

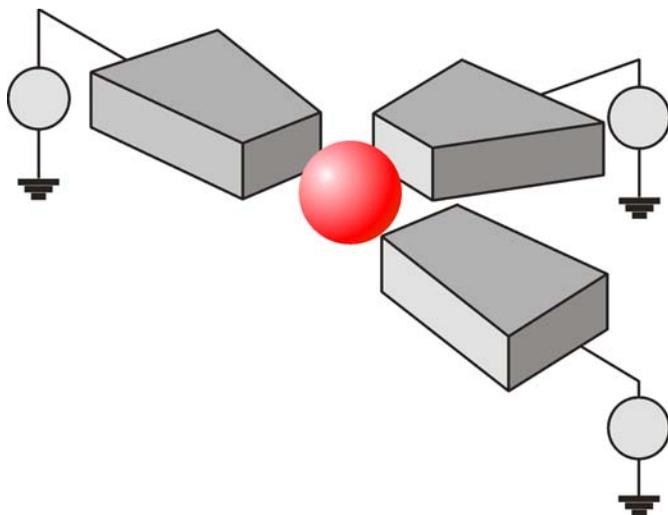
Ю.Н. Зубков, А.С. Кадочкин, Д.В. Козлов, Ю.С. Нагорнов,
С.Г. Новиков, В.В. Светухин, Д.И. Семенов

ВВЕДЕНИЕ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

МОДУЛЬ «ФИЗИКА»

Учебное пособие для учащихся 10–11 классов
средних общеобразовательных учреждений

Под общей редакцией В.В. Светухина и Д.И. Семенова



Экземпляр для апробации в школах
«Школьной лиги РОСНАНО»

Санкт-Петербург, 2012

УДК 53
ББК 3-91
22.3

Ю.Н. Зубков, А.С. Кадочкин, Д.В. Козлов, Ю.С. Нагорнов, С.Г. Новиков, В.В. Светухин, Д.И. Семенов

Введение в нанотехнологии. Модуль «Физика». Учебное пособие для учащихся 10–11 классов средних общеобразовательных учреждений. – СПб: Образовательный центр «Участие», Образовательные проекты, 2012. – 160 с. (Серия «Наношкола»).

Данное учебное пособие предназначено для учащихся 10-х и 11-х классов общеобразовательной школы и содержит ознакомительный материал по основным направлениям новой области науки, получившей название «нанотехнологии». В краткой и доступной форме изложен материал по основным направлениям исследований физики наноструктур и многочисленных практических приложений этих исследований. Пособие состоит из двух частей. Первая часть вводит в мир естественных и искусственных нанообъектов, содержит обзоры по современным наноматериалам, методам их получения и исследования. Особое внимание уделяется понятиям самоорганизации и самосборки, углеродным наноструктурам – фуллеренам, графенам, нанотрубкам, зондовым методам исследования и формирования нанообъектов. Вторая часть пособия знакомит учащегося с основными закономерностями нанофизики, с такими явлениями как сверхпроводимость и магнетизм, уникальными физическими свойствами квантово-размерных структур – квантовых ям, нитей и точек, а также с одной из основных областей их приложения – наноэлектроникой.

Серия «Наношкола»

Пособие подготовлено в рамках проекта «Школьная Лига Роснано»

© АНО «Образовательный центр «Участие», 2011

© Пугра Г.С., дизайн обложки

АНО «Образовательный центр «Участие»
196196, Санкт-Петербург, ул. Стахановцев, 13а
Телефон/факс: (812) 444-38-62
www.fondedu.ru

Подписано в печать 16.05.2012
Заказ №

Отпечатано в ООО «Издательство «ЛЕМА»
Санкт-Петербург, Средний пр. В.О., 24 Телефон/факс: (812) 401-01-74
e-mail: izd_lemma@mail.ru

