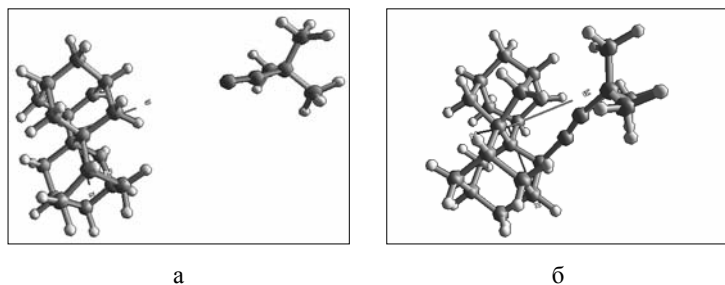


Рис. 6.5. Иллюстрация процесса взаимодействия молекул: а – стадия сближения молекул; б – начало объединения молекул

Модульная архитектура пакетов *NanoEngineer* и *Nano-Hive* позволяет встраивать их в другие программы или использовать совместно с ними. По-видимому, весьма перспективным может оказаться их использование в сочетании с программами семейства CAD, используемыми для автоматизации проектирования, в том числе проектирования КА.

С помощью тех или иных программ проводилось, в частности, моделирование воздействия заряженных частиц на углеродные наноструктуры. Исследованы, например, физико-химические процессы, протекающие в фуллеренах при воздействии протонов с энергией $\sim 2\text{--}7$ эВ. Указанные значения энергий соответствуют частицам холодной магнитосферной плазмы. Для изучения влияния космической среды на наноструктуры необходимо рассматривать процессы, вызываемые частицами и более высоких энергий. Известны результаты моделирования воздействия различных ионов с энергиями до $1\text{--}5$ кэВ на углеродные нанотрубки.

Результаты математического моделирования и экспериментальные данные, которые будут приведены ниже, свидетельствуют о высокой радиационной стойкости УНТ. Для объяснения этого предложена физическая модель, в основе которой лежат представления о менее плотной по сравнению с объемными твердыми телами и анизотропной упаковке атомов в УНТ и адсорбции поверхностью трубки выбиваемых из нее атомов углерода. Миграционные процессы, протекающие на поверхности УНТ, приводят к «залечиванию» радиационных дефектов. Схематически эта модель поясняется рис. 6.6. Вверху слева показана структура однослойной УНТ с образовавшейся вакансией V и атомом углерода A, адсорбированным поверхностью. Справа в верхней части изображены однослойные УНТ (вид вдоль осей) с дополнительными атомами на поверхности и цепочками атомов между УНТ, стрелкой указано направление облучения. В нижней части рисунка изображена схема аналогичных процессов для многослойной УНТ: слева вид вдоль оси трубки до облучения, справа – после него.

В тех случаях, когда необходимо исследовать только роль особенностей конфигурации наноструктур в каких-то процессах, при математическом моделировании можно использовать укрупненные геометрические модели, в которых наноразмерные элементы заменены, например, элементами микронных размеров с сохранением конфигурации структуры. Такой прием позволяет применять при моделировании расчетные методы, хорошо отработанные для микродиапазона.

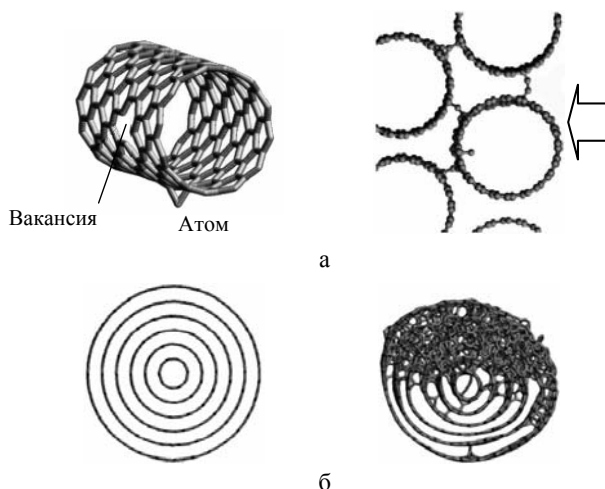


Рис. 6.6. Молекулярная модель облучаемых УНТ: а – однослойная УНТ; б – многослойная УНТ

В НИИЯФ МГУ описанный подход был реализован с помощью основанного на методе Монте-Карло программного комплекса GEANT 3, который был создан в ЦЕРНе – Европейском центре ядерных исследований, где в ближайшем будущем начнет функционировать Большой адронный коллайдер. На рис. 6.7 показаны использованные в расчетах геометрические модели образцов композиционных материалов, в которых в матрицу введены фуллерены (а) и ориентированные различным образом УНТ (б, в). Было выполнено моделирование воздействия на представленные структуры потоков электронов и

