



Л. Уильямс | У. Адамс

НАНОТЕХНОЛОГИИ

ПУТЕВОДИТЕЛЬ

БЕЗ ТАЙН

Оглавление

Посвящение	11
Об авторах	12
Предисловие	13
Благодарности	16

ЧАСТЬ I. ОТКРЫТИЕ

ГЛАВА 1. Открытие фуллерена	19
В начале всех начал.	20
«Внизу полным-полно места»	26
Графит, алмаз и фуллерены	32
Однослойные углеродные нанотрубки.	33
Вперед!	35
Контрольные вопросы	36
ГЛАВА 2. Наномасштаб	38
Всегда ли следует верить тому, что мы видим	38
Микро- и нано-	38
Размер имеет значение	40
Открытие микромира	43
Подробнее о масштабах	44
Международная система единиц — СИ.	46
Периодическая таблица элементов	47
Биологическая номенклатура	49
Номенклатура нанотехнологий.	49
Контрольные вопросы	50
ГЛАВА 3. Что особенного в наномире	53
Формы углерода	54
Однослойные углеродные нанотрубки.	56
Наностержни	57



Оглавление

Цвет	57
Поверхностная площадь	58
Квантовая механика.	60
Производство	61
Новые продукты	62
Наноботы	63
<i>Контрольные вопросы</i>	65
ГЛАВА 4. Наноинструменты	67
Инструменты для новых открытий.	67
Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ).	69
Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ)	71
Аналитический электронный микроскоп (АЭМ)	71
Сканирующий туннельный микроскоп.	73
Атомно-силовой микроскоп	74
Мультифункциональные микроскопы	76
Лазерный сканирующий конфокальный микроскоп	76
Другие инструменты.	77
Наноинструменты	80
Теория и компьютерное моделирование.	80
<i>Контрольные вопросы</i>	86
<i>Тест к части I</i>	88
 ЧАСТЬ II. «МОКРЫЕ» (ОРГАНИЧЕСКИЕ) ПРИЛОЖЕНИЯ	
ГЛАВА 5. Биология	97
Граница раздела	98
Уотсон и Крик	100
Код ДНК	102
Наблюдение за биологическими структурами и процессами	103
Наблюдение за однослойными углеродными нанотрубками.	104
Биологические наносенсоры	107
Поверхностное натяжение	109
Вязкость.	110
Электрическая кинетика	110
Жидкостная электросиловая микроскопия	111
Влияние на биологический мир	112
<i>Контрольные вопросы</i>	113



ГЛАВА 6. Медицина	115
Методы лечения	117
Кремниевые нанопровода	121
Борьба с раком	121
Биологическая инженерия	127
Самосборка	130
Многофункциональная терапия	131
Нанотоксичность	136
Медицина будущего	136
Контрольные вопросы	137
ГЛАВА 7. Охрана окружающей среды	139
Загрязнение	139
Нанотехнологии в охране окружающей среды	142
Очистка воды	142
Нанотехнологии и государственные приоритеты	148
Факторы риска окружающей среды	152
Международный совет по нанотехнологиям	154
Глядя в будущее	155
Контрольные вопросы	155
Тест к части II	158
 ЧАСТЬ III. «СУХИЕ» (НЕОРГАНИЧЕСКИЕ) ПРИЛОЖЕНИЯ	
ГЛАВА 8. Материалы	167
Умные материалы	168
Производство	171
Нанокристаллические материалы	171
Нанокристаллы	172
Биологические маркеры	176
Сплавы	178
Наноккомпозиты	179
Нанокольца	181
Нанопокрyтия	182
Нанооболочки	183
Катализаторы	185
Микрокапсулы	186
Контрольные вопросы	187



Оглавление

ГЛАВА 9. Электроника и сенсоры	189
Закон Мура	189
Транзисторы	192
Иммерсионная литография	196
Плоскостной транзистор	197
Полевой транзистор	198
Нанотранзисторы.	198
Электронная гонка	199
Главная надежда	202
Единообразие	202
Подвешенные нанопровода	205
Напыленные нанопровода	205
Свойства и применения нанопроводов	205
Квантовые эффекты в наномасштабной электронике	206
Биологические наносенсоры	207
Биологические чипы	208
Контрольные вопросы	209
ГЛАВА 10. Коммуникации	212
Квантовые коммуникации	213
Атомарное позиционирование	216
Влияние размеров	217
Нанооптика	218
Нанолинзы	221
Сети	223
Беспроводные технологии	223
Компьютерная и общественная безопасность	224
Прогресс видеотехнологий	224
Хранение информации	225
Контрольные вопросы	227
ГЛАВА 11. Энергетика	229
Энергия	230
Доступность	233
Эффективность	235
Альтернативные виды энергии	236
Углеродные нанотрубки	244
Будущие исследования	245
Инвестиции	246
Энергетика будущего	247
Контрольные вопросы	248
Тест к части III	250



ЧАСТЬ IV. БУДУЩЕЕ

ГЛАВА 12. Бизнес и инвестиции	259
Игроки	260
Нанопровода	264
Клеточная терапия	265
Наноструйная техника	266
Биологические угрозы	266
Компьютеры	266
Ассемблеры	267
Группа NanoBusiness Alliance	267
Внедрение	269
На что следует обратить внимание в первую очередь	269
Новые и улучшенные инструменты	270
Локальные центры нанотехнологий	272
Международные усилия	272
Программы развития биотехнологий и нанотехнологий	273
Прогнозы на будущее	274
Что стоит посмотреть	275
<i>Контрольные вопросы</i>	275
ГЛАВА 13. Нанотоксичность и общество	278
Нанотехнологии и общество	279
Растворимость и токсичность	280
Образование производных химических веществ	282
Международный совет по нанотехнологиям	283
Устойчивое развитие	284
Окружающая среда, здравоохранение и безопасность	286
Оценка риска	288
Распространение информации	289
Международное сотрудничество	290
Риски и выгоды	291
<i>Контрольные вопросы</i>	292
ГЛАВА 14. Что дальше?	295
Перспективы нанотехнологий	295
Продукты и рынки	296
Патенты	299
Ключевые приложения	299
Производство	300
Медицинские имплантаты	301
Дисплеи	304



Оглавление

Керамика	306
Космические аппараты	313
Оптоэлектронные устройства	314
Инфракрасные сенсоры	314
Космический лифт	315
Геостационарная орбита	316
Как все это осуществить	317
Мир нанотехнологий	318
<i>Контрольные вопросы</i>	321
<i>Тест к части IV</i>	323
<i>Итоговый экзамен</i>	331
Список литературы	349
Русскоязычные ресурсы в Интернете	352
Англоязычные ресурсы в Интернете	352
Ответы на контрольные вопросы к главам	356
Ответы на тесты в конце частей	358
Ответы на вопросы итогового экзамена	360
Предметный указатель	361

Посвящение

Эта книга посвящается Ричарду Э. Смолли (Richard E. Smalley), профессору химии и физики Университета Райс (Rice University). Обладая видением, смелостью и настойчивостью, он подвергал сомнению традиционные представления, пытался объяснить противоречия в природе и естественных науках, искал новые идеи решения глобальных проблем. Многие выдающиеся достижения в сферах медицины, связи, транспорта и энергетики, несомненно, стали результатом этих усилий.

Профессор Смолли ушел из жизни на заключительной стадии подготовки этой рукописи после продолжительной борьбы с раком. Нам будет очень не хватать его проникновенного видения.

Линда Уильямс

Об авторах

Линда Уильямс — автор многих научно-популярных книг по химии, медицине и космонавтике. Она была ведущим специалистом и техническим писателем в НАСА, компаниях McDonnell Douglas и Wyle Labs, а также в Университете Райс. Линда является автором нескольких научно-популярных книг серии «Без тайн» издательства «Эксмо».

Доктор Уэйд Адамс — директор Института нанотехнологий им. Смолли в Университете Райс, автор более 190 публикаций, включая несколько обзоров, а также редактор двух книг.

Предисловие

Эта книга предназначена для всех, кого интересует наномасштабный мир и кто хочет больше узнать об этой увлекательной области науки. Она будет понятна школьникам, студентам и всем любознательным читателям. Материал излагается последовательно, его можно легко усвоить, если читать книгу от начала до конца. Однако если вас интересуют только отдельные темы, например квантовые точки, наноэлектроника, «лаборатория-на-чипе» и т. п., соответствующие главы можно читать независимо от других.

В ходе повествования автор упоминает важнейшие теории и достижения ученых и инженеров в данной области. Эти сведения приводятся, чтобы показать, как вопросы и яркие идеи любознательных людей порой способствовали развитию всего человечества.

Наука основана на любопытстве и желании разобраться в происходящем. Лауреаты Нобелевской премии когда-то были студентами, искавшими новые пути в науке. Они верили, что на самые трудные вопросы должны существовать ответы, и упорно пытались найти их. Ежегодно кинематографистам вручают «Оскары» за выдающиеся достижения в кино, а ученым — Нобелевские премии; с 1901 г. их получили более 750 ученых. Самым молодым лауреатом Нобелевской премии (25 лет) стал физик В. Лоуренс Брэгг (W. Lawrence Bragg) в 1915 г.

Альфред Нобель (Alfred Nobel, 1833–1896) получил 355 патентов за свои изобретения. Он завещал, чтобы после его смерти из оставленных им денег выплачивали премии в пяти областях (химия, физика, физиология и медицина, литература и укрепление мира) «тем, кто в предыдущий год сделал наибольший вклад в процветание человечества». В 1968 г. была учреждена Нобелевская премия по экономике.

Нобель хотел обеспечить признание новаторов и достойное вознаграждение творческого мышления в поисках новых знаний. Автор надеется, что описание открытий, которые изменили понимание сути многих вещей и процессов, послужит для читателя толчком к кон-



Предисловие

центрации собственной творческой энергии для решения важнейших проблем в науке и технике.

В этой книге предлагается общий обзор нанотехнологий с описанием некоторых наиболее важных областей науки, где читатели смогут встретиться с ними. В начале книги объясняются основные термины, понятия, концепции и инструменты, которые чаще всего используются учеными и инженерами для описания нанотехнологий. Все сведения сопровождаются ссылками на полезные интернет-ресурсы, содержащие новейшую информацию о методах и полученных результатах.

В книге приводится большое количество иллюстраций, которые помогут читателям представить себе все, что происходит на «нанотехнологическом фронте». Кроме того, здесь предлагаются задания и вопросы, которые могут встретиться на экзамене, с несколькими вариантами ответа. В конце каждой главы предлагаются несложные контрольные вопросы. Чтобы ответить на них, можно вернуться к содержанию главы, освежить полученные знания и проверить себя. Ответы с правильными решениями находятся в конце книги.

Книга состоит из четырех частей. В конце каждой части предлагается пройти проверочный тест, но теперь уже без помощи книги. Вопросы теста не сложнее вопросов в конце каждой главы. Они предназначены только для того, чтобы подытожить полученные знания. Автор постарался сделать их достаточно интересными и необычными, чтобы позабавить читателей. Если вы дадите более 75% правильных ответов, считайте, что хорошо усвоили материал. Помните, ответы на все вопросы собраны в конце книги.

Вам предлагается финальный экзамен, который содержит более легкие вопросы, чем в конце каждой главы и части. Его рекомендуется пройти после выполнения заданий всех тестов. Хорошим результатом экзамена можно считать правильные ответы на 75% вопросов.

После выполнения тестов и финального экзамена поручите своим друзьям проверить правильность ответов. В таком случае вы не будете знать, на какие именно вопросы дали неправильные ответы, сможете повторить пройденный материал и еще раз попытаться пройти тест. Только после повторного прохождения следует сделать работу над ошибками и попытаться определить пробелы в знаниях.

Книгу рекомендуется читать по одной главе в неделю, либо по одному часу в день, чтобы постепенно перерабатывать полученную информацию. Спешить не стоит, лучше заниматься меньше, но регулярно. Освоение нанотехнологий достаточно просто, но для обу-

Предисловие



мывания прочитанного материала потребуются определенное время. К очередной главе рекомендуется переходить только после освоения материала предыдущей главы.

Тем, кто интересуется влиянием нанотехнологий на окружающую среду и наше общество, несомненно, будет интересно прочитать главы 13 и 14.

После окончания чтения не спешите избавиться от этой книги. Она еще может пригодиться вам в качестве справочного пособия по нанотехнологиям. Ведь книга снабжена предметно-именным указателем и приложениями с указанием наиболее известных аббревиатур, компаний и публикаций в области нанотехнологий.

Линда Уильямс

Благодарности

Иллюстрации для книги были подготовлены с помощью программ PowerPoint и Word от компании Microsoft Corporation.

В книге была использована информация, любезно предоставленная правительственными организациями США: Национальной нанотехнологической инициативой США (National Nanotechnology Initiative — NNI) и Департаментом исследований и развития (Office of Research and Development — ORD) Агентства по охране окружающей среды США (Environmental Protection Agency — EPA) и др.

Автор выражает благодарность доктору Кристен Кулиновски (Kristen Kulinowski), исполнительному директору Центра нанотехнологий в биологии и окружающей среде из Университета Райс за техническое рецензирование и коллективу Университета Райс за иллюстрации для этой книги.

Благодарю доктора Уэйда Адамса, директора Института нанотехнологий Смолли, за исторические сведения и плодотворные обсуждения.

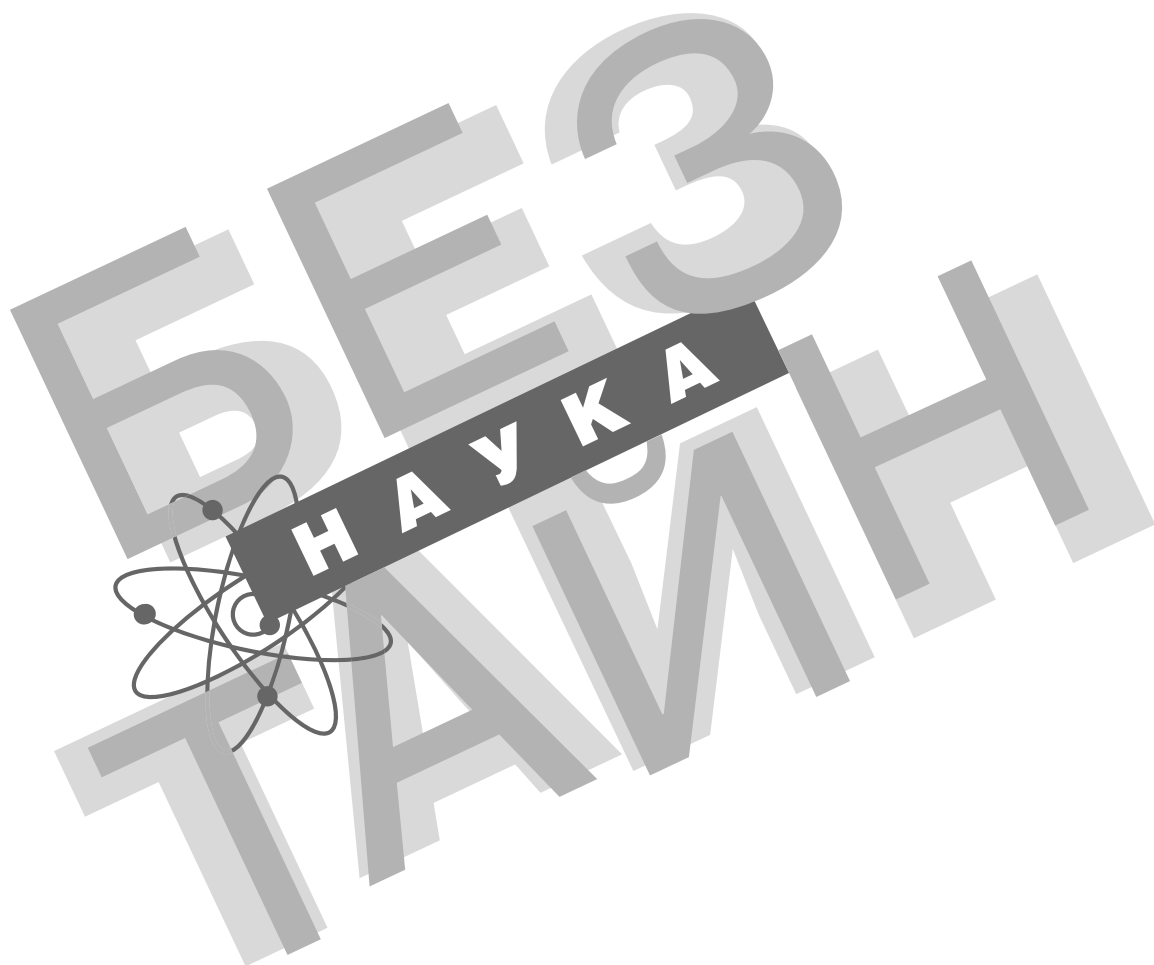
Благодарю Джуди Басс (Judy Bass) из издательства McGraw-Hill за ее поразительную энергию и поддержку, несмотря на все препятствия и жизненные обстоятельства.

Элизабет, Пол, Брин, Эван и Джек, благодарю вас за любовь и поддержку!

Линда Уильямс

Часть I

ОТКРЫТИЕ



Глава 1

Открытие фуллерена

Иногда (раз в сто или даже тысячу лет) человечество открывает или создает нечто, меняющее *все* вокруг. Пещерные жители почуяли новый для них запах дыма и решили исследовать (видимо, после долгого производственного совещания) его источник. Открытие огня перевернуло мир: на смену суши пришли барбекю и шашлыки.

Позже их потомки открыли инструменты из железа, которые были гораздо долговечнее, чем каменные наконечники. Оружие из железа стало предпосылкой завоевания окружающего мира.

Затем были открыты канализация, электричество, автомобили и антибиотики, которые стали неотъемлемой частью жизни большинства развитых стран. Внезапно человечество осознало, что если настойчиво стремиться к какой-то мечте, то ее вполне можно осуществить (если не посвящать в эту мечту бюрократию). Наука и техника совершили такие прорывы, которые считались фантастикой еще несколько десятилетий назад.

Наконец наступила эра высоких технологий: цветное телевидение, компьютеры... Девизом современной науки и техники стало высказывание: «Меньше, быстрее, легче и умнее». Чем больше мы знаем, тем больше хотим узнать. Жажда знаний неутолима, а любопытство безгранично. Все — от квазаров до ДНК — вызывает жгучий интерес.

В настоящее время поиск знаний достиг невероятного накала. Во многом это объясняется открытиями в совершенно новой фантастической области знаний, которую стали называть *нанотехнологией*.

Благодаря нанотехнологиям появилась возможность создавать более быстрые и легкие компьютеры, улучшенные теннисные мячи, прочную ткань, прозрачные солнцезащитные экраны, молекулярные сенсоры и клеточные методы лечения рака. Сейчас нанотехнологии используются в сотнях рыночных продуктов. Многие из них стали результатом улучшения уже существующих технологий, например антивандальные поверхности, антиприлипающие покрытия, но



ЧАСТЬ I Открытие

в ближайшие 10–20 лет нас поразят совершенно новые продукты, созданные на основе нанотехнологий.

В этой книге описываются новые материалы, удивительные приложения и поразительные технологии; возможность их использования появилась в результате научных исследований на наномасштабном уровне. Кроме того, здесь анализируется влияние нанотехнологий на общество: инвестиции, риски, общественное мнение и международная политика.

Устраивайтесь поудобнее и погрузитесь в мир сверхмалых объектов и удивительных процессов — в мир нанотехнологий.

В начале всех начал

В 1897 г. Дж. Дж. Томсон (J. J. Thomson) открыл отрицательно заряженные частицы в трубке с откачанным воздухом, куда он поместил два электрода. Эта трубка получила название *электронно-лучевая трубка*, или *ЭЛТ*. Она использовалась для изучения возбужденных атомов газообразных веществ, когда с помощью электродов через нее пропусклся электрический ток. Таким образом, более ста лет назад были сделаны первые попытки разделения атомов на составные части.

ЭЛЕКТРОНЫ

Во время экспериментов с изучением свечения газов Дж. Дж. Томсон обнаружил, что *электроны* имеют отрицательный заряд и входят в состав всех известных химических элементов. Это была ошеломляющая новость, поскольку до этого различия между элементами были очень расплывчатыми.



Электроны — это крошечные отрицательно заряженные субатомные частицы, которые вместе с положительно заряженным ядром находятся в составе атома.

В 1906 г. Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию по физике «В знак признания заслуг в области теоретических и экспериментальных исследований проводимости электричества в газах». Позже ученые выяснили, что электрон имеет массу $9,1 \times 10^{-31}$ кг и заряд $1,6 \times 10^{-19}$ К.

ЯДРО

Сравнительно недавно ученые установили, что атом является не одним сплошным объектом, а состоит из множества крошечных частиц и более крупного ядра.



В 1907 г. Эрнест Резерфорд (Ernest Rutherford), ученик Дж. Дж. Томсона, развил современную концепцию атома. За эту работу он получил Нобелевскую премию 1908 г. по химии с формулировкой «За проведенные исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ» и рыцарский титул в 1914 г. (кто сказал, что химия неблагоприятное занятие?). Во время экспериментов с радиоактивным ураном в 1911 г. Резерфорд предложил свою модель ядра. Бомбардируя частицами тонкую золотую фольгу, он предсказал, что атомы обладают положительно заряженными ядрами, размеры которых гораздо меньше размеров атома. Вместе со своим учеником Хансом Гейгером (Hans Geiger), который получил всемирную известность за изобретение счетчика Гейгера, Резерфорд обнаружил, что более 99% всех частиц проходят насквозь. И только одна из 8000 частиц отражается от ядра под некоторым углом и даже на 180° . Ученые предположили, что такое отражение происходит, когда частица сталкивается с массивным положительно заряженным ядром.

В ходе дальнейших исследований удалось установить, что ядро состоит из протонов и нейтронов. Каждый протон имеет массу, в 1800 раз превышающую массу электрона, поэтому в ядре сконцентрирована большая часть массы атома. Ядро имеет крошечные размеры и занимает очень малую долю объема атома. На рисунке 1.1 показана структура атома с точки зрения Резерфорда. Вскоре ученые выяснили, что внутри атома электроны не вращаются по орбитам вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца, а размазаны в пространстве, как облака.

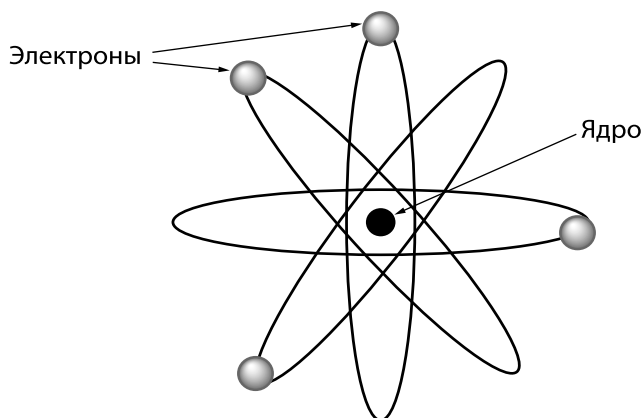


Рис. 1.1. Модель атома Резерфорда



ЧАСТЬ I Открытие

Чтобы представить себе структуру атома, вообразите, что ядро имеет размер мячика для игры в настольный теннис. Тогда диаметр всего атома будет больше 5 км! Точнее говоря, ядро имеет диаметр около 10^{-12} м.

ПРОТОНЫ

Протоны представляют собой крошечные *субатомные* частицы вещества, находящиеся внутри ядра. Как уже указывалось выше, протон обладает положительным зарядом и имеет массу, которая в 1800 раз больше массы электрона. *Атомное число* (Z) элемента определяется количеством протонов в ядре. *Чистым элементом* называется элемент, состоящий из атомов с одинаковым атомным числом.

НЕЙТРОНЫ

Частицы, из которых состоит ядро атома, называются *нуклонами*. Этими частицами являются протоны и нейтроны. Когда ученые обнаружили протоны и посчитали массу ядра на основе их суммы, полученный результат не совпал с вычисленной оценкой общей массы ядра. Чего-то не хватало, и это «что-то» вскоре было найдено. Так открыли нейтроны.



Нейтрон — это не имеющая электрического заряда субатомная частица с массой, приблизительно равной массе протона.

Нейтроны находятся внутри ядра вместе с протонами. В таблице 1.1 приведены массы субатомных частиц атома: электронов, протонов и нейтронов.

Таблица 1.1. Массы субатомных частиц

Частица	Обозначение	Масса
Электрон	e^{-}	$9,110 \times 10^{-28}$ г
Протон	p^{+}	$1,675 \times 10^{-24}$ г
Нейтрон	n	$1,675 \times 10^{-24}$ г

МОЛЕКУЛЫ

Многие вещества, например дерево, камень или мыло, на ощупь кажутся твердыми, но они состоят из множества пустотелых атомов.



Связь, которая удерживает два атома вместе, называется *химической связью*. *Молекула* — это комбинация двух или более атомов, связанных химической связью. *Ковалентной* называется химическая связь, при которой электроны размазаны в пространстве так, что используются всеми атомами молекулы в равной мере (в отличие от *ионной* связи, при которой электроны используются атомами неравномерно).



Молекула — это простейшая структурная единица элемента или вещества, которая состоит из атомов, связанных химическими связями.

Одно из хорошо известных нам веществ состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Как называется вещество? Правильно, вода. Составные части молекулы воды удерживаются вместе с помощью ковалентных связей. Символьная запись комбинации атомов в молекуле вещества называется его *химической формулой*. Формула воды имеет вид H_2O , где H_2 обозначает два (нижний индекс) атома водорода, а O — один атом кислорода. Отсутствие нижнего индекса означает наличие лишь одного атома.

Все молекулы одного вещества одинаковы. Они настолько малы, что даже крупинка вещества содержит огромное количество молекул. Например, в капле воды диаметром около 5 мм содержится 2×10^{21} молекул, то есть около 2000 миллиардов молекул. Если сложить такое же число страниц, стопка протянется от Земли до Солнца (150 млн км) около 600 тыс. раз! Если бы можно было выложить все молекулы (диаметр около 0,3 нм) капли воды в одну линию, то ее длина равнялась бы двум расстояниям от Земли до Солнца!

Указание количества атомов в виде нижних индексов в химической формуле имеет большое значение для определения разных веществ. Ниже приводится несколько примеров простых химических формул.

- хлорид натрия (поваренная соль) NaCl — 1 атом натрия и 1 атом хлора;
- перекись водорода H_2O_2 — 2 атома водорода и 2 атома кислорода;
- этанол $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ — 2 атома углерода, 6 атомов водорода и 1 атом кислорода.

Вещество на Земле может существовать в твердой, жидкой или газообразной форме. Атомы веществ на наноуровне могут образо-



ЧАСТЬ I Открытие

ывать огромное, почти бесконечное, количество комбинаций. Однако ученые обнаружили сравнительно небольшое число элементов и веществ. Причем некоторые внешне разные вещества часто имеют одинаковую химическую формулу. Чтобы отличать формы разных веществ, ученые используют структурные формулы.

ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ФОРМУЛЫ

Химическая формула вещества указывает, сколько атомов разных элементов содержится в каждой молекуле данного вещества. Попробуем сравнить молекулу с автомобилем. Пусть короткий и высокий джип имеет столько же двигателей и колес (то есть аналогов атомов), сколько и длинный и приземистый лимузин. Однако их расположение оказывает существенное влияние на ходовые качества и предназначение обоих типов автомобилей.

Все молекулы вещества имеют одинаковое количество атомов одного элемента, которые соединены химическими связями, возникающими в результате взаимодействия электронов и атомного ядра.

По простой химической формуле сульфата меди (медный купорос), CuSO_4 , можно сказать, что в этом веществе содержится 1 атом меди (Cu), 1 атом серы (S) и 4 атома кислорода (O). В таблице 1.2 приведен перечень некоторых распространенных химических веществ вместе с их химическими формулами.

Таблица 1.2. Химические формулы веществ

Вещество	Формула
Карбонат аммония	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$
Нитрат аммония (аммиачная селитра)	NH_4NO_3
Бензол	C_6H_6
Гидроксид кальция (гашеная известь)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Тетрафторид углерода	CF_4
Алдегид коричный	$\text{C}_9\text{H}_8\text{O}$
Нитрат меди	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$
ДДТ (дихлордифенилтрихлорметилметан)	$\text{C}_{14}\text{H}_9\text{Cl}_5$
Оксид фосфора (III) (фосфористый ангидрид)	P_2O_3
Фтористый метил	CH_3F
Фруктоза	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$
Этан	C_2H_6

ГЛАВА 1 Открытие фуллерена



Вещество	Формула
Оксид галлия	Ga_2O_3
Дихромат лития	$\text{Li}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Хлорид магния	MgCl_2
Этандиовая кислота (щавелевая кислота)	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$
Перекись водорода	H_2O_2
Нитрат калия (селитра)	KNO_3
Хлорид натрия (поваренная соль)	NaCl
Стеарат натрия	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2\text{Na}$
Серная кислота	H_2SO_4
Мочевина	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$



Химическая формула вещества указывает точное количество атомов всех элементов, которые образуют молекулу вещества.

Вода имеет химическую формулу H_2O , селитра (используется для приготовления фейерверков и удобрений) — KNO_3 , а фруктоза (сладкое вещество, которое содержится во фруктах и меде) — $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$.



Структурная формула указывает, как расположены отдельные атомы в молекуле вещества.

Структурная формула показывает положение каждого атома и каждой связи. Обычно в такой формуле атомы обозначаются символами элементов, а связи — черточками. Одна линия представляет два электрона, которые используются в одинарной ковалентной связи, а две линии — четыре электрона в двойной ковалентной связи.



Вещества, которые состоят из молекул с одинаковой химической формулой, но разным расположением атомов в молекуле, называются *изомерами*.

На рисунке 1.2 показана химическая формула $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ и два ее изомера с разными структурными формулами.

Структурная формула указывает точное расположение атомов в молекуле. Эту формулу можно представить как план расположения футболистов на поле в определенных игровых позициях. В раз-



ЧАСТЬ I Открытие

ные моменты игры, например во время атаки, положение игроков может быть разным. Расположение и функции отдельных игроков определяют стиль командной игры. Точно так же расположение и функции отдельных атомов определяют поведение молекулы и физические характеристики вещества, например их способность вступать в химические реакции с другими веществами. На рисунке 1.3 показаны структурные формулы некоторых веществ.

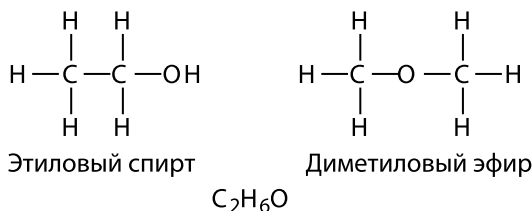


Рис. 1.2. Структурные формулы изомеров

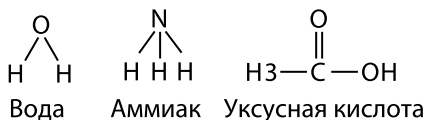


Рис. 1.3. Структурные формулы показывают расположение атомов в молекулах

Ученые исследуют структуру молекул, чтобы определить, как они будут себя вести. Структура молекул также сильно влияет на свойства наночастиц.

«Внизу полным-полно места»

29 декабря 1959 г. профессор Ричард Фейнман (Richard Feynman), лауреат Нобелевской премии по физике 1965 г. «За фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц», выступил в Калифорнийском технологическом институте (США) на Рождественском обеде Американского физического общества в канун 1960 г. с лекцией под названием *There's Plenty of Room at the Bottom* («Внизу полным-полно места»). В ней он рассказал о новой области исследований. Фейнман предложил идею управления отдельными атомами и создания на их основе новых веществ на чрезвычайно малом (субатомном) уровне.



Он поразил аудиторию простой и смелой научной идеей (для того времени и с помощью доступных тогда научных инструментов). Фейнман обратил внимание на высказывания некоторых ученых о том, что все великие открытия уже сделаны, и заниматься наукой уже неинтересно. Физик считал иначе и предложил свои аргументы. Он заявил, что все содержимое Британской энциклопедии *Britannica* можно разместить на булавочной головке.

Фейнман предложил представить каждую букву 6–7 битами информации, а информацию хранить не только на поверхности, но и в объеме. Если для записи каждого бита использовать 100 атомов, то всю информацию из всех книг со всего мира можно будет разместить в кубе с ребром чуть более 0,1 мм. В субатомном мире *действительно* достаточно места.

Физик заявил, что биологам это давно известно. Биологи уже в течение нескольких десятилетий изучали такие объекты, как молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Они знали, что ДНК находится в ядре клетки организма и содержит код структуры этого организма (будь то комар, человек или касатка). И все остальные организмы!

Фейнман сообщил, что биологи уже давно ждут от физиков изобретения нового микроскопа, способного разглядеть в 100 раз меньший объект, чем это возможно сейчас. Как только они получают в свое распоряжение более мощные инструменты, то смогут вплотную разглядеть реакции между отдельными белками. Фейнман описал бесконечные возможности молекулярного мира, который теперь называют *наномиром*. Ученый разбудил воображение коллег, а также дал старт научной гонке в исследованиях молекулярного мира.

Но поднятую Фейнманом тему нельзя назвать абсолютно новой. Еще алхимики стремились изменить химические свойства элементов. Они пытались найти рецепт волшебного «эликсира молодости» и «философский камень» для превращения свинца в золото. Фактически они предпринимали попытки манипулирования не только атомами, но и отдельными их компонентами.

В 1981 г. Герд Бинниг (Gerd Binnig) и Хайнрих Ропер (Heinrich Rohrer) из научно-исследовательской лаборатории компании IBM в Цюрихе (Швейцария) создали *сканирующий туннельный микроскоп* (scanning tunneling microscope), который впервые позволил ученым увидеть отдельные атомы и манипулировать ими. Они обнаружили, что, используя электрическое поле и специальный зонд с крошечным наноразмерным кончиком, можно перемещать отдельные атомы. Вскоре после создания сканирующего туннельного микроскопа был изобретен



ЧАСТЬ I Открытие

атомный силовой микроскоп (atomic force microscope), один из наиболее популярных инструментов эры нанотехнологий. Затем появились идеи создания новых веществ. Появление такого инструмента стало значительным событием и было отмечено Нобелевской премией по физике 1986 г. «За изобретение сканирующего туннельного микроскопа».

В 1989 г. Дон Эйглер (Don Eigler) в Альмаденской научно-исследовательской лаборатории компании IBM в Сан-Хосе, штат Калифорния (США), сложил слово «IBM» из 35 атомов ксенона и сфотографировал его. На рисунке 1.4 показано, как это слово можно сложить из отдельных атомов. Более подробно инструменты нанотехнологий описываются в главе 4.

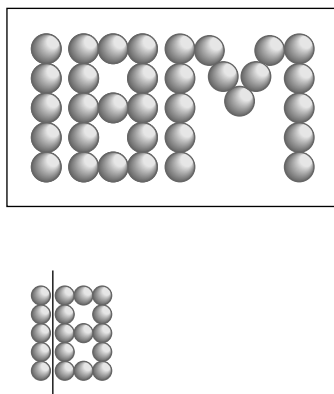


Рис. 1.4. Схема расположения отдельных атомов для создания слова «IBM»

УДАЧА И ИНТУИЦИЯ

В сентябре 1985 г. тремя химиками, Робертом Ф. Керлом, мл. (Robert F. Curl, Jr.), сэром Гарольдом У. Крото (Harold W. Kroto) и Ричардом Э. Смолли (Richard E. Smalley), была открыта новая разновидность углерода C_{60} . Они собрались в Университете Райс для проведения совместных экспериментов, результаты которых поразили весь мир. Ученым помогали два студента: Джэймс Хиз (James Heath), теперь профессор химии в Калифорнийском технологическом институте, и Шон О'Брайан (Sean O'Brien), теперь научный сотрудник компании Texas Instruments в Далласе (США). Поскольку одну Нобелевскую премию присуждают не более чем трем ученым, то Хиз и О'Брайан обрели лишь всемирную славу, а Нобелевскую премию 1996 г. по химии «За открытие фуллеренов» получили Керл,



Крото и Смолли. Эту премию вручили 10 декабря 1996 г. в 100-летнюю годовщину смерти ее основателя.

Новая разновидность углерода получила название *фуллерен* (*fullerene*). Структура фуллерена очень похожа на каркас обычного футбольного мяча, сшитого из лоскутов кожи (рис. 1.5). Фуллерен состоит из 60 атомов углерода. Его структура принципиально отличается от структуры других разновидностей углерода: графита и алмаза. Фуллерен был назван так в честь архитектора и изобретателя Ричарда Бакминстера Фуллера (Richard Buckminster Fuller), который спроектировал и построил первый геодезический купол — полую пространственную стальную сферическую конструкцию из прямых стержней.

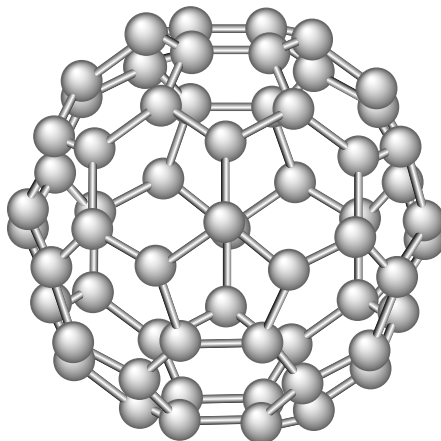


Рис. 1.5. Фуллерен похож на обыкновенный футбольный мяч, сшитый из лоскутов кожи

Открытие фуллерена произошло в результате экспериментов Смолли и Крото с инструментом, который Смолли изобрел для изучения молекул и кластеров атомов. Крото заинтересовала предложенная Смолли методика лазерного испарения. С ее помощью он намеревался проверить свою теорию о поведении углерода в межзвездном пространстве. Крото считал, что богатые углеродом звезды, красные гиганты, способны испускать сложные углеродные соединения, которые можно обнаруживать с помощью радиотелескопов.

Исследователи попытались представить структуру для обнаруженной ими новой разновидности углерода с помощью *масс-*



ЧАСТЬ I Открытие

спектрометра, который способен измерять длины волн излучения и энергии отдельных элементов. Однажды поздним вечером Смолли с помощью бумаги, ножниц и скотча соединил все 60 вершин и получил симметричную замкнутую форму. Полученную молекулу C_{60} стали также называть *бакиболл* (*buckyball*). Графит, наиболее распространенная разновидность углерода, состоит из атомов углерода, которые расположены в двухмерных плоскостях. А в молекуле фуллерена связанные сильными связями атомы углерода располагаются в трехмерном пространстве и образуют замкнутый сферический каркас.

До этого момента ученые считали, что углерод существует только в виде графита или алмаза. Они не могли поверить в существование фуллерена и посчитали открытие ошибкой. Действительно, почему никому раньше не удавалось обнаружить это новое соединение? Многие ученые стали интенсивно исследовать фуллерен, и вскоре стало ясно, что данная молекула существует, и ее открытие имеет огромное значение для науки. Как уже упоминалось выше, за это открытие Смолли, Керл и Крото получили Нобелевскую премию по химии 1996 г. За открытие фуллерена и пропаганду исследований на наномасштабном уровне Смолли (наряду с Фейнманом, Биннигом и Рорером) часто называют одним из отцов нанотехнологий.

ГРАФИТ

До открытия фуллерена наиболее исследованным соединением углерода был графит. Графит состоит из плоских слоев углерода, похожих на колоду игральные карты. Связи атомов в каждой плоскости (карте колоды) чрезвычайно прочны, но отдельные плоскости связаны друг с другом не очень сильно и могут изгибаться и ломаться.

Большинство людей пользовались простыми карандашами с мягкими графитовыми стержнями. Такие карандаши могут писать, потому что при трении о бумагу слои графита отслаиваются и остаются на бумаге.

Отдельные атомы в одном слое графита связаны *ковалентными* связями. Эти связи удерживают молекулы графита вместе и способствуют поддержанию плоской формы слоев. В графите каждый атом углерода связан с тремя соседними атомами сильными ковалентными связями. *Силы Ван-дер-Ваальса* связывают соседние плоскости и удерживают их рядом. На рисунке 1.6 показаны основные типы расположения атомов углерода: плоское (в угле и графите), решеточное (в алмазе) и сферическое (в фуллерене).

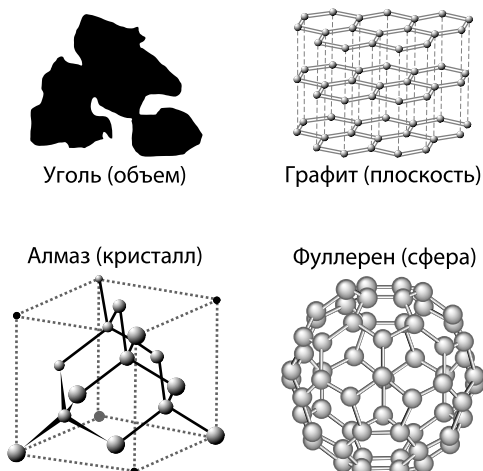


Рис. 1.6. В угле и графите атомы углерода расположены в плоскостях, в алмазе — в объемной кристаллической решетке, а в фуллерене — в сферическом каркасе

Графит часто используется в качестве смазки в некоторых механизмах с трущимися частями: замках, вентиляторах и т. д. Сильные связи между отдельными атомами графита объясняют высокую температуру его плавления. Графит не растворяется в воде и органических растворителях, но способен проводить электрический ток, поэтому не носите карандаши в карманах светлой одежды. Иначе вам придется сделать шокирующее открытие!

АЛМАЗ

До открытия фуллерена самым прочным соединением атомов углерода считался алмаз. Алмазы называют «лучшими друзьями девушек» и... инженеров. Благодаря сильным ковалентным связям каждого атома углерода с тремя соседними атомами они образуют прочную объемную кристаллическую решетку. Алмаз настолько прочен и тверд, что используется для резки, сверления и полировки других материалов в промышленности. Действительно, алмаз — самое твердое тело, которое известно ученым.

Алмаз имеет очень высокую температуру плавления (около 4000 °С), ведь для разрушения кристаллической структуры нужно разорвать все сверхсильные ковалентные связи между атомами. Алмаз, как и графит, не растворяется в воде и других органических растворителях.



ЧАСТЬ I Открытие

Однако алмаз не проводит электрический ток. Дело в том, что все электроны в нем прочно удерживаются между атомами и не могут перемещаться по решетке (представьте себе плотную толпу людей во время многолюдного празднования встречи Нового года на центральной площади города, например в Нью-Йорке, — сильно не подвигаешься).

Люди издавна ценили алмазы за их необыкновенное сияние и блеск. Однако ученых они привлекали своей чрезвычайной твердостью и малой сжимаемостью. Алмазы прекрасно проводят тепло и очень слабо расширяются с увеличением температуры. Они не вступают в реакцию с большинством сильных кислот или оснований. Алмазы прозрачны в очень широком диапазоне: не только для видимого света, но и для ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

ГРАФИТ, АЛМАЗ И ФУЛЛЕРЕН

Многие минералы состоят из атомов и молекул всего одного химического элемента. Геологи различают *металлические* и *неметаллические* минералы. Около 80% химических элементов являются металлами. Например, золото, серебро и медь — металлы. Углерод лежит в основе таких минералов, как графит, алмаз и фуллерен (неметаллы).

Именно упорядочением атомов углерода в алмазе объясняются его удивительные свойства. Действительно, графит, алмаз и фуллерен состоят из одинаковых атомов углерода. Однако алмаз является самым твердым веществом, а графит — одним из самых мягких. Такое различие объясняется разными способами связи атомов. В алмазе каждый атом углерода связан с четырьмя другими атомами, а в графите — только с тремя. В графите атомы углерода образуют конфигурацию, как у молекулы бензола. Они располагаются в плоскостях, которые могут легко проскальзывать друг относительно друга.

Фуллерен похож на алмаз и графит. Он обладает некоторыми характеристиками обоих этих веществ, но лишен их недостатков. С 1990-х гг. ведутся исследования структуры и свойств фуллеренов. Теперь ученым известны не только сферические фуллерены (с 60 атомами), но и овальные (с 70 атомами), типа сосиски (с 80 атомами) и др. Каждое новое открытие давало ответы на прежние вопросы, порождая множество новых вопросов. Ученые определили энергию электронов и измерили электрические токи. Оказалось, что у разных видов фуллеренов они имеют разные значения на молекулярном уровне. Более того, фуллерены вели себя совершенно иначе, чем алмаз и графит. Для исследования фуллеренов пришлось применить более изощренные научные методы.



Однослойные углеродные нанотрубки

В 1991 г. Сумио Ииджима (Sumio Iijima) из Лаборатории фундаментальных исследований компании NEC (NEC Fundamental Research Laboratory) в Цукубе, Япония, обнаружил в саже на углеродном стержне катода дугового разряда *углеродные нанотрубки* (*carbon nanotubes*). На фотографиях, полученных с помощью электронного микроскопа высокого разрешения, были найдены многослойные углеродные нанотрубки, или МСУН (multi-walled carbon nanotubes — MWNT). Оказалось, что они имеют закругленные концы и очень похожи на фуллерены. Но, в отличие от фуллеренов, многослойные углеродные нанотрубки не обладали совершенной структурой на молекулярном уровне.

В 1993 г. Сумио Ииджима и Тошинари Ичихаши (Toshinari Ichihashi) в Японии, а также Дональд С. Бетун (Donald S. Bethune) с сотрудниками Альмаденского научно-исследовательского центра в Сан-Хосе, штат Калифорния (США) почти одновременно открыли однослойные углеродные нанотрубки, или ОСУН (single-walled carbon nanotubes — SWNT). Обе группы ученых описали поведение железа, никеля и кобальта на аноде дугового разряда и образование фуллерена C_{60} в саже на стенках камеры. С помощью просвечивающего электронного микроскопа, ПЭМ (transmission electron microscope — TEM), ученые обнаружили, что сажа состоит из множества однослойных углеродных нанотрубок приблизительно с одинаковым диаметром. Кроме них, в саже нашли также многослойные углеродные нанотрубки.

Тысячи ученых и инженеров до сих пор пытаются разгадать загадку образования фуллеренов, стремятся найти способы их генерации в большем количестве и более чистом виде, а также исследуют их свойства. На рисунке 1.7 показана схема строения углеродной нанотрубки.

Нанотрубки, в зависимости от длины, содержат от тысячи до миллионов атомов углерода. Благодаря своей структуре они могут быть такими же хорошими проводниками электрического тока, как медь, либо полупроводниками, как кремний. Они могут проводить тепло так же хорошо, как алмаз. А поскольку алмаз состоит из атомов углерода, то химики могут создавать связи между ними и атомами других веществ. Благодаря этой способности есть возможность использовать фуллерены и нанотрубки в качестве нового наномасштабного материала в биологических системах и композитах. Теоретики подсчитали, что из нанотрубок можно создать самые прочные волокна в мире, которые почти в 100 раз прочнее и в 6 раз легче



ЧАСТЬ I Открытие

стали. Углеродные нанотрубки и фуллерены являются наиболее удивительным открытием в области материаловедения за последние несколько десятилетий.

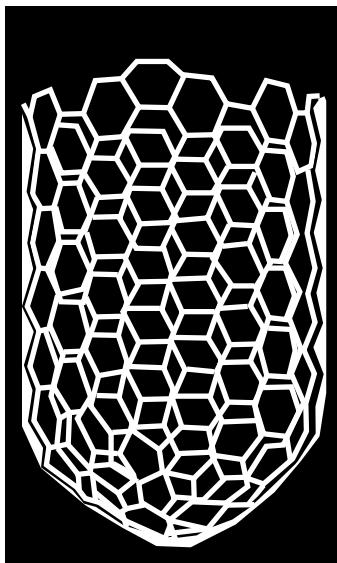


Рис. 1.7. Углеродная нанотрубка

БУДУЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Обучение студентов, аспирантов и докторантов имеет очень большое значение для развития многих областей науки, включая биологию, химию, физику, материаловедение, информатику, электротехнику и т. д. Новые специалисты будут востребованы во многих отраслях промышленности, связанных с применением нанотехнологий при работе с керамикой, полимерами, полупроводниками, металлами, сплавами, катализаторами и сенсорами (подробнее об этом рассказывается в главе 8).

Для освоения нанотехнологий, которые находятся на стыке нескольких научных дисциплин, студентам и аспирантам требуется солидная подготовка в нескольких областях науки. Возможно будущие открытия (например, в медицине и нанокompозитах) приведут к появлению новых предметов в учебных расписаниях, которые потеснят привычные дисциплины.



Вперед!

На рисунке 1.8 показана хроника событий и прогноз развития исследований в области нанотехнологий.

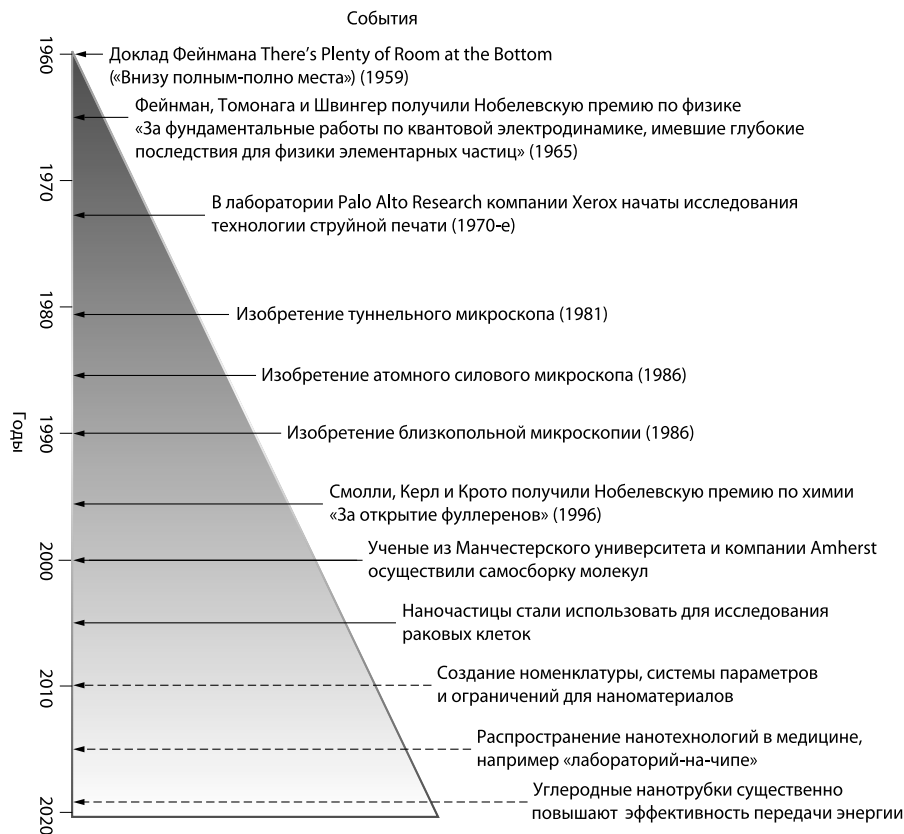


Рис. 1.8. Развитие нанотехнологий

Меньше, быстрее, легче и умнее — вот к чему стремятся ученые, исследуя новые нанотехнологии, которые должны приносить пользу человечеству. Вчерашние мечты сегодня становятся реальностью. Современные достижения нанотехнологов можно сравнить только с переходом наших предков из бронзового в железный век. В следующих главах мы ближе познакомимся с этими поразительными достижениями и технологиями. Вперед!



ЧАСТЬ I Открытие

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В 1985 г. была открыта новая разновидность углерода, которую назвали:
(а) инертный газ;
(б) лантанид;
(в) редкоземельный элемент;
(г) фуллерен.
2. Доклад под названием *There's Plenty of Room at the Bottom* («Внизу полным-полно места») с описанием наномасштаба прочитал:
(а) Ричард Смолли;
(б) Ричард Бэртон;
(в) Ричард Фейнман;
(г) Ричард Пэтти.
3. Нанотрубки могут иметь металлические свойства, сравнимые со свойствами:
(а) латуни;
(б) свинца;
(в) олова;
(г) меди.
4. Некоторые фуллерены имеют форму:
(а) наковальни;
(б) сосиски;
(в) баклажана;
(г) сосульки.
5. Масса протона больше массы электрона:
(а) в 800 раз;
(б) в 1200 раз;
(в) в 1600 раз;
(г) в 1800 раз.
6. Структура всех живых существ (от комара до кита) закодирована:
(а) в коде Морзе;
(б) в радиоволнах;
(в) в ДНК;
(г) в МЭМС (микроэлектромеханической системе).

ГЛАВА 1 Открытие фуллерена



7. В алмазе каждый атом углерода связан со следующим количеством других атомов углерода:
 - (а) 2;
 - (б) 4;
 - (в) 6;
 - (г) 8.
8. Разновидность углерода, похожая на фуллерен, но не обладающая его симметрией, называется:
 - (а) аминокислотой;
 - (б) углеводом;
 - (в) многослойной нанотрубкой;
 - (г) черной сажей.
9. В 1996 г. Нобелевская премия по химии была присуждена за открытие:
 - (а) кварца;
 - (б) фуллерена;
 - (в) урана;
 - (г) полония.
10. Для формирования нанотрубок исследователи используют:
 - (а) железо;
 - (б) уран;
 - (в) калий;
 - (г) бериллий.

Глава 2

Наномасштаб

Всегда ли следует верить тому, что мы видим

Олимпийские чемпионы достигают немыслимых результатов. Фокусники делают невозможное возможным. Кинематографисты с помощью спецэффектов демонстрируют невероятные трюки. Стоит ли доверять глазам? Ученые и инженеры доверяют увиденному своими глазами только после многократных и тщательных проверок. Всему (от движения планет до изменения хромосом летучей мыши) можно поверить, если понять, как это происходит.

В настоящее время технологии развиваются так стремительно, что микроскопический масштаб уже не является пределом. Создание микроскопических механизмов было существенным достижением более 30 лет назад, а сейчас этим никого не удивишь. Невидимые миры, которые можно было только мысленно представлять в прошлом, теперь стали предметом интенсивных исследований с помощью сложных инструментов и динамически развивающихся технологий.

Нанотехнологии — это очень «крутая» область современной науки. Как исследования космоса и Интернет в недавнем прошлом, наномир захватил воображение современных школьников, студентов и ученых. Нанотехнологии теперь играют важную роль даже для финансистов, которые планируют свои инвестиции. Новые технологии обычно означают появление новых продуктов и способов получения доходов. Потому сегодня инвесторы и политики также интересуются открытиями в наномире.

Микро- и нано-

Совсем недавно микроскопические размеры считались самыми маленькими из известных человеку. Люди научились создавать микрофоны и микроскопы, исследовать микроорганизмы и микропроцессы. С каждым годом мобильные телефоны и микропроцессоры



становятся все мощнее и меньше. Однако современная микроэлектроника почти достигла своего теоретического предела. Для достижения большей мощности и скорости вычислений необходимо переходить на совершенно новые технологии. Современные микропроцессоры стали такими крошечными и мощными, что во время работы могут перегреться и сгореть. Как же спасти положение?

Ответ прост: мир спасут нанотехнологии! Нанонаука занимается изучением чрезвычайно малого мира — мира атомов и молекул.



Нанометр (нм) — это одна миллиардная метра, то есть 10^{-9} м.

Частицы считаются наночастицами, если одно из их измерений меньше 100 нм. Приставка «нано» означает «одна миллиардная часть». В таблице 2.1 для сравнения приведено несколько примеров объектов разного размера. Обратите внимание: если представить себе, что золотая наноскорлупа (наночастица, которая подробно описывается в главе 6) имеет размер бильярдного шара, то рост человека можно приравнять к самой высокой вершине мира, Эвересту, то есть около 8848 м!

Таблица 2.1. Размеры некоторых объектов

Объект	Размер (в м)
Ядро урана (диаметр)	10^{-13}
Молекула воды	10^{-10}
Молекула ДНК (ширина)	10^{-9}
Протозоа (простейший одноклеточный организм)	10^{-5}
Дождевой червь	10^{-2}
Человек	2
Эверест (высота)	10^4
Земля (диаметр)	10^8
Солнечная система (расстояние от Солнца до Плутона)	10^{13}

Молекула с количеством атомов от 2 до 25 обычно имеет радиус в диапазоне от 1 до 10 нм. По определению молекула имеет более одного атома. Наименьшей молекулой является молекула водорода — H_2 . Многие биологические молекулы, например ДНК, гораздо больше молекулы воды, поскольку содержат намного больше атомов. Наночастица может содержать от 50 до 200 000 атомов, а потому ее размеры варьируются в пределах от нескольких нанометров до сотен нанометров. Бактерия имеет размер около 100 нм, а красное кровяное тельце — 6000 нм. Размер наименьшего элемента современной микросхемы — около 130 нм.



ЧАСТЬ I Открытие

Новые технологии и методы манипулирования отдельными атомами, молекулами и наночастицами позволяют создавать или изменять структуру окружающих объектов — от раковых клеток до нанокomпьютеров. Все только выиграют от внедрения новых открытий в области нанотехнологий. Главное отличие наноинструментов (наноразмерных пинцетов, линз, магнитов и электрических схем) от обычных лабораторных приборов (например, мензурок и горелок Бунзена) — их размер или масштаб.

Самая большая в мире модель нанотрубки

Самые маленькие объекты, которые способен разглядеть человек, имеют размер около 10 000 нм (ширина дорожек на материнской плате компьютера). Никто не может разглядеть наночастицы или нанотрубки невооруженным глазом, без помощи сканирующего электронного микроскопа. Настолько малы они на самом деле!

Чтобы визуально представить столь крошечные объекты, более 100 сотрудников и студентов Университета Райс решили воспроизвести однослойную углеродную нанотрубку шириной 0,7 нм и длиной 700 нм в увеличенном виде. 22 апреля 2005 г. они с помощью 65 тыс. пластиковых деталей из химических наборов для моделирования структуры молекул создали самую крупную модель углеродной нанотрубки (рис. 2.1). Длина модели равнялась 1180 футам (более 350 м), то есть больше, чем высота самого высокого небоскреба в Хьюстоне (США). Таким образом, был установлен новый мировой рекорд для модели нанотрубки, занесенный в книгу рекордов Гиннеса. Если бы сотрудники и студенты Университета Райс создали полную модель нанотрубки, длина которой равна 5 см, она растянулась бы на 15 тыс. миль (более 24 тыс. км)!

Теперь не только студенты и ученые, но и все остальные поражаются тому, насколько *крупными*, то есть *длинными*, могут быть столь малые объекты! Кушочки этой модели можно увидеть в постоянной экспозиции в Музее естествознания Хьюстона.

Размер имеет значение

На греческом языке слово *нано* означает «карлик», а в науке приставка *нано-* означает «одна миллиардная часть», то есть нанометр (нм) — это 10^{-9} м, а наносекунда (нс) — 10^{-9} с. За одну наносекунду свет проходит расстояние около 30 см.



Рис. 2.1. Самая длинная модель нанотрубки, которая занесена в Книгу рекордов Гиннеса

В 1670 г. Габриэль Мутон (Gabriel Mouton) предложил метрическую систему, которая была принята Правительством Франции в качестве стандартной системы единиц измерения в 1795 г. Метрическая система является десятичной, то есть все единицы измерения в ней связаны множителем 10. Для сравнения: 1 метр приблизительно равен 40 дюймам, а 1 килограмм — 2 фунтам, где дюйм — это единица длины, а фунт — единица массы в Британской системе единиц измерения, которые очень популярны в США, Великобритании и некоторых других странах мира.

В таблице 2.2 перечислены некоторые приставки, которые используются в названиях единиц измерения метрической системы.

Наночастицы так малы, что их нельзя разглядеть. Удивительно, как при этом ученым удается наблюдать их и работать с ними.



Нанометр равен одной миллиардной части метра, а толщина волоса человека в среднем равна 80 тыс. нм.

Ученые обнаружили, что в наномасштабе размер действительно имеет значение! Размер атома водорода — примерно 0,1 нм, потому



ЧАСТЬ I Открытие

в одном нанометре помещается около 10 атомов. (Учтите, что атом водорода — это самый маленький атом.) Но такой субатомный мир невозможно разглядеть невооруженным глазом из-за крошечных размеров.

Таблица 2.2. Приставки метрической системы

Приставка	Множитель	Полная запись множителя	Название
экса (exa)	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000	квинтиллион
пета (peta)	10^{15}	1 000 000 000 000 000	квадриллион
тера (tera)	10^{12}	1 000 000 000 000	триллион
гига (giga)	10^9	1 000 000 000	миллиард
мега (mega)	10^6	1 000 000	миллион
кило (kilo)	10^3	1000	тысяча
	1	1	
милли (milli)	10^{-3}	1/1000	тысячная
микро (micro)	10^{-6}	1/1 000 000	миллионная
нано (nano)	10^{-9}	1/1 000 000 000	миллиардная
пико (pico)	10^{-12}	1/1 000 000 000 000	триллионная
фемто (femto)	10^{-15}	1/1 000 000 000 000 000	квадриллионная
атто (atto)	10^{-18}	1/1 000 000 000 000 000 000	квинтиллионная

Ученые говорят, что в наномасштабе размер имеет значение, потому что свойства наночастиц существенно отличаются от свойств более крупных сплошных материалов. Эта разница объясняется двумя причинами.

Во-первых, наночастицы имеют гораздо большую удельную площадь, то есть величину площади частицы, которая приходится на единицу ее объема. Действительно, общая поверхность горсти металлических опилок гораздо больше бруска металла той же массы. Поскольку химические реакции между твердыми телами происходят на их поверхности, то большая поверхность означает более высокую скорость реакции.

Во-вторых, чем меньше частицы, тем заметнее изменения их магнитных, оптических и электрических свойств.

Наночастицы — большие любители «потусоваться», поскольку они способны быстро вступать в реакцию друг с другом без обременительного «багажа», который замедлял бы их. Размер также влияет



на цвет. С помощью наночастиц разного размера и цвета можно создавать целую радуу цветов. Все эти особенности позволяют совершенно по-новому использовать наночастицы.

Наночастицы невозможно было наблюдать ранее, поскольку не существовало инструментов для их поиска, изучения и управления ими. Современные ученые способны видеть гораздо больше своих предшественников. С помощью микроскопов и других инструментов высокого разрешения сегодня можно изучать структуру и свойства самых крошечных объектов.

Открытие микромира

Еще несколько столетий назад люди считали, что мыши порождаются зерном, поскольку мышей всегда можно было найти в зерне. Если зерно убрали, исчезали и мыши. До 1665 г. тайна происхождения мышей (а также причина появления плесени на сыре и гниения мяса) оставалась неразгаданной. Однако именно в этом году Роберт Гук (Robert Hooke) в своей книге *Micrographia* опубликовал первые рисунки микроорганизмов.

В молодости Гук, сын английского священника, жившего на острове Вайт, больше интересовался рисованием и созданием механических устройств, чем выполнением домашних заданий. На самом деле учиться по-настоящему Гук начал в колледже в Оксфорде. Он тратил много времени на изучение биологии и математики, пытаясь понять, как работают многие вещи. Для более серьезного исследования Гуку нужно было тщательно изучать самые мелкие детали объектов. Поэтому неудивительно, что он постоянно пользовался увеличительным стеклом, а спустя какое-то время изобрел микроскоп. С помощью микроскопа Гук смог впервые рассмотреть крошечные пустоты внутри пробки, которые он назвал клетками по аналогии с маленькими комнатками монахов в монастыре.

В главе *Observation XVIII* своей книги *Micrographia* Гук писал: «Я явно убедился в том, что [пробка] полностью пронизана порами, как соты, но эти поры не так регулярны, как соты... эти поры, или клетки... действительно первые микроскопические поры, которые мне удалось наблюдать». Гук впервые изобразил мельчайшие детали мошек, морских губок и окаменелостей.

Ученый изобрел несколько совершенно новых научных инструментов: барометр, пружинный балансир для наручных часов, универсальный шарнир и телескоп-рефлектор.



ЧАСТЬ I Открытие



Закон Гука гласит, что удлинение пружины пропорционально приложенной к ней силе.

Антони ван Левенгук (Antony van Leeuwenhoek), голландский торговец и сын корзинщика, также обладал талантом изобретателя. Он научился шлифовать линзы и создал микроскоп с увеличением объектов в 200 раз. Благодаря такому микроскопу Левенгук смог рассмотреть структуру волос и других объектов; но он не обладал художественным талантом, чтобы изобразить их самостоятельно, поэтому нанял художника, который смог мастерски изобразить его находки. В 1674 г. Левенгук впервые рассмотрел структуру водорослей *Spirogyra*, изучая образцы воды из пруда.

Левенгук был настолько любознательным, что взялся исследовать налет на зубах своей жены и детей. Эти исследования ничего не дали, поскольку его семья регулярно чистила зубы и содержала их в чистоте. Тогда он решил взять пробы налета у двух стариков, «которые никогда в своей жизни не чистили зубы». Так Левенгук стал первым ученым, которому удалось наблюдать живых бактерий под микроскопом.

В 1683 г. в письме, адресованном Королевскому научному обществу в Лондоне, Левенгук описал бактерию как «невероятно большое собрание живых крошечных организмов, которые способны плавать гораздо проворнее, чем все, что мне приходилось видеть прежде». Биологические опыты Левенгука считаются одними из самых первых точно проведенных и детально описанных научных исследований.

Сегодня ученые могут наблюдать гораздо больше, чем Гук, Левенгук и другие первые исследователи микромира. Современные инструменты высокого разрешения позволяют изучать структуру и свойства поистине крошечных организмов и частиц.

Подробнее о масштабах

Итак, напомним, что нанометр — это одна миллиардная метра, или 10^{-9} м. Представьте себе ребенка, который смотрит на гору высотой примерно в тысячу (1000) раз больше его. Муравей на ноге ребенка тоже приблизительно в тысячу раз меньше его. А бактерия на теле муравья в тысячу раз меньше муравья и примерно в миллион (1 000 000) раз меньше ребенка. Наконец, молекулы сахара, которыми питается бактерия на муравье, крадущемся по ноге ребенка, примерно в миллиард (1 000 000 000) раз меньше ребенка.



Как видите, размеры молекулы сахара и бактерии отличаются в 1000 раз, бактерии и муравья — в 1000 раз, муравья и ребенка — в 1000 раз. Иначе говоря, наноразмерная молекула равна примерно одной миллиардной ($1/1\,000\,000\,000$) доле привычных для нас размеров. Современные ученые научились работать с объектами и процессами именно в таком масштабе!

СТАНДАРТЫ

Наблюдения и измерения являются ключевыми компонентами науки и техники. Ученые в научных исследованиях, как и в остальных сферах человеческой деятельности, проводят измерения на основе установленных единиц измерения. Достижения спортсменов-прыгунов измеряются в метрах и сантиметрах, а результаты горнолыжников — в десятых долях секунды. Для выполнения точных измерений используются общепринятые стандарты длины, массы, времени, температуры и других величин. Без них было бы очень трудно сравнивать измерения, выполненные разными учеными в разных лабораториях.

Например, как сравнить результаты конных скачек, если точно не определены понятия *длина* и *время*. Конечно, можно было бы считать размер лошади единицей длины, но ведь лошади бывают разной длины, и для точной оценки результатов такое определение не годится.

Научные и инженерные инструменты и измерения должны иметь очень строгие стандарты, и должны быть точные единицы измерений. Например, в научном эксперименте ошибка в составе химических реагентов может привести к ошибочному результату, то есть к получению совершенно другого продукта. Аналогично шестеренки механизма должны быть очень точно сделаны, чтобы обеспечить необходимую четкость работы всего механизма.



Эксперимент — это строго контролируемая проверка свойств изучаемого объекта на основе тщательно измеряемых и записываемых наблюдений.

Научные исследования непосредственно связаны с измерениями и сравнениями. Для воспроизведения эксперимента или метода, предложенного другими исследователями, ученому нужно использовать те же единицы измерения. Представьте себе, что ученый в Нью-Йорке измеряет объем жидкости в чашках, а ученый в Германии — в миллилитрах. Как сравнить полученные результаты? Для этого нужно использовать общую систему единиц измерения.



ЧАСТЬ I Открытие

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ — СИ

В 1960 г. на Генеральной конференции по мерам и весам была принята *Международная система единиц*, или *СИ* (International System of Units — SI). В 1965 г. Великобритания официально признала эту систему, а США остаются среди немногих стран, которые официально ее еще не приняли, хотя используют с середины XIX века. В Международном бюро мер и весов в Севре (Франция) хранится официальный платиновый стандарт (эталон) единицы измерения массы.

Такая единая система мер и весов позволяет ученым точно сравнивать результаты своих исследований с высокой надежностью и достоверностью. В настоящее время аналогичные стандарты жизненно необходимо использовать и в области нанотехнологий. Метрическая система единиц измерения уже используется, но ученым еще предстоит выработать стандарты безопасного использования нанотехнологий на производстве и в быту, предельно допустимых уровней распространения наноразмерных объектов в окружающей среде и т. п.

НОМЕНКЛАТУРА

В научном мире принята единая система именования (или *номенклатура*) объектов и процессов. Например, в химии используется химическая номенклатура для описания специфических химических соединений.



Химическая номенклатура — стандартизированная система имен, которые присваиваются химическим веществам.

Для химических элементов издавна используются сокращения на основе латинских символов, поскольку для написания полных названий элементов в составе вещества потребовалось бы много бумаги, а для их произнесения — много времени. Например, известный инсектицид ДДТ имеет формулу $C_{14}H_9Cl_5$ и полное название «дихлордифенилтрихлорметилметан». С другими примерами длинных полных названий химических элементов мы уже имели возможность познакомиться в табл. 1.2.

Сокращения химических веществ особенно удобно использовать при записи химических реакций. В таких случаях химический элемент обозначается:

- одним символом, например С обозначает углерод (лат. *carbon*), а К — калий (лат. *kalium*);



- двумя символами, например Ag — серебро (лат. *argentum*), Cu — медь (лат. *cuprum*);
- тремя символами, например открытые недавно элементы Uuq — унунквадий (лат. *ununquadium*) и Uuo — унуноктий (лат. *ununoctium*).

Обратите внимание, что первый символ записывается с прописной буквы, а все последующие — со строчных.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТОВ

В 1864 г. немецкий химик Лотар Мейер (Lothar Meyer) опубликовал книгу *Die Modernen Theorien der Chemie* («Современные теории химии»). В ней он предложил упорядоченное расположение 28 химических элементов в шести семействах на основе их атомного веса, а также сходных физических и химических свойств. Некоторые элементы как будто проскочили места в этом упорядочении. Мейер предположил, что там должны находиться еще не обнаруженные элементы. Он также впервые использовал понятие *валентность* для описания способности атома одного элемента связываться с несколькими атомами другого элемента.

В 1870 г. Мейер предложил новый вариант *Периодической таблицы*, уже с 57 элементами. В ней на основе таких новых свойств, как температура плавления элементов и атомарный объем, Мейер предложил упорядочить элементы по отдельным группам.



Мейер опубликовал свою таблицу элементов в 1870 г., а независимо от него — русский химик Д. И. Менделеев в 1869 г. Чтобы не путаться с авторскими правами, большинство ученых западного мира называют эту систему просто «Периодической системой элементов» без упоминания имени первооткрывателя. На самом деле первые идеи о периодичности свойств элементов высказывались задолго до появления работ Менделеева и Мейера. Всего существует несколько сотен вариантов периодической системы (в виде кривых, таблиц, фигур и т. д.).

Любопытство ученого объясняется тем, что он вырос в семье медиков и с раннего детства привык к научным и медицинским дискуссиям. Мейер получил медицинское образование в Швейцарии, затем у него появился интерес к физиологии дыхания, и вскоре он переключился на химические исследования. Одним из первых ученых узнал о том, что кислород в крови связывается с гемоглобином. Множество элементов в теле человека и их сложные взаимосвязи заинтересовали Мейера. Для объяснения сложных биохимических

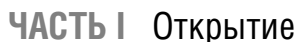


Таблица 2.3. Химические элементы в теле человека

Элемент	Органы и функции
Кальций	Кости, зубы, жидкости организма
Фосфор	Кости, зубы
Магний	Кости, внутрикостные жидкости
Натрий	Внутриклеточные жидкости, передача нервных импульсов
Хлор	Соли в окооклеточных и желудочных жидкостях
Калий	Внутриклеточные жидкости, передача нервных импульсов
Сера	Аминокислоты, белки
Железо	Гемоглобин крови, мышцы

[illegible]

Рис. 2.2. Периодическая таблица элементов

В 2008 г. Периодическая таблица элементов содержала 118 элементов. Все элементы вплоть до 92-го (уран) встречаются в приро-



де, а так называемые трансурановые элементы можно синтезировать в ходе ядерных реакций. Сравнивая нынешний вид Периодической таблицы элементов (рис. 2.2) с версией Мейера, можно проследить 150-летнюю историю химических открытий.

Номенклатура также имеет большое значение для идентификации и определения наноматериалов. Действительно, в номенклатуре наноматериалов должна учитываться разная форма даже таких наноматериалов, которые имеют одинаковый химический состав, например графит, алмаз, фуллерен, нанотрубка. Еще более сложная задача для номенклатуры наноматериалов возникает при необходимости различать наноматериалы с одинаковым составом и формой, но разными размерами и свойствами, например квантовые точки (quantum dots). Квантовые точки более подробно рассматриваются в главе 8.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ НОМЕНКЛАТУРА

В биологии для именования разных родов и видов используется *зоологическая номенклатура*. *Международный кодекс зоологической номенклатуры* (International Code of Zoological Nomenclature — ICZN) — это общепризнанный международный свод правил для научных названий животных. Как и в химии, в биологии используются строгие стандарты именования, которые известны и понятны всем биологам.

Согласно коду ICZN, все организмы разделены на группы и подгруппы, например на позвоночных и беспозвоночных. Организм получает окончательное название, когда достигает конечной точки в классификации, например *Homo sapiens* — это название современного человека. Полная классификация ICZN содержит сотни разветвлений, где описаны мельчайшие отличия между видами.

НОМЕНКЛАТУРА НАНОТЕХНОЛОГИЙ

По мере появления новых наноматериалов значение номенклатуры увеличивается. Теперь все объекты, включая C_{60} , C_{70} , C_{80} , нанотрубки, квантовые точки, золотые наноболочки и т. д., находятся на линии передовых исследований в области биологии и материаловедения. Общепринятая номенклатура и терминология упрощает понимание и использование новых материалов и концепций.

Профессор Вики Колвин (Vicki Colvin) из Центра исследования нанотехнологий в биологии и охране окружающей среды Универси-



ЧАСТЬ I Открытие

тета Райс работает над созданием стандартной номенклатуры и терминологии для всей отрасли. В 2005 г. она впервые представила свои идеи на 229-й Национальной конференции Американского химического общества в Сан-Диего, штат Калифорния (США). Именно такое передовое видение будущих перспектив способно упростить междисциплинарные научные исследования.

Колвин отметила, что количество статей по нанотехнологиям, опубликованных в период с 1990 по 2005 г., увеличилось до 20 тыс., что отражает растущую значимость данной тематики. Наночастица может иметь разные названия, в зависимости от ее формы и применения. Колвин предложила использовать систему именования, которая принята для полимеров. Например, разные поверхностные химические характеристики наночастиц можно использовать в качестве начального критерия для присвоения им разных имен.

Для оценки рисков требуется строгая и полная система именования, чтобы избежать потенциально опасного неправильного толкования выводов. Аналогично для защиты окружающей среды от возможного загрязнения воздуха, воды и почвы также требуется строгая терминология и четко сформулированные стандарты безопасного использования нанотехнологий и наночастиц.

Поскольку наномир находится почти в самом основании материального мира (на уровне атомов и молекул), он затрагивает практически все области научных исследований. В этом состоит наиболее важный аспект нанонауки и нанотехнологии — они удивительным образом пронизывают все вокруг нас! Каждая область деятельности человека так или иначе вскоре почувствует их влияние.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Левенгук обнаружил микроорганизмы:
 - (а) у больных полиомиелитом;
 - (б) в пупке;
 - (в) у больных малярией;
 - (г) в зубном налете.
2. Одним из наиболее важных свойств наночастиц является:
 - (а) более сильный запах;
 - (б) повышенная кислотность;
 - (в) большая поверхностная площадь;
 - (г) большая стоимость.



3. Сегодня с помощью микроскопов высокого разрешения ученые могут видеть:
 - (а) гораздо меньше, чем ученые прошлого;
 - (б) гораздо больше, чем ученые прошлого;
 - (в) почти так же, как ученые прошлого;
 - (г) вообще ничего.
4. Удлинение пружины пропорционально приложенной к ней силе называется:
 - (а) законом Джоэла;
 - (б) законом Гука;
 - (в) законом Дугласа;
 - (г) законом Крука.
5. Сокращенная запись $C_{14}H_9Cl_5$ обозначает:
 - (а) МТВ;
 - (б) АДД;
 - (в) ДДТ;
 - (г) СТМ.
6. В биологии для именования организмов используется:
 - (а) Периодическая таблица;
 - (б) Международная система единиц;
 - (в) Диаграмма изотопов;
 - (г) Международный кодекс зоологической номенклатуры.
7. Основное отличие наноинструментов и обычных лабораторных приборов:
 - (а) размер и масштаб;
 - (б) запах и звук;
 - (в) размах и разлет;
 - (г) замерзание и таяние.
8. Контрольная проверка свойств образца с помощью точных измерений и тщательных записей называется:
 - (а) эксперимент;
 - (б) лаборатория;
 - (в) демонстрационный проект;
 - (г) гипотеза.