Содержание

Предисловие	4
Введение	
1. Кто стоял у истоков нанотехнологий (6)	
2. От макро– к нанотехнологиям (7)	
3. Три научно-технических революции (9)	
Часть 1. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ	
Глава 1.1. Нанотехнологии вокруг нас	12
1.1.1. Информационные технологии (12)	
1.1.2. Нанотехнические устройства (15)	
1.1.3. Космический лифт (17)	
1.1.4. Нанопорошки и нанопокртия (20)	
1.1.5. Нанотехнологии в быту (22)	
1.1.6. «Умная» одежда (24)	
1.1.7. Нанотехнологии в военном деле (28)	
Глава 1.2. Наночастицы и наноструктуры	32
1.2.1. Классификация наноструктур (32)	
1.2.2. Наночастицы и нанокластеры (34)	
1.2.3. Роль поверхностных атомов (36)	
1.2.4. Магические числа (40)	
1.2.5. Углеродные наноструктуры (42)	
1.2.6. Нанокompозиты, нанопористые и нанофазные материалы (46)	
Глава 1.3. Методы получения и исследования наноструктур	51
1.3.1. Общие характеристики физических методов (51)	
1.3.2. Технологии «сверху-вниз» (54)	
1.3.3. Технологии «снизу-вверх» (56)	
1.3.4. Самоорганизация и самосборка в нанотехнологиях (58)	
1.3.5. Электронная микроскопия (61)	
1.3.6. Сканирующая туннельная микроскопия (64)	
1.3.7. Атомно-силовая микроскопия (66)	
Часть 2. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О НАНОСТРУКТУРАХ	
Глава 2.1. Квантовая физика и наноструктуры	70
2.1.1. Электромагнитные волны (70)	
2.1.2. Квантовые свойства излучения фотоны (73)	
2.1.3. Гипотеза де Бройля (76)	
2.1.4. Соотношения неопределённости (79)	
2.1.5. Квантовые представления об атоме (81)	
2.1.6. Кристаллы и энергетические зоны (85)	
2.1.7. Потенциальные яма и барьер. Туннельный эффект (89)	
2.1.8. Квантовые ямы, нити, точки (99)	
Глава 2.2. Уникальные свойства наноструктур	99
2.2.1. Число «ближайших соседей» в наночастице (99)	
2.2.2. Механическая прочность нанотрубок (101)	
2.2.3. Температура плавления наночастиц (105)	
2.2.4. Электросопротивление наноструктур (106)	
2.2.5. Магнетизм наноструктур (109)	
2.2.6. Цвет наночастиц (115)	
2.2.7. Сверхнизкие температуры и нанообъекты (117)	
Глава 2.3. Наноэлектроника	124
2.3.1. Наноэлектроника и тенденции ее развития (124)	
2.3.2. Одноэлектронное туннелирование (125)	
2.3.3. Резонансное туннелирование (129)	
2.3.4. Спинтроника (132)	
2.3.5. Сверхпроводниковая электроника (135)	
2.3.6. Нано– и квантовые компьютеры (142)	
2.3.7. Нанотехнологии в оптоэлектронике (145)	
Ближайшие перспективы нанотехнологий.....	153
Историческая ретроспектива	156
Рекомендуемая литература.....	159

Предисловие

Что такое **нанотехнологии**? На сегодняшний день существует много формулировок, описывающих эту область человеческой деятельности – от достаточно пространных до очень кратких. Мы приведем здесь одно из таких определений, которое достаточно полно дает ответ на поставленный вопрос.

Нанотехнологии – это совокупность физических, химических и биологических методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать объекты и материалы из отдельных атомов, молекул и компонентов с размерами от 1 до 100 нм, хотя бы в одном измерении.

В популярной литературе часто используется более простое и доходчивое определение, суть которого состоит в следующем: **НАНОТЕХНОЛОГИИ – это технологии манипулирования веществом на атомном и молекулярном уровне**. В настоящей книге мы будем знакомиться, в основном, с физическими основами нанотехнологий.