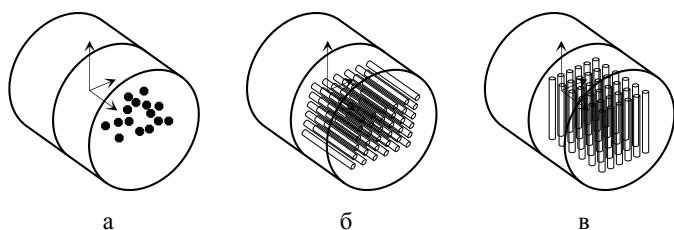


Рис. 6.7. Расчетные геометрические модели образцов нанокомпо-
зитов: а – с фуллеренами; б, в – с УНТ

протонов с характерными для космического излучения энер-
гетическими спектрами и угловыми параметрами. На рис. 6.8
в качестве примера показано полученное пространственное
распределение переданной веществу энергии в одном из образ-

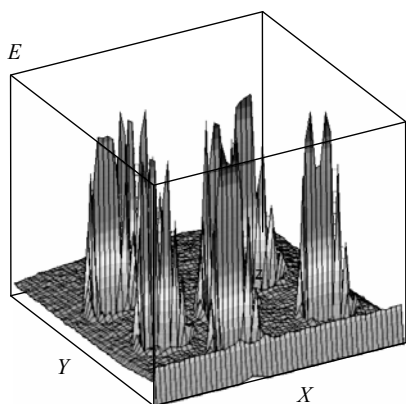


Рис. 6.8. Распределение переданной энергии в образце

цов. Результаты моде-
лирования свидетел-
ствуют об эффектив-
ности использования описан-
ного подхода при изу-
чении закономерностей
воздействия корпуску-
лярных потоков на
наноструктурированные
материалы.

Основываясь на из-
ложенном подходе,
можно при изучении
некоторых аспектов
применения нанострук-
тур использовать даже

математические модели и программные комплексы, предназна-
ченные для макромоделирования. В разд. 1 отмечалось, что с
применением УНТ могут создаваться высокоэффективные авто-
эмиссионные катоды. На рис. 6.9 показан фрагмент структуры,
которая может быть использована для этих целей.

Для достижения максимальной эффективности автоэмиссионного катода необходимо выбрать оптимальные значения длины используемых УНТ и расстояния между ними. Это делается на основании расчета эквипотенциалов электрического поля вблизи УНТ. На рис. 6.10а приведе-

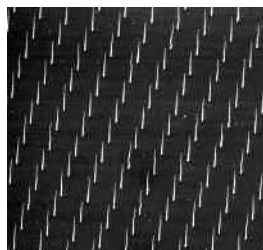


Рис. 6.9. Фрагмент автоэмиссионного катода

ны результаты расчета, выполненного для расположенных вертикально к подложке УНТ, как это показано на рис. 6.9, а на рис. 6.10б – результаты аналогичных расчетов, проведенных для элементов конструкции КА с помощью описанной выше программы анализа электризации НИИЯФ МГУ. Сходство представленных результатов свидетельствует о возможности применения макро моделирования при решении подобных задач.

Накопленные к настоящему времени сравнительно немногочисленные экспериментальные данные по стойкости наноструктур к воздействию ФКП, в частности по их радиационной стойкости, получены на лабораторных установках широкого назначения, поскольку, как уже указывалось, специализированные установки для исследования влияния космической среды на свойства наноматериалов еще только предстоит создать.

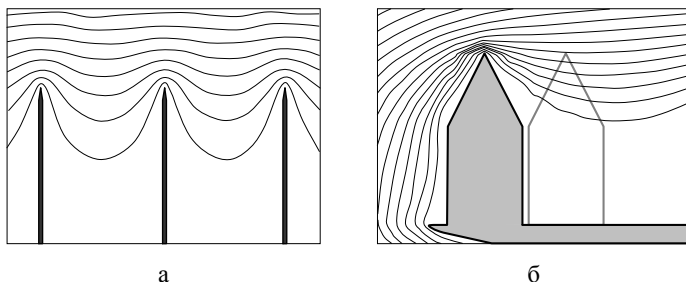


Рис. 6.10. а – структура электрического поля вблизи УНТ; б – результаты расчета структуры поля для элементов конструкции КА

Известны результаты экспериментального изучения воздействия электронов и ионов с энергиями в диапазоне $\sim 10^2$ – 10^6 кэВ на УНТ и нанокompозиты на их основе. В частности, исследовалось возникновение радиационных дефектов в УНТ при облучении их электронами с энергиями до 1,25 МэВ и ионами (He, Ne, Ar, Kr, Xe) до 3 кэВ при флюенсах $\sim 10^{16}$ см $^{-2}$. Были получены данные об образовании дефектов в наноструктурах, в целом согласующиеся с результатами математического моделирования.