ЧАСТЬ I Открытие

9. Нанометр равен:
- (а) одной квинтиллионной части метра;
 - (б) одной миллионной части метра;
 - (в) одной миллиардной части метра;
 - (г) одной триллионной части метра.
10. Какие типы наноинструментов используют инженеры и ученые?
- (а) крошечные молотки и гаечные ключи;
 - (б) системы глобального позиционирования;
 - (в) компасы и положение Солнца;
 - (г) оптические, магнитные и электрические приборы и схемы.

Глава 3

Что особенного в наномире

Почему нанотехнологии вызывают такой повышенный интерес? Ответ прост: атомы в очень маленьких группах ведут себя иначе, чем в больших. По отдельности базовые блоки вещества (атомы) не оказывают существенного влияния на окружающую среду, но в больших группах они способны проявить свои свойства и функции.

Современные ученые могут изучать даже свойства отдельных атомов. Например, на наноуровне они исследуют *квантовые* свойства (подробнее эта тема описывается в главе 10). При этом нельзя сказать, что атом не оказывает влияния на окружающую среду, однако эта среда чрезвычайно мала по сравнению с размерами человека.



Квант — это мельчайшее неделимое количество физической величины, например электромагнитного излучения или энергии.

Как уже упоминалось в главе 1, в 1959 г. Ричард Фейнман (Richard Feynman) выступил с лекцией *There's Plenty of Room at the Bottom* («Внизу полным-полно места»), в которой он отметил: «Известные нам принципы физики не запрещают создавать объекты “атом за атомом”. Манипуляция атомами вполне реальна и не нарушает никаких законов природы. Практические же трудности ее реализации обусловлены лишь тем, что мы сами являемся слишком крупными и громоздкими объектами, вследствие чего нам сложно осуществлять такие манипуляции».

Размер является определяющим фактором успеха нанотехнологий.

Представьте себе, что вы сидите в центре футбольного стадиона, заполненного 70 тыс. галдящих зрителей. Услышат ли вас зрители в самом верхнем ряду, если вы закричите что есть силы? Насколько возросшая температура вашего тела повлияет на окружающую среду, если вы начнете бегать по стадиону? А если начнете топтать ногами, то почувствуют ли это зрители в самом верхнем ряду? Ко-



ЧАСТЬ I Открытие

нечно, нет. В такой огромной аудитории крик, температура, удары ногами отдельного человека не окажут заметного влияния.

А теперь представьте, что в центре поля стоит несколько тысяч ваших сторонников, которые отчаянно кричат и поддерживают свою команду. Повлияют ли они на остальных зрителей? Конечно! Координированные крики, хлопки ладонями рук и удары ногами услышат все присутствующие. Более того, для такого большого количества зрителей потребуется включить системы кондиционирования воздуха, установить многочисленные лотки с пищей и открыть множество туалетов. Влияние тысяч зрителей на окружающую среду заметно больше влияния одного человека.

В наномире частицы могут располагаться близко или далеко друг от друга, но их интересные свойства можно зарегистрировать именно благодаря тому, что они зависят от размера частиц. Как уже упоминалось в главе 2, размер оказывает влияние на разные свойства наноматериалов: цвет, площадь поверхности, проводимость и прочность. Гравитация и законы Ньютона не оказывают заметного влияния на поведение наночастиц, поскольку их масса чрезвычайно мала.

Когда Фейнман говорил, что «внизу полным-полно места», он имел в виду, что наномир предлагает исследователям огромные возможности для новых открытий. Наномир содержит множество крошечных атомов и молекул, разделенных огромными пространствами. Однако в земных условиях крайне трудно найти совершенно изолированные атомы или их компоненты — субатомные частицы. Большинство атомов химических элементов (за исключением инертных газов) существует в связанном виде: либо в молекулах, либо в соединениях с подобными себе атомами или атомами других элементов.

Атомы находятся повсюду и реагируют со всеми окружающими объектами. Мы едим, дышаем и надеваем их. Все, то есть *абсолютно* все, вокруг нас состоит из атомов или субатомных частиц.

Формы углерода

В предыдущих главах вы узнали о разных структурах, которые могут образовывать атомы углерода, о связях, возникающих между ними, и о том, насколько они сильны. Попробуем разобраться, почему углерод привлекает такое пристальное внимание ученых.

Углерод — шестой по распространенности химический элемент во Вселенной. Он известен с незапамятных времен. Углерод содержится в атмосфере и может растворяться в воде. В горных поро-



дах углерод образует несколько соединений: карбонат кальция (известняк), карбонат магния (углекислый магний) и карбонат железа. В течение многих веков углерод добывали в виде каменного угля и использовали в качестве топлива. Известно около 10 млн соединений углерода с другими элементами, причем около сотни играют важную роль в химических и биологических процессах.

В естественных условиях углерод может находиться в трех *аллотропных* формах: графит, алмаз или аморфный углерод. (Фуллерены и углеродные нанотрубки были получены в специальных лабораторных условиях и не образуются в естественной среде.)



Аллотропные (от греч. *állos* — другой, греч. *trópos* — поворот, свойство) формы — это модификации одного и того же химического элемента в виде двух и более простых веществ, различных по строению и свойствам.

Аморфный углерод (например, сажа и активный уголь) образуется после сгорания углеродосодержащих материалов без достаточного доступа кислорода для их полного сгорания. Черная сажа используется для изготовления красок, чернил, резиновой продукции, а также в спрессованном виде для сухих топливных батареек.

Графит известен как один из самых мягких материалов и часто используется в качестве смазки. Хотя он существует в естественном виде, коммерческий графит производится на основе нефтяного кокса (черного смолистого осадка, который остается после очистки сырой нефти) в бескислородной печи. В естественных условиях графит существует в двух видах, имея практически одинаковые физические свойства, но разную *кристаллическую структуру*: α -графит (гексагональный) и β -графит (ромбоэдрический).



В природе β -графит в чистом виде не наблюдается, так как является метастабильной модификацией, но в природных графитах его содержание может достигать 30%.

Помимо использования в твердых смазочных материалах, на практике графит (а точнее кокс) широко применяется в металлургической промышленности. Кокс получают за счет нагревания мягкого угля до 500–550 °С в печи без доступа воздуха.

Алмаз, который уже упоминался в главе 1, является одним из наиболее твердых веществ в природе. Естественные алмазы используются в ювелирной отрасли, а для промышленности они часто создаются искусственным путем. Промышленные алмазы выращиваются



ЧАСТЬ I Открытие

под большим давлением при высокой температуре в течение нескольких дней или недель. Такие синтетические алмазы используются для создания режущих или абразивных материалов.

После открытия фуллеренов ученые заинтересовались тем, как углерод может принимать так много разных структурных модификаций, оставаясь углеродом. Обнаружение молекулы в виде футбольного мяча с 60 или 70 связанными вместе атомами (C_{60} или C_{70}) стало поистине удивительным открытием. Результаты дальнейших исследований позволили получить ответы на многие вопросы относительно природы данного явления. Оказалось, что новые модификации углерода обладают совершенно неожиданными физическими характеристиками. Они способны выдерживать огромные давления, а также обладают магнитными и сверхпроводящими свойствами при высоких температурах. Такая универсальность не свойственна их ближайшим родственникам — графиту и алмазу.

Однослойные углеродные нанотрубки

Со времен Галилея точные приборы и инструменты в руках умелых ученых часто становились источником новых открытий. Нанотехнологии также способствовали появлению более мощных и точных инструментов.

Ричард Смолли изобрел инструмент, с помощью которого ему удалось обнаружить фуллерены и перевернуть прежние представления. С тех пор ученые добились значительных успехов в изучении фуллеренов, но исследования однослойных углеродных нанотрубок (ОСУН) считаются наиболее перспективной областью современной науки. Многие ученые считают, что возможности углеродных нанотрубок намного превосходят потенциал фуллеренов. Они исследуют характеристики связей между атомами углерода в ОСУН, которые позволяют понять и предсказать их химические свойства. Например, ученые следят, как атомы некоторых металлов образуют сложные образования с ОСУН, и таким образом прослеживают тонкие химические взаимосвязи на отдельных этапах создания ОСУН.

Группе Смолли удалось синтезировать удивительно длинные и симметричные ОСУН. Смолли верил, что ОСУН обладают практически неограниченным потенциалом для усовершенствования современных методов передачи энергии. Он обнаружил, что нанотрубки могут очень хорошо проводить электрический ток, обладая гораздо меньшей, чем металлические провода, массой без ущерба для проч-



ности. Путем точной подгонки размеров можно создать конфигурацию «трубка в трубке», то есть поместить проводящую нанотрубку внутрь изолирующей нанотрубки. На рисунке 3.1 показаны примеры такой конфигурации на основе обычного медного провода и ОСУН.

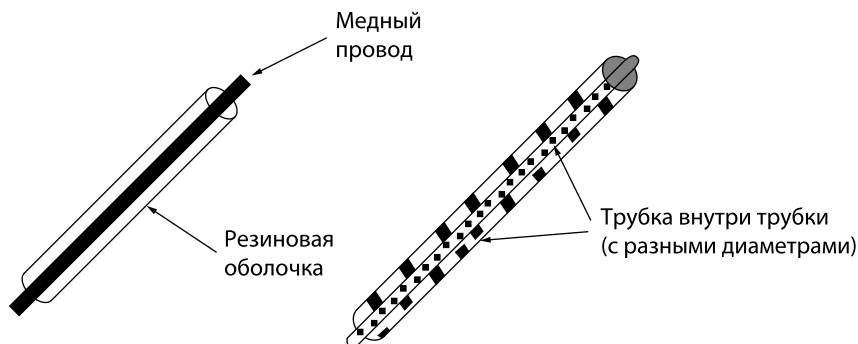


Рис. 3.1. Концентрические нанотрубки (справа) могут стать основой для более эффективной передачи электрического тока по сравнению с обычной технологией на основе изолированного медного провода (слева)

Наностержни

Наностержни изготавливаются из кремния, металлов (например, титана, олова и цинка), а также других полупроводящих и изолирующих материалов. В зависимости от материала наностержни могут иметь разные механические, электронные и оптические свойства. Они применяются в различных отраслях промышленности для создания электронных и оптических компонентов, дисплеев, полимерных композитов, сенсоров и актуаторов.

Наностержни обычно изготавливают с помощью испарения и конденсации или методами жидкой химии. Их можно выращивать на подложках с гелем с помощью электрофоретического осаждения (при пропускании электрического тока через гель) или высокотемпературной кристаллизации.

В процессе создания наностержней их можно упорядочивать в более крупные структуры с большой химически активной площадью.

Цвет

Как один и тот же элемент — углерод — может проявлять такие разные свойства?



ЧАСТЬ I Открытие

Все дело в размере. Например, обычное обручальное кольцо из золота имеет желтый цвет, но если его размеры уменьшить до наноуровня, оно станет красным. Разные оптические свойства колец объясняются разными размерами. Конечно, в макроскопическом мире этот трюк не получится, поскольку разница в цвете становится ощутимой только в наномасштабе.

Для наночастиц цвет является физической характеристикой, и материалы с такими наночастицами могут выглядеть по-разному.

Средневековые стеклодувы пытались найти новые способы окрашивания стекол. Они неустанно экспериментировали с золотом, и им удалось получить мельчайшие частички, которые меняли свой цвет в зависимости от размера: зеленый, оранжевый, красный и пурпурный. Многие витражи в церквях того времени были получены в результате подмешивания таких частичек в стекло. Даже некоторые образцы глазури на древней керамике содержат мельчайшие частицы, цвет которых зависел от их размера. Древние мастера могли создавать прекрасные многоцветные изделия, но не понимали механизма изменения цвета.

Поверхностная площадь

Размышляя о наночастицах, нужно иметь в виду их огромное количество. Мы имеем дело с миллиардами наночастиц даже в объеме булавочной головки. Представьте себе: кубик металла мы разрезаем на мельчайшие частицы вплоть до нанометровых. Если теперь их сложить вместе, получится тот же самый исходный кубик.

Но чего мы добьемся в результате такой разбивки? Ответ прост: огромное увеличение химически активной поверхности, поскольку в результате разбивки может быть получено около 10^{15} нанометровых частей. Исходный кубик имеет площадь поверхности, равную сумме площадей его граней. При каждой разбивке кубика на меньшие доли число граней увеличивается, а отношение площади к объему заметно возрастает. На рисунке 3.2 показана наглядная схема подобной разбивки.

Представьте себе, что шар диаметром 1 м сделан из сплошного материала, тогда площадь его поверхности чуть более 3 м^2 . Теперь, если разрезать его на 10^{15} кусочков, площадь их поверхности будет равна площади примерно 10 тыс. футбольных полей!

Как видите, масштаб играет огромную роль в нанотехнологиях. На отрезке длиной от 10 до 100 ангстрем (Å) может поместиться от

ГЛАВА 3 Что особенного в наномире



100 до 1000 частиц. Именно переход к сверхмалому масштабу увеличивает влияние площади поверхности. В таблице 3.1 приведены сравнительные размеры некоторых наноразмерных объектов.

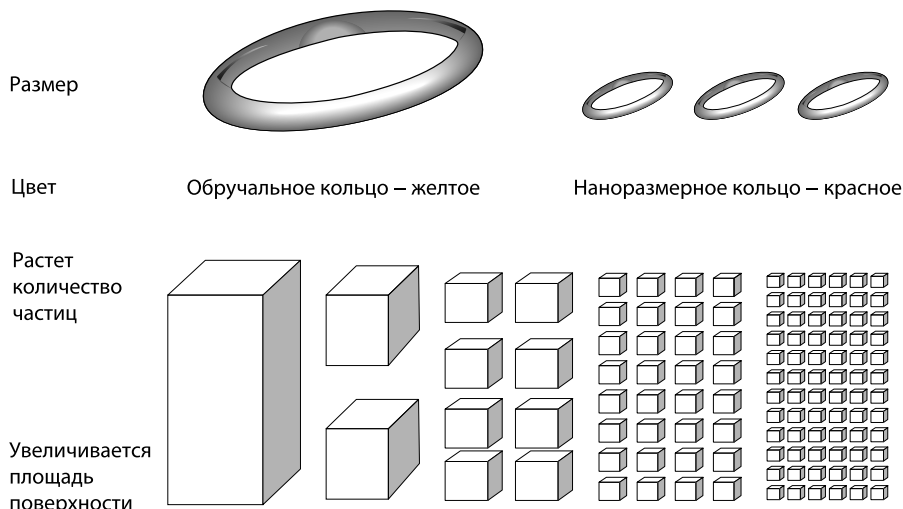


Рис. 3.2. Уменьшение размера обручального кольца до наноразмера приводит к изменению его цвета (слева), а разбивка куска металла на наночастицы — к громадному увеличению его химически активной поверхности (справа)

Таблица 3.1. Размеры некоторых наноматериалов

Размер	Наноматериал
Все три измерения < 100 нм	Наночастицы, квантовые точки, нанооболочки, микрокапсулы, пустотелые наносферы
Два измерения < 100 нм	Однослойные углеродные нанотрубки, волокна, нанопровода
Одно измерение < 100 нм	Антикоррозийные/антиадгезивные покрытия, нанопленки, вирусы

Резкое увеличение площади объекта связано и с другими эффектами. Недавно средства массовой информации уделяли много внимания правильному приготовлению гамбургеров. Мясо для гамбургеров режется на тонкие слои, и в какой-то момент общая площадь поверхности всех ломтей становится больше, чем площадь поверхности исходной мясной туши. При неправильной технологии хранения и приготовления пищи опасные бактерии (например, спорообразу-



ЧАСТЬ I Открытие

ющая палочка *Clostridium botulinum*, которая вызывает ботулизм) могут легко попасть сразу в огромное количество ломтей (ведь площадь резко возрастает) и вызвать *массовое* отравление.

Ботулизм — это острое инфекционное заболевание, которое проявляется как нарушение сокращений поперечно-полосатых и гладких мышц, а также деятельности нервных клеток, ответственных за передачу возбуждения к мышцам. У больных страдают мышцы глаз, глотки, дыхательные мышцы. Смерть, как правило, наступает от паралича дыхания.

Используя наноматериалы, ученые стремятся получить аналогичный эффект от увеличения химически активной площади для повышения чувствительности детекторов и катализаторов.

Квантовая механика

Континуальная механика имеет дело с непрерывными физическими величинами и привычными в бытовых ситуациях законами Ньютона и гравитационного притяжения. Однако в наном мире доминируют другие законы, «странные» законы *квантовой* механики, которая описывает дискретные величины и процессы.

Квантовая механика — это раздел теоретической физики, описывающий квантовые законы движения и свойства вещества в наномасштабе. Поведение и свойства многих наночастиц и наноструктур описываются законами квантовой механики.

Ученые обнаружили, что многие явления наномира не происходят в макром мире. Именно по этой причине нанотехнологии захватывают воображение. Исследования наномира могут привести к новым удивительным открытиям.

Вот типичный пример из физики биологии. В середине 1990-х гг. исследователи взяли крошечные шарики кварца (вещества, похожего на обычный песок) диаметром около 20–30 нм и покрыли их еще более мелкими шариками золота. Полученную структуру, похожую на круглое печенье, покрытое шоколадной глазурью, назвали *нанооболочкой* (подробнее она описывается в главе 10).

Изменяя диаметр ядра и толщину золотого покрытия, ученые смогли уловить связь размеров с отраженным светом, который мог быть красным, пурпурным или зеленым.

При определенном соотношении размеров ядра и покрытия нанооболочка могла поглощать инфракрасное излучение. Этот резуль-



тат позволил сделать важное открытие, поскольку инфракрасное излучение способно проникать в живую ткань на глубину около 10 см. Это открытие дало толчок созданию новых медицинских технологий (более подробно применение нанотехнологий в медицине описывается в главе 6).

Производство

Нанотехнологии позволяют использовать совершенно новые способы промышленного производства. С середины XX в. (и по сей день) для создания сверхмалых электрических схем и материалов было необходимо применять сверхточные инструменты и сверхчистые помещения. Даже сегодня полученные результаты не всегда абсолютно идеальны.

Инженеры стремились создавать как можно более легкие и быстрые компьютеры с максимально большой мощностью и объемом памяти. Для этого до сих пор используется *нисходящий* подход, или подход *сверху вниз (top down)*: большой исходный материал разбивается на все более мелкие фрагменты, которые становятся частями единого механизма. Этот подход напоминает работу гениального скульптора Микеланджело Буонарроти, который для создания шедевра отсекал от глыбы мрамора все лишнее. Современные микротехнологии действуют аналогично: например электрические схемы создаются за счет отсечения всего лишнего с постепенным созданием нужной структуры.

нисходящий и восходящий подходы

Многие наночастицы и микрокапсулы генерируются за счет *самосборки*, то есть на основе самоорганизации и без прямого вмешательства инженеров и ученых. Этот подход получил название *восходящего*, или подхода *снизу вверх (bottom up)*. Атомы и молекулы самостоятельно собираются в наноструктуры под действием химических и каталитических реакций. Современные ученые и инженеры мечтают, чтобы в будущем все компьютеры и другие электронные приборы собирались именно таким образом. В таком случае даже самые мощные нанокomпьютеры смогут уместиться на ноготке мизинца или даже имплантироваться под кожу человека. Ваш мобильный телефон всегда будет буквально под рукой!

Современные компьютеры создаются на основе *нисходящего* подхода. Все более мелкие и мелкие детали формируются с помощью сложных макро- и микроинструментов, химикалий, шаблонов и т. п.



Новые продукты

Нанотехнологии работают уже сейчас. Промышленность выпускает многие товары с новыми наносвойствами, которые превосходят прежние свойства тех же материалов. Манипулируя некоторыми материалами на молекулярном уровне, ученые смогли повысить их долговечность и прочность.

Вы даже не представляете, сколько товаров, которые производятся на основе нанотехнологий, уже находится на полках современных магазинов. Например, современные солнцезащитные кремы уже не похожи на прежние мази белого цвета, которые придавали всем курортникам ужасный вид инопланетян. Современные бесцветные кремы пропускают видимый свет, но поглощают вредное ультрафиолетовое излучение. Они содержат наночастицы диоксида титана и оксида цинка, которые эффективно отражают ультрафиолетовое излучение. Принцип работы новых кремов точно такой же, как и у прежних белых мазей, но размер частиц теперь существенно меньше, и они незаметно выполняют свою работу.

Другие примеры использования наноматериалов — наночастицы кварца в зубных наполнителях и нановолокна в грязеотталкивающей ткани Nanopants. Компания NanoTex разработала технологию создания грязеотталкивающей ткани Nanopants на основе покрытия из нановолокон, которые не поглощают грязь. Теперь более 80 текстильных фабрик используют технологию Nanopants для создания новых тканей для одежды и обивки мягкой мебели.

Преимущество новой грязеотталкивающей ткани Nanopants заключается в том, что после специальной обработки в наномасштабе ткань становится гидрофобной и грязеотталкивающей. Вместо традиционного нисходящего подхода, то есть удаления макроскопических пятен, используется восходящий подход, то есть пятна удаляются еще на этапе их появления. Вполне возможно, что вскоре нанопокрывтия и нанотехнологии дойдут до такой степени совершенства, что отпадет надобность в стиральных машинах.

Еще один новый товар бытовой химии позволяет упростить процесс мытья стекол. В новой стеклоочистительной жидкости используются наночастицы диоксида титана, которые уже известны нам как компонент солнцезащитных кремов. Диоксид титана ускоряет распад органических материалов, способствуя разрушению и соскальзыванию грязи с окон и других вертикальных гладких поверхностей. Окна, ветровые и увеличительные стекла после специальной



нанобработки могут стать самоочищающимися. Теперь у домохозяек будет больше времени для просмотра сериалов, занятий спортом и телефонных разговоров с подружками!

Наномасштабные технологии обработки поверхностей позволяют создавать товары с улучшенными механическими, термическими, биологическими, электронными, оптическими и химическими свойствами. Ниже перечислены некоторые перспективные области их применения:

- защита от износа инструментов и машин;
- защита мягких материалов (например, полимерных, деревянных и текстильных);
- антивандальные и необрастающие покрытия;
- самоочищающиеся поверхностные пленки для текстиля и керамики;
- антикоррозийная защита для инструментов и машин;
- термостойкие покрытия для турбин и двигателей;
- термоизоляция для оборудования и строительных материалов;
- биологически совместимые имплантаты;
- антибактериальные медицинские материалы и инструменты;
- сверхтонкие компоненты для транзисторов;
- магниторезистивные сенсоры и элементы памяти;
- фотохромные и электрохромные окна;
- антибликовые экраны;
- более эффективные солнечные батареи.

НАНОБОТЫ

Легко можно вообразить себе разнообразные возможности создания новых материалов на атомарном уровне, однако многие проекты принципиально невозможно реализовать. Один из таких фантастических проектов основан на использовании наномасштабных роботов, или *наноботов*. Наноботы (или молекулярные монтажники) уже успели стать отрицательными персонажами некоторых фантастических сценариев, описанных популяризатором нанотехнологий Эриком Дрекслером (Eric Drexler) в своей книге «Машины созидания»¹ (*Engines of Creature*). Он описал, как наноботы могут стать «серой слизью» (gray goo), пожирающей всех обитателей Вселенной. (В июне 2004 г. в журнале *Nature* Эрик Дрекслер признался, что лучше бы никогда

¹ На русском языке книга официально не издавалась, но перевод можно легко найти в Интернете. — *Прим. ред.*



ЧАСТЬ I Открытие

не упоминал о «серой слизи»!) Еще один популярный автор научно-фантастических триллеров, Майкл Крайтон (Michael Crichton), описал возможную угрозу от наноботов в своей книге «Рой» (*Prey*). Авторы дешевых комиксов часто изображают, как супергерои сражаются с инопланетянами, обладающими нанотехнологическим оружием массового поражения, которое грозит уничтожить Землю или всю Вселенную.

Добавьте к этому поднятый в прессе шум в отношении возможной угрозы от внедрения нанотехнологий. С волной негативной информации трудно справиться, даже приводя аргументы, что реализация многих сценариев невозможна, просто потому что они противоречат законам природы. Но, как это часто бывает с научно-фантастическими произведениями, наука в них порой вытесняется фантастикой.

Действительно, наноботы имеют такие крошечные размеры, что просто не могут двигаться достаточно быстро или только в определенном направлении. Они не обладают собственными источниками энергии, которые позволили бы им функционировать подобно биологическим организмам. Более того, наноботы из органических молекул сами могут стать добычей обычных бактерий и грибков. Если бы наноботы могли самовоспроизводиться из неорганического материала (например, скальных пород), на такой синтез ушло бы все их время, энергия и другие ресурсы.

Эксперты в области информатики любят пофантазировать на тему воображаемой программы действий, которая могла бы помочь преодолеть эти трудности. Такая программа помогла бы контролировать расход ресурсов, причем даже с отключением питания, обновлением значений и поиском необходимых ресурсов. Это довольно забавное занятие, но реальность очень отличается от фантастических историй в духе «покорения Дикого Запада» наноботами.

Серьезные ученые, например уже упомянутый ранее Ричард Смолли и Марк Ратнер, профессор химии в Северо-западном университете (США), лауреат Фейнмановской премии за исследования в области нанотехнологий за 2001 год, скептически относятся к идее возможного использования наноботов. Смолли считает, что наноботам потребуется чудовищно огромное время для создания макроскопического объекта. Следует напомнить, что размер атома равен примерно одной миллиардной метра, а потому для сборки макроскопического объекта потребуется просто невероятное количество атомов. Ученые любят приводить такой пример: для сборки атом-за-атомом одного миллилитра воды потребовалось бы столько же операций, сколько для вычерпывания Тихого океана с помощью чайной ложки.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При изменении диаметра ядра и толщины золотого слоя у нанооболочки меняется:
(а) польза;
(б) цвет;
(в) запах;
(г) узор.
2. Сажа, кокс и активированный уголь — это формы:
(а) свинца;
(б) азота;
(в) ртути;
(г) аморфного углерода.
3. Средневековые стеклодувы пытались найти новые способы окрашивания стекол, изменяя свойства:
(а) олова;
(б) калия;
(в) золота;
(г) железа.
4. Самосборка микрокапсул и других наночастиц выполняется:
(а) сверху вниз;
(б) снизу вверх;
(в) сбоку;
(г) вдоль оси z .
5. Нанотехнология позволяет создавать материалы на основе:
(а) огромных гранитных блоков;
(б) атомов и молекул;
(в) песка;
(г) метеоритов.
6. Какие наноматериалы делают из кремния, металлов, полупроводников и изоляторов?
(а) наностержни;
(б) скульптуры;
(в) наноконечности;
(г) урановые стержни.



ЧАСТЬ I Открытие

7. На каком месте по распространенности в природе находится углерод?
 - (а) втором;
 - (б) четвертом;
 - (в) шестом;
 - (г) последнем.
8. Нанобот не представляет собой:
 - (а) фантазию писателей;
 - (б) ошибку, о которой жалеет Эрик Дрекслер;
 - (в) объект, который трудно создать и запрограммировать;
 - (г) реальную угрозу всему человечеству.
9. Кварцевые шарики диаметром 20–30 нм с золотой оболочкой называются:
 - (а) наношариками;
 - (б) золотыми глобусами;
 - (в) нанооболочками;
 - (г) наногелем.
10. Подход, при котором исходный материал разбивается на более мелкие фрагменты, становящиеся частями большого механизма, называется:
 - (а) восходящим;
 - (б) трудоемким;
 - (в) нисходящим;
 - (г) экономически выгодным.

Глава 4

Наноинструменты

В сериалах *Star Trek* («Звездный путь») и *Star Wars* («Звездные войны») полно забавных персонажей с необычным внешним видом, например Вуки и Клингоны. Современные телескопы позволяют нам заглянуть туда, куда прежде могло добраться только воображение.



Клингоны (Klingons) — это вымышленная инопланетная цивилизация гуманоидов-воинов из научно-фантастической Вселенной сериала «Звездный путь». А Вуки (Wookiee) — это вымышленная раса покрытых волосами и напоминающих земных обезьян гуманоидов из сериала «Звездные войны».

Прежде недоступные звезды, планеты и неземные ландшафты теперь тщательно изучаются разнообразными методами. Современные ученые анализируют все — от структуры атмосферы до химического состава грунта.

Однако современные открытия происходят не только в открытом космосе, но и на Земле. Технологии совершенствуются так быстро, что теперь ученые могут видеть и анализировать не только очень далекие и крупные объекты, но и очень близкие и чрезвычайно мелкие. Странные и прежде недоступные микромиры теперь находятся в зоне особого внимания.

Нанотехнологии как область междисциплинарных занятий ученых, инженеров и даже финансистов появились не «в один прекрасный день». Как это часто бывает со многими сенсационными открытиями, появлению нанотехнологий предшествовали долгие годы интенсивных исследований и открытий новых инструментов, которые легли в основу этого нового направления человеческой деятельности.

Инструменты для новых открытий

Ученые прошлых веков впервые обнаружили бактерии с помощью обычного оптического микроскопа с тщательно отполирован-



ЧАСТЬ I Открытие

ными линзами. Современные ученые для работы с нанообъектами используют гораздо более мощные и сложные инструменты. Глаз человека способен разглядеть детали величиной не менее 0,1 мм на расстоянии около 25 см от глаз. Чтобы увидеть более мелкие предметы, нужно использовать микроскоп.

Обычные оптические микроскопы недостаточно сильны, чтобы с их помощью можно было рассматривать молекулы. Предельное увеличение оптических микроскопов — около 1000 раз; с их помощью можно разглядеть детали величиной не менее 200 нм. Для изучения более мелких объектов ученые используют не свет, а электроны. Именно электронные микроскопы позволяют рассматривать самые крошечные объекты.



Увеличение микроскопа — это величина, которая указывает, во сколько раз больше выглядит изображение изучаемого объекта по сравнению с его реальным размером.

Для выбора типа микроскопа большое значение имеет несколько факторов, включая, например, способность изучаемого объекта излучать *флуоресцентный* свет (то есть свет с определенной длиной волны), проводить электрический ток или иметь органическую структуру.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Для изучения свойств нанообъектов ученые используют электронные микроскопы разных типов:

- сканирующий электронный микроскоп (scanning electron microscope), или СЭМ (SEM);
- просвечивающий электронный микроскоп (transmission electron microscope), или ПЭМ (TEM);
- аналитический электронный микроскоп (analytical electron microscope), или АЭМ (AEM).

На выбор одного из этих инструментов для изучения нанообъекта влияет несколько факторов, включая природу нанообъекта и интересные у него параметры.



Электронный микроскоп дает возможность получать сильно увеличенное изображение объектов, для освещения которых используются электроны. Некоторые электронные микроскопы позволяют увеличивать изображение в 2 млн раз.



СКАНИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП (СЭМ)

В СЭМ фокусированный пучок электронов используется для сканирования поверхности тонких и толстых образцов. Полученные снимки дают визуальное представление о трехмерной структуре изучаемого объекта. Итоговое изображение складывается из точек, полученных благодаря последовательному сканированию многих мест поверхности изучаемого объекта.

На рисунке 4.1 показаны некоторые основные компоненты СЭМ.

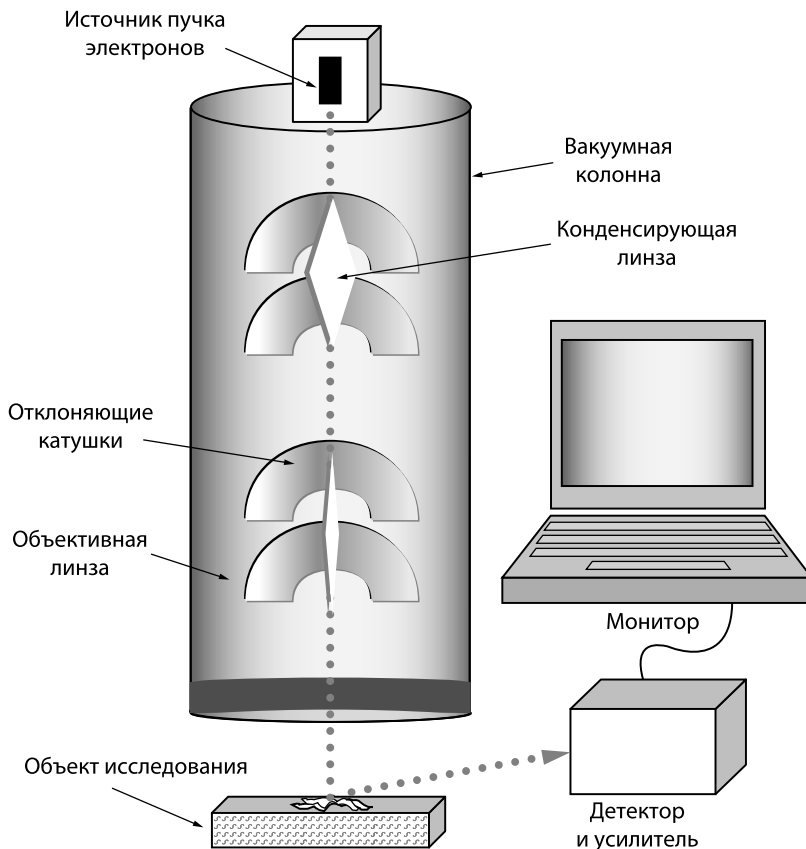


Рис. 4.1. Принцип работы электронного микроскопа

СЭМ обеспечивает увеличение от 10 до 100 000, что позволяет рассматривать детали объекта величиной до 5–10 нм. Некоторые



ЧАСТЬ I Открытие

наиболее мощные современные инструменты способны увеличивать объект в 1 000 000 раз с разрешением около 1 нм.



Разрешение — способность оптического прибора измерять расстояние или угол между близкими объектами.

Фотографию можно увеличить с помощью чрезвычайно мощных линз, но новых деталей на ней обнаружить не удастся. Дело в том, что увеличение уже полученного изображения не приводит к увеличению разрешения.

Разрешающая способность оптического микроскопа ограничивается *длиной волны света, дифракцией* (степенью отклонения света) и *апертурой* (величиной отверстия объектива).



Разрешающая способность — это мера способности линзы или оптической системы показывать раздельно близко расположенные объекты.

Черно-белые изображения на экранах мониторов СЭМ представляют исследуемый объект, причем более светлые места соответствуют большему количеству отраженных электронов, а менее светлые — меньшему.

Обычно образцы в СЭМ изучают в условиях вакуума. Чтобы они не сжимались и не изменяли форму под действием вакуума, их нужно тщательно подготовить. Биологические образцы высушивают и покрывают пленкой, чтобы они не съеживались. Поскольку изображение в СЭМ формируется с помощью электронов, образцы должны проводить электрический ток. На образец, установленный на специальной платформе, напыляют очень тонкий слой металла, чтобы создать на нем проводящий поверхностный слой.

После откачки воздуха из микроскопа источник посылает пучок электронов высокой энергии через ряд магнитных линз, которые фокусируют его в одной точке.

Набор отклоняющих катушек (см. рис. 4.1) перемещает сфокусированный пучок вперед-назад, сканируя таким образом поверхность образца. Пучок электронов попадает на образец и выбивает другие электроны из образца или его проводящего покрытия. Детектор улавливает отраженные и выбитые электроны и передает сигнал усилителю. После усиления сигналы от всех сканированных участков поверхности образца собираются вместе и отображаются на экране монитора.



ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП (ПЭМ)

В отличие от СЭМ, который способен анализировать только поверхность объекта, ПЭМ может заглянуть внутрь образца. Широкий пучок электронов проходит сквозь тонкий образец и образует картинку его внутреннего строения. Пучок электронов в ПЭМ фокусируется с помощью магнитных линз, как свет в оптическом микроскопе фокусируется с помощью стеклянных линз.

ПЭМ похож на обычный оптический микроскоп, поскольку он может просвечивать только очень тонкие образцы. Причем на полученном изображении более темные места соответствуют большему поглощению электронов, а менее темные — меньшему. Многие биологические объекты состоят из углерода, азота, кислорода и водорода. Плотность их компонентов не настолько отличается, чтобы их можно было различить с помощью ПЭМ. В таких случаях биологи с помощью специальных химических процедур добавляют в образец краску с атомами тяжелых металлов, которые связываются с определенными атомами и молекулами и образуют четкое изображение.

С помощью ПЭМ можно рассматривать объекты, в 1000 раз меньшие, чем объекты, доступные для просмотра с помощью оптического микроскопа, и в 500 000 раз меньшие, чем невооруженным глазом. Разрешение ПЭМ равно примерно 0,1–0,2 нм. Именно на таком расстоянии друг от друга находятся атомы в твердых телах.

Просвечивающие электронные микроскопы с пучками высоких энергий используют для анализа сверхмалых нанообъектов и изучения их свойств:

- размера и формы;
- внутренней структуры и ее сложности;
- состава;
- упорядочения атомов и молекул;
- физических свойств (температуры плавления, твердости, прочности, проводимости, реактивности).

Современные ученые способны видеть гораздо больше, чем Гук, Левенгук и их современники. Теперь можно заглянуть внутрь клетки, хромосомы, белка, отдельных молекул и даже атомов.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП (АЭМ)

Возможность исследовать структуру материала и его химические характеристики является важным условием будущих успехов нанонауки и нанотехнологии. Для этого нужно использовать все имеющиеся методы исследования новых материалов.



ЧАСТЬ I Открытие

ПЭМ вместе с такими аналитическими инструментами, как рентгеновский и электронный спектрометр, часто называют аналитическим электронным микроскопом. С его помощью можно анализировать рентгеновское излучение, которое возникает при столкновении электронов с атомами образца, а также потери энергии при прохождении электронов сквозь образец. Так можно обнаружить разницу между атомами углерода и азота, а также между атомами железа и никеля, очень точно определяя состав материала.

С помощью АЭМ определить не только размеры (вплоть до 0,1 нм), но и химический состав, тип молекулярных связей и электрическую проводимость образца, то есть получить подробную информацию о физических и химических свойствах материала образца и его компонентов.

АЭМ широко используется для изучения новых материалов и структур: «умных» покрытий, топливных элементов, магнитных наноструктур, полупроводниковых квантовых точек и т. д. Для этих приложений требуется точно знать положение атомов на поверхностях, границах и возможных дефектах структуры.

СКАНИРУЮЩИЕ ЗОНДОВЫЕ МИКРОСКОПЫ (СЗМ)

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) используются для изучения поверхности материалов на атомарном уровне. Они имеют заостренную иглу — зонд, который отслеживает и записывает мельчайшие изменения свойств поверхности изучаемого объекта. Зонд сканирует поверхность образца, как марсоход, записывая текущую высоту, проводимость и другие свойства. СЗМ работает как старинный граммофон с металлической иглой, которая повторяет бугорки и впадины звуковой дорожки граммофонной пластинки и тем самым воспроизводит запись на пластинке.

Мельчайшие движения зонда вверх и вниз фиксируются лазерным лучом, который отражается от зонда и передает все его вибрации оптическому детектору. Аналогично можно измерить разницу потенциалов и электрический ток между зондом и поверхностью изучаемого объекта. Для перемещения зонда в режиме сканирования применяются пьезокристаллы.



Пьезокристаллы — это кристаллы, которые при сжатии создают разность потенциалов (электрическое напряжение) и, наоборот, под действием электрического напряжения изменяют форму: сжимаются и расширяются, скручиваются и гнутся.



СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

Первым прототипом СЗМ был сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), изобретенный в 1981 г. Гердом Биннигом и Хайнрихом Рорером в лаборатории компании IBM в Цюрихе (Швейцария). В этом революционном изобретении используется система «образец–игла», к которой приложена разность потенциалов. Электроны из образца туннелируют на иглу и создают туннельный электрический ток, который можно точно измерить. В 1986 г. Герд Бинниг и Хайнрих Рорер получили Нобелевскую премию по физике «За изобретение сканирующего туннельного микроскопа».

В зависимости от способа использования иглы можно получать разную информацию. В простейшем случае поверхность образца сканируется на постоянном расстоянии, например 0,2 нм, а игла приподнимается или опускается для поддержания постоянного тока, что означает одинаковое расстояние между иглой и поверхностью. На рисунке 4.2 показана схема вольфрамовой иглы.

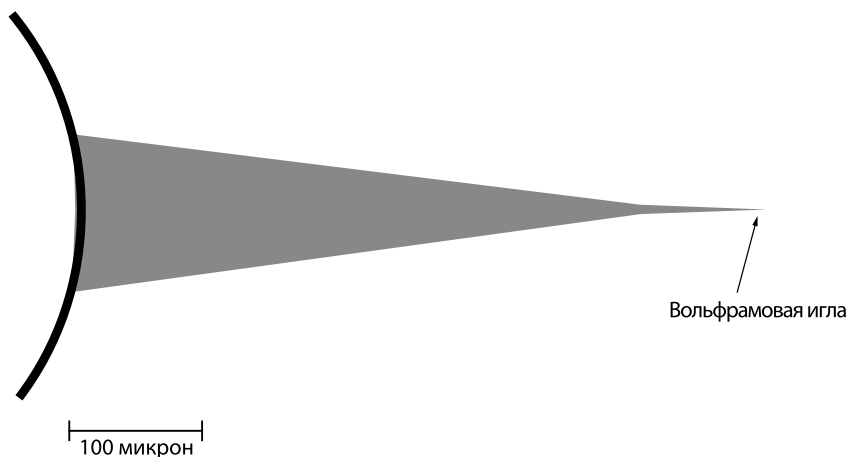


Рис. 4.2. Схема вольфрамовой иглы для сканирующего туннельного микроскопа



Туннельный электрический ток — это явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике, когда электроны преодолевают потенциальный барьер, обладая полной энергией (остается при туннелировании неизменной), которая меньше высоты барьера. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния между образцом и иглой.



ЧАСТЬ I Открытие

При перемещениях иглы вверх или вниз относительно поверхности для поддержания одинакового туннельного тока становится возможной фиксация топографии (рельефа) поверхности. Для существования туннельного тока образец должен быть проводником. Изоляторы, например резина, не проводят электрический ток, и их нельзя изучать таким способом, если не покрыть тонким проводящим слоем.

Игла обычно очень острая, и ее кончик может содержать всего несколько атомов. Именно благодаря этой «остроте» удается установить положение отдельных атомов с точностью до 0,2 нм. С помощью этой иглы можно также вызывать определенные химические реакции или создавать ионы, выдергивая отдельные электроны из атомов или, наоборот, передавая атомам добавочные электроны.

АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП

На малых расстояниях (около одного ангстрема) между атомом образца и атомом острия возникают силы отталкивания, а на больших — силы притяжения. Величина усилия также экспоненциально зависит от расстояния между образцом и иглой. *Атомно-силовой микроскоп* (atomic force microscope), или АСМ (AFM), фиксирует отклонения зонда (кантилевера), вызванные таким силовым взаимодействием близко расположенных атомов. АСМ может работать в нескольких режимах, например в режиме относительного ближкодействия (измеряется сила отталкивания) или дальнодействия (измеряется сила притяжения).

АСМ характеризуется разрешающей способностью в плоскости сканирования и в вертикальном направлении, перпендикулярном этой плоскости. Чем острее игла-зонд (ее обычно делают из кремния или нитрида кремния), тем лучше разрешающая способность. Идеальной иглой-зондом могла бы стать однослойная углеродная нанотрубка с регулярной структурой, которая позволила бы выполнять очень точные измерения. На рисунке 4.3 показана схема такой иглы-зонда, а на рис. 4.4 — пример более точного измерения мелких деталей объекта.

Вертикальное разрешение АСМ достигается за счет сравнения относительных колебаний иглы-зонда над поверхностью. На точность этих измерений влияют внешние помехи в виде звука, вибрации здания и тепловых колебаний. Для устранения помех АСМ располагают на специальных платформах, которые способны погасить внешние паразитные вибрации.

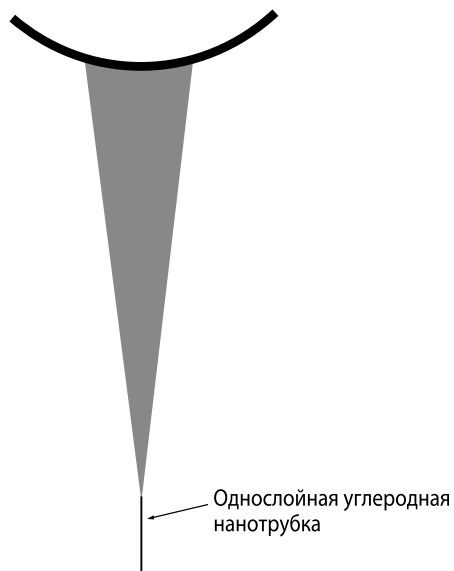


Рис. 4.3. Однослойная углеродная нанотрубка может существенно увеличить точность АСМ



Зонд на основе углеродной нанотрубки

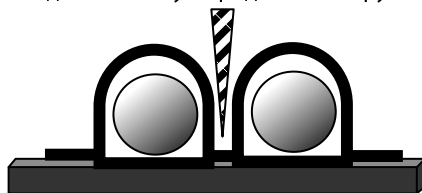


Рис. 4.4. В атомно-силовой микроскопии более острая игла-зонд позволяет повысить точность измерений



ЧАСТЬ I Открытие

МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МИКРОСКОПЫ

С середины XIX в. теоретический предел максимальной разрешающей способности оптических приборов из-за дифракции (рассеяния) ограничивался величиной, приблизительно равной половине длины волны видимого света (0,5 мкм или 500 нм). Изобретение и развитие СЗМ в 1980-х гг. на три порядка улучшило разрешающую способность. Однако их возможности ограничиваются также физическими законами.



Дифракция — это явление, которое наблюдается при распространении электромагнитной волны иначе, чем предписывают законы геометрической оптики. В современной науке с дифракцией связывают широкий круг явлений, возникающих при распространении волн в неоднородных средах.

Изображения, полученные с помощью СЗМ, подчиняются законам квантовой механики и зависят от условий прохождения туннельного тока. АСМ обладает более широкими возможностями, поскольку способен зарегистрировать силовое взаимодействие между зондом и поверхностью в широком диапазоне, например, вследствие трения, магнитного и электростатического взаимодействия, отталкивания ядер атомов и химического связывания.

Дифракция света ограничивает разрешающую способность современных оптических микроскопов, но ученые все же придумали, как обойти это ограничение. В *ближкопольном сканирующем оптическом микроскопе* (near-field scanning optical microscope), или *БПСОМ* (NSOM), изображение со сверхвысоким разрешением можно получить путем регистрации излучения, проходящего при сканировании объекта сквозь отверстие меньшего размера, чем длина волны.

ЛАЗЕРНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ КОНФОКАЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

Для создания реального трехмерного изображения изучаемого объекта в *лазерном сканирующем конфокальном микроскопе* (laser scanning confocal microscope), или *ЛСКМ* (LSCM), используется созданный лазером ультрафиолетовый свет и сканирующие зеркала. Небольшая апертура ограничивает поле зрения так, чтобы в фокусе был очень узкий слой, параллельный плоскости сканирования. Таким образом сканируется несколько рядом расположенных слоев, или *оптических сечений*, которые комбинируются с помощью компьютера, в результате чего образуется трехмерное представление объекта. Поскольку узкая апертура сильно ограничивает пучок све-



та, для успешной работы требуется использовать очень мощный источник. Для изучения разных образцов применяются разные режимы съемки. Разрешающая способность ЛСКМ достигает 1,2 нм. ЛСКМ можно использовать в комбинации со стандартным флуоресцентным оптическим микроскопом.

ЛСКМ обладает несколькими преимуществами перед обычными оптическими микроскопами: контролируемая глубина резкости, способность отсекаать информацию вне фокуса, способность комбинировать разные оптические сечения в одно трехмерное представление изучаемого объекта. ЛСКМ дает возможность получать высококачественные трехмерные снимки объектов с очень сложным рельефом.

ДРУГИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Новые способы наблюдения отдельных наноструктур и манипулирования ими привели к новым достижениям и открытиям в области нанотехнологий. Сканирующие зонды, электронные микроскопы высокого разрешения и другие сложные инструменты открывают ученым возможности для создания новых наноструктур, измерения новых свойств и новых приложений на практике. Часто единственным препятствием, замедляющим прогресс исследований, является необходимость определения химического состава наночастицы и ее электромагнитных и термодинамических свойств.

Итак, мы познакомились с несколькими инструментами для изучения наномира. Какой из них является наиболее полезным, обладает наибольшей разрешающей способностью и предоставляет наиболее ценные данные? Ответ зависит от природы изучаемого объекта и целей исследования. Например, белки имеют структуру, которая существенно отличается от структуры керамики, а потому для их изучения требуется применять совершенно другой метод наблюдения.

Электронные микроскопы уже длительное время успешно используются учеными для изучения объектов в субмикронном масштабе, и их трудно превзойти. В электронные микроскопы некоторых типов теперь можно разглядеть отдельные атомы в наночастицах и материалы в субнанометровом масштабе. Ученые научились получать информацию о химическом составе объекта, анализируя потери энергии электронов и рентгеновское излучение почти на атомарном уровне. Новые методы позволили добиться значительных результатов в понимании природы магнитных наноструктур.

Развитие СТМ и АСМ подтолкнуло ученых и инженеров к созданию новых микроскопов СЗМ. Как уже упоминалось выше, СЗМ



ЧАСТЬ I Открытие

может измерять локальные свойства и форму нанообъектов с помощью сверхмалого и сверхтонкого зонда.

Новые сканирующие зонды способны не только определить топографию поверхности, но и представить информацию о других свойствах изучаемого объекта, которые кратко перечислены ниже:

- *электронную структуру при низких температурах* можно исследовать, например, с помощью сканирующей электронной спектроскопии;
- *оптические свойства* изучают при помощи ближнепольной сканирующей оптической спектроскопии, которая способна анализировать отдельные фрагменты волны в масштабах 50–100 нм;
- *температуру* измеряют с помощью сканирующей термальной спектроскопии, в которой термочувствительный зонд используется для создания карты температурных полей электронных и оптических наноструктур и измерения термальных свойств наночастиц;
- *диэлектрические константы* измеряют с помощью сканирующей микроскопии с сохранением заряда для исследования свойств полупроводниковых наноструктур;
- *структура биологических молекул* исследуется для определения сложной наномеханики отдельных внутримолекулярных процессов (прежде поведение таких биологических систем можно было изучать только за счет усреднения поведения большого количества биологических молекул);
- *химические свойства* предоставляют информацию об особенностях физических, химических и биологических процессов на наномасштабном уровне.

НАНОМАНИПУЛЯТОРЫ

Такие маленькие объекты, как отдельные атомы и молекулы, можно перемещать и использовать в наноразмерных электрических схемах в качестве переключателей на атомарном уровне. Возможность контроля состава и структуры нанообъектов является огромным скачком в создании новых материалов. Среди достижений в манипулировании нанообъектами следует отметить возможность использования электронных микроскопов разных типов для выполнения разных операций: СЗМ с компьютерным управлением, оптических пинцетов и наноманипуляторов.

СЗМ с компьютерным управлением позволяет в оперативном режиме манипулировать наночастицами. Некоторые системы для на-



номанипулирования имеют виртуальный интерфейс пользователя, который напоминает игру с элементами виртуальной реальности. Это дает исследователю возможность выполнять манипуляции с точностью, в миллион раз большей, чем при ручных манипуляциях. Прямой интерфейс человек—СЗМ не только улучшает возможности измерения, но и обеспечивает обратную связь для оператора, так называемый тактильный (осязательный) интерфейс. Сейчас он все еще очень груб, но в ближайшее время эта технология будет улучшена настолько, что можно будет производить и (или) ремонтировать наноустройства и наноструктуры.

Оптические пинцеты предоставляют еще один способ захвата и перемещения нанометровых структур в трехмерном пространстве. Эта возможность особенно важна при изучении динамики атомов и молекул, поскольку специалистам молекулярной биофизики важно понимать поведение отдельных молекул. Оптические пинцеты позволяют непосредственно наблюдать за структурными параметрами. Их принцип работы основан на фокусировке пучка света на частице в жидкости. Воздействие света достаточно велико, чтобы удерживать молекулу в одном месте: если молекула слегка сместится к краю сфокусированного пучка, то свет подействует на нее таким образом, что молекула вернется в центр пучка. С помощью оптических пинцетов ученые могут изучать реакцию белков и других сложных молекул, например полимеров, на внешнее воздействие.

Наноманипуляторы предназначены для использования в составе СЭМ и СЗМ вместе с одним или несколькими пьезоэлектрическими моторами, которые совершают управляемое перемещение образца по нескольким направлениям.



Пьезоэлектрический мотор, или **пьезомотор**, — это мотор, работа которого основана на пьезокристаллах. Под действием электрического напряжения они изменяют форму: сжимаются и расширяются, скручиваются и сгибаются — и таким образом могут совершать механическое движение.

Пьезоэлектрические держатели используются в ПЭМ для изучения взаимодействия нанокристаллов и углеродных нанотрубок, а также для измерения проводимости отдельных рядов атомов, что позволяет подсчитать количество атомов в определенной наноструктуре. Наноманипуляторы часто применяются при проверке новейших электронных схем, поскольку их зонды достаточно малы для соприкосновения с крошечными электрическими контактами.



Наноинструменты

Ученые стремятся найти новые области применения нанотехнологий (от компьютеров до лекарств против рака) и одновременно используют более сложные инструменты (СЭМ, СПМ, СЭМ и т. п.) для исследования свойств наноструктур. Они применяют эти инструменты для изучения, моделирования и создания новых наноматериалов. Инструменты делятся на три категории: инспекционные инструменты для исследования, инструменты моделирования для предсказания характеристик и производственные инструменты для изготовления наночастиц и наноматериалов. Все они играют огромную роль в новых областях исследований и приложениях нанотехнологий. В главе 12 более подробно описываются коммерческие аспекты использования наноинструментов.

Теория и компьютерное моделирование

Наибольший прогресс в теории и компьютерном моделировании нанотехнологий связан с появлением и развитием новых теорий, алгоритмов, программного и аппаратного обеспечения компьютеров. Развитие и слияние разных методов компьютерного моделирования (например, квантовой химии и молекулярной динамики) позволяет с высокой достоверностью и надежностью выполнять компьютерное моделирование наномасштабных структур и материалов.

Несмотря на огромную сложность моделирования наномасштабных систем из-за большого числа неизвестных величин в наномасштабе, ученым удалось добиться значительных успехов:

- сократить время проектирования новых материалов;
- создать новые наномасштабные устройства на основе новых материалов (например, углеродные нанотрубки);
- увеличить надежность и предсказуемость работы наноприборов;
- спроектировать и оптимизировать новые нанотехнологии.

Теория и компьютерное моделирование используются для усовершенствования экспериментальных методов измерения наноструктур. Их удобно применять для имитации работы сложных биологических систем, например клеток, в будущих нанотехнологических приложениях. Действительно, многие современные нанотехнологические устройства были созданы на основе понимания принципов работы естественных наносистем и белков.



Но все это произошло не в одночасье, а в результате многолетних исследований. Например, для изучения электрических, магнитных, химических и термодинамических свойств наноструктур потребовалось создать методы компьютерного моделирования с учетом квантовой природы процессов на наномасштабном уровне. Прежде чем начать дорогостоящее производство наноструктур, ученым и инженерам следует перебрать и проанализировать тысячи альтернативных вариантов. Для этого как нельзя лучше подходит теория и компьютерное моделирование.

ПЕРЕХОД К НАНОМАСШТАБУ

Для применения на практике работу наномасштабных устройств необходимо моделировать в более крупном окружении. Такое моделирование должно включать несколько уровней других масштабов — от молекул к наноуровню, микроскопическому и макроскопическому уровню. При этом нельзя фокусироваться только на каком-то одном уровне. Наномасштабные устройства нужно моделировать в контексте всего их окружения. В электронике моделирование выполняется согласно следующей схеме возрастающей сложности:

материал $\Rightarrow$ устройство $\Rightarrow$ электросхема $\Rightarrow$ система $\Rightarrow$ архитектура.

Для успешного перехода к моделированию в наномасштабе большое значение имеют новые методы соединения уровней разных масштабов. Улучшенные теоретические модели позволят моделировать поведение электронных устройств в целом, а не по отдельности. Успех работы инженеров будет зависеть от успешного взаимодействия разных частей и функций готового устройства.

ТРУДНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для успешного создания наномасштабных структур необходимо использовать такие методы компьютерного моделирования, которые позволят адекватно воспроизвести процессы на нескольких уровнях. Для имитации поведения сложных биологических молекул необходимо придумать новые методы оптимизации сложных структур, которые смогут привести к предсказуемой самосборке наноструктур, например сворачивания (или фолдинга) белка.



Сворачивание (или фолдинг) белка — это процесс спонтанного сворачивания полипептидной цепочки белковых молекул в более крупные и сложные структуры.



ЧАСТЬ I Открытие

Эти методы должны быть совместимы и доступны для широкого круга специалистов, чтобы обеспечить общую эффективность работы проектируемого наноустройства. Полученные результаты компьютерного моделирования должны иметь необходимую надежность и точность, а также согласовываться с числовыми расчетами и теоретическими оценками. В настоящее время для этого созданы и используются среды коллективного поиска решения и совместные базы данных. Благодаря им ученые из географически удаленных организаций могут совместно работать над одной проблемой.

С развитием компьютерных технологий появляются новые мощные инструменты исследования нанотехнологий. Параллельные компьютеры и методы параллельного вычисления значительно расширяют возможности моделирования наноструктур и решения многих задач нанотехнологий.

ПАРАМЕТРЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ученые научились синтезировать и анализировать наномасштабные структуры, а также манипулировать ими. Помимо широкого круга фундаментальных и прикладных результатов с их работой связано появление множества новых сложных вопросов. Для интерпретации экспериментальных результатов, полученных на наномасштабном уровне, необходимо создать математическую модель взаимодействия между измерительным инструментом и изучаемым объектом. В таблице 4.1 перечислены только некоторые составные части (компоненты, понятия, свойства, параметры) математических моделей, которые необходимо учитывать при компьютерном моделировании наноструктур.

Таблица 4.1. Составные части математических моделей наноструктур

Параметр	Описание
Актуатор	Компонент, преобразующий электрическую энергию в механическую
Биочип	Компонент, выполняющий биологические операции с помощью гидравлической или электрической схемы
Биоинформатика	Наука, изучающая генетическую информацию
Броуновское движение	Тепловое движение микроскопических взвешенных частиц, (броуновские частицы) твердого вещества (пылинки, крупинки взвеси, и т. д.), находящегося в жидкой или газобразной среде



Параметр	Описание
Декартова система координат	Прямоугольная система координат на плоскости, которая образуется двумя взаимно перпендикулярными осями координат
Дифракция	Распространение электромагнитной волны иначе, чем предписывают законы геометрической оптики
Энтропия	Мера необратимого рассеивания энергии
Эмерджентность	Наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих ее элементам
Наногидравлика	Наука манипулирования наномасштабными объемами жидкости
Флуоресценция	Свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения
Фрактальность	Математическое самоподобие объекта или его свойств
Изомерия	Существование соединений, одинаковых по элементному составу и молекулярной массе, но различных по физическим и химическим свойствам
Ламинарное течение	Течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций скоростей и давлений
Линейная обработка	Способ вычислений, выполняемых последовательно шаг за шагом
Монокот	Тип конструкции, в которой (в отличие от каркасных или рамных конструкций) внешняя оболочка является основным и единственным несущим элементом
Оптоэлектроника	Раздел физики и техники, связанный с преобразованием электромагнитного излучения оптического диапазона в электрический ток и обратно
Орбиталь	Геометрическое представление о движении электрона в атоме, отражающее тот факт, что движение электрона в атоме описывается законами квантовой механики
Осциллятор	Физическая система, совершающая колебания, — ее показатели периодически повторяются во времени
Параллельная обработка	Способ вычислений, выполняемых независимо друг от друга
Фотокатализ	Ускорение фотохимических реакций в присутствии катализатора
Давление	Отношение силы, направленной перпендикулярно к поверхности взаимодействия между телами, к площади этой поверхности



ЧАСТЬ I Открытие

Таблица 4.1. Продолжение

Параметр	Описание
Квантовая точка	Фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по всем трем пространственным измерениям и содержащий электроны проводимости; причем он настолько мал, что становятся существенными квантовые эффекты
Квантовое туннелирование	Явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике, когда частицы преодолевают потенциальный барьер, обладая меньшей полной энергией (при туннелировании остается неизменной), чем высота барьера
Самосборка	Способность системы к самоорганизованному созданию сложной структуры на основе более простых элементов
Спинтроника	Область квантовой электроники, использующая эффект спинового токопереноса
Сверхпроводимость	Способность некоторых материалов обладать близким к нулю электрическим сопротивлением при температуре ниже определенного значения
Термоэлектрический эффект	Преобразование электрической энергии в тепловую
Топология	Раздел математики, изучающий свойства геометрических объектов, не меняющиеся при малых деформациях и не зависящие от способа их создания
Транзистор	Полупроводниковый прибор, в котором током в цепи двух электродов управляет третий электрод
Трансляция	Параллельный перенос в геометрии и поступательное движение в механике

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Воспроизводимость результатов — это наличие возможности повторить научный эксперимент с получением таких же результатов. Для обеспечения высокой воспроизводимости результатов и качества наноструктур и наноматериалов необходимо рассмотреть несколько переменных. Во многих процессах (от виноделия до создания биочипов) есть факторы, которые являются критическими: температура, давление, концентрация компонентов, время обработки и т. д.

В исследованиях, проводимых в рамках Национальной нанотехнологической инициативы США (National Nanotechnology Initiative — NNI), придается огромное значение эксперименту, теории и компьютерному моделированию (более подробно об этой инициативе рассказывается в других главах этой книги). Действительно,



благодаря умелому взаимодействию экспериментаторов, теоретиков и специалистов компьютерного моделирования удалось получить много важных результатов.

В Национальной лаборатории Оук-Ридж недавно был основан Институт теории наноматериалов (Nanomaterials Theory Institute), задача которого состоит в упрочении связей между теорией и компьютерным моделированием. Объектами исследования этого института являются неорганические наноматериалы, самособирающиеся наноструктуры, нанокатализаторы и многое другое.

Моделирование наноматериалов основано на квантовых законах движения и взаимодействия электронов, спинов и т. п. С их помощью теоретики моделируют поведение атомов и молекул, а также изучают и предсказывают их взаимодействие. Компьютерное моделирование используется и для объяснения экспериментальных результатов, например, по рассеянию нейтронов.

СОВМЕСТИМОСТЬ

Нанонаука и нанотехнологии предоставляют возможность совместно использовать сложные наночастицы и наноматериалы, прежде считавшиеся несовместимыми. Такие комбинации описываются в части II этой книги. Например, поверхность некоторых неорганических материалов химически связывается с биологическими молекулами. Полученные таким образом полые сферы можно применять для специализированной доставки лекарств.

Почему это возможно? Все дело в размерах! Данное наблюдение доказывает, что можно создавать новые материалы, манипулируя наночастицами, а не крупномасштабными объектами. В биологии, химии и физике существует огромное количество таких возможностей на атомарном и молекулярном уровне. На наномасштабном уровне ученые и инженеры могут использовать гораздо более широкий выбор сложных инструментов.

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА

В настоящее время размеры полупроводниковых устройств достигли наномасштабного уровня. Теперь транзисторы в высокопроизводительных процессорах имеют нанометровые размеры. Поэтому при оценке их работы следует учитывать сложные квантовые свойства столь малых объектов. Для проектирования и компьютерного моделирования таких наномасштабных объектов требуется решить множество довольно сложных задач.



ЧАСТЬ I Открытие

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каком микроскопе используется лазерное ультрафиолетовое излучение и сканирующие зеркала для съемки флуоресцирующего образца?
 - (а) сканирующем конфокальном;
 - (б) атомном силовом;
 - (в) оптическом;
 - (г) сканирующем электронном.
2. Помимо качества продукции, при промышленном производстве наноматериалов нужно учитывать следующий основной фактор:
 - (а) стоимость материалов;
 - (б) воспроизводимость;
 - (в) график отпусков инженеров;
 - (г) охлаждение.
3. Способность оптического прибора измерять расстояние или угол между близкими объектами называется:
 - (а) микроскопией;
 - (б) разрешением;
 - (в) молекулярной электроникой;
 - (г) фотосинтезом.
4. Сканирующий зондовый микроскоп используется для изучения:
 - (а) химического состава объекта;
 - (б) толщины человеческого волоса;
 - (в) поверхностных свойств материала на атомарном и наномасштабном уровне;
 - (г) вращения Земли вокруг своей оси.
5. Изображения, которые можно видеть с помощью ПЭМ, в 1000 раз меньше, чем рассматриваемые с помощью оптического микроскопа, и меньше всего, что видно невооруженным глазом:
 - (а) в 10 раз;
 - (б) в 50 раз;
 - (в) в 50 000 раз;
 - (г) в 500 000 раз.

ГЛАВА 4 Наноинструменты



6. Для изучения и создания нанотехнологий не используются:
 - (а) измерительные инструменты;
 - (б) производственные инструменты;
 - (в) инструменты моделирования;
 - (г) консервный нож.
7. Для наблюдения фуллерена и других сложных молекулярных объектов ученые используют:
 - (а) увеличительное стекло;
 - (б) светячков;
 - (в) электроны вместо света;
 - (г) бинокль.
8. На проигрыватель граммофонных пластинок похож микроскоп:
 - (а) АТМ;
 - (б) АДД;
 - (в) ЛСМ;
 - (г) СЗМ.
9. Нанотехнологии позволяют химически связывать поверхность золота:
 - (а) с комарами;
 - (б) алюминием;
 - (в) молекулами диоксида углерода;
 - (г) биологическими молекулами.
10. Электроны, преодолевая потенциальный барьер с полной энергией, которая меньше высоты барьера, формируют:
 - (а) роющий ток;
 - (б) туннельный ток;
 - (в) магнетизм;
 - (г) нижележащий ток.

Тест к части I

1. На проигрыватель граммофонных пластинок похож микроскоп:
(а) оптический;
(б) ЛСМ;
(в) СЗМ;
(г) ПЭМ.
2. Нанометр равен:
(а) одной миллиардной метра;
(б) одной миллионной метра;
(в) одной тысячной метра;
(г) одной сотой метра.
3. До открытия фуллерена самым прочным веществом считался:
(а) свинец;
(б) золото;
(в) криптон;
(г) алмаз.
4. Увеличением микроскопа называется величина, которая указывает, во сколько раз изображение изучаемого объекта:
(а) меньше его реального размера;
(б) больше его реального размера;
(в) плотнее оригинала;
(г) светлее его реального свечения.
5. Метрическая система основана на:
(а) бушеле и пеке;
(б) метре и килограмме;
(в) щепотке и фунте;
(г) ярде и миле.
6. Электрический мотор, работа которого основана на материалах, под действием электрического напряжения изменяющих форму, называется:
(а) пицца-мотором;
(б) крадущимся мотором;
(в) роторным мотором;
(г) пьезомотором.



7. Нанотехнологии вызывают повышенный интерес:
 - (а) у малышей;
 - (б) у инвесторов;
 - (в) у блондинок;
 - (г) у учителей словесности.
8. Эрик Дрекслер для привлечения общественного внимания к будущим проблемам нанотехнологии предложил идею:
 - (а) черного комка;
 - (б) пурпурной пены;
 - (в) серой слизи;
 - (г) зеленой слизи.
9. Для изучения и создания нанотехнологий используются все перечисленные ниже инструменты, кроме:
 - (а) инструментов моделирования;
 - (б) производственных инструментов;
 - (в) измерительных инструментов;
 - (г) садовых инструментов.
10. Наноразмерные частицы оксида цинка используются для защиты от:
 - (а) солнечного света;
 - (б) ветра;
 - (в) износа;
 - (г) плохой погоды.
11. При изменении диаметра ядра и толщины золотого слоя у наноболочки меняется:
 - (а) вес;
 - (б) отскок;
 - (в) цвет;
 - (г) запах.
12. Дж. Дж. Томсон открыл отрицательно заряженные частицы, которые теперь известны как:
 - (а) протоны;
 - (б) электроны;
 - (в) кварки;
 - (г) нейтроны.



ЧАСТЬ I Открытие

13. Метод, в котором атомы и молекулы самостоятельно собираются в наноструктуры под действием химических и каталитических реакций, называется:
- (а) восходящим, или методом снизу вверх;
 - (б) нисходящим, или методом сверху вниз;
 - (в) промышленным;
 - (г) археологическим.
14. Микроскоп, который способен дать информацию о химическом составе, молекулярных связях, электрической проводимости и т. п., называется:
- (а) МЭТ;
 - (б) АЭМ;
 - (в) АОЛ;
 - (г) АИМ.
15. В 1959 г. Ричард Фейнман заявил, что манипуляция атомами вполне реальна и не нарушает никаких законов природы, но:
- (а) это очень хлопотное дело;
 - (б) современными средствами сложно осуществлять такие тонкие манипуляции;
 - (в) это плохо оплачиваемая работа;
 - (г) это бесконечно долгое занятие.
16. Для захвата и перемещения нанометровых структур в трехмерном пространстве используются:
- (а) оптические пинцеты;
 - (б) кухонные вилки;
 - (в) ювелирные щипчики;
 - (г) боксерские перчатки.
17. Простейшей структурной единицей вещества является:
- (а) кристалл;
 - (б) нанотрубка;
 - (в) молекула;
 - (г) полисахарид.
18. К наноинструментам относятся все перечисленные ниже предметы, кроме:
- (а) магнитов;
 - (б) оптики;
 - (в) молотков;
 - (г) электросхем.



19. Химической формулой перекиси водорода является:
(а) H_2O ;
(б) H_2O_2 ;
(в) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$;
(г) $\text{Pb}(\text{SO}_4)$.
20. Нанотехнологии стали всем перечисленным ниже, кроме:
(а) интенсивной области исследования;
(б) модного словечка рекламистов;
(в) источника истерии в средствах массовой информации;
(г) угрозы Вселенной.
21. Наночастица по сравнению с клеткой по размерам выглядит так же, как бильярдный шар по сравнению:
(а) с Эйфелевой башней;
(б) легковым автомобилем;
(в) собачьим носом;
(г) мостом Золотые ворота в Сан-Франциско.
22. Нанотехнологии обработки поверхности позволяют создать перечисленные ниже новые свойства, за исключением:
(а) оптических;
(б) интеллектуальных;
(в) электрических;
(г) термических.
23. Буквосочетание «нано» используется для обозначения множителя:
(а) 10^{-9} ;
(б) 10^{-4} ;
(в) 10^2 ;
(г) 10^7 .
24. Инженеры используют нанотехнологии для создания материалов:
(а) по минимальной цене;
(б) до ухода в отпуск;
(в) атом за атомом;
(г) с помощью теории струн.
25. Современная Периодическая таблица элементов содержит около:
(а) 28 элементов;
(б) 57 элементов;
(в) 82 элементов;
(г) 118 элементов.



ЧАСТЬ I Открытие

26. Молекулярная структурная формула описывает:
- (а) пространственное упорядочение и расположение элементов;
 - (б) стоимость;
 - (в) количество атомов углерода;
 - (г) реактивную способность.
27. Микроскопическая теория, теория сложных систем и мультимасштабные методы — это:
- (а) виды вечерних телевизионных шоу;
 - (б) английские методы измерения;
 - (в) названия теорий, моделей и методов моделирования;
 - (г) способы исследования движения Земли.
28. Эрнест Резерфорд получил Нобелевскую премию по физике в 1908 г. и рыцарское звание в 1914 г. за:
- (а) рецепт шоколадного торта;
 - (б) открытие спина электрона;
 - (в) теорию тектонических плит;
 - (г) современную концепцию атома.
29. Автором высказывания о том, что всю информацию из всех книг со всего мира можно будет разместить в кубе с ребром чуть более 0,1 мм, является:
- (а) Ричард Смолли;
 - (б) Ричард Фейнман;
 - (в) Роберт Керл;
 - (г) Джеймс Хиз.
30. Наименьший предмет, который способен разглядеть человек невооруженным глазом, имеет размер:
- (а) 100 нм;
 - (б) 1000 нм;
 - (в) 10 000 нм;
 - (г) 100 000 нм.
31. В 1989 г. Дон Эйглер из Альмаденской научно-исследовательской лаборатории компании IBM в Сан-Хосе, штат Калифорния (США), изумил научную общественность тем, что:
- (а) выполнил сложные исследования с небольшим бюджетом;
 - (б) первым увидел микроорганизмы;
 - (в) сложил слово «IBM» из 35 атомов ксенона и сфотографировал его;
 - (г) получил вторую научную степень в филологии.



- 32.** Большинство компьютерных чипов делается по технологии:
- (а) поперечной;
 - (б) нисходящей, или технологии «сверху вниз»;
 - (в) топографической;
 - (г) восходящей, или технологии «снизу вверх».
- 33.** Количество статей, посвященных нанотехнологиям и опубликованных в период с 1990 до 2005 г., увеличилось с 0 до:
- (а) 10 000;
 - (б) 15 000;
 - (в) 20 000;
 - (г) 30 000.
- 34.** Просвечивающий электронный микроскоп:
- (а) сканирует поверхность образца;
 - (б) передает электричество;
 - (в) просвечивает образец видимым светом;
 - (г) просвечивает образец, как слайд в проекторе.
- 35.** Фуллерен имеет сферическую форму, а графит состоит из:
- (а) пластин;
 - (б) додекаэдров;
 - (в) тетраэдров;
 - (г) овалов.
- 36.** Нанобот — это:
- (а) новая новогодняя елочная игрушка;
 - (б) миниатюрный луноход;
 - (в) сборщик молекул;
 - (г) сложная карточная игра.
- 37.** Чтобы материал считался наномасштабным, нужно, чтобы хотя бы одно его измерение было не больше:
- (а) 25 нм;
 - (б) 50 нм;
 - (в) 100 нм;
 - (г) 200 нм.
- 38.** Ученые придумывают новые методы оптимизации сложных наноструктур для предсказания их:
- (а) цвета;
 - (б) самосборки;
 - (в) запаха;
 - (г) сроков изготовления.



ЧАСТЬ I Открытие

- 39.** Мировой рекорд для размеров модели нанотрубки, который был занесен в Книгу рекордов Гиннесса, равен:
- (а) 880 футов;
 - (б) 1180 футов;
 - (в) 1420 футов;
 - (г) 1820 футов.
- 40.** Комбинацию просвечивающего электронного микроскопа с рентгеновским и электронным спектрометром часто называют:
- (а) стереомикроскопом;
 - (б) конфокальным микроскопом;
 - (в) темнопольным микроскопом;
 - (г) аналитическим электронным микроскопом.

Часть II

«МОКРЫЕ» (ОРГАНИЧЕСКИЕ) ПРИЛОЖЕНИЯ



Глава 5

Биология

Наномасштабный мир значительно отличается от того мира, который мы знаем и любим и в котором все предметы — от самолетов, поездов и автомобилей до туфель, карандашей и вчерашней пиццы — определяется их крупномасштабными массивными свойствами. Всем окружающим нас макроскопическим предметам с размерами от миллиметров до километров присущи такие свойства, как трение, пластичность, прилипание, упругость и т. п. Благодаря этим свойствам наши дома прочно стоят на своих фундаментах и не рушатся, как карточные домики.

В наномасштабе, наоборот, поведение объектов очень сильно зависит от их размеров. Например, как обычная пыль более подвержена порывам ветра и менее сдерживается силой тяжести, так и наночастицы менее чувствительны к гравитационному притяжению. Состояние атомов и молекул в большей мере зависит от влияния соседних объектов. Контактное взаимодействие атомов и молекул гораздо сильнее их гравитационного притяжения. На движение и реакционную активность наночастицы оказывают также влияние внешние силы, например электромагнитное поле, газовые и жидкостные потоки, тепло и холод.

Как нам уже известно из главы 2, наночастицы имеют размеры, сравнимые с размерами атомов, ширина которых примерно 0,1 нм. Объект считается наномасштабным, когда хотя бы одно из его измерений находится в интервале от 1 до 100 нм. Хотя бы одно измерение большинства биологических объектов попадает в этот диапазон. На рисунке 5.1 приведены относительные размеры некоторых органических объектов, которые невозможно разглядеть невооруженным глазом.