Современное техническое обеспечение науки достигло такого уровня, который позволяет манипулировать отдельными молекулами, атомами и даже электронами. Именно эти объекты составляют элементную базу наноустройств, в работе которых физической основой являются процессы, происходящие в областях с атомными размерами. Между тем, физические законы, которые описывают поведение электронов в нанобъектах, существенно отличаются от классических, на основе которых работает очень большое число сложных электронных приборов (например, кинескопы телевизоров и ускорители). Эти законы, являясь квантовыми по своей природе, зачастую кажутся весьма странными с точки зрения здравого смысла. В их основе лежит идея **корпускулярно-волнового дуализма материи**. Наличие у электрона волновых свойств, которые начинают играть существенную роль при его движении в микроскопически малых объемах, требует нового подхода к описанию его поведения. Новый способ описания движения микрочастицы, основанный на квантовых представлениях, не всегда совместим с хорошо обоснованным бытовым представлением о траектории движения макрообъекта (маленького шарика), поэтому часто теряет свою наглядность.

Основными объектами исследования в нанофизике являются структуры, в которых движение электронов пространственно ограничено в одном,

двух или трех направлениях областью с размером порядка 10 нм. В таких структурах существенно меняются привычные для массивных образцов электронные свойства и проявляются так называемые **размерные эффекты**, которые служат основой для создания новых типов нанoeлектронных приборов и устройств.

Нанофизика в настоящее время активно развивается и формируется как отдельная дисциплина, основой которой является **квантовая физика**. Детальное знакомство с этим разделом физики возможно лишь на основе хорошей математической подготовки и поэтому происходит только в университете. Между тем, учебного пособия, пригодного для достаточно широкого круга школьников, желающих хотя бы поверхностно ознакомиться с основами физики наноструктур, пока не написано. При написании нашей книги мы преследовали две основные цели, которые отражены в двух частях предлагаемого курса. Первая часть должна познакомить учащихся с новой и одной из важнейших для настоящего времени и ближайшего будущего отраслью знаний – **нанотехнологиями**, сформировать у школьника устойчивый интерес к этой области науки и техники. Вторая часть курса должна помочь школьнику уяснить сущность физических явлений и процессов, на основе которых разрабатываются **наноустройства**, осознать оригинальность подходов ученых и практиков при решении конкретных научно-технических задач и сформировать желание продолжить свое образование, непосредственно связанное с нанотехнологиями. Авторы также надеются, что полученные знания помогут сформировать у выпускника школы глубокий интерес к исследовательской и инженерной работе в бурно развивающейся современной науке и технике, независимо от ее специфики и направленности.

Введение

1. Кто стоял у истоков нанотехнологий

Остановимся коротко на основных хронологических моментах развития наноауки. Как отмечают многие исследователи, историю нанотехнологий создать крайне сложно по двум причинам. Во-первых, по причине размытости самого этого понятия. Например, нанотехнологии часто не являются технологиями в привычном смысле этого слова. Во-вторых, человечество всегда пыталось экспериментировать с нанотехнологиями, даже и не подозревая об этом. Поэтому с определенной долей иронии и условности можно сказать, что у ее истоков вообще стояли средневековые алхимики. Именно они первыми пытались решить задачу получения золота из других металлов. По мнению многих специалистов, отцом современной нанотехнологии можно считать древнегреческого философа Демокрита, который примерно в 400 г. до н.э. впервые использовал слово «атом» для определения самой малой частицы вещества. Исторически первыми наноматериалами можно считать красные и рубиново-красные опалесцирующие стекла Древнего Египта, Древнего Рима и многих витражей культовых сооружений средних веков. В книге «Введение в нанотехнологию» Чарльз Пул приводит один показательный пример применения первых нанотехнологий: в Британском музее хранится кубок, известный под названием «Кубок Ликурга», изготовленный древнеримскими мастерами. Его стенки содержат наночастицы золота и серебра, добавленные в стекло, которые при различном освещении меняют цвет кубка от темно-красного до светло-золотистого.

В 1661 году ирландский химик Роберт Бойль первым опубликовал утверждение, что все состоит из «корпускул» – сверхмалых частиц, которые в разных сочетаниях образуют различные вещества и предметы. Первый прорыв в практическом применении нанотехнологий был совершен американским изобретателем Джорджем Истманом, который в 1883 году изготовил фотопленку со светочувствительным слоем из наночастиц бромистого серебра. Далее развитие основных представлений, а также методов формирования и контроля наноструктур происходит взрывными темпами. Оно базируется на достижениях и открытиях исследователей самых разных научных направлений.