Результаты исследования радиационной стойкости системы УНТ, используемой в составе полевого транзистора, к воздействию протонов с энергиями 10–35 МэВ при флюенсах $4 \cdot 10^{10}$ – $4 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ показали, что при таком воздействии исходные характеристики транзистора меняются весьма незначительно. Заключение о достаточно высокой радиационной стойкости нанотранзисторов, используемых в составе Flash-памяти, было сделано также на основании эксперимента по облучению наноструктуры ионами Br с энергией 240 МэВ.

Радиационная стойкость полимерных и композиционных материалов, содержащих наночастицы и нанотрубки, исследовалась при облучении их протонами с энергиями, лежащими в двух диапазонах: 30–200 кэВ и 1–800 МэВ при флюенсах до 10^{16} см $^{-2}$. В обоих случаях было показано, что введение наноструктур существенно повышает радиационную стойкость исходных материалов.

С помощью магнитоплазмодинамического ускорителя НИИЯФ МГУ, позволяющего получать потоки нейтральных атомов O, Xe, Ar и ряда других элементов с энергиями ~ 20 –100 эВ, исследуются потери массы и изменения свойств полимерных и композиционных материалов под действием таких потоков. В частности, была изучена эффективность защиты полимеров от воздействия атомарного кислорода с помощью тонких покрытий, наносимых различными способами. В настоящее время начаты исследования упоминавшегося выше метода защиты материалов путем введения в приповерхностные слои различных наночастиц и наноструктур.

Энергии электронов и ионов, использовавшихся в описанных экспериментах, соответствуют энергиям частиц РПЗ и СКЛ. Приведенные значения флюенсов характерны для достаточно продолжительных полетов КА на различных околоземных орбитах. Поэтому на основании обсуждавшихся данных можно сделать вывод о пригодности исследовавшихся наноструктур и материалов на их основе для применения в составе конструкции КА.

Весьма перспективным материалом для использования при конструировании КА следует, по-видимому, считать графен. Поскольку однослойная УНТ является, как уже обсуждалось, фактически свернутым листом графена, можно полагать, что основные выводы относительно радиационной стойкости УНТ применимы и по отношению к графену. Кроме того, по имеющимся данным графен обладает высокой теплопроводностью и электропроводностью. Эти свойства графена позволяют рассматривать его не только в качестве базового материала для элементов нанoeлектроники, но и как функциональный материал широкого применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космонавтика является одной из наиболее перспективных и масштабных областей применения нанотехнологий и наноматериалов. В ближайшие годы разнообразные конструкционные и функциональные наноматериалы и изделия на их основе будут все шире использоваться при создании новых образцов космической техники, что значительно изменит подходы к конструированию КА и сыграет огромную роль в осуществлении крупномасштабных космических проектов первой половины XXI столетия.

Однако для успешной реализации рассмотренных в настоящем пособии программ развития космических нанотехнологий и внедрения наноматериалов в космическую технику еще предстоит решить целый ряд сложных фундаментальных и прикладных задач, в числе которых важное место занимают задачи, связанные с изучением поведения наноматериалов в условиях космического пространства. Для решения последних необходимо создать физико-математические модели, адекватно описывающие воздействие факторов космического пространства различной природы на наноструктуры, разработать лабораторные установки нового поколения для исследования изменения свойств наноматериалов в космической среде, подготовить и провести космические эксперименты по тестированию наноматериалов и изготовленных из них изделий.

Авторы выражают уверенность, что сегодняшние студенты и аспиранты, которым в первую очередь адресовано настоящее пособие, внесут достойный вклад в решение перечисленных задач и дальнейшее развитие космической техники на основе широкого использования нанотехнологий и наноматериалов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 134 с.
2. Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. Нанотехнологии, 3-е изд. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
3. Л. Фостер. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. – М.: Техносфера, 2008. – 352 с.
4. И.П. Суздалев. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
5. Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. Наноструктурные материалы. Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2005 – 192 с.
6. Н.Г. Рамбиди. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
7. Е.А. Гудилин, Ю.Д. Третьяков. Фундаментальные подходы к развитию нанотехнологий, наноматериалов и подготовке кадров для наноиндустрии. – Альтернативная энергетика и экология, 2008, № 1(57), с. 9–16.
8. Радиационные условия в космическом пространстве. Учебное пособие / Под ред. М.И. Панасюка. – М.: Библион – Русская книга, 2006. – 132 с.
9. Л.С. Новиков. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006. – 120 с.
10. Л.С. Новиков. Основы экологии околоземного космического пространства. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006. – 84 с.

Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына

Лев Симонович Новиков
Екатерина Николаевна Воронина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Учебное пособие

Подписано в печать 20 ноября 2008 г.
Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура: Times New Roman, Futura
Печать цифровая.
Печ. л. 11,75. Тираж 120 экз. Заказ № Т-027

Отпечатано в типографии КДУ
Тел./факс: (495) 939-40-36
E-mail: press@kdu.ru