Большинство одноклеточных организмов содержит еще более мелкие компоненты: ядро, митохондрию, аппарат Гольджи и др. Эти компоненты клетки выполняют разнообразные сложные функции, например поставляют энергию или способствуют воспроизводству.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

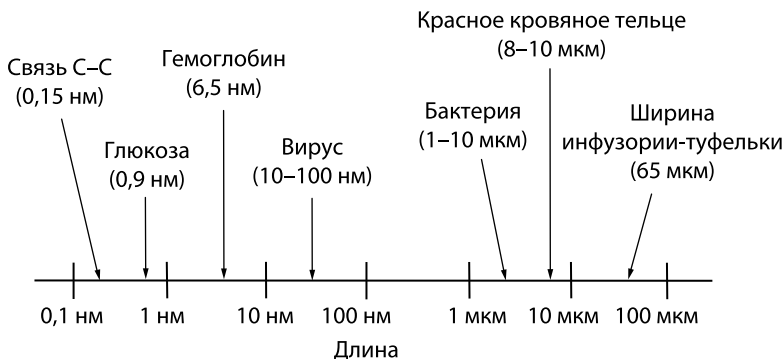


Рис. 5.1. Даже на наномасштабном уровне объекты имеют разные размеры

Граница раздела

Поверхность раздела между разными состояниями веществ, например жидким и твердым, играет важную роль для их растворимости. Ученые научились с помощью биологических нанотехнологий превращать нерастворимые в воде вещества в растворимые, которые могут функционировать в различных жидких растворах, включая растворы живого организма. Открытие новых способов таких превращений (из сухого состояния в мокрое) является ключевым фактором успешного внедрения нанотехнологий в биологических и медицинских целях.

Один из способов состоит в том, чтобы взять нечто из «царства сухого», например золото, и присоединить его к «царству мокрого», например больной клетке, с помощью специальных антител. Таким образом, для лечения болезней, например рака, можно использовать нетоксичные частицы или гибридные субстанции. Нанотехнологии обладают огромным потенциалом для влияния на отдельные клетки, органы, микроорганизмы и даже экосистемы.

Кроме того, живые организмы можно использовать для создания наноструктур. Природа переполнена разнообразными углеводородными системами, которые выполняют сложнейшие химические, физические и биологические функции. Если ученые смогут научиться использовать эти биологические системы для синтеза наноструктур, то это полностью изменит наши представления о химии, биологии и материаловедении.

Рукотворные наноматериалы являются «иностранцами» в биологических системах. Потому для их применения в медицинских и эко-



логических целях важно понять, какое влияние они оказывают на биохимические процессы. Для новых применений нанотехнологий необходимо четко представлять, как взаимодействуют биологические системы («мокрое царство») и неорганические наноматериалы («сухое царство»).

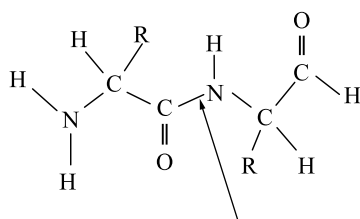
БИОМЕХАНИКА ПРИРОДЫ

Природа демонстрирует огромное разнообразие живых организмов — от крошечных насекомых до огромных синих китов. В основе всех этих биологических конструкций лежат белки. Белок представляет собой центральный атом углерода с ответвлениями: аминокислотной группой, карбоксильной группой и боковыми цепочками разной длины.



Белки — это высокомолекулярные органические вещества, состоящие из аминокислот, соединенных в цепочку пептидной связью.

Итак, несколько связанных *пептидными связями* аминокислот образуют цепочку белка. На рисунке 5.2 показана структура типичного белка с пептидными связями. Свойства этих связей позволяют ученым манипулировать внутриклеточными механизмами в определенных биологических целях.



Пептидная связь
между аминокислотами

Рис. 5.2. Структура белка может быть простой или сложной (в зависимости от пептидных связей или боковых ответвлений)

На рисунке 5.2 показана пептидная связь, которая соединяет аминокислоты, а также *донорская* водородная связь, то есть связь между азотом (N) и водородом (H), и *акцепторная* водородная связь — двойная связь между углеродом (C) и кислородом (O). Эти связи определяют свойства и функции новых наноструктур и наноматериалов.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

Ученые считают, что нанотехнологии призваны оказывать помощь Матери-Природе. Добавляя атомы и молекулы в белковые структуры или удаляя их, можно научиться лечить некоторые болезни или даже предотвращать их.

Чтобы понять принцип работы белков в клетках, необходимо иметь возможность узнать, как они устроены. Например, нельзя раскрыть секреты биологических молекул, если не известна их базовая структура.

УОТСОН И КРИК

По образному выражению ученых, белки в *ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота)* содержат *план жизни*. Они действительно хранят программу развития и функционирования живого организма.

Все животные (от трубочкуса и броненосца до бегемота и человека) содержат ДНК с записанными основами строения данного животного, которые передаются из поколения в поколение.

В 1953 г. биологи Джеймс Уотсон (James Watson) и Фрэнсис Крик (Francis Crick) в Кембриджском университете (Великобритания) изучали структуру ДНК с помощью методов *рентгеновской кристаллографии*. На основании полученных данных они создали физическую модель ДНК. Позже существование предложенной ими структуры двойной спирали было доказано, а их работа была отмечена Нобелевской премией по физиологии и медицине 1962 г. «За открытия, касающиеся молекулярной структуры нуклеиновых кислот и их значение для передачи информации в живых системах».

После открытия структуры ДНК ученые стали лучше понимать механизмы наследственности и наследственных заболеваний. ДНК содержит фрагменты, которые хранят информацию о белках тела организма, а также о разных ферментах.

Каждая молекула ДНК состоит из двух длинных нитей, соединенных водородными связями и закрученных в виде *двойной спирали*. Нити включают перемежающиеся группы, которые содержат фосфат, сахар и одно из четырех азотистых оснований. Нити связаны друг с другом с помощью водородных связей между парами азотистых оснований.

Итак, сахар с пятью атомами углерода (*дезоксирибоза*), фосфат и азотистое основание образуют *нуклеотид*. Четыре азотистых основания (базы) — гуанин (Г), цитозин (Ц), аденин (А) и тимин (Т) —



образуют *генетический код*. Фактически они играют роль клеточной памяти, в которой записана информация о том, как создать ферменты и другие белки. На рисунке 5.3 схематически показана структура двойной спирали молекулы ДНК.

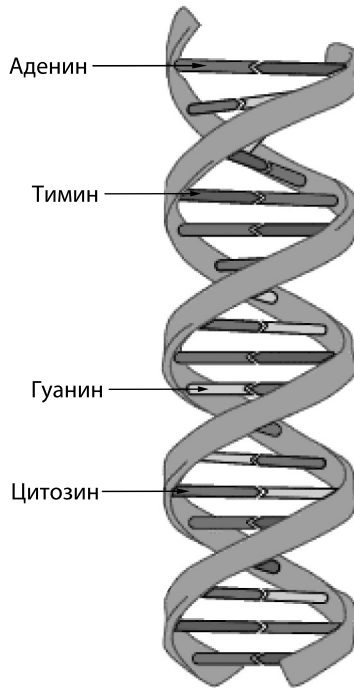


Рис. 5.3. Молекула ДНК состоит из закрученных в спираль двух связанных нитей, которые образованы из цепочек четырех азотистых оснований

Обе цепочки ДНК удерживаются вместе с помощью *пуриновых* или *пиридиновых* оснований, которые образуют связанные пары. Причем аденин (пуриновое основание) может быть связан только с тиминном (пиридиновое основание), а гуанин (пуриновое основание) — с цитозином (пиридиновое основание).

Аденин ↔ Тимин

Гуанин ↔ Цитозин

Четыре нуклеотида (А, Т, Ц и Г) в разных сочетаниях двух цепочек ДНК содержат полный план строения и функционирования



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

организма. Они способны копировать эту информацию с поразительно высокой точностью. В организме человека каждая клетка содержит 46 отдельных молекул ДНК, причем в каждой находится около 160 млн пар нуклеотидов. И весь этот огромный объем информации копируется и хранится почти без ошибок. Это гораздо более надежная система хранения информации, чем компьютер!

КОД ДНК

ДНК человека содержит план, или код, строения всего организма. Для выполнения закодированных инструкций информация копируется и передается другим молекулам. Если одна нить ДНК содержит последовательность азотистых оснований АГЦГЦААГ, то во второй нити соответствующая ей последовательность будет иметь вид ТЦГЦГТТЦ. Этот принцип соответствия азотистых оснований сохраняется всегда, если только ДНК не получила какое-то повреждение.

Повреждение ДНК может быть вызвано разными факторами, например радиационным облучением. Именно по этой причине беременным женщинам не рекомендуется проходить рентгенографию. Дело в том, что рентгеновское облучение может повредить структуру белков в молекулах ДНК зародыша.

Конечно, большое значение имеет место и величина ошибки при копировании ДНК. Если участок ДНК с последовательностью азотистых оснований ГГЦААТЦ скопировался в последовательность ГГГААТЦ, то потенциальный вред от такой ошибки будет зависеть от того, что именно закодировано в данном участке ДНК. Одним из перспективных направлений развития нанотехнологий является возможность исправления таких ошибок в генетическом коде. Если бы ученые научились удалять или заменять отдельные атомы, то они могли бы лечить многие генетические заболевания, например серповидно-клеточную анемию. Ученым предстоит еще много и основательно потрудиться, чтобы научиться складывать подобные биологические пазлы.

Известно, что последовательности нуклеотидов в ДНК отвечают за включение и выключение некоторых процессов, создание белков и других биологических структур. Однако есть много последовательностей, роль которых до сих пор неясна. Новые нанотехнологии и наноинструменты позволят заглянуть глубже (вплоть до атомарного уровня) и лучше рассмотреть, что происходит на наноуровне и как это можно использовать во благо человечества.



Наблюдение за биологическими структурами и процессами

Успех наблюдения за биологическими структурами и процессами в основном зависит от умелого приготовления исследуемых образцов. Чем лучше лабораторное оборудование и чище образец, тем больше вероятность точного определения его структуры, химического состава и свойств. Часто студентам не удается добиться хороших результатов даже с помощью того же оборудования и тех же методов, которыми пользуются их более опытные наставники. Опыт и тщательность в мелочах играют большую роль! Иногда простое изменение процедуры, например перенос только что полученного образца в холодильник в другой конец лаборатории вместо мгновенного помещения его в контейнер со льдом, может значительно снизить качество полученных результатов.

Маститым ученым необходим весь их опыт, чтобы получить наилучшие результаты. При этом они стремятся использовать именно те специфические свойства исследуемого объекта, которые позволят получить наибольший объем информации о нем. Например, если образец способен флуоресцировать, то для наблюдения за ним следует анализировать флуоресценцию, а если образец является хорошим проводником, измерять его электрические свойства.

РЕНТГЕНОВСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Рентгеновская кристаллография позволяет получить наиболее подробную информацию об атомной структуре исследуемого объекта. С помощью методов рентгеновской кристаллографии можно добывать сведения о конфигурации электронов и трехмерном распределении их плотности.

Для этого сначала пытаются вырастить чистый кристалл на основе исследуемой молекулы. Затем его помещают в рентгеновскую установку и освещают пучком рентгеновского излучения. Пучок дифрагирует (отклоняется) на структуре молекулы, а дифракционная картина фиксируется детектором и анализируется компьютером. На основе полученной информации воссоздается карта распределения электронной плотности. Например, таким образом можно определить типы связей и расположение азотистых оснований в молекуле ДНК, как показано на рис. 5.4.

Действительно, расположение атомов можно определять с точностью до доли ангстрема (около 10^{-8} см). В зависимости от спосо-



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

ба создания (выращивания) кристалла в нем могут быть некоторые структурные отличия.

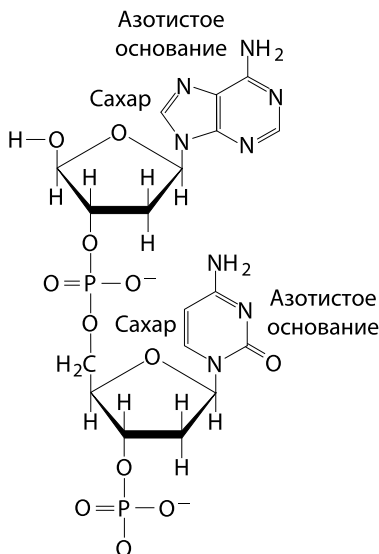


Рис. 5.4. С помощью методов рентгеновской кристаллографии можно определять расположение азотистых оснований в молекуле ДНК

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

В главе 4 уже упоминалось об использовании электронной микроскопии для определения общей структуры биологических молекул. Электронные микроскопы обладают разрешением около 2 нм и позволяют наблюдать за общим видом сложных биологических структур, но не за отдельными атомами. СЭМ и ПЭМ используются для изучения общей структуры сложных биологических молекул.

Результаты, полученные с помощью методов электронной микроскопии и рентгеновской кристаллографии, используют для компьютерного моделирования и анализа атомарной структуры крупных сложных молекул.

НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ОДНОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Группа исследователей под руководством профессора Брюса Вайсмана (Bruce Weisman) и Ребекки Дрезек (Rebekkah Drezek) из Центра исследования нанотехнологий в биологии и охраны окру-



жающей среды (Center for Biological and Environment Quality — CBEN) Университета Райс (США) ищет новые способы получения, очистки и анализа биологических наночастиц.

В своей работе они используют однослойные углеродные нанотрубки, которые упрощают процесс наблюдения за некоторыми биологическими процессами. Работа осложняется большими техническими трудностями, связанными с тем, что получаемые нанотрубки имеют разные размеры, форму и ориентацию. Ученым нужно проверить и отфильтровать только нанотрубки, которые годятся для их целей. Они впервые стали использовать *спектральный анализ* нанотрубок в биологических целях. Для этого были собраны данные о 33 разных типах полупроводящих нанотрубок. Располагая такими сведениями, ученые смогли использовать их для эффективного создания и выборки именно тех нанотрубок, которые больше всего подходят для их целей.



Спектроскопия (спектральный анализ) — это наука, которая изучает взаимодействие излучения с разной длиной волны и вещества. Объектом исследования при этом является **спектр** излучения, то есть распределение интенсивности излучения в зависимости от длины волны.

Одна из наиболее важных целей новых наномасштабных исследований в биологии — поиск «иголки в стоге сена». Точнее говоря, ученых часто интересует, в каком именно месте происходят изменения, например повреждение белка, и каковы следствия такого повреждения в разных клетках и биологических системах. На рисунке 5.5 показана типичная схема определения повреждения на разных стадиях этого процесса.

Упомянутые выше исследователи из CBEN придумали способ наблюдения за *макрофагами* мышей (клетками, которые способны захватывать и переваривать другие клетки) с помощью нанотрубок. Они заметили, что в режиме *in vitro* нанотрубки никак не влияют на функции макрофагов мыши, но они хорошо видны благодаря флуоресценции. Таким образом, флуоресценция однослойных углеродных нанотрубок позволяет использовать эти нанотрубки в качестве маркеров и агентов для наблюдения за поведением биологических объектов.



Режим **in vivo** означает *внутри* живого организма, а режим **in vitro** — *вне* живого организма, например в пробирке.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

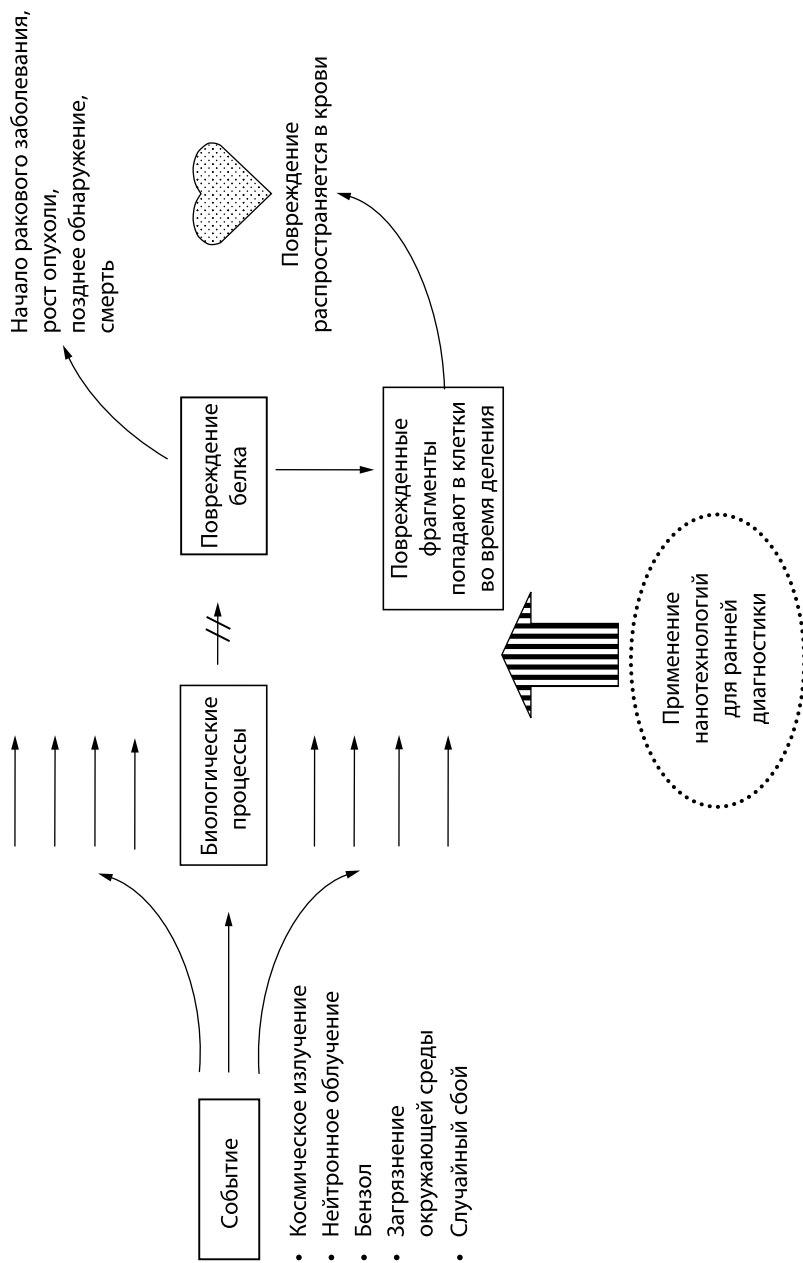


Рис. 5.5. Нанотехнологии могут помочь в ранней диагностике повреждения клеток и возникновения заболевания



Биологические наносенсоры

Биологические наносенсоры используются в различных областях, для разных приложений, включая здравоохранение, мониторинг и защиту окружающей среды, фармацевтику, гастрономию, косметику, химию, защиту от биологического терроризма и управление биологическими процессами.

Они предназначены для обнаружения специализированных биологических сигналов, которые обычно порождаются цифровым электрическим сигналом, связанным с особым биологическим или химическим объектом. Использование новых научных методов, например микро- и нанопроизводства, а также успехи электроники позволили ученым создать улучшенные биомедицинские сенсоры. Применение этих сенсоров способствовало развитию новых технологий в медицинской и фармацевтической промышленности, а также новых методов защиты окружающей среды. Например, сейчас разрабатываются наномасштабные сенсоры глюкозы, которые способны зафиксировать наличие сахарного диабета.

Биологические наносенсоры дают ученым возможность избирательно идентифицировать очень низкие концентрации токсичных соединений в промышленной продукции, химических материалах, воздухе, воде, почве, биологических системах (например, в бактериях, клетках и вирусах) и т. д. Комбинируя специфические биологические маркеры (например красители) с методами оптического детектирования и высокопроизводительными компьютерными системами, ученые научились создавать биологические наносенсоры для поиска и дифференциации сложных соединений.

Большинство биологических наносенсоров работает по принципу измерения взаимодействия изучаемого образца с неким реагентом с образованием нового продукта реакции. Эта реакция улавливается сенсором, который преобразует ее в электрический сигнал. Данный сигнал отображается или записывается с помощью компьютера. Реакции в биологических процессах могут регистрироваться преобразователем несколькими разными способами, перечисленными в табл. 5.1. Конкретный тип сенсора определяется специфическими биологическими процессами.

Ниже перечислены наиболее важные параметры биологических наносенсоров:

- способность изолировать специфический биологический фактор с небольшой степенью вмешательства других факторов;



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

- малое время отклика;
- биологическая совместимость;
- сверхмалые (нано) размеры;
- сверхвысокая чувствительность;
- сверхвысокая точность;
- прочность;
- низкая стоимость для большого количества разных тестов на одном исследуемом образце.

Таблица 5.1. Физические принципы, лежащие в основе некоторых типов биологических сенсоров

Метод преобразования	Тип биологического сенсора
Излучение или поглощение тепла	Калориметрический
Изменения распределения заряда	Потенциометрический
Движение электронов в реакциях окисления или восстановления	Амперометрический
Излучение или поглощение света	Оптический
Деформация или напряжение	Пьезоэлектрический

На пути внедрения биологических наносенсоров в лабораториях и больницах ученым придется преодолеть несколько препятствий. Биологические наносенсоры должны быть адаптированы к текущим клиническим методам и интегрированы в них. Кроме того, требуется создать новые биоинженерные технологии и усовершенствованную электронику. Например, количество попыток использования биологического сенсора может ограничиваться по мере накопления белков на биологически активных поверхностях.

Более того, для достижения высокой чувствительности, избирательности, стабильности и совместимости разных материалов требуется согласовать их электрические и биологические интерфейсы.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ, ВЯЗКОСТЬ И ЗАРЯД

На наноскопическом и молекулярном уровне базовые свойства жидких субстанций очень сильно отличаются от базовых свойств твердых тел. Эта особенность имеет большое значение для биологических наноматериалов. Дело в том, что взаимодействие атомов и молекул в значительной мере определяется их ближайшим окружением. Для успешной работы некоторых биологических наносенсоров необходимо учитывать их локальное окружение.



ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

У непосвященных этот термин может ассоциироваться с напряженной обстановкой во время корпоративных совещаний или светских приемов с участием политических соперников. В научном контексте поверхностное натяжение встречается всякий раз, когда мы видим капли дождя на листьях растений или натертых кремом башмаках.



Поверхностное натяжение возникает, когда молекулы жидкости стремятся собраться вместе для уменьшения своей поверхности и общей энергии.

Поверхностное натяжение представляет собой результат стремления нескольких молекул жидкости уменьшить затраты своей энергии за счет минимизации площади свободной поверхности (рис. 5.6).

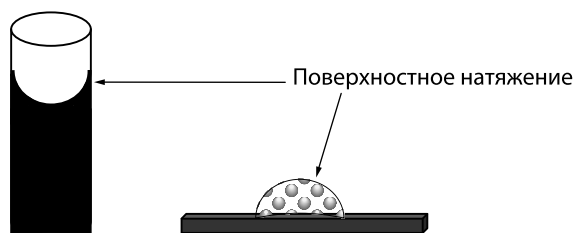


Рис. 5.6. Поверхностное натяжение воды может проявляться в виде заметной силы

Если поразмыслить, то можно понять, что люди порой ведут себя так же. Представьте себе нескольких людей, которые морозной зимой вышли из теплого дома. Все они сразу же поглубже натянут свои головные уборы, спрячут руки в карманы или наденут перчатки, чтобы уменьшить затраты общей энергии (на обогрев) за счет минимизации площади свободной поверхности (открытой всем ветрам кожи).

Исследователи, которые работают с жидкостями на молекулярном уровне, учитывают поверхностное натяжение. *Микроструйная* и *наноструйная* техника основана на изучении потоков сверхмалых количеств жидкости. Для успешной работы биологических наносенсоров и других медицинских наносистем ученым и инженерам необходимо находить способы доставки мельчайших образцов жидкости, например капелек крови, к детекторам. На наномасштабном уровне перемещать жидкости очень сложно именно из-за влияния поверхностного натяжения.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

ВЯЗКОСТЬ

Наверняка вам доводилось слышать выражение «туман густой, как чечевичная похлебка». Термин *вязкий* используется для характеристики именно такого плотного состояния жидкости, когда она сопротивляется любому перемешиванию или перемещению в ней. Прекрасным примером очень вязкой жидкости является обычный мед, жирная сметана или приготовленный дедушкой кетчуп.

Если для кулинарии вязкость не представляет проблемы, то для нанотехнологий она создает дополнительные трудности. При проектировании и создании наносенсоров ученым и инженерам всегда приходится учитывать вязкость исследуемых образцов.

Вязкость связана еще с одним свойством жидкости — *ламинарным течением*. С ламинарным течением мы сталкиваемся всякий раз, когда, например, проливаем молоко из стакана. Пролитое молоко не задерживается в одном месте, а плавно растекается по всей свободной площади.



Ламинарное течение — это спокойное непрерывное течение отдельных молекул жидкости в определенном направлении.

Характер течения жидкости и вязкость имеют огромное значение при проектировании микроскопических каналов для взятия образцов и перемещения их к сенсорам. Ведь ученые и инженеры стремятся избежать закупоривания этих каналов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА

Для исключения проблем с вязкостью и ламинарным течением жидкостей в наномасштабе используется электричество. Для перемещения молекул жидкости в заданном направлении исследователи применяют электрические свойства жидкостей.



Электрическая кинетика, или электрокинетика, — это управляемый перенос электрического заряда по сверхмалому каналу для перемещения молекул в заданном направлении.

Электрокинетика используется в лаборатории несколькими способами. В одном из них вдоль канала посылается электрический заряд, который увлекает за собой отдельные молекулы. Этот метод называется *электрофорезом*. Объекты-маркеры (например белки) исследуемого образца помещаются на одном конце субстанции-геля, через



которую пропускается электрический ток. В зависимости от размера и других характеристик молекул они начинают перемещаться с разной скоростью к противоположному концу. Затем ученые сравнивают положение отдельных маркеров и делают выводы о составе образца.

В *электрическом осмосе* (или *электроосмосе*), как и в электрофорезе, используется электрический ток, который пропускается через жидкость в канале. Молекулы реагируют друг с другом и образуют стенки электрических зарядов, которые перемещаются вдоль канала с разной скоростью.

Биологи уже давно используют электрофорез и электроосмос для анализа крупных (миллиметровых) биологических образцов. Теперь они имеют возможность использовать более совершенные и тонкие технологии на молекулярном уровне.

ЖИДКОСТНАЯ ЭЛЕКТРОСИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Доктор Джейсон Хафнер (Jason Hafner) из CBEN открыл способ измерения зарядов в наномасштабе, который можно использовать в биологических наносенсорах. С помощью так называемой *жидкостной электросиловой микроскопии*, или *ЖЭСМ* (*fluid electrical force microscopy — FEFM*), он научился измерять крошечные заряды на одной молекуле. ЖЭСМ была использована для разных биологических систем, включая липиды (жиры) биологических мембран. Сотрудники лаборатории Хафнера использовали ЖЭСМ для наблюдения за скоплениями жиров в мембранах, находящихся в жидкой и гелевой фазе.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ И МАРКЕРЫ

Еще одно достижение ученых в области создания биологических наносенсоров относится к стоматологии. Как известно, слюна очищает полость рта и предохраняет зубы от разрушения. Согласно мнению ученых из Школы стоматологии при Университете штата Калифорния (США), слюна также действует как индикатор общего здоровья человека. Дело в том, что слюна содержит много белков, гормонов, антител и других молекулярных субстанций. По мнению профессора Дэвида Вонга (David Wong), большим достоинством диагностического тестирования слюны является то, что этот метод неинвазивный, то есть не требует хирургического вмешательства. Пробу слюны можно взять довольно легко без какого-либо риска, стресса или потенциальной возможности заражения, в отличие от тестов, связанных с кровью. Кроме того, здесь не нужно никого протыкать иглками.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

Вонг с коллегами использовали биологические наносенсоры для измерения содержания в слюне четырех связанных с раком молекул РНК (рибонуклеиновой кислоты). Им удалось с точностью 91% определить совершенно здоровых людей и больных раком ротовой полости. Обладая такими точными методами, вскоре любой дантист сможет мгновенно и легко определить наличие ракового заболевания на основе анализа слюны.

По мнению Вонга, в будущем на основе анализа биологических маркеров в слюне можно будет разработать методики ранней диагностики других видов заболеваний, например рака молочной железы, яичников и поджелудочной железы, болезни Альцгеймера, СПИДа, сахарного диабета и остеопороза.

Возможность выполнять высокоточный анализ биологических мембран превращает биологические наносенсоры в еще один мощный инструмент ученых и инженеров.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЧИПЫ

В *ДНК-сенсоре* односпиральная молекула ДНК может использоваться для поиска дополнительной последовательности нуклеотидов среди смеси других односпиральных молекул ДНК. В настоящее время на основе этого эффекта создаются новые биологические наносенсоры.

ДНК-чип, или *биологический чип (биочип)*, основан на нескольких коротких молекулах ДНК, которые прикреплены к поверхности. Эти упорядоченные молекулы ДНК позволяют ученым одновременно анализировать тысячи генов. Биочип является важным инструментом исследования поведения генов, биологических маркеров и последовательностей нуклеотидов в биологическом образце. Используя результаты, полученные с помощью биочипов, генетики и медики смогут разработать профилактические меры для предотвращения многих заболеваний.

Важность исследования, создания и внедрения новых наносенсоров более подробно рассматривается в главе 9.

Влияние на биологический мир

Нанотехнологии позволяют получить ответы на вопросы, которыми задавались ученые в течение многих столетий.

Биологические нанотехнологии дают возможность исследовать внутренний мир органов и отдельных клеток, предупреждать смер-



тельные болезни и предотвращать экологические катастрофы. Ученые как будто обрели чудесный «наноскоп», который открыл им совершенно новый и непознанный мир. Используя биологические наносенсоры, биочипы и другие новые инструменты и методы исследования, ученые могут полностью изменить наш биологический мир.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Такие внешние факторы воздействия на наночастицу, как электричество и магнетизм, воздушные и водные потоки, тепло и холод, могут повлиять на:
 - (а) ее стоимость;
 - (б) положение на рынке;
 - (в) движение и взаимодействие;
 - (г) размер.
2. Методы кристаллографии позволяют получить информацию:
 - (а) о прозрачности алмаза;
 - (б) строении темной материи;
 - (в) двухмерных линейных сингулярностях;
 - (г) трехмерном распределении электронной плотности.
3. Спектроскопия используется для изучения материалов на основе анализа их:
 - (а) спектра;
 - (б) запаха;
 - (в) точки насыщения;
 - (г) размера.
4. Живую бактерию впервые наблюдал:
 - (а) Александр Флеминг;
 - (б) Гарольд Корелл;
 - (в) Антони ван Левенгук;
 - (г) Ричард Смолли.
5. Биологические маркеры рака молочной железы, болезни Альцгеймера, СПИДа, сахарного диабета и остеопороза были найдены:
 - (а) в ушной сере;
 - (б) в слюне;
 - (в) в волосах;
 - (г) в слезах.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

6. Длинные цепочки аминокислот, которые сворачиваются в специфические структуры, называются:
 - (а) липидами;
 - (б) неоцитами;
 - (в) белками;
 - (г) протоплазмой.
7. Распознавание структуры ДНК основано на:
 - (а) соответствии нити нуклеиновой кислоты и дополнительной к ней последовательности нуклеотидов;
 - (б) повышении температуры;
 - (в) фобии, связанной с визитом к врачу;
 - (г) распознавании образов в случайном упорядочении несвязанных липидов.
8. Положения атомов можно определить с точностью до нескольких:
 - (а) комариных усов;
 - (б) ангстрем;
 - (в) микрометров;
 - (г) километров.
9. Несущественной характеристикой биологического наносенсора является:
 - (а) биологическая совместимость;
 - (б) размер;
 - (в) высокая чувствительность;
 - (г) высокая стоимость.
10. Жидкостная электросиловая микроскопия связана:
 - (а) с подъемом и погружением пузырьков в жидкости;
 - (б) обнаружением крошечных зарядов на молекуле;
 - (в) концепцией хранения электроприборов в сухом месте;
 - (г) флуоресценцией молекул.

Глава 6

Медицина

Через 15 минут после взятия анализов врач возвращается и сообщает результаты их обработки. «Похоже, что все в порядке. Однако я удивлен необычной активностью поджелудочной железы», — замечает он.

При этих и следующих словах моя улыбка заметно тускнеет. Дедушка умер от рака поджелудочной железы: эта мысль мгновенно пронзает мой мозг. Он отличался завидным здоровьем на протяжении всей жизни и лишь в далекой молодости злоупотреблял курением и алкоголем. А еще вчера я выпил бокал вина во время ужина. Насколько это серьезно теперь?

Врач продолжает: «Клетки и белки демонстрируют ускоренный рост. Этот вид рака поджелудочной железы...»

Мое сердце замерло. Внезапно мне стало нехорошо. Рак? Снова? Но почему?

Длинное повествование врач заканчивает словами: «На этой ранней стадии вам достаточно сделать несколько иммунных инъекций, которые обо всем позаботятся. Согласуйте удобное для вас время с моей помощницей. Увидимся во время следующего профилактического осмотра через год».

Какое облегчение! Прежняя смертельная болезнь уже совсем не так страшна благодаря *наномедицине*.



Наномедицина — это область медицины, в которой лечение болезней и операции выполняются на молекулярном уровне.

По мнению многих ученых и медиков, возможно уже в 2015 г., эта вымышленная история будет не фантастикой, а реальностью. Согласно Плану действий в области наномедицины Национального института здравоохранения США (National Institute of Health — NIH), основными целями наномедицины являются:



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

- раннее обнаружение и устранение раковых клеток;
- удаление или замена испорченных компонентов клетки с помощью наномасштабных устройств;
- создание и имплантация молекулярных насосов для доставки медикаментов.

Исследования по созданию и использованию материалов и устройств на наномасштабном уровне, из молекул и атомов, очень активно ведутся и щедро финансируются.

Нанотехнологии могут использоваться для решения различных медицинских задач:

- хранения и извлечения генетической информации;
- диагностики, например обнаружения болезни;
- определения общей восприимчивости к некоторым болезням, например к болезни Альцгеймера;
- улучшенной классификации болезней, например разбивки их на типы и подтипы;
- точечного подбора лекарств на основе хромосомных различий;
- геной терапии, например для кистозного фиброза;
- подбора медикаментов, нацеленных на отдельные клетки, например создания антител для специальных клеток.



Рис. 6.1. Рак проникает в тело разными способами

Рак до сих пор является одним из наиболее смертоносных заболеваний. На самом деле под словом «рак» скрывается множество болезней, которые характеризуются своими особенностями и метода-



ми лечения. Рак очень хорошо маскируется и проникает в соседние части тела. На рисунке 6.1 показаны некоторые способы, с помощью которых рак преодолевает защиту организма.

Например, рак молочной железы проявляется 14 различными способами, которые отличаются степенью тяжести и быстротой роста. Хотя ученые уже раскрыли некоторые секреты раковых заболеваний, некоторые виды рака не поддаются лечению, особенно если раковая опухоль обнаружена поздно, когда она уже достаточно прочно обосновалась в теле больного. На рисунке 6.2 показана схема типичного развития рака с летальным исходом.

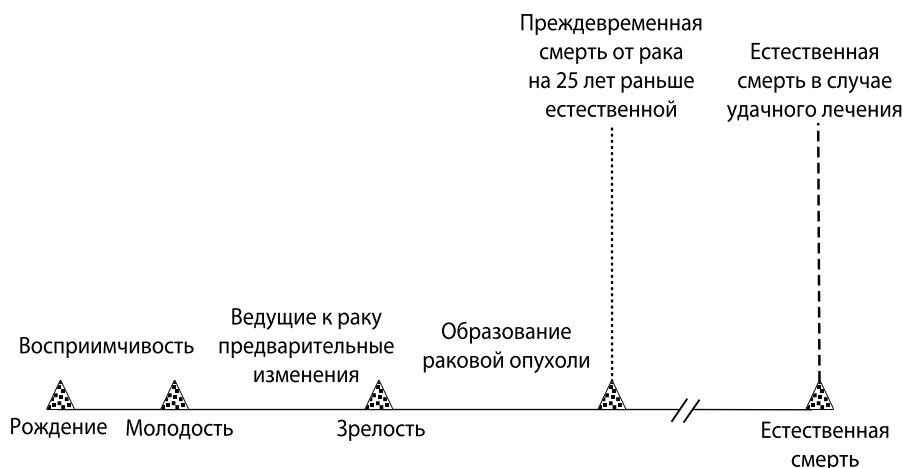


Рис. 6.2. Без ранней диагностики и своевременного медицинского вмешательства рак может привести к преждевременной смерти

В долгосрочной перспективе нанотехнологии могут дать медикам мощные инструменты лечения рака и других смертельных болезней, а может быть, и преодоления старости.

Методы лечения

В разных научных изданиях, например *Journal of Biomedical Nanotechnology* (Журнал биомедицинских нанотехнологий), описываются многочисленные примеры использования нанотехнологий в биологии, медицине и химии. Генетики, молекулярные биологи, биохимики и биоинженеры закладывают основы для создания новых улучшенных методов лечения разных болезней. Вскоре рак станет вполне



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

излечимой болезнью, как теперь диабет, причем с такими же шансами на выживание. На рисунке 6.3 показана схема типичного случая, когда рак удастся обнаружить и вылечить еще на ранней стадии.

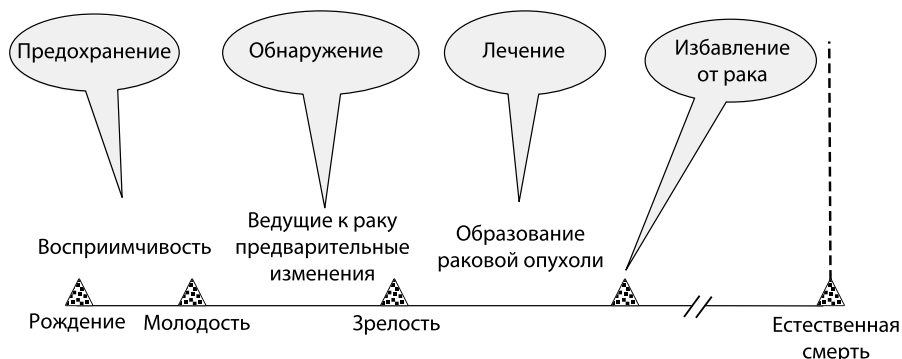


Рис. 6.3. Для успешного лечения рака ключевым фактором является время

ЛАБОРАТОРИЯ-НА-ЧИПЕ

Представьте себе маленький пластиковый чип величиной с булавочную головку, который может выдать результаты анализов в течение нескольких минут, а не через несколько дней или недель. Похоже на фантастику? Вовсе нет. Это возможно с помощью нанотехнологий.

Доктор Джеймс Хит (James Heath), профессор химии и исследователь нанотехнологий из Университета штата Калифорния в Лос-Анджелесе (США), работает над созданием устройства с 1000 ячейками-анализаторами, размещенными на 1 см² кремниевого чипа. Каждый чип имеет ряд ячеек с отдельными скважинами под порами кремния. Подсоединенная к клеточной мембране пора играет роль канала между внешней и внутренней частями клетки. Кроме того, на чипе плотно упакованы массивы *нанопроводов* (то есть линии из атомов металла толщиной в несколько нанометров). Каждый нанопровод покрыт биомолекулярным зондом (особыми белками) — например антителом, — который связывается со специфическим белком. Белки проходят сквозь мембрану и связываются с антителом, изменяя электрическую проводимость, которая измеряется детектором, присоединенным к этому массиву.

Хит с коллегами назвали этот метод *переносом сверхрешеточного нанопроводного шаблона* (super-lattice nanowire pattern transfer).



В данном методе используются отдельные полупроводящие нанопроводки с диаметром 8 нм, которые располагаются на расстоянии 8 нм друг от друга. Прежние попытки других исследователей приводили к созданию аналогичных чипов величиной на 2–3 порядка больше. На рисунке 6.4 показано фото одной из первых реализаций идеи, которая часто называется «лаборатория-на-чипе» (lab-on-chip). Обратите внимание на его гораздо более крупные размеры.

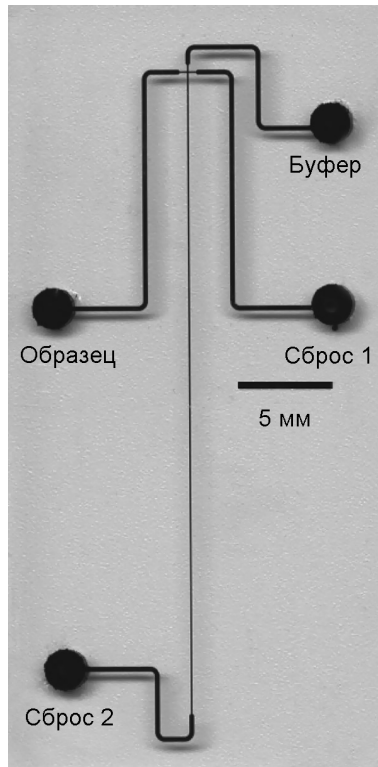


Рис. 6.4. Пример реализации идеи «лаборатория-на-чипе» (фото, полученное в рамках программы Human Genome Program, любезно предоставлено Министерством энергетики США)

Другие исследователи пытаются выяснить степень влияния внутриклеточных нанозондов на обычную деятельность клетки. Они хотят выявить типичные процессы и процессы, которые появились лишь после вмешательства. Эта работа похожа на анализ вечерней



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

деятельности среднестатистической семьи в будний день и, например, в выходной, когда обычный распорядок нарушается из-за каких-то внешних факторов: похода за покупками в супермаркет, посещения футбольного матча, приема гостей и т. п.

Для реализации технологии «лаборатория-на-чипе» используются методы, которые уже давно применяются для изготовления печатных плат в электротехнике. Такие чипы создаются с микроскопическими и наноскопическими каналами для жидкостей и химикалий.



Микроструйная техника — это область деятельности, которая изучает способы создания микро- и наномасштабных каналов для передачи жидкостей в разные клетки.

Технология «лаборатория-на-чипе» быстрее, дешевле и точнее, чем обычные технологии. Более того, эти крошечные чипы можно спроектировать для выполнения одновременно нескольких тестов. На рисунке 6.5 показана схема типичной «лаборатории-на-чипе», выполняющей сразу несколько разных тестов.

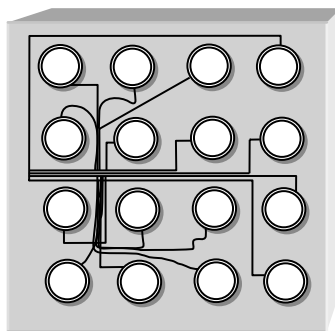


Рис. 6.5. Технология «лаборатория-на-чипе» позволяет существенно увеличить количество тестов и их чувствительность даже для небольшого объема анализируемой жидкости

Особенность нанотехнологий в том, что они позволяют создавать очень небольшие специализированные системы. На рисунке 6.5 показано только 16 анализаторов, но «лаборатория-на-чипе» может содержать сотни и даже тысячи таких анализаторов для тестирования разных химических соединений и их производных. Таким образом, с помощью «лаборатории-на-чипе» пациент может пройти один универсальный тест на наличие почти всех возможных химических



веществ. Времена, когда для этого пришлось бы выполнять длительную серию многочисленных анализов, уходят в прошлое.

Наномасштабная «лаборатория-на-чипе» позволит смешивать, разделять, тестировать и обрабатывать биологические образцы для определения их текущего состояния, наличия инфекционных и других болезней. С ее помощью можно будет проследить за взаимодействием клеток: передачей сигналов, работой энзимов и доставкой питательных веществ, образованием клеточных продуктов и многим другим. Вместо одного «снимка» одной клетки ученые смогут снять «фильм» о том, как живут несколько клеток.

КРЕМНИЕВЫЕ НАНОПРОВОДА

Ученые Гарвардского университета (США) обнаружили, что сверхтонкие кремниевые электрические нанопровода можно использовать для обнаружения отдельных вирусов. С помощью таких нанопроводов есть возможность с большой точностью определять наличие разных вирусов. Если отдельные нанопровода собрать в массив, можно сконструировать сложный анализатор, способный определять наличие тысяч разных вирусов.

Доктор Чарльз М. Либер (Charles M. Lieber), профессор химии из Гарвардского университета (США), сумел создать кремниевые нанопровода, которые могли замыкать или размыкать электрическую цепь при наличии всего одного вируса. Обнаружение вируса стало возможным благодаря тонкой подгонке параметров нанопроводов, электрического тока и рецепторов антител.

При соединении одного вируса с рецептором антитела возникает определенное изменение электрических свойств, которое является признаком наличия данного вируса. Исследователи обнаружили, что такой метод позволяет точно различать разные вирусы. Таким образом, вскоре можно будет обнаруживать опасные вирусы на очень ранних стадиях инфекционного заболевания. Дело в том, что иммунная система способна воздействовать на небольшие популяции вирусов, но особо опасные вирусы порой можно победить только с помощью медицинского вмешательства на ранней стадии, которую обычно трудно зафиксировать традиционными методами.

Борьба с раком

С развитием нанотехнологий ученые стали все чаще проводить медицинские эксперименты с использованием самых новых достижений. Медицинские нанотехнологии находятся на стыке многих дис-



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

циплин и включают результаты из области биологии, химии, физики и техники. Некоторые из них используются для нацеленной доставки медикаментов к больным клеткам, например раковым клеткам, и называются *нановекторами*. Кроме того, они применяются в качестве агента для повышения контрастности изображения — флуоресцируют или просто четко видны под микроскопом.

ЗОЛОТЫЕ НАНООБОЛОЧКИ

Пробовали ли вы когда-нибудь пропустить свет фонарика сквозь пальцы своей руки? Свет на выходе кажется красным, но совсем не потому, что кровь имеет красный цвет. Дело в том, что свет, имеющий большую длину волны, может проходить сквозь кожу без значительного рассеивания. Именно этот метод используется в фотодинамической терапии для лечения внутренних болезней.

Свет можно использовать разными способами. Если на своем пути свет повстречает металл, тот может разогреться так сильно, что в буквальном смысле поджарит окружающую его ткань (например, раковую опухоль). А если свет встретит частицу, которая сгенерирует высокоактивные молекулы кислорода, они вступят в реакцию с окружающей тканью и разрушат ее (например, снова раковую опухоль).

Дженифер Уэст (Jennifer West) и Ребекка Дрезек (Rebekah Drezek) из CBEN для обнаружения и лечения больных тканей использовали *нанооболочки* (nanoshells), созданные профессором Наоми Халас (Naomi Halas) на основе сверхмалых кварцевых шариков, покрытых тонким слоем золота (рис. 6.6).

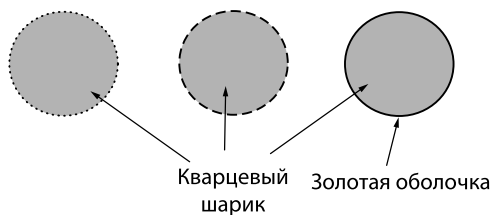


Рис. 6.6. Нанооболочки являются простыми, но очень эффективными наноагентами



Нанооболочка — это покрытый тонким слоем золота кварцевый шарик с оптическими свойствами, которые зависят от размеров шарика и толщины слоя, а также от химического состава его компонентов.



Наночастицы на основе сверхмалых кварцевых шариков, покрытых тонким слоем золота, были созданы таким образом, что поглощали свет (электромагнитное излучение) в диапазоне, близком к инфракрасному, который легче всего проходит сквозь ткани тела человека — рис. 6.7 (как известно, видимая часть спектра электромагнитного излучения для длинных волн имеет красный цвет, а для коротких — фиолетовый).

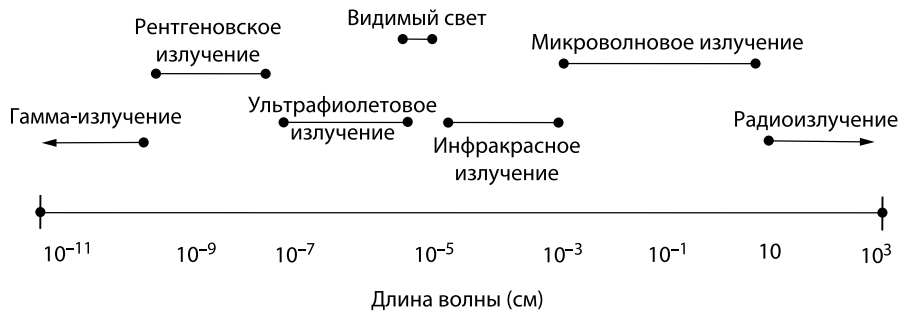


Рис. 6.7. Шкала длин волн и энергий электромагнитного излучения

Новый метод лечения рака основан на том, что крошечные наноболочки вместе с кровью проникают в раковую опухоль. Поскольку сосуды в опухоли имеют небольшие щели, наноболочки оседают и накапливаются только внутри опухоли. Это явление называется *повышенной проницаемостью и удержанием (enhanced permeability and retention — EPR)*. Наноболочки также можно соединять с антителами и направлять против *онкобелков* (онкогенных, то есть раковых, белков) или маркеров, повышая специализацию лечения до клеточного уровня.

Итак, наноболочки могут доставляться в опухоль двумя способами: с помощью EPR или антител. Однако не все раковые заболевания имеют четко выраженные маркеры, для которых можно создать антитело. К счастью, EPR можно использовать для более широкого круга раковых заболеваний даже без особых маркеров.

Например, для лечения рака молочной железы покрытые золотом наноболочки соединяют с антителами, которые способны реагировать с раковыми клетками. В эксперименте на мышах раковые клетки с этими наноболочками освещали инфракрасным лазерным лучом. При этом золото поглощало лазерное излучение, и наноболочки разогревались, а здоровые ткани были холодными. При тем-



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

пературе +55 °С раковые клетки поджарились, а здоровые остались целыми и невредимыми.

Прелесть такого нацеленного лечения состоит в том, что «поджариваются» только пораженные раком области, а здоровые ткани остаются невредимыми. Эта особенность демонстрирует огромное преимущество данного метода по сравнению с традиционной химиотерапией. При химиотерапии погибают все быстрорастущие клетки, как раковые, так и здоровые (именно по этой причине пациенты, проходящие химиотерапию, утрачивают волосы — дело в том, что клетки волосяного мешочка делятся и растут быстрее остальных и погибают первыми).

В опытах на мышах ученые добились 100-процентной эффективности в уничтожении клеток раковой опухоли молочной железы по сравнению с контрольной мышью, которая не получила никакого лечения и умерла через 30 дней. Благодаря такому прекрасному результату опыты с людьми начались уже в 2005 г.

В опытах на мышах по лечению рака прямой кишки после внутривенной инъекции нанооболочек и спустя 6 часов после облучения пораженной раком зоны исследователи зафиксировали полное уничтожение всех раковых клеток. На 10-й день все обработанные нанооболочками опухоли полностью исчезли, а опухоли контрольных мышей остались невредимыми.

На 21-й день все контрольные мыши с опухолями умерли, а у всех вылеченных таким образом мышей опухоли так и не появились.

Ученые, исследующие потенциал новых лечебных методов, должны убедиться, что новый метод лечения по крайней мере не опаснее самого заболевания. Проблемы могут возникнуть, если наночастицы не попадают в запланированные места (биологическое распространение), остаются в теле навсегда (чистота) или оказываются ядовитыми (токсичность). Поэтому, перед тем как применять нанооболочки, нужно было проверить степень их биологического распространения, чистоты и токсичности. Нанооболочки успешно прошли эту проверку.

Такие радикально новые и улучшенные методы лечения рака с помощью проникающего инфракрасного излучения вскоре помогут многим пациентам избежать страданий и побочных эффектов. Кроме того, они позволят повысить эффективность лечения, поскольку организму не придется яростно сопротивляться лечению, как при химиотерапии, когда вместе с раковыми клетками погибают здоровые клетки организма.



СВАРКА ТКАНЕЙ

Поскольку наноболочки можно проектировать таким образом, чтобы они поглощали инфракрасный свет без нагрева окружающих здоровых тканей, то в лаборатории профессора Уэст в Университете Райс (США) их решили использовать для «сварки» тканей. Сваренные таким методом ткани лучше и быстрее заживают. Это особенно важно для очень молодых и пожилых людей.

Для сварки тканей наноболочки погружают в раствор альбумина (белка) и смазывают им края раны. При освещении краев раны инфракрасным светом наноболочки нагреваются и окружающие их белки денатурируют (то есть изменяют свою структуру, как белок куриного яйца при поджаривании на сковородке) и слипаются, как при сварке металлов (рис. 6.8). При инфракрасном освещении без наноболочек никакой сварки бы не было.

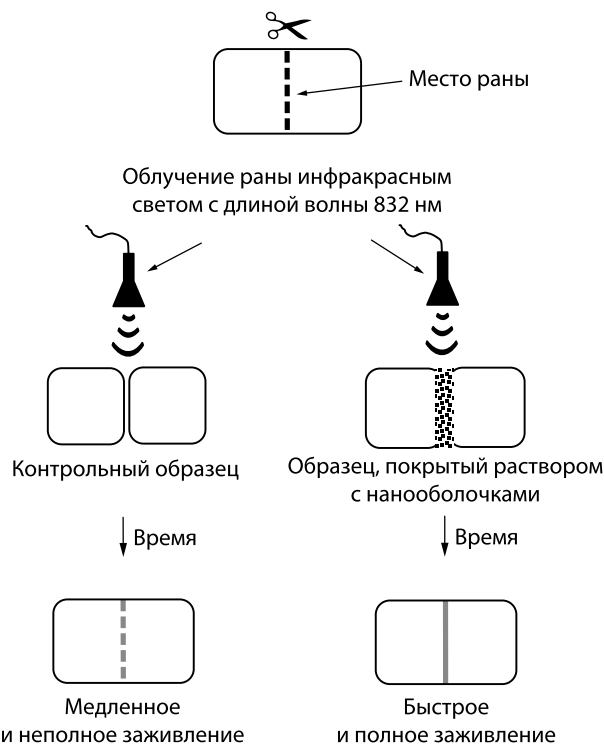


Рис. 6.8. Применение наноболочек до лазерного облучения позволяет быстрее и прочнее заживать раны



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

Обычная лазерная сварка тканей без нанооболочек связана с некоторыми проблемами. Дело в том, что световое излучение не может проникнуть на большую глубину, а потому сваренные швы получаются очень тонкими и непрочными, а окружающие их ткани сильно повреждаются. В технологии с нанооболочками эти проблемы минимизированы за счет подбора излучения с определенной длиной волны (близкой к инфракрасной), которое в минимальной степени поглощается живыми тканями. После покрытия раны припоем с нанооболочками и освещения припоя инфракрасным светом очень быстро происходит сварка контактирующих тканей с припоем. Причем прочность сварного шва приближается к прочности неповрежденной ткани. Предварительные испытания *in vivo* на мышах показали, что сварные швы не только не разрушились, но даже стали прочнее спустя 32 дня после испытаний.

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Для неинвазивной диагностики раковых заболеваний используют также оптические технологии визуализации на основе рассеяния света, например *оптическая когерентная томография*, или *ОКТ* (*optical coherence tomography* — *ОСТ*). По мере прогрессирования рака оптические свойства ткани изменяются, что позволяет врачам зафиксировать разницу между здоровыми и злокачественными частями ткани. Раннее обнаружение, повышение чувствительности и улучшение визуализации раковой опухоли становится возможным благодаря использованию в качестве молекулярных маркеров новых агентов.

Поскольку нанооболочки имеют контролируемые оптические свойства, их можно подстраивать, чтобы нанооболочки поглощали или рассеивали свет практически во всем диапазоне видимой и инфракрасной части электромагнитного излучения (рис. 6.9, 6.10).

С помощью темнопольной микроскопии (которая чувствительна только к рассеянному свету) были выполнены эксперименты *in vitro* с раковыми клетками с маркерами (белками, антителами и т. д.). Благодаря использованию нанооболочек со связанными антителами удалось отчетливо рассмотреть раковые клетки.

Эти методы визуализации можно применять наряду с другими наноматериалами, которые обладают оптическими свойствами, например флуоресценцией вблизи инфракрасного диапазона. Благодаря частичному поглощению и рассеиванию излучения можно создавать даже невидимые нанооболочки.

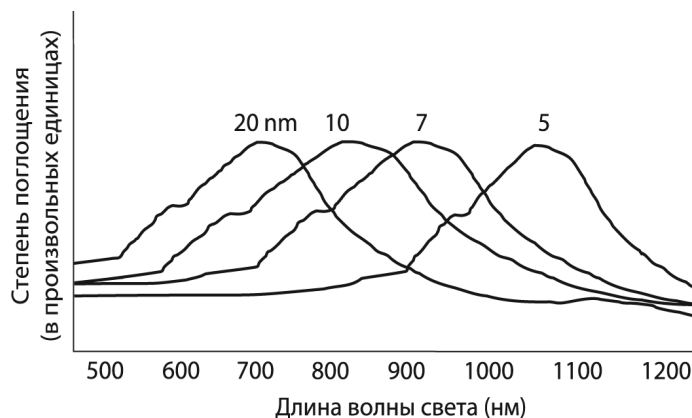


Рис. 6.9. Параметры нанооболочки можно настроить так, чтобы она максимально поглощала свет с заданной длиной волны



Рис. 6.10. Оттенки света, поглощенного нанооболочками разного размера (публикуется с разрешения Дженифер Уэст)

Биологическая инженерия

Область деятельности, в которой предъявляются самые высокие требования к свойствам материалов, — это, несомненно, биологическая инженерия. Наноматериалы имеют огромное значение в медицинском лечении, поскольку сверхмалые размеры позволяют внедрять их в биологическую среду. Кроме того, инженеры научились



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

использовать характерные для наноматериалов свойства, например огромную поверхностную площадь, для диагностики заболеваний и повреждений органов.

БЕЛКОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

Биологические системы, включая организм человека, состоят из множества белков. Кожа, волосы, мышцы, кровь, внутренние органы, глаза и многие другие части организма — это тысячи белков, которые образуют структуру и функции органа. Некоторые заболевания, например серповидно-клеточная анемия и коровье бешенство, вызваны повреждениями молекул белка.

В течение многих лет ученые стремятся расшифровать структуру некоторых белков. Этот процесс заметно упростился после расшифровки генома человека и открытия многих новых белков и их свойств.

В настоящее время ученые хотят научиться создавать белки, укладывая строительные блоки (аминокислоты) в длинные цепочки. Они научились заменять отдельные части поврежденного белка. Таким образом, измененный белок может действовать либо так, как ему было предназначено природой, либо так, как задумали ученые. Подобная деятельность стала называться *белковой инженерией*.



Белковая инженерия — наука создания или изменения белков в медицинских или аграрных целях.

Нанотехнологии находятся в тесной связи с белковой инженерией. Изучение деталей структуры молекулы белка с их помощью значительно усиливает потенциал методов белковой инженерии. Новые научные дисциплины — *геномика* и *протеомика* (от слова «протеин», то есть белок) — занимаются изучением множества важных белков, их строения и функций, а также способов их изменения или улучшения. Очень скоро станут реальностью искусственные белки, которые смогут атаковать или контратаковать вирусные инфекции.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДНК-ТЕРАПИЯ

Еще один тип лечения, известный под названием *генная терапия*, или *ДНК-терапия*, основан на способности молекулы ДНК к *саморепликации* (то есть созданию собственной копии). Его можно использовать в качестве биологического сенсора для поиска специальной биологической частицы, мембраны или ткани. Исследователи



научились создавать фрагменты ДНК для некоторых онкобелков. *ДНК-дактилоскопия* (названная так, потому что ДНК индивидуальна и уникальна) точно идентифицирует онкобелок в крови или ткани. Поскольку гены в ДНК находятся по однозначному соответствию, вероятность ошибки практически ничтожна.

ДОСТАВКА МЕДИКАМЕНТОВ

Организм человека является огромной и сложной системой, состоящей из разных подсистем, поэтому большое значение имеет точная доставка медикаментов в нужное место. Наш организм способен делать это естественным способом, то есть по своему определению. Однако ученые только начинают понимать все тонкости механизма *биодоступности* (*bioavailability*), благодаря которому доставка медикаментов выполняется в организме человека.



Биодоступность описывает способность доставки медикамента до места назначения в организме человека.

В нанотехнологических методах доставки медикаментов используется уникальность кода ДНК, благодаря которой лекарство присоединяется именно к нужному белку и доставляется к раковой опухоли. В отличие от медикаментов, которые влияют на весь организм, новые медикаменты способны действовать избирательно. Такой способ гораздо безопаснее для пациента, поскольку исключаются вредные побочные эффекты.

Проблемы биодоступности и доставки медикаментов нельзя решить простой силой, то есть просто увеличивая концентрацию препарата. В химиотерапии лечение некоторыми токсичными лекарствами проводится на грани уничтожения раковой опухоли и самого пациента.

Нанотехнологии позволили увеличить биодоступность благодаря новым методам проникновения медикаментов сквозь клеточные мембраны внутрь клеток. Поскольку большинство репликаций вирусов и других болезнетворных реакций происходит внутри клеток, именно этот способ должен существенно повысить эффективность лечения.

В настоящее время многие медикаменты прекращают свое действие именно потому, что не могут проникнуть в клетку через ее мембрану. Это невозможно, поскольку они имеют электрический заряд. *Заряженная* частица не может пройти сквозь *электрически нейтральную* мембрану. Один из способов решения данной пробле-



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

мы — окружение молекулы нейтральной оболочкой, с помощью которой молекула медикамента может проникнуть внутрь клетки.

САМОСБОРКА

В лаборатории Майкла Вонга в Университете Райс (США) идет интенсивная работа по изучению методов *самосборки*. Ученые обнаружили, что в некоторых условиях полые микрокапсулы могут автоматически образовывать полую сферу. Микрокапсула имеет О-образную форму с антителами или другими белками снаружи и энзимами или другими молекулами внутри.

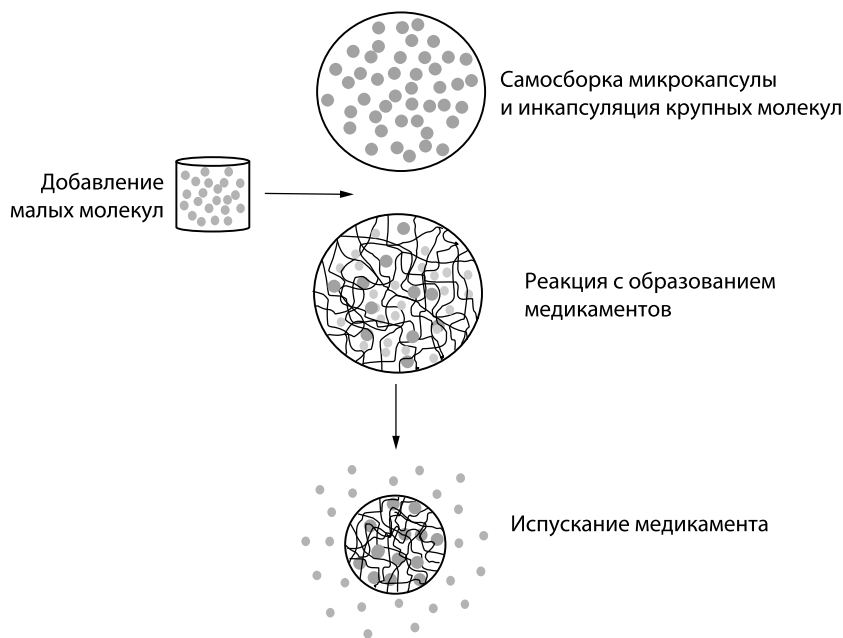


Рис. 6.11. С помощью реактантов в капсулах можно контролировать скорость поступления медикамента в организм человека

Самособирающиеся микрокапсулы дают возможность доставлять медикаменты в нужное место в организме человека. Например, для лечения болезни Альцгеймера используется следующая последовательность действий (рис. 6.11).

1. Сначала с помощью самосборки (на основе химической реакции с полимером и солью) образуются полые сферы-



микрокапсулы с порами определенного размера. Одновременно внутрь микрокапсулы добавляются более крупные молекулы.

2. Более мелкие молекулы другого вещества проникают внутрь микрокапсулы и реагируют с более крупными молекулами внутри.
3. Мелкие и крупные молекулы реагируют с образованием медикаментов.
4. Медикаменты, то есть продукты их реакции, постепенно с заданной скоростью покидают микрокапсулу.

В зависимости от того, какие молекулы инкапсулируются и добавляются, а также от кислотности и температуры, можно регулировать тип и концентрацию медикамента.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ТЕРАПИЯ

Медики часто пытаются обнаружить альтернативные способы лечения болезней. А потому они порой ищут разные способы доставки медикаментов для лечения таких опасных заболеваний, как рак или серповидно-клеточная анемия.



Многофункциональная терапия — это способ лечения, при котором медикаменты доставляются в место назначения в организме человека разными способами (например, через рот и желудок или с помощью инъекции в кровеносную систему).

Нанотехнологии можно применять для создания наночастиц, которые смогут доставлять медикаменты в такие места назначения, которые недоступны для традиционных методов доставки. Как известно, когда пациент глотает таблетку, в желудке она попадает в очень агрессивную кислотную пищеварительную среду. Затем на пути встают другие препятствия: поглощение и длительное переваривание (рис. 6.12). Нет никакой уверенности в том, что лекарство достигнет места назначения с концентрацией, которая окажет пациенту необходимую помощь.

В течение многих лет медики пытаются найти нехирургические методы лечения рака мозга. В настоящее время с развитием инъектируемых нановекторов они получают в свое распоряжение инструменты, которые позволяют заглянуть внутрь мозга без хирургического вмешательства. С помощью МРТ и нановекторов медики могут также оценивать результаты хирургической операции, например,



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

насколько удачно удалена раковая опухоль. Злокачественные клетки с прикрепившимися к ним наночастицами видны на экране компьютера, как огоньки лампочек на новогодней елке. Таким образом, можно легко выделить здоровые ткани без применения многих традиционных медикаментов.

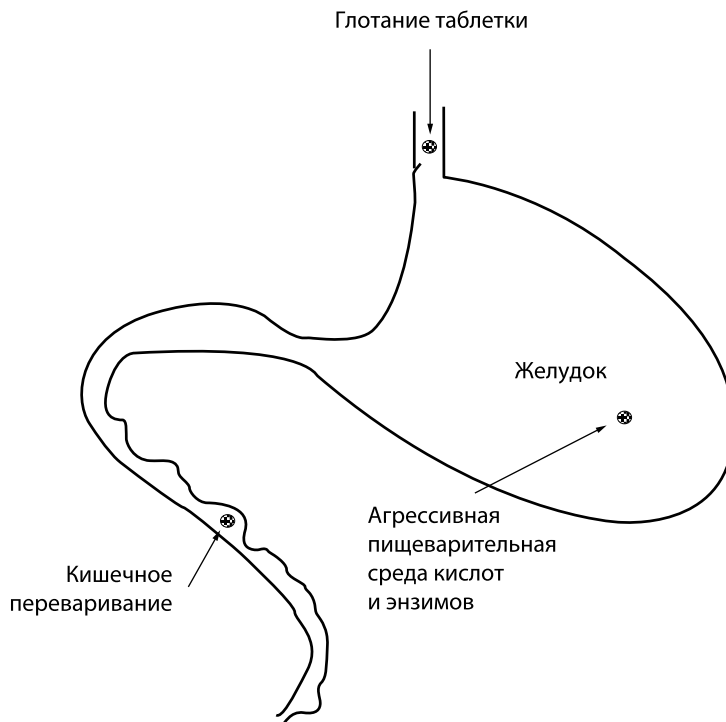


Рис. 6.12. Пример доставки медикаментов через пищеварительную систему

Некоторые болезни могут иметь такой же уникальный характер, как и сами пациенты, а потому для их успешного лечения просто необходимо применять многофункциональную терапию. Например, порой требуется строго контролировать поступление медикаментов в течение нескольких дней, месяцев или даже лет. Для проверки действенности лечебных методов конкретной болезни часто используется компьютерное моделирование и интенсивные тесты.

Как известно, инфекционные бактерии и вирусы в процессе лечения изменяются или мутируют. По мере их трансформации важно



контролировать все изменения и применять новые медикаменты. На рисунке 6.13 перечислены некоторые преимущества многофункциональной терапии.

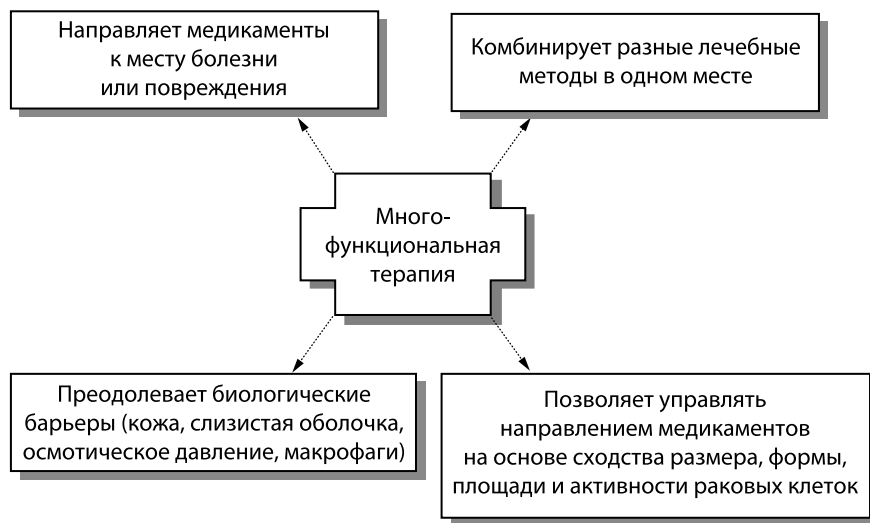


Рис. 6.13. Многофункциональная терапия дает медикам множество новых способов предотвращения или лечения болезней

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Для правильной диагностики заболевания медики должны иметь возможность «заглянуть внутрь» организма человека. До появления нанотехнологий ученые и практикующие врачи вынуждены были делать биопсию тканей и брать анализы крови, использовать рентгеновские и ультразвуковые методы, МРТ и другие методы. Как уже упоминалось в главе 4, за последние 15–20 лет появилось несколько усовершенствованных методов и инструментов, которые существенно упростили визуализацию и определение диагноза.

Теперь нанотехнологические компании и медики стремятся объединить усилия, чтобы научиться визуализировать отдельные молекулы. Современные агенты визуализации уже способны визуализировать события внутри клетки. Теперь визуализация сфокусирована не только на наблюдениях крупных объектов, например переломов и микротравм.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения



Молекулярная визуализация — это область исследований, которая занимается *in vivo* наблюдением за поведением молекул с течением времени в организме человека или животных.

Для наблюдения за процессами в отдельных органах человека используются специальные агенты визуализации. Например, радиоактивный изотоп бария ^{37}Ba является контрастным агентом, который применяется для диагностики необычных брюшных болей, желудочно-кишечной регургитации, рака, гастрита и язвы двенадцатиперстной кишки. Заблокированные области проявляются на рентгеновских снимках в светлых тонах, которые контрастно выглядят на фоне здоровых тканей и позволяют радиологам анализировать внутреннюю поверхность пищеварительного тракта на наличие блокад и опухолей.

Ядерная визуализация основана на впрыскивании трассера в организм человека и отслеживании его с помощью камеры. Например, для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы используется радиоактивный изотоп таллия ^{201}Tl . Этот изотоп хорошо связывается с кислородом, который обычно в большой концентрации присутствует в мышечных тканях. Для определения концентрации изотопа в сердце пациента используется сцинтилляционный счетчик (детектор радиоактивного излучения). Он фиксирует уровень радиации в разных участках сердца, причем низкий уровень соответствует малой концентрации кислорода (то есть малому количеству связанного с ним радиоактивного таллия), что проявляется в виде темного пятна на мониторе.

Сейчас разрабатываются новейшие наноинструменты визуализации, *зонды*, которые способны уловить специфический клеточный сигнал или зафиксировать серию событий внутри клетки. Это позволит медикам выявить заболевание на гораздо более ранней стадии, чем было возможно прежде. Молекулярные зонды способны отразить самые первые реакции в ходе развития заболевания, то есть еще задолго до того, как оно проявится в виде ужасной опухоли или жуткого кровотечения.

Здесь стоит вспомнить старую поговорку «Капля такта полезнее потоков острословия», которую можно перефразировать следующим образом: «Капля профилактики полезнее потоков лекарств». Гораздо проще решить проблему размером с муху, чем тогда, когда она примет размеры слона!

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ИМПЛАНТАНТЫ КОСТЕЙ

Если кость повреждена во многих местах или на большой площади, то для ее лечения потребуется длительное время. Более того,



если пациент находится в преклонном возрасте или у него проблемы с кровообращением, то лечение может продолжаться вдвое дольше, чем у молодого пациента с такой же травмой. Ускорение залечивания тяжелой травмы кости поможет пациенту быстрее вернуться к нормальной жизни. Дело в том, что чем длительнее лечение, тем больше вероятность деградации мышечных тканей и других органов. Например, у космонавтов во время длительного пребывания в состоянии невесомости уменьшается концентрация кальция в костных тканях, которые не используются для поддержания тела, а также деградируют мышечные ткани, которые не задействуются в повседневной жизни.

При лечении таких повреждений можно применять методы биологической инженерии. Например, для имитации коллагена хорошо использовать нанокompозиты на основе коротких цепочек пептидов. Такие нанокompозиты внедряют в уязвимые зоны для повышения прочности кости и предотвращения ее дальнейшего повреждения.



Коллаген — это наиболее распространенный белок в организме человека, который состоит из трех спиральных цепей аминокислотных остатков, составляет основу соединительной ткани животных (сухожилия, кости и хрящи) и обеспечивает ее прочность.

Короткие пептидные цепочки самостоятельно собираются в структуру коллагена и образуют связанные полимеры спиральной формы длиной в сотни нанометров. В комбинации с наночастицами эти коллагеноподобные материалы образуют нанокompозиты, которые можно использовать для упрочнения поврежденных участков костной ткани.

По мнению доктора Роберта Хэддона (Robert Haddon), директора Центра наномасштабной науки и инженерии при Университете штата Калифорния в Риверсайде (США), остеопороз и переломы костей также можно лечить с помощью углеродных нанотрубок.

Прочность, гибкость и легкость однослойных углеродных нанотрубок делает их универсальными кандидатами для создания «строительных лесов» при лечении и регенерации костей. На основе наноматериалов этого типа можно создавать искусственные кости с повышенной гибкостью и прочностью, новые типы костных трансплантатов и улучшенные методы лечения остеопороза.

С помощью таких интегрированных наноматериалов процесс лечения может проходить более гибко и быстро, а также с меньшим числом осложнений, особенно у пожилых пациентов.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

Нанотоксичность

Поскольку наноматериалы часто ведут себя совсем иначе, чем их «собратья» более крупного размера, то их улучшенные свойства, например сверхбольшая прочность или электрическая проводимость, наводят на мысль о потенциальной опасности.

В настоящее время нанотехнологии используются для производства сотен продуктов. Однако сами нанотехнологии находятся еще в самом начале своего славного пути, а их количество пока еще просто ничтожно. Пока еще плохо изучено вредное влияние наноматериалов на организм человека. Это очень широкая область исследований, которая находится на стадии сбора информации. Однако токсикологи Управления по охране окружающей среды США (Environmental Protection Agency — EPA) уже начали всерьез анализировать все факторы риска, которые сопровождают применение наноматериалов, и разработали программу деятельности.

В октябре 2005 г. в электронном научном журнале *Particle and Fiber Toxicology* (Токсикология частиц и волокон) ученые опубликовали 85-страничный отчет с подробной характеристикой потенциальных угроз здоровью человека со стороны наноматериалов и стратегией их предотвращения.

Основное внимание в этом отчете уделено токсичному влиянию наночастиц на наш организм. Однако известно всего лишь несколько примеров прямого воздействия наночастиц на человека. В отчете подчеркивается необходимость характеристики наночастиц по структуре, форме, площади поверхности, электрическим свойствам и возможности образования агрегатов, которые могут взаимодействовать с организмом иначе, чем отдельные частицы. В отчете предлагаются методы проверки влияния наноматериалов на разные внутренние органы, а также способы проверки последствий вдыхания, поглощения наночастиц или даже контакта с ними.

В отчете не описываются методы, которые позволили бы объяснить, почему наночастицы могут оказывать биологическое влияние. Ученым и медикам еще предстоит собрать подробную информацию в ходе тщательных исследований.

Медицина будущего

За свою историю медицина создала множество совершенных методов быстрого лечения острых заболеваний и опасных повреждений. Основной целью медиков всегда считалось быстрое лечение



и спасение пациентов. Западная медицина традиционно реагировала на уже начавшиеся и явно проявляющие себя болезни.

В восточной медицине основной целью является предотвращение болезни. Именно поэтому такое важное место в ней занимают акупунктура, массаж и медитация.

Однако пропасть между основными целями восточной и западной медицины может заметно уменьшиться в ближайшие 10–20 лет именно благодаря развитию нанотехнологий. Если новые нанотехнологии позволят определять генетический профиль и выполнять молекулярный анализ по пробам крови, то оценка здоровья и предрасположенность к определенным болезням может выполняться уже в момент рождения человека. Таким образом, медики смогут планировать лечение задолго до печальных проявлений многих заболеваний.