В основе своей нанотехнологии представляют собой логическое продолжение современных оптических, микроэлектронных, материаловедческих, химических, биологических и иных технологий с учетом возникающих размерных эффектов. Впервые понятие «нанотехнологии» было озвучено Ричардом Фейнманом в 1960 году на заседании Американского физического общества. Его лекция получила название *«Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики!»* Вот ее вводная часть: «Мне хочется обсудить одну малоизученную область физики, которая представляется весьма важной и перспективной и может найти множество ценных технических применений. Речь идет о проблеме контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров. Внизу (т.е. внутри пространства, если угодно) располагается поразительно сложный мир малых форм, и когда-нибудь (например, в 2000 году) люди будут удивляться тому, что до 1960 года никто не относился серьезно к исследованиям этого мира». Здесь Р. Фейнман имел в виду мир нанометрового масштаба, в котором работают фундаментальные законы квантовой физики, управляющие поведением отдельных атомов. Понятие нанотехнологии он ввел как совокупность методов получения объектов с заданной атомарной структурой в результате «манипулирования» атомами и молекулами, отметив при этом, что законы физики не запрещают создавать «конструкции» из отдельных атомов и их блоков. Пророчество Р. Фейнмана положило начало современной эпохи нанотехнологий.

2. От макро – к нанотехнологиям

Развитие человеческой цивилизации связано с освоением новых материалов. Первые материалы, которые освоил человек – дерево и камень. Орудия труда и охоты, изготовленные из этих материалов, позволили человеку успешно выживать в диком первобытном мире. Затем человек научился выплавлять медь и бронзу. Орудия труда и охоты стали более совершенными, человек стал «хозяином» окружающего мира. Освоение железа позволило человечеству создать и развить промышленность и совершить огромный скачок в своем развитии. Достижения электроники перевернули образ жизни современного человека. Мы уже не мыслим свое существование без компьютера, сотового телефона, телевизора и т.д. Развитие электроники произошло благодаря успешному освоению нового материала – кремния.

Придумывая и развивая новые способы получения и обработки материалов, человек создавал новые *технологии*. Слово «технология» произошло от греческих слов «techné» – искусство, мастерство, умение и «logos» – наука. Можно дать следующее более точное определение: *ТЕХНОЛОГИЯ – это совокупность средств и методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья или материала в процессе производства*

продукции. Для того чтобы изготовить каменный топор или компьютер, нужно владеть технологией – набором методов и средств обработки исходных материалов и получения из них конечного продукта. Технология изменяет качество или первоначальное состояние материи в целях получения материального продукта. Задача технологии – превратить знания человека о мире и природе в продукт, необходимый и полезный для человека.

В процессе обработки материалов и производства продукции человек научился производить объекты различного геометрического размера. **МАКРОСКОПИЧЕСКИМИ («масго» – большой) называют объекты, которые человек видит невооруженным глазом.** В течение тысячелетий человек использовал в быту и технике макроскопические тела, состоящие из большого числа атомов, будь это каменный топор или автомобиль. Технологии изготовления топора и автомобиля – это технологии макроскопического мира, т.е. макротехнологии.

С изобретением оптического микроскопа человек открыл для себя объекты микромира. **МИКРОСКОПИЧЕСКИМИ («мисго» – маленький) называют объекты, размеры которых лежат в диапазоне от 1 до 100 мкм.** Напомним, что приставка «микро» означает одну миллионную часть чего-либо. Так, длина в 1 мкм равна 10^{-6} м. **Нанометровыми** называют объекты, размеры которых лежат в пределах от 1 до 100 нм. Приставка «нано» означает одну миллиардную долю какой-либо единицы (например, 1 нм = 10^{-9} м). В качестве иллюстрации на приведенном ниже рисунке в логарифмическом масштабе показаны размеры объектов природного и искусственного мира. Атомы и мельчайшие молекулы имеют размер порядка от 0,1 до 1 нанометра. Для сравнения укажем, что толщина человеческого волоса почти в 60000 раз больше размера одной молекулы. На этом уровне стираются границы между такими науками, как физика, химия, биология. На **рис. 1** приведена схема, иллюстрирующая соотношение размеров различных систем природного и искусственного мира.

Человек всегда стремится создавать удобные для себя технические устройства. Очень часто удобство связано с уменьшением размеров того или иного устройства. Согласитесь, что плоский телевизор удобнее телевизора кубической формы. Если первые компьютеры занимали несколько комнат, то современный компьютер легко помещается в сумке или кармане одежды. Развитие современных технологий часто сопровождается процессом **миниатюризации** – уменьшением размеров продукта технологии. Специалистам, работающим в области электроники, известна закономерность, согласно которой каждые два года происходит удвоение вычислительных возможностей микропроцессоров за счет повышения плотности чипов и уменьшения их размеров. Данная закономерность, которая получила название закона Мура, оказалась универсальной и уже выполняется более 40 лет. Продолжение этого закона на ближайшее будущее неизбежно приводит электронику от микроструктур к **наноструктурам**. Это означает, что

транзисторы и другие элементы электронных схем вскоре будут состоять из считанного числа атомов. Сегодня нанотехнологии являются продолжением современных микроэлектронных технологий.

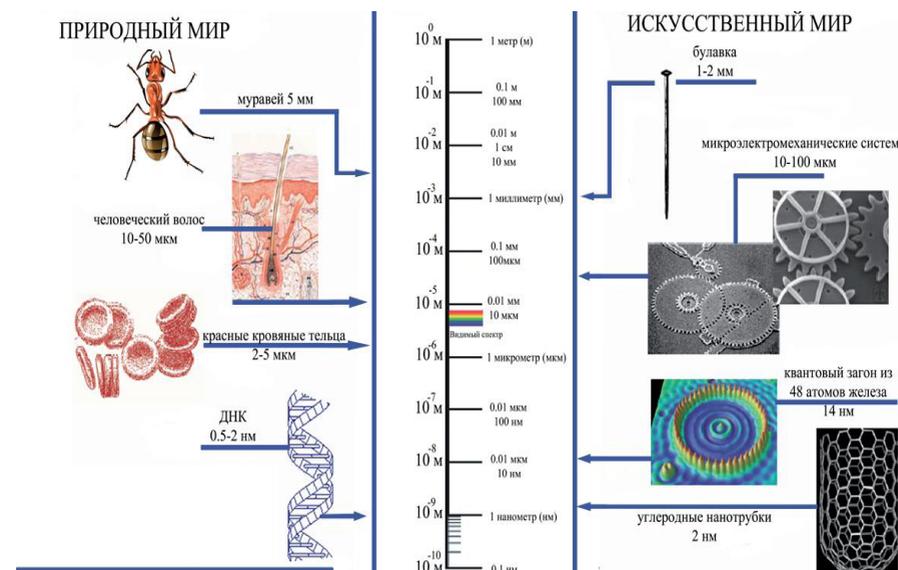


Рис. 1. Иллюстрация к понятию нанометра: соотношение объектов и их размеров на логарифмической шкале

3. Три научно-технических революции (НТР)

В истории развития человечества можно выделить несколько важных исторических этапов, связанных с освоением новых материалов и технологий.

Первая НТР – индустриальная или энергетическая. Она условно отсчитывается от получения Д. Уаттом в 1769 году патента на усовершенствованный паровой двигатель, который резко увеличил производительность труда на всех видах производства, в сельском хозяйстве и на транспорте. Научно-технический переворот произошел благодаря новым технологиям изготовления продукции из металла. Продукты этой технологии связаны с привычным макромиром.