В таких условиях профилактическая медицина станет нормой, а персональные планы лечения перевернут прежние представления о качестве медицины. Ученые надеются, что достижения наномедицины изменят к лучшему не только здравоохранение, включая медицинскую промышленность и образование, но и все общество в целом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Область деятельности, которая занимается лечением и восстановлением поврежденных тканей на молекулярном уровне, называется:
 - (а) нанобиотикой;
 - (б) наногипсом;
 - (в) наномедициной;
 - (г) наноортодонтикой.
2. Система наномасштабных каналов для перемещения жидкости в «лаборатории-на-чипе» называется:
 - (а) микротрубками;
 - (б) микроструйной техникой;
 - (в) микросоломками;
 - (г) наноструями.
3. Процесс просачивания золотых нанооболочек сквозь пористые сосуды раковой опухоли и осаждения в ней называется:
 - (а) металлическим осаждением;
 - (б) симбиотическим осаждением;
 - (в) оптической томографией;
 - (г) повышенной проницаемостью и удержанием.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

4. Золотые наноболочки используются для лечения:
 - (а) рака молочной железы;
 - (б) нематод;
 - (в) слепоты;
 - (г) грибка.
5. Нановекторы — это:
 - (а) наномасштабные комары;
 - (б) инструменты измерения углов;
 - (в) средства доставки медикаментов и визуализации;
 - (г) сверхмалые инструменты для контроля над подопытными грызунами.
6. Коллаген — это:
 - (а) вегетарианская пища;
 - (б) спираль из трех цепей аминокислотных остатков;
 - (в) белки и жиры, связанные в круговую структуру;
 - (г) симметричные структуры, образующие треугольную форму.
7. Онкобелки — это:
 - (а) белки рептилий;
 - (б) диетическая пища;
 - (в) раковые белки;
 - (г) белки из морской капусты.
8. При сварке тканей наноболочки находятся:
 - (а) в белковом растворе;
 - (б) желатине;
 - (в) соединениях жиров;
 - (г) курином супе с лапшой.
9. Нанотехнологии изменяют будущие медицинские методы за счет большей:
 - (а) длительности и стоимости;
 - (б) инвазивности и зависимости;
 - (в) резкости и тревожности;
 - (г) предсказуемости и профилактики.
10. Раковые клетки хорошо видны из-за:
 - (а) контраста между светлыми клетками и кровью;
 - (б) большего рассеяния света на наноболочках;
 - (в) их большего размера и клеточных мембран;
 - (г) более мощных линз и лучших зеркал.

Глава 7

Охрана окружающей среды

Что первое приходит на ум, когда мы слышим словосочетание *окружающая среда*? Покрытые снегом верхушки горных вершин или благоухающие джунгли Амазонки? Весенние цветы или осенняя листва?

Окружающая среда может быть прекрасной или ужасной, в зависимости от условий или обстоятельств. Океан может быть умиротворяющим и спокойным, либо штормящим и бушующим, с 10-метровыми смертельно опасными волнами. Многие американцы стали свидетелями смертей и разрушений, вызванных ураганами Катрина и Рита, которые обрушились на штаты Луизиана, Миссисипи и Алабама в августе 2005 г.

Дружественность или враждебность окружающей среды чаще всего от нас не зависит. Времена года сменяют друг друга вместе с присущими им катаклизмами. Однако один из факторов окружающей среды, а именно ее загрязнение, является проблемой, созданной нами, а не природой.

Загрязнение

Охрана окружающей среды от загрязнения — одна из наиболее важных проблем современности. При этом недостаточно сфокусироваться только на охране атмосферы, поскольку окружающая среда является чрезвычайно сложной системой, состоящей из бесчисленного множества подчиненных взаимосвязанных систем. Вода и почва с их свойствами и обитателями также являются частями этой системы. Одни считают, что загрязнение окружающей среды — неизбежное следствие прогресса, а другие хотели бы вернуться в более чистое прошлое. Эти споры велись всегда и будут продолжаться бесконечно.

Не нужно быть активным защитником окружающей среды, чтобы понимать, какой вред и какую угрозу нашему здоровью и жизни не-



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

сет ее загрязнение. Дымящие трубы извергают все виды зловоний, от которых не только болит голова, но и слезает краска с автомобилей. Страшнее всего то, что испускаемые заводскими трубами химикаты являются *канцерогенами*.

 **Канцерогены** — химические вещества, которые вызывают раковые заболевания или способствуют их появлению.

Однако определение степени загрязнения воды или почвы — очень трудная задача, поскольку часто оно не превышает нескольких частей на миллион или даже миллиард. Многие люди верят только тому, что видят воочию, а токсины можно увидеть только под сильным микроскопом. В настоящее время мы должны заботиться не только о чистоте воздуха и питьевой воды, но и о качестве пищи. Действительно, некоторые виды рыб, например тунец, способны поглощать и накапливать опасные химические вещества из загрязненных водоемов. В таблице 7.1 перечислены токсичные химические вещества и их типичные концентрации в почве и воде.

Таблица 7.1. Уровни концентрации некоторых токсичных химических веществ в почве и воде

Вещество	Токсичная концентрация (промилле)
Мышьяк (в детской песочнице)	10
Мышьяк (в отходах горных пород)	1320
Диэтиловый эфир	400
Тригалометан (в воде)	0,1
Нитраты (в воде)	10
Нитриты (в воде)	1
Серебро (в воде)	0,05
Кадмий (в воде)	0,005
Ртуть (в воде)	0,002

Во многих промышленно развитых странах воздух загрязнен дымом, макрочастицами и токсичными химическими веществами, которые генерируются в результате бытовой и промышленной деятельности человека. Наиболее распространенными загрязняющими веществами считаются:



- окись углерода (или угарный газ);
- фреон (chlorofluorocarbon — CFC);
- тяжелые металлы (мышьяк, хром, кадмий, свинец, ртуть, цинк);
- углеводороды;
- оксиды азота;
- органические химикаты (летучие органические соединения, диоксины);
- диоксид серы (или сернистый ангидрид);
- макрочастицы.

Качество нашей жизни во многом зависит от деятельности местных, региональных и общенациональных органов охраны окружающей среды. Их работа затрудняется тем, что загрязняющие вещества часто не имеют цвета, вкуса и запаха.

Кислотные дожди происходят из-за того, что оксиды азота и диоксид серы оседают на землю и взаимодействуют с росой или инеем. Около 95% повышенного содержания оксидов азота и диоксида серы в атмосфере связано с деятельностью человека и лишь 5% — с естественными природными процессами. Главными источниками оксидов азота и диоксида серы являются:

- сжигание нефти, угля и газа;
- вулканическая деятельность;
- лесные пожары;
- распад почвенных бактерий;
- молнии.

Загрязнение воды вызывается внезапными или непрерывными, случайными или запланированными выбросами загрязняющих веществ. По мере роста населения планеты человечеству приходится иметь дело с более масштабным загрязнением морей и океанов. Вода чаще всего загрязняется:

- стоками промышленных отходов;
- сожженными ископаемыми видами топлива;
- утечками нефти;
- удобрениями, гербицидами, пестицидами, которые используются в сельском хозяйстве и при уходе за садами и парками;
- вследствие вырубки лесов.

Сегодня политики и общественные деятели прилагают усилия для борьбы с загрязнением атмосферы и водного пространства. Помимо роста населения Земли, существует множество других сложных и взаимосвязанных причин загрязнения окружающей среды.



Нанотехнологии в охране окружающей среды

Порой кажется, что загрязнение окружающей среды столь велико, что его уже нельзя устранить. Многие давно смирились с текущим положением вещей. Однако исследователи нанотехнологий видят свет в конце туннеля.

Проектирование материалов на молекулярном и атомарном уровне и манипулирование ими открывает перед учеными огромные возможности для создания новых методов защиты окружающей среды. Уникальные свойства наноматериалов могут дать ощутимые преимущества в методах производства энергии, ее эффективного использования, водопользования и восстановления окружающей среды.

Многие текущие проекты нацелены на изучение характера взаимодействия наночастиц с биологическими и экологическими системами, включая перемещение наночастиц в микроструйных системах. Исследователи пытаются определить, как разные виды загрязняющих веществ связываются с наноматериалами, переносятся ими в грунтовых водах, взаимодействуют с биологическими клетками и поражают их.

Очистка воды

Вода жизненно важна для человечества. Загрязненная отходами вода пагубно влияет на здоровье. Доступ к чистой воде — гораздо большая проблема, чем голод, в развивающихся странах с локальными военными конфликтами и частыми стихийными бедствиями. В США стандарты использования питьевой воды пересматривались несколько раз с целью повышения ее чистоты.

Рост народонаселения и интенсивное ведение сельского хозяйства связаны с постоянно растущим потреблением чистой воды, поэтому все более актуальными становятся поиски новых методов ее очистки. Применение наноматериалов может помочь улучшить существующие, а также создать совершенно новые технологии и материалы, используемые для очистки воды. С помощью нанотехнологий можно усовершенствовать способы обработки и доставки воды в удаленные регионы без достаточных запасов электрической энергии.

Специально созданные наноматериалы являются новым классом, который относительно мало известен большинству специалистов по охране окружающей среды и водопользования. Однако



постепенно ситуация меняется к лучшему. Благодаря дальнейшим исследованиям безопасных, дешевых и эффективных методов обработки воды постепенно меняются прежние традиционные практические способы.

КЕРАМИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ

Мембраны и фильтры разнообразных размеров используются для разделения веществ. В зависимости от своих свойств им удастся выполнять эту работу с переменным успехом.

При ультрафильтрации создается повышенное давление с одной стороны мембраны, которое способствует прониканию компонентов с малым молекулярным весом сквозь поры. При этом более крупные молекулы могут перемещаться только вдоль мембраны и не проникают сквозь поры из-за своего размера.



Полупроницаемая **ультрафильтрационная мембрана** имеет поры величиной от 0,0025 до 0,01 мкм.

Исследователи из центра СВЕН Университета Райс (США) создали реактивную мембрану из *ферроксана (ferroxane)*, то есть керамики на основе оксида железа. Благодаря уникальным химическим свойствам железа эти реактивные мембраны позволяют очищать воду, удаляя из нее загрязняющие вещества и органические отходы. Кроме того, обнаружено, что ферроксановые материалы способны разлагать загрязнения с бензойной кислотой.

При использовании мембран из *алюмоксана (alutoxane)*, то есть керамики на основе оксида алюминия, ученые научились управлять их свойствами (толщиной, распределением диаметров пор, проницаемостью), контролируя размеры алюмоксановых частиц и режим термической обработки мембраны. На рисунке 7.1 показана типичная схема такой керамической мембраны.

Наноструктурные керамические мембраны способны фильтровать и очищать воду в пассивном и активном режимах. Керамические мембраны можно использовать в традиционных системах очистки загрязненной воды и воздуха.

Интеграция нанокатализаторов и методов очистки воды позволяет получить новые преимущества.



Нанокатализаторы — это вещества или материалы, которые обладают каталитическими свойствами и имеют по крайней мере один наноразмер.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

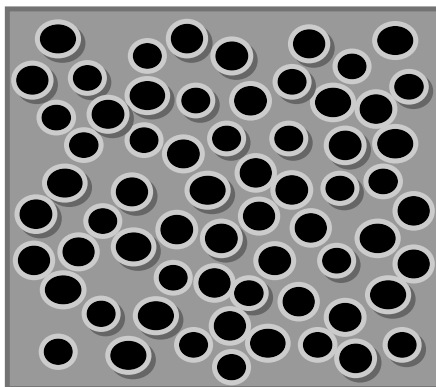


Рис. 7.1. Типичное распределение размеров пор в керамической мембране

Благодаря увеличению поверхностной площади нанокатализаторы обладают большей контактной поверхностью и более эффективно реагируют, чем сплошные материалы. Нанокатализаторы можно использовать, например, для очистки загрязненных грунтовых вод, в обычных устройствах для очистки воды, а затем восстанавливать их (то есть возвращать в рабочее состояние) с помощью наномембран. На рисунке 7.2 показана часть наноструктурной мембраны, созданной на основе шаблона.

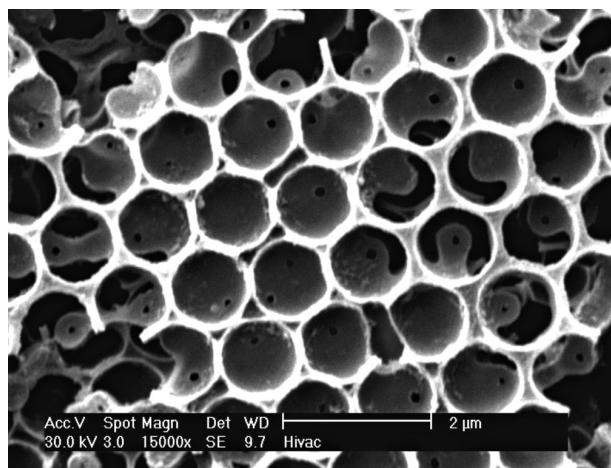


Рис. 7.2. Типичная керамическая наномембрана
(фото любезно предоставлено М. Визнером из Университета Дьюк, США)



НАНОЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА

Уникальные исследования, проведенные инженером по защите окружающей среды Чжан Вейсянем (Wei-xian Zhang) из Университета Лехай (США), продемонстрировали потенциал наномасштабного железного порошка, способного очищать почву и грунтовые воды, загрязненные промышленными веществами.

Железо, один из наиболее распространенных металлов на Земле, может стать недостающим звеном в решении мультимиллиардной проблемы. Дело в том, что в США и других странах имеется огромное количество загрязненных в результате промышленной деятельности регионов, подземных хранилищ вредных веществ, заброшенных шахт и горных выработок. Железо обладает способностью легко окисляться и образовывать ржавчину. Если это окисление происходит в присутствии таких опасных загрязняющих веществ, как трихлорэтилен, тетрахлорид углерода, диоксины или полихлорированные дифенилы (ПХД), то их сложные молекулы распадаются на более простые и менее токсичные углеродные компоненты.

Аналогичное явление наблюдается, когда окисление железа происходит в присутствии таких опасных тяжелых металлов, как свинец, никель, ртуть и даже уран. Тогда эти металлы образуют нерастворимые формы, которые оседают в почве и не переносятся по пищевой цепочке (следовательно, их вредное влияние на окружающую среду уменьшается).

Поскольку железо не обладает токсичным эффектом и в большом количестве присутствует в горных породах, почве и воде, многие компании в настоящее время начали применять железный порошок для очистки своих промышленных отходов перед выбросом их в окружающую среду. Эта технология прекрасно подходит для новых промышленных отходов, но ученых беспокоит ситуация и со старыми отходами. В этом деле им могут помочь наночастицы железа.

Наночастицы железа в 10–1000 раз активнее обычных макроскопических частиц.

Обладая меньшим размером и большей активной поверхностью, наночастицы могут легко проникнуть в центр загрязненной зоны. Они легко переносятся вместе с грунтовыми водами и попутно очищают все окружающее пространство. На рисунке 7.3 показана принципиальная схема данного процесса.

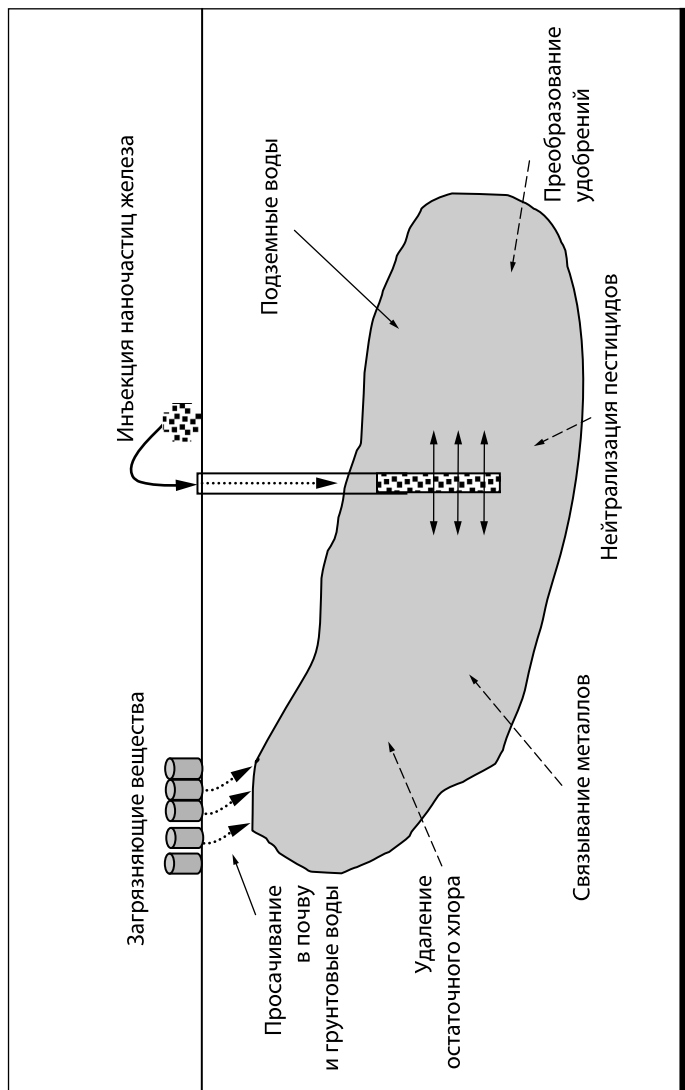


Рис. 7.3. Опасные тяжелые металлы в почве и грунтовых водах нейтрализуются инъекцией наночастиц железа



На свойства наночастиц железа не влияют кислотность, температура или содержание питательных веществ в почве. Крошечные размеры (1–100 нм, что в 10–1000 раз меньше бактерии) позволяют наночастицам железа легко и быстро перемещаться между частицами почвы. Лабораторные и полевые испытания показали, что благодаря наночастицам железа уровни загрязнения возле места инъекции значительно падают уже за 1–2 дня и снижаются практически до безопасного уровня за несколько недель. Результаты этих исследований показывают, что наночастицы железа остаются активными в течение 4–6 недель, то есть до тех пор, пока не распределятся в грунтовых водах до достижения естественной концентрации железа в природе.

Этот тип нанотехнологической инновации может быстро улучшить ситуацию в загрязненной окружающей среде. Более того, он может вдохновить других исследователей на поиски новых способов очистки от загрязняющих веществ. Следует отметить, что метод Чжана гораздо дешевле и эффективнее, чем раскопки загрязненной почвы и ее полная переработка обычными методами.

НАНОМАСШТАБНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПОТОКИ

Новые улучшенные мембраны с нанопорами можно использовать для изучения перемещения полимерных молекул. Дело в том, что способы перемещения полимерных молекул сквозь узкие проходы играют огромную роль в химических и биологических процессах.

Эксперименты с такими молекулами, как ДНК и РНК, показали, что их перемещение сквозь поры в мембранах сопровождается переносом электрического тока. Эти процессы играют огромную роль в изучении взаимодействия данных молекул с вирусами и в исследовании методов секвенирования генов. Действительно, благодаря своей структуре и форме молекула ДНК является прекрасной моделью для проектирования длинных синтетических полимеров. На рисунке 7.4 показано, как молекула белка проникает сквозь пору в мембране.

Физика перемещения молекул ДНК и РНК через наноканалы связана непосредственно с будущими методами фильтрации и проектирования наномембран. Наномасштабные компьютерные модели позволяют получить новые данные для проектирования таких наномембран, предназначенных для более эффективной фильтрации воды.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

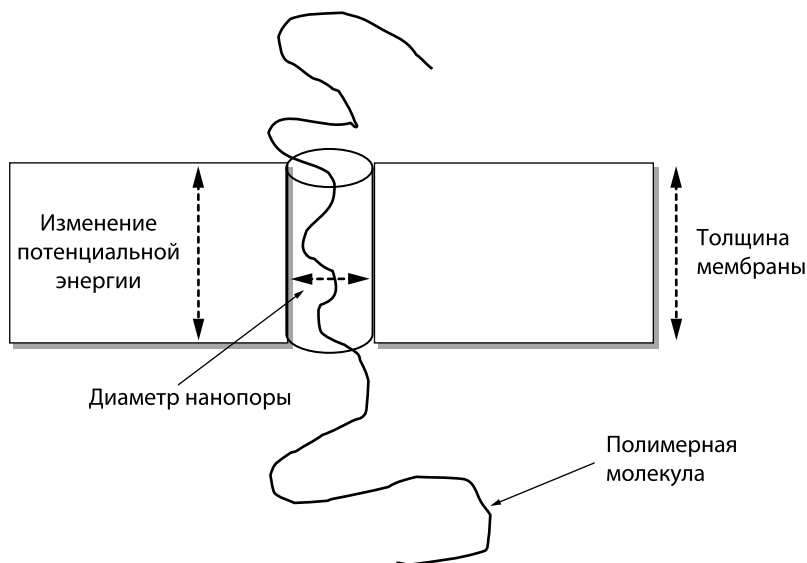


Рис. 7.4. Перемещение полимерной молекулы сквозь пору мембраны

Нанотехнологии и государственные приоритеты

Нанотехнология является одним из наиболее важных научно-исследовательских приоритетов правительства США¹. Научно-исследовательская программа в области нанотехнологий Управления по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency — EPA) является частью Национальной нанотехнологической инициативы (National Nanotechnology Initiative — NNI), которая обеспечивает координацию всех усилий и контроль над ними в этой области. С точки зрения NNI, все технологии и исследования, которые выполняются на атомарном, молекулярном или макромолекулярном уровне (то есть в диапазоне размеров 1–100 нм), считаются нанотехнологическими.



Согласно определению NNI, к **нанотехнологиям** относятся все структуры, устройства и системы с уникальными свойствами/функциями, которые создаются и которыми манипулируют или управляют на атомарном уровне.

¹ В России в 2007 г. для реализации государственной политики в области нанотехнологий была создана государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий» (РОСНАНО). — *Прим. ред.*



На наномасштабном уровне законы квантовой механики часто коренным образом меняют механические, оптические, химические и электронные свойства материалов. Эти свойства можно использовать в новых нанотехнологиях для защиты окружающей среды, включая улучшенные сенсоры мониторинга текущего состояния и обнаружения загрязнений, эффективные и дешевые методы очистки, «зеленые» (то есть безопасные для окружающей среды) способы производства энергии и товаров (более подробно данные методы описываются в главе 11).

Новые наноматериалы также могут представлять опасность для окружающей среды из-за своего химического состава, повышенной реактивности и сверхмалых размеров.

Поэтому большое значение имеют тщательные исследования всех наноматериалов. Особенно важна оценка их влияния на атмосферу, почву и грунтовые воды, включая весь жизненный цикл и транспортировку.

Анализ рисков, связанных с применением наноматериалов, должен включать проверку их токсичности и восприимчивости со стороны растений, животных и человека.

ПРАВИТЕЛЬСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ЕРА принимает активное участие в исследованиях токсичности новых нанотехнологий.

Это агентство не только ведет несколько собственных научно-исследовательских программ, но и участвует в других проектах вместе с подкомитетом по наномасштабной науке и технике (Nanoscale Science, Engineering and Technology subcommittee) Совета по научной и технологической политике, национальной науке и технике (Science and Technology Policy, National Science and Technology Council) Правительства США.

Научно-исследовательская деятельность ЕРА включает перечисленные ниже направления.

- Национальный центр исследований по защите окружающей среды финансировал многомиллионные гранты на научные исследования нанотехнологий для защиты окружающей среды (то есть разработку дешевых, быстрых и простых методов очистки воды от токсичных загрязняющих веществ, новые сверхчувствительные сенсоры загрязняющих веществ, «зеленое» производство наноматериалов и высокоизбирательные катализаторы).



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

- Избранные научно-исследовательские проекты посвящены изучению возможного вредного воздействия наноматериалов (то есть их токсичности, превращений, накопления и т. д.).
- В рамках программы поддержки малого бизнеса (Small Business Innovation Research Program) выделялись средства на разработку и коммерциализацию новых наноматериалов и методов очистки (например, компания SBIR создала фильтр на основе углеродных нановолокон с большой поверхностной площадью, который мог эффективно удалять летучие органические соединения и частицы диаметром менее 3 мкм из выхлопных газов двигателей, генераторов энергии и кондиционеров).
- Несколько научно-исследовательских проектов посвящены изучению наноструктурных фотокатализаторов, которые предполагается использовать в качестве «зеленой» альтернативы для углеводородного окисления; использованию наноматериалов в качестве адсорбентов, мембран и катализаторов для контроля над чистотой воздуха и выхлопных газов; проверке вредного влияния сверхмалых частиц во время их производства.

НАНОКАТАЛИЗАТОРЫ

Наночастицы в растворах или вместе с мембранами могут оказать заметное влияние не только на перемещение загрязняющих веществ, но и на химическую деградацию. В настоящее время ученые интенсивно исследуют роль *нанокатализаторов* в деле защиты окружающей среды, поскольку каталитические реакции могут заметно удешевить методы очистки воды.

Например, огромное значение имеет очистка грунтовых вод от пестицидов. Однако часто для каждого типа загрязняющего вещества требуется отдельный катализатор и определенная стратегия очистки.

Специализированные наноматериалы могут ускорить очистку и сделать ее более эффективной.

Доктор Дэниэл Р. Стронгин (Daniel R. Strongin), профессор химии из Университета Тэмпл в Филадельфии (США), использует белковые структуры для проектирования и сборки наночастиц на основе оксидов металлов. Он считает, что такие наночастицы можно применять в качестве нанокатализаторов для защиты окружающей среды.



Стронгин с коллегами изучает химические реакции, которые могут способствовать сгущению опасных металлов или выделению их из раствора, предотвращая их распространение в грунтовых водах или просачивание в почву. Экспериментируя с токсичным хромом, ученые создали наночастицы, которые вступают в реакцию с хромом.

В комбинации с наночастицами хром уже не растворяется в воде и легко отфильтровывается. Этот метод позволяет гораздо эффективнее очищать воду озер, рек и ручьев от загрязнения.

Группа Стронгина работает и над созданием других наночастиц, способных реагировать с токсичными металлами, например технецием, которым загрязнено несколько мест в штате Вашингтон (США). Дело в том, что в 1940–1950-е гг. там были захоронены большие емкости с ядерными отходами. С течением времени в них образовались брешки, которые грозят загрязнением грунтовых вод. В отличие от обычных макрочастиц, наночастицы позволили бы ученым гораздо эффективнее справиться с таким загрязнением.

АДСОРБЦИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Хотя при помощи обычных методов очистки воды удаляется большая часть загрязняющих веществ, для удаления некоторых токсичных примесей порой требуется использовать более эффективные специализированные методы. Для многих тяжелых металлов не удалось найти подходящие нанокатализаторы, поэтому ученые сосредоточили свои усилия на методах их адсорбции, например, при помощи полимеров или наночастиц.

Мышьяк является одним из наиболее распространенных загрязняющих воду веществ. Этот ядовитый химический элемент может реагировать с кислородом, хлором, серой, углеродом, водородом, свинцом, золотом и железом, а потому присутствует во многих горных породах и минералах. Присутствие мышьяка в природе объясняется его участием в естественных геологических и искусственных промышленных процессах, сельскохозяйственной деятельности и т. п.

Мышьяк пагубно действует на пищеварительную систему человека и ухудшает доставку кислорода в клетки. Симптомами отравления мышьяком являются нарушение сердечной деятельности, ускоренное сердцебиение, бледность, сильные желудочные боли, рвота и расстройство сознания. Это отравление часто вызывает увеличение мочевого пузыря и рак прямой кишки.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

В связи с тем, что мышьяк представляет собой большую опасность для здоровья человека, ЕРА ужесточила стандарты для его предельного содержания в питьевой воде до 10%. В глобальном масштабе угроза отравления мышьяком является очень серьезной проблемой. В Бангладеш, Индии, Мексике, Чили, Аргентине, Тайване и Таиланде от 10 до 40% населения страдают от отравления мышьяком, находящемся в питьевой воде. Хотя загрязнение питьевой воды повышенным содержанием мышьяка обычно характерно для стран третьего мира, многие системы водоснабжения в США содержат мышьяк в большей концентрации, чем 10%. Поэтому разработка и применение новых технологий очистки воды от таких опасных металлов, как, например, мышьяк, имеет огромное значение для здравоохранения.

Факторы риска окружающей среды

Среди факторов риска окружающей среды наибольшее значение имеют воздействие и угроза. Под *воздействием* подразумевается возможность контакта с загрязняющим веществом в достаточно высокой концентрации, которая способна вызвать проблемы. Под *угрозой* подразумевается сама эта проблема (например, воздействие однослойных углеродных нанотрубок в форме аэрозоля выражается в возможности их вдыхания, а угроза — в потенциальной угрозе органам дыхания). Факторы риска и методы их оценки более подробно описываются в главе 13.

К сожалению, в настоящее время практически ничего не известно о токсикологии искусственно созданных наночастиц в «мокрых» взаимодействиях. Кое-что на сегодня определено лишь в вопросе влияния аэрозолей на живые организмы в результате их вдыхания. Однако токсикологическое влияние наночастиц на биологические процессы пока не изучено.

В настоящее время интенсивно исследуется биологическое влияние наночастиц кварца, титана и железа на функционирование клеток в частности и дыхательной системы в целом. Аналогичные исследования выполняются научно-исследовательскими лабораториями США для изучения воздействия наночастиц на кожу человека.

Одним из наиболее важных вопросов, волнующих многих ученых и политиков, является уровень последствий от постоянного или внезапного масштабного воздействия наночастиц на окружающую



среду. Нельзя с уверенностью сказать, что такое воздействие окажет какое-то негативное влияние. Просто до сих пор еще недостаточно ясно, какие свойства наночастиц могут нанести вред окружающей среде и в какой мере.

В настоящее время ученым известны многие позитивные свойства наноматериалов. Однако, во избежание неприятных последствий для здравоохранения и благополучия окружающей среды, нужно предусмотреть все негативные эффекты от применения новых нанотехнологий.

Ученые занимаются исследованиями фактической дозы наночастиц, влиянию которых может подвергнуться окружающая среда и биологические организмы (бактерии, рыбы, люди). Для предсказания скорости и эффективности распространения наночастиц в окружающей среде необходимо тщательно изучить все способы перемещения наночастиц.

Наноматериалы способны распространяться разными способами в пористых материалах. Например, фуллерены и однослойные углеродные нанотрубки демонстрируют совершенно разную подвижность. Во время сборки наноструктур их подвижность заметно падает. Профессор Марк Визнер с коллегами из Университета Дьюк (США) занимается изучением подвижности и методов перемещения разных наночастиц.

«ЗЕЛЕННЫЕ» НАНОТЕХНОЛОГИИ

Нанотехнологии способны изменить производственные процессы двумя способами. Во-первых, за счет быстрого сокращения отходов производства и повышения его эффективности. Во-вторых, за счет использования наноматериалов в качестве катализаторов, которые повысят эффективность производственных процессов и позволят избавиться от токсичных и грязных материалов, а также конечных продуктов.



«Зеленые» нанотехнологии — это технологии, в которых используются безопасные для окружающей среды химические и технологические процессы.

В идеале «зеленые» нанотехнологии должны улучшить производственные процессы, предъявляемые к материалам требования, химические процедуры, а также заменить текущие небезопасные вещества и процессы. Это позволит сократить расходы энергии и материалов.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

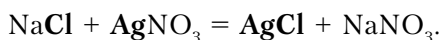
Для достижения данных целей ученые ведут исследования в следующих направлениях:

- синтез на атомном уровне новых улучшенных катализаторов для производственных процессов;
- вставка информации в молекулы (такие как ДНК) для создания новых молекул;
- самосборка молекул как основа для новых химикатов и материалов;
- создание молекул в микро- и нанореакторах;
- использование альтернативной энергии на основе солнечных батарей и топливных элементов, а также разработка новых способов передачи энергии;
- усовершенствование производственных процессов с целью более экономного использования энергии.

Значение «зеленой» химии и «зеленых» технологий было оценено по достоинству в 2005 г., когда Нобелевскую премию по химии «За вклад в развитие метода метатезиса в органическом синтезе» вручили Роберту Граббсу (Robert Grubbs) из Калифорнийского технологического института (США), Ричарду Шроку (Richard Schrock) из Массачусетского технологического института (США) и Иву Шовену (Yves Chauvin) из Института нефти (Франция).

Метатезис означает такое «переключение» пары химических связей, при котором возникает перегруппировка атомов, то есть изменяется углеродный скелет одной или двух молекул.

Вот типичный пример такой реакции:



Этот тип реакции играет огромную роль в химической промышленности, например при создании лекарств и пластмасс, поскольку для метатезиса расходуется гораздо меньше энергии и уменьшается количество вредных побочных продуктов.

Международный совет по нанотехнологиям

В 2004 г. энтузиастами была учреждена международная организация — *Международный совет по нанотехнологиям* (International Council on Nanotechnology — ICON), — которая собирает и распространяет всю доступную информацию о нанотехнологиях. Члены этой организации пытаются оценивать преимущества и недостатки нанотехнологий (например риски для окружающей среды) и распространяют информацию об этом.



ICON создал базу данных с научными выводами о преимуществах и недостатках нанотехнологий. Совет поддерживает эту базу данных в сотрудничестве с Университетом Райс (США), Министерством энергетики США и представителями химической промышленности.

В ICON входят представители не только промышленных предприятий, но и правительственных учреждений США, университетов, колледжей и неправительственных организаций. В таком широком партнерстве члены ICON обсуждают и оценивают потенциальные риски и меры безопасности при работе с нанотехнологиями, предлагают стандарты и терминологию для создания и применения наноматериалов, а также распространяют сведения о нанотехнологиях.

Широкая поддержка со стороны членов совета упрочила положение ICON как всемирного хранилища информации о достоинствах и недостатках нанотехнологий.

Глядя в будущее

Вполне возможно, что некоторые новые материалы могут представлять риск для изготовителей и потребителей, а также для общества и окружающей среды. Поэтому ученые стремятся максимально тщательно и всесторонне изучить потенциальный риск, связанный с новыми нанотехнологиями, чтобы гарантировать безопасность их применения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Загрязнение часто измеряется:
 - (а) в частях на сотню;
 - (б) частях на миллиард;
 - (в) частях на кварк;
 - (г) частях на триллион.
2. Мышьяк пагубно действует на:
 - (а) пищеварительную систему;
 - (б) репродуктивную систему;
 - (в) нервы;
 - (г) слух.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

3. Повышенное содержание оксида азота и диоксида серы объясняется человеческой деятельностью приблизительно на:
 - (а) 52%;
 - (б) 75%;
 - (в) 95%;
 - (г) 100%.
4. Технологии, в которых используются безопасные для окружающей среды химические и инженерные процессы, называются:
 - (а) «оранжевыми» нанотехнологиями;
 - (б) микронанотехнологиями;
 - (в) «зелеными» нанотехнологиями;
 - (г) деревянными нанотехнологиями.
5. Технеций — это не:
 - (а) загрязняющее вещество в ядерном могильнике в штате Вашингтон;
 - (б) добавка для протирания лобового стекла автомобиля;
 - (в) токсичный металл;
 - (г) источник загрязнения грунтовых вод.
6. Отравленный тунец имеет высокое содержание:
 - (а) мышьяка;
 - (б) молибдена;
 - (в) стронция;
 - (г) ртути.
7. Проверка токсичности естественных и искусственных наноматериалов, путей их воздействия и биологического накопления имеет большое значение для:
 - (а) анализа факторов риска;
 - (б) производства обуви;
 - (в) курсов кулинарии;
 - (г) школьного гардероба.
8. Материалы хотя бы с одним наномасштабным размером и повышенной каталитической активностью называются:
 - (а) биокерамическими мембранами;
 - (б) космическими точками;
 - (в) нановспышками;
 - (г) нанокатализаторами.

ГЛАВА 7 Охрана окружающей среды



9. Химикаты, которые провоцируют раковое заболевание, называются:
- (а) антигенами;
 - (б) лейкоцитами;
 - (в) канцерогенами;
 - (г) энзимами.
10. ICON — это аббревиатура:
- (а) Indentured Committee of Neighbors (Обусловленный договором комитет соседей);
 - (б) Indivisible Council of Nanobots (Бесконечно малый совет наноботов);
 - (в) Incredible Calmness of Night (Невероятный ночной покой);
 - (г) International Council on Nanotechnology (Международный совет по нанотехнологиям).

Тест к части II

1. Трение, прилипание, пластичность и сдвиговая прочность сплошных тел объясняется:
 - (а) влажностью и температурой;
 - (б) скольжением и солнцем;
 - (в) инерцией и гравитацией;
 - (г) гидростатическим давлением и наклоном.
2. Кристаллографические методы визуализации позволяют получить трехмерное представление:
 - (а) атмосферной ауры;
 - (б) электронной плотности и конфигурации;
 - (в) горных районов;
 - (г) годовых колец на срезах деревьев.
3. Нанотехнологии можно применить для решения разных медицинских проблем, за исключением:
 - (а) сохранения и извлечения генетической информации;
 - (б) доставки веществ в клетку;
 - (в) создания лекарства на основе хромосомных особенностей;
 - (г) лечения взрослого ногтя на пальце ноги.
4. Наиболее распространенным белком в организме человека является:
 - (а) нитрогеназа;
 - (б) кератин;
 - (в) амилаза;
 - (г) коллаген.
5. «Мокрые» (органические молекулы) находятся:
 - (а) в плавательном бассейне;
 - (б) живом организме;
 - (в) горных породах;
 - (г) радиоактивных отходах.
6. С помощью белковой инженерии можно создать белки, которые способны:
 - (а) повысить прочность мостов;
 - (б) увеличить финансирование научных исследований;
 - (в) повысить точность прогнозов погоды;
 - (г) атаковать или контратаковать вирусные инфекции.



7. Вещества, которые провоцируют раковые заболевания, называются:
(а) раздражители;
(б) базы;
(в) аллергены;
(г) канцерогены.
8. Первая книга о строении микроорганизмов, *Micrographia* («Микрография»), была написана:
(а) Джорджем Беннетом;
(б) Робертом Гуком;
(в) Норманом Бекманом;
(г) Джеком Шауэрсом.
9. Сверхмалые, покрытые золотом шарики, которые используются для диагностики и лечения поврежденных тканей, называются:
(а) нанооболочки;
(б) скорлупа устриц;
(в) трубчатые оболочки;
(г) биооболочки.
10. Повышенное содержание оксида азота и диоксида серы объясняется человеческой деятельностью приблизительно на:
(а) 15%;
(б) 42%;
(в) 70%;
(г) 95%.
11. Распределение размеров пор, проницаемость и поверхностную химическую активность можно регулировать за счет изменения исходных параметров частиц для наномембран на основе:
(а) алюмоксана;
(б) кремния;
(в) полупроницаемости;
(г) биохимии.
12. Биологические наносенсоры предназначены для:
(а) выявления выдающихся ученых;
(б) обнаружения важных биологических сигналов;
(в) измерения осадков;
(г) определения размера обуви.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

13. Токсичные тяжелые металлы, например свинец, никель, ртуть и даже уран, можно нейтрализовать в почве за счет:
- (а) сокращения содержания цинка;
 - (б) добавления натрия;
 - (в) окисления железа;
 - (г) добавления хлора.
14. Загрязнение воды происходит внезапно или постепенно, намеренно или случайно из-за попадания в нее:
- (а) песка;
 - (б) кубиков льда из холодильника;
 - (в) водяных лилий;
 - (г) загрязняющих веществ.
15. Сколько типов рака молочной железы обнаружено на сегодняшний день?
- (а) 11;
 - (б) 14;
 - (в) 15;
 - (г) 17.
16. Длинные цепочки аминокислот, которые сворачиваются в сложные структуры, называются:
- (а) липидами;
 - (б) ризомами;
 - (в) оригами;
 - (г) белками.
17. Область деятельности, связанная с изучением структур, устройств и систем с уникальными свойствами, которыми управляют на атомарном уровне, называется:
- (а) аэродинамикой;
 - (б) микробиологией;
 - (в) нанотехнологией;
 - (г) биологической инженерией.
18. Область медицины, которая нацелена на лечение болезней и повреждения тканей на молекулярном уровне, называется:
- (а) наномедициной;
 - (б) акушерством;
 - (в) ядерной медициной;
 - (г) ринологией.



19. Первой обнаруженной человеком зеленой водорослью была:
(а) *Leptospira* (лептоспира);
(б) *Saccharomyces* (сахаромицета);
(в) *Spirogyra* (спирогира);
(г) *Aspergillus* (аспергилл).
20. Возможность доставки медикаментов в заданное место организма называется:
(а) хемосинтезом;
(б) фармакологией;
(в) фотосинтезом;
(г) биодоступностью.
21. Первые крошечные пустоты, обнаруженные внутри пробки, называли:
(а) гнидами;
(б) клетками;
(в) чипсами;
(г) дырками.
22. С огромной точностью нанопроволочные детекторы могут различать:
(а) металлы;
(б) неорганические молекулы;
(в) вирусы;
(г) земляных червей.
23. Из-за огромной поверхностной площади наночастицы железа обладают более высокой реактивностью, чем макрочастицы железа:
(а) в 2–3 раза;
(б) в 5–7 раз;
(в) в 10–1000 раз;
(г) они ею не обладают.
24. Исторически сложилось так, что восточная медицина является профилактической, а западная лучше справляется с лечением:
(а) морщин;
(б) серьезных травм;
(в) стрессов;
(г) наружного отита.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

25. Электромагнетизм, воздушные и водные потоки, тепло и холод, а также другие факторы влияют на следующее свойство наночастицы:
- (а) ее имя;
 - (б) рыночную привлекательность;
 - (в) инвестиционный потенциал;
 - (г) перемещение и реакции.
26. Область деятельности, связанная с созданием и изменением белков в медицинских или аграрных целях, называется:
- (а) липидной инженерией;
 - (б) домашним самолечением;
 - (в) белковой инженерией;
 - (г) садоводством.
27. В США аббревиатура NNI означает:
- (а) Neonatal Nanny Initiative (Инициатива няней для новорожденных);
 - (б) National Neurological Institute (Национальный неврологический институт);
 - (в) Nanoscience and Nanotechnology Institute (Институт нанонауки и нанотехнологий);
 - (г) National Nanotechnology Initiative (Национальная нанотехнологическая инициатива).
28. В керамических наномембранах, которые применяются для очистки воды от загрязняющих веществ, используется:
- (а) натрий;
 - (б) железо;
 - (в) свинец;
 - (г) цинк.
29. Изучение образцов на основе анализа оптического спектра называется:
- (а) спектроскопией;
 - (б) климатологией;
 - (в) астрономией;
 - (г) вирусологией.



- 30.** Автоматическое создание микрокапсул называется:
- (а) пончиком;
 - (б) криогенезисом;
 - (в) самосборкой;
 - (г) кальцинацией.
- 31.** На наномасштабном уровне огромные изменения механических, оптических и электромагнитных свойств происходят по:
- (а) правилам местных и государственных органов;
 - (б) законам фотодинамики;
 - (в) принципам спроса и предложения;
 - (г) законам квантовой механики.
- 32.** Эксперименты непосредственно внутри живого организма называются:
- (а) *in centro*;
 - (б) *in vivo*;
 - (в) *in livo*;
 - (г) *in vitro*.
- 33.** Материалы хотя бы с одним наномасштабным размером и повышенной каталитической активностью называются:
- (а) биомаркерами;
 - (б) энзимами;
 - (в) нанокатализаторами;
 - (г) антителами.
- 34.** Реакции в рамках биологических процессов улавливаются:
- (а) преобразователями;
 - (б) резиновыми перчатками;
 - (в) метелками для смахивания пыли;
 - (г) посыльными.
- 35.** Нанотехнологии предоставляют медикам новые мощные инструменты для борьбы с разными болезнями, за исключением:
- (а) рака;
 - (б) сосания большого пальца;
 - (в) дегенерации;
 - (г) старения.



ЧАСТЬ II «Мокрые» (органические) приложения

- 36.** «Зеленые» нанотехнологии включают:
- (а) безопасные для окружающей среды химические и технологические процессы;
 - (б) натуральные красители и волокна;
 - (в) тектонические процессы;
 - (г) тяжелые металлы, как, например, мышьяк, хром и кадмий.
- 37.** «Лаборатория-на-чипе» создается на основе:
- (а) очень маленьких трубок и центрифуг;
 - (б) переноса сверхрешеточного нанопроводного шаблона;
 - (в) создания лаборатории с помощью очень точных инструментов;
 - (г) сверхмалых пипеток и проводков.
- 38.** Эксперименты показали, что использование наночастиц железа заметно снижает уровень загрязнения в месте инъекции уже спустя:
- (а) 3–4 часа;
 - (б) 1–2 дня;
 - (в) 5–6 дней;
 - (г) 3–4 месяца.
- 39.** Явление, при котором частицы захватываются и удерживаются макрофагами, называется:
- (а) окаменение;
 - (б) опреснение;
 - (в) фагоцитоз;
 - (г) дурной запах изо рта.
- 40.** Закон, согласно которому удлинение пружины прямо пропорционально растягивающей ее силе, называется:
- (а) законом Хейфера;
 - (б) законом Худа;
 - (в) законом Гермияна;
 - (г) законом Гука.

Часть III

«СУХИЕ» (НЕОРГАНИЧЕСКИЕ) ПРИЛОЖЕНИЯ



Глава 8

Материалы

Наноматериалы имеют просто потрясающие и странные свойства. Например, углеродные нанотрубки делают более прочными, гибкими и термоустойчивыми некоторые виды пластмасс, керамики и металлических сплавов. Наноматериалы не так просто разрушить. При разрезании они способны самостоятельно «залечиваться» и открывают для инженеров совершенно новые перспективы.

Наноматериалы обладают полезными свойствами для многих применений, но их нельзя назвать абсолютными новичками. Их начали использовать довольно давно, но не могли увидеть и не могли манипулировать ими. Например, золотые наночастицы использовались в Средние века для окрашивания стекла, а углеродные наночастицы на протяжении последних 100 лет применялись для повышения прочности шин.

АЛХИМИЯ

Алхимия, которая существовала сотни лет назад, представляла собой смесь науки, искусства и шарлатанства.

Одни алхимики, *аденты*, утверждали, что благодаря духовному превращению и ощущению вибраций Земли они могут достигать абсолютного совершенства и создавать золото. Иные стремились превращать любые металлы в золото. Для получения золота они использовали разные виды печей, мехов и специальные компоненты, включая нефть, деготь, сажу и навоз. Считалось, что чем горячее огонь, тем скорее произойдет желанная реакция превращения. По правде сказать, деятельность алхимиков всегда была красочным шоу для их соседей.

Несмотря на странные методы, которыми пользовались алхимики, им удалось найти и развить некоторые идеи, которые стали основой первых химических знаний. Например, алхимики правильно предположили, что цвет является базовым свойством элемента.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

В своих попытках найти способ генерирования золота они пытались в первую очередь получить металл желтого или золотистого цвета. Используя известь, серу, уксус и медь, они получали вещества с золотистым цветом, которые часто принимали за золото.

В процессе этих поисков алхимики научились кристаллизовать и дистиллировать растворы, открыли несколько неизвестных элементов и соединений.

Современные исследователи постоянно обнаруживают уникальные физические, химические и биологические свойства наномасштабных материалов и реакций. Одновременно их исследуют с помощью теоретических знаний, компьютерного моделирования и экспериментов.

Применение нанотехнологий возникает в результате проверки новых материалов, свойств и процессов. Исследования открывают новые способы улучшения существующих коммерческих продуктов в диапазоне размеров от атомов и молекул (~1 нм) до их гораздо больших образований (>100 нм). По сравнению с более масштабными уровнями наномасштаб не просто еще один уровень, а *качественно* новый уровень. Наномасштабные системы существуют в царстве квантовых законов, и их можно увидеть только с помощью самых мощных микроскопов и других инструментов. Теперь квантовые законы, которые прежде были лишь любимой игрушкой фантастов, становятся повседневными инструментами нанотехнологических исследований.

Умные материалы

Практически все отрасли, включая биомедицину, энергетику, химию и электронику, теперь так или иначе связаны с наномасштабными объектами. Наномасштабные материалы и процессы используются для создания многих новых материалов. Для реализации различных идей, например создания более экономичных солнечных батарей или линий электропередач, не хватает более эффективных материалов. С появлением таких материалов глобальные проблемы энергосбережения могут уйти в историю. Как и много лет назад, когда в результате прогресса после каменного века наступил бронзовый век, а потом железный и индустриальный, сегодня на смену информационному приходит *молекулярный век*.

Новые наноматериалы, например углеродные нанотрубки или нанооболочки, обладают гораздо большими возможностями по сравне-



нию с обычными углеродными или кремниевыми частицами. Например, углеродные нанотрубки в 100 раз прочнее стали, они проводят тепло лучше алмаза и переносят электрический ток лучше меди. Именно по причине такой универсальности многие материалы, например фуллерены, однослойные углеродные нанотрубки, нанооболочки, квантовые точки и микрокапсулы, часто называют *умными материалами (smart materials)*.

Как разные разделы науки, так и разные отрасли промышленности, например авиастроение, биомедицину, химию, электротехнику, машиностроение и энергетику, объединяет общий знаменатель — поиск *материалов с улучшенными свойствами*. После открытия нанотрубок и нанооболочек ученые и инженеры стремятся проверить все новые возможности, которые открываются благодаря их свойствам, и найти способ их применения.

Например, исследования пластмасс привели к тому, что теперь они используются практически везде — от контейнеров и игрушек до контактных линз и протезов суставов. Пластмассы были удивительным открытием науки и техники 1950–1960-х гг. Их внедрение полностью изменило мир. Многие предметы стали столь дешевы, что проще было их выбросить и купить новые, чем помыть или починить (однако о пользе и вреде одноразовой пластиковой посуды все еще ведутся ожесточенные дискуссии).

Похоже, что применение наноматериалов идет по тому же пути, но, возможно, в более щадящей для окружающей среды манере. Кроме того, некоторые свойства наноматериалов намного превосходят аналогичные свойства пластмасс. В таблице 8.1 приведена сравнительная характеристика основных свойств некоторых типов наноматериалов.

Таблица 8.1. Сравнительная таблица свойств наноматериалов

Свойства	Органические полимеры	Металлы	Полупроводники	Керамика	Углерод
Оптические		***	***		*
Механические	*	*		*	***
Электрические		**			***
Магнитные		*		***	
Каталитические				**	*
Абсорбционные	***				



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Инженеры теперь имеют в своем распоряжении бóльшую прочность, теплопроводность, электропроводность, гибкость и могут не только найти новые решения старых проблем (например новые способы лечения болезней), но и создавать просто невероятные сегодня материалы и продукты. И как только они появятся, нам трудно будет представить, как же можно было так долго без них обходиться. Все станет возможным, когда сформируются технологии манипулирования атомами!

Однослойные углеродные нанотрубки являются невероятно перспективными наноматериалами. Их свойства, например прочность, долговечность, химическая стойкость, теплопроводность и (вероятно, наиболее важное свойство) электропроводность, делают нанотрубки универсальным материалом. В зависимости от молекулярной структуры одни нанотрубки являются полупроводниками, а другие — проводниками. Эти свойства, вместе с наномасштабной геометрией, делают их кандидатами для создания проводов, контактов и устройств для молекулярной электроники.

В течение многих лет работа с однослойными углеродными нанотрубками осложнялась трудностями их обработки. Однако профессорам Ричарду Смолли и Маттео Паскуали (Matteo Pasquali) из Университета Райс (США) удалось сделать важное открытие. Оказалось, что некоторые кислоты, например серная, позволяют манипулировать нанотрубками и получать растворы с отдельными нанотрубками или жидкими кристаллами нанотрубок. Это позволило ученым заложить основу для создания более крупных объектов, целиком состоящих из однослойных углеродных нанотрубок. На рисунке 8.1 показан один из примеров самосборки нанотрубок.

Поскольку нанотрубки прочнее стали, на их основе можно создавать сверхпрочные пластмассы. Благодаря этому можно значительно снизить вес самолетов, космических аппаратов и автомобилей. Вооруженные силы США заинтересованы в использовании нанотрубок для покрытий самолетов, кораблей, танков и автомобилей, которые поглощали бы излучение радаров. В аэрокосмической отрасли переход на такие пластмассы может сыграть такую же революционную роль, как переход от винтовой авиации к реактивной.

Многослойные углеродные нанотрубки со средним диаметром около 40 нм также имеют множество потенциальных применений — от оптических систем в мобильных телефонах до элементов окон автомобилей и спортивных товаров. Они обладают еще большей прочностью, чем однослойные углеродные нанотрубки, и играют важную роль при создании композитных материалов.

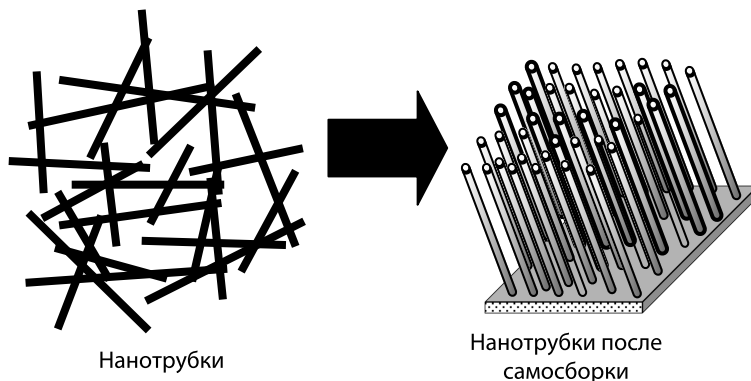


Рис. 8.1. Самосборка нанотрубок

ПРОИЗВОДСТВО

Огромные технические трудности на пути промышленного производства не могут остановить или даже замедлить исследования наноматериалов. В краткосрочной перспективе промышленное производство нанотрубок будет только расширяться благодаря усилиям и средствам, затраченным на исследования таких высокоэффективных материалов, как нанопровода или нанополупроводники.

Некоторые специалисты считают, что нанотрубки наиболее перспективны для применения в покрытиях и красках. При смешивании с краской нанотрубки получают электростатический заряд. Благодаря этому краска и покрытия с нанотрубками плотнее прилегают к поверхности. Такие краски с нанотрубками можно наносить непосредственно на конвейере. Кроме того, специальная паста с нанотрубками может улучшить оптические свойства жидкокристаллических и гибких дисплеев, например позволит получать более четкое изображение, чем это возможно сейчас.

Нанокристаллические материалы

Как известно, все материалы состоят из атомов и молекул. Большинство материалов состоит из частиц с размерами от нескольких сотен микрон до нескольких миллиметров.

Нанокристаллические материалы имеют размеры от 1 до 100 нм. Радиус атома — около $1\text{--}2 \text{ \AA}$, тогда как $10 \text{ \AA} = 1 \text{ нм}$. В зависимости от типа атома на одном нанометре помещается 3–5 атомов.

Наноматериалы могут обладать чрезвычайно высокой прочностью, твердостью, гибкостью, вязкостью при высоких температурах,



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

износостойкостью, коррозионной стойкостью, химической реактивностью и т. д. Многие наноматериалы гораздо более эффективны, чем их более крупные аналоги. Например, наночастицы серебра обладают особыми каталитическими свойствами (способностью реагировать с вирусами и убивать их), которых нет у макроскопического массивного куска серебра.

Для создания наноматериалов обычно используются следующие пять методов:

- золь-гель (коллоидные) технологии;
- конденсация в атмосфере инертного газа;
- механическое сплавление или высокоэнергетическое перемалывание;
- плазменный синтез;
- электролитическое осаждение.

Все эти процессы используются для создания разного количества наноматериалов, но синтез на основе золь-гель-технологий позволяет:

- производить большое количество наноматериала;
- генерировать одновременно два или более материала;
- создавать очень однородные и высокочистые (до 99,99%) сплавы и композиты;
- получать керамические и металлические материалы при очень низких температурах (около 60–300 °С вместо стандартных 1200–3500 °С);
- точно подгонять атомный состав и структуру.

Создавая материалы на наномасштабном уровне, инженеры могут применять их удивительные свойства, например сверхвысокую прочность, для уже существующих продуктов.

Нанокристаллы

Нанокристаллами называются небольшие скопления атомов, которые больше размера молекул (то есть 10 нм), но гораздо меньше макроскопических кристаллов. Они могут иметь разные физические и химические характеристики, но размер и площадь нанокристаллов (например *квантовых точек*), а значит и их свойства, строго контролируются. Действительно, ученые могут точно определять их кристаллическую структуру, регулировать электропроводимость и даже изменять температуру плавления.

Химик Пол Аливисатос (Paul Alivisatos), который работает в Университете штата Калифорния в Беркли (США) и Национальной лаборатории Лоуренса Беркли (США), создает нанокристаллы,



добавляя полупроводящий порошок в пенообразное *поверхностно-активное вещество (ПАВ)*. Ему с коллегами удалось вырастить несколько нанокристаллов разной формы (например в виде стержней или сфер) с помощью разных ПАВ.



Поверхностно-активное вещество — это вещество (например стиральный порошок), которое после добавления в жидкость увеличивает проникающую способность жидкости за счет уменьшения ее поверхностного натяжения.

Аливисатос с коллегами получили полупроводящие нанокристаллы в виде двухмерных стержней и определили условия, которые позволяют контролировать форму и размеры этих нанокристаллов. Принципы изменения формы еще до конца не ясны, но вполне возможно, что она определяется характером взаимодействия атомов жидкости и ПАВ. Регулируя эти условия, ученые вырастили несколько разных типов нанокристаллов (вытянутые стержни и ограниченные кристаллики), образцы которых показаны на рис. 8.2.

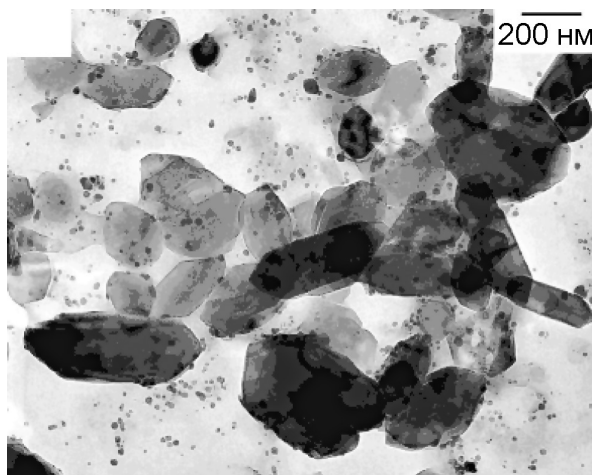


Рис. 8.2. Нанокристаллы кварца

Кроме того, ученым удалось показать, что нанокристаллы в форме стержней испускают поляризованный свет вдоль своей длинной оси, в отличие от сферических нанокристаллов, которые испускают неполяризованный свет. Благодаря этому свойству такие нанокристаллы удобно использовать в качестве биологических маркеров.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Аливисатос с коллегами обнаружили, что граница между энергиями излучения и поглощения у стержней больше, чем у сфер. Это свойство позволит улучшить характеристики светоизлучающих диодов, которые поглощают часть излучаемого света. Поскольку нанокристаллические стержни можно плотно упаковать с предпочтительной ориентировкой (как бревна на складе, рис. 8.3), их можно использовать в светодиодах и фотогальванических элементах.

Ученые научились выращивать нанокристаллы причудливой формы, например в виде капельки, стрелки и даже в виде рычага. Нанокристаллы такой формы еще не получили никакого конкретного применения, но, вполне вероятно, они будут полезны в будущем. Например, структуры типа *тетрапод* в форме рычага (рис. 8.4) можно будет использовать в качестве соединителей в нанoeлектронике.

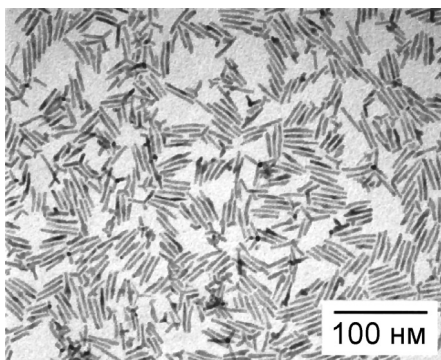


Рис. 8.3. Нанокристаллические стержни

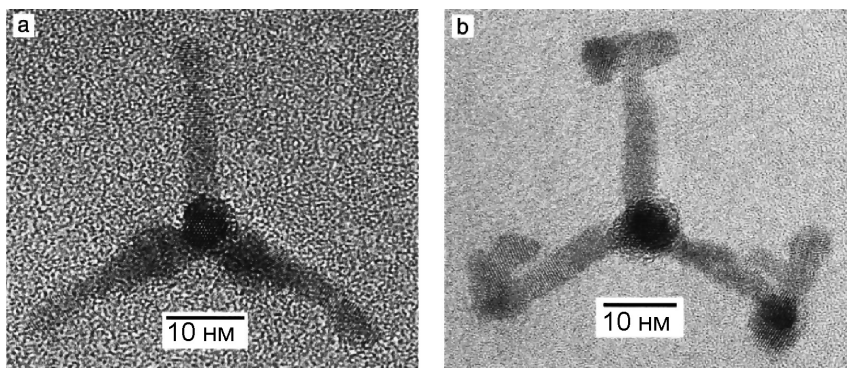


Рис. 8.4. Нанокристаллы в виде тетрапода



КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

Полупроводниковые наночастицы, которые способны захватывать электроны и локализовать их в малой области, называются *квантовыми точками* (*quantum dots*). Они способны испускать свет с разной длиной волны, в зависимости от собственного размера и уровней энергии. Уровнями энергии можно управлять за счет изменения размера, формы и заряда квантовой точки. Разницы уровней и длина испускаемого света связаны между собой. Изменение размера квантовой точки изменяет разницы уровней энергии, что в свою очередь влияет на длину испускаемого света, то есть цвет излучения. Эта взаимосвязь цвета излучения и размера квантовой точки является характерным свойством наномасштабного мира.

Квантовый провод (*quantum wire*) и *квантовая яма* (*quantum well*) аналогичны квантовой точке, но ограничивают движение электронов по двум измерениям для провода (как вдоль узкой скважины) и по одному для ямы (как вдоль стенок колодца), тогда как в точке оно ограничено по трем измерениям (как в клетке). Движение электронов ограничивается на расстояниях порядка длины волны де Бройля.



Длина волны де Бройля — это мера количественного соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц. Если частица имеет энергию E и импульс $p = mv$, то с ней связана волна, частота которой $\nu = E/h$ и длина $\lambda = h/p = h/mv$.

Это ограничение определяет уровни энергии и *квантовый выход* (то есть количество событий при поглощении одного фотона излучения). Квантовые точки могут служить в качестве *кубитов* (*qubit*) — элементов квантового компьютера.



Квантовая точка — это фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по всем трем пространственным измерениям в области не более 10 нм и содержащий электроны проводимости.

Как и атомы, квантовые точки можно изучать только с помощью самых мощных современных спектроскопических и микроскопических методов. Квантовые точки определенного размера обладают характерным цветом, и, несмотря на крошечный размер, их можно заметить по этому цвету (конечно, не по отдельности, а в достаточно большом скоплении).

Чем больше квантовая точка, тем ближе ее спектр излучения к красному концу видимой части всего спектра электромагнитного



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

излучения, а чем она меньше, тем ближе ее спектр излучения к синему концу. Некоторые ученые считают, что форма квантовой точки также оказывает влияние на ее цвет, но для окончательного вывода требуется провести дополнительные исследования этой зависимости.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ

Еще одно важное применение квантовых точек связано с их использованием в качестве *флуорофоров*, то есть флуоресцентных биологических маркеров, для обнаружения раковых опухолей с помощью флуоресцентной спектроскопии.

Как уже упоминалось выше, регулируя размер квантовой точки, можно регулировать длину волны ее излучения. С помощью такого механизма медики и ученые научились настраивать квантовые точки для определенных целей. Например, они могут фиксировать проникновение таких биологических маркеров внутрь клеток сквозь мембраны (это явление подробнее описывается в главе 6). Подобные маркеры никогда не «выцветают», то есть не теряют способности излучать свет с определенной длиной волны. Это свойство упрощает работу ученых, которые пытаются разгадать внутриклеточные механизмы.

В настоящее время в качестве биологических маркеров используются органические красители. Однако по мере появления новых технологий визуализации прежние биологические маркеры на основе органики постепенно вытесняются новыми маркерами на основе квантовых точек. Помимо прочего, биологические маркеры на основе квантовых точек обладают повышенной яркостью (благодаря большому значению квантового выхода) и стабильностью.

В настоящее время ученые изучают сферические нанокристаллы на основе сульфида кадмия и селенида кадмия. Такие нанокристаллы способны излучать свет разного цвета в зависимости от своего размера. Именно они используются в качестве флуоресцентных биологических маркеров. В конфокальной микроскопии объект облучается фотонами, которые стимулируют флуоресцентное излучение в биологических маркерах.

Нанокристаллы удобно использовать для визуализации сосудов и переноса медикаментов в режиме *in vivo*. Именно для этого их применяют Мария Акерман (Maria Akerman), Уоррен Чан (Warren Chan) и Эрки Руослахти (Erkki Ruoslahti) из Университета штата Калифорния в Сан-Диего (США). Они показали, что нанокристаллы, покрытые легочными пептидами, помогают визуализировать легочные ткани мышей. Кроме того, нанокристаллы с другими пеп-



тидами позволили визуализировать кровеносные и лимфатические сосуды раковой опухоли. Эти результаты наводят на мысль об использовании наночастиц не только для визуализации, но и для высокоточной доставки медикаментов к месту назначения.

Для изучения некоторых популяций клеток медикам часто требуется использовать разные комбинации биологических маркеров. Для некоторых измерений необходимо анализировать сразу несколько цветов излучения, что очень сложно технически при использовании обычных органических красителей. Биологические маркеры на основе новых нанотехнологий позволяют легко и быстро решить эти проблемы.

По-видимому, новые методы визуализации помогут ученым и медикам придумать новые способы диагностики и лечения сложных заболеваний. Например, для визуализации и лечения повреждений и болезней внутренних органов можно использовать волоконно-оптические зонды с ультрафиолетовой подсветкой. Более того, аналогичные методы пригодятся для разведки и устранения токсичных загрязнений в труднодоступных местах, например в ядерных реакторах или опасных отходах производства.

ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА НАНОЧАСТИЦ

Помимо методов микроскопии, которые уже описывались ранее в главе 4, для анализа и изучения свойств наночастиц используются новые методы и инструменты.

Майкл О'Кифи (Michael O'Keefe) и Кристиан Киселовски (Christian Kisielowski) из Национального центра электронной микроскопии (НЦЭМ) — National Center for Electron Microscopy, NCEM — при Министерстве энергетики США разработали новые высокочувствительные методы анализа наночастиц. С помощью одноангстремного микроскопа (One-Angstrom Microscope — OEM) они достигли наибольшей разрешающей способности в США для исследования наноматериалов, то есть около $0,8 \text{ \AA}$ ($<0,1 \text{ нм}$).

Разрешение этого микроскопа настолько велико, что с его помощью можно рассматривать отдельные атомы. Как утверждает Киселовски, так можно соединить теоретические предсказания о размерах нанокластеров и экспериментальные результаты. Эксперименты показали, что атомы ведут себя так, как было предсказано в компьютерном моделировании и теоретических расчетах.

С помощью новых технологий и инструментов ученые НЦЭМ теперь могут изучать практически каждый атом нанокластера. На-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

пример, атомы кремния в элементе-вентиле микросхемы можно располагать с беспрецедентной точностью около 0,1 нм.

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Квантовые точки представляют собой огромный технологический скачок на пути к твердотельным квантовым вычислениям. Прикладывая небольшое напряжение к квантовой точке, можно управлять электрическим током, который протекает через нее. Таким образом, появляется возможность выполнять точные измерения спина и других свойств электрона. Совсем скоро хранение данных и вычисления на основе квантовых эффектов станут повседневной реальностью.

В отличие от стандартных электронных устройств, в которых для передачи сигналов используется ток заряженных электронов, в квантовых вычислениях их роль играют спин электрона и поляризация света. Этот метод может существенно повысить скорость выполнения операций и снизить энергопотребление вычислительных систем.

Помимо своего размера, квантовые точки обладают несколькими другими преимуществами. Благодаря своим лучшим кинетическим и оптическим свойствам они являются прекрасными кандидатами для использования в усилителях, полупроводниковых лазерах и биологических сенсорах (то есть внутри клеток).

Квантовые точки уже появились в электронике и игровой индустрии. В самых современных DVD-плеерах и игровых приставках уже используются так называемые голубые лазеры. Еще недавно это считалось чем-то невозможным, пока не были использованы квантовые точки с излучением синего света.

Более подробно влияние нанотехнологий на вычисления, электронику, сенсоры и связь описывается в главах 9 и 10.

Сплавы

Материаловеды и инженеры научились создавать прочные сплавы еще задолго до того, как начали анализировать их внутреннюю структуру. Сначала разные компоненты сплава нагревали до полного растворения, затем охлаждали. При этом выпадали некоторые компоненты, и образовывался прочный и твердый сплав.

Действительно, технологии дисперсионного твердения имели огромное значение для авиации со времен первого полета братьев Райт. Как показал анализ, двигатель их самолета был сделан из



сплава, приготовленного по этой технологии. Через семь лет данная технология стала стандартной для авиационных сплавов.



Сплав — это смесь, состоящая из нескольких компонентов, по крайней мере один из которых является металлом. Например, латунь — сплав меди и цинка, а сталь — сплав железа и углерода.

Вообще говоря, чем меньше расстояние между атомами, тем тверже сплав. Некоторые компоненты сложных сплавов, например алюминиевого сплава 2219, настолько малы по процентному содержанию, что их упорядочение не всегда точно известно.

Однако с помощью просвечивающей электронной микроскопии и методов анализа можно определить размеры, форму и структуру даже самых крошечных выделившихся фаз — *преципитатов*.

Поскольку преципитаты меняют кристаллическую структуру материала, это может повлиять на его сдвиговую прочность. Инженеры вынуждены учитывать такое влияние преципитатов на прочность конструкций для практических применений.

Преципитаты также влияют на термические свойства материала, ведь они могут иметь более высокую или низкую температуру плавления, чем основной материал сплава.

Ученым из Национального центра электронной микроскопии при Министерстве энергетики США удалось создать совершенно новый сплав алюминия, меди, германия и кремния для авиационной и автомобильной промышленности. Этот сплав имеет чрезвычайно плотное распределение сверхмалых преципитатов, обеспечивая большую прочность и стабильность, чем сплав 2219.

Так, изучая атомарную структуру нанодобавок в материалах с помощью новейших методов электронной микроскопии, ученые находят новые способы контроля свойств материалов на наномасштабном уровне.

Нанокмползиты

Материалы и процессы, используемые для манипулирования наномасштабными частицами в пластмассах, металлах или керамике, являются элементами *нанокмползитных* технологий. Характерной особенностью нанокмползитов является то, что их внутренняя структура очень мелкозернистая и состоит из наномасштабных элементов. Большая поверхностная площадь этих элементов обеспечивает прочность нанокмползитных материалов.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения



Нанокompозиты — это новый класс материалов, который создается за счет введения наночастиц (наполнителя) в основной макроскопический материал (матрицу).

Например, некоторые нанокompозиты создаются на основе внедрения наночастиц силикатной глины в пластмассы или керамику. Такие сверхтвердые нанокompозиты уже используются в автомобильной промышленности для создания панелей и ступенек.

Новейшие нанотехнологии, а также методы и инструменты анализа отдельных наноструктур и манипулирования ими, открывают перед материаловедами широкий круг возможностей. Теперь они могут комбинировать неорганические, органические и биологические системы в одной интегрированной сверхструктуре.

Нanomатериалы и автогонки NASCAR

Пилоты гоночных автомобилей NASCAR часто получают ожоги от перегрева двигателя, трансмиссии и даже пола. Для предохранения от такого перегрева (до 60 °C) в их автомобилях стали использоваться защитные экраны из наноматериалов.

Когда известный автогонщик Бобби Эллисон посетил Центр космических полетов им. Кеннеди в штате Флорида (США), он с удивлением обнаружил, что в космических аппаратах используется защитный слой, который предохраняет их от перегрева во время спуска в плотных слоях атмосферы. Он решил обсудить с другим гонщиком, Роджером Пенске, возможность применения подобной защиты в гоночных автомобилях.

Вскоре команда Пенске вместе со специалистами NASA и фирмы Rockwell попробовала применить композитный наноматериал NASA для своего гоночного автомобиля Ford Thunderbird. Вес всего покрытия не превысил и пары килограммов. После нескольких тестовых заездов на максимальной скорости около 300 км/ч оказалось, что этот наноматериал позволил снизить температуру перегрева почти на 30 °C.

Если бы такие легкие теплоизолирующие наноматериалы применялись раньше в гонках NASCAR, Formula 1 и многих других гонках, это изобретение могло бы обезопасить и людей, и их машины. Пилоты смогли бы соревноваться в более комфортных условиях, а рабочие части машин не перегревались бы и не выходили из строя преждевременно. Такие наноматериалы пригодятся не только астронавтам и пилотам, но и пожарникам и членам спасательных команд.



Нанокольца

Ученые из Национального института стандартов и технологий США вместе с коллегами из Швеции и Испании показали, что золотое *нанокольцо* с радиусом около 60 нм обладает удивительными оптическими и электромагнитными свойствами. Причем эти свойства можно настраивать за счет изменения радиуса и толщины кольца.

Дело в том, что при освещении нанокольца внутри и вне его генерируются сильные электромагнитные колебания в диапазоне, близком к инфракрасному. Они возникают в результате взаимодействия света с электронами кольца, которые возбуждаются и создают волну колебаний. Параметры этих колебаний зависят от геометрии кольца и длины волны падающего света.

Ученые придумали способ синхронизации электронов и света, чтобы их колебания имели одинаковую длину волны.

На рисунке 8.5 показана схема электромагнитного поля внутри и снаружи нанокольца с радиусом 60 нм и толщиной 10 нм. Стрелки указывают направление электромагнитного поля, создаваемого электронами.

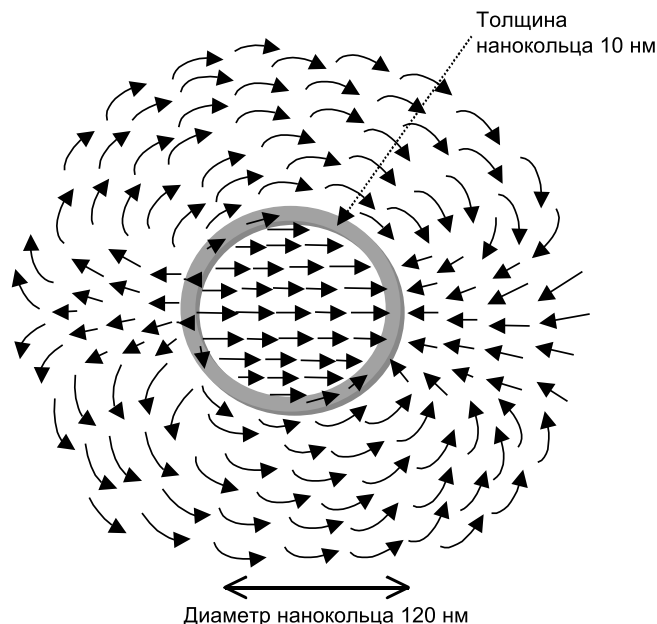


Рис. 8.5. Внутри нанокольца свет создает сильное электромагнитное поле



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Электромагнитное поле внутри кольца имеет частоту, близкую к инфракрасной части спектра, поэтому такие нанокольца можно применять в качестве контейнера-усилителя инфракрасных сигналов для тестирования молекул. Например, как уже упоминалось в главе 6, ученые могут таким образом изучать поведение белков и химические реакции, облучая их лазером и фиксируя поглощенную и переизлученную энергию. С помощью подобных экспериментов внутри нанокольца можно будет получать усиленные инфракрасные сигналы и более точные результаты.

САМОСБОРКА

Александр Вэй (Alexandr Wei), профессор химии Школы наук в Университете Пэрдью (США), и его коллеги создали нанокольца из кобальтовых наночастиц.

Эти нанокольца диаметром менее 100 нм способны хранить магнитную информацию при комнатной температуре. Более того, они создаются с помощью *самосборки*.

Кобальтовые наночастицы соединяются и образуют нанокольцо, в котором ведут себя, как крошечные магнетики с полюсами разного знака на противоположных концах. Они ориентированы так, что внутри нанокольца возникает *замыкание магнитного потока*. Хотя внутри кольца имеется сильное магнитное поле, снаружи его нет.

Такие магнитные нанокольца можно использовать в качестве элементов памяти в устройствах долговременного хранения данных и оперативной памяти. Предварительные исследования показали, что магнитные состояния нанокольца можно надежно контролировать. Например, при включении внешнего магнитного поля нанокольцо можно переключать из 1 в 0, что соответствует двум состояниям памяти в одном бите. Это значит, что на основе нанокольца и нанопроводов можно создавать наноразмерную электронную память.

Нанопокрyтия

Если теннисный мяч покрыть наномасштабным герметиком, то он прослужит в шесть раз дольше, чем обычный мяч с обычным покрытием. Наномасштабные покрытия используются не только для теннисных мячей, но и для велосипедов и автомобилей. Они повышают износостойкость и не так легко царапаются, как обычные покрытия.



АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ОТРАСЛЬ

Покрытия играют огромную роль в авиационной и космической промышленности:

- повышают долговечность, надежность и эффективность разных компонентов;
- препятствуют эрозии и износу;
- повышают качество поверхностей;
- препятствуют коррозии, отслаиванию, окислению и перегреву.

В аэрокосмической промышленности разрабатывается несколько многофункциональных нанопокрытий, которые должны обеспечить коррозионную защиту с помощью специальных материалов. Предполагается, что они будут способны обнаруживать коррозию и механическое повреждение и препятствовать им, реагировать на химическое и физическое воздействие, улучшать адгезию и повышать долговечность металлических конструкций. Одновременно разрабатываются легкие, прочные и термостойкие наноматериалы для авиационных двигателей.

ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

Для постоянной борьбы с коррозией требуется много ресурсов. Общая стоимость таких работ в Вооруженных силах США оценивается в 10 млрд долларов в год, из них 2 млрд долларов уходит на обычные операции соскабливания старой краски и нанесения новой. Ученые разрабатывают умные покрытия, которые в случае коррозионного повреждения или появления обычной царапины могли бы самостоятельно залечиваться. Кроме того, разрабатываются нанопокрытия для танков и другой военной техники, которые меняли бы цвет для создания маскировки в разных условиях.

Нанооболочки

Хотя нанооболочки подробно описывались в главе 6, их стоит упомянуть еще раз здесь, поскольку они являются важным компонентом для умных материалов в наномасштабах. Нанооболочки являются наночастицами нового типа — с настраиваемыми оптическими свойствами. Они обычно состоят из диэлектрического ядра (например кремния) и сверхтонкой металлической оболочки (например золота). Золотые нанооболочки, как и коллоидные растворы золота, обладают повышенной оптической абсорбцией, вызванной активным взаимодействием света и электронов этого металла. Эти свойства



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

широко используются на практике. Например, красные коллоидные растворы золота применяются в тестах на беременность.

Как уже известно, оптические свойства золотых наноболочек зависят от размера ядра и толщины его золотого покрытия. Как и у квантовых точек и наноколец, эти свойства можно изменять, управляя размерами наноболочек. Таким образом, поменяется не только их цвет во всем видимом диапазоне, но и соотношение поглощенного и отраженного света.

Наноболочки были впервые получены профессором Наоми Халас (Naomi Halas) из Университета Райс (США). Для их создания потребовалось применить знания и технологии из разных областей науки: химии, физики, оптики и электротехники. В 2001 г. Наоми Халас вместе с коллегой Дженнифер Уэст (Jennifer West) основала компанию Nanospectra Biosciences, Inc., которая занимается созданием наноболочек в медицинских целях. На рисунке 8.6 показана типичная золотая наноболочка, окруженная полиакриламидом и антителами, которые могут прилипать к особым местам раковой опухоли.

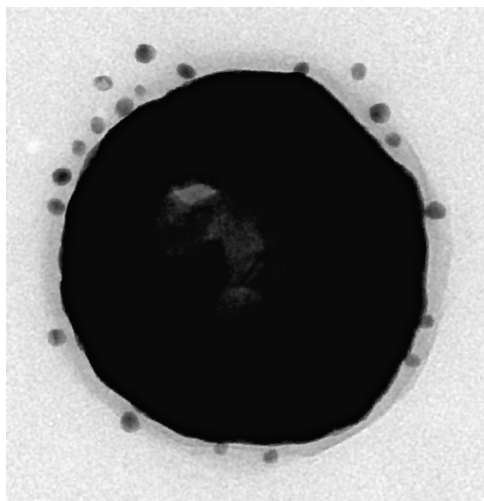


Рис. 8.6. Наноболочка с «гало» из полиакриламида

В настоящее время ученые изучают следующие возможные применения таких наноболочек:

- оптический анализ крови;
- оптическая визуализация;



- фототермическая абляция («поджаривание») раковых опухолей и мест дегенерации желтого пятна (заболевание светочувствительных клеток глаза);
- доставка медикаментов внутри организма;
- оптически контролируемая микроструйная техника;
- биологические сенсоры.

Кроме того, предполагается применять нанооболочки в качестве ингибитора в фотоокислительных процессах полимерных пленок.

Катализаторы

Уже многие годы нанотехнологии с подачи авторов научно-фантастических произведений представляются как способы создания крошечных искусственных молекулярных роботов, которые способны манипулировать отдельными атомами. Однако люди давно используют естественные молекулярные «монтажники», которые называются *катализаторами*.



Катализаторы — это вещества, которые ускоряют химические реакции, но при этом не расходуются и не изменяются химически.

Натуральные катализаторы, энзимы, предоставляют альтернативный способ протекания реакции с более низкой энергией ее активации. Промышленные катализаторы не обладают такими высокими характеристиками, как естественные. Катализаторы имеют, как правило, большое отношение площади поверхности к объему и распределяются на инертном носителе.

Еще с 1920-х гг. в промышленности используются катализаторы в виде металлических частиц со случайным распределением по размерам.

Ученые обнаружили, что размеры частиц и расстояния между ними имеют огромное значение для эффективности катализаторов. В экспериментах было показано, что упорядочение нанокристаллов платины высотой 15–20 нм на расстоянии 100 нм на пластинке оксида кремния площадью всего 0,5 см² позволяет увеличить каталитическую способность в 20 раз по сравнению с таким же количеством сплошной платины. Это и другие открытия вскоре позволят ученым создать сверхэффективные катализаторы.

Нанотехнологии обладают огромным потенциалом для создания новых катализаторов для химической, нефтеперерабатывающей, автомобильной, фармацевтической и пищевой промышленности.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Специализированные нанокатализаторы, которые способны взаимодействовать с биологическими структурами, могут служить важным связующим звеном между традиционными искусственными катализаторами и ферментами.

Микрокапсулы

Исследование микрокапсул является одним из приоритетов для специалистов в области наномасштабного материаловедения. Многие компании стремятся создать полые контейнеры для доставки медикаментов, визуализации внутренних процессов, защиты от солнечного излучения, косметики и парфюмерии. Способность микрокапсулы сохранять и переносить молекулы другого вещества имеет огромное значение для современной медицины и промышленности.

Микрокапсулы могут образовываться с помощью самосборки при комнатной температуре в результате реакции между наночастицами кварца в водном растворе полимеров и солей.

Микрокапсулы легко переносят ферменты — сложные биологические молекулы, которые способны инициировать многие клеточные процессы и управлять ими. Профессор Майкл Вонг из Университета Райса (США) продемонстрировал в своих экспериментах, как ферменты могут сохраняться в микрокапсулах без утечки сквозь стенки, но с проникновением других более мелких молекул внутрь микрокапсул. На рисунке 8.7 показано, как выглядят микрокапсулы.

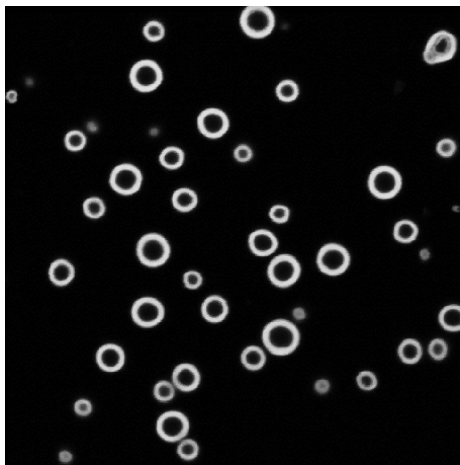


Рис. 8.7. Микрокапсулы



Именно это свойство можно, по мнению Вонга, использовать для катализа химических реакций с другими молекулами. Такие микробиореакторы хорошо применять в производственных процессах химической и фармацевтической промышленности.

Уникальные свойства подобных наноматериалов и наномасштабных структур вызвали лавинообразное увеличение интереса к ним среди материаловедов. В некоторых промышленных продуктах (например, в наполнителях, покрытиях и электросхемах) уже используются уникальные свойства наноматериалов. Нанотехнологии ждет великое будущее, но уже сейчас они демонстрируют свои преимущества, которые ведут к значительным изменениям в производственных процессах, ассортименте продукции и общественном сознании.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Мерой количественного соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц является:
 - (а) протяженность;
 - (б) миллилитр;
 - (в) световой год;
 - (г) волна де Бройля.
2. Оптические свойства золотых наноболочек зависят от:
 - (а) количества тепла, поглощенного во время их создания;
 - (б) рыночной цены золота;
 - (в) размера ядра и толщины его золотого покрытия;
 - (г) времени суток.
3. Материалы, которые создаются на основе внедрения наночастиц силикатной глины в пластмассы или керамику, называются:
 - (а) нанокомпозитами;
 - (б) нанокольцами;
 - (в) нанотрубками;
 - (г) нанопенопластом.
4. Катализаторы — это вещества, которые:
 - (а) вызывают землетрясения;
 - (б) ускоряют химические реакции, но при этом не расходуются и не изменяются химически;
 - (в) добываются в болотистой местности;
 - (г) способствуют затвердеванию.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

5. Микрокапсулы могут сохранять внутри себя и переносить:
 - (а) солнечный свет;
 - (б) перепелиные яйца;
 - (в) электрическую энергию;
 - (г) энзимы.
6. Применение композитного наноматериала для гоночного автомобиля Ford Thunderbird позволило снизить температуру перегрева почти на:
 - (а) 10 °С;
 - (б) 20 °С;
 - (в) 30 °С;
 - (г) 40 °С.
7. Оптические и электромагнитные свойства нанокольца можно настраивать:
 - (а) за счет изменения радиуса и толщины;
 - (б) с помощью руки, на которой оно носится;
 - (в) увеличивая его диаметр до 3 мм;
 - (г) регулируя давление при его изготовлении.
8. Для создания нанооболочек нужно применять знания и технологии из химии, физики:
 - (а) и антропологии;
 - (б) музыки;
 - (в) оптики;
 - (г) экологии.
9. Сферы, которые могут образовываться с помощью самосборки при комнатной температуре в результате реакции между наночастицами кварца в водном растворе полимеров и солей, называются:
 - (а) тапиокой;
 - (б) фуллеренами;
 - (в) микрокапсулами;
 - (г) бильярдом.
10. Вещество, которое после добавления в жидкость увеличивает ее проникающую способность за счет уменьшения поверхностного натяжения, называется:
 - (а) идеальным газом;
 - (б) поверхностно-активным веществом;
 - (в) энзимом;
 - (г) муссом.

Глава 9

Электроника и сенсоры

Техасцы считают, что чем больше корова, шляпа или личный автомобиль, тем лучше. Но когда дело касается электроники, все наоборот: они любят все маленькое, быстрое и дешевое. Чтобы новинки электроники всегда соответствовали требованиям потребителей, технологии должны предусматривать весь потенциал инновационных решений.

Закон Мура

Гордон Мур (Gordon Moore) за три года до основания компании Intel заметил, что плотность компонентов электронных схем удваивается каждые 18 месяцев. Он заявил, что если такая тенденция продолжится, то их плотность возрастет с 50 компонентов в одной схеме до 65 тыс. уже в 1975 г. Эта тенденция сохранилась и стала называться *закон Мура*. На рисунке 9.1 показан график этой тенденции за последние годы.

Помимо технического прогресса, наблюдается тенденция экономического роста, причем почти в соответствии с законом Мура. Дело в том, что стоимость производства сложных электронных схем удваивается ежегодно. В 2005 г. типичный компонент сложной электронной схемы, микропроцессора имел размер 130 нм. Компания Intel планирует построить завод, который будет производить микропроцессоры с компонентами величиной около 65 нм, то есть шириной, равной цепочке из 300 атомов.

Уменьшение компонентов не замедляется, однако очевидно, что предел будет достигнут очень скоро, например, когда размер компонента станет равным размеру атома. Если этот предел все же будет достигнут, человечество научится выполнять квантовые вычисления. Одни специалисты считают, что это произойдет уже в 2010 г., а другие — что не ранее 2020–2030-х гг. Более мелкие компоненты компьютеров будущего, вероятно, будут состоять из субатомных частиц.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

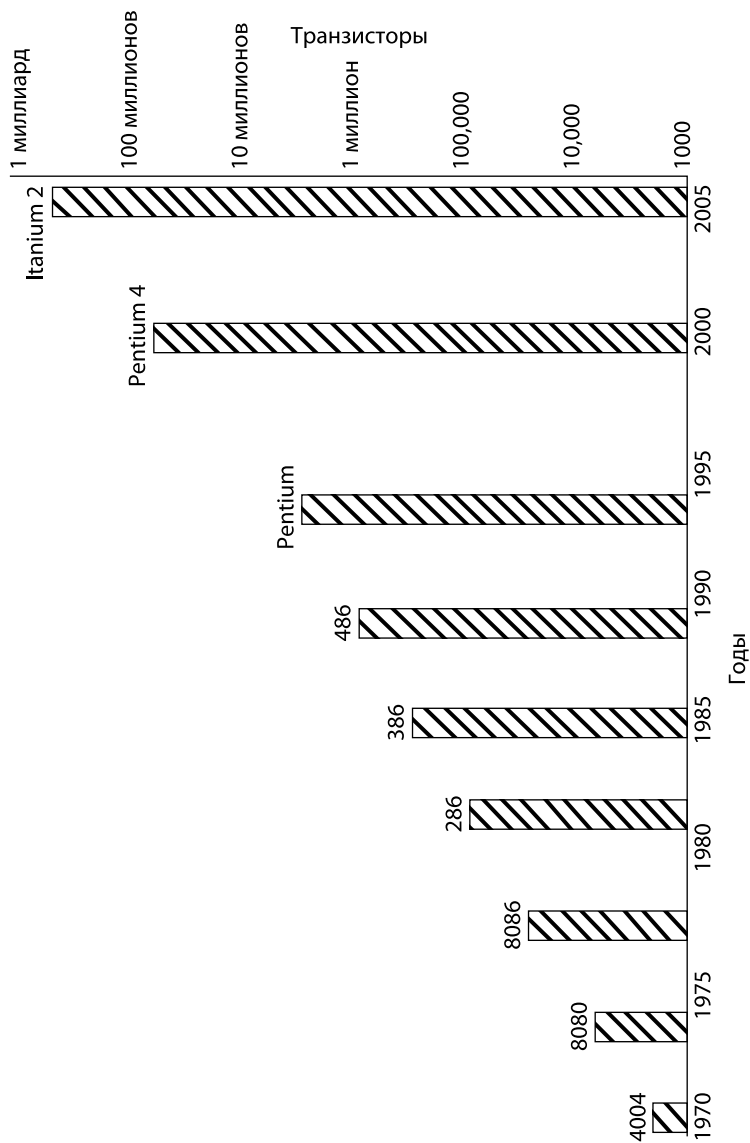


Рис. 9.1. Закон Мура, согласно которому растет плотность компонентов электронных схем



Как бы то ни было, но для достижения этого инженерам сначала нужно научиться использовать наноструктуры, например нанотрубки в качестве проводов.

Отдельный вопрос: а как быть с программным обеспечением? Каким оно будет и как его загрузить в такие сверхбыстрые компьютеры?

КВАНТОВЫЕ ВОПРОСЫ

Чудеса нанотехнологии заключаются не только в уменьшенном размере компонентов систем. Благодаря более малым размерам ученые надеются выйти на новый качественный уровень полупроводниковой электроники и создать совершенно новые поколения процессоров.

Действительно, на молекулярном уровне нанотехнологии позволяют получать поистине ошеломляющие результаты. Как уже описывалось в главе 3, разбивка сплошного материала на наночастицы увеличивает общую площадь поверхности в миллионы раз. Большая площадь поверхности означает большую реактивную способность. Наноматериалы плавятся, воспламеняются и абсорбируют гораздо быстрее, чем их сплошные массивные аналоги. Например, массивный брусок золота является химически *инертным*, а золотое нанокольцо действует как катализатор.



Инертность означает слабую химическую активность или ее полное отсутствие.

Некоторые наноматериалы с уменьшением размеров (менее длины волны видимого света) становятся прозрачными. Благодаря этому эффекту ученые научились передавать свет через такие непрозрачные материалы, как, например, кремний. Другие материалы становятся чрезвычайно прочными. Например, углеродные нанотрубки обладают очень высокой прочностью и гибкостью, поскольку их атомарная структура — это атомарная структура алмаза.

Однако в наном мире все еще много неразгаданных загадок. Например, наноматериалы не подчиняются законам механики Ньютона. Все дело в том, что в наномасштабе доминируют законы *квантовой механики*.



Квантовая механика (волновая механика, матричная механика) — это раздел теоретической физики, описывающий квантовые законы движения.

Этот раздел физики описывает поведение вещества на атомарном и ядерном уровне. На этих уровнях энергия, импульс и другие свой-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

ства изменяются не непрерывно, как на макроскопическом уровне, а *дискретно*, то есть неделимыми порциями, или *квантами*.

Законы механики Ньютона прекрасно объясняют движение планет и траекторию полета баскетбольного мяча, а законы квантовой механики описывают поведение молекул, атомов и других объектов наномира. Механика Ньютона не может удовлетворительно объяснить стабильность атомов, а также такие явления, как сверхпроводимость и сверхтекучесть.

Предсказания квантовой механики вот уже более века подтверждаются экспериментами. В отличие от классической механики, квантовая механика способна объяснить некоторые поистине удивительные явления. Прежде всего, это *корпускулярно-волновой дуализм* (наличие у нанообъектов свойств, присущих волнам и частицам) и *квантовое запутывание* (влияние измерения одной системы на другие системы).

Квантовая механика лежит в основе современной и будущей электроники. Применение ее законов для создания новых нанотехнологий станет залогом успеха в будущем.

ТРАНЗИСТОРЫ

В 1948 г. американские физики Джон Бардин (John Bardeen), Уолтер Х. Браттэйн (Walter H. Brattain) и Уильям Шокли (William Shockley), которые в то время работали в компании Bell Telephone Laboratories, объявили об изобретении транзистора. В 1956 г. они получили Нобелевскую премию по физике «За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». (Практически одновременно с ними и независимо от них транзистор был создан также немецкими учеными Гербертом Матаре (Herbert Mataré) и Хайнрихом Велькером (Heinrich Welker) из лаборатории компании Westinghouse в Париже.) С тех пор придумано большое количество разных транзисторов.

Бардин продемонстрировал свою уникальность в этой сложной научной области, когда в 1972 г. получил Нобелевскую премию по физике «За создание теории сверхпроводимости, обычно называемой БКШ-теорией» вместе с Леоном Н. Купером (Leon N. Cooper) и Джоном Р. Шриффером (John R. Schrieffer). На момент написания этой книги Бардин — единственный дважды лауреат Нобелевской премии в одной области науки.

Для понимания основ наноэлектроники необходимо получить некоторые базовые сведения о принципах работы компьютера. Транзистор заменил электровакуумную лампу в качестве регулятора электронных сигналов. По сравнению с электровакуумными лампами транзисто-



ры обладают несколькими преимуществами, например меньшим размером, большей долговечностью и прочностью, дешевизной. Первые транзисторы имели вид небольшой детали в керамическом корпусе с металлическими контактами. Такой транзистор припаивали в нужном месте электрической схемы. Хотя подобные изолированные транзисторы используются до сих пор в простых схемах, они чаще всего являются неотъемлемой частью более сложных интегральных микросхем. Транзисторы присутствуют практически во всех электронных устройствах: компьютерах, радиоприемниках, системах глобального позиционирования, космических системах и т. п.



Транзистор — это полупроводниковый электронный прибор, в котором током в цепи двух электродов управляет третий электрод.

Транзистор состоит из трех слоев полупроводникового материала. *Полупроводник* — это материал, который по-разному проводит электрический ток в разных условиях. При высокой температуре полупроводник проводит электрический ток, как металл, например медь, а при низкой является изолятором, как, например, резина. В полупроводнике движение электронов определяется его кристаллической структурой.



Полупроводники — это вещества, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличаются от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей и внешних условий (температуры, излучения и т. д.).

В твердотельной электронике для полупроводниковых элементов используются кремний и германий. Их атомы имеют по четыре *валентных* электрона (электроны, которые способны образовать связи с другими атомами). Однако при изменении температуры в германии появляется больше свободных электронов, и он становится проводником. Кремний в этом отношении более универсален, поскольку может использоваться при более высоких температурах. Под воздействием света или электричества полупроводники становятся либо проводниками, либо изоляторами.

Полупроводник создается за счет *легирования*, то есть химической операции добавления некоторых веществ в основной материал (кремний, германий и т. п.). После легирования в основном материале появляется некоторое количество атомов, которые имеют



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

либо пять валентных электронов, и так получается полупроводник *n*-типа (от англ. слова «negative» — отрицательный, поскольку появляются лишние электроны и избыток отрицательного заряда), либо три валентных электрона — полупроводник *p*-типа (от англ. слова «positive» — положительный, поскольку из-за нехватки электронов появляется избыток положительного заряда). Транзистор обычно состоит из трехслойного «бутерброда»: один слой *p*-типа находится между двумя слоями *n*-типа, или, наоборот, слой *n*-типа между двумя слоями *p*-типа. Более подробно эти слои описываются ниже.

При небольшом изменении напряжения во внутреннем слое такого «бутерброда» изменяется величина электрического тока во всем транзисторе. Таким образом, транзистор действует как очень быстрый переключатель электрического тока. В современных компьютерах используются транзисторы на основе структуры металл—оксид—полупроводник (МОП-структура). Огромное количество таких микроскопических структур-транзисторов образует *микрочип*.

ЛИТОГРАФИЯ

Стандартная кремниевая микропроцессорная технология вскоре достигнет своего физического предела. Создателям будущих микропроцессоров потребуется найти новые технологии, которые позволили бы им повысить плотность транзисторов в микрочипе и создать новые мощные микропроцессоры.

В настоящее время для создания микропроцессоров используется *литография*. Эта технология основана на принципе печати фотографий, то есть с помощью света изображение электрической схемы проецируется на кремниевую подложку. В процессе создания интегральной схемы микропроцессора *маска* играет роль фотопленки, а кремниевая подложка — фотобумаги. Свет проходит через маску, с помощью нескольких линз ее изображение уменьшается до микроскопических размеров и попадает на кремниевую подложку.

На подложке располагается светочувствительный слой, *фоторезист*, затвердевающий под воздействием света. Когда свет (например ультрафиолетовый с длиной волны 248 нм) проходит сквозь маску и падает на подложку, незащищенная маской часть фоторезиста затвердевает. Остальное легко смывается водой. На рисунке 9.2 показана последовательность действий, которые выполняются при создании микрочипа с помощью литографии. Процесс повторяется до тех пор, пока на подложке не будет получен необходимый узор из вытравленных дорожек, то есть нужная электросхема.



Рис. 9.2. Создание микрочипа с помощью литографии



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

С помощью света с длиной волны 248 нм таким образом можно получить схему с дорожками шириной 200 нм. В современных компьютерах используются сотни микропроцессоров с миллионами транзисторов. Компании — производители микропроцессоров, например Intel — стремятся создавать все более миниатюрные транзисторы для увеличения их плотности в микропроцессорах.

Одним из наиболее важных факторов литографии является длина волны света. Чем короче длина волны, тем меньше вытравленные на подложке элементы (дорожки) электросхемы и выше плотность транзисторов. А чем выше плотность транзисторов, тем больше вычислительная мощность микропроцессора. Именно по этой причине процессор Intel Pentium 4 имеет 42 млн транзисторов, а процессор Intel Pentium 3 — всего 28 млн.

Литография — это, по сути, технологический процесс репликации чертежа электросхемы на подложку. Достоинства и недостатки этого процесса определяют производительность и стоимость электросхем. Литография включает этапы создания маски, экспозиции, нанесения и смывания фоторезиста, травления и т. д. Сокращение или повышение эффективности любого из этих этапов позволяет уменьшить стоимость созданных электросхем.



Фотолитография, или литография, — это метод получения рисунка на тонкой пленке материала, который широко применяется в микроэлектронике и полиграфии. Для получения рисунка используется свет определенной длины волны, причем минимальный размер деталей рисунка ограничен половиной длины волны.

Современные кремниевые чипы создаются с помощью ультрафиолетового света с очень короткой длиной волны (deep-ultraviolet lithography). В настоящее время ведутся интенсивные исследования возможностей использования *литографии на основе экстремального ультрафиолетового света (extreme-ultraviolet lithography)* с длиной волны около 10–15 нм. С его помощью можно настолько увеличить плотность транзисторов в микропроцессорах, что они станут мощнее почти в 100 раз. Некоторые специалисты считают, что эта задача будет решена уже к 2010 г.

ИММЕРСИОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

В этом варианте литографии все операции выполняются в жидкости, куда погружается оптическая система и подложка. Например, в иммерсионной литографии с ультрафиолетовым светом с длиной



волны 193 нм используется сверхчистая дегазированная (то есть без пузырьков) жидкость. Иммерсионная литография увеличивает глубину фокуса, что позволяет создавать совершенные электросхемы для более мощных микропроцессоров.

ТИПЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Транзистор состоит из нескольких полупроводниковых материалов, например кремния, арсенида галлия и германия с примесями, добавленными в процессе легирования. В полупроводниках *n*-типа примеси (например мышьяк) вызывают появление лишних электронов и избыток отрицательного заряда, а в полупроводниках *p*-типа примеси (например бор) являются причиной нехватки электронов (так называемых дырок) и избытка положительного заряда.

ПЛОСКОСТНОЙ ТРАНЗИСТОР

Такой *n-p-n*-транзистор состоит из двух полупроводников *n*-типа (*эмиттера* и *коллектора*), между которыми находится полупроводник *p*-типа (*база*). Небольшой ток между базой и эмиттером значительно увеличивает ток между эмиттером и коллектором. Помимо роли усилителя тока транзистор может играть роль управляющего элемента электросхемы (рис. 9.3).

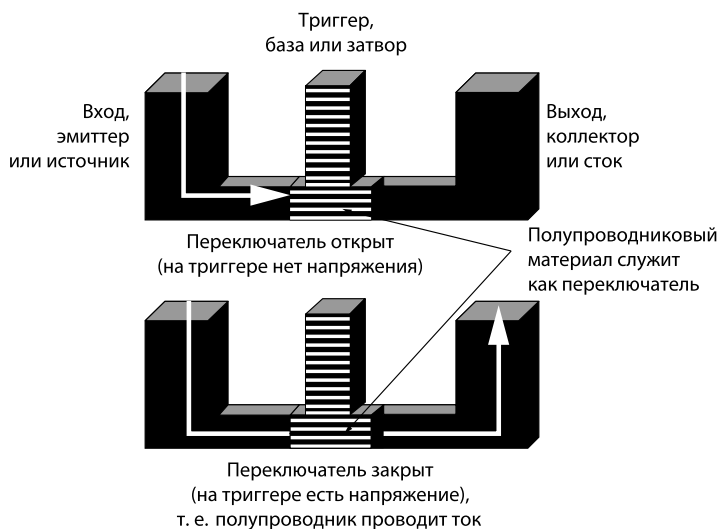


Рис. 9.3. Комбинацию полупроводниковых материалов в транзисторе можно использовать для включения/отключения электрического тока



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Действительно, любой ток между базой и эмиттером значительно снижает сопротивление участка между эмиттером и коллектором.

p-n-p-транзистор устроен аналогично *n-p-n*-транзистору, но в нем полупроводник *n*-типа находится между двумя полупроводниками *p*-типа.

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

Вслед за плоскостным транзистором был создан полевой транзистор. Поскольку для его работы требуется входной сигнал с гораздо меньшей энергией, он обладает несомненным преимуществом. В полевом транзисторе канал-полупроводник *n*-типа находится между двумя небольшими полупроводниками *p*-типа.

Концы канала *n*-типа называются *источником* и *стоком*, а концы областей *p*-типа — *затворами*. На затворы подается напряжение (обратное напряжение), которое препятствует протеканию тока по границам между полупроводниками *p*-типа и *n*-типа. Таким образом, с помощью обратного напряжения можно контролировать протекание тока по каналу. Полевой транзистор с каналом-полупроводником *p*-типа работает аналогично, но обратное напряжение в нем имеет противоположный знак.

НАНОТРАНЗИСТОРЫ

Ученые из Университета штата Иллинойс в Шампэйн-Урбане (США) создали биполярный транзистор, который способен работать с частотой 600 ГГц. Они предполагают в скором будущем создать транзистор, который сможет преодолеть терагерцовый барьер и стать основой для высокоскоростных вычислений. Имея меньший размер, терагерцовый микропроцессор будет содержать в 25 раз больше транзисторов, работать в 25 раз быстрее и потреблять меньше энергии, чем чип Pentium 4. Компания Intel планирует создать такой чип на основе нанотранзисторов.

Полевой транзистор на основе фосфида индия и арсенида галлия содержит коллектор, базу и эмиттер. Именно на таком транзисторе ученым удалось получить частоту 604 ГГц и славу создателей самого быстрого транзистора в мире.

Работающие на высоких скоростях транзисторы переносят ток высокой плотности и сильно перегреваются, при этом происходит плавление их отдельных компонентов. В новых композитных биполярных транзисторах поддерживается более низкая плотность тока. С помощью новых материалов ученые и инженеры стремятся по-



высить вероятность успешного создания терагерцового транзистора уже в недалеком будущем. Более быстрые транзисторы позволят создавать более быстрые микропроцессоры, а значит более мощные компьютеры и эффективные электронные системы для связи, промышленности и армии.

ДОСТИЖЕНИЯ КОМПАНИИ INTEL

Итак, как все эти достижения связаны с нанотехнологиями? За последние 35 лет специалисты компании Intel научились создавать все более миниатюрные чипы и их компоненты. В настоящее время отдельные компоненты этих чипов уже вышли за пределы нанометрового диапазона, то есть стали меньше 100 нм. Действительно, когда создавалась эта книга, ученые и инженеры компании Intel планировали перейти рубеж в 20 нм¹. Это достижение позволит компании Intel стать самой крупной нанотехнологической компанией в мире.

35 лет назад память на основе кремния стоила почти в 100 раз дороже, чем память на основе магнитных сердечников. Основателям Intel удалось создать первый микропроцессор Intel 4004, содержащий 2300 транзисторов на площади, которая меньше ногтя. Этот процессор стоил около 100 долл. США и обрабатывал порядка 60 тыс. инструкций в секунду. Сравните: чтобы достичь производительности среднего современного компьютера, потребовалось бы около 250 тыс. таких микропроцессоров! Ничто так не способствует прогрессу, как коммерческий успех. Специалистам компании Intel каждый год удавалось и удастся сейчас создавать все более мощные и миниатюрные микропроцессоры.

Электронная гонка

Специалисты прогнозируют, что полупроводниковая индустрия с современными стандартными технологиями достигнет физического предела миниатюризации электронных компонентов к 2010–2016 гг. После этого инженерам не удастся далее сокращать размеры элементов кремниевых микропроцессоров.

С приближением этого времени компании-производители микропроцессоров хотели бы сохранить свое лидирующее положение на рынке. Будущий успех они связывают с нанотехнологиями.

¹ На начало 2009 г. в серийном производстве этот рубеж не перейден. — *Прим. ред.*



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

В 2005 г. полупроводниковые компании получили совокупный доход около 214 млрд долл. США. Пройдет немало времени, пока нанотехнологические компании достигнут такого уровня доходов. Но чтобы удваивать вычислительную мощность компьютеров каждые полтора года, согласно закону Мура, компьютерная промышленность должна постоянно находить новые технологии, архитектуры и материалы. Нельзя сказать, что эта задача недостижима, ведь некоторые производители микропроцессоров уже преодолели рубеж в 90 нм. Фактически в своей работе они уже используют нанотехнологии.

До второго десятилетия XXI в. производители микропроцессоров, которые инвестируют огромное количество средств в нанотехнологии, будут приобретать перспективные компании, которые смогут создавать свои нанотехнологии, а также интегрировать уже имеющиеся методы и материалы.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДНК

Молекулы ДНК, содержащие наш генетический код, вполне могут стать основой компьютеров будущего. *ДНК-чипы*, которые также называют *биочипами*, или *микромассивами (microarrays)*, являются частью биологических технологий в генетических исследованиях. ДНК-чипы состоят из молекул ДНК, которые располагаются на жесткой подложке (например, из кремния, стекла, пластика и т. п.). Технология ДНК-чипов может сыграть важную роль в реализации нанопроизводства.

С помощью ДНК-чипов ученые могут производить одновременно тысячи анализов. Дело в том, что на подложке располагается огромное количество отдельных кусочков ДНК. Неизвестный образец прилипает к соответствующему кусочку. ДНК-чипы содержат от 100 до 100 тыс. таких кусочков ДНК, или *пикселей* ДНК-чипа. В зависимости от типа ДНК-чипа размеры одного кусочка могут варьироваться в диапазоне от 10 до 100 мкм. В каждом таком кусочке может быть от 10^6 до 10^9 нуклеотидов.

Созданием ДНК-чипов занимаются некоторые крупные компании, включая Affymetrix, PE Applied Systems, HySeq, Nanogen, Incyte, Molecular Dynamics и Geometrix¹. Современные ДНК-чипы применяются при проведении генетических исследований, изучении

¹ В России такие чипы находятся лишь на стадии научных исследований. — *Прим. ред.*



новых медикаментов, а также в фармацевтической генетике, судебной медицине, при диагностике рака и других заболеваний.

Электрически активные ДНК-чипы (производства компании Nanogen), которые генерируют контролируемые электрические поля в каждом пикселе, могут иметь потенциально перспективные приложения для нанопроизводства. Такие микроэлектронные устройства переносят заряженные молекулы (например, ДНК, РНК, белки и ферменты), наноструктуры, клетки и структуры микронного масштаба к любому месту на поверхности устройства.

В вычислительных устройствах на основе ДНК электрические поля используются для регулирования процессов самосборки в заданных пикселях ДНК-чипа. Они также играют роль «материнских плат» для сборки молекул ДНК в сложные трехмерные структуры. Молекулы ДНК сами по себе обладают программируемыми и самоорганизующими свойствами, поэтому их можно настроить для выполнения функций молекулярной электроники и фотоники.

Молекулы ДНК можно присоединять к более крупным структурам (например, металлическим и органическим частицам, нанотрубкам, микроструктурам и кремниевым поверхностям). В будущем микроэлектронные массивы и ДНК-компоненты могут позволить ученым и инженерам регулировать самосборку двумерных и трехмерных электронных цепей и устройств внутри более крупных полупроводниковых структур. В этом случае электрически управляемая самосборка ДНК может охватить широкий круг потенциальных применений.

Например, исследователи из Израиля уже связали транзисторы с нитями ДНК. Группа физиков под руководством Эреза Брауна (Erez Braun) из Израильского технологического института Технион разработала двухэтапный процесс такой связи. Во-первых, они использовали белки, которые способны связать углеродные нанотрубки с особыми местами нити ДНК. Затем им понадобилось превратить остальную часть молекулы ДНК в электропроводящую проволоку. Поскольку ДНК не проводит электричество, было необходимо присоединить металлический проводник к нити ДНК. Для этого молекулу ДНК покрыли белками бактерии *E. coli*. Затем углеродные нанотрубки (покрытые антителами) прикрепили к белку, а потом поместили в раствор, где ионы серебра стали связываться с фосфатными группами ДНК, но только в местах, где не было белков *E. coli*. Альдегид (углерод с присоединенной группой с электрическим зарядом) превратил ионы серебра в атомы, которые образовали основу проводящей проволоки.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Затем устройство покрыли золотом для создания полностью проводящей проволоки. Таким образом, углеродная нанотрубка обоими концами была соединена с золотой и серебряной проволокой и функционировала как транзистор при приложении переменного напряжения. В зависимости от приложенного напряжения нанотрубки либо замыкали щель между проволоками (и цепь в целом), либо размыкали ее. Так с помощью биологического процесса ученые научились соединять оба устройства.

Аналогичный метод можно применить для создания самособирающихся на основе ДНК структур и цепей. Хотя это всего лишь один крошечный наноскачок к молекулярным вычислительным устройствам, самособирающимся на основе ДНК, но есть надежда, что в ближайшем будущем таким образом можно будет создавать крупные самособирающиеся электронные устройства (например компьютеры). Опирируя на атомарном уровне, ученые и инженеры смогут организовать передачу и обработку информации в малых молекулярных устройствах.

Главная надежда

Создатели микропроцессоров в поиске новых материалов для будущих интегральных микросхем обратили пристальное внимание на однослойные углеродные нанотрубки. Однако оказалось, что с ними чрезвычайно трудно работать.

Они имеют диаметр от 1 до 5 нм (то есть почти в 50 тыс. раз тоньше человеческого волоса), но в 100 раз прочнее, в 6 раз легче и на 20% эластичнее стали. Не материал, а мечта инженера! Однослойные нанотрубки также обладают огромной теплоемкостью и могут вдвое быстрее переносить электрические заряды, чем цепи на основе кремния. Эти преимущества вдохновляют ученых на создание более миниатюрных, быстрых и менее нагревающихся чипов. Предполагается, что на основе углеродных нанотрубок можно будет создать даже трехмерные интегральные микросхемы, в которых транзисторы будут располагаться не только бок о бок, но и один над другим, что невозможно в схемах на основе кремния.

Единообразие

Казалось бы, все «помешались» на углеродных нанотрубках, однако многие компании стремятся упорядочить и структурировать данные о новых материалах. Ассоциация полупроводниковой про-



мышленности (Semiconductor Industry Association — SIA), в которую входят основные производители микропроцессоров, совместно с правительственными органами США разработала программу оценки возможностей новых нанотехнологических процессов и финансирования исследований правительственными и частными организациями.

SIA сфокусируется на двух-трех новых нанотехнологических областях, чтобы максимально сконцентрировать в них средства и ресурсы. Ученые и инженеры смогут проводить свои исследования более организованно и координированно.

До 2005 г. ученые не знали, как можно производить нанотрубки в промышленном масштабе. Дело в том, что после выращивания получаются нанотрубки разного диаметра и длины, а также со свойствами проводников и полупроводников. Действительно, миллионы углеродных нанотрубок выглядят как обычное пятнышко сажи. Для извлечения нанотрубок заданного типа и размера нужно изрядно потрудиться.

Группе ученых из компании DuPont и Университета Райс (США) удалось разделить нанотрубки с помощью специальных добавок, которые не дают нанотрубкам слипаться. Лауреат Нобелевской премии Ричард Смолли описал эту ситуацию так: «Представьте себе, что нанотрубки — это спагетти, а мы лишь изобрели масло».

В 2005 г. проблема получения однообразных трубок стала менее актуальной. Ученые из компании Southwest Nanotechnologies (США) предложили способ выращивания нанотрубок постоянного диаметра, а их коллеги из Университета Дюк и Национальной лаборатории в Лос-Аламос (США) вырастили самые длинные нанотрубки — длиной около 4 см. Благодаря их усилиям теперь можно получать нужное количество нанотрубок одинакового размера, а значит, упрощается их применение.

НАНОПРОВОДА

Методы очистки, распутывания, выпрямления и сортировки нанотрубок гораздо сложнее, чем методы выращивания кремниевых кристаллов. А создание электрических цепей на их основе — это огромная техническая проблема, которую сейчас решают ученые и инженеры.



Нанопровод — это проволока диаметром всего несколько нанометров (то есть около 10^{-9} м). На таком масштабном уровне важную роль играют законы квантовой механики, а потому подобные провода называют **квантовыми проводами**.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Гораздо проще работать с кремниевыми *нанопроводами* (*наностержнями*, или *квантовыми проводами*), которые являются следующим этапом развития кремниевой электроники. Как и нанотрубки, нанопровода могут образовывать сложные конфигурации из сверхмалых транзисторов, но они не обладают сверхвысокой прочностью нанотрубок.

Нанопровода могут образовывать сложные системы с другими материалами. Кремниевые нанопровода научились делать благодаря огромным успехам современных электронных технологий. Дело в том, что ученые и инженеры могут контролировать их структуру и свойства так же, как делали это на протяжении многих лет.

Однако кремний — не единственный материал, пригодный для создания нанопроводов. Для разных целей могут применяться металлические или многослойные нанопровода из золота, меди или марганца.

Нанопровода диаметром 12 нм можно использовать для оптических и электромагнитных систем, включая сенсоры и солнечные батареи.

На рисунке 9.4 перечислены материалы, из которых можно изготавливать нанопровода.





ПОДВЕШЕННЫЕ НАНОПРОВОДА

Нанопровода создают в лабораториях с помощью *подвешивания* или *напыления*. Обычный провод подвешивают в вакуумной камере и уменьшают его толщину либо с помощью травления, либо обстреливая его высокоэнергетичными частицами, либо вытягивая его из расплава (приблизительно так, как вытягивают вилкой очень тонкие волокна из расплавленного сыра моцарелла).

НАПЫЛЕННЫЕ НАНОПРОВОДА

Напыленные нанопровода образуются на подложке из другого материала, например, в виде ряда атомов металла на непроводящей поверхности. Это обычно достигается с помощью лазерной абляции («стирания») атомов источника нанопроводов в состоянии типа пар—жидкость—твердое тело.

Сначала источник подвергается воздействию катализатора (например нанокластеров золота). Атомы источника просачиваются в катализатор и насыщают его. В момент перенасыщения они переходят в твердое состояние и начинают расти в виде кристалла нанопровода. Длина такого нанопровода регулируется с помощью подачи атомов источника. Таким способом можно получать не только отдельные нанопровода из одного материала, но и сверхрешетки из перемежающихся материалов за счет включения разных источников во время напыления. Именно так получают нанопровода для полупроводниковых компонентов электрических схем.

Для создания компонентов электрических схем на основе нанопроводов отдельные нанопровода легируют (то есть добавляют примеси других химических веществ), чтобы получить полупроводники *n*-типа или *p*-типа. Затем простой переход *p-n*-типа фиксируют посредством простого физического соединения провода *p*-типа с проводом *n*-типа или при помощи химического легирования различными примесями. Например, переход *p-n*-типа можно получить с помощью всего одного провода. После создания переходов приступают к созданию логических затворов на основе нескольких переходов *p-n*-типа.

Несомненно, полупроводящие и проводящие нанопровода будут иметь огромное значение для будущих компьютеров, поскольку задействуют многочисленные преимущества нанотехнологий.

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ НАНОПРОВОДОВ

Благодаря своим сверхмалым размерам нанопровода имеют уникальные электрические свойства. В отличие от углеродных нанотру-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

бок, в которых электроны свободно перемещаются между контактами, проводимость нанопроводов очень сильно зависит от *краевых эффектов*, возникающих, поскольку атомы на поверхности и внутри нанопровода по-разному связаны с соседними атомами. Частично связанные атомы на поверхности могут инициировать появление дефектов в нанопроводе, которые снизят электрическую проводимость нанопроводов. Чем меньше нанопровод, тем больше в нем поверхностных атомов, и тем сильнее краевые эффекты.

Квантовые эффекты в наномасштабной электронике

Необходимость создания сложной электроники и электрических компонентов на молекулярном уровне способствовала быстрому появлению и развитию новых наномасштабных методов. На этом уровне огромное значение имеют точные измерения. Кинетические и квантовые эффекты существенно меняют электрические и тепловые свойства материалов и устройств.

Проводящие наноструктуры могут применяться для наномасштабных измерений. Некоторые лаборатории уже активно используют движение отдельных электронов в качестве стандартных измерительных инструментов электрического тока и емкости. Кроме того, ученые успешно измеряют свойства атомарных проводов и других электромагнитных наноструктур.

Будущие наноструктуры, вероятно, будут использоваться в чрезвычайно широком спектре — от квантовых вычислений до сенсоров отдельных частиц и атомарных взаимодействий. Квантовые эффекты очень слабы с точки зрения макромасштаба, а потому для их измерения требуются более точные инструменты.

Некоторые микроскопические системы, несмотря на свой гораздо больший размер по сравнению с наносистемами, демонстрируют свойства, присущие последним. Чаще всего такие наносвойства возникают при создании материалов и их взаимодействиях. Например, наносвойства проявляются при создании биочипов для секвенирования генов и других биологических приложений. Обычно стенки макроскопических сосудов слабо влияют на течение в них жидкости. Однако в микроскопических и наноскопических сосудах это влияние становится огромным и может привести к непредсказуемым результатам.

Благодаря развитию наноэлектроники был сделан огромный прорыв — изобретение оптических переключателей в оптоволоконных сетях. Световые волны (с длиной волны в несколько сотен наноме-



тров) способны переносить гигабайты данных, но этот поток уменьшается, когда наступает этап их обработки с помощью электронов. Поскольку электронные коммутаторы стоят очень дорого, у разработчиков оптических коммутаторов имеется огромный экономический стимул. Оптические коммутаторы могут иметь вид массива или кольца из линз и зеркал (рис. 9.5), преобразующих и расщепляющих поток фотонов, которые переносят данные.

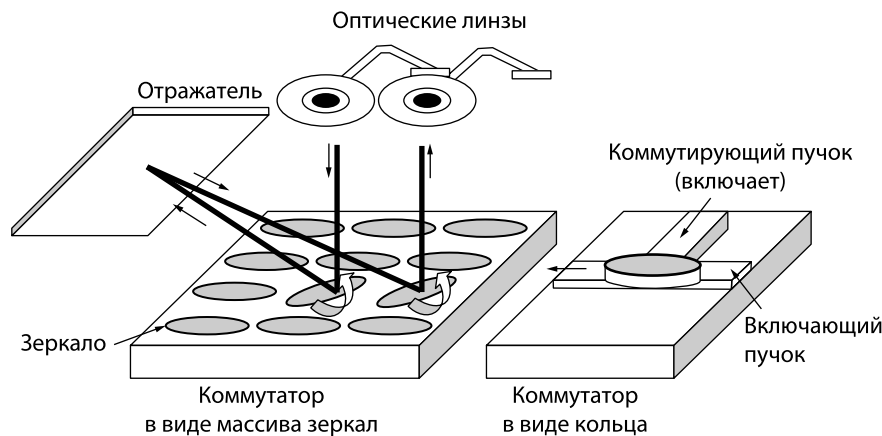


Рис. 9.5. Примеры оптических коммутаторов

Биологические наносенсоры

Как уже обсуждалось в главе 5, биологические сенсоры — очень важные инструменты для идентификации токсичных химикатов, которые в малых концентрациях могут находиться в промышленных продуктах, химических соединениях и окружающей среде (вода, воздух, почва), а также для обнаружения опасных биологических систем (например, бактерий, вирусов и т. п.).

Экстремальная специфичность биологических зондов, а также сверхчувствительность оптических детекторов на основе лазеров позволяет биологическим сенсорам обнаруживать и различать химические компоненты сложных систем. Благодаря их тонко настроенной схеме можно четко определять и точно измерять исследуемые образцы.

Новая группа биологических наносенсоров с использованием антител и ДНК-зондов расширяет арсенал уже имеющихся биологических сенсоров. Например, для идентификации канцерогенов уже



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

применяются *флюороиммуносенсоры* (*fluoroimmunosensors* — *FIS*) на основе антител. Антитела располагают в конце оптоволоконного зонда или сенсора (внутри *FIS*) для анализа в режиме *in vivo* или *in vitro*. Экстремальная чувствительность достигается с помощью лазерного излучения с более высокой энергией и управляемых оптических сигналов.

FIS по волокну посылает в образец сигнал увеличенной энергии и собирает флуоресцентное излучение, испускаемое белком на конце зонда. Зонд после лазерного облучения возбуждает образец, связанный с антителами на кончике оптоволоконного зонда. С помощью этого метода можно выполнять быстрые и простые измерения химических и биологических агентов с гораздо большей чувствительностью.

Биологические чипы

Биологические процессы, например дифференциация клеток, деление клеток, фагоцитоз (то есть пожирание чужеродных частиц) и некроз (смерть клеток), связаны с перемещениями компонентов клеток. Для изучения этих важных процессов сейчас разрабатываются новые методы. Молекулярное маркирование с помощью химических и биологических методов позволяет точно отслеживать отдельные молекулы в процессе флуоресцентной микроскопии.

С помощью новых нанотехнологий и наноматериалов можно будет обнаруживать атомы и молекулы, а также манипулировать ими на клеточном уровне в медицинских целях. Тот факт, что биологические сенсоры имеют наномасштабные размеры, означает возможность чрезвычайно высокой степени локализации измерений в самых крохотных местах внутри клетки. Развитие биологических наносенсоров и внутриклеточные измерения в режиме *in situ* с помощью нанозондов на основе антител — это большое достижение современной науки и техники.

При помощи биологических наносенсоров ученые могут тестировать отдельные молекулы и передаваемые между ними сигналы в специфических местах внутри клетки. Расположение биологического наносенсора внутри клетки не влияет на клеточную мембрану или всю внутриклеточную деятельность. Это чрезвычайно приятная новость для медиков, которые всегда мечтали о такой возможности. Способность отслеживать процессы в режиме *in vivo* внутри живых клеток позволит существенно улучшить наше понимание клеточных



функций. Только одно это достижение нанотехнологий даст возможность полностью преобразовать клеточную биологию.

В настоящее время пристальное внимание уделяется исследованию биологических сенсоров с ДНК-зондами (биочипами). Как уже упоминалось в главе 5, распознавание белков основано на чрезвычайно точном соответствии участка ДНК с комплементарной (то есть дополняющей) последовательностью нуклеотидов. ДНК-зонды могут принести пользу там, где возможно использовать это свойство нуклеиновых кислот. Биологические сенсоры такого типа могут помочь в диагностике генетической восприимчивости к некоторым заболеваниям, например наследственной гемофилии.

Сенсоры глюкозы, вероятно, являются самыми распространенными биологическими сенсорами. Тысячи страдающих от диабета людей во всем мире нуждаются в них для определения уровня глюкозы в крови в течение всего дня. Принцип действия сенсора основан на использовании фермента (глюкозооксидазы), который ускоряет реакцию глюкозы и кислорода с образованием глюконовой кислоты и перекиси водорода. Сенсор может определять уровень глюкозооксидазы и вызванные им изменения электрического тока.

Биологические наносенсоры позволяют исследователям использовать и тестировать биологические молекулы. Медики хотели бы создать такие наноинструменты, которые помогут анализировать клеточные процессы, выполняемые отдельными биологическими молекулами или клетками. Одни специалисты называют подобные исследования *клеточной инженерией*, а другие — здравоохранением будущего.

Достижения микро- и нанoeлектроники позволят создать более миниатюрные, быстрые, точные и дешевые наноинструменты уже в ближайшем будущем (а некоторые уже созданы). В нашем компьютеризованном обществе все отрасли промышленности ощутят эти преимущества и извлекут из них пользу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что регулирует ток/напряжение и действует как переключатель или вентиль для электронных сигналов:
 - (а) шлюз;
 - (б) транзистор;
 - (в) задвижка;
 - (г) счетчик.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

2. Кремний, арсенид галлия и германий используются для создания:
 - (а) удобрений;
 - (б) пластмассы;
 - (в) ингаляторов;
 - (г) полупроводниковых материалов.
3. Поведение вещества на атомарном и ядерном уровне описывается:
 - (а) квантовой механикой;
 - (б) делением ядра;
 - (в) геофизической тектоникой;
 - (г) физикой Эдварда.
4. Применение шаблонов для создания интегральных микросхем называется:
 - (а) химиотерапией;
 - (б) фотосинтезом;
 - (в) трансдукцией;
 - (г) литографией.
5. Проводимость нанопровода в значительной степени зависит от:
 - (а) краевых эффектов;
 - (б) состояния рынка;
 - (в) солнечных вспышек;
 - (г) стоимости материалов.
6. Полупроводники n -типа характеризуются:
 - (а) излишком кварков;
 - (б) избытком электронов;
 - (в) нейтрализацией всех зарядов;
 - (г) дефицитом электронов.
7. С помощью ультрафиолетового излучения со сверхкороткой длиной волны в скором будущем станет возможным создавать транзисторы на кремневой подложке, которые будут мощнее современных:
 - (а) в 10 раз;
 - (б) в 25 раз;
 - (в) в 50 раз;
 - (г) в 100 раз.

ГЛАВА 9 Электроника и сенсоры



8. Удвоение плотности компонентов микропроцессоров каждые полтора года называется:
 - (а) теорией Кулиновского;
 - (б) предположением Пауля;
 - (в) законом Мура;
 - (г) гипотезой Бардина.
9. Добавление примесей в полупроводниковые материалы называется:
 - (а) обзором;
 - (б) пластификацией;
 - (в) легированием;
 - (г) маскированием.
10. Флюороиммуносенсоры на основе антител применяются для идентификации:
 - (а) москитов;
 - (б) канцерогенов;
 - (в) уровня глюкозы;
 - (г) ядерных отходов.

Глава 10

Коммуникации

Бурный рост коммуникационных технологий в последние 40 лет уже стали называть «информационным веком». С каждым годом упрощается способ общения с друзьями, родственниками и коллегами. Развитие Интернета дало возможность людям мгновенно получать доступ к удаленной информации и обмениваться ею. Раньше об этом приходилось только мечтать, а теперь это можно осуществить одним щелчком мыши!

Методы доступа к информации и ее передачи могут совершить новый невероятный скачок с помощью наноматериалов и наноустройств. Как уже было сказано в главе 9, компоненты компьютеров могут создаваться на наномасштабном уровне как «сверху вниз», так и «снизу вверх». Эти методы также используются для разработки компонентов коммуникационных устройств, например мобильных телефонов и радарных систем.

Действительно, многие свойства наночастиц, которые имеют огромное значение для производства компьютеров и сенсоров, могут иметь такое же значение и для коммуникаций. Есть возможность применять некоторые наносистемы, например квантовые точки, во всех этих отраслях. Передача сигналов играет важнейшую роль в коммуникациях, и ее важность будет только возрастать по мере использования свойств новых материалов.

Ученые активно изучают способы вычисления с помощью изменения свойств отдельной молекулы или группы молекул. Создание функционального элемента на основе молекулы, когда некоторое ее свойство нужно связать с выполнением арифметического или логического действия, является большой и сложной задачей для специалистов молекулярной электроники.

Молекулярная электроника охватывает множество концептуальных, экспериментальных и модельных аспектов. При поиске ответов на вопросы нужно учитывать расположение и взаимодействие



молекул, химические свойства, методы наносборки и nanoупаковки. Архитектура молекул связана со сложными задачами определения их взаимодействия и роли: переключателя, транзистора или более сложного устройства, например логического или арифметического элемента. Если какое-то электронное устройство (скажем, транзистор) удастся уменьшить до величины молекулы, будет совершен переход от микро- к наноэлектронике.

Известно, что в одной молекуле сосредоточено достаточно «квантовых ресурсов» для интеграции нескольких функций. Чтобы воплотить эти идеи на практике, ученые стремятся подобрать подходящие молекулы, установить параметры их работы и оптимальную архитектуру.

Квантовые коммуникации

Как уже упоминалось в главе 9, для создания новых коммуникационных систем ученые пытаются использовать *квантовое запутывание*. Оказывается, что на основе одного высокоэнергетичного фотона можно получить два фотона с меньшей энергией, которые будут квантово запутанными.



Квантовое запутывание возникает, когда разные фотоны не удается описать отдельно, поскольку измерение характеристик одного из них оказывает влияние на другой.

Поведение таких квантово запутанных фотонов является связанным, и именно эта особенность лежит в основе квантового принципа передачи информации между двумя удаленными местами, то есть в основе *квантовой телепортации*. Потрясающие усовершенствования экспериментальных методов и инструментов позволяют ученым выполнять квантовые эксперименты с удивительными результатами для науки, промышленности и бизнеса.

Потенциал квантового запутывания начал оцениваться по достоинству только недавно, поскольку раньше его просто не удавалось наблюдать, анализировать и использовать. На самом деле квантовое запутывание может стать основой безопасной (квантовой) криптографии, вычислительных алгоритмов и квантовой телепортации.

Измерения квантовых систем позволят отправлять секретную информацию с помощью сигнального пучка, а адресат сможет расшифровать ее с помощью другого квантово запутанного приемного пучка.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Такая передача абсолютно неуязвима для перехвата, поскольку расшифровать ее смогут только обладатели передаваемого и принимаемого пучка. Злоумышленник не имеет приемного пучка и не сможет расшифровать передаваемую информацию. А если он даже попытается это сделать, то получатель легко об этом догадается, поскольку любое вмешательство изменит сигнальный пучок.

Этот невероятно быстрый способ передачи информации и чрезвычайно высокая степень миниатюризации компьютерных компонентов достигли точки, в которой для описания базовых вычислений ученым неизбежно приходится использовать законы квантовой механики. На наномасштабном уровне необходимо переписать даже теоретические основы компьютерных вычислений.

СПИН

Квантовые компьютеры способны обрабатывать и сохранять огромные объемы информации, что не под силу обычным современным компьютерам. Дело в том, что квантовые компьютеры способны обрабатывать данные в параллельном режиме. Современные компьютеры содержат последовательно работающие микропроцессоры и вынуждены последовательно (одну инструкцию за другой) обрабатывать все операции компьютерного моделирования, шифрования или передачи данных. Квантовые вычисления благодаря параллельности могут выполняться в миллионы и даже миллиарды раз быстрее, чем вычисления в современных последовательных суперкомпьютерах.

Исследователи квантовых вычислений вторгаются в совершенно новую область квантовомеханических законов. Становится возможным решение таких вычислительных задач, которые раньше считались практически неразрешимыми, например расшифровка «сверхсложных» шифров, генерация истинно случайных чисел и абсолютно защищенных коммуникаций на основе квантового запутывания.

В квантовых вычислениях используются квантовые свойства, например *спин* электрона. Спин — это чрезвычайно загадочная характеристика элементарной частицы, которая может принимать значения $-1/2$ или $1/2$. С точки зрения компьютерных вычислений, эти значения могут соответствовать 0 и 1, то есть допустимым значениям бита — элемента компьютерной информации. Таким образом, спин электрона может стать основой единицы информации, для которой в квантовых вычислениях принято использовать термин *кубит* (*qubit*).



Методы сохранения и передачи информации на основе спина электрона чрезвычайно сложны, поскольку значение спина неизвестно до его измерения.

Как уже упоминалось в главе 8, спин электрона взаимодействует со светом, и характер взаимодействия зависит от длины волны света и его поляризации. Изумительный факт, что спин электрона неизвестен до его измерения, можно использовать для выполнения двух операций одновременно для состояний 0 и 1. Более того, кубиты можно связать вместе так, чтобы изменение состояния одного приводило к цепной реакции, как в последовательности падающих костяшек домино.

В простейшем случае два кубита могут иметь четыре различные конфигурации: (00), (01), (10) и (11). Математические операции с кубитами можно использовать для операций сразу с четырьмя разными состояниями. Это свойство снова возвращает нас к теме квантового запутывания.

Подобные манипуляции с кубитами и спинами не только ускоряют компьютеры и коммуникации, но и делают возможными вычисления, которые ранее казались практически невозможными, поскольку требовали миллиардов лет работы самых мощных компьютеров. Благодаря квантовым вычислениям можно будет добиться фантастических успехов в работе с базами данных и обеспечении безопасности зашифрованных данных.

Следует иметь в виду, что квантово запутанные электроны и их свойства очень уязвимы. Любое взаимодействие с окружающей средой (например, попадание фотона или тряска) могут нарушить их запутанность, и это явление называется *декогеренцией*. При наличии декогеренции в квантовых вычислениях возникает ошибка.

Недавно исследователи начали изучать методы исправления подобных квантовых ошибок, и их некоторые варианты уже предложены учеными компании Bell, Оксфордского университета (Великобритания), Университета Торонто (Канада), Национальной лаборатории Лос-Аламос (США) и Принстонского университета (США). Основной задачей является сохранение квантовой системы в когерентном состоянии, то есть ее следует изолировать от взаимодействия с окружающей средой. Сложность задачи создания квантового компьютера заключается в обеспечении сильного внутреннего взаимодействия и исключении внешнего воздействия.

Для стабилизации кубитов необходимо выполнить еще очень много масштабных исследований. В настоящее время декогеренция



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

возникает после выполнения около 1000 операций. Для передачи данных это неприемлемо высокая частота ошибок, однако использование новых наноматериалов и наносистем (например, квантовых точек, описанных в главе 8) поможет решить эту задачу.

Атомарное позиционирование

Для передачи и обработки данных с помощью молекул необходимо достичь высокой точности размещения и сборки атомов, молекул и нанопроводов, то есть точнее, чем 0,1 нм.

Для тонкой настройки и стандартизации сборочных спецификаций на наномасштабном уровне и связи с макроскопическим уровнем необходимо разработать и утвердить пошаговые методы и инструкции. Для достижения этой цели нужно добиться высокой точности движений. Действительно, *атомарное позиционирование* является совершенно новой и очень бурно развивающейся областью исследований. Эта область охватывает методы передачи данных от молекулы, расположенной на металлической поверхности, к молекуле на полупроводящей поверхности с последующей передачей более крупному внешнему контакту. Специалисты многих областей науки (физика, химия, механика и материаловедение) тесно сотрудничают для решения подобных задач компьютерной молекулярной инженерии.

Создание молекулярной электрической или логической схемы — большая проблема не только для наномасштабных коммуникаций, но и для наномасштабной химии. Ученым необходимо подобрать молекулы, которые были бы надежными элементами схемы, но не стали бы источником помех для выполнения квантовых вычислений.

Например, исследования молекулярной схемы с помощью сканирующего туннельного микроскопа могут оказать разрушительное влияние на саму схему. Для обеспечения структурной стабильности молекулярной схемы химикам нужно найти химические соединения, которые обеспечивали бы надежное взаимодействие между молекулярными компонентами схемы. В настоящее время на эту роль претендуют концевые группы типа тиолов, то есть органические соединения, содержащие серу. Этот процесс нельзя назвать чрезвычайно простым, а потому ученые стремятся найти более эффективные методы.

Сборка молекулярных схем с наномасштабной точностью находится на начальном этапе своего развития. Ученые надеются, что в конечном итоге удастся обнаружить методы самосборки элемен-



тарных структур и их соединений. Только после этого полученные объекты можно будет применять на практике и перенести из лабораторий в промышленность.

Грядущий «нанотехнологический век» дает нам возможность исследовать новые свойства материалов на наномасштабном уровне и использовать их в более крупных продуктах. Связанные с ними инструменты помогут контролировать атомарные и электронные структуры, характеризовать наномасштабные материалы, структуры и свойства, а также наблюдать и анализировать процессы на нескольких масштабных уровнях — от нано до макро.

К настоящему времени химики добились значительных успехов в синтезе, анализе и моделировании наноструктурных материалов на основе полупроводников. Однако мириады комбинаций других материалов вскоре могут стать основой для создания еще большего количества наноматериалов будущего.

Влияние размеров

Как уже не раз говорилось ранее, изменение размера материала часто приводит к качественному изменению его свойств. Например, если размеры частицы становятся сравнимыми с длиной волны *фонона* (кванта колебательной энергии), в ней могут возникать новые режимы передачи тепла и электричества. Такие наблюдения были сделаны в начале 1980-х гг. при изучении обычных токов в металлических кольцах и сверхпроводящих углеродных нанотрубок. Новые свойства материалов также удалось наблюдать при облучении светом квантовых точек.

Термодинамические и электромагнитные свойства тоже существенно меняются при уменьшении размеров структуры до наномасштабного уровня. Системы с размерами от нескольких десятых нанометра до десятков нанометров находятся на неосознанной границе между квантовым и обычным миром.

В настоящее время достижения в области хранения информации стимулировали интенсивные научные исследования в области наномасштабного магнетизма. Сложные молекулы порой обладают необычными магнитными свойствами. Например, ученым компании IBM удалось усовершенствовать методы магнитно-резонансной визуализации и измерить слабый сигнал одного-единственного электрона. Этот результат имеет колоссальное значение для создания микроскопа, способного визуализировать трехмерную структуру молекул с атомарным разрешением. С помощью такого инструмента



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

можно будет с большей точностью изучать самые сложные материалы, например белки, катализаторы, молекулярные схемы и т. п. Точное определение расположения атомов в нанoeлектронных схемах упростит работу проектировщиков и создателей молекулярных схем, повысит их эффективность и производительность. Кроме того, создание схем на основе спинов, а не зарядов, откроет новый путь развития электроники (а точнее, спинтроники) на основе магнитных наноструктур.

Изменения структурной прочности, адгезионных и гидродинамических свойств наномасштабных элементов способствуют появлению новых методов проектировки и создания наноустройств. Однако работа на этом масштабном уровне связана с некоторыми неудобствами. Дело в том, что нежелательные эффекты в наномасштабе также усиливаются. Например, механическое влияние, поверхностное натяжение, диффузия и коррозия существенно возрастают (отчасти из-за более высокого отношения поверхность/объем). Даже проблемы нагрева имеют гораздо большее значение для наномасштабных устройств, чем для их более крупных аналогов.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННОГО МАСШТАБА

Свойства материалов меняются с уменьшением их размера. А что происходит с временным масштабом наноскопических процессов? Изменение масштаба длины неразрывно связано с изменением масштаба времени процессов. Всем понятно, что ужин из пяти блюд длится дольше, чем полдник из пяти печений.

С научной точки зрения, это очевидно. Для перемещения объекта на меньшее расстояние с той же скоростью (например скоростью света для фотонов) требуется меньше время. Однако не все так просто, и ученым нужно учитывать множество других эффектов, например, связанных с увеличением поверхности.

Для изучения уникальных свойств крошечных наноматериалов потребовалось создать множество совершенно новых инструментов (например атомный силовой микроскоп). Потребуется изобрести и совершенно новые инструменты для изучения быстропротекающих квантовых процессов.

Нанооптика

Нанооптика охватывает процессы взаимодействия света с частицами, размеры которых гораздо меньше, чем длина волны света. Ученым удалось обнаружить, что под воздействием света наночасти-



цы колеблются с оптической частотой и взаимодействуют как электромагнитные волны.



Плазмон — квазичастица, соответствующая квантованию плазменных колебаний, которые представляют собой коллективные колебания свободного электронного газа.

Когда свет рассеивается на атомах и молекулах, большинство фотонов упруго отражается от них. Именно это явление получило название *рамановское рассеяние* (*Raman scattering*). Рассеянные фотоны обладают той же энергией (частотой) и длиной волны, что и окружающие их фотоны.



Рамановское рассеяние — это рассеяние света в газах, жидкостях и кристаллах, сопровождающееся заметным изменением его частоты.

Однако небольшая часть света (около 1%) рассеивается с оптическими частотами, которые меньше частоты окружающих фотонов. В газах рамановское рассеяние приводит к изменению колебательной или вращательной энергии.

Эффект *усиленного поверхностного рамановского рассеяния* (УПРР) используют в золотой или серебряной подложке. Серебро и золото легко возбуждаются лазером, а результирующие электрические поля вызывают рамановское рассеяние в окружающих молекулах. Используя это явление, ученые могут анализировать и изучать химические связи внутри молекул.

КВАЗИЧАСТИЦА

В квантовой механике *возбужденное* состояние системы (например атома, молекулы или ядра) означает любое квантовое состояние, при котором энергия больше, чем в *основном* состоянии, то есть состоянии с минимально возможной энергией. Например, основным состоянием атома водорода является состояние, в котором его единственный электрон обладает минимальной энергией. После получения некоторой дополнительной энергии электрон переходит в возбужденное состояние. Если электрон получает достаточно много энергии, он может покинуть атом, и такой атом называется *ионизированным*.



Элементарное возбуждение — это возбужденное состояние, в котором квазичастица обладает самой низкой энергией.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Взаимодействие квазичастиц достаточно мало при низких температурах, но именно при этих температурах легче всего изучать их поведение и свойства, например тепловые. Действительно, многочастичные системы часто характеризуются двумя типами элементарных возбуждений: изменением движения квазичастиц из-за взаимодействия с другими объектами и комбинированным движением всей системы. Такие возбуждения называются *коллективными модами* и включают *плазмоны*.

Плазмоны играют важную роль в оптических свойствах металлов. Влияние плазмонов на оптические свойства было обнаружено в 1989 г., причем совершенно случайно (как это довольно часто происходит с научными открытиями). Томас Эббесен (Thomas Ebbesen), сотрудник Научно-исследовательского института компании NEC в Принстоне, штат Нью-Джерси (США), проводил опыты по прохождению видимого света сквозь золотую пластину с 100 млн отверстий диаметром около 300 нм. Отверстия были уже, чем длина волны света, — около 400 нм. Представьте себе сетку, в которую бросают волейбольные мячи. Согласно квантовой теории, существует вероятность того, что $1/1000$ часть светового потока может пройти сквозь такую пластину. В примере с сеткой это значит, что один из тысячи мячей протиснется сквозь сетку. Однако в опытах Эббесена сквозь пластину прошло даже *больше, чем 100%* падающего света. С обратной стороны пластины было больше света, чем с лицевой! Ученый тщательно проверил методику эксперимента и несколько раз повторил все измерения. Однако результат оставался неизменным. Исход эксперимента был настолько необычным, что Эббесен предположил наличие какой-то неизвестной ошибки эксперимента и даже не опубликовал свои результаты.

С 1998 г. в компании NEC работает физик-теоретик Петер Вольф (Peter Wolff). Он изучил результаты необычных опытов Эббесена с наноразмерными отверстиями и светом. Поскольку Вольф уже знал, как электроны ведут себя на поверхности металлов (они образуют волнистую «рябь»), он попробовал повторить этот эксперимент. Действительно, Вольф обнаружил, что электроны ведут себя как волны, а не как частицы, и при определенных условиях можно наблюдать эффект, замеченный Эббесеном.

В настоящее время плазмоны активно исследуются, и, возможно, вскоре будут применяться для передачи компьютерной информации, поскольку передают ее гораздо быстрее электронов и могут использоваться в стандартных компьютерных чипах.



НАНОЛИНЗЫ

Группа исследователей из Технического университета Джорджии (США) и Университета Тель-Авива работает над способом фокусировки света в окрестности с диаметром всего несколько атомов и стремится достичь оптического увеличения в миллионы раз. С помощью ряда из нескольких металлических наносфер с постепенно уменьшающимися размерами и расстояниями между ними свет можно сфокусировать в очень малой области. Такие попытки напоминают привычное с детства занятие, когда пытаешься поджечь кусочек бумаги с помощью обыкновенной лупы. Метод, основанный на применении наносфер, можно использовать для обнаружения молекул и наночастиц, а также для манипулирования ими.

На рисунке 10.1 показана простая модель нанолинзы, созданная на основе трех наносфер с размерами от 50 до 5 нм. При освещении самой крупной наносферы возникают волны колеблющихся электронов (плазмоны), которые распространяются вдоль поверхности наносферы, в результате чего возникает электромагнитное поле (почти как в опытах Эббесена и Вольфа). Это поле, проходя через последовательность уменьшающихся наносфер, сгущается и сводится в точку. Таким образом, можно добиться увеличения интенсивности света почти в миллион раз.

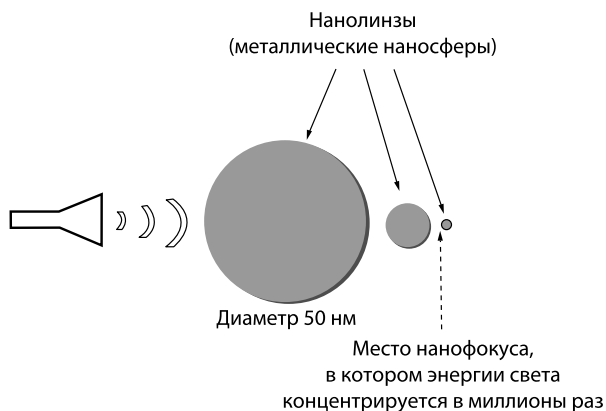


Рис. 10.1. Принцип действия нанолинзы, с помощью которой можно добиться увеличения в миллион раз

Такое увеличение несет огромные преимущества для некоторых видов спектроскопии. Поверхностные плазмоны можно фокусиро-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

вать в устройстве, подобном лазеру, которое называется *спазером* (от англ. *spaser — surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation*, усиление стимулированного излучения поверхностными плазмонами). В работе спазера принимают участие металлические наночастицы и активная среда с полупроводниковыми квантовыми точками.

Вспомните всеобщее увлечение волоконной оптикой. Нанооптика может привести к такому технологическому скачку, равного которому не было со времен появления оптоволоконных кабелей. С помощью нанооптики ученые и инженеры смогут существенно усовершенствовать методы передачи и обработки информации.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Как уже описывалось в главе 4, крупномасштабное компьютерное моделирование имеет огромное значение для понимания свойств и процессов в наномире. Дело в том, что электронные, оптические, механические и магнитные свойства наноструктур тесно связаны с их размерами, формой, топологией и химическим составом. Для полного понимания этих взаимосвязей ученым придется выполнить компьютерное моделирование множества вариантов — ведь сейчас известны свойства только простейших полупроводников и углеродных нанотрубок.

В наномире *тепловые флуктуации* сравнимы с *энергией активации* многих процессов. Статистические и компьютерные модели наносистем должны учитывать их для обеспечения высокой точности результатов моделирования. Более того, для компьютерного моделирования наномасштабных систем необходимо использовать законы квантовой механики. Компьютерное моделирование играет важную роль в описании свойств наноматериалов и проектировании наноструктур.

ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ

Технологические инновации стимулируют развитие коммуникационной отрасли (например, внедрение технологии DVD, беспроводных и широкополосных сетей), а также новых стандартов. Коммуникационные стандарты имеют большое значение для организации стабильной передачи сигналов в разных средах и между разными устройствами. В отсутствие общепринятых стандартов связь между ними была бы просто невозможной.

Попросту говоря, связь означает, что собеседники находятся «на одной волне». В быту, когда утрачено взаимопонимание между



людьми, инженеры порой образно говорят об «утраченной синхронизации». Эти слова буквально описывают особенности и проблемы работы коммуникационных устройств. Для успешного обмена сигналами большое значение имеет высокая точность измерений времени и частоты с помощью надежных инструментов.

Стандарты задают четкие ориентиры для дальнейшего прогресса нанотехнологий и их влияния на коммуникации: радио, телевидение, Интернет, навигацию, исследования космоса и т. д. Для успешного взаимодействия стандарты оптоволоконной техники и телекоммуникаций должны соответствовать стандартам, разработанным для новых нанотехнологий и наносистем.

СЕТИ

Электронная коммерция, здравоохранение, образование, наука и развлечения зависят от глобальных компьютерных сетей. Для создания компьютерных сетей на основе нанотехнологий ученым и инженерам потребуются разработать новые сетевые протоколы и методы проверки систем и компонентов. Для использования квантовых масштабов и скоростей в новых сетях, мультимедиаприложениях и беспроводных сетях будут нужны усовершенствованные стандарты.

БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Совсем недавно беспроводные технологии стали «последним писком» высокотехнологичной моды. Эволюция устройств для беспроводной связи быстро прошла этап пейджеров и перешла к мобильным телефонам и персональным органайзерам. Вопрос жизни и смерти, «быть или не быть», теперь означает «быть или не быть на связи». Нравится нам это или нет, такова суровая реальность современного бизнеса в частности и жизни в целом!

Крошечные электронные компоненты внутри пейджеров, мобильных телефонов и других миниатюрных коммуникационных устройств полностью изменили стиль современной жизни. Рингтон телефона теперь является неотъемлемым элементом любой среды, будь то художественный фильм, школьный концерт, совещание или служба в церкви.

Для устойчивой работы и надежной связи ключевые части коммуникационных устройств должны работать в широком диапазоне температур. Нанотехнологии продвинули индустрию беспроводных технологий благодаря развитию керамических материалов для фильтров, резонаторов и осцилляторов, а также керамических тон-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

ких пленок. В 2003 г. некоммерческая частная организация Larta Institute (США), компания Hybrid Plastics и Shea Technology Group Inc. получили премию за наиболее многообещающее применение нанотехнологий. Они создали наноструктурный гибрид (технология совместного использования неорганических и органических веществ) для создания коммуникационных устройств. Следует отметить, что Shea Technology Group Inc. уже давно активно работает в телекоммуникационной отрасли.

КОМПЬЮТЕРНАЯ И ОБЩЕСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Во многих маленьких городках США среди местных жителей не принято закрывать двери на ключ, они не беспокоят о том, что кто-то может угнать их автомобили. Если бы все мы были так счастливы и беззаботны! Урбанизация и ускорение темпов жизни несут нам новые угрозы и опасности: от спама в электронной почте до краж электронных данных.

Криминалистам и экспертам нужны мощные инструменты для расследования и раскрытия преступлений, связанных с компьютерным пиратством, нарушением авторских прав, распространением детской порнографии и т. п. Среди этих инструментов следует упомянуть системы классификации и определения отпечатков пальцев и черт лица.

Полицейским, пожарным и врачам скорой помощи необходимо иметь высокоскоростные надежные коммуникационные системы, которые помогут им быстро обмениваться жизненно важной информацией (например, оперативно сообщать о распространении пожара, урагана или проблемах, связанных с подачей электроэнергии). Критически важным коммуникационным системам нужно иметь надежные системы шифрования и обработки информации, чтобы не стать мишенью для атак злоумышленников. Благодаря последним достижениям в области квантовых коммуникаций оптические нанотехнологии вскоре смогут удовлетворить эти требования.

ПРОГРЕСС ВИДЕОТЕХНОЛОГИЙ

Говорят, что один рисунок стоит тысячи слов. Если это так, то цифровой видеодиск стоит десятков видеокассет или сотен катушек с кинопленкой. Благодаря прогрессу компьютерных технологий ученые и инженеры уже научились прокручивать высококачественные полноцветные видеоролики на карманных персональных компьютерах и огромных экранах на стадионах.



Совсем недавно, всего несколько лет назад, появились первые плоскпанельные мониторы, а теперь они уже стоят практически на каждом рабочем столе. Нанооптические технологии уже совсем скоро расширят достигнутый успех за счет использования наноразмерных колориметров и тонкой настройки с помощью наночастиц.