Вторая НТР – информационная или микроэлектронная. Она связана с освоением технологий получения микроструктур из кремния. Ее начало относится к 60-м годам XX века и, в первую очередь, связано с развитием микроэлектроники. Автомобили и другие средства передвижения, станки

и приборы оставались макроскопическими телами, но управляющие элементы, устройства для передачи и приема информации становились все сложнее, а их компоненты (транзисторы, конденсаторы, резисторы) – все миниатюрнее.



Алферов Ж. И. – российский ученый, лауреат Нобелевской премии по физике за 2000 год, создатель полупроводниковых гетероструктур, с которых началось развитие практической наноэлектроники.

Ученые и эксперты полагают, что ближайшие десятилетия станут эпохой проникновения нанотехнологий в наиболее важные области человеческой деятельности. Уже начавшаяся третья НТР – нанотехнологическая – является фактически продолжением предыдущей, но на более высоком научно-техническом уровне. Успешное освоение нанотехнологий позволит обществу решить многие сложные проблемы, стоящие перед ним в настоящее время. Это, прежде всего, проблемы энергетики и экологии, медицины и сельского хозяйства, строительства и освоения космоса. В одной из своих лекций последнего времени российский ученый лауреат Нобелевской премии по физике Ж. Алферов сказал: «Микроэлектроника была во второй половине XX века и останется на ближайшие десятилетия не только движителем научно-технического прогресса, информационных технологий, но и социального прогресса в целом. Те изменения в обществе, которые произошли за это время, связаны, прежде всего, с развитием микроэлектроники. В настоящее время мы вступаем в новый и быстро развивающийся мир нанотехнологий. Отставания по этой части мы не должны допустить, так как оно грозит вообще выбрасыванием за борт столбовой дороги развития ультрасовременных технологий». Из сказанного следует, что высокие темпы третьей НТР требуют быстрой научно-технической подготовки новых кадров, что возможно лишь при закладывании базы этой подготовки в школе. Учитывая это, в ряде промышленно развитых стран курсы нанотехнологий введены в школьные программы. Введение подобного курса в школах России – это вызов времени, откликнувшись на который можно вывести естественнонаучное школьное образование на уровень, отвечающий высоким требованиям XXI века.

Часть 1. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА 1.1.

Нанотехнологии вокруг нас

С каждым днем нам все чаще и чаще попадают слова: «нанонаука», «нанотехнологии», «наноструктурированные материалы», мы находим их в прессе, слышим по радио и на телевидении, замечаем в речах не только ученых, но и политиков. Мы также знаем, что нанотехнологиям оказывают предпочтение при финансировании научных и инновационных программ не только в нашей стране, но и во всех развитых странах мира. Ожидается, что в недалеком будущем нанотехнологии проникнут не только во все области общественной жизни, но и войдут в обиход каждого человека. Они приведут к грандиозной научно-технической революции, которая кардинально изменит жизнь человека на нашей планете. По оценкам специалистов, сложившаяся сейчас ситуация во многом аналогична той, что предшествовала компьютерной революции. Однако последствия нанотехнологической революции будут гораздо обширнее и глубже. Собственно, она уже началась и захватывает все новые и новые области. То, что казалось фантастикой, далекой от реальности, входит в нашу жизнь, открывая необычайные перспективы во всех сферах человеческой деятельности. Вместе с тем, радужные ожидания сопровождаются и некоторой тревогой за наше будущее. Как и любое научно-техническое достижение, использовать нанотехнологии можно не только на благо человека. Здесь многое зависит от того, как сумеет распорядиться человек теми возможностями, которые открываются с освоением нанотехнологий. В настоящей главе мы кратко обсудим некоторые из наиболее перспективных их применений. Очень важные области применения нанотехнологий в биологии и медицине мы здесь не рассматриваем.

1.1.1. Информационные технологии

Примерно пятьдесят лет назад на одном кристалле кремния размещался всего один транзистор, сегодня – почти миллиард. Столь стремительный технологический прогресс привел к огромному увеличению вычислительной мощности компьютеров. Поскольку в ближайшие годы количество транзисторов в интегральных схемах будет и дальше увеличиваться, их элементы уменьшатся почти до размеров молекул. **НАНОКОМПЬЮТЕР – это разра-**

батываемое на основе нанотехнологий вычислительное устройство, логические элементы которого имеют молекулярные размеры. При этом сам нанокomпьютер имеет микроскопические размеры и его отличает высокая производительность. Совершенно ясно, что достижение принципиального предела возможностей кремниевых транзисторов, т.е. уменьшение размера функциональных элементов до 10 нм (и содержащих до 30 атомов) невозможно без внедрения новых технологических решений.