Хранение информации

Устройства хранения информации, как и вся компьютерная индустрия, также развиваются в сторону уменьшения масштаба вплоть до наноуровня. Теперь на основе элементов, которые в 10 тыс. раз тоньше волоса, ученые и инженеры могут создавать не только быстрые компьютерные чипы, но и более емкие устройства хранения информации. Однако чем меньше наномасштабные компоненты, тем дороже их производство.

Большинство производителей электронных устройств стремятся использовать в них как можно более мелкие компоненты хранения информации. В прошлом инженерам приходилось полагаться на магнитные носители. Они стремились повысить плотность хранения информации и скорость ее считывания. В настоящее время исследователи также пытаются использовать магнитные свойства, но теперь уже наноматериалов.

В 2004 г. компания IBM объявила о создании устройства хранения информации Millipede, в которой используется массив 32×32 из 1024 зондов атомного силового микроскопа, который способен делать углубления с шагом в 50 нм на поверхности полимера (более подробно атомный силовой микроскоп описывался в главе 4). Зонды микромеханического устройства Millipede могут считывать и записывать информацию в таких углублениях. На рисунке 10.2 показана схема работы подобного устройства, в котором зонд отклоняется под действием электрического тока.

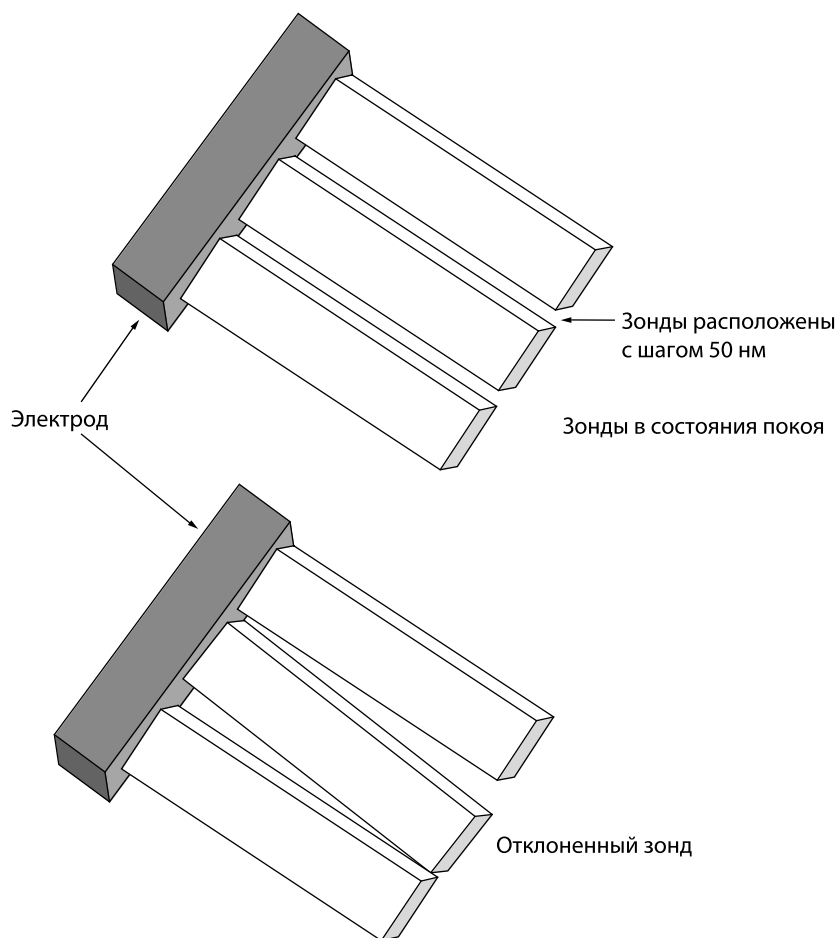
Зонды создают углубления на плоской поверхности полимера или удаляют их, расплавляя окружающую поверхность. Таким образом можно получить систему записи и хранения информации с плотностью записи около 1 терабит на один квадратный дюйм, то есть в 40 раз больше, чем позволяют современные технологии. Причем новый метод требует гораздо меньше энергии, чем прежние.

Специалисты NIST создали *пульсирующий индуктивный микроволновой магнетометр* (*pulsed inductive microwave magnetometer — PIMM*) для выполнения пикосекундных измерений при сверхбы-



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

стрых магнитных переключениях. Этот инструмент позволит изучать свойства сверхмагнитных наноматериалов для высокоскоростных записывающих головок в чрезвычайно малых областях (с площадью менее 160 нм^2 на один бит). С помощью этого нового магнетометра ученые смогут контролировать свойства новых наноматериалов в процессе их синтеза и выращивания. Это позволит создавать сверхбыструю магнитную память со скоростью считывания около 1 млрд бит в секунду, то есть записать всю Британскую энциклопедию всего за одну минуту!





КВАНТОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Квантовые вычисления и коммуникации способны совершить переворот в развитии современной электроники. Лидерами в этой области науки и техники являются компания ИВМ, Массачусетский технологический институт (США), Оксфордский университет (Великобритания), Национальная лаборатория Лос-Аламос (США). Их успехи основаны на глубоком анализе молекулярных и атомарных взаимодействий, описываемых квантовой физикой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Явление, когда разные фотоны не удается описывать отдельно, поскольку измерение одного фотона оказывает влияние на другой, называется:
 - (а) квантовым спагетти;
 - (б) квантовым запутыванием;
 - (в) фототропизмом;
 - (г) солнечными вспышками.
2. Если размеры наночастицы становятся сравнимыми с длиной волны фонона (кванта колебательной энергии), это может привести к новым режимам:
 - (а) игровых устройств;
 - (б) коллективных исследований;
 - (в) передачи тепла и электричества;
 - (г) парового движения.
3. При освещении самой крупной наносферы в нанолинзе возникают волны колеблющихся электронов (плазмоны), которые порождают:
 - (а) звуковой эффект аккордеона;
 - (б) усиленную тепловую волну;
 - (в) усиленную остроту зрения;
 - (г) электромагнитное поле.
4. Чтобы не стать мишенью для атак злоумышленников, критически важным коммуникационным системам нужно иметь:
 - (а) системы охлаждения;
 - (б) медную проводку;
 - (в) системы шифрования и обработки информации;
 - (г) системы идентификации радужной оболочки глаза.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

5. Квазичастица, которая является результатом колебаний плазмы, называется:
 - (а) небутоном;
 - (б) ксеноном;
 - (в) плазмоном;
 - (г) плазмидом.
6. Зонды микромеханического устройства Millipede могут считывать и записывать информацию в наномасштабных углублениях с помощью:
 - (а) зондов;
 - (б) осмотического давления;
 - (в) нанолинз;
 - (г) фреона.
7. Базовым элементом квантовых вычислений на основе спина электрона является:
 - (а) куб;
 - (б) кубит;
 - (в) микробит;
 - (г) нанобит.
8. На основе микромеханического устройства Millipede можно создать систему записи и хранения информации с плотностью записи, которая больше, чем позволяют современные технологии:
 - (а) в 10 раз;
 - (б) в 20 раз;
 - (в) в 30 раз;
 - (г) в 40 раз.
9. Элементарные возбуждения, которые являются носителями энергии и когерентности в нанооптике, называются:
 - (а) поверхностными плазмонами;
 - (б) подземными плазмонами;
 - (в) кварками;
 - (г) транзисторами.
10. Квантовые вычисления позволят создать компьютеры с колоссальной вычислительной мощностью благодаря их способности:
 - (а) быть чрезвычайно малыми и компактными;
 - (б) фокусировать научно-исследовательские ресурсы;
 - (в) использовать полезные ископаемые;
 - (г) выполнять операции сразу с несколькими разными состояниями.

Глава 11

Энергетика

Представьте, каким будет наш мир в 2050 г. без возобновляемых источников энергии. Практически все запасы нефти на планете будут сожжены в двигателях автомобилей. А все запасы газа израсходованы на генерацию электричества или в сжиженном состоянии использованы для перемещения автомобилей и самолетов. Человечеству придется использовать оставшиеся запасы угля с выбросом продуктов сгорания с высоким содержанием металлов и других загрязняющих веществ. Содержание углекислого газа в атмосфере превысит отметку 750 частей на миллион. Уровень воды в Мировом океане повысится так, что береговая линия сдвинется почти на 80 км вглубь континентальной части. При этом будут затоплены многие прибрежные города и густозаселенные территории. Электросети будут настолько перегружены, что перестанут надежно работать, и большинство людей смогут получать энергию всего несколько часов в неделю. Из-за невыносимой жары миллиарды вынуждены будут мигрировать.

Нищета и болезни будут расти в связи с отсутствием дешевой и экологически чистой энергии. Энергия станет элементом роскоши, доступной только богачам, которые вынуждены будут тратить большую часть своих средств на защиту от энергетически голодных орд.

Трудно себе представить, что мировые лидеры позволят осуществить такому кошмарному сценарию. Сегодня очень важно найти новые технологические решения для поиска альтернативных источников энергии еще до того, как исчерпаются ископаемые источники энергии. В этой главе представлены некоторые пути поиска решения энергетических проблем, с которыми человечество неизбежно столкнется к 2050 г.

Открытия в области нанотехнологий вызывают эффект домино практически во всех отраслях науки и техники. По мере постижения основных свойств наномира и открытия новых нанотехнологий ученые и инженеры находят новые сферы их применения. Вероятно,



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

наиболее важным будет применения нанотехнологий в энергетике. Дальнейшее процветание человечества, доступность энергии и качество окружающей среды будут во многом зависеть от успеха применения нанотехнологий.

Ричард Смолли, один из самых активных сторонников применения альтернативных технологий, убежден, что новые наноматериалы сыграют критически важную роль в удовлетворении будущих энергетических потребностей человечества. Он считает, что нанотехнологии помогут найти способ распределения энергии по всему миру, и верит, что человечество найдет и применит нужные нанотехнологии для решения всех энергетических проблем.

Новые технологии в энергетике необходимы для всеобщего благополучия человечества. После исчерпания ископаемых источников энергии человечеству придется найти экономически выгодные альтернативы, ибо в противном случае мы просто прекратим свое существование.

Энергия

Прежде чем искать решения энергетических проблем с помощью нанотехнологий, попробуем разобраться, в чем же заключаются энергетические проблемы.

С какими наибольшими проблемами столкнется человечество в ближайшие 50 лет? Достаточно большой список всех проблем имеет общий знаменатель: энергия. В таблице 11.1 перечислены 10 наиболее важных современных проблем человечества.

Таблица 11.1. Десять самых важных проблем человечества

Место	Проблема
1	Недостаток энергии
2	Загрязнение вод
3	Недостаток пищи
4	Загрязнение окружающей среды
5	Перенаселение
6	Болезни
7	Войны/терроризм
8	Бедность
9	Неграмотность
10	Истощение почв



Большая часть проблем загрязнения окружающей среды связана с используемой энергией, которая генерируется за счет сжигания ископаемых ресурсов (угля, нефти и газа), древесины или продуктов жизнедеятельности человека и домашних животных. Это сжигание приводит к возрастанию в атмосфере концентрации углекислого газа, сажи и других загрязняющих веществ, которые приводят к отравлению атмосферы и глобальному потеплению.

Бедность, почти по ее определению, означает недостаток энергии. Из 6,5 млрд людей, живущих на Земле, около 2 млрд не имеют доступа к электричеству, а еще 2 млрд вынуждены использовать ограниченное количество ископаемых видов топлива, обычно древесины и продукты жизнедеятельности домашних животных. Остальные 2 млрд используют другие доступные источники энергии (например, американцы составляют всего 5% населения Земли, но используют около 25% всей расходуемой человечеством энергии). Люди без доступа к достаточному количеству энергии вступают в конфликт с теми, у кого энергии достаточно, а это приведет к росту социальной и политической напряженности. Огромный экономический разрыв между богатыми и бедными странами и народами повлечет за собой рост напряженности в отношениях между ними.

А что с войнами и терроризмом? Приходилось ли раньше людям воевать за энергию? Первое, что приходит в голову, — это война в Персидском заливе и горящие нефтяные скважины.

Причиной множества болезней является загрязнение питьевой воды. Если бы у человечества было достаточно энергии для очистки воды, уровень заболеваний можно было бы существенно снизить.

Образование также зависит от ресурсов и энергии. Трудно учиться на пустой желудок, в жаре или холоде. Не верите? Спросите у любого студента. Население Земли в 2050 г. может достигнуть 8–10 млрд человек. Отсутствие демократии и свободы может показаться меньшей проблемой, чем перенаселение и недостаток энергии, но решение энергетических проблем упростило бы решение всех остальных проблем человечества.

Какие факторы, кроме энергии, могут повлиять на решение этих проблем? При тщательном изучении может показаться, что только уменьшение населения Земли может помочь в их решении. Однако даже после самых ужасных войн и эпидемий население существенно не уменьшалось. Удалось бы решить эти проблемы, если бы население Земли составляло всего 1 млрд человек? Скорее всего, да, но куда девать остальные 5,5 млрд?



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Вероятно, вы заметили, что полки книжных магазинов ломятся от книг с ужасающими заголовками: «Без газа», «Фактор нефти», «Конец нефти», «Последний энергетический кризис», «Без нефти: вид с пика Хаббарда» и др. В большинстве из них обсуждается вопрос: достигла ли пика мировая добыча нефти? Почти все соглашались, что такой пик будет достигнут уже в 2010 г.¹

М. Кинг Хаббард (M. King Hubbard), геофизик компании Shell Oil, в 1957 г. проанализировал темпы добычи нефти и предсказал, что США достигнут пика добычи нефти в 1970 г. Именно так и произошло. На рисунке 11.1 предсказания Хаббарда показаны на графике.

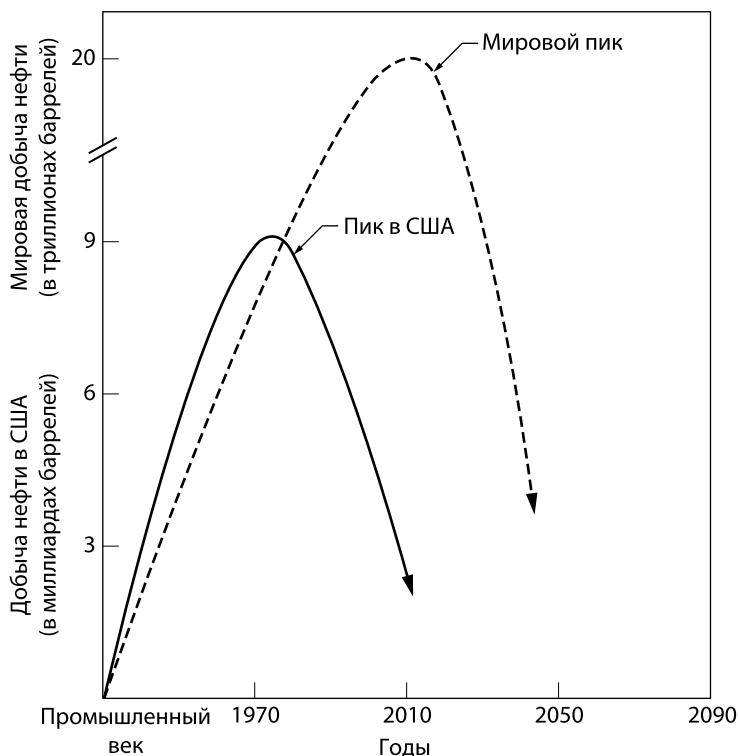


Рис. 11.1. Темпы добычи нефти согласно предсказаниям Хаббарда

¹ Надо сказать, что в России таких книг практически нет. Видимо, вопрос «Что будет, когда кончится нефть?» для России не актуален. — *Прим. ред.*



В книге *Twilight in the Desert* («Сумерки в пустыне») описываются нефтяные поля Саудовской Аравии. В ней анализируется состояние крупнейших нефтяных полей мира и уровень их истощения. Согласно этому анализу, цены на нефть и нефтепродукты, вероятно, останутся такими же высокими, если не выше. Дело в том, что спрос на нефть постоянно растет быстрее предложения¹.

Почти 99% современных ученых согласны с тем, что повышение уровня концентрации углекислого газа в атмосфере вызовет серьезные проблемы в течение ближайших 100 лет. Все ископаемые виды топлива выделяют углекислый газ при сгорании. Поэтому если мы будем продолжать сжигать нефть, газ и уголь, то должны придумать способы снижения уровня углекислого газа в атмосфере. Многие компании разрабатывают варианты сохранения углекислого газа в подземных резервуарах, океане или в составе производных веществ, например карбонате кальция. Проблема в том, что для снижения содержания углекислого газа в атмосфере такими методами придется в течение 100 лет хоронить десятки гигатонн углекислого газа.

Доступность

Энергия неодинаково доступна всем людям на Земле. Как уже говорилось выше, около 2 млрд человек не имеют доступа к электричеству, а еще 2 млрд вынуждены использовать биомассу (то есть древесину и продукты жизнедеятельности домашних животных).

На рисунке 11.2 показаны кривые спроса и текущего потребления нефти, газа и угля. Человечество потребляет огромное их количество. По мере приближения к 2050 г. спрос на эти виды топлива будет только расти. Если учесть, что текущие прогнозы чрезвычайно занижены и не учитываются некоторые факторы, то положение может быть еще более тяжелым.

Например, ежегодные общемировые темпы роста потребления энергии равны 2%, а темпы роста потребления энергии в Китае — 20%. Поскольку население Китая превышает 1 млрд человек, то общий рост потребления энергии в мире вряд ли останется на прежнем уровне. Фактически потребление энергии растет в наиболее населенных странах мира вместе с ростом уровня жизни: люди стремятся покупать ав-

¹ Книга была написана до падения цен на нефть в конце 2008 г., и автор не мог себе предположить такого сценария развития событий. — *Прим. ред.*



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

томобили и больше путешествуют. На рисунке 11.3 показана структура основных видов топлива, которые потребляются в настоящее время.

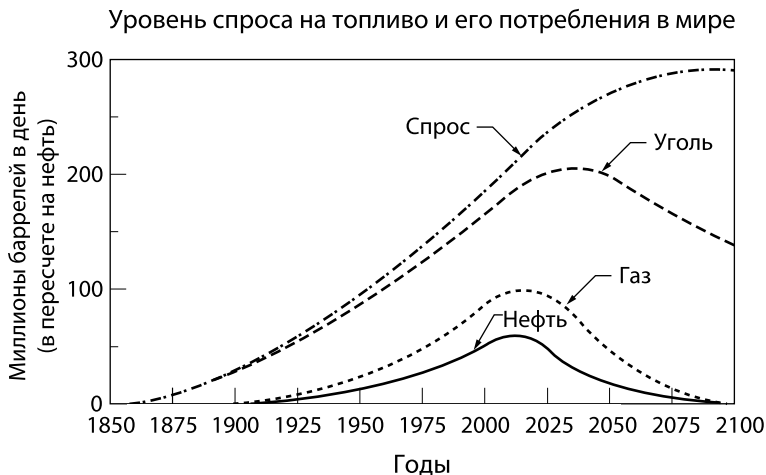


Рис. 11.2. Спрос на ископаемые источники энергии и их потребление

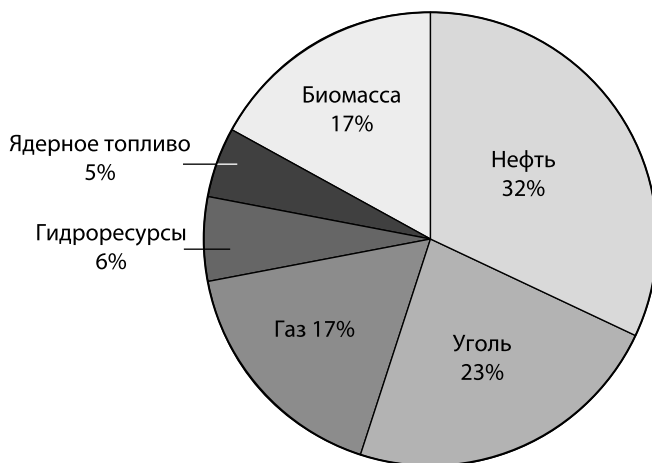


Рис. 11.3. Более половины потребляемого топлива — это ископаемые ресурсы

ПРОБЛЕМА ТЕРАВАТТА

Этот термин образно описывает проблемы современной энергетики. В пересчете на нефть человечество ежедневно потребляет более



210 млн баррелей нефти, из которых около трети приходится на саму нефть, а остальная часть — на уголь, газ, ядерное топливо, биомассу и гидроресурсы. За исключением гидроресурсов основная часть топлива — это невозобновляемые источники энергии. Благосостояние в XX в. было связано с потреблением нефти. Что же станет основой энергетики в XXI в.?

По самым скромным оценкам, в 2050 г. человечеству потребуется вдвое больше энергии, чем сегодня (а если учесть некоторые дополнительные факторы, то даже вчетверо). Это значит, что ежегодно будет тратиться 10–15 тераватт.



Тераватт — это миллион миллионов ватт (то есть 10^{12} ватт), что приблизительно соответствует миллиону баррелей нефти.

В настоящее время нет никаких возможностей для удовлетворения столь высоких потребностей человечества. Потребление нефти, газа и угля составит лишь малую долю от общего потребления энергии. Для удовлетворения повышенного спроса потребуется использовать новые источники энергии на основе ядерного распада и синтеза, гидроэнергетики и новых возобновляемых источников энергии. Сможет ли человечество овладеть этими новыми источниками в ближайшие десятилетия?

ЭФФЕКТИВНОСТЬ

По мнению Эймори Ловинс (Amory Lovins) из Института Роки Маунтэйн (США), решить энергетические проблемы можно с помощью повышения эффективности производства и использования новых материалов. Например, если делать автомобили из композитов, то их масса уменьшится, и потребление энергии снизится. Такие автомобили могли бы дать до 69% экономии потребляемого топлива. Использование более прочных композитных материалов также позволило бы создавать конструктивно иные грузовики и микроавтобусы и получить экономию топлива до 65%.

Компании Boeing и Airbus достигли заметного прогресса в применении новых материалов. Например, новый самолет Boeing 787 *Dreamliner* спроектирован на основе композитных материалов, позволяющих более эффективно использовать топливо.

Нельзя ли приостановить рост потребления энергии и удовлетвориться текущими потребностями? Большинство экспертов считают, что даже при современном уровне потребления ископаемых ресурсов



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

человечеству надолго не хватит имеющихся запасов биомассы, чтобы прокормиться и отопить свои жилища.

Альтернативные виды энергии

Правительство США уделяет пристальное внимание использованию водорода в качестве топлива. Однако чтобы сжигать водород, его сначала нужно получить.

Группа исследователей под руководством профессора Манораньяна Мисры (Manoranjan Misra) из Университета штата Невада в Рино (США) использует массивы нанотрубок на основе диоксида титана для генерации водорода на основе расщепления воды с помощью солнечного света. Если этот процесс удастся перенести на более крупный промышленный масштаб, то он может стать основой для получения водорода из воды.

При использовании нового метода молекулы воды расщепляются гораздо эффективнее. В настоящее время изучаются различные материалы, полученные на основе углеродных нанотрубок, чтобы повысить эффективность процесса расщепления воды с использованием бесплатной солнечной энергии.

В методе Мисры около 1 трлн нанотрубок помещается на площадке из диоксида титана величиной с ноготь. Полученный водород удастся сохранять в системах наноразмерных пор титана и углеродных нанотрубок. Такой наноматериал способен сохранять водород для последующего использования в двигателях автомобилей.

В майском номере журнала *Physical Review Letters* группа ученых из Национальной лаборатории Лос-Аламос (США) поделилась своим открытием. Они обнаружили, что один фотон может генерировать три свободных электрона в квантовой точке. В современных солнечных фотоэлементах один фотон способен генерировать только один электрон, а остальная энергия рассеивается в виде тепла. Таким образом, новый метод позволит повысить эффективность солнечных фотоэлементов с 20–30 до 65%.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

Как насчет энергии, получаемой на основе ядерного распада? Для решения «проблемы тераватт» нужно построить очень много новых атомных электростанций. Причем это должны быть электростанции-бридеры, поскольку имеющегося урана будет недостаточно для получения многих тераватт энергии. Сколько нужно построить бридеров к 2050 г., чтобы получить 10 тераватт? Не удивляйтесь, но для этого



потребуется построить 10 тыс. атомных электростанций с мощностью 1 гигаватт. Это значит, что в течение 27 лет каждый день должна вводиться в строй новая атомная электростанция. Вряд ли человечество сможет осилить такую задачу в ближайшие 50 или даже 100 лет.

Вероятно, наиболее перспективным является создание реакторов на основе ядерного синтеза. Если они будут созданы, то, несомненно, начнут использоваться. Однако, по современным оценкам, их стоимость будет чрезвычайно высока.

Кроме того, использование ядерных реакторов всех типов связано с огромной опасностью для окружающей среды, прежде всего из-за наличия радиоактивных отходов.

Уникальные свойства наноматериалов могут пригодиться для передачи и распределения энергии, выработанной атомной электростанцией. На рисунке 11.4 показана схема типичной атомной электростанции и ее компонентов, в основе которых могут использоваться нанотехнологии.

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

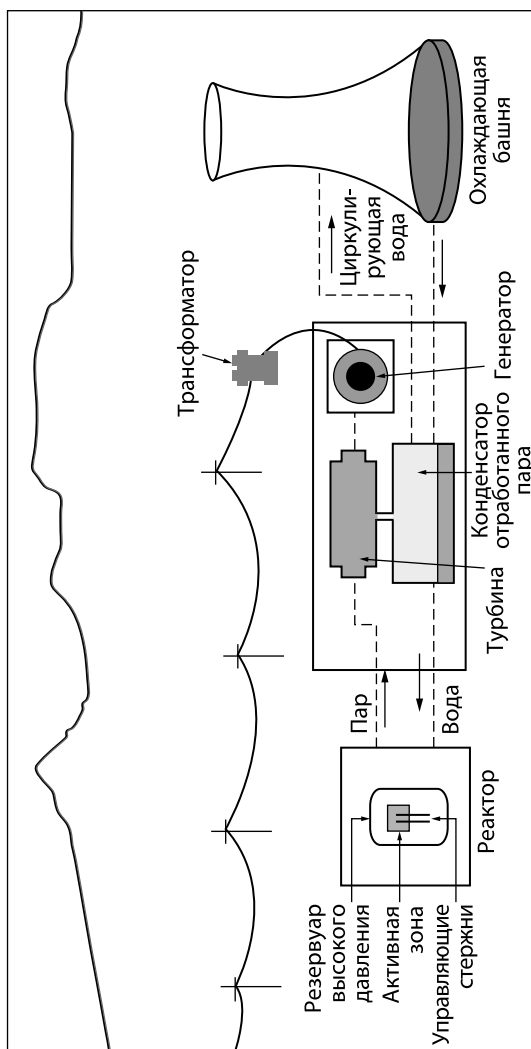
Геотермальная энергия генерируется за счет использования подземных тепловых потоков, которые поднимаются к поверхности земли с водой и паром. Представьте себе парилку с горячими камнями, на которые льют воду.

Чтобы воспользоваться этой энергией, в зонах с термальными подземными водами сверлят скважины, по которым нагретые грунтовые воды поступают на поверхность. Для извлечения этой энергии в промышленном масштабе требуется пробурить как можно больше скважин, что существенно повышает стоимость такой энергии.

По данным Всемирного геотермального конгресса, по состоянию на 2005 г. 72 страны использовали около 16 гигаватт геотермальной энергии для обогрева жилищ, растапливания снега, обогрева лечебниц и парников, а 24 страны — около 9 гигаватт для выработки электрической энергии. Рейкьявик, столица Исландии, полностью отапливается за счет геотермальной энергии вулканических пород Среднеатлантического хребта, который пересекает Исландию. Для этого к системе отопления подключены подземные резервуары с горячей водой с температурой 80–100 °С. А для выработки электрической энергии используются резервуары с температурой около 180 °С и выше. Такие резервуары обычно находятся вблизи вулканов и содержат горячий пар внутри раскаленных горных пород. Благодаря наноматериалам ученые и инженеры могут повысить эффективность передачи геотермальной и электрической энергии.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения





СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

Взгляните на Солнце на рис. 11.5 (непосредственно на него лучше не смотреть, чтобы не повредить зрение) и сравните его огромные размеры с гораздо меньшими размерами Земли.

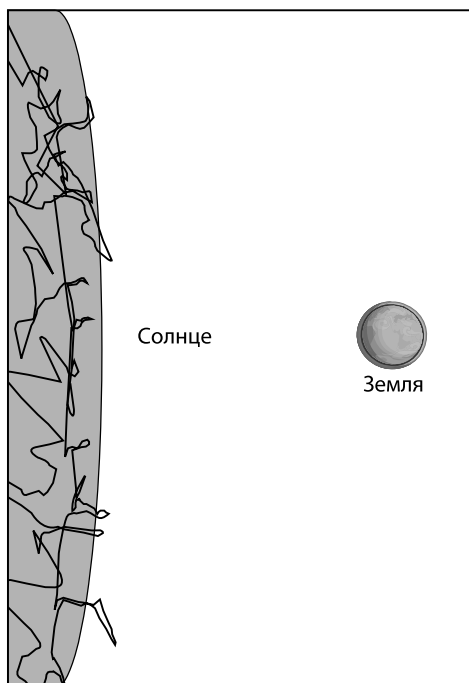


Рис. 11.5. Солнце ежедневно генерирует гораздо больше энергии, чем может использовать человечество

Сколько тераватт солнечной энергии поступает на Землю ежедневно? Около 165 тыс. тераватт, что гораздо больше, чем необходимые человечеству 10 тераватт. Остается только найти такие способы их получения, чтобы эту энергию можно было использовать вместо нефти, газа и угля.

Возможно ли это? И да, и нет. В 2006 г. США использовали около 3 тераватт. Чтобы удовлетворить все энергетические потребности человечества, солнечными батареями пришлось бы полностью покрыть территорию нескольких штатов: Техаса, Оклахомы, Канзаса, Колорадо и Нью-Мексико, но это непрактично.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Что является наибольшей проблемой при получении и использовании солнечной энергии? Дело в том, что солнечный свет не всегда одинаково освещает поверхность Земли. Необходимо найти способ сохранения солнечной энергии для ее использования в темное или пасмурное время суток.

Солнечная энергия — наиболее перспективный альтернативный источник энергии для южных штатов США. С ее помощью можно было бы удовлетворить потребности в электроэнергии в масштабах всей страны. Однако Правительство США ежегодно выделяет менее 100 млн долларов на исследования способов получения солнечной энергии. Для удовлетворения растущих энергетических потребностей правительству нужно инвестировать большие средства в этот и другие возобновляемые источники энергии.

ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

Можно ли использовать другие химические виды топлива, например природный газ? К сожалению, это связано с проблемой повышения уровня углекислого газа и стоимостью добычи, доставки и распределения природного газа. В июле 2005 г. в журнале *Scientific American* в статье *Can We Bury Global Warming?* («Можно ли похоронить глобальное потепление?») Роберт Х. Соколов (Robert H. Socolow) привел оценку, согласно которой Уильям Шекспир с каждым миллионом вдыхаемых молекул поглощал 280 молекул углекислого газа, а мы — 380.

Сейчас изучается возможность *секвестрации углерода* (*carbon sequestration*), то есть сохранения углекислого газа под землей или в глубинах океана вместо выброса его в атмосферу. Альтернативные способы получения энергии должны основываться на более эффективном использовании ископаемых видов топлива и замещении их другими возобновляемыми источниками энергии.

Экологически чистое использование угля — одно из перспективных направлений, но для этого с помощью нанотехнологий придется решить проблемы секвестрации углерода и снижения стоимости использования угля.

«УМНЫЕ» ЭНЕРГОСЕТИ

Для создания поистине «умных» энергосетей США и другие промышленно развитые страны стремятся улучшить свойства электрических кабелей. Они пытаются кардинально изменить способы хранения и передачи энергии на основе сверхпроводящих кабе-



лей, в которых практически нет потерь энергии. Смолли называет такую систему *распределенной сетью генерирования и хранения электроэнергии (distributed storage and generation grid)*. Всемирная энергетическая сеть должна перейти от транспортировки традиционного массивного топлива (угля, нефти, газа и т. д.) к передаче невесомой энергии (электрического тока по проводам). На рисунке 11.6 представлена схема возможного улучшения системы доставки энергии.

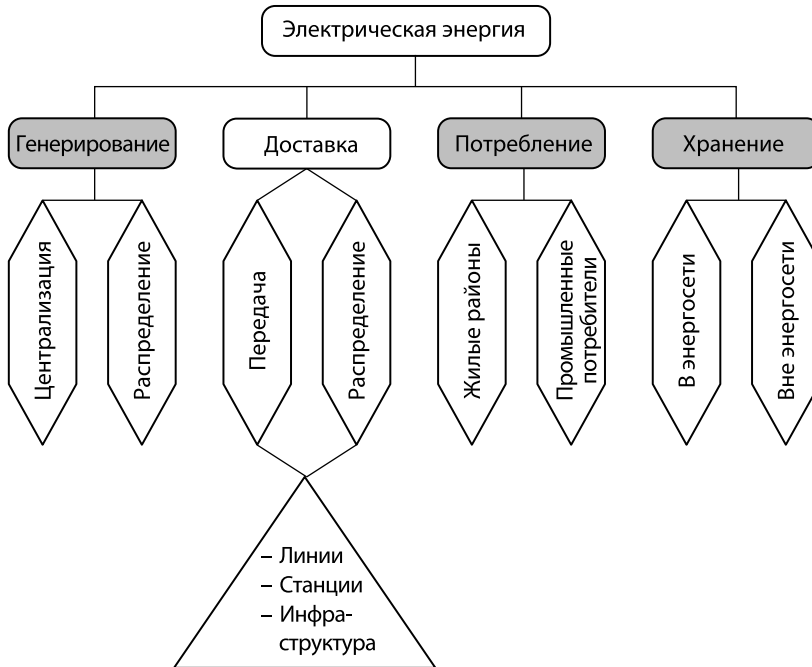


Рис. 11.6. Передачу энергии можно сделать гораздо более эффективной за счет совершенствования методов и материалов

Наноматериалы, например углеродные нанотрубки, представляют собой один из вариантов, повышающих эффективность системы передачи электрической энергии. Дело в том, что проводимость углеродных нанотрубок в 6 раз выше проводимости меди. К тому же они имеют гораздо меньший размер, что особенно важно в местах, где подземные коммуникации уже переполнены медными проводами, например в подземных коммуникациях Нью-Йорка, которые



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

уже в шутку называют наибольшими залежами меди в мире. Кабели на основе углеродных нанотрубок вполне могут разместиться в уже существующих подземных коммуникациях, и для них не придется рыть новые туннели.

Современная энергосеть уже заметно устарела. Ее основные компоненты имеют возраст от 15 до 20 лет. Энергосеть должна обладать положительными свойствами Интернета, то есть быть надежной, защищенной от атак злоумышленников, а также сохранять энергию (например, в батареях, механических аккумуляторах, водородных элементах и т. п.).

Во время «затемнения» (аварии энергосистемы, которая имела место во многих штатах Северо-Востока США и Канаде 14 августа 2003 г.) огромное количество людей оставалось без электроэнергии в течение недели¹. В отсутствие эффективных альтернативных линий передача и распределение энергии были полностью разрушены. Чтобы исключить регулярное появление «затемнений» в промышленно развитых странах (которые уже зафиксированы в Италии, Великобритании, Канаде и скандинавских странах), нужно решительно изменить систему передачи и распределения электрической энергии.



«Затемнение» — это масштабная авария энергосистемы, которая является результатом несбалансированности спроса на электрическую энергию и ее потребления.

Большое значение для исключения «затемнений» имеет локальное генерирование электроэнергии. Не принципиально, как именно она генерируется (за счет солнечной, ядерной, геотермальной или других видов энергии), но очень важно использовать все местные источники.

Надежность энергосети можно повысить с помощью наноматериалов и нанотехнологий. Достоинством «умной» энергосети является то, что каждый ее элемент играет активную, а не пассивную роль.

В таблице 11.2 приведена сравнительная характеристика современной энергосети и «умной» энергосети будущего.

¹ Самое известное отключение такого масштаба в России — в мае 2005 г. в Москве на полдня. Правда на Дальнем Востоке такие отключения до последнего времени были обычным делом. — *Прим. ред.*



Таблица 11.2. Современная энергосеть менее восприимчива к изменениям, чем «умная» энергосеть

Энергосеть XX в.	«Умная» энергосеть
Электромеханическая	Цифровая
Однонаправленная	Двунаправленная
Централизованное генерирование	Распределенное генерирование
Радиальная топография	Сетевая топография
Несколько сенсоров	Интегрированные мониторы и сенсоры
«Слепая» (без самоконтроля)	С самоконтролем
Ручное восстановление	Самовосстановление
Уязвимая к «затемнениям» и сбоям	Адаптивная защита и изоляция
Ручная проверка оборудования	Удаленный мониторинг оборудования
Реакция на аварии по телефону и коллективное принятие решений	Автоматические системы принятия решений, надежность прогнозов
Слабый контроль передачи энергии	Всеобъемлющий контроль передачи энергии
Слабый контроль текущих расходов	Всеобъемлющий контроль текущих расходов
Ограниченный выбор для потребителей	Широкий выбор для потребителей

ХРАНЕНИЕ

Человечеству нужно позаботиться также об эффективном хранении электричества. Если домовладельцы рассчитывают на использование только солнечной энергии, то им придется позаботиться о надежном хранилище, которое способно удерживать энергию хотя бы в течение недели. В пасмурные дни такая система должна предоставить достаточно энергии для нормального функционирования дома. В настоящее время для этого используются литиевые батареи, но они занимают большую территорию (почти как сам дом) и стоят около 50–60 тыс. долларов. Для широкого распространения таких батарей в домашних хозяйствах они должны иметь размер не больше стиральной машины, а стоимость — не выше 1000 долларов.

Как усовершенствовать возможности хранения энергии? Ответом опять может стать создание «умной» энергосети. По мнению специалистов Национальной лаборатории энергетических технологий США, типичная «умная» энергосеть должна обладать семью основными характеристиками, которые перечислены в табл. 11.3.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

Таблица 11.3. Основные характеристики «умной» энергосети

№	Характеристика	Описание свойств
1	Самовосстановление	Способность быстро обнаруживать, анализировать сбои, реагировать на них и восстанавливаться после сбоев и аварий
2	Участие потребителя	Способность использовать оборудование и поведение потребителя в структуре и функционировании энергосети
3	Устойчивость к атакам	Ослабление физических и компьютерных атак и способность противостоять им
4	Повышенное качество энергии	Удовлетворение повышенных требований потребителей к качеству энергии
5	Варианты генерирования энергии	Способность использовать разные локальные источники энергии (например возобновляемые)
6	Конкурентоспособность	Способность выдержать рыночную конкуренцию
7	Оптимизация	Способность осуществлять мониторинг энергосети для постоянной оптимизации основных средств и минимизации расходов

Углеродные нанотрубки

Инженеры так увлечены углеродными нанотрубками, потому что эти трубки являются самыми прочными материалами во Вселенной. Ни один элемент в периодической системе не обладает такой прочностью. Возможно, это смелое утверждение будет опровергнуто новыми открытиями ученых, за которые не грех дать Нобелевскую премию.

Если профессор Смолли прав, то существуют тысячи новых способов использования материалов на основе углеродных нанотрубок. Благодаря своим удивительным электрическим свойствам углеродные нанотрубки смогут заменить металлические материалы в электрических схемах, поскольку проводят ток лучше меди. На основе полупроводящих свойств углеродных нанотрубок будут созданы новые компьютеры. Углеродные нанотрубки обладают теплопроводностью алмаза, химическими свойствами углерода и структурным совершенством ДНК. Именно поэтому их называют самым универсальным инженерным материалом.

Тонкую нанопластинку графита легко свернуть в нанотрубку. При этом можно настолько точно соединить атомы, что получится абсолютно идеальный цилиндр (который показан в главе 1). Нано-



трубка проводит электрический ток лучше, чем медь, но имеет нанометровый диаметр и длину до 12 см. Такое волокно в 10–100 раз прочнее волокна из стали, кевлара или любого другого известного материала.

Щепотка таких волокон массой 1 г похожа на обычное пятно сажи. В 2004 г. это «пятно» стоило около 1000 долларов, а теперь компания Carbon Nanotechnologies Inc. в Хьюстоне (США) продает углеродные нанотрубки по цене 375 долларов за грамм. Предполагается, что нынешняя цена очень скоро уменьшится в десятки тысяч раз.

На основе углеродных нанотрубок ученые стремятся создать квантовый провод, который будет обладать электрической проводимостью в 10 раз больше, чем у меди, весить в 6 раз меньше стали и обладать большей прочностью и меньшим тепловым расширением.

По мнению профессора Смолли, углеродные нанотрубки можно разместить одну рядом с другой и параллельно проводить ток с плотностью большей, чем могут обеспечить современные линии электропередачи. При этом новые линии будут гораздо легче, чем нынешние, созданные на основе меди и алюминия. Превосходные электрические и тепловые свойства углеродных нанотрубок позволят снизить уровень потерь при такой передаче электроэнергии. Это позволит радикальным образом усовершенствовать систему электроснабжения.

Ключевым фактором развития данной технологии является увеличение длины углеродной нанотрубки, и ученые уже пытаются найти способы максимального увеличения длины нового волокна.

Итак, начальная проблема поиска новых способов получения исходного материала решена. Ученые и инженеры научились делать углеродные нанотрубки в огромном количестве, и теперь им предстоит найти способы улучшения их параметров.

Будущие исследования

Наибольшая проблема ближайших десятилетий — задача генерирования и распределения энергии, достаточной для 10^{10} людей планеты. До 2050 г. человечеству потребуется найти способы генерирования дополнительных 10 тераватт экологически чистой энергии ежегодно. Для всеобщего процветания новая энергия должна быть дешевой, широко распространенной и доступной, что невозможно с помощью имеющихся в настоящее время технологий.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

На этом пути человечеству придется преодолеть еще множество препятствий. Исследования новых источников энергии требуют большего финансирования. Профессор Смолли предлагал взимать налог в 10% на каждый галлон нефтепродуктов, потребляемых в США. Только это позволило бы аккумулировать около 10 млрд долларов дополнительного финансирования на исследования новых видов энергии. США инвестируют огромные средства в импорт, производство и распределение энергии, но не в исследования новых ее источников. Более крупные инвестиции позволили ли бы найти и развить новые технологии и решить многие энергетические проблемы уже к 2020 г.

В ближайшие 50 лет энергетический ландшафт планеты изменится самым драматическим образом. Новые технологии откроют новые возможности. Лидерство будет определяться степенью освоения новых источников энергии. В настоящее время основные усилия США сосредоточены на использовании нефти, газа и водорода, хотя в ближайшее время, после подписания президентом США Джорджем У. Бушем в 2005 г. так называемого энергетического билля, все может измениться решительным образом. Самая крупная в мире нефтегазовая энергетическая отрасль в процентном отношении тратит меньше денег на научные исследования, чем остальные отрасли. Учитывая значение проблемы, очевидно, что этот подход является чрезвычайно близоруким.

Инвестиции

Откуда берется интеллектуальная собственность? Откуда могут появиться решения будущих энергетических проблем? Кто будет владеть энергетическими технологиями в будущем? У кого будут покупать энергию? Вскоре человечество получит ответы на все эти вопросы.

Министерство энергетики ежегодно тратит около 10 млн долларов на исследования в области нанотехнологий¹. Однако это финансирование нужно значительно увеличить. Некоторые энергетические компании заинтересованы в таких исследованиях. Например, компа-

¹ В России все финансирование перспективных проектов в сфере нанотехнологий осуществляется Государственной корпорацией «Российская корпорация нанотехнологий». Обещанный объем финансирования со стороны государства — 5 млрд долларов. — *Прим. ред.*



ния Halliburton уже на протяжении нескольких последних лет ведет активные исследования в этом направлении.

Однако большинство энергетических компаний США еще не переключилось на активные исследования нанотехнологий. Они не считают нанотехнологии условием своего будущего долговременного процветания. Некоторые крупные энергетические корпорации приобретают небольшие компании, создающие солнечные батареи, чтобы подготовиться к грядущим изменениям. В настоящее время создаются высокоэффективные и долговечные гибридные солнечные батареи, которые удовлетворяют повышенным экологическим требованиям.

Исследования способов получения солнечной энергии особенно интенсивно ведутся в Европе. Дело в том, что европейские страны инвестируют огромные средства в исследования, связанные с поиском альтернативных источников энергии. В 2003 г. правительство Японии объявило об инвестировании 50 млн долларов в программу научных исследований в области нанотехнологий и их применения в энергетике. Правительство США и многих других стран, особенно в Азии, стремятся перехватить инициативу и обеспечить лидирующее положение в энергетике будущего.

Энергетика будущего

Нефть останется одним из основных источников энергии в ближайшие 50–100 лет. Многие запасы нефти еще даже не разведаны, но их разведка и добыча потребует огромных средств. Открытие нанотехнологий сможет повлиять практически на все области науки и техники. По мере открытия наномасштабных свойств появятся новые области исследований, а наиболее важной отраслью, вероятно, станет энергетика.

Правительство США с каждым годом увеличивает финансирование исследований в области нанотехнологий. Однако из 1 млрд долларов общего финансирования только 10 млн приходится на исследования в области энергетике. Министерство энергетики США недостаточно щедро финансирует такие исследования, хотя в будущем планируется увеличить инвестиции.

Как уже неоднократно упоминалось выше, лауреат Нобелевской премии Ричард Смолли, образно говоря, являлся чемпионом инициатив в вариантах альтернативных источников энергии. Он был убежден, что новые материалы будут иметь критическое значение для решения будущих энергетических проблем человечества. Еще



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

до своей смерти в 2005 г. он предсказывал, что к 2050 г. для удовлетворения энергетических потребностей человечества потребуется генерировать вдвое больше энергии. Смолли считал, что Земля купается в энергии: солнечной, ядерной и геотермальной. Также он говорил, что человечество... еще, к сожалению, не обладает достаточно эффективными технологиями для ее генерирования, распределения и сохранения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Геотермальные источники с температурой более 180 °С используются для всех перечисленных ниже применений, за исключением:
 - (а) подогрева полов;
 - (б) обогрева жилищ;
 - (в) мытья и сушки автомобилей;
 - (г) локального энергоснабжения городов.
2. В 2003 г. было объявлено об инвестировании 50 млн долларов в программу научных исследований в области нанотехнологий и их применения в энергетике Правительством:
 - (а) ЮАР;
 - (б) Канады;
 - (в) Германии;
 - (г) Японии.
3. Общим знаменателем для крупных проблем человечества в будущем является недостаток:
 - (а) льда;
 - (б) энергии;
 - (в) океанов;
 - (г) налогов.
4. Что из перечисленного не входит в перечень наиболее важных проблем человечества?
 - (а) недостаток энергии;
 - (б) недостаток воды;
 - (в) перенаселение;
 - (г) наличие храпа.



5. До 2050 г. человечеству потребуется найти способы генерирования дополнительной экологически чистой энергии в размере:
 - (а) 3 тераватта;
 - (б) 6 тераватт;
 - (в) 10 тераватт;
 - (г) 15 тераватт.
6. В большинстве публикаций о нефтяном кризисе предполагается, что пик мировой добычи нефти будет достигнут:
 - (а) в 2006 г.;
 - (б) в 2010 г.;
 - (в) в 2100 г.;
 - (г) в 2400 г.
7. Ежедневно на Землю поступает около 165 тыс. тераватт энергии от:
 - (а) Солнца;
 - (б) Луны;
 - (в) философского камня;
 - (г) природного газа.
8. Какой материал обладает электрической проводимостью, в 10 раз большей, чем у меди, весит в 6 раз меньше стали и обладает большей прочностью?
 - (а) квантовые провода;
 - (б) нанокристаллы;
 - (в) фуллерены;
 - (г) космические точки.
9. По мнению Ричарда Смолли, к 2050 г. для удовлетворения энергетических потребностей человечества потребуется генерировать энергии:
 - (а) столько же, как и сейчас;
 - (б) в 2 раза больше;
 - (в) в 3 раза больше;
 - (г) в 4 раза больше.
10. Тераватт (10^{12} ватт) приблизительно эквивалентен:
 - (а) 1 сотне баррелей нефти;
 - (б) 1 тысяче баррелей нефти;
 - (в) 10 тысячам баррелей нефти;
 - (г) 1 миллиону баррелей нефти.

Тест к части III

1. Биологические сенсоры являются важными инструментами, которые позволяют идентифицировать все перечисленное ниже, за исключением:
(а) токсичных химикатов;
(б) минералов;
(в) биологических объектов;
(г) загрязнения окружающей среды.
2. Светочувствительный слой на кремниевой подложке, затвердевающий под воздействием света, называется:
(а) липучкой;
(б) грязью;
(в) фоторезистом;
(г) фотодезистом.
3. Если делать автомобили из композитов, то их масса уменьшится, и потребление энергии снизится на:
(а) 37%;
(б) 52%;
(в) 69%;
(г) 81%.
4. Основной проблемой при генерировании солнечной энергии является:
(а) ночное время суток;
(б) дневное время суток;
(в) суббота;
(г) воскресенье.
5. Сохранение углекислого газа под землей или в глубинах океана вместо открытого выброса его в атмосферу называется:
(а) переработкой в бумагу;
(б) копированием;
(в) очернением;
(г) секвестрацией.



6. Углеродная нанотрубка прочнее:
(а) стали;
(б) меди;
(в) кевлара;
(г) всех перечисленных выше материалов.
7. Нанопокрyтия теннисных мячиков:
(а) улучшают их отскок;
(б) предохраняют от ударов;
(в) повышают герметичность;
(г) упрощают поиск в случае потери.
8. Экстремальный ультрафиолетовый свет имеет длину волны:
(а) 1–5 нм;
(б) 10–15 нм;
(в) 50–100 нм;
(г) 193–248 нм.
9. Массивы нанотрубок на основе диоксида титана при расщеплении воды с помощью солнечного света используются для генерирования:
(а) неона;
(б) палладия;
(в) водорода;
(г) серы.
10. Для определения уровня глюкозы в течение всего дня используется сенсор на основе:
(а) бензола;
(б) энзима оксидаз глюкозы;
(в) алюминия;
(г) окиси азота.
11. Квантовая точка ограничивает электроны:
(а) в воде;
(б) пончиках;
(в) нанобласти проводника или полупроводника;
(г) в нуль-пространстве.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

12. Аббревиатура НЦЭМ означает:
- (а) новый централизованный электронный мониторинг;
 - (б) новый целиком электрофизический метод;
 - (в) Национальный центр электрического обслуживания;
 - (г) Национальный центр электронной микроскопии.
13. Нанокольца можно применять в качестве контейнера-усилителя инфракрасных сигналов для тестирования:
- (а) молекул;
 - (б) тектоники плит;
 - (в) обручальных колец;
 - (г) гимнастических колец.
14. Всемирная энергетическая сеть должна перейти от транспортировки традиционного топлива (угля, нефти, газа и т. д.) к передаче:
- (а) криогенного носителя;
 - (б) ветра;
 - (в) ручного труда;
 - (г) энергии.
15. Концы канала n -типа называются источником:
- (а) и переносчиком;
 - (б) маской;
 - (в) фоторезистом;
 - (г) стоком.
16. Что из перечисленного не входит в перечень наиболее важных проблем человечества?
- (а) перенаселение;
 - (б) недостаток энергии;
 - (в) недостаток пищи;
 - (г) слежение за последними тенденциями моды.
17. Уильям Шекспир с каждым миллионом вдыхаемых молекул поглощал примерно 280 молекул углекислого газа, а мы теперь поглощаем примерно:
- (а) 220 молекул;
 - (б) 310 молекул;
 - (в) 380 молекул;
 - (г) 460 молекул.



18. Длина волны де Бройля — это мера:
- (а) длины приливной волны;
 - (б) количественного соотношения между волновыми и корпускулярными свойствами частиц;
 - (в) новой модной прически;
 - (г) длины футбольного поля.
19. Тераватт — это:
- (а) 10^6 ватт;
 - (б) 10^9 ватт;
 - (в) 10^{10} ватт;
 - (г) 10^{12} ватт.
20. Секвестрация углерода — это:
- (а) огранка алмаза;
 - (б) сохранение углекислого газа под землей или в глубинах океана;
 - (в) сохранение угля на зиму;
 - (г) выпуск углерода в атмосферу.
21. Исследования наноинструментов, которые помогли бы анализировать клеточные процессы, выполняемые отдельными биологическими молекулами или клетками, называют:
- (а) фантастикой;
 - (б) литографией;
 - (в) клеточной инженерией;
 - (г) квантовой оптикой.
22. «Затемнения», или масштабные аварии энергосистемы, являются результатом:
- (а) бесшабашных студенческих вечеринок;
 - (б) несбалансированного спроса и предложения электрической энергии;
 - (в) электротехники, оставленной во включенном состоянии;
 - (г) плохого качества лампочек.
23. Материалы, которые создаются на основе внедрения наночастиц силикатной глины в пластмассы или керамику, называются:
- (а) нанопенопластами;
 - (б) нанокольцами;
 - (в) нанотрубками;
 - (г) нанокомпозитами.



ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

24. Огромное количество микроскопических транзисторов образует:
- (а) микрочип;
 - (б) сток;
 - (в) материнскую плату;
 - (г) источник.
25. В 2006 г. США использовали энергии около:
- (а) 400 киловатт;
 - (б) 850 киловатт;
 - (в) 3 тераватт;
 - (г) 10 тераватт.
26. Группа исследователей из Университета штата Невада в Рино (США) использует массивы нанотрубок на основе диоксида титана:
- (а) для генерирования водорода на основе расщепления воды с помощью солнечного света;
 - (б) для создания более долговечной косметики;
 - (в) для промышленных измельчителей;
 - (г) для прочных колес.
27. Нанотехнологии могут повысить эффективность солнечных фотоэлементов с 20–30% до:
- (а) 40%;
 - (б) 55%;
 - (в) 65%;
 - (г) 70%.
28. Подземные коммуникации какого города уже настолько переполнены медными проводами, что их уже в шутку называют наибольшими залежами меди в мире?
- (а) Атланты;
 - (б) Хьюстона;
 - (в) Нью-Йорка;
 - (г) Сан-Франциско.
29. Вариант литографии, в котором все операции выполняются в жидкости, куда погружена оптическая система и подложка, называется:
- (а) биомиметикой;
 - (б) квантовой механикой;
 - (в) нанонаблюдением;
 - (г) иммерсионной литографией.



- 30.** Красные коллоидные растворы золота обладают повышенной оптической абсорбцией, вызванной сильным взаимодействием света и электронов этого металла, и применяются:
- (а) для окрашивания помидоров;
 - (б) в свечах;
 - (в) в тестах на беременность;
 - (г) для окраски ковров.
- 31.** Созданное учеными из Университета штата Иллинойс в Шампэйн-Урбане (США) устройство, которое способно работать с частотой 600 ГГц, называется:
- (а) рогаткой;
 - (б) биполярным транзистором;
 - (в) ноутбуком;
 - (г) внедорожным мотоциклом.
- 32.** Население Земли в 2050 г. может достигнуть величины:
- (а) той же, что и сейчас;
 - (б) 6—7 млрд человек;
 - (в) 8—10 млрд человек;
 - (г) 11—12 млрд человек.
- 33.** В современных солнечных фотоэлементах один фотон способен генерировать только один электрон, а остальная энергия рассеивается в виде:
- (а) цвета;
 - (б) пены;
 - (в) соли;
 - (г) тепла.
- 34.** Если делать автомобили из композитов, то их масса уменьшится, и потребление энергии снизится примерно на:
- (а) 20%;
 - (б) 40%;
 - (в) 50%;
 - (г) 70%.
- 35.** Американцы составляют всего 5% населения Земли, но из всей расходуемой человечеством энергии используют около:
- (а) 5%;
 - (б) 15%;
 - (в) 25%;
 - (г) 40%.

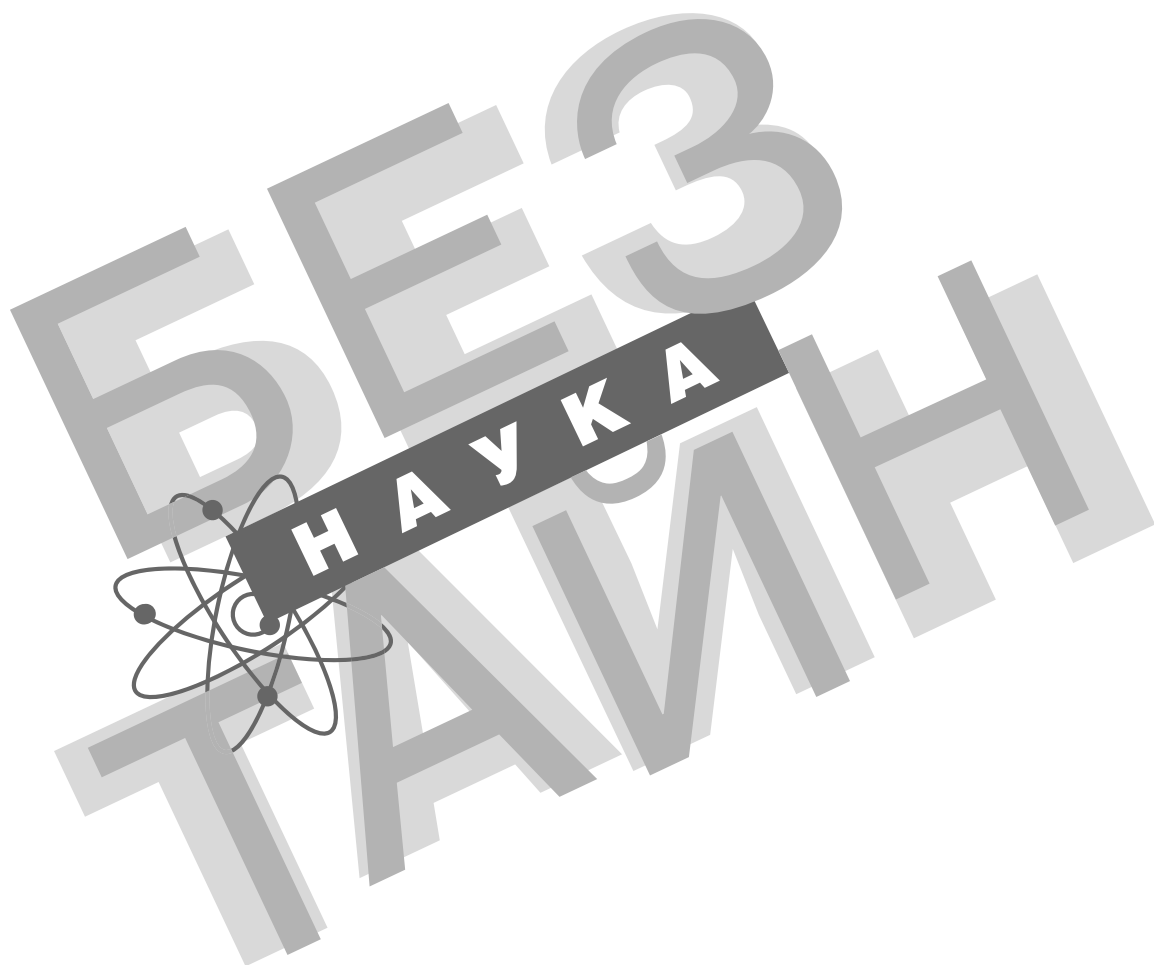


ЧАСТЬ III «Сухие» (неорганические) приложения

- 36.** Для создания наноматериалов обычно используются все перечисленные ниже методы, за исключением:
- (а) конденсации в атмосфере инертного газа;
 - (б) электролитического осаждения;
 - (в) литификации (окаменения);
 - (г) синтеза на основе перехода золь—гель.
- 37.** Светочувствительный слой на кремниевой подложке, затвердевающий под воздействием света, называется:
- (а) фоторезистом;
 - (б) маскардом;
 - (в) растворителем;
 - (г) высокопроизводительным элементом.
- 38.** Оптические свойства золотых наноболочек можно изменять с помощью:
- (а) крошечного переключателя;
 - (б) размера ядра и толщины его золотого покрытия;
 - (в) миниатюрных техников;
 - (г) заменой золота пенопластом.
- 39.** Ежедневно на Землю поступает солнечной энергии около:
- (а) 10 тыс. тераватт;
 - (б) 50 тыс. тераватт;
 - (в) 138 тыс. тераватт;
 - (г) 165 тыс. тераватт.
- 40.** При комнатной температуре в результате реакции между наночастицами кварца в водном растворе полимеров и солей могут образовываться:
- (а) микрокапсулы с помощью самосборки;
 - (б) частички льда;
 - (в) морские звезды;
 - (г) желатиноподобная замазка.

Часть IV

БУДУЩЕЕ



Глава 12

Бизнес и инвестиции

Нанотехнологии — это мечта современных маркетологов. Сейчас они пытаются связать все вокруг со словом «*нано*». Например, даже проигрыватель компании Apple называется iPod nano. Толщиной с карандаш и длиной всего чуть менее 9 см, он обладает портативной системой воспроизведения звуковых файлов, цветным дисплеем, батареей со временем работы до 14 часов, памятью для хранения более 1000 песен, аудиокниг и подкастов. Этот плеер способен на многое, но он совсем не содержит наночастиц, а его мельчайшие компоненты имеют размер более 100 нм.

Действительно, в настоящее время многие компании все используют приставку «нано-» в названиях своих продуктов. Потому подчас трудно отделить зерна (реальные нанотехнологические продукты и технологии) от плевел (обычных продуктов, которые названы новомодным словечком). Некоторые компании разбрасываются термином «нано», как конфетти, но без вкладывания какого-либо реального смысла в это название.

В свое время многообещающие биотехнологии стали огромным благом для многих инвестиционных компаний, которые поспешили вложить свои средства в покупку акций быстрорастущих биотехнологических компаний. Дадут ли такую же выгоду инвесторам неокрепшие нанотехнологии и нанопродукты? Сеем надеяться, что да. В основе большинства таких проектов лежит расширение круга акционеров, а реальная выгода и рост компаний достигаются за счет продажи патентов и лицензий на новые коммерческие методы и приложения.

Многие венчурные фирмы, которые успешно инвестировали биотехнологии, например такие монстры, как Genentech и MedImmune, продвинулись далеко вперед. Теперь в сфере нанотехнологий они ищут новые продукты, скажем, наноматериалы для распознавания белков и вирусов, и стремятся получить новые прибыли (с учетом



ЧАСТЬ IV Будущее

возврата инвестиций), а не просто провести шумную маркетинговую кампанию вокруг новомодного термина. *Реальные* нанотехнологии внедряются во многие передовые технологии, которые способны улучшить продукты, сервисы и процессы во всех отраслях промышленности.

Игроки

Почти 50% компаний в реестре-индексе Dow Jones, который охватывает 30 крупнейших компаний США, используют или создают нанопродукты¹. Среди них Intel, IBM, Hewlett-Packard, DuPont, General Electric, Motorola, Sony, Siemens, Xerox и многие другие.

Множество других компаний, работающих в области нанотехнологий (в наноэлектронике, наноматериалах и бионанотехнологиях), способны достичь таких результатов, которые смогут существенно повлиять на выпускаемую продукцию и смежные отрасли в целом.

Учитывая огромное количество компаний в США и других странах (их число уже перевалило за 350), которые ведут интенсивные исследования с прицелом на будущее внедрение, можно предположить, что полученные ими нанотехнологии повлияют на всю нашу жизнь. Новые материалы, по размерам сравнимые с вирусами, открывают совершенно новые возможности. Самолеты, поезда, автомобили, биологические сенсоры, медикаменты, компьютеры, краски и покрытия — все это находится на гребне технологического цунами, о размерах которого сегодня мы можем только догадываться. Многие крупные компании (в тесном сотрудничестве со своими правительствами) тратят огромные деньги на нанотехнологические исследования, чтобы не остаться далеко позади в этой технологической гонке.

По некоторым оценкам, в 2004 г. на исследования нанотехнологий правительствами разных стран было потрачено более 1 млрд долларов США. В 2006 г. эта цифра превысила 2 млрд долларов США, причем столько же на подобные исследования потратили частные компании. В 2006 г. в своем обращении к нации Джордж У. Буш отметил высокий приоритет нанотехнологий в бюджете США. В 2007 г. в рамках Национальной нанотехнологической инициативы (National Nanotechnology Initiative — NNI) в США выделили около

¹ В России все значительно проще. За развитие нанотехнологий взялось государство. — *Прим. ред.*



1,275 млрд долларов, которые были распределены между 10 правительственными агентствами.

В настоящее время в разных областях деятельности (например, информатике, биологии и материаловедении) уже прослеживаются стойкие нанотехнологические связи.

Такие компании, как Dow Chemical, ChevronTexaco, NEC, DuPont, ExxonMobil и Mitsubishi Electric, щедро инвестируют в нанотехнологические стартапы (то есть недавно созданные и бурно развивающиеся фирмы, которые часто основываются преподавателями университетов) и (или) объединяют свои усилия с другими компаниями. Например, компания Dow Chemical (с ежегодным объемом продаж около 33 млрд долларов США и клиентами более чем в 180 странах мира) объединила свои усилия с компанией Starpharma (Мельбурн, Австралия) и компанией Dendritic NanoTechnologies, Inc. (DNT) для создания нанопродуктов с помощью наномасштабных полимеров. Эти вливания подстегнули процесс получения патентов на дендримеры — типы наноструктур с разветвленным древовидным физическим строением, которое позволяет доставлять лекарства в нужное место организма.

Компания DNT получила более 30 патентов на дендримеры и продала лицензии на дендримеры более 200 типов другим фармацевтическим, диагностическим и биотехнологическим компаниям. В настоящее время DNT разрабатывает продукты для работы с белками и антителами, создания противовоспалительных средств, целевой доставки лекарств посредством белков и улучшения методов диагностики с помощью магниторезонансной визуализации.

В 2004 г. Starpharma стала первой компанией, которая начала клинические испытания новых медикаментов на основе дендримеров для борьбы с вирусом иммунодефицита (human immunodeficiency virus — HIV). Эти испытания проводились под наблюдением Администрации по контролю продуктов питания и лекарств (Food and Drug Administration — FDA) Министерства здравоохранения и социальных служб США. В результате был создан чрезвычайно актуальный бактерицидный гель, который препятствует распространению вируса HIV. Компания Dow Chemical также постепенно сместила свои коммерческие интересы в область создания медикаментов на основе дендримеров.

СТАРТАПЫ

Рынок нанотехнологий все еще находится в стадии становления, но уже появились достаточно окрепшие компании, которые предлагают готовые технологии и продукты. Многие такие компании были



ЧАСТЬ IV Будущее

образованы самими учеными на основе выполненных ими научных исследований. Этим ученым никогда ранее не приходилось составлять бизнес-план. Отдельные компании прибегают к услугам профессионалов в сфере управления бизнесом, чтобы создать надежную бизнес-модель. Впоследствии они осуществляют оперативное руководство для поддержания устойчивого развития компании. Наиболее успешные стартапы с начала своего существования имели качественный бизнес-план и строго придерживались его. Они планировали свое развитие в соответствии с давно проверенными надежными методами, без переоцененных и недостижимых ожиданий.

В 2007 г. в бюджете США было предусмотрено около 1,2 млрд долларов на исследования нанотехнологий в рамках Национальной нанотехнологической инициативы (National Nanotechnology Initiative — NNI). В целом, с 2001 г. США почти вдвое увеличили ежегодные ассигнования на исследования нанотехнологий и потратили на эти цели около 6,5 млрд долларов. Однако, по оценкам научно-исследовательской компании NanoMat (Карлсруэ, Германия), только в 2004 г. суммарная стоимость выпущенной на основе наночастиц или наноматериалов продукции превысила 26,5 млрд долларов.

В настоящее время к продуктам на основе нанотехнологий относятся нанокатализаторы, нанокомпоненты для смешения красок, солнцезащитные кремы с наночастицами оксида цинка, износостойкие покрытия для очков, антиадгезионные покрытия для окон и лобовых стекол, антифрикционные смазки для промышленных инструментов и механизмов. В таблице 12.1 перечислены некоторые современные нанотехнологические компании и выпускаемая ими продукция.

Таблица 12.1. Нанопродукция, выпускаемая современными компаниями

Компания	Продукция
Acadia Research Corp.	Идентификация генов, молекулярная характеристика заболеваний
Altair Nanotechnologies Inc.	Наноматериалы на основе титаната лития для ферромагнитных шпинелей
Applied Nanofluorescence, LLC	Оптические наноинструменты для изучения нанотрубок
Arryx, Inc.	Нанопинцеты для манипулирования наночастицами
California Molecular Electronics Corp.	Интеллектуальная собственность в области молекулярной электроники



Компания	Продукция
Carbon Nanotechnologies, Inc.	Коммерческое производство углеродных нанотрубок
Cima Nanotech, Inc.	Мелкие, сверхмелкие и наноразмерные порошки
Dendritech, Inc.	Производство дендримеров
Dendritic NanoTechnologies, Inc.	Производство дендримеров, имеющий широкий диапазон применения (например в качестве медикаментов)
EnviroSystems	Дезинфицирующие наноэмульсии для больниц
eSpin Technologies, Inc.	Производство полимерных нановолокон
Front Edge	Сверхтонкие аккумуляторы
Hysitron	Научно-исследовательские и промышленные инструменты для измерения наномасштабных характеристик: прочности, упругости, трения, износа и адгезии
Intematix Corp.	Электронные материалы; катализаторы для мембран топливных элементов
Kereos Inc.	Наночастицы для визуализации болезней и терапевтического лечения
Lumera	Полимерные материалы
Mecular Electronics Corp.	Электронные и оптоэлектронные приложения
Molecular Imprints	Инструменты для нанопечати в полупроводниковой и электронной промышленности
NanoDynamics	Наночастицы серебра, меди, никеля; наноксиды; углеродные наноструктуры
NanoElectronics	Новые наноматериалы для элементов электросхем
NanoGram Corp.	Химические соединения для компьютерных чипов
Nanohorizons	Производство тонкопленочных наноструктур на основе лицензии (Университета штата Пенсильвания, США)
NanoInk Inc.	Обнаружение сибирской язвы
NanoOpto	Наноструктуры для оптических систем
Nanophase Technologies	Подготовка и коммерческое производство нанопорошков оксидов металлов
Nanopoint	Визуализация внутренних компонентов биологических клеток с разрешением около 50 нм (в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазоне)



ЧАСТЬ IV Будущее

Таблица 12.1. Продолжение

Компания	Продукция
Nanoproducts, Inc.	Наномасштабные порошки, дисперсии и продукты на их основе
NanoSpectra Biosciences, Inc.	Неинвазивная терапия на основе нанооболочек
Nanosphere	Анализ и обнаружение нуклеиновых кислот и белков
Nanosys, Inc.	Гибкие тонкопленочные компоненты для электроники, биометариалов и солнечных батарей
Nano-Tex	Нанотехнологические ткани и покрытия
Nanotherapeutics, Inc.	Целевая доставка медикаментов с помощью наночастиц
Neo-Photonics Corp.	Наномасштабные оптические компоненты
Novation Environmental Technologies	Очистка воды наномасштабными фильтрами на основе йода
Ntera	Электронные чернила и цифровая бумага

НАНОПРОВОДА

Компания Nanosys, Inc. (Пало-Альто, Калифорния, США) использует технологию создания нанопроводов, разработанную Чарльзом М. Либером (Charles M. Lieber), профессором химии Гарвардского университета. Нанопровода делаются из материала, используемого для полупроводниковых лазеров, и позволяют обнаруживать отдельные молекулы. По оптическим свойствам они обладают заметными преимуществами по сравнению с углеродными нанотрубками.

Как уже описывалось в главе 9, нанопровода имеют огромный потенциал применения в электронике и сенсорах. И этот факт не упустили инвесторы. В ноябре 2005 г. компания Nanosys, Inc. объявила, что ей удалось продать акции на сумму более 40 млн долларов. Компания планировала использовать эти средства для продолжения исследований и массового производства продуктов с использованием разработанных ею органических наноструктур.

Производственные планы компании Nanosys, Inc. включали выпуск чипов для химического анализа в фармацевтической промышленности, топливных элементов для портативной электроники, наноструктур для компьютерных дисплеев и сложных антенн, энергонезависимой памяти для электронных устройств и твердотельных



оптических устройств. Рост финансирования за несколько последних лет показан на рис. 12.1. Компания получила несколько миллионов долларов в виде исследовательских грантов, контрактов и проектов. Недавно Nanosys, Inc. вместе с японской компанией Sharp Corporation получила финансирование на многолетние исследования дисплеев с использованием нанотехнологий.

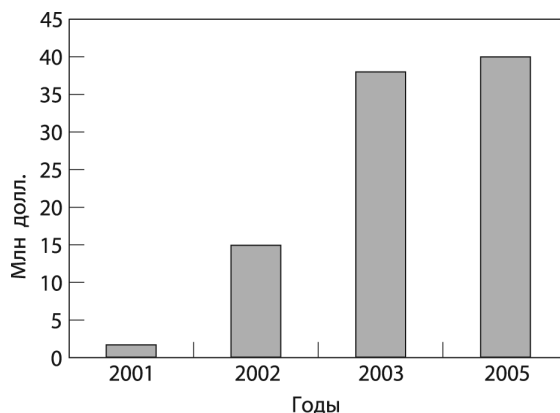


Рис. 12.1. Компания Nanosys, Inc. — история успеха в области нанотехнологий с реальными продуктами и приличным финансированием

Компания Nanosys, Inc. обладает одной из самых богатых коллекций нанотехнологий, которые защищены более чем 400 патентами и применяются во многих отраслях; по мнению редакции журнала *Journal of Nanotechnology Law and Business*, в 2005 г. она находилась в десятке лучших нанотехнологических компаний.

КЛЕТОЧНАЯ ТЕРАПИЯ

Как уже описывалось в главе 7, фуллерены можно использовать для доставки терапевтических медикаментов к заданному месту лечения, чтобы минимизировать побочные эффекты. Они могут быть сделаны таким образом, чтобы точно соответствовать специфическим поверхностным рецепторам клетки. Фуллерены могут действовать, как «перехватчики» болезней, то есть аналогично иммунной системе. С помощью таких медикаментов предполагается лечить СПИД, рак, артрит и многие другие болезни.

В настоящее время чувствительные микрочипы с ДНК могут фиксировать реакции между антибиотиками и целевыми организма-



ЧАСТЬ IV Будущее

ми. С помощью нанотрубок эти биочипы выполняют в 100 тыс. раз больше химических тестов с гораздо большей чувствительностью.

НАНОСТРУЙНАЯ ТЕХНИКА

С помощью сверхмалых нанотрубок в медицинских целях можно безболезненно (несомненный плюс) пронизывать кожу человека. Это особенно важно для пациентов, которым необходимо несколько раз в день делать анализы крови (например больных диабетом типа II).

Компания TheraFuse, Inc. разрабатывает и создает системы введения в тело человека и доставки в заданное место фармацевтических и биологических жидкостей. С 2001 г. эта компания успешно создает системы для точного измерения крошечных объемов при введении жидких медикаментов (например, часто требуется очень точно определить объем медикаментов, которые вводятся внутривенно новорожденным пациентам с помощью инъекций). В настоящее время специалисты компании стремятся создать для диабетиков специальную накладку на кожу. С ее помощью делается анализ крови и проверяется уровень содержания глюкозы, а затем при необходимости производится инъекция инсулина. Таким образом, процесс лечения диабета значительно упрощается, особенно для детей.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ УГРОЗЫ

Нанотехнологии позволяют создать невероятно чувствительные системы для обнаружения биологических угроз. Например, споры сибирской язвы можно выявлять и обрабатывать с помощью специальных нанотехнологических методов, которые способны распознавать поверхность спор. Прежние трудоемкие и длительные методы были основаны на раскалывании споры и анализе ее ДНК.

Компания NanoInk, Inc. (Чикаго, США) получила лицензию на использование технологии идентификации спор сибирской язвы с помощью сверхмалой «ручки», которая может рисовать узоры из нанолиний. Программируя с помощью компьютера узор, специфичный для уникальных черт поверхности споры, можно обнаруживать узоры, которые связываются со спорой. Именно этот принцип лежит в основе технологии компании NanoInk, Inc.

КОМПЬЮТЕРЫ

Компании — производители компьютеров и чипов были одними из первых энтузиастов использования нанотехнологий и являются их наиболее щедрыми исследователями.



Несомненно, что ноутбуки и карманные компьютеры с использованием нанотехнологий станут работать еще лучше. Их аккумуляторы с углеродными нанотрубками и наночастицами лития будут быстрее заряжаться, дольше работать и больше концентрировать энергию.

Поскольку нанотрубки — это самые лучшие из известных проводников электрического тока, их можно использовать для наиболее эффективного преобразования энергии торможения автомобиля в энергию заряда его аккумуляторов. Предполагается, что углеродные нанотрубки могут стать прекрасным материалом для сохранения водорода в топливных элементах автомобилей-гибридов. В таком случае ископаемые виды топлива и связанные с ними проблемы перестанут быть неотъемлемой частью транспорта будущего.

Можно предположить, что кремниевые чипы в ближайшие 5–10 лет станут еще более быстрыми и эффективными. Полупроводниковая промышленность инвестировала миллиарды долларов в производство кремниевой электроники. Потому наночипы станут экономически более выгодными лишь после исчерпания физических возможностей кремниевой электроники. Кроме того, ученым и инженерам придется немало потрудиться, чтобы открыть способы самосборки нанотрубок в заданную структуру электросхемы.

АССЕМБЛЕРЫ

Эрик Дрекслер (Eric Drexler), пионер в области нанотехнологий и глава Института Форсайт в Пало-Альто (Калифорния, США), предложил идею *ассемблера* (или сборщика). Ассемблер — это наномасштабный робот, который запрограммирован на сборку атомов в наноразмерные компоненты и механизмы, например рычаги, шестеренки и т. п. Как уже упоминалось в главе 3, эта идея ближе к фантастике, чем к реальности. Но если она будет реализована даже в незначительной степени, то у ученых и инженеров появится возможность создавать совершенно новые материалы. Например, такие нанороботы могли бы не только собирать пыль и грязь, но и конструировать элементы электросхем и компьютеров из отдельных атомов. Пока об этом можно только мечтать...

Группа NanoBusiness Alliance

Ученые и инженеры по определению не занимаются бизнесом. Как правило, это талантливые люди, которые направляют свои усилия на решение невероятно сложных научных и инженерных задач.



ЧАСТЬ IV Будущее

Потому для реализации своих открытий им нужна помощь со стороны опытных организаторов бизнеса. А менеджерам и антрепренерам необходимо глубокое понимание сложных деталей новых нанотехнологий. Для организации взаимодействия этих двух групп в 2004 г. усилиями наиболее крупных компаний, университетов, стартапов и других организаций была создана группа NanoBusiness Alliance. В настоящее время она насчитывает 200 членов, которые в скором будущем надеются извлечь значительную финансовую выгоду. Национальный научный фонд США (National Science Foundation — NSF) прогнозирует, что в 2015 г. рынок нанотехнологий достигнет величины 1 трлн долларов. Члены группы NanoBusiness Alliance учитывают этот факт и очень надеются стать одними из лидеров данного рынка.

Шон Мэрдок (Sean Murdock), исполнительный директор группы NanoBusiness Alliance, на заседании исследовательского подкомитета Совета по науке при Палате представителей Конгресса США в июне 2005 г. заявил, что члены группы NanoBusiness Alliance считают нанотехнологии одним из ключевых аспектов экономического роста и повышения качества жизни в XXI в. Он призвал Правительство США стать образцом в коммерциализации нанотехнологических инноваций.

Компания Lux Research/Capital — одна из научно-исследовательских инвестиционных компаний, которая очень серьезно относится к описанным выше перспективам. Она была основана в 2000 г. и с тех пор фокусирует свое внимание на тенденциях развития нанотехнологий, поиске новых идей и продуктов.

Эта и многие другие инвестиционные компании считают, что развитие нанотехнологий можно сравнить с «золотой лихорадкой», имевшей место в Калифорнии более века назад, только нынешняя лихорадка от использования нанотехнологий может принести гораздо больше выгод, чем поиск золотого песка в водоемах Калифорнии. Однако, как и во всяком смелом начинании, никто не может наверняка спрогнозировать успех или провал очередного стартапа. Несмотря на потрясающий прогресс в деле создания наномасштабных транзисторов и электросхем на основе нанотрубок, их коммерческое применение может осуществиться только спустя многие годы.

Нанотехнологии по определению являются мультидисциплинарным занятием. В этом деле один-два даже самых талантливых ученых вряд ли могут сделать заметный прорыв без химиков, физиков, биологов, материаловедов, медиков. Им не обойтись без помощи



компьютерщиков, которые способны смоделировать сложнейшие физико-химические взаимодействия на сверхмощных компьютерах. Именно такое тесное взаимодействие станет залогом успешного развития нанотехнологий. Действительно, многие бизнесмены, ученые и инженеры очень рассчитывают на продуктивность такого взаимодействия.

Внедрение

История учит нас тому, что прогресс науки и технологий всегда опирался на эволюцию инструментов. Многие специалисты связывают потенциальный успех нанотехнологий с огромными инвестициями и прогрессом в области простых, более точных и надежных наноинструментов.

Для развития и коммерциализации наноинструментов большое значение имеет кооперация научно-исследовательских коллективов университетов, компаний и национальных лабораторий. Если дорогостоящие научные установки (например, ускорители элементарных частиц и связанные с ними источники синхротронного излучения) будут доступны для широкого круга исследователей, перспективы коммерциализации научных открытий станут гораздо более реальными.

Новые специализированные инструменты дадут возможность специалистам наблюдать за наночастицами и манипулировать ими на наномасштабном уровне. Инвесторам необходимо уделить должное внимание снабжению ученых и инженеров инструментами, которые позволят сделать открытия в физике, химии и биологии наномира. Чем раньше будут сделаны инвестиции в инструментарий, тем быстрее и вероятнее будет получена выгода от новых открытий в области нанотехнологий.

На что следует обратить внимание в первую очередь

Среди новых инструментов следует упомянуть манипуляторы наночастиц и нанотрубок, ближнепольный оптический микроскоп и атомно-силовой микроскоп.

МАНИПУЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ

Инструменты для манипулирования отдельными молекулами и исследования их свойств имеют огромное значение для определения параметров наноматериалов. Как уже говорилось в главах 5



ЧАСТЬ IV Будущее

и 6, биология и медицина получают огромный импульс развития, если ученые и инженеры научатся управлять молекулярными химическими и физическими реакциями на наномасштабном уровне. Таким образом, можно будет создавать специальные полимеры, адсорбенты и катализаторы (например белки и ферменты) и настраивать их для специфических потребностей отдельных пациентов.

Прежде измерения молекулярных свойств носили усредненный характер, поскольку ученые не имели возможности исследовать поведение отдельных молекул. Хотя усредненные характеристики не утратили своего значения, их недостаточно для понимания тонких деталей поведения молекул.

Некоторые перечисленные ниже инструменты и методы исследования теперь позволяют получить новые сведения о поведении отдельных молекул:

- уникальные электрические и механические свойства углеродных нанотрубок были определены с помощью измерений отдельных нанотрубок;
- стали возможными точные измерения перемещений молекул (например, удастся распознавать антитела и антигены, а также комплементарные нити ДНК);
- удалось выявить природные молекулярные механизмы-моторы, ответственные за транскрипцию ДНК, клеточный транспорт и сокращение мышц;
- оптические пинцеты позволяют непосредственно измерять свойства молекул и манипулировать динамикой и конфигурацией свертки белка.

НОВЫЕ И УЛУЧШЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Ученые и инженеры университетов и научно-исследовательских лабораторий изобретают измерительные инструменты и манипуляторы, а руководители промышленных предприятий внимательно наблюдают за прогрессом в этой области и стремятся инвестировать огромные средства в коммерциализацию наиболее перспективных инструментов.

Например, в результате взаимовыгодного сотрудничества Университета Вашингтон в Сент-Луисе (штат Миссури, США) и компании Zyvex Corporation удалось создать новый инструмент для манипулирования наномасштабными объектами и одновременной их визуализации. Этот инструмент позволяет растягивать, сгибать, скручивать и сворачивать углеродные нанотрубки в трехмерные кон-



фигурации. Дешевый манипулятор способен с высокой точностью выполнять операции по перемещению и сборке нанокomпонентов.

Компания EnviroSystems в Сан-Хосе (штат Калифорния, США) создала наноразмерное дезинфицирующее вещество с улучшенными характеристиками. В отличие от традиционных отбеливающих дезинфицирующих веществ, продукт EcoTru®, созданный компанией, не оказывает раздражающего или коррозионного действия. Поэтому он может использоваться в больницах без специальных предупредительных маркеров Агентства по защите окружающей среды США. В настоящее время продукт EcoTru® является единственным нераздражающим и некоррозионным дезинфицирующим веществом на рынке.

В EcoTru® используются наночастицы, которые настолько малы, что могут проникать внутрь бактерий и разрушать их изнутри. Эти наночастицы действуют как высокоточное «умное» оружие, которое поражает только бактерии и микробы, но не влияет на клетки человека и животных. Кроме того, они не являются токсичными. Действительно, EcoTru® широко рекламируется для использования в больницах, поликлиниках, лабораториях и т. п., поскольку обладает перечисленными ниже характеристиками:

- 100-процентная эффективность против вируса иммунодефицита человека, стафилококка, кишечной палочки и многих других вирусов и бактерий;
- за 5 минут убивает бациллу туберкулеза;
- для его использования не требуется защитной экипировки;
- не обладает токсичным эффектом;
- не воспламеняется;
- выполняет одновременно очистку и дезинфекцию.

Продукт EcoTru® прекрасно очищает и дезинфицирует поверхности металлов, пластиков, синтетических веществ, резины, стекла и окрашенных поверхностей. Поскольку этот продукт не обладает коррозионным действием, он может использоваться для очистки деликатного оборудования. При использовании EcoTru® в качестве предоперационного антисептика в Африке для лечения 500 пациентов зафиксировано отсутствие каких-либо послеоперационных инфекций и осложнений в 100% случаев. Хотя до массового использования он должен еще пройти тщательное тестирование, предварительные результаты уже привлекли пристальное внимание медиков.

Изменив несколько молекул в стандартном промышленном дезинфицирующем средстве, специалисты компании EnviroSystems смогли



ЧАСТЬ IV Будущее

создать совершенно новое антибактериальное средство. Как видите, преобразование традиционных продуктов на наномасштабном уровне позволяет создавать необычайно полезные продукты с совершенно новыми свойствами.

Локальные центры нанотехнологий

Многие дальновидные политики, ректоры университетов и главы компаний понимают значение лидерства в нанотехнологической отрасли и стремятся стать основателями новой нанотехнологической Силиконовой долины. В Остине (штат Техас, США) на базе Университета штата Техас и в Хьюстоне (штат Техас, США) на базе Университета Райс уже создано несколько успешных стартапов, которые работают в области развития нанотехнологий.

Еще один крупный центр нанотехнологий располагается в Олбани (штат Нью-Йорк, США), где сосредоточено около 2,75 млрд частных инвестиций, направленных на исследования нанотехнологий и их применение в полупроводниковой технике для создания новых наноматериалов и т. п.

Например, нидерландский холдинг ASML (лидер в области иммерсионной литографии) и компания IBM совместно вложили 400 млн долларов в создание нового научно-исследовательского центра в Олбани. Это будет первый крупный неевропейский филиал ASML. В 2002 г. аналогичный центр в Олбани построила компания SEMATECH International, являющаяся одной из ведущих компаний в области полупроводниковой техники. Она вложила в этот проект около 400 млн долларов, а власти штата внесли вклад в размере около 75 млн долларов.

Международные усилия

Нанотехнологии — это не очередная забава ученых и не научная фантастика. В настоящее время они являются областью щедрых инвестиций со стороны крупнейших компаний и холдингов всего мира.

УСИЛИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА

В 2004 г. крупные европейские компании, в частности Philips, Nokia, Ericsson, AMD и IBM, приняли решение о ежегодном инвестировании не менее 6 млрд долларов на переход от микро- к нанотехнологиям, чтобы Европа и в будущем оставалась технологическим лидером. В 2004 г. был создан Европейский совещательный совет



в области нанoeлектроники (European Nano-Electronics Initiative Advisory Council), который сформулировал основные научно-исследовательские цели.

- поддержка европейских исследований и инвестиции в нанoeлектронику;
- ускорение инноваций и использования научно-исследовательских технологий;
- повышение эффективности и конкурентоспособности европейской нанoeлектроники;
- устранение препятствий для координации и ускорения выхода на рынок новых технологий;
- сбалансированное развитие инноваций и планирования с согласованием новых технологий и регуляторной политики Евросоюза;
- повышение привлекательности Евросоюза для науки и промышленности;
- повышение уровня восприятия, понимания и признания нанотехнологий в обществе.

Только время расставит все по своим местам и покажет, насколько правильными были те или иные решения политиков.

ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ БИОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В рамках европейской программы Network of Excellence в консорциуме Nano2Life около 200 ученых, 23 организаций и 12 стран объединили свои усилия с промышленными партнерами для определения широкого круга региональных центров, дисциплин, квалификации и опыта для решения нанотехнологических задач. Консорциум Nano2Life функционирует с 2004 г., и планировалось, что на его основе будет создан Европейский институт бионанотехнологий. Одна из его основных целей — поддержка совместных научно-исследовательских проектов для выполнения четырех основных задач: функционирования, обнаружения, интеграции наноустройств и управления ими. Начиная с апреля 2004 г. было создано около 30 научно-исследовательских проектов, а 20 из них уже финансируется Европейским союзом.

В консорциуме Nano2Life участвуют организации из Дании, Германии, Греции, Франции, Швеции, Израиля, Австрии и многих других стран. В его деятельности также собираются принять активное участие многие известные промышленные компании и недавно возникшие стартапы.



ЧАСТЬ IV Будущее

Прогнозы на будущее

Компания Lux Research в своем отчете *The Truth about Nanotech Tools* (Правда о нанотехнологических инструментах) подытожила мнения руководителей более 20 ведущих компаний — производителей нанотехнологических инструментов, а также 49 корпораций, университетов и стартапов США, являющихся лидерами в области исследования нанотехнологий.

Их интервью были проанализированы специалистами в области нанотехнологий и представлены в графическом виде, как показано на рис. 12.2.



Рис. 12.2. Нанотехнологии являются результатом взаимодействия многих дисциплин

В 2005 г. рынок нанотехнологических инструментов состоял из инспекционных образцов. Они стали результатом первых лет развития нанотехнологического бума, когда примерно в одно и то же время начали появляться первые нанотехнологические центры.



В отчете компании Lux Research показано, что в настоящее время доступны более дешевые и эффективные инструменты для контроля качества новых наноматериалов, но производители нанопродуктов часто довольствуются сканирующими зондовыми микроскопами и электронными микроскопами. Теперь рынок практически насытился, и количество новых исследовательских инструментов вскоре уменьшится.

Важно подчеркнуть, что для будущего развития нанонауки и нанотехнологий необходимо разрабатывать, создавать и использовать инструменты с *улучшенными* возможностями. Только расширяя возможности наноинструментов, можно добиться новых успехов в здравоохранении, электронике, охране окружающей среды и упрочнении национальной безопасности.

Что стоит посмотреть

В программах телепередач часто можно увидеть рекламные рубрики в стиле «что стоит посмотреть». Нанотехнологии — это именно то, «что стоит посмотреть» в науке и технике будущего. Ожидается значительный прогресс нанотехнологий в ближайшем будущем. Во-первых, в 2015 г. доходы от использования нанотехнологий превысят 1 трлн долларов США. Во-вторых, в будущем нанотехнологии проникнут практически во все области жизни, начиная от предметов личного пользования (косметика, одежда и т. п.) и заканчивая медикаментами, топливными элементами и новыми способами передачи энергии.

Некоторые эксперты рассматривают наноматериалы как основную область инвестиций в ближайшие 10 лет. Медицина кажется наиболее привлекательной областью, но сложности, связанные с регуляторной политикой FDA, могут замедлить внедрение новых нанотехнологий в медицине. Однако заманчивые свойства наноматериалов в состоянии компенсировать все неприятности и сложности, связанные с их внедрением.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сколько процентов компаний в реестре-индексе Dow Jones используют или создают нанопродукты?
 - (а) 25%;
 - (б) 40%;
 - (в) 50%;
 - (г) 62%.



ЧАСТЬ IV Будущее

2. Компании, работающие в области нанотехнологий, фокусируют свои усилия в нанoeлектронике, наноматериалах, а также:
 - (а) переработке нефти;
 - (б) морской геологии;
 - (в) бионанотехнологиях;
 - (г) диетических напитках.
3. Организации из Дании, Германии, Греции, Франции, Швеции, Израиля, Австрии участвуют в исследованиях нанотехнологий в рамках консорциума:
 - (а) NanoNow;
 - (б) Nano or Bust;
 - (в) Living the Nano Life;
 - (г) Nano2Life.
4. Какой из перечисленных ниже продуктов использует приставку «нано-» в качестве маркетингового приема?
 - (а) супержевательная резинка с нанопузырьками;
 - (б) наносалфетки для коктейля;
 - (в) проигрыватель iPod nano;
 - (г) нанокольца в нос.
5. В 2015 г. доходы от использования нанотехнологий превысят:
 - (а) 100 млн долл. США;
 - (б) 500 млн долл. США;
 - (в) 800 млн долл. США;
 - (г) 1 трлн долл. США.
6. В 2005 г. рынок нанотехнологических инструментов состоял в основном из:
 - (а) стоматологических инструментов;
 - (б) диагностических инструментов;
 - (в) тостеров;
 - (г) крошечных роботов.
7. Сколько членов насчитывает группа NanoBusiness Alliance?
 - (а) 100;
 - (б) 165;
 - (в) 200;
 - (г) 231.



8. Нанопровода, которые способны обнаруживать отдельные молекулы, имеют большой потенциал применения:
 - (а) в оптических сенсорах;
 - (б) в кремах против старения;
 - (в) в кеглях для боулинга;
 - (г) в спасательных жилетах.
9. Инвесторы стремятся найти способы:
 - (а) снижения прибылей;
 - (б) создания нанотехнологических продуктов;
 - (в) повторения кризиса с Internet-компаниями;
 - (г) улучшения питания на авиарейсах.
10. Наноинструменты помогают ученым создавать и использовать крошечные:
 - (а) актуаторы;
 - (б) курсоры;
 - (в) карбонаторы;
 - (г) инновации.

Глава 13

Нанотоксичность и общество

Убийственные организмы, оружие Судного дня, ученые-монстры и вышедшие из-под их контроля изобретения часто становятся темой научно-фантастических произведений. Их можно встретить в комиксах, книгах, фильмах и компьютерных играх. Порой даже кажется, что все на свете способно разрушить мир!

В результате люди привыкли искать «темную сторону» любой новой технологии. Все и вся подвергается сомнению и часто сопровождается исковыми заявлениями в суд — от очень горячего кофе до опасных медикаментов.

Средства массовой информации с готовностью тиражируют эти сообщения, и любое (даже самое незначительное) событие часто становится громким скандалом. Неудивительно, что появление любой новой технологии сопровождается как восхищением, так и скепсисом.

Недавние исследования показали, что нанотехнологии в целом позитивно воспринимаются обществом. Хотя многие не обладают достаточными знаниями о них, но большинство все же ожидают положительных результатов их применения. В прошлом появление новых материалов также сопровождалось позитивным восприятием, и негативное отношение появлялось гораздо позже, когда обнаруживались непредвиденные последствия. Любое открытие — это всегда палка о двух концах: оно может нести прогресс и, если недостаточно хорошо изучено, открыть ящик Пандоры с непредсказуемыми последствиями.

Если открытие несет какие-то преимущества, то это не означает, что оно абсолютно безвредно. Совсем недавно мы восхищались свойствами асбеста, талидомида (транквилизатора с вредным побочным действием), фреоном, ДДТ и т. д. И только после возникновения больших проблем в связи с их использованием пришло осознание потенциальных опасностей, сопровождающих всякое новое открытие.



Некоторые критики-скептики считают, что технологии, которые смогут избавить нас от рака или решить глобальные энергетические проблемы, одновременно будут в состоянии погубить жизнь на нашей планете. Они протестуют против развития биологических нанотехнологий. На самом деле никто из здравомыслящих ученых не хочет гибели человечества. И только время покажет, какие выгоды и угрозы может принести внедрение нанотехнологий.

Билл Джой (Bill Joy), один из основателей и ведущих специалистов компании Sun Microsystems, в апреле 2000 г. в статье *Why the Future Doesn't Need Us* («Почему будущее в нас не нуждается?»), опубликованной в журнале *Wired*, заявил, что текущие темпы технологического прогресса несут реальную угрозу будущему человечества. Среди основных угроз он видит генетическую инженерию, нанотехнологии и робототехнику.

Хотя никто из смертных не обладает даром предвидения, но все же сценарии крушения мира представляются явно преувеличенными. Конечно, любое научное открытие может быть использовано в пагубных целях, но из-за этого все же не следует отказываться от полезных открытий. В тесном международном сотрудничестве человечество должно уделять больше внимания их изучению, оценке и стандартизации. 50 лет назад казалось, что гибель человечества в результате ядерной войны неизбежна, но мы еще существуем, хотя риск по-прежнему высок.

Нам нужно тщательно изучать все потенциальные проблемы любой новой технологии и продвигаться вперед с большой осторожностью. Одновременно следует признать, что прогресс достигается только за счет выхода за привычные рамки.

Нанотехнологии и общество

Индустриальный век принес человечеству множество новых открытий, материалов и продуктов. На смену товарам из дерева и бумаги пришли пластиковые продукты на основе углеводов. Прежние бумажные продуктовые контейнеры постепенно были вытеснены более удобными пластиковыми, которые не промокают и сохраняют форму.

В XXI в. наука и техника демонстрируют потрясающие темпы роста. Однако часто за кадром остается тот факт, что развитие порой опережает осознание их влияния на общество. Новинки весьма привлекательны, и все хотят находиться на передовой линии научно-



ЧАСТЬ IV Будущее

технического прогресса. Мало кто думает о потенциально вредном влиянии любой «крутой» новинки. Порой все «новое и усовершенствованное» воспринимается как «лучшее»!

В конечном итоге, за такую беспечность приходится расплачиваться. Например, воздух, вода и почва загрязняются смесью вредных веществ. Многие страны мира вынуждены тратить огромные средства на защиту окружающей среды от загрязнения, контроль деятельности промышленных предприятий и распространение среди населения знаний о новых угрозах. На все это требуется время. Медленно, но неизбежно приходит осознание, что судьбу Земли нельзя слепо доверять неосторожным и недальновидным руководителям.

С появлением нанотехнологий все большее число ученых, политиков и общественных деятелей пытаются спрогнозировать вредное влияние новых технологий на общество. Все открытия в области нанотехнологий кажутся чудесными и многообещающими, но опыт прошлого учит нас, что некоторые угрозы можно и нужно выявлять на самых ранних стадиях.

Растворимость и токсичность

В ранних оценках рисков от применения новых нанотехнологий большое внимание уделялось растворимости наночастиц. Дело в том, что легкорастворимые молекулы могут проникать в биологические системы и распространяться в окружающей среде.

В главе 1 мы уже познакомились с фуллереном C_{60} . С момента открытия этой молекулы в 1985 г. было известно, что молекулы фуллерена могут образовывать наномасштабные кластеры, которые очень активны в водной среде. Растворимые в воде кластеры фуллерена продемонстрировали свою *цитотоксичность* (клеточную токсичность, то есть способность отравлять и убивать клетки) и стали причиной повреждения тканей мозга рыб.

Однако ученые Университета Райс, Вики Колвин (Vicki Colvin), Дженнифер Уэст (Jennifer West) и Джо Хьюз (Joe Hughes), обнаружили, что цитотоксичность можно снизить за счет присоединения небольших молекулярных фрагментов к поверхности фуллерена. Этот процесс называется *функционализацией*. Токсичность таких функционализированных молекул была на 50% меньше, чем в аналогичных опытах на рыбах при концентрации около 20 частей на миллиард. На рисунке 13.1 показана схема связей между функционализацией и токсичностью.

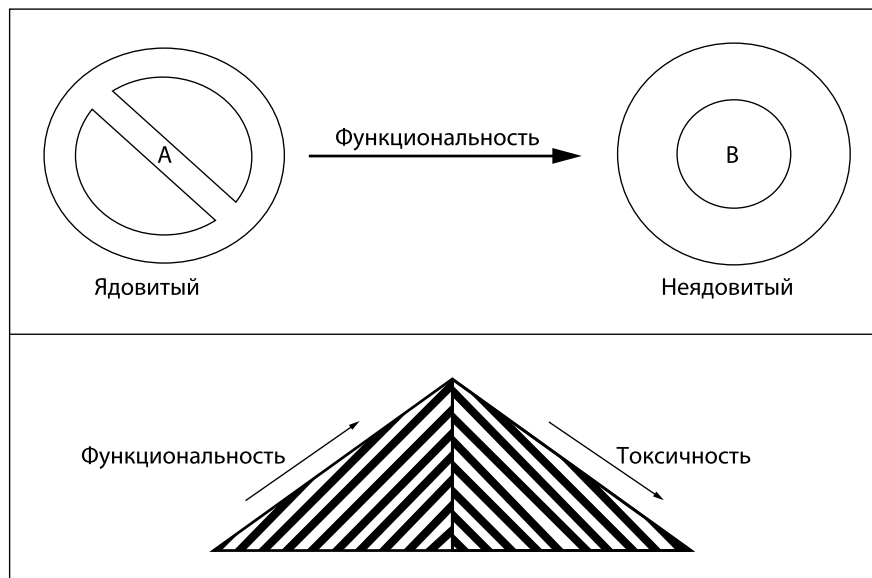


Рис. 13.1. С ростом функционализации нанотоксичность падает

Метод функционализации усиливается, если к поверхности фуллерена добавлять все больше и больше фрагментов молекул. Этот эксперимент демонстрирует, что токсичность наночастиц можно заметно снизить довольно простыми методами.

Однако для снижения риска токсичности наночастиц необходимо четко понимать особенности строения их поверхности и свойства. Конечно, способ изменения свойств поверхности одних наночастиц может оказаться недостаточно эффективным для других частиц, материалов, устройств и процессов. Чтобы полностью использовать потенциал наночастиц в конкретном приложении, могут потребоваться изменения другого рода (например, механических, реактивных или электромагнитных свойств).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА КЛЕТОЧНОМ УРОВНЕ

Изучение механизма токсикологического влияния искусственно полученных наночастиц в жидкой среде — цель исследований во многих областях нанонауки. Токсичность аэрозолей для дыхательной системы живых организмов широко известна ученым, но очень мало изучена токсичность наночастиц в жидкой среде.



ЧАСТЬ IV Будущее

Ученые стремятся выяснить, как использовать поверхностные покрытия для снижения токсичности наночастиц. Эксперименты показали, что молекулы фуллерена в растворах с концентрацией около 100 частей на миллион образуют скопления с гидрофильной (то есть способной к растворению в воде) поверхностью. Этот результат очень важен, так как сам по себе фуллерен является гидрофобным (то есть водоотталкивающим и плохо растворимым). Такая кластеризация фуллерена и его последующая растворимость имеет большое значение, поскольку кластеры легко растворяются и распространяются в естественных водоемах.

Некоторые другие наночастицы могут играть роль бактерицидов, то есть агентов против грамположительных и грамотрицательных бактерий. Они могут использоваться как дезинфицирующие вещества в больницах, поскольку легко переносятся в воздушной среде и проникают сквозь мембраны.

ОБРАЗОВАНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

На токсичность наночастиц влияет не только их размер, но и другие факторы: химический состав, поверхностный заряд, форма, структура и т. д.

В экспериментах с фуллереном была отмечена их цитотоксичность при концентрации около 20 частей на миллиард. Это достаточно высокое значение по сравнению с другими цитотоксичными химикатами. Однако токсичность фуллерена связана и с другими явлениями, например образованием производных химических веществ.

 Образование производных химических веществ, или **дериватизация** (derivatization), — это явление преобразования химического соединения в *производный* продукт с аналогичной химической структурой.

Производные химические продукты появляются в результате некоторой химической реакции. При этом исходное вещество А превращается в вещество В с другими свойствами: реактивностью, температурой кипения и плавления, растворимостью и химическим составом. С помощью образования производных химических веществ можно изменять нежелательные свойства наночастиц, например их токсичность.

Токсичность фуллерена влияет на клеточные мембраны из-за присутствия свободных радикалов. Эксперименты показывают, что это влияние можно снизить, используя производные химические вещества, полученные с помощью фуллерена.



Аналогичные исследования ведутся с наночастицами оксидов кварца, титана и железа с целью выявления способов снижения их токсичного влияния на окружающую среду.

МОБИЛЬНОСТЬ

Еще один глобальный риск применения нанотехнологий связан с чрезвычайно высокой мобильностью наночастиц. Благодаря своим сверхмалым размерам наночастицы могут проникать практически во все. Представьте себе нанопыль, распространение которой невозможно остановить никакими средствами. Это дает преимущества в борьбе с болезнями и вирусами, но может вызвать большие проблемы при защите окружающей среды.

В главе 7 уже упоминались способы защиты окружающей среды с помощью наночастиц железа. Но прежде чем широко использовать их, нужно научиться восстанавливать наночастицы железа после очистки токсичных отходов.

Однако это не всегда необходимо. Чжан Вейсянь (Wei-xian Zhang) из Университета Лихай заявляет, что железо уже присутствует в окружающей среде, а потому наночастицы железа не нужно восстанавливать. Наночастицы с другим химическим составом могут иметь разную реактивность в зависимости от условий их применения. Несмотря на кажущуюся безопасность, их потенциальную токсичность необходимо очень тщательно проверять.

При оценке потенциальных угроз, которые несут новые нанотехнологии, следует учитывать богатый опыт, полученный путем проб и ошибок при использовании ДДТ и других «чудодейственных» химикатов прошлого.

Международный совет по нанотехнологиям

Недавно в Университете Райс (США) был основан Международный совет по нанотехнологиям (International Council on Nanotechnology — ICON¹), занимающийся оценкой, обсуждением и принятием мер по снижению риска для здоровья и окружающей среды от использования новых нанотехнологий. Для выполнения этой миссии ICON сотрудничает с учеными, инженерами, промышленниками и представителями общественных организаций, работающих в области охраны окружающей среды. Как уже упоминалось в главе 7, чле-

¹ К сожалению, представители России в него не входят. — *Прим. ред.*



ЧАСТЬ IV Будущее

ны ICON активно исследуют процессы взаимодействия наночастиц с клетками, разрабатывают стандарты и терминологию, а также выполняют анализ восприятия обществом потенциальных рисков.

БАЗА ДАННЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Комбинируя доступные информационные ресурсы, ICON образует единую информационную сеть научно-исследовательских проектов с центральным репозитарием данных. Ученые Университета Райс совместно с сотрудниками Министерства энергетики и Национальной лаборатории Оук-Ридж создали единую базу данных о влиянии наноматериалов на окружающую среду и здоровье людей. В августе 2005 г. был запущен каталог научной литературы (<http://icon.rice.edu/research.cfm>), который позволяет ученым и политикам получать самую свежую информацию о потенциальной опасности наноматериалов и нанотехнологий.

Через Интернет любой желающий может получить свободный доступ к этой базе данных под эгидой Консультативного совета в области нанотехнологий (Consultative Board for Advancing Nanotechnology — CBAN). Таким образом, не только ученые, но и любознательные посетители со всего мира могут в интерактивном режиме составлять запросы и получать информацию о потенциальных опасностях применения нанотехнологий.

Для широкой общественности ICON планирует периодически выпускать пресс-релизы, посвященные наиболее важным научным результатам и публикациям. Кроме того, регулярно обнародуются отчеты о выполненных исследованиях в отношении вредного воздействия наноматериалов на окружающую среду и здоровье людей, будь то квантовые точки из селенида кадмия или что-либо иное.

Основная цель ICON — создать доступный для всех банк данных с описанием последних достижений в изучении нанотехнологий и их влияния на окружающую среду. Это даст возможность наилучшим образом организовать внедрение инноваций, разработку и применение стандартов и правил.

Устойчивое развитие

В рамках Национальной нанотехнологической инициативы (NNI) разработан план устойчивого развития нанотехнологий и оценки их влияния в охране окружающей среды, здравоохранении, юриспруденции, этике и других аспектах общественной жизни. Интенсивные



исследования такого влияния ведутся с учетом всех возможных преимуществ и недостатков новых научных открытий и их применения на практике.

Правительственные и частные научно-исследовательские организации тесно сотрудничают в рамках NNI для формулирования регуляторной политики в отношении производства и использования наноматериалов. При обнаружении пробелов в правилах необходимо принимать неотложные меры для их устранения.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ

Национальный институт охраны труда США (National Institute of Occupational Safety and Health) планирует подготовить и выпустить документ с обзором практического опыта работы с наноматериалами.

Как уже упоминалось в главе 2, ученые и инженеры стремятся создать новые стандарты измерений на наномасштабном уровне, которые позволят надежно сравнивать результаты их работы. Упомянутый документ с обзором практического опыта работы с наноматериалами даст возможность повысить безопасность труда в области нанотехнологий. Специалисты надеются, что негативное отношение общества к нанотехнологиям значительно уменьшится после выхода этого отчета, в котором подытожен продолжительный опыт использования нанотехнологий в разных областях деятельности.

ОТНОШЕНИЕ ОБЩЕСТВА

Для сбалансированного развития нанотехнологий необходимо, чтобы правительства стран мира уделяли должное внимание реакции общества. Ниже перечислены наиболее важные аспекты общественной жизни, определяющие отношение общества к нанотехнологиям:

- доступ к преимуществам нанотехнологий;
- влияние на занятость;
- новые методы лечения и медикаменты;
- влияние на производство;
- влияние на здоровье и окружающую среду;
- неприкосновенность личности и частной собственности (доступ к личной информации с помощью наносенсоров).

Ответственное развитие нанотехнологий означает, что правительство должно установить каналы обмена информацией с обществом с помощью NNI. Настороженное же отношение к нанотехнологиям объясняется отчасти тем, что во многих научно-фантастических про-



ЧАСТЬ IV Будущее

изведениях описываются отрицательные последствия неконтролируемого развития новых технологий. Открытый доступ к информации позволит обществу и правительствам принимать правильные решения и заложить надежные основы взаимного доверия.

В нашем бурно развивающемся мире мы просто перегружены информацией: мнениями, данными и идеями. В плотном потоке информации часто трудно отличить правду от имитации, основанной на слухах и домыслах. Понимание и восприятие новых технологий являются ключевыми факторами успешного внедрения новых методов и материалов в повседневную жизнь.

ПОСТЕПЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

До того как правительство окончательно «расставит все по своим местам» в отношении применения нанотехнологий, необходимо пропагандировать *плавное* и *постепенное* внедрение их в повседневную жизнь. Это не значит, что нужно тормозить их проникновение в нашу жизнь, надо лишь внимательно следить за всеми аспектами этого процесса. Прежде чем использовать нанотехнологии в производстве, нужно учесть все риски, найти способы их устранения для повышения безопасности труда, а также создать новые стандарты безопасного производства и использования нанопродуктов во всех отраслях деятельности человека.

Окружающая среда, здравоохранение и безопасность

В рамках инициативы NNI прилагает активные усилия для оценки влияния нанотехнологий на окружающую среду, здравоохранение и безопасность. Масштаб этих исследований увеличивается с появлением новых наночастиц, наноструктур, наноматериалов и нанопродуктов.

Среди приоритетных проектов NNI в этом направлении следует отметить:

- изучение потенциальных рисков наноматериалов для здоровья;
- интеграцию усилий Национального института защиты окружающей среды США, Национального института охраны труда США, Управления по охране окружающей среды США, Министерства обороны США, Министерства энергетики США и Национального научного фонда;
- создание новых стандартов совместно с Национальным институтом стандартов США;



- обмен информацией между членами NNI;
- определение и ранжирование приоритетов в научно-исследовательской деятельности для принятия решений в регуляторной политике;
- поддержку тесного сотрудничества правительственных, коммерческих и научных организаций.

Выполнение этих задач координируется Рабочей группой по исследованию влияния нанотехнологий на окружающую среду и здоровье (Nanotechnology Environmental and Health Implications Working Group — NEHIWG) в тесной кооперации с другими нанотехнологическими и регуляторными агентствами. Одна из целей этой рабочей группы — изучить весь жизненный цикл наноматериалов и оценить степень их влияния на окружающую среду.

ТЕКУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ NNI

В 2004 г. на финансирование научно-технической деятельности в области здравоохранения и охраны окружающей среды в рамках NNI было выделено 105,8 млн долларов США, или около 11% от общего финансирования NNI. В 2006 г. в рамках еще одной программы, объединившей усилия 23 правительственных институтов США, было также выделено 39 млн долларов для изучения влияния нанотехнологий на окружающую среду и здоровье.

Для оценки влияния искусственных наночастиц сначала были предприняты попытки изучить, какое воздействие оказывают наночастицы естественного происхождения. К ним, в частности, относятся песочная пыль в пустынях, вулканический пепел, дым лесных пожаров, бактерии и вирусы. Кроме того, традиционные промышленные процессы также являются источниками наночастиц (это, например, сажа от продуктов сгорания, выхлопные газы, летучие краски и пары сварочного припоя).

Риск использования наночастиц прямо пропорционален уровню токсичности и длительности их воздействия:

РИСК = ТОКСИЧНОСТЬ × ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ.

Например, если токсичность наночастиц невелика, а время воздействия огромно (скажем, несколько лет), то риск также будет значительным. Чем больше токсичность, тем больше риск, и наоборот — чем меньше токсичность, тем меньше риск. Аналогично чем больше длительность воздействия, тем больше риск, а чем меньше длительность воздействия, тем меньше риск.



ЧАСТЬ IV Будущее

В настоящее время риск воздействия искусственных наночастиц (например углеродных нанотрубок) ограничивается только сотрудниками научно-исследовательских лабораторий, в которых они создаются или изучаются. Однако эта ситуация может измениться уже в ближайшее время, и человечество должно быть готово к таким переменам.

ОЦЕНКА РИСКА

Профессор Марк Визнер (Mark Wiesner) из Университета Дьюк уже сейчас тщательно изучает токсичность различных наноматериалов. В настоящее время ученые данного университета выполняют сравнительный анализ пяти наноматериалов: однослойных углеродных нанотрубок, фуллеренов, квантовых точек, наночастиц алюминия и диоксида титана. Исследование посвящено рискам, которые возникают на стадии производства этих наноматериалов, а не рискам, связанным с их использованием.

Тестируются исходные материалы, готовая продукция и промышленные отходы, полученные при разных температурах и давлении. Сведения об их свойствах закладываются в базу данных и затем подвергаются сравнительному анализу для определения относительного риска в связи с летучестью, воспламеняемостью, токсичностью и мобильностью.

Результаты экспериментов показали, что риск производства перечисленных выше наноматериалов сравним с рисками производства многих стандартных материалов. На рисунке 13.2 в графическом виде представлены результаты этого анализа.

Такому же анализу следует подвергнуть косметику и солнцезащитные кремы с наночастицами, поскольку их использование связано с длительным временем воздействия.

Аналогичные исследования в рамках NNI должны помочь разобраться в процессах, происходящих в наноматериалах на клеточном и молекулярном уровне, с помощью экспериментов *in vivo* и *in vitro*; расширить представления о взаимодействии наноматериалов с окружающей средой; определить потенциальные риски для окружающей среды и здоровья людей; выработать методы контроля за использованием наноматериалов и стандартные методы безопасной работы с ними.

Тесное сотрудничество всех перечисленных выше институтов (NNI, NIOSH, NEHWG и т. п.) позволит подытожить накопленный опыт и выработать единые правила и нормы безопас-



ности труда при работе с наноматериалами для передачи их научно-исследовательским, промышленным и общественным организациям.

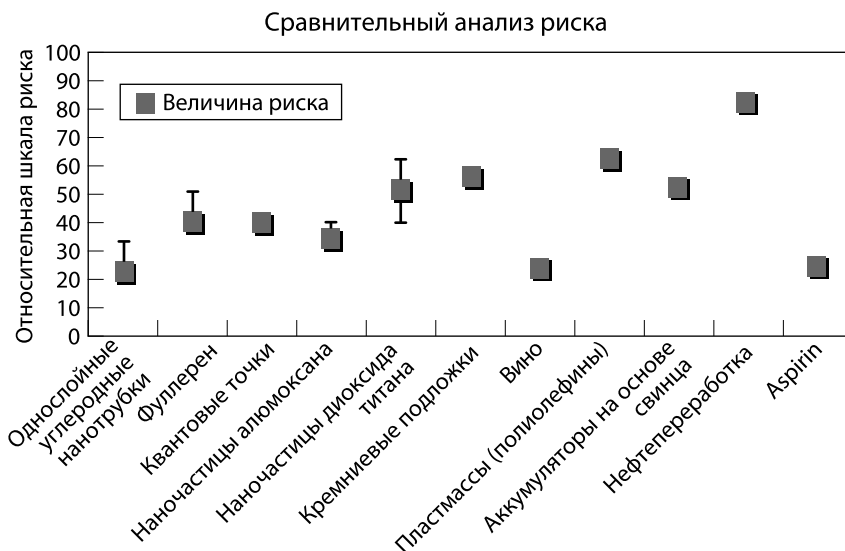


Рис. 13.2. Риск при производстве наноматериалов не превышает риска при производстве многих стандартных материалов

Распространение информации

Для успешного представления новых достижений в области нанотехнологий всю публично распространяемую информацию необходимо подавать четко сформулированной. Конкретные сведения об открытиях, технологиях и их прикладном значении надо отделять от маркетинговых уловок и приукрашиваний. Не следует преувеличивать значение нанотехнологий и превращать их описание в научно-фантастическое произведение. Реальные достижения науки и техники сами по себе настолько удивительны, что не стоит вносить путаницу излишними домыслами.

Нанотехнологии и нанопродукты нужно представлять с той же степенью конкретности их практического предназначения, как, например, телефон, компьютер или вакцину. Обывателям скучно вникать в подробности функционирования новых продуктов. Наоборот, они, как персонаж известного фильма «Джерри Магу-



ЧАСТЬ IV Будущее

айер» (*Jerry Maguire*), просят: «Покажи мне деньги!» («Show me the money!»). Людям интересно знать, как новые нанотехнологии и нанопродукты улучшат их жизнь, а не как они были получены и как устроены.

ОБРАЗОВАНИЕ

Нанотехнологии соприкасаются с обществом в таких областях деятельности, как наука, техника, экономика, культура, этика, право, национальная безопасность и, конечно, образование.

Появление новых методов создания материалов и компонентов в стиле «снизу вверх» (начиная с наномасштабного уровня) неизбежно скажется на образовательных методиках и требованиях. В них необходимо будет учесть огромный объем научной и технологической информации, новые регуляторные и этические нормы.

В контексте повышения эффективности образования в рамках NNI предполагается решать следующие задачи:

- способствовать обмену информации между разными дисциплинами;
- исследовать восприятие нанотехнологий обществом;
- исследовать влияние нанотехнологий на окружающую среду, стандарты жизни и конкурентоспособность;
- вовлекать студентов колледжей и университетов в процесс исследования нанотехнологий в разных отраслях деятельности.

Только учитывая все возможные направления развития нанотехнологий, человечество сможет добиться решения поставленных задач и преодолеть трудности на этом пути. Такие предосторожности позволят использовать достижения нанотехнологий наиболее безопасным и хорошо продуманным способом.

Международное сотрудничество

Совершенно очевидно, что исследования в такой важной области, как нанотехнологии, требуют максимальных усилий всего мирового сообщества. Чтобы избежать ошибок и недопонимания, нужно наладить открытый обмен информацией и откровенную дискуссию по вопросам энергетики, охраны окружающей среды, здравоохранения и безопасности. Успешной совместной работе в этих направлениях будет способствовать развитие информационных технологий, использования ресурсов и управления бизнесом.



Некоторые страны уже активно начали создавать научно-исследовательские альянсы с общими интересами в нанотехнологиях. В 2005 г. Канада инвестировала 5,5 млн долларов в совместные с Индией проекты, посвященные биотехнологиям и нанотехнологиям.

В 2000 г. Национальный научный фонд США оказал финансовую помощь организаторам международной рабочей встречи представителей 25 стран мира и Европейского союза. В результате этой встречи была опубликована совместная декларация о намерениях участвовать в совместных исследованиях и всячески поддерживать развитие нанотехнологий.

В январе 2006 г. в Майами (штат Флорида, США) прошел первый международный симпозиум по нанотоксикологии. Программа включала презентации и дискуссии по поводу токсичности наноматериалов и антиоксидантов, специфической реакции тканей на их воздействие, обнаружения и очистки наночастиц.

Успех всякого нового начинания и международных исследований, в том числе в области нанотехнологий, зависит от четкого и конкретного планирования всех действий. Специалистам предстоит выполнить огромную работу по согласованию интересов, преодолению препятствий и координации усилий.

Риски и выгоды

Некоторые критики считают, что молекулярная инженерия может оказать непредсказуемое влияние на общество (следует отметить, что ученые воспринимают и рассматривают такие заявления как научную фантастику).

Пессимисты утверждают, что появление крошечных наноустройств и новых видов nanoоружия сможет вызвать экономический кризис и нанести непоправимый ущерб окружающей среде.

Кроме того, плохое планирование и недостаточный контроль может вызвать повышенный спрос на нанопродукты, и это приведет к взрывному росту теневой экономики.

Однако все эти пессимистические оценки в равной степени можно отнести к любому виду деятельности. Появление нанотехнологий связано со всеми известными рисками, как было с любой другой новой технологией в прошлом.

Несмотря на все препятствия и недостатки, для взвешенной оценки роли и места нанотехнологий в нашем мире нужно учитывать их огромные преимущества и выгоды:



ЧАСТЬ IV Будущее

- целевая доставка медикаментов;
- диагностика болезней с помощью «лаборатории-на-чипе»;
- лечение генетических заболеваний;
- нанoeлектроника;
- нанокомпозиты;
- наносенсоры;
- оптические массивы;
- топливные элементы;
- эффективная генерация и передача энергии.

Болезни роста всегда приносят дискомфорт и неудобства. Нанотехнологии обладают огромным потенциалом добра и зла. Действительно, вместе со списком выгод от применения нанотехнологий нужно всегда иметь под рукой и список сопутствующих недостатков. Простых решений нет. Только изучение, обсуждение и тщательное планирование всех действий позволит предотвратить потенциальные угрозы.

Нанотехнологии успешно развиваются в направлении эффективного и недорогого производства множества новых продуктов, которые изменят многие аспекты нашей жизни. Однако широкое распространение нанотехнологий может стать таким бурным, что у человечества не будет времени для реагирования на возможные последствия, если об этом не позаботиться заблаговременно.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нанотехнологии затрагивают:
 - (а) экономику;
 - (б) этику;
 - (в) культуру;
 - (г) все указанные выше области.
2. Национальный институт охраны труда США планирует подготовить и выпустить:
 - (а) листовку к Национальному дню нанотехнологий;
 - (б) документ с обзором практического опыта работы с наноматериалами;
 - (в) перечень способов получения нанотрубок;
 - (г) приз за лучшую идею охраны окружающей среды.



3. В одном исследовании на рыбах нефункционализированные фуллерены продемонстрировали:
 - (а) влияние на окружающую среду;
 - (б) высокую стоимость;
 - (в) липкость;
 - (г) яркий синий цвет.
4. Нанотехнологии имеют огромный потенциал общественной пользы и возможного:
 - (а) риска;
 - (б) ухудшения;
 - (в) циркового представления;
 - (г) улучшения школьных обедов.
5. За счет присоединения небольших молекулярных фрагментов к поверхности фуллерена цитотоксичность можно:
 - (а) повысить;
 - (б) снизить, в зависимости от степени фукционализации;
 - (в) оставить неизменной;
 - (г) удвоить.
6. Отношение общества к нанотехнологиям определяется всеми перечисленными ниже аспектами общественной жизни, кроме:
 - (а) влияния на занятость;
 - (б) возможности получения новых алмазов;
 - (в) неприкосновенности личности и частной собственности;
 - (г) возможности изобретения новых методов лечения и медикаментов.
7. Какая структура занимается исследованиями устойчивого и ответственного развития нанотехнологий и оценки их влияния в нескольких областях, включая охрану окружающей среды, здравоохранение, юриспруденцию и т. д.?
 - (а) INN;
 - (б) NNF;
 - (в) NNI;
 - (г) NTA.



ЧАСТЬ IV Будущее

8. Стандартизация измерений на наномасштабном уровне позволит сравнивать:
 - (а) показания весов в разных магазинах;
 - (б) фунты и метры;
 - (в) изюм и орешки;
 - (г) результаты разных исследований.
9. Что позволит освоить огромный объем новой научной и технологической информации и с ее помощью устранить потенциальные препятствия на пути развития нанотехнологий?
 - (а) рекомендуемый стиль одежды;
 - (б) равнодушие общественности;
 - (в) образование;
 - (г) увеличение площади рабочих помещений.
10. Снижение цитотоксичности за счет функционализации будет способствовать внедрению инноваций во всех перечисленных ниже областях, кроме:
 - (а) связи;
 - (б) очистки воды;
 - (в) воспитания детей;
 - (г) медицины.

Глава 14

Что дальше?

Суббота. Идут последние приготовления к еженедельной вечеринке. Надо вспомнить, какая картина была на стене в прошлый раз. Горные склоны Аспена, морское дно вблизи Большого Барьерного рифа или огни ночного Нью-Йорка? Благодаря нанотехнологиям и успехам адаптивной оптики с помощью всего нескольких нажатий клавиш на стене появится любое из этих изображений, установится соответствующая ему температура и уровень освещения. Куда там прежним бумажным обоям и люстрам с лампочками!

Просматривая доступные изображения, на секунду стоит приостановиться, чтобы еще раз вспомнить памятные моменты жизни, например смешную мордашку младшего братишки с празднования его дня рождения. Пожалуй, стоит выбрать вид с ослепительно белым песчаным пляжем на Гавайях. Ведь гости придут в легкой летней одежде, и такой интерьер будет как нельзя кстати.

А что с музыкой? Прокрутим знакомые и любимые мелодии: джаз, рок, бонго... Объемный звук из нанопокрытия на стенах создаст потрясающий эффект звучания реальных инструментов.

Невольно приходит мысль о том, насколько быстро нанотехнологии проникли в нашу повседневную жизнь. Прогресс неумолим: кажется, еще вчера люди передвигались на лошадях, а сегодня уже не мыслят путешествия без реактивных лайнеров!

Перспективы нанотехнологий

Нанотехнологии, основанные на биологических и химических принципах поатомного конструирования, позволяют создавать функциональные устройства с размерами в диапазоне 1–100 нм. В органической химии уже в течение многих лет создают наноструктуры с помощью химического синтеза. Но только в последнее десятилетие благодаря успехам в области микроскопии поверхности, производства кремниевых структур, биохимии, физической химии и инфор-



ЧАСТЬ IV Будущее

матики удалось получить выдающиеся результаты в производстве структур на атомарном уровне и манипулировании ими.

Нанотехнологии привлекают пристальное внимание ученых, потому что благодаря им становится возможным из отдельных атомов создавать новые молекулы и даже материалы, имеющие огромное значение для общества и оказывающее влияние на него. Стремительное развитие нанотехнологий и областей их применения демонстрирует очевидный факт: нанотехнологии становятся одними из основных технологий XXI в.

С развитием микро- и нанотехнологий то, что прежде считалось научной фантастикой, становится наукой. 100 лет назад невозможно было даже предсказать появление мобильных телефонов, но благодаря успехам микроэлектроники они теперь так же доступны и привычны, как хот-доги. Можете ли вы себе представить современную жизнь без микроволновки, компьютера и Интернета?

Что же произошло? Неужели люди стали умнее? Скорее всего, нет. Просто любые успехи науки и техники обычно основаны на прежних открытиях. Таким образом, в течение многих лет накапливается изумление от новых научных результатов: «Ого!» В какой-то момент они внезапно дают совершенно новое видение явлений природы: «Вот это да, смотрите, что я нашел!» Ученые и инженеры находятся в постоянном поиске: когда они обнаруживают ответ на один вопрос, неизбежно возникает несколько новых. После открытия молекулы фуллерена оказалась реальностью идея упрочнения материалов и точечной доставки медикаментов в заданное место организма с помощью отдельных молекул и атомов. К всеобщему изумлению стало ясно, что наномасштабный мир не только чрезвычайно мал — он способен привести революционные изменения в нашу жизнь!

В течение последнего десятилетия ученые и инженеры научились делать металлы более прочными и гибкими с помощью наноматериалов. Авиастроители обнаружили, что самолеты могут быть более легкими и экономичными благодаря использованию металлических сплавов и нанокompозитов с наночастицами.

Продукты и рынки

Нанотехнологии находятся на стыке многих научных и инженерных дисциплин, поэтому способы их использования чрезвычайно разнообразны. В таблице 14.1 перечислены некоторые области деятельности, в которых ожидается применение нанотехнологий в ближайшем будущем.



Таблица 14.1. Потенциальные области применения нанотехнологий

Область	Метод «снизу вверх»	Метод «сверху вниз»
Космонавтика	Покрытия и материалы для элементов фюзеляжа и сопел	Материалы для двигателя и солнечных панелей
Автомобилестроение	Антикоррозионные покрытия, окна, покрышки, воспламенители	Электроды для свинцовых аккумуляторов
Потребительские товары	Спортивное снаряжение, настольные и портативные компьютеры, телевизоры, косметика	Компоненты аудиосистем
Вооружение	Броня, боеприпасы и покрытия для стволов	Компоненты двигателей
Охрана окружающей среды	Средства сбора загрязняющих веществ, очистки воды и воздуха, керамические мембраны	Материалы для солнечных панелей
Промышленные покрытия	Безопасные для окружающей среды покрытия (заменители хрома, кадмия и бериллия), магнитные покрытия	Антикоррозионные покрытия
Медицина	Покрытия для имплантантов, антимикробные покрытия	Сенсоры, «лаборатории на чипе»
Энергетика	Компоненты ядерных реакторов, кабели для линий электропередачи	Покрытия и материалы для контейнеров с радиоактивными отходами и отходами сжигания ископаемого топлива

ПУТЬ ОТ НАУКИ ДО РЫНКА

По некоторым оценкам, в 2006 г. около 460 частных компаний, более 100 инвесторов и около 300 научно-исследовательских организаций и государственных учреждений занимались внедрением нанотехнологий. Многие из них успешно довели свои научные исследования до стадии промышленного применения, что подтверждается большим количеством патентов, которые они оформили на свои изобретения.

Согласно данным Европейского патентного бюро в Мюнхене (Германия), за период с 1981 по 1998 г. количество ежегодно оформляемых патентов на нанотехнологии выросло с 28 до 180, что соответствует ежегодному приросту около 7%. В США темпы роста числа патентов на нанотехнологии в период с 1999 по 2003 г. составили 28% в год, а их количество выросло с 479 до 1011.



ЧАСТЬ IV Будущее

Одним из важнейших факторов быстрого внедрения нанотехнологий является потенциальная выгода от их применения в промышленности и на потребительском рынке. Однако предсказывать судьбу новых технологий — довольно рискованное дело. Многие маркетологи верят в светлое будущее нанотехнологий, но мало кто из них может точно предсказать, когда и где они появятся и какую дадут коммерческую прибыль.

Некоторые аналитики склонны считать, что пик интенсивности научных исследований нанотехнологий будет достигнут в 2010 г., а их крупномасштабное внедрение состоится примерно в 2015 г.

По некоторым оценкам, в 2001 г. на исследования и внедрение нанотехнологий было затрачено около 50 млрд долларов. В 2000 г. Национальный научный фонд США спрогнозировал, что в 2015 г. рынок нанопродуктов и нанотехнологий достигнет величины 1 трлн долларов. А аналитики агентства Lux Research в 2005 г. предсказали, что эффект от внедрения нанопродуктов и нанотехнологий будет равным 2,6 трлн долларов.

ЛИДЕРЫ РЫНКА

Оценивая развитие нанотехнологий и процесс их внедрения, важно определить области промышленности, в которых нанотехнологии будут внедряться особенно быстро и эффективно. По мнению Михаила Роко (Mihail Roco), старшего аналитика в области нанотехнологий, сотрудника Национального научного фонда США, наиболее перспективными будут вычислительная техника и фармакология. Интересно, что многие другие аналитики сделали основные ставки на медицину.

В настоящее время на рынке уже присутствует около 400 нанотехнологических продуктов, большинство из которых относятся к косметике, покрытиям, тканям, сенсорам и дисплеям. Многие из них стали неотъемлемой частью теннисных ракеток и мячей, автомобильных бамперов, солнцезащитных кремов и очков, спортивных штанов и курток.

Национальный научный фонд США прогнозирует, что благодаря большим инвестициям на ранних этапах развития многих нанотехнологий соответствующие им рыночные продукты могут появиться гораздо раньше, чем предсказывается. На основе полученного опыта ученым и инженерами удастся разрешить многие проблемы еще на начальных стадиях и быстро внедрить новые технологии.



Патенты

При составлении патентов важно оценить новизну защищаемой идеи и выделить ее среди очередных вариантов прошлых идей. Нанотехнологии не являются исключением. Не только коммерческие компании, но и многие университеты, особенно за последние два десятилетия, осознали большое значение патентов.



Патент — это официальный документ, удостоверяющий исключительное право, авторство и приоритет изобретения, полезной модели или промышленного образца. Срок действия патента зависит от объекта патентования (обычно от 10 до 25 лет). Патент выдается государственным органом исполнительной власти по интеллектуальной собственности, например, в Российской Федерации таким органом является Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Роспатент).

Интенсивность получения патентов в той или иной области может служить индикатором текущей и будущей активности. Например, около $1/4$ всех патентов в области нанотехнологий посвящено новым инструментам. Это указывает на то, что нанотехнологии находятся в стадии развития, когда важно создать хорошие инструменты и методы производства наноструктур.

В этом отношении наиболее прогрессивными областями являются информатика, химия и фармакология. Например, в информатике это устройства хранения данных высокой емкости, плоские дисплеи, электронная бумага и многое другое. Большое значение для развития информатики также имеют методы обработки, передачи и хранения информации на наномасштабном уровне.

В химии и фармакологии большинство патентов относится к методам точечной доставки лекарств, диагностики и лечения рака и других опасных заболеваний. Растет количество патентов в других областях, например строительстве, аэрокосмической отрасли, но их доля все еще не очень велика. Предполагается, что массовый выход нанотехнологий и нанопродуктов на рынок сначала состоится в указанных выше областях: информатике и фармакологии. Именно такая тенденция наблюдалась в последние 25 лет.

Ключевые приложения

Наноматериалы обладают уникальными химическими и физическими свойствами, которые можно успешно использовать для огром-



ЧАСТЬ IV Будущее

ного числа разнообразных приложений. Ниже перечислены некоторые наиболее перспективные применения нанотехнологий и нанопродуктов, которые окажут значительное влияние в период с настоящего времени и до 2015 г.

ИНСТРУМЕНТЫ

К ним относятся разные, но связанные приспособления и устройства для анализа, синтеза, обработки наночастиц и управления ими. Наиболее совершенные инструменты позволяют очень точно измерять свойства и параметры наномасштабных структур.

Для создания новых наноструктур и их измерения уже применяются атомные силовые микроскопы, сканирующие зондовые микроскопы, наноманипуляторы, оптические пинцеты и другие инструменты.

В ближайшее время развитие этих инструментов станет основным катализатором прогресса нанотехнологий.

ПРОИЗВОДСТВО

Новые инструменты для резки на основе наночастиц вольфрама и карбида титана обладают гораздо большей прочностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, чем их более крупные аналоги. Они позволяют выполнить работу быстрее, а потому более эффективны и экономичны.

Для уменьшения размеров электронных устройств используются нанокристаллические материалы для сверл (с диаметром менее 100 мкм), которые позволяют получать более точные очертания и обладают большей износостойкостью, чем сверла из традиционных материалов.

Для миниатюрных сверл также применяются карбидные и алмазные покрытия, которые хорошо себя зарекомендовали в более крупных сверлах в нефтегазовой промышленности.

БИОИНЖЕНЕРИЯ

Некоторые аналитики считают, что наномедицина и другие связанные с ней области на 80% изменят состояние биологических наук к 2015 г.



Биоинженерия — это область деятельности, в которой методы биологии и техники используются для достижения общих целей, например диагностики и лечения заболеваний.



Биологическая инженерия — это наука о применении инженерных и технических знаний в медицине и биологии, например для создания искусственных органов (костей, сухожилий, клапанов и т. п.).

Если прогресс развития нанотехнологий продолжится в текущих темпах, то в области здравоохранения откроются невиданные прежде перспективы. В главах 5 и 6 уже описывались новые методы диагностики опасных заболеваний.

По некоторым оценкам, в 2002 г. рынок нанотехнологий в биологических науках был равен примерно 8 млрд долларов, в 2006 г. — 30 млрд. Предполагается, что к 2010 г. он достигнет величины 104 млрд долларов. В 2002 г. этой деятельностью занимались 600 компаний, а к 2010 г. их число может достигнуть 3000.

Однако следует напомнить, что прогресс нанотехнологий усиливает значение сопутствующих юридических и этических факторов. Как и в ходе внедрения генетически модифицированных организмов (ГМО), общественное мнение окажет существенное влияние и на внедрение нанотехнологий. Именно по этой причине многие исследователи нанотехнологий уделяют большое внимание вовлечению общественности в процесс оценки рисков нанотехнологий и принятия решений по их устранению.

МЕДИЦИНСКИЕ ИМПЛАНТАНТЫ

В настоящее время многие медицинские имплантаты (например, заменители костей или сердечных клапанов) изготавливают из титановых сплавов, нержавеющей стали и специальных пластмасс, например на основе полиэтилена. Эти сплавы и пластмассы используют, поскольку они являются *биологически совместимыми*. Ортопедические имплантаты (искусственные кости) обладают высокой плотностью и не имеют пор.



Биологически совместимые материалы (например, сплавы титана, золота и нержавеющей стали, пластмассы) не вступают в реакцию с тканями организма и не вызывают иммунной реакции организма.

Чтобы имплантат действовал как натуральная кость, окружающая ткань должна иметь возможность прорасти в него. Это придает имплантанту необходимую прочность. Поскольку обычные материалы имплантантов очень прочны, ткани человека не могут в достаточной степени проникать в них, и эффективность их ис-



ЧАСТЬ IV Будущее

пользования падает. Кроме того, имплантанты из пластмасс довольно быстро изнашиваются (примерно за 10 лет), и для их замены необходимо часто проводить очень обременительные, сложные и дорогие хирургические операции. Многим пациентам это не по карману.

Специалисты в области биоинженерии постоянно ищут новые наноматериалы, которые можно было бы использовать в качестве медицинских имплантантов. Например, нанокристаллы оксида циркония обладают высокой твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью (дело в том, что биологические жидкости вызывают коррозию) и биологической совместимостью. Керамические наноматериалы можно сделать пористыми с помощью перехода золь-гель, который уже упоминался в главе 8. В виде аэрогеля такие материалы могут выдерживать нагрузку, в 100 раз превышающую их вес, что существенно повышает эффективность и снижает стоимость имплантантов на их основе. Наноматериалы на основе карбида кремния, обладающие малым весом, высокой прочностью и твердостью, биологической совместимостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, можно использовать для создания искусственного клапана сердца.

Медицинские имплантанты на основе нанокерамики особенно пригодятся людям преклонного возраста, которые страдают от остеопороза (и которым требуется длительное время для заживления сломанных костей).

КОМПЬЮТЕРЫ И ЭЛЕКТРОНИКА

В главах 9 и 10 уже говорилось, что нанотехнологии обеспечивают массу возможностей в области вычислительной техники, электроники, сенсоров и связи. Какое влияние на развитие вычислительной техники окажут нанотехнологии? Что произойдет, когда появятся более мощные и эффективные компьютеры? Как далеко может зайти прогресс? Некоторые аналитики считают, что невероятная вычислительная мощь новых компьютеров приведет к огромным изменениям не только в информатике, но и в медицине, энергетике и транспорте. Вполне возможно, что грань между электронным и человеческим разумом постепенно сотрется до минимума. Скажем, могут появиться имплантируемые операционные системы, например, для усиления иммунной защиты организма.

Специалисты в области электроники давно сосредотачивают свои усилия на миниатюризации электронных устройств и их компонен-



тов: транзисторов, резисторов и конденсаторов. Уменьшение размеров и уплотнение компонентов электронных схем сопровождается увеличением их вычислительной мощности и эффективности. Борьба за увеличение контролируемой части рынка, новые продукты и патенты ведется ожесточенно, постоянно и неустанно. В век информации каждая компания, работающая в сфере электроники, хочет стать лидером и контролировать самые последние достижения науки и техники.

Однако для решения поставленных сверхзадач требуется найти способы производства наноструктур, которые позволят избежать избыточного рассеяния энергии в виде тепла, повысят надежность и обеспечат устойчивое энергоснабжение крошечных электросхем.

Современные компьютеры выполняют вычисления в последовательном режиме (одно вычисление за другим), а квантовые компьютеры будущего способны выполнять одновременно несколько вычислений в параллельном режиме (см. главу 10.) Например, чтобы разложить на простые множители число из 400 цифр, обычному компьютеру потребуются миллиарды лет, а квантовому компьютеру — всего несколько минут.

Задача разложения числа на его простые множители, знакомая нам еще из школьного курса математики, имеет огромное практическое значение. Алгоритмы разложения на простые множители используются в системах шифрования. А значит, если какому-то злоумышленнику удастся создать квантовый компьютер, то он сможет быстро взломать многие системы шифрования, что может нанести огромный ущерб коммерческой и национальной безопасности. По этой причине агентство DARPA и институт NIST в США ведут интенсивные исследования квантовых вычислений.

Многие ведущие научно-исследовательские организации, включая Оксфордский университет (Великобритания), Университет Инсбрука (Австрия), Массачусетский технологический институт (США), Калифорнийский технологический институт (США) и Стэнфордский университет (США), имеют в своем штате научные группы, которые занимаются изучением основ квантовых вычислений. Такие коммерческие компании, как Microsoft и IBM, а также некоторые правительственные организации, например Аргоннская национальная лаборатория США, прилагают усилия для изучения квантовых вычислений.

Наноматериалы позволят преодолеть многие традиционные технические барьеры и обеспечить условия для более высокой проч-



ЧАСТЬ IV Будущее

ности, чистоты, теплопроводности и долговечности компонентов наноэлектронных систем.

СВЯЗЬ

Наряду с миниатюризацией компьютеров и их компонентов происходит миниатюризация беспроводных коммуникационных устройств. Размеры беспроводных средств связи уменьшаются, а сами они постепенно становятся неотъемлемыми составными частями других электронных схем и устройств. Однако антенны (например в мобильных телефонах) и сенсоры все же имеют довольно большие размеры по сравнению с другими компонентами и являются ограничивающим фактором дальнейшей миниатюризации электронных схем. С помощью наноматериалов и нанотехнологий ученые и инженеры в скором времени смогут справиться и с этой проблемой.

ОПТИКА

Обработка оптической информации на наномасштабном уровне является сложнейшей проблемой в некоторых областях науки и техники. Среди наиболее актуальных применений следует упомянуть оптические наноустройства, литографию с ультракороткой длиной волны, визуализацию наноструктур, а также оптический мониторинг нанопроцессов в биологических материалах на клеточном и молекулярном уровне. В главах 5 и 6 уже упоминалось об использовании оптических наноустройств в биологических и медицинских целях.

ДИСПЛЕИ

Разрешение телевизоров и дисплеев определяется размером пикселей, из которых формируется изображение на экране: чем меньше пиксель, тем больше разрешение.



Пиксель — это наименьший элемент двумерного цифрового изображения. Он представляет собой неделимый объект прямоугольной (обычно квадратной) формы, обладающий определенным цветом.

Для повышения разрешения дисплеев ученые и инженеры пытаются использовать новые наноматериалы на основе селенида цинка, сульфида цинка, сульфида кадмия и теллурида свинца, полученные с помощью перехода золь-гель. С их помощью предполагается



не только повысить разрешение, но и сократить стоимость дисплеев для телевидения высокой четкости HDTV (high-definition television) и компьютерной техники.

Плоскопанельные дисплеи составляют значительную часть рынка портативных компьютеров. Ведущие позиции в исследованиях и производстве таких дисплеев занимают японские компании. За счет использования наночастиц они стремятся улучшить разрешение дисплеев и снизить производственные затраты. Кроме того, замечено, что применение наноматериалов позволяет существенно повысить яркость и контрастность плоскопанельных дисплеев.

Электрохромные устройства основаны на материалах, оптические свойства которых меняются при прохождении электрического тока или приложении электромагнитного поля.



Электрохромность — способность материала изменять оптические свойства под напряжением. Такой способностью обладают оксиды вольфрама.

Обратимая электрохромность (то есть обратимое изменение оптических свойств) достигается с помощью двойного инжектирования заряженных частиц (ионов или электронов) в нанокристаллы оксида вольфрама. Материалы, обладающие обратимой электрохромностью, уже используются в качестве покрытия для оптических дисплеев информационных табло.



Жидкокристаллический дисплей — это плоскопанельный монитор на основе жидких кристаллов. Каждый пиксель такого дисплея состоит из слоя молекул между двумя прозрачными электродами и двух поляризационных фильтров. В отсутствие жидких кристаллов свет, пропускаемый первым фильтром, практически полностью блокируется вторым. При отсутствии напряжения молекулы выстраиваются в винтовую структуру, и свет проходит без потерь, а при достаточной величине поля молекулы становятся практически параллельно, что приводит к непрозрачности структуры.

Электрохромные дисплеи внешне похожи на жидкокристаллические, которые широко используются в настоящее время в компьютерах, калькуляторах и наручных часах.

Поскольку разрешение, яркость и контраст электрохромных дисплеев в значительной степени зависит от размера наночастиц, наночастицы являются весьма перспективными материалами для этих устройств.



ЧАСТЬ IV Будущее

МАТЕРИАЛЫ

Как уже упоминалось в главе 8, нанокристаллические материалы, созданные с помощью перехода золь-гель, называются *аэро-гелями*. Они имеют очень пористую структуру, которая в сотни раз легче сплошного аналога. Трехмерная сеть пор, которые заполнены пузырьками воздуха или любого другого газа, может использоваться в качестве прекрасного теплоизолятора в домах или офисах.

С их помощью можно существенно снизить затраты на обогрев или охлаждение и таким образом добиться значительной экономии энергоресурсов. Разрабатываются проекты создания «умных» стекол на их основе, которые могут темнеть в очень светлое время суток (как самонастраивающиеся стекла солнцезащитных очков) и, наоборот, становиться более прозрачными в пасмурную погоду.

КЕРАМИКА

Керамические материалы обычно характеризуются высокой твердостью и хрупкостью, а потому трудно поддаются обработке. Из-за этого инженерам с трудом удастся использовать их превосходные качества. Однако благодаря уменьшению размера зерна обработка существенно упрощается, и популярность керамических материалов растет.

Керамика на основе двуокиси циркония способна деформироваться до 300% своей исходной длины и потому называется сверхпластичной. Чтобы демонстрировать такие свойства, эта керамика должна содержать нанокристаллические зерна. Некоторые нанокристаллические материалы (нитрид кремния Si_3N_4 и карбид кремния SiC) уже используются в автомобилестроении, например для высокопрочных пружин, шарикоподшипников и толкателей клапанов. Помимо прекрасных физических, химических и механических свойств, они обладают хорошей способностью к формоизменению, термической и станочной обработке.



Спекание (sintering) — это процесс получения твердых материалов и изделий из порошкообразных или пылевых смесей при температуре, которая ниже температуры плавления.

Нанокристаллические материалы можно сжимать и спекать в разнообразные формы при гораздо более низких температурах, чем обычно требуется для сжатия и спекания сплошных аналогов.



В настоящее время ученые и инженеры уже научились делать на их основе множество изделий для медицинских целей. Например, в Японии изготавливают зубные протезы, которые легче, комфортнее и удобнее, чем протезы из других материалов.

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Уже упоминавшиеся нанокристаллические материалы имеют гораздо бóльшую поверхность (сосредоточенную на границах зерен), чем их сплошные аналоги. Благодаря этому нанокристаллические материалы обладают повышенной химической и физической активностью. Эти качества наноматериалов можно использовать для создания эффективных катализаторов, которые могут реагировать с такими токсичными газами, как оксиды азота и углерода, в автомобилях и тепловых электростанциях. Таким образом, нанокристаллические материалы могут оказать заметную помощь в охране окружающей среды от загрязнения, вызванного сжиганием ископаемых видов топлива.

БАТАРЕИ ВЫСОКОЙ ЕМКОСТИ

Обычные батареи и повторно заряжаемые аккумуляторы широко используются в нашей жизни: в автомобилях, компьютерах, мобильных телефонах, часах и игрушках. К сожалению, их емкость (и долговечность) недостаточно велика, и их приходится часто заряжать.

Пористые нанокристаллические материалы способны хранить электрическую энергию с гораздо большей плотностью, поэтому в будущем батареи и аккумуляторы на их основе смогут работать без подзарядки гораздо дольше.

СЕНСОРЫ

Чувствительность сенсоров электрического сопротивления, химической активности, магнитной проницаемости, тепла и других физических и химических свойств во многом зависит от микроскопической структуры (зернистости) материала. Например, в сенсоре окиси углерода для обнаружения этого газа используется оксид циркония. Реакция взаимодействия молекул оксида циркония с молекулами окиси углерода вызывает изменение проводимости.

Поэтому для повышения чувствительности сенсоров ученые и инженеры стремятся использовать материалы с меньшим размером зерна. Нанокристаллические сенсоры обладают повышенной чувстви-



ЧАСТЬ IV Будущее

тельностью и уже используются в детекторах дыма, датчиках обледенения поверхности самолета и функционирования двигателей.

АВТОМОБИЛИ

Двигатели современных автомобилей сжигают огромное количество топлива, и выхлопные газы являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды. Нанотехнологии способны решить эти проблемы без ущерба для темпов развития автомобильной отрасли. Предполагается, что в 2015 г. доля использования нанотехнологий и наноматериалов в автомобилестроении достигнет 60%.

Возможность манипулирования атомами и молекулами открывает большие перспективы в автомобилестроении. Например, нанокристалльная свеча зажигания с наноэлектродами обладает большей экономичностью (топливо сжигается эффективнее), прочностью, износостойкостью и долговечностью, чем обычная свеча зажигания с обычными электродами. Более совершенные свечи зажигания на основе обычных материалов создают очень мощные искры, которые способствуют более эффективному сжиганию топлива, но обладают очень низкой коррозионной стойкостью. Установлено, что свечи зажигания на основе наноматериалов могут работать гораздо дольше.

Кроме того, ученые и инженеры стремятся повысить эффективность сжигания топлива в автомобилях с дизельными двигателями за счет использования покрытий цилиндров на основе нанокристаллической керамики. Композитные материалы на базе нанотрубок позволяют снизить вес и повысить эффективность систем торможения. Стекла и крылья на основе углеродных нанотрубок будут гораздо прочнее без увеличения массы.

В целом в автомобилестроении будут заметны преимущества внедрения нанотехнологий, поскольку многие компоненты автомобиля станут гораздо легче, прочнее, долговечнее и эффективнее, а затраты на их производство снизятся. По некоторым оценкам, в следующем десятилетии конкурентоспособность в автомобильной промышленности будет во многом зависеть от использования нанотехнологий и наноматериалов.

ОРУЖИЕ

В современном огнестрельном и ракетном оружии используется химическая энергия сжигания химических веществ. Благодаря этому скорость пуль, снарядов и ракет достигает примерно 2 км/с. Пер-



спективные электромагнитные системы, в которых снаряды ускоряются электромагнитным полем, способны разогнать снаряд до скорости 10 км/с. Понятно, что снаряд с большей скоростью обладает большей кинетической энергией и разрушительной способностью. По этой причине конструкторы оружия уделяют огромное внимание таким электромагнитным пушкам.

Электромагнитные пушки должны обладать достаточно хорошей прочностью и износостойкостью, а рельсы для разгона снарядов — хорошей электропроводностью. Медь является отличным проводником, но обладает слабой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Для решения этой проблемы ученые и инженеры пытаются применить новые наноматериалы. В настоящее время ведутся интенсивные исследования композитных наноматериалов на основе вольфрама, меди и диборида титана. Такие композиты обладают необходимой прочностью, твердостью, электропроводностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Предполагается, что использование подобных композитов позволит повысить эффективность и темп стрельбы, а также сэкономить деньги налогоплательщиков. Одновременно с этим изучается возможность использования наноматериалов на основе углеродных нанотрубок, которые обладают еще большей электропроводностью и износостойкостью.

ПЕНЕТРАТОРЫ С ВЫСОКОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Для борьбы с бронированной техникой противника в Министерстве обороны США планируется использовать специальные снаряды и пули, так называемые пенетраторы с высокой кинетической энергией на основе урана. Они являются непревзойденными средствами проникновения сквозь любую броню, но характеризуются повышенной радиоактивностью. Однако снаряды на основе нанокристаллических сплавов вольфрама могут вскоре заменить урановые пенетраторы и исключить риск, связанный с радиоактивностью и токсичностью урановых снарядов и пуль.

МОЩНЫЕ МАГНИТЫ

Эффективность магнитов связана с размером зерна и суммарной поверхностью материала, из которого сделан магнит. Нанокристаллические магниты из иттрия/самария/кобальта обладают повышенными магнитными свойствами ввиду их большой суммарной поверхности. На основе таких магнитов можно будет создавать более



ЧАСТЬ IV Будущее

тихоходные подводные лодки, генераторы переменного тока, электродвигатели, сверхчувствительные аналитические инструменты, включая магнитно-резонансные томографы.

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕЛЕВИЗОРЫ И ЭКРАНЫ

Производители дисплеев стремятся создать более дешевые альтернативные варианты для уже имеющихся жидкокристаллических и плазменных дисплеев. Компания Motorola уже объявила о создании первого работающего прототипа наноэмиссионного дисплея (nanoemissive display — NED). Тонкий, как плитка шоколада, дисплей станет основой будущего настенного телевизора с диагональю экрана 42 дюйма, обладающего таким же качеством изображения, что и жидкокристаллический дисплей.

В наноэмиссионном дисплее изображение формируется с помощью электронов, которые ускоряются напряжением 5–10 В (в жидкокристаллическом дисплее — 5000 В). Вместо электронно-лучевой трубки и крошечных полупроводниковых светодиодов в наноэмиссионном дисплее используется фосфоресцирующая пластина, которая под действием напряжения создает изображение с гораздо меньшими затратами энергии. Интересно, что эта технология позволяет создавать экраны произвольно большого размера, что было очень трудно или вообще невозможно достичь с помощью прежних технологий.

РАЗВЛЕЧЕНИЯ

Нанотехнологии постепенно проникают во все сферы жизни. В таблице 14.2 перечислены некоторые продукты и материалы, созданные на основе нанотехнологий или наноматериалов и попавшие в список десяти самых популярных нанопродуктов в 2005 г., по мнению журнала *Forbes*.

Таблица 14.2. Десять нанопродуктов самых популярных в 2005 г.

	Продукт	Компания
1	iPod Nano с чипом памяти NAND 4 Гб	Apple Computer
2	Canola Active — повышает абсорбцию фитохимикатов и снижает уровень холестерина	NutraLease/Shemen
3	Жевательная резинка Choco'la	O'Lala Foods
4	Антиоксидантный крем Fullerene C-60	Zelen
5	Бейсбольная бита Easton Stealth на основе углеродных нанотрубок	Easton Sports & Zyvex



	Продукт	Компания
6	Водоотталкивающая и грязеустойчивая ткань на основе нановолокон	Nanotex
7	Антибактериальные носки Arctic Shield	ARC Outdoor
8	Водоотталкивающая и прочная краска Nano-GuardPaint	Behr Paints
9	Самоочищающееся покрытие Activ Glass	Pilkington
10	Очиститель воздуха NanoBreeze Air Purifier	NanoTwin Technologies

ОДЕЖДА

В главе 3 уже упоминалось об успехах ученых и инженеров в создании новых тканей на основе нанотехнологий. Специалисты немецкой компании Franz Ziener GmbH & Company научились создавать ветрозащитные и водонепроницаемые ткани с использованием нановолокон. Сшитая из этой ткани одежда пропускает влагу изнутри, но защищает от внешнего воздействия ветра, дождя и грязи.

СПОРТИВНЫЙ ИНВЕНТАРЬ

С момента изобретения в Шотландии в XV в. гольф постепенно из простой игры превратился в чрезвычайно популярный вид спорта, в котором активно используются все последние технические достижения. В 2004 г. на основе нанотехнологий и нанокompозитов титана специалисты компании Wilson создали новые виды клюшек для гольфа FwC, Pi5 и Staff Pd5/Dd5. Эти клюшки стали прочнее и легче, а потому позволяют выполнять более энергичные и точные удары.

Кроме того, в компании Wilson создали мяч для гольфа нового вида PhD (Pan Head Dimple), который имеет более крупные и почти на 50% менее глубокие ямки на поверхности (рис. 14.1), чем в обычном мяче для гольфа. Это позволяет добиться большей дальности и устойчивости полета мяча.

В некоторых современных теннисных ракетках и удочках для повышения прочности и гибкости уже используются наночастицы или нанотрубки. Производители спортивных велосипедов, лыж и коньков также находят пути улучшения параметров с помощью нанотехнологий и наноматериалов. Для этого компания Zuvex поставляет многим производителям спортивного инвентаря специальные углеродные нанотрубки.



ЧАСТЬ IV Будущее



Рис. 14.1. Новые мячи для тенниса (слева) и для гольфа (справа), созданные компанией Wilson на основе нанотехнологий

МУЗЫКАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ

Углеродные нанотрубки могут использоваться и для качественно-го прослушивания музыки. Повышенная пористость и проводимость углеродных нанотрубок может обеспечить улучшенные качества акустических колонок. Некоторые исследователи пытаются найти способы их применения в специальных гитарах и виолончелях, чтобы повысить качество звучания и прочность инструмента и снизить вес. Кто знает, может быть, скоро мы станем свидетелями появления совершенно новых музыкальных инструментов!

КОСМЕТИКА

О применении нанотехнологий и наноматериалов в косметике уже говорилось выше. Следует отметить и некоторые другие продукты, например кремы для кожи. В одном из таких кремов используются полимерные нанокапсулы размером около 200 нм. Они способны впитывать, как губка, полезные вещества, например витамин А, и отдавать их, растворяясь под кожей.

Компания L'Oréal, как и многие другие косметические компании (например, Dior, Estée Lauder, Johnson & Johnson), использует



в своих новых кремах аналогичные нанотехнологии для доставки питательных веществ под поверхностный слой кожи.

Еще одной областью использования нанотехнологий в косметике являются средства защиты от солнечного излучения. В солнцезащитном креме многих компаний присутствует порошок Z-COTE® компании BASF, который создан на основе наночастиц сверхчистого оксида цинка. Дело в том, что крем на основе обычных частиц цинка внешне напоминает белую мазь, что выглядит не очень привлекательно на пляже. Кремы на основе наночастиц оксида цинка поглощают опасное ультрафиолетовое излучение, но полностью пропускают видимый свет, потому такие кремы абсолютно прозрачны и не имеют цвета.

АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ОТРАСЛЬ

Авиастроители стремятся создавать более прочные, легкие и долговечные самолеты. Особое внимание уделяется методам повышения усталостной прочности материалов. Замечено, что усталостная прочность повышается с уменьшением размера зерна в сложных авиационных сплавах.

Как известно, наноматериалы содержат зерна чрезвычайно малых размеров. По некоторым оценкам, применение таких наноматериалов позволит на 200–300% повысить усталостную прочность и ресурс авиационных материалов и компонентов. Бóльшая прочность и меньший вес наноматериалов увеличат срок службы, скорость и эффективность новых самолетов.

Наноматериалы являются прекрасными кандидатами для использования в новых типах двигателей, сопел и обшивки космических аппаратов.

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Искусственные спутники широко используются для коммерческих и оборонных целей. Для коррекции или изменения траектории полета время от времени требуется включать реактивные двигатели, поэтому продолжительность работы спутников зависит от количества ракетного топлива и эффективности его использования. Около трети топлива спутника расходуется впустую из-за износа воспламенителя и неэффективности сгорания. В будущем для изготовления более стойких и прочных воспламенителей предполагается задействовать нанокристаллические композиты на основе вольфрама, титана и диборида меди.



ЧАСТЬ IV Будущее

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Оптоэлектроника на основе наноструктур вскоре будет использоваться для осуществления связи и создания сенсоров (например сенсоров инфракрасного излучения). Для связи со спутниками предполагается применять оптоэлектронные устройства меньшего размера и массы, но с большей частотной полосой пропускания оптических сигналов.

Новые наноструктурные оптоэлектронные устройства дают возможность передавать данные с меньшими энергетическими затратами, меньшими размерами и массой приемников и передатчиков, а также более высокой безопасностью. Новые методы глобальной передачи данных на основе таких устройств позволят наблюдать за поверхностью Земли, осуществлять связь с космическими аппаратами и манипулировать ими.

В проекте ARTEMIS (Advanced Relay Technology Mission) Европейского космического агентства (European Space Agency — ESA) были впервые продемонстрированы возможности оптической связи между спутниками для передачи большого объема данных. Службы передачи данных успешно использовались в европейской космической миссии ENVISAT и французской космической миссии SPOT, начиная с 4 марта 2003 г.

Первая двуправленная оптическая связь была организована 9 декабря 2005 г. между японским спутником OICETS (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) и европейским спутником ARTEMIS. Позже аналогичные исследования были проведены в рамках космической миссии OICETS-KIRARI, в которой использовались более совершенные твердотельные лазеры. В настоящее время эта оптическая система передачи данных работает на постоянной основе.

ИНФРАКРАСНЫЕ СЕНСОРЫ

Инфракрасные сенсоры широко используются в космических исследованиях, например в астрономических инструментах, при наблюдениях за атмосферой и поверхностью Земли, в навигационных инструментах космических систем и оптических системах передачи данных. Усовершенствование инфракрасных сенсоров стало возможным благодаря развитию наноструктур на основе нульмерных квантовых точек, одномерных квантовых проводов и двумерных квантовых ям.

Параметры инфракрасных сенсоров зависят от характеристик наноструктур и могут варьироваться. Инфракрасные сенсоры с кванто-



выми ямами на основе арсенида галлия уже созданы специалистами Центра космических микроэлектронных технологий NASA.

КОСМИЧЕСКИЙ ЛИФТ

Помимо компьютеров, клюшек для гольфа и косметики, некоторые наноматериалы могут использоваться даже для создания *космического лифта*. Так называется новая технология доставки грузов и пассажиров с поверхности Земли на космическую орбиту. В настоящее время не существует материалов, имеющих достаточную прочность для создания такого лифта.

Однако некоторые американские компании, например Southwest Nanotechnologies (Норман, штат Оклахома), Carbon Nanotechnologies (Хьюстон) и Liftport Group (Бреметон, Вашингтон), работают над проектами создания космического лифта к 2018 г.

Идея космического лифта не нова. В 1895 г. после посещения Эйфелевой башни русский ученый Константин Циолковский впервые высказал идею конструкции «космической башни», состоящей из катушки с кабелем, растянутым до высоты *геостационарной орбиты*. Эта идея пришла ему в голову после наблюдения за обычными лифтами, которые доставляли изумленных зрителей на вершину Эйфелевой башни. На рисунке 14.2 показана схема такого лифта.

Писатель Артур Кларк (Arthur Clarke), автор знаменитого научно-фантастического романа «Космическая одиссея 2001 г.» (2001: A Space Odyssey), в книге «Фонтаны рая» (The Fountains of Paradise) описал будущие способы доставки грузов в космос без использования ракет, а только с помощью космических лифтов. Тогда, в 1979 г., это была фантастическая идея, но теперь, с появлением новых сверхпрочных наноматериалов, она очень скоро может стать реальностью.

До изобретения углеродных нанотрубок специалисты аэрокосмической отрасли не имели достаточно прочных материалов, которые могли бы выдержать собственный вес троса космического лифта и центробежную силу под действием вращения Земли. Идеи создания и расчеты космических лифтов могли существовать только в головах и блокнотах фантастов.

Сейчас ученые и инженеры уже научились скручивать нанотрубки в волокна, как шерсть. С помощью легкой и сверхпрочной ленты на основе углеродных нанотрубок можно создать трос необходимой длины (около 100 тыс. км), который мог бы стать основой космического лифта.



ЧАСТЬ IV Будущее

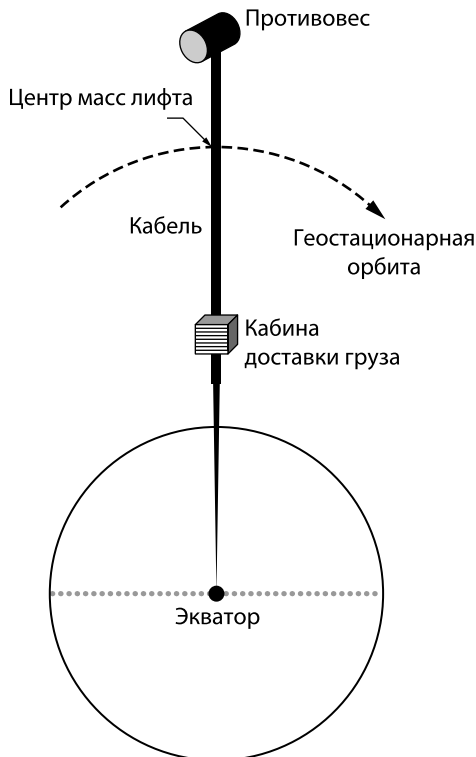


Рис. 14.2. Космический лифт мог бы доставлять грузы на геостационарную орбиту

ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ ОРБИТА

Геостационарная орбита — это расположенная над экватором Земли круговая орбита, на которой искусственный спутник обращается вокруг Земли с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг собственной оси. Таким образом, спутник постоянно находится над одной и той же точкой на земной поверхности. Идея использования геостационарных спутников для целей связи высказывалась еще Константином Циолковским. О преимуществах геостационарной орбиты заговорили после выхода в свет научно-популярной статьи Артура Кларка в 1945 г., поэтому на Западе геостационарная и геосинхронная орбиты иногда называются «орбитами Кларка». Геостационарная орбита используется для размещения искусственных спутников (коммуникационных, телетрансляционных и т. п.).



Зачем нужен космический лифт? По двум причинам: для улучшения качества жизни и удешевления космических полетов. В настоящее время стоимость доставки 1 кг полезного груза на низкую околоземную орбиту равна около 20 тыс. долларов, а на геостационарную орбиту — около 40 тыс. долларов. При использовании космического лифта цена доставки 1 кг полезного груза на геостационарную орбиту будет не выше 400 долларов. Вследствие удешевления вывода спутников подешевеют и средства связи. Благодаря массовому выводу огромных солнечных батарей на околоземную орбиту подешевеет производство альтернативной энергии. В условиях невесомости упростится и станет массовым производство сложных фармацевтических препаратов и рост высокочистых кристаллов. Станут более дешевыми туристические полеты в космос, межпланетные экспедиции и создание баз на Луне и планетах Солнечной системы.

КАК ВСЕ ЭТО ОСУЩЕСТВИТЬ

Наилучшим местом базирования космического лифта могла бы быть плавучая платформа в Тихом океане на широте экватора. Здесь практически нет сильных ветров и мала вероятность возникновения тропических ураганов.

На огромном пространстве Тихого океана платформу космического лифта всегда можно разместить вне путей следования морских и воздушных кораблей. Однако для полной безопасности потребуется создать систему наблюдения за плаванием и полетами вблизи космического лифта. Помимо этих особенностей при создании космического лифта необходимо учитывать следующие факторы:

- наличие космического мусора из старых спутников и их осколков;
- метеориты;
- коррозию в атмосферном кислороде;
- сложные погодные условия (грозы, ветры и т. п.);
- неизбежный ремонт обрывов отдельных волокон и всей ленты на всем протяжении лифта;
- колебания из-за ветров;
- радиацию;
- саботаж и терроризм.

Компании, заинтересованные в исследованиях космоса с помощью космического лифта, наверняка учтут эти особенности. Вполне



ЧАСТЬ IV Будущее

возможно, что чтение прогноза погоды перед отправкой в космическое путешествие на космическом лифте станет таким же обычным делом, как чтение прогноза перед отправкой на пикник.

Мир нанотехнологий

При рассмотрении перспектив развития синтеза и обработки наноструктур на ближайшее будущее, до 2020 г., ясно видны большие возможности использования нанотехнологий в области химии и биологии.

Комбинация традиционных химических и биологических методов сборки «сверху вниз» с методами самосборки «снизу вверх» позволит создавать функциональные устройства на наномасштабном уровне. Благодаря им удастся создать совершенно новые продукты и развить технологии нового поколения.

К 2015 г. рынок нанотехнологических продуктов станет огромным. В таблице 14.3 перечислены наиболее вероятные области применения нанотехнологий в недалеком будущем.

Таблица 14.3. Перспективные будущие области применения нанотехнологий

Продукт	Описание
Настенные экраны	Улучшение телевидения и видеоигр
Настенные акустические колонки	Улучшение звуковых систем, телевидения и видеоигр
Программируемая краска	Изменение цвета и узора по команде
Перепрограммируемые книги	Изменение содержания и вида книг по команде
Повторно используемая бумага и ткани	Изменение цвета и узора
Самонастраивающиеся кресла	Подгонка формы кресла под фигуру человека
Самонастраивающиеся краски для настольных игр	Подгонка размера и формы игрового поля под любую поверхность
Настольные игры с большой детализацией	Создание реальных стратегических игр по аналогии с компьютерными стратегиями
Окна и стены с изменяющейся прозрачностью	Изменение прозрачности для регулировки уровня освещенности и экономии энергии
Окна и стены с изменяющейся формой	Изменение объема комнат по команде



Продукт	Описание
Стены, которые можно проходить насквозь	Изменение механической сопротивляемости стен по команде
Программируемые комнаты	Изменение конфигурации квартиры и интерьера по команде
Самозатачивающиеся ножи	Применение наночастиц, которые образуют абсолютно острую кромку
Программируемые затворы	Открытие и закрытие затвора по команде
Самоочищающиеся ванны	Покрытия, на которые не прилипает грязь
Программируемые гигиенические средства	Гигиенические средства для удаления грязи, жиров и пота без необходимости приема душа
Программируемые средства по уходу за одеждой	Одежда из материалов, которые способны автоматически удалять грязь
Чувствительная к температуре одежда	Одежда из материалов, которые способны автоматически изменять теплопроводящие свойства, например плотность расположения волокон в зависимости от внешней температуры
Наручные часы и термометры в виде тонкого, как краска, покрытия	Мгновенное получение информации; больше не нужно будет бояться потери часов
Программируемые лекарства внутри организма	Доза и время ввода лекарства по команде
Автоматические поглотители колебаний зданий	Предотвращение ужасных последствий землетрясений и ураганов
Самособирающиеся полномасштабные продукты	Полный цикл самосборки — от чертежа к продукту
Программируемые формы и штампы	Для создания деталей из разных материалов — от бетона до пластмасс
Программируемые презентационные доски	Сделанные специальной ручкой надписи автоматически считываются компьютером
Самодиагностируемые конструкционные материалы	Автоматически определяют свое состояние, приложенную нагрузку, износ и структурную целостность
Чувствительные шины	Изменяют форму и свойства в соответствии с нагрузкой и дорожными условиями
Умные бамперы	Изменяют форму (например, увеличиваются) при внезапном приближении к препятствию
Программируемые голограммы	Визуализация по команде



ЧАСТЬ IV Будущее

Таблица 14.3. Продолжение

Продукт	Описание
Контактные линзы для виртуальной реальности	Для улучшения компьютерных игр и систем управления
Полноценная виртуальная реальность	Окружение, которое имитирует ситуацию для всех органов чувств: зрения, слуха, осязания и т. п.
Космический лифт	Доставка грузов в космос
Клеточная терапия	Идентификация и лечение заболеваний на уровне клетки
Имплантируемые компьютеры	Компьютер, который всегда с тобой
Имплантируемые переводчики	Переводчик, который всегда с тобой
Увлажнитель кожи, устраняющий морщины	Автоматическое сглаживание морщин
Самонастраивающийся спортивный инвентарь	Автоматическая подгонка спортивного снаряжения под спортсмена
Противоударные и антикоррозионные покрытия	Для повышения износоустойчивости транспортных средств, двигателей и инструментов

В настоящее время около 4000 компаний и научно-исследовательских организаций занимаются нанотехнологиями, включая 1900 организаций в сфере обслуживания и около 2100 организаций, выпускающих новые продукты. Общий рынок нанотехнологий в 2006 г. оценивался примерно в 300 млрд долларов, а в 2015 — уже в 1000 млрд долларов.

Сейчас США, Япония, Китай и Германия занимают ведущие позиции в нанотехнологических исследованиях. По некоторым оценкам, число нанотехнологических компаний только в Китае с 2003 по 2006 г. выросло до 600. Причем темпы роста остаются очень высокими.

Глобальный интерес к наноматериалам и нанотехнологиям способствует улучшению качества уже существующих продуктов. По мере открытия новых удивительных свойств наноматериалов растут инвестиции в развитие потенциально очень выгодных нанотехнологий.

Хотя многие перспективы сегодня все еще относятся к области фантастики, вполне возможно, что уже завтра они будут претворены в реальность. В нанотехнологиях даже крошечные шаги могут привести к большим прорывам.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Национальный научный фонд США спрогнозировал, что рынок нанопродуктов и нанотехнологий достигнет величины 1 трлн долларов:
 - а) в 2007 г.;
 - б) в 2010 г.;
 - в) в 2012 г.;
 - г) в 2015 г.
2. Официальный документ, удостоверяющий исключительное право, авторство и приоритет изобретения, полезной модели либо промышленного образца, называется:
 - а) пропуском;
 - б) патентом;
 - в) меню;
 - г) завещанием.
3. Согласно данным Европейского патентного бюро в Мюнхене (Германия), за период с 1981 по 1998 г. количество ежегодно оформляемых патентов на нанотехнологии выросло с 28:
 - а) до 80;
 - б) до 100;
 - в) до 180;
 - г) до 200.
4. Специалисты компании Wilson создали на основе нанотехнологий и нанокompозитов титана новые виды клюшек для гольфа, которые стали:
 - а) скользкими;
 - б) более прочными и легкими, а потому позволяют выполнять более энергичные удары;
 - в) золотыми;
 - г) более медленными, тяжелыми и плотными.
5. Сколько компаний и научно-исследовательских организаций в настоящее время занимается нанотехнологиями?
 - а) 1200;
 - б) 2850;
 - в) 3500;
 - г) 4000.



ЧАСТЬ IV Будущее

6. Процесс получения твердых материалов и изделий из порошкообразных или пылевых смесей при температуре, которая ниже температуры плавления, называется:
 - а) уплотнением;
 - б) плавлением;
 - в) спеканием;
 - г) тлением.
7. Комбинация традиционных химических и биологических методов сборки «сверху вниз» с методами самосборки «снизу вверх» позволит создавать:
 - а) функциональные устройства на наномасштабном уровне;
 - б) аудиосистемы с объемным звуком;
 - в) новые модные серии купальников;
 - г) наноалюминиевые порошки.
8. Наилучшим местом базирования космического лифта могла бы быть плавучая платформа:
 - а) на Северном полюсе;
 - б) на центральной площади Нью-Йорка;
 - в) на вершине горы Эверест;
 - г) в Тихом океане на широте экватора.
9. Созданием медицинских имплантантов, например заменителей костей или сердечных клапанов, занимается:
 - а) биоинженерия;
 - б) археология;
 - в) геология;
 - г) ядерная физика.
10. Чтобы разложить на простые множители число из 400 цифр, обычному компьютеру потребуются миллиарды лет, а квантовому компьютеру несколько:
 - а) секунд;
 - б) минут;
 - в) часов;
 - г) дней.



Тест к части IV

1. Какая организация планирует создать доступный для всех банк данных с описанием последних достижений в изучении нанотехнологий и их влияния на окружающую среду?
 - а) Environmental Protection Agency;
 - б) National Nanoscience Council;
 - в) International Council on Nanotechnology;
 - г) Institute of Higher Learning.
2. Мечта современных маркетологов — использовать в рекламе термины из:
 - а) криптологии;
 - б) нанотехнологии;
 - в) легкой атлетики;
 - г) океанографии.
3. Самым прочным веществом до открытия фуллерена считался:
 - а) свинец;
 - б) золото;
 - в) криптон;
 - г) алмаз.
4. На основе наномасштабных дендримеров был создан:
 - а) гель для волос;
 - б) смазка;
 - в) губная помада;
 - г) бактерицидный гель.
5. Перспективы использования нанотехнологий в практических целях самыми первыми оценили:
 - а) создатели чипов;
 - б) археологи;
 - в) окулисты;
 - г) прорабы.
6. Официальный стандарт (эталон) единицы измерения массы сделан:
 - а) из платины;
 - б) из железа;
 - в) из серебра;
 - г) из вольфрама.



ЧАСТЬ IV Будущее

7. Токсичность фуллерена и других растворимых в воде химикатов связана:
 - а) со специализацией;
 - б) с образованием производных химических веществ;
 - в) с подкислением;
 - г) с дистрибуцией.
8. Кремниевые чипы станут еще более быстрыми и эффективными в ближайшие:
 - а) 1—4 года;
 - б) 5—10 лет;
 - в) 11—20 лет;
 - г) 21—40 лет.
9. Теоретически ассемблеры (наномасштабные роботы) способны:
 - а) завоевать мир;
 - б) управлять велосипедом;
 - в) собирать наноразмерные компоненты и механизмы из атомов;
 - г) делать виртуозных танцоров из неповоротливых людей.
10. Компания TheraFuse, Inc. разрабатывает и создает специальную накладку на кожу для введения и доставки фармацевтических и биологических жидкостей для лечения:
 - а) водобоязни;
 - б) диабета;
 - в) птичьего гриппа;
 - г) энуреза.
11. Изобретателем технологии создания нанопроводов является профессор химии Гарвардского университета:
 - а) Чарльз М. Либер;
 - б) Дэннис Уильямс;
 - в) Элизабет Карадек;
 - г) Ларри Бок.
12. Прежде чем широко использовать способы очистки токсичных отходов на основе наночастиц железа, нужно научиться их:
 - а) распределять;
 - б) восстанавливать;
 - в) упаковывать;
 - г) маркировать.



13. Частицы считаются наночастицами, если одно из их измерений меньше:
а) 100 мм;
б) 10 мм;
в) 100 нм;
г) 1 дм.
14. Если объект обращается вокруг Земли с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси, его орбита называется:
а) низкой орбитой;
б) галактической орбитой;
в) солнечной орбитой;
г) геостационарной орбитой.
15. Компании Intel, IBM, Hewlett-Packard, DuPont, General Electric, Motorola, Sony, Siemens, Xerox объединяет интерес:
а) к созданию новых удобрений;
б) намеренному обрушению рынка;
в) нанотехнологиям;
г) проблемам малого бизнеса.
16. Международный совет по нанотехнологиям сотрудничает с учеными, инженерами, промышленниками и представителями общественных организаций по охране окружающей среды для создания стандартных:
а) приемов ведения бизнеса;
б) кристаллических структур;
в) бланков;
г) терминов.
17. По оценкам научно-исследовательской компании NanoMat (Карлсруэ, Германия), только в 2004 г. была выпущена продукция на основе наночастиц или наноматериалов, суммарная стоимость которой превысила:
а) 12,2 млрд долларов;
б) 22,4 млрд долларов;
в) 26,5 млрд долларов;
г) 28,4 млрд долларов.



ЧАСТЬ IV Будущее

18. Нанотрубки — это самые лучшие из известных проводников электрического тока, и их можно использовать для заряда аккумуляторов автомобиля благодаря наиболее эффективному преобразованию:
- а) пробега;
 - б) энергии торможения;
 - в) времени;
 - г) выхлопных газов.
19. Все перечисленные ниже агентства сотрудничают в рамках Национальной нанотехнологической инициативы США, за исключением:
- а) Национального научного фонда США;
 - б) Национального института защиты окружающей среды США;
 - в) Министерства энергетики США;
 - г) Министерства экономики США.
20. Задача разложения числа на его простые множители имеет огромное практическое значение, поскольку алгоритмы разложения на простые множители используются:
- а) в фильмах ужасов;
 - б) генерации электричества;
 - в) развлечениях;
 - г) системах шифрования.
21. Изучение свойств объекта с помощью тщательно выполняемых наблюдений и измерений называется:
- а) очной ставкой;
 - б) экспериментом;
 - в) ошибкой;
 - г) гибридизацией.
22. Влияние на занятость людей, новые методы лечения и медикаменты, производство, здоровье и окружающую среду, неприкосновенность личности и частной собственности — это аспекты нанотехнологий, действующие на:
- а) сезонные колебания температуры;
 - б) академический статус;
 - в) общество;
 - г) оценки в школе.



23. В 2004 г. специалисты компании Wilson создали новые виды клюшек для гольфа (FwC, Pi5 и Staff Pd5/Dd5) на основе:
- а) советов опытных игроков в гольф;
 - б) олова и железа;
 - в) представлений о более расслабленной технике удара;
 - г) нанокompозитов титана.
24. Наноструктуры с разветвленным древовидным физическим строением, которое позволяет прекрасно доставлять лекарства в нужное место и лечить болезни, называются:
- а) дендримерами;
 - б) пуллеренами;
 - в) дедритами;
 - г) полипами.
25. Преобразование химического соединения в другой производный продукт с аналогичной химической структурой и немного отличающимися свойствами называется:
- а) оксидизацией;
 - б) валентизацией;
 - в) образованием производных химических веществ;
 - г) изотермией.
26. Национальный научный фонд США спрогнозировал, что рынок нанопроductов и нанотехнологий достигнет величины 1 трлн долларов:
- а) в 2010 г.;
 - б) в 2015 г.;
 - в) в 2020 г.;
 - г) в 2025 г.
27. Доля топлива спутника, которая расходуется впустую из-за износа воспламенителя и неэффективности сгорания топлива, примерно равна:
- а) $1/4$;
 - б) $1/3$;
 - в) $1/2$;
 - г) $2/3$.



ЧАСТЬ IV Будущее

28. Для обеспечения безопасности в воздушном пространстве вблизи космического лифта будут:
- а) приглашать туристов;
 - б) располагаться облака;
 - в) ограничены полеты;
 - г) разрешены любые полеты.
29. Компания NanoInk, Inc. получила лицензию на технологию идентификации спор сибирской язвы и изготавливает:
- а) святящиеся в темноте чернила;
 - б) авторучки с чернилами;
 - в) диагностические устройства;
 - г) краску для продуктов питания.
30. Глобальный риск применения наночастиц связан с чрезвычайно высокой их:
- а) мобильностью;
 - б) запахом;
 - в) сопротивляемостью;
 - г) хрупкостью.
31. Компания L'Oréal использует в своих новых кремах нанотехнологии для доставки под поверхностный слой кожи:
- а) питательных веществ;
 - б) спор сибирской язвы;
 - в) ботокса;
 - г) фосфоресцирующих наночастиц.
32. Для широкой публики нанотехнологии означают:
- а) устаревшие новости;
 - б) техническая терминология;
 - в) научная фантастика;
 - г) модное словечко.
33. Возможности оптической связи между спутниками для передачи большого объема данных впервые были продемонстрированы в проекте:
- а) ARTEMIS;
 - б) ARROW;
 - в) CALLISTO;
 - г) ORION.



- 34.** Токсичность фуллерена влияет на клеточные мембраны из-за присутствия:
- а) липидов;
 - б) аминокислот;
 - в) азота;
 - г) свободных радикалов.
- 35.** Многие ведущие научно-исследовательские организации, включая Оксфордский университет (Великобритания), Университет Инсбрука (Австрия), Массачусетский технологический институт (США), Калифорнийский технологический институт (США) и Стэнфордский университет (США), имеют в своем штате научные группы, которые занимаются изучением основ:
- а) фигурного катания;
 - б) квантовых вычислений;
 - в) альпинизма;
 - г) конструирования эффективных мышеловок.
- 36.** Инвестиционные компании считают, что развитие нанотехнологий можно сравнить:
- а) с крахом интернет-компаний в 1990-х гг.;
 - б) с легендой о Давиде и Голиафе;
 - в) с поговоркой «Копейка рубль бережет»;
 - г) с «золотой лихорадкой» в Калифорнии более века назад.
- 37.** Для успешного строительства космического лифта следует учитывать все перечисленные ниже факторы, за исключением:
- а) даты начала строительства;
 - б) защиты от радиации;
 - в) вибрации;
 - г) саботажа и терроризма.
- 38.** Одним из оптимальных путей правительственной поддержки развития нанотехнологий является:
- а) неограниченное финансирование;
 - б) приостановка всех остальных исследований;
 - в) постепенное внедрение;
 - г) специальные налоги на биочипы.



ЧАСТЬ IV Будущее

- 39.** С помощью нанотрубок биочипы могут выполнять химические тесты эффективнее:
- а) в 10 раз;
 - б) в 1 тыс. раз;
 - в) в 10 тыс. раз;
 - г) в 100 тыс. раз.
- 40.** В солнцезащитном креме многих компаний используется порошок Z-COTE на основе наночастиц сверхчистого оксида цинка, который выпускается компанией:
- а) BASF;
 - б) ACME;
 - в) NASA;
 - г) Intel.

Итоговый экзамен

1. Все перечисленные ниже элементы являются составными частями ДНК, за исключением:
 - а) гуанина;
 - б) цитозина;
 - в) аденина;
 - г) тирозина.
2. Национальный институт охраны труда США и Управление по контролю продуктов и лекарств США изучают воздействие промышленных наночастиц на:
 - а) кожу;
 - б) синтетические материалы;
 - в) геотермальную активность;
 - г) татуировки.
3. В зависимости от типа инкапсулированных молекул медики могут влиять на:
 - а) стоимость медикаментов;
 - б) необходимость лечения;
 - в) дозу и тип медикамента;
 - г) рабочую нагрузку.
4. Организмы-убийцы, оружие судного дня и бесконтрольные наноботы могут быть элементами перечисленных ниже видов деятельности, кроме:
 - а) художественного фильма;
 - б) плана научных исследований;
 - в) компьютерной игры;
 - г) научно-фантастического романа.
5. Присоединение молекул к поверхности фуллерена называется:
 - а) поляризацией;
 - б) функционализацией;
 - в) характеристикой;
 - г) оптимизацией.



ЧАСТЬ IV Будущее

6. Белки — это:
 - а) элементы неорганических соединений;
 - б) бесцветные пилюли;
 - в) цепочки аминокислот, способные образовывать сложные структуры;
 - г) поделки из дерева и минералов.
7. Частицы считаются наночастицами, если одно из их измерений меньше:
 - а) 1 м;
 - б) 50 см;
 - в) 100 мм;
 - г) 100 нм.
8. Особые свойства наночастиц преимущественно связаны:
 - а) с их размерами;
 - б) температурой;
 - в) плотностью;
 - г) запахом.
9. Образно говоря, современный интерес к нанотехнологиям чуть прохладнее, чем:
 - а) пламя;
 - б) вода;
 - в) ветер;
 - г) лед.
10. Устройства с 1000 ячейками-анализаторами на 1 см² кремниевого чипа называются:
 - а) картофельными чипсами;
 - б) рыбными чипсами;
 - в) шоколадными батончиками;
 - г) «лабораториями-на-чипе».
11. Национальный институт охраны труда США планирует подготовить и выпустить:
 - а) листовку к Национальному дню нанотехнологий;
 - б) перечень способов получения нанотрубок;
 - в) документ с обзором практического опыта работы с наноматериалами;
 - г) приз за лучшую идею охраны окружающей среды.



12. Символом серебра в Периодической таблице элементов является:
а) Si;
б) Ag;
в) Hg;
г) Sr.
13. Нанотехнологии позволяют создавать материалы на основе:
а) отдельных атомов и молекул;
б) воды;
в) почвы;
г) космических лучей.
14. В 1870 г. Мейер предложил вариант своей Периодической таблицы, содержащей:
а) 28 элементов;
б) 57 элементов;
в) 74 элемента;
г) 112 элементов.
15. До изобретения современных инструментов визуализации объектов наномира ученые использовали все перечисленные ниже методы, за исключением:
а) астрологических предсказаний;
б) рентгеновского излучения;
в) ультразвукового излучения;
г) биопсии тканей.
16. В связи с тем, что мышьяк представляет большую опасность для здоровья человека, ЕРА ужесточила стандарты для его предельного содержания в питьевой воде до:
а) 1 части на миллиард;
б) 5 частей на миллиард;
в) 10 частей на миллиард;
г) 50 частей на миллиард.
17. Белок в организме человека, который состоит из трех спиральных цепей из аминокислотных остатков, составляет основу соединительной ткани животных (сухожилия, кости и хрящи) и обеспечивает ее прочность, называется:
а) гемоглобином;
б) коллагеном;
в) альбумином;
г) фактором роста.



ЧАСТЬ IV Будущее

18. Отрицательно заряженные субатомные частицы, которые вместе с положительно заряженным ядром находятся в составе атома, называются:
- а) нейтрино;
 - б) протонами;
 - в) электронами;
 - г) кварками.
19. Профессор Ричард Фейнман был:
- а) физиком;
 - б) биологом;
 - в) социологом;
 - г) патологоанатомом.
20. Источниками атмосферного оксида азота являются все перечисленные ниже объекты, за исключением:
- а) молний;
 - б) горных ручьев;
 - в) лесных пожаров;
 - г) вулканов.
21. Нанотехнологии — это:
- а) технологии обновления локомотивов;
 - б) область мультидисциплинарных исследований;
 - в) способы стать гиперактивным;
 - г) фантастика.
22. Наибольшей проблемой использования солнечной энергии является:
- а) высокая надежность;
 - б) недостаточная мощность;
 - в) большое загрязнение;
 - г) ночное время.
23. Физика движения молекул ДНК и РНК через наноканалы имеет большое значение для:
- а) планирования семьи;
 - б) методов фильтрации и проектирования мембран;
 - в) цвета волос и глаз;
 - г) очистки окружающей среды от технеция.



24. Доля современных ученых, которые согласны с тем, что повышение уровня концентрации углекислого газа в атмосфере вызовет серьезные проблемы в течение ближайших 100 лет, составляет:
а) 24%;
б) 45%;
в) 72%;
г) 99%.
25. В химиотерапии лечение некоторыми токсичными лекарствами проводится на грани между уничтожением раковой опухоли:
а) и повышением суеверия;
б) повышением уровня стресса;
в) уничтожением самого пациента;
г) потерей медицинской страховки.
26. Алхимией раньше назывались исследования:
а) древних химиков;
б) ботаников;
в) системных администраторов;
г) математиков.
27. Количество статей по нанотехнологиям, опубликованных в период с 1990 по 2005 г., увеличилось с 0 до:
а) 200;
б) 4032;
в) 20 тыс.;
г) 32 тыс.
28. Полупроводниковый нанокристалл величиной всего несколько нанометров называется:
а) квантовой собакой;
б) квантовой точкой;
в) бактерией;
г) амёбой.
29. Дон Эйглер сложил слово «IBM» из 35 атомов ксенона, а впоследствии изобрел:
а) машину для приготовления мороженого;
б) антибликовый вытяжной шкаф;
в) противообрастающее покрытие;
г) электрический переключатель на основе одного атома.



ЧАСТЬ IV Будущее

30. Нанотехнологи используют все перечисленные ниже инструменты, за исключением:
- а) инспекционных инструментов;
 - б) производственных инструментов;
 - в) кулинарных инструментов;
 - г) инструментов моделирования.
31. Качество воды определяется с учетом перечисленных ниже факторов, за исключением:
- а) добычи и сжигания ископаемых видов топлива;
 - б) массовой вырубki лесов;
 - в) выбросов отходов производства;
 - г) присутствия речных камней.
32. Исследования какого ученого показали, что бóльшая часть массы атома сосредоточена в его ядре?
- а) Эрнеста Резерфорда;
 - б) Дж. Дж. Томсона;
 - в) Ганса Гейгера;
 - г) Эрнеста Хемингуэя.
33. Эксперимент вне живого организма называется:
- а) *in centro*;
 - б) *in vivo*;
 - в) *in vivo*;
 - г) *in vitro*.
34. Вещество, способное при добавлении в жидкость изменять ее смачивающие свойства за счет изменения поверхностного натяжения жидкости, называется:
- а) нефтяной пленкой;
 - б) поверхностно-активным веществом;
 - в) мелассой;
 - г) грязью.
35. Материал называется цитотоксичным, если он:
- а) убивает клетки;
 - б) хорошо растет;
 - в) содержится в граните;
 - г) имеет сине-зеленый цвет.



- 36.** Какой русский ученый предложил конструкцию «космического лифта», состоящего из катушки с кабелем, растянутым до высоты геостационарной орбиты?
- а) Стив Смолин;
 - б) Константин Циолковский;
 - в) Поль Карадек;
 - г) Михаил Барышников.
- 37.** Для оценки скорости и эффективности движения наночастиц в воде и почве очень важно определить:
- а) их оптические свойства;
 - б) способы транспортировки;
 - в) соленость воды;
 - г) стоимость устранения загрязнения.
- 38.** Такие тяжелые металлы, как свинец и ртуть, после окисления с помощью железа становятся нерастворимыми, а также:
- а) зелеными;
 - б) радиоактивными;
 - в) оплодотворяющими;
 - г) заблокированными в почве.
- 39.** В настоящее время население Земли приблизительно составляет:
- а) 3 млрд;
 - б) 4 млрд;
 - в) 5 млрд;
 - г) 6,5 млрд.
- 40.** Несколько коротких фрагментов молекулы ДНК, расположенных особым образом на поверхности, называются ДНК-чипом, или:
- а) шоколадным чипом;
 - б) кремниевым чипом;
 - в) биочипом;
 - г) неочипом.
- 41.** Первая двунаправленная оптическая связь была организована 9 декабря 2005 г. между французским спутником ARTEMIS:
- а) и российским спутником VVP;
 - б) японским спутником OICETS;
 - в) китайским спутником GREAT WALL;
 - г) индийским спутником RADGE KAPOOR.



ЧАСТЬ IV Будущее

42. Среди частиц, составляющих атом, заряда не имеют:
- а) электроны;
 - б) протоны;
 - в) нейтроны;
 - г) кварки.
43. Оптическое увеличение — это величина, на которую станет больше изображение:
- а) в стетоскопе;
 - б) микроскопе;
 - в) гироскопе;
 - г) альтиметре.
44. Общий рынок нанотехнологий в 2006 г. оценивался примерно в 300 млрд долларов США, а в 2015 г. он достигнет:
- а) 385 млрд;
 - б) 500 млрд;
 - в) 700 млрд;
 - г) 1000 млрд.
45. Первым человеком, который увидел бактерию, был:
- а) Александр Флеминг;
 - б) Леонардо да Винчи;
 - в) Антони ван Левенгук;
 - г) Джон Бертоли.
46. Искусственный спутник на геостационарной орбите находится:
- а) только в научно-фантастических произведениях;
 - б) над разными точками на земной поверхности;
 - в) над Северным полюсом;
 - г) постоянно над одной и той же точкой на земной поверхности.
47. Для наблюдения *in vivo* молекулярных процессов внутри живых организмов используется:
- а) мутагенная визуализация;
 - б) молекулярная визуализация;
 - в) метеорологическая визуализация;
 - г) космическая визуализация.



48. Компанией, специалисты которой создали на основе нанотехнологий и нанокompозитов титана новые виды клюшек для гольфа, является:
а) Head;
б) Nike;
в) Wilson;
г) Everlast.
49. Для открытия и исследования новых физических, химических и биологических явлений в наномире ученым необходимы:
а) высокотехнологичные инструменты;
б) больше кофе;
в) большая длительность отпуска;
г) выходные по пятницам.
50. Способность материала изменять оптические свойства при приложении электрического напряжения называется:
а) высокой рыночной стоимостью;
б) электрохромизмом;
в) фототропизмом;
г) радиоактивностью.
51. Объектом, внутри и снаружи которого при освещении генерируются сильные электромагнитные колебания в диапазоне, близком к инфракрасному, является:
а) углеродная нанотрубка;
б) золотое обручальное кольцо;
в) нановодород;
г) золотое нанокольцо.
52. Аббревиатура ОСУН (SWNT) означает:
а) оранжевый стручковый ультрачувствительный нарцисс;
б) особо стойкий и устойчивый нанопровод;
в) однослойная углеродная нанотрубка;
г) основное сверхпрочное универсальное нанопокрывтие.
53. Нанотехнологии имеют для энергетики и медицины такое же значение, как и пластмассы для:
а) новых материалов;
б) косметики;
в) теории струн;
г) контейнеров для мусора.



ЧАСТЬ IV Будущее

- 54.** Инфракрасные сенсоры можно использовать при космических исследованиях во всех областях, перечисленных ниже, кроме:
- а) навигационных инструментов;
 - б) самозатачивающихся зондов;
 - в) оптической передачи данных;
 - г) исследований атмосферы.
- 55.** Объекты считаются наномасштабными, если одни из параметров их измерений находятся в диапазоне:
- а) 1–100 нм;
 - б) 100–1000 нм;
 - в) 1000–10000 нм;
 - г) 10 000–100 000 нм.
- 56.** Национальная нанотехнологическая инициатива США обеспечивает координацию деятельности в области:
- а) биотехнологий;
 - б) агрономии;
 - в) биохимии;
 - г) нанотехнологий.
- 57.** Квантовые точки можно создавать с помощью:
- а) археологии;
 - б) камнедробления;
 - в) электронно-лучевой литографии;
 - г) кондитерских методов.
- 58.** Волна де Бройля — это мера волновой природы:
- а) приливной волны;
 - б) складок на флаге;
 - в) метеора;
 - г) элементарных частиц.
- 59.** Уникальные электрические и механические свойства нанотрубок удалось продемонстрировать благодаря:
- а) тщательным измерениям;
 - б) щедрому финансированию;
 - в) умелому маркетингу;
 - г) счастливому стечению обстоятельств и упорству.



- 60.** На наночастицы железа в почве не оказывает влияния:
- а) кислотность почвы;
 - б) температура почвы;
 - в) питательные вещества в почве;
 - г) все перечисленные выше факторы.
- 61.** Так обычно говорят по поводу использования нанотехнологий:
- а) они слишком хороши, чтобы быть правдой;
 - б) лучше меньше, да лучше;
 - в) их стоит использовать в науке и технике;
 - г) разум сильнее грубой силы.
- 62.** Электронно-лучевая литография используется для создания:
- а) наиболее совершенных ручек;
 - б) высококачественных радиоприемников;
 - в) квантовых точек;
 - г) аэрогелей.
- 63.** Материал, состоящий из двух металлов (как, например, латунь из меди и цинка), называется:
- а) суфле;
 - б) сплавом;
 - в) идеальным газом;
 - г) компостом.
- 64.** Взвесь очень маленьких частиц, которые не осаждаются под действием силы тяжести в другом непрерывном материале, называется:
- а) омлетом;
 - б) коллоидом;
 - в) результатом школьного эксперимента;
 - г) инертным материалом.
- 65.** Основным преимуществом метода диагностики на основе анализа слюны является его следующая характеристика:
- а) не липкий;
 - б) инвазивный;
 - в) повторно используемый;
 - г) неинвазивный.



ЧАСТЬ IV Будущее

- 66.** Продукт EсоTru® при использовании в Африке в качестве предоперационного антисептика продемонстрировал отсутствие каких-либо послеоперационных инфекций и осложнений:
- а) у 25% пациентов;
 - б) 50% пациентов;
 - в) 75% пациентов;
 - г) 100% пациентов.
- 67.** В отличие от электрических вычислительных устройств, в которых для передачи сигналов используются заряды, в квантовых компьютерах используется:
- а) тепло;
 - б) спин или поляризация;
 - в) ветер;
 - г) кварки.
- 68.** Один из полупроводниковых наномасштабных объектов называется:
- а) квантовой запятой;
 - б) квантовой почкой;
 - в) квантовой точкой;
 - г) квантовой кочкой.
- 69.** Микроскоп, созданный Антони ван Левенгуком, имел увеличение:
- а) 50-кратное;
 - б) 75-кратное;
 - в) 100-кратное;
 - г) 200-кратное.
- 70.** При радиационной диагностике заблокированные области контрастно выглядят на фоне здоровых тканей и проявляются на рентгеновских снимках:
- а) в светлых тонах;
 - б) темных тонах;
 - в) красных тонах;
 - г) коричневых тонах.



71. Один из новых методов лечения рака основан на свойстве крошечных наноболочек:
- а) поглощать монооксид азота в легких;
 - б) повышать настроение при прослушивании популярных мелодий;
 - в) проявлять активность по определенным дням и ночам;
 - г) вместе с кровью проникать в раковую опухоль.
72. Артур Кларк в книге «Фонтаны рая» (*The Fountains of Paradise*) описал будущие способы доставки грузов в космос без использования ракет, а только с помощью космических лифтов:
- а) в 1865 г.;
 - б) 1979 г.;
 - в) 1986 г.;
 - г) 2002 г.
73. Какие наноинструменты позволяют непосредственно измерять динамические характеристики молекул?
- а) грубая сила;
 - б) крошечные тиски;
 - в) оптические пинцеты;
 - г) сверхмалые плоскогубцы.
74. С помощью просвечивающей электронной микроскопии можно рассматривать объекты с увеличением, большим, чем в оптической микроскопии:
- а) в 500 раз;
 - б) 1000 раз;
 - в) 25 000 раз;
 - г) 100 000 раз.
75. Учеными, открывшими в 1951 г. структуру ДНК, являются:
- а) Дж. Уотсон и Ф. Крик;
 - б) Дж. Джеймс и Э. Эбби;
 - в) У. Вильямс и Г. Беннет;
 - г) М. Брайан и У. Маккенна.



ЧАСТЬ IV Будущее

76. Свойство линзы или оптической системы показывать раздельно близко расположенные объекты называется:
- а) доступностью;
 - б) разрешающей способностью;
 - в) проводимостью;
 - г) прочностью.
77. Токсикологическое влияние искусственно созданных наночастиц на живые организмы:
- а) хорошо изучено;
 - б) все еще является загадкой;
 - в) отчасти понятно;
 - г) не имеет никакого значения.
78. Одним из важнейших преимуществ нанокристаллов по сравнению с более крупными объектами является то, что:
- а) их легко расколоть;
 - б) их можно использовать как зеркало;
 - в) их легко спрятать;
 - г) они имеют большую поверхность при малом объеме.
79. Просвечивающий электронный микроскоп способен просвечивать достаточно тонкий образец, как:
- а) проектор слайдов;
 - б) магнитное зеркало;
 - в) лампа Аладдина;
 - г) циркуль.
80. После железного, бронзового, индустриального и информационного веков в будущем наступит:
- а) грязный век;
 - б) век Евро;
 - в) молекулярный век;
 - г) век знаменитостей.
81. Туннельный электрический ток образуется, когда в системе «образец—игла» с приложенной разностью потенциалов:
- а) создается постоянно действующий туннель;
 - б) электроны из образца туннелируют к игле;
 - в) ничего не меняется;
 - г) вообще ничего не происходит.



- 82.** Аббревиатура ЦНБООС (CBEN) означает:
- а) Централизованная научная база оптимальных и оперативных средств;
 - б) Центр нанотехнологий в биологии и охране окружающей среды;
 - в) Центральная научная больница для особо опасных случаев;
 - г) Центр новых биологических объектов и открытых систем.
- 83.** Аэрозоли и пены являются разновидностями:
- а) коллоидов;
 - б) гелей для волос;
 - в) метаморфических пород;
 - г) молекул ДНК.
- 84.** Современные удочки для рыбной ловли и теннисные ракетки содержат наночастицы и углеродные нанотрубки для:
- а) дополнительной рекламы;
 - б) увеличения продаж;
 - в) прочности и гибкости;
 - г) улучшения цвета.
- 85.** Правительства США и других развитых стран мира затратили миллиарды долларов на очистку территорий, загрязненных промышленными отходами, поскольку:
- а) боятся гнева избирателей;
 - б) не знают, куда потратить излишек денег;
 - в) хотят снизить опасность для жизни со стороны токсичных отходов;
 - г) появились новые стандарты.
- 86.** Чем больше количество фрагментов молекул, присоединенных к поверхности фуллеренов, тем больше вероятность снижения:
- а) стоимости;
 - б) выразительности;
 - в) вариативности;
 - г) цитотоксичности.
- 87.** Поверхностно-активное вещество — это такое вещество, при добавлении которого в жидкость изменяется ее:
- а) запах;
 - б) точка плавления;
 - в) поверхностное натяжение;
 - г) стоимость.



ЧАСТЬ IV Будущее

88. Углеродные нанотрубки прочнее стали:
- а) в 20 раз;
 - б) 50 раз;
 - в) 70 раз;
 - г) 100 раз.
89. Электромотор, принцип действия которого основан на изменении формы объекта под действием электрического поля, называется:
- а) подвесным мотором;
 - б) пьезоэлектрическим мотором;
 - в) полевым мотором;
 - г) устаревшим мотором.
90. Эксперименты с такими молекулами, как ДНК и РНК, показали, что их перемещение сквозь поры в мембранах сопровождается:
- а) электрическим током;
 - б) переносом соли;
 - в) переносом коллагена;
 - г) самосборкой.
91. С появлением каких новых сверхпрочных материалов очень скоро может стать реальностью идея космического лифта?
- а) нанокристаллов;
 - б) нанотрубок;
 - в) фуллеренов;
 - г) нанопорошков.
92. Наномасштаб — не просто еще одна ступенька на пути миниатюризации, это:
- а) научная фантастика;
 - б) антикварная ценность;
 - в) лекарство для снижения веса;
 - г) качественно новый уровень.



- 93.** Какое из перечисленных ниже веществ наиболее часто используется в качестве радиоактивного маркера?
- а) кобальт;
 - б) сера;
 - в) таллий;
 - г) родий.
- 94.** Наибольший прогресс в связи с использованием нанотехнологий до сих пор был достигнут в создании более совершенных:
- а) компьютеров;
 - б) кислот;
 - в) политиков;
 - г) военных баз.
- 95.** Фуллерены, однослойные углеродные нанотрубки, нанополочки, квантовые точки и микрокапсулы справедливо называют:
- а) модными словечками;
 - б) объектами, которые невозможно создать;
 - в) слишком сложными для понимания объектами;
 - г) умными материалами.
- 96.** Профессор Ричард Смолли считал, что новые наноматериалы станут ключевым фактором решения:
- а) энергетических проблем;
 - б) проблем с финансированием;
 - в) проблемы народонаселения;
 - г) задач охраны окружающей среды.
- 97.** Нанотехнологии часто называют:
- а) молекулярной грязью;
 - б) молекулярным гипнозом;
 - в) молекулярным производством;
 - г) молекулярной фикцией.



ЧАСТЬ IV Будущее

- 98.** В Бангладеш, Индии, Мексике, Чили, Аргентине, Тайване и Таиланде от отравления мышьяком, содержащимся в питьевой воде, страдают:
- а) от 1 до 5% населения;
 - б) от 10 до 40% населения;
 - в) от 50 до 75% населения;
 - г) от 90 до 95% населения.
- 99.** В лазерной сканирующей конфокальной микроскопии используется лазерный (ультрафиолетовый) свет для исследования:
- а) мороженого;
 - б) флуоресцентных образцов;
 - в) атмосферы;
 - г) сжиженных углеводородов.
- 100.** Продукт EcoTru® является нетоксичным:
- а) антисептиком;
 - б) инструментом для обрезки веток;
 - в) удобрением;
 - г) видом одежды из хлопка.

Список литературы

1. Aizpurua J., Hanarp P., Sutherland D.S. et al. Optical properties of gold nanorings // *Physical Review Letters*. — 2003. — Vol. 90, № 5. P. 57–401.
2. Atkinson W. Nanocosm: Nanotechnology and the big changes coming from the inconceivably small. — New York: Amacom, 2003. — 307 p.
3. Bennett J., Cooper M., Hunter M. et al. London's Leonardo: The life and work of Robert Hooke — New York: Oxford University Press, 2003. — 276 p.
4. Boisseau P. Bringing nanobio to life in Europe // *Small Times Magazine*. — 2005. — Vol. 5, № 7. — P. 10–11.
5. Campbell C., Laherrere J. The end of cheap oil // *Scientific American*. — 1998. — Vol. 278, № 3. — P. 78–83.
6. Deffeyes K. Hubbert's Peak: The impending world oil shortage. — Princeton; New Jersey: Princeton University Press, 2001.
7. DNA-based molecular construction, international workshop on DNA-based molecular construction, Jena, Germany; May 23–25, 2002 / W. Fritzsche (ed.). — Melville, New York: American Institute of Physics, 2002. — (*AIP Conference Proceedings*, Vol. 640).
8. Endo M., Muramatsu H., Hayashi T. et al. Nanotechnology: 'Buckypaper' from coaxial nanotubes // *Nature*. — 2005. — Vol. 433, 476. doi: 10.1038/433476a.
9. Energy information administration, office of integrated analysis and forecasting: International energy outlook 2004. — Washington, DC.: U.S. Department of Energy, 2004. Rep. no. DOE/EIA-0484 (2004).
10. Environmental protection agency // Brief: The U.S. Greenhouse gas inventory. — Washington, DC.: Office of air and radiation, 2002 (EPA 430-F-02-008).
11. Ferrari M. Cancer nanotechnology: Opportunities and challenges // *Nature Reviews: Cancer*. — 2005. — Vol. 5. — P. 161–171.



Список литературы

12. *Feynman R.* There's plenty of room at the bottom, engineering and science // *Engineering and Science* (California Institute of Technology). — 1960. — № 23. — P. 22–36. Caltech presentation (<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>) (Русский перевод: «Химия и жизнь», 2002. — № 12. — С. 21–26).
13. *Goodsell D.S.* BioNanotechnology: Lessons from nature. — Hoboken, New Jersey: Wiley-Liss, Inc., 2004.
14. *Goodstein D.* Out of gas: The end of the age of oil. — New York : W.W. Norton & Company, 2004. — 128 p.
15. *Hood L., Heath J.R., Phelps M.E., Lin B.* Systems biology and new technologies enable predictive and preventative medicine // *Science*. — 2004. — Vol. 306. — P. 640–643.
16. *Jones R.L.* Soft Machines: nanotechnology and life. — Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2004.
17. *Lüsted M., Lüsted G.* A Nuclear power plant. — New York: Lucent Books, 2005.
18. *Marx V.* Molecular imaging // *Chemical and Engineering News*. — 2005. — Vol. 83, № 30. — P. 25–36.
19. *Melosh N. et al.* // *Journal of Cellular Biochemistry*. — 2003. — Vol. 87. — P. 112–115. (*Melosh N.A., Boukai A., Diana F. et al.* Ultrahigh-density nanowire lattices and circuits // *Science*. — 2003. — Vol. 300 (5616). — P. 112–115.)
20. *Mitlin D., Radmilovic V., Dahmen U., Morris J.W.* Precipitation and aging in Al-Si-Ge-Cu // *Metallurgical and Materials Transactions*. — 2001. — 32A. — P. 197–199.
21. Nanotechnology: Molecular speculations on global abundance / B.C. Crandall (ed.). — Cambridge; Massachusetts: MIT Press, 1996.
22. *O'Neal, D.P., Hirsch L.R., Halas N.J. et al.* Photo-thermal tumor ablation in mice using near infrared-absorbing nanoparticles // *Cancer Letters*. — 2004. — Vol. 209, № 2. — P. 171–176.
23. *Patolsky F., Zheng G., Hayden O. et al.* Electrical detection of single viruses // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2004, 28 September. — Vol. 101, № 39. — P. 14 017–14 022.
24. *Poole C.P., Jr., Owens F.J.* Introduction to Nanotechnology. — Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
25. *Ratner M., Ratner D.* Nanotechnology: A gentle introduction to the next big idea. — Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.



26. *Robichaud C., Tanzil D., Weilenmann U., Wiesner M.* Relative risk analysis of several manufactured nanomaterials: An insurance industry context // *Environmental Science and Technology*. — 2005, 4 October. — Vol. 39(22). — P. 8985–8994.
27. *Shellenberger M., Nordhaus T.* The death of environmentalism: Global warming politics in a post-environmental world. — (Essay presented at the October 2004 meeting of the Environmental Grantmakers Association).
28. Societal implications of nanoscience and nanotechnology / M. C. Roco, W.S. Bainbridge (eds.). — Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
29. *Stix G.* Little big science // *Scientific American*. — 2001, 16 September. — Vol. 285. — P. 32–37.
30. *Stockman M., Bergman D.* Quantum nanoplasmonics: Surface plasmon amplification through stimulated emission of radiation (spaser) // American Physical Society, Annual APS, 3–7 March 2003, abstract #S11.009.
31. *Watson J., Crick F.* Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid // *Nature* — 1953, 25 April. — Vol. 171. — P. 737–738.
32. *Zandonella C.* The tiny toolkit // *Nature*. — 2003, 1 May. — Vol. 423. — P. 10–12.

ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

1. *Альтман Ю.* Военные нанотехнологии / Ю. Альтман. — М.: Техносфера, 2006. — 416 с.
2. *Балабанов В. И.* Нанотехнологии. Наука будущего. — М.: Эксмо, 2008. — 256 с.
3. *Бинниг Г.* Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности: нобелевские лекции по физике / Г. Бинниг, Г. Рорер // УФН, 1996. Т. 154 (1988). — Вып. 2. — С. 261.
4. *Кобаяси Н.* Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси; пер. с япон. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 134 с.
5. *Митрофанов О.* Нанотехнология — шаг за горизонт / О. Митрофанов // Техника — молодежи, 2001. — № 12. — С. 10–12.
6. *Пула Ч.* Нанотехнологии / Ч. Пула, Ф. Оуэнса; 2-е изд. — М.: Техносфера, 2006 — 260 с.
7. *Сергеев Г. Б.* Нанохимия / Г. Б. Сергеев. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. — 228 с.



Список литературы

Русскоязычные ресурсы в Интернете

- РОСНАНО — Российская корпорация нанотехнологий (<http://www.rusnano.com/>).
- Российский электронный наножурнал (<http://www.nanojournal.ru>).
- Информационно-аналитический портал по нанотехнологиям и наноматериалам ФГУП ВНИИНМ им. А. А. Бочвара (<http://www.nanoportal.ru>).
- Журнал «Российские нанотехнологии» (<http://www.nanorf.ru>).
- Сайт о нанотехнологиях № 1 в России (<http://www.nanonews-net.ru>).
- Нанометр (<http://www.nanometer.ru>).
- Официальный сайт потребителей нанотоваров (<http://www.nanoware.ru>).

Англоязычные ресурсы в Интернете

БИЗНЕС

- Организация NanoBusiness Alliance (<http://www.nanobusiness.org>).
- Журнал *Technology Review* (<http://www.technologyreview.com>).
- Международная сеть International Small Technology Network (<http://www.nanoinvestornews.com/index.php>).
- Консультационная организация Cientifica Business Information and Consulting (<http://www.phantomsnet.com>).
- Обзорная статья «Technology Topics for Investors», David J. Roughly (<http://www.smallcapmedia.com/pdf/Nanotechfinal.pdf>).

ХИМИЯ

- Периодическая таблица элементов — WebElements (<http://www.webelements.com>).
- Периодическая таблица элементов — EnvironmentalChemistry.com (<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Pb.html>).
- Статья *There's Plenty of Room at the Bottom*. Richard Feynman (<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>).
- Группа Поля Аливисатоса «Alivisatos Group», University of California. Berkeley (<http://www.cchem.berkeley.edu/~pagrp/>).



СВЯЗЬ

- Национальный институт стандартов и технологий США — National Institute of Standards and Technology (<http://www.nist.gov/>).
- Компания NEC Laboratories America (<http://www.nec-labs.com/>).

ИСКОПАЕМЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

- Обзор рынка ископаемых видов топлива «World Petroleum Assessment». U.S. Geological Survey (<http://greenwood.cr.usgs.gov/energy/WorldEnergy/DDS-60>).

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

- Национальная лаборатория Сандия (США) — Sandia National Laboratories (<http://www.sandia.gov/geothermal>).
- Исследования USGS о тектонике плит (<http://geology.er.usgs.gov/eastern/tectonic.html>).

ЭЛЕКТРОНИКА

- Статья «Закон Мура» (<http://www.intel.com/technology/silicon/mooreslaw/>).
- Статья *IBM, Partners Creating 1,000+ Jobs with \$2.7 Billion in New York Projects* (<http://www.conway.com/ssinsider/bbdeal/bd050117.htm>).
- European Nanoelectronics Initiative Advisory Council (<http://www.cordis.lu/ist/eniac/>).
- Статья *Nano-transistor self assembles using biology*, *New Scientist* (<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn4406>).
- Статья *DNA Chips*. Snapshots of Science & Medicine. (http://science.education.nih.gov/newsnapshots/TOC_Chips/Chips_RITN/How_Chips_Work_1/how_chips_work_1.html).
- Статья *IBM scientists make breakthrough in nanoscale imaging*. IBM (http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/news.20040714_nanoscale.html).

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- О нанотехнологиях на сайте Environmental Protection Agency (<http://es.epa.gov/ncer/nano/>).
- Хранилище данных EnviroSenSe (<http://es.epa.gov>).



Список литературы

- National Center for Environmental Research (<http://es.epa.gov/ncer/publications/nano/index.html>).
- Статья «Legal Authorities Defining Hazardous Substances». Environmental Protection Agency Emergency Response System (<http://www.epa.gov/superfund/programs/er/hazsubs/lauths.htm>).

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

- Хранилище данных «Energy Efficiency and Renewable Energy». Department of Energy (<http://www.eere.energy.gov>).

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Каталог Nanovip.com (<http://www.nanovip.com/directory/Materials/index.php>).
- Статья *The Top Ten Nanotech Products of 2003*. Forbes.com (http://www.forbes.com/2003/12/29/cz_jw_1229soapbox.html).
- Компания Wilson (<http://www.wilsongolf.com>).
- Статья *Nano Republic Award Winners*. Larta (http://www.larta.org/lavox/articlelinks/2003/030721_nanoawardwinners.asp).

МЕДИЦИНА

- Обзор состояния нанотехнологий в медицине: Office of Portfolio Analysis and Strategic Initiatives (<http://nihroadmap.nih.gov/panomedicine/index.asp>).
- Обзор состояния нанотехнологий в сфере производства продуктов питания и лекарств: U.S. Food and Drug Administration Nanotechnology (<http://www.fda.gov/nanotechnology>).
- Статья *Nanocrystal Targeting in vivo*. Proceedings of the National Academy of Sciences (<http://www.pnas.org/cgi/content/full/99/20/12617>).

МИКРОСКОПИЯ

- Обзор истории развития микроскопии (<http://www.cas.muohio.edu/mbi-ws/microscopes/index.html>).

НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Институт Ричарда Смолли — Richard E. Smalley Institute for Nanoscale Science and Technology. Rice University (<http://www.cnst.rice.edu>).

Список литературы



- Национальная нанотехнологическая инициатива — National Nanotechnology Initiative (<http://www.nano.gov/>).
- Статья *Drexler dubs 'gray goo' fears obsolete* (<http://nanotechweb.org/articles/society/3/6/1/1>).
- Институт нанонауки и технологий — Nano Science and Technology Institute (<http://www.nsti.org>).
- Компания Lux Research (<http://www.luxresearchinc.com/>).
- Сервер новостей Nanotechweb.org (<http://www.nanotechweb.org/>).
- Сервер новостей SmallTimes (<http://www.smalltimes.com>).
- Foresight Nanotech Institute (<http://www.foresight.org/nano-dot/>).
- Институт нанотехнологий — Institute of Nanotechnology (<http://www.nano.org.uk>).
- Национальный институт стандартов и технологий США — National Institute of Standards and Technology (<http://www.nist.gov/>).

ОКЕАНОЛОГИЯ

- U.S. Geological Survey (<http://www.usgs.gov>).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (<http://www.nws.noaa.gov>).

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

- U.S. Department of Energy. Solar Energy Topics (<http://www.eere.energy.gov/RE/solar.html>).

ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМОСА

- NASA (<http://www.nasa.gov/home/index.html>).

Отвѣты на контрольные вопросы к главам

Глава 1

1: Г	2: В	3: Г	4: Ё	5: Г
6: В	7: Ё	8: В	9: Ё	10: а

Глава 2

1: Г	2: В	3: Ё	4: Ё	5: В
6: Г	7: а	8: а	9: В	10: Г

Глава 3

1: Ё	2: Г	3: В	4: Ё	5: Ё
6: а	7: В	8: Г	9: В	10: а

Глава 4

1: а	2: Ё	3: Ё	4: В	5: Г
6: Г	7: В	8: Г	9: Г	10: Ё

Глава 5

1: В	2: Г	3: а	4: В	5: Ё
6: В	7: а	8: Ё	9: Г	10: Ё

Глава 6

1: В	2: Ё	3: Г	4: а	5: В
6: Ё	7: В	8: а	9: Г	10: Ё

Глава 7

1: Ё	2: а	3: В	4: В	5: Ё
6: Г	7: а	8: Г	9: В	10: Г

Ответы на контрольные вопросы к главам



Глава 8

1: Г	2: В	3: а	4: б	5: Г
6: В	7: а	8: В	9: В	10: б

Глава 9

1: В	2: Г	3: а	4: Г	5: а
6: В	7: Г	8: В	9: В	10: б

Глава 10

1: б	2: В	3: Г	4: В	5: В
6: а	7: б	8: Г	9: а	10: Г

Глава 11

1: В	2: Г	3: б	4: Г	5: В
6: б	7: а	8: а	9: б	10: Г

Глава 12

1: В	2: В	3: Г	4: В	5: Г
6: б	7: В	8: а	9: б	10: а

Глава 13

1: Г	2: б	3: а	4: а	5: б
6: б	7: В	8: Г	9: В	10: В

Глава 14

1: Г	2: б	3: В	4: б	5: Г
6: В	7: а	8: Г	9: а	10: б

Ответы на тесты в конце частей

Часть I

1: В	2: а	3: Г	4: б	5: б
6: Г	7: б	8: В	9: Г	10: а
11: В	12: б	13: а	14: б	15: б
16: а	17: В	18: В	19: б	20: Г
21: б	22: б	23: а	24: В	25: Г
26: а	27: В	28: Г	29: б	30: В
31: В	32: б	33: В	34: Г	35: а
36: В	37: В	38: б	39: б	40: Г

Часть II

1: В	2: б	3: Г	4: Г	5: б
6: Г	7: Г	8: б	9: а	10: Г
11: а	12: б	13: В	14: Г	15: б
16: Г	17: В	18: а	19: В	20: Г
21: б	22: В	23: В	24: б	25: Г
26: В	27: Г	28: б	29: а	30: В
31: Г	32: б	33: В	34: а	35: б
36: а	37: б	38: б	39: В	40: Г

Ответы на тесты в конце частей



Часть III

1: б	2: в	3: в	4: а	5: г
6: г	7: в	8: б	9: в	10: б
11: в	12: г	13: а	14: г	15: г
16: г	17: в	18: б	19: г	20: б
21: в	22: б	23: г	24: а	25: в
26: а	27: в	28: в	29: г	30: в
31: б	32: в	33: г	34: г	35: в
36: в	37: а	38: б	39: г	40: а

Часть IV

1: в	2: б	3: г	4: г	5: а
6: а	7: б	8: б	9: в	10: б
11: а	12: б	13: в	14: г	15: в
16: г	17: в	18: б	19: г	20: г
21: б	22: в	23: г	24: а	25: в
26: б	27: б	28: в	29: в	30: а
31: б	32: в	33: а	34: г	35: б
36: г	37: а	38: в	39: в	40: а

Ответы на вопросы итогового экзамена

1: Г	2: а	3: В	4: Ё	5: Ё
6: В	7: Г	8: а	9: а	10: Г
11: В	12: Ё	13: а	14: Ё	15: а
16: В	17: Ё	18: В	19: а	20: Ё
21: Ё	22: Г	23: Ё	24: Г	25: В
26: а	27: В	28: Ё	29: Г	30: В
31: Г	32: а	33: Г	34: Ё	35: а
36: Ё	37: Ё	38: Г	39: Г	40: В
41: Ё	42: В	43: Ё	44: Г	45: В
46: Г	47: Ё	48: В	49: а	50: Ё
51: Г	52: В	53: а	54: Ё	55: а
56: Г	57: В	58: Г	59: а	60: Г
61: В	62: В	63: Ё	64: Ё	65: Г
66: Г	67: Ё	68: В	69: Г	70: а
71: Г	72: Ё	73: В	74: Ё	75: а
76: Ё	77: В	78: Г	79: а	80: В
81: Ё	82: Ё	83: а	84: В	85: В
86: Г	87: В	88: Г	89: Ё	90: а
91: Ё	92: Г	93: В	94: а	95: Г
96: а	97: В	98: Ё	99: Ё	100: а

Предметный указатель

In vitro, 105

In vivo, 176

А

Аденин, 100

Аллотропная форма, 55

Алмаз, 31, 55

Алхимия, 167

Аморфный углерод, 55

Ассемблер, 267

Атомарное позиционирование, 216

Атомное число, 22

Атомно-силовой микроскоп, 74

Атомный силовой микроскоп, 28

Аэрогель, 306

Б

Бакиболл, 30

Бардин, Джон, 192

Белковая инженерия, 128

Бинниг, Герд, 27, 73

Биодоступность, 129

Биоинженерия, 300

Биологическая инженерия, 127, 301

Биологическая номенклатура, 49

Биологический маркер, 176

Биологически совместимый материал, 301

Биочип, 112

Близкопольный сканирующий
оптический микроскоп, 76

Браттэйн, Уолтер Х., 192

В

Визуализация, 133

молекулярная, 134

Вязкость, 110

Г

Гейгер, Ганс, 21

Генетический код, 101

Генная терапия, 128

Геномика, 128

Геостационарная орбита, 316

Графит, 30, 55

Гуанин, 100

Гук, Роберт, 43

Д

Декогеренция, 215

Дериватизация, 282

Дифракция, 76

ДНК, 100

ДНК-дактилоскопия, 129

ДНК-сенсор, 112

ДНК-терапия, 128

ДНК-чип, 112



Предметный указатель

Ж

Жидкокристаллический дисплей, 305

Жидкостная электросиловая микроскопия, 111

З

Закон Мура, 189

Затемнение, 242

«Зеленые» нанотехнологии, 153

И

Имплантант, 301

Инертность, 191

К

Канцероген, 140

Катализатор, 185

Квазичастица, 219

Квант, 53, 192

Квантовая механика, 60, 191

Квантовая точка, 175

Квантовая яма, 175

Квантовое запутывание, 192, 213

Квантовые вычисления, 178

Квантовый выход, 175

Квантовый провод, 175

Керл, Роберт, 28

Кислотный дождь, 141

Клеточная терапия, 265

Коллаген, 135

Крик, Френсис, 100

Крото, Гарольд, 28

Кубит, 175, 214

Купер, Леон Н., 192

Л

«Лаборатория-на-чипе», 118

Лазерный сканирующий конфокальный микроскоп, 76

Ламинарное течение, 110

Левенгук, Антони ван, 44

Легирование, 193

Литография, 194

иммерсионная, 196

М

Масс-спектрометр, 29

Международная система единиц, 46

Мейер, Лотар, 47

Менделеев, Д. И., 47

Микрокапсула, 186

Микроскоп, 68

атомно-силовой, 74

лазерный сканирующий конфокальный, 76

мультифункциональный, 76
электронный, 68

Микроскопия

жидкостная электросиловая, 111

Микроструйная техника, 120, 266

Микрочип, 194

Многофункциональная терапия, 131

Мобильность, 283

Молекула, 22

Молекулярная ДНК-терапия, 128

Молекулярный век, 168

Мультифункциональный микроскоп, 76

Мур, Гордон, 189



Н

Нанобот, 63
 Нанокатализатор, 143
 Нанокольцо, 181
 Нанокомпозит, 179
 Нанокристалл, 172
 Нанолинза, 221
 Наноманипулятор, 78
 Наномедицина, 115
 Нанометр, 39, 44
 Наномир, 27
 Нанонаука, 39
 Нанооболочка, 60, 183
 Нанооптика, 218
 Нанопокрывтие, 182
 Нанопровод, 203, 264
 Наностержень, 57
 Наноструйная техника, 266
 Нанотехнология, 19
 Нанотранзистор, 198
 Нанотрубка, 33
 многослойная углеродная, 33
 однослойная углеродная, 56
 Наночастица, 39, 42
 Нейтрон, 22
 Нуклеотид, 100
 Нуклон, 22

О

Оптическая когерентная
 томография, 126

П

Патент, 299
 Периодическая таблица
 элементов, 47
 Пиксель, 304

Плазмон, 219
 Поверхностно-активное вещество,
 173
 Поверхностное натяжение, 109
 Подход
 сверху вниз, 61
 снизу вверх, 61
 Полупроводник, 193
 Преципитат, 179
 Протеомика, 128
 Протон, 22
 Пьезокристалл, 72
 Пьезомотор, 79

Р

Разрешающая способность, 70
 Разрешение, 70
 Рамановское рассеяние, 219
 Растворимость, 280
 Резерфорд, Эрнест, 21
 Рентгеновская кристаллография,
 100, 103
 Рорер, Хайнрих, 27, 73

С

Самосборка, 130, 182
 Сборщик, 267
 Сеть генерирования и хранения
 электроэнергии, 241
 Сила Ван-дер-Ваальса, 30
 Сканирующий зондовый
 микроскоп, 72
 Сканирующий туннельный
 микроскоп, 27, 73
 Смолли, Ричард, 28
 Спазер, 222
 Спекание, 306
 Спектральный анализ, 105



Предметный указатель

Спектроскопия, 105

Спин, 214

Сплав, 179

Стартап, 261

Структурная формула, 25

Т

Тераватт, 235

Тимин, 100

Токсичность, 280

Томсон, Дж. Дж., 20

Транзистор, 192, 193

 плоскостной, 197

 полевой, 198

Туннельный электрический ток,
73

У

Углерод, 54

Углеродная нанотрубка, 33, 244

Уотсон, Джеймс, 100

Ф

Фейнман, Ричард, 26

Фолдинг, 81

Фотолитография, 196

Фуллерен, 29

Фуллер, Ричард Бакминстер, 29

Х

Химическая номенклатура, 46

Химическая связь, 23

Химическая формула, 23, 25

Ц

Цитозин, 100

Цитотоксичность, 280

Ш

Шокли, Уильям, 192

Шриффер, Джон Р., 192

Э

Эйглер, Дон, 28

Электрокинетика, 110

Электрон, 20

Электронная микроскопия, 104

Электронно-лучевая трубка, 20

Электронный микроскоп, 68

 аналитический, 68, 71

 просвечивающий, 68, 71

 сканирующий, 68, 69

Электрофорез, 110

Электрохромность, 305

Энергосеть, 240

Эталон, 46

Я

Ядро, 20