Ученые всего мира рассматривают также различные возможности создания нанокomпьютеров на основе некремниевых технологий. К таким устройствам могут быть отнесены, в частности, компьютеры на основе нанокуглеродной, магнитной, сверхпроводниковой и других типов памяти, для которых плотность записи может достигать 100 терабайт.

Большое внимание при создании нанокomпьютеров уделяется также нетрадиционным направлениям формирования памяти и процесса вычислений. Одним из таких направлений является разработка **МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ, т.е. вычислительных систем, использующих возможности формирования из молекул компьютерной памяти и элементов вычислительного тракта.** Один из таких уникальных нанокomпьютеров уже создан и испытан в Японии. Он состоит всего лишь из 17 молекул органического вещества и имеет размеры порядка 20 нм (**рис.1.1.1**). Считается, что на этом принципе когда-нибудь будет создан настоящий искусственный интеллект, способный к самопознанию и саморазвитию.

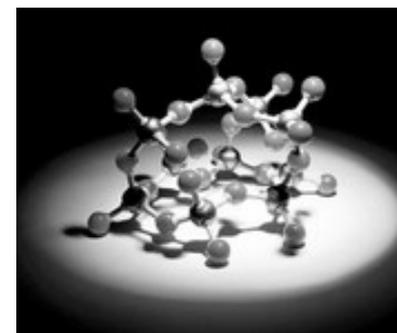


Рис.1.1.1 Модель молекулярного нанокomпьютера

Еще одно перспективное направление исследований в области информационных технологий – это **биокомпьютеры**. Их создание находится на пересечении физики, химии и биологии. Биокомпьютер состоит из живых клеток. У каждой клетки есть свой генетический код, то есть код, который определяет все свойства данной клетки. Изменяя генетический код клетки, можно придавать ей необходимые свойства. Обычно учёные работают с бактериями – одноклеточными организмами, с которыми достаточно удобно работать. Изменяя специальным образом генетический код бактерии, ее

научили обмениваться сигналами и менять цвет в зависимости от того, как окрашены её соседи. Этого оказалось достаточно, чтобы получать сложные изображения, где роль точек выполняли бактерии, а также выполнять простые математические действия.

Уже сегодня крупные компании начали поисковые работы по применению нанотехнологий в области создания сверхплотных и сверхскоростных матриц памяти для компьютеров, вплоть до создания ячейки памяти на одном атоме. Применение наноматериалов сможет создать новые типы дисплеев и телевизионных экранов с трехмерным изображением. Многие научные лаборатории работают над созданием «вечного» элемента питания, который не будет нуждаться в подзарядке. В далекой перспективе предполагается создание компьютера, обладающего человеческим интеллектом. Прогнозируемый срок реализации сверхплотной памяти и «одноатомной» компьютерной ячейки – вторая четверть XXI века.



Рис.1.1.2. Браслет-компьютер, созданный на основе нанотехнологий

Для иллюстрации достижений в области компьютерных нанотехнологий на рис.1.1.2 представлен один из существующих уже вариантов браслета-компьютера, созданного в Японии. Вполне возможно, что скоро айфоны и прочие подобные им устройства станут атавизмом, а широкое распространение получат подобные браслеты. Это устройство стильно смотрится на запястье, имеет экологически чистый источник питания, голографический дисплей, а также возможность постоянно быть онлайн.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимается под битом и байтом информации, во сколько раз терабайт больше одного байта?
2. На основе каких материалов в настоящее время ведется разработка памяти и процесса вычислений нанокomпьютеров?
3. Ознакомьтесь с устройством и работой полупроводникового транзистора. Почему он используется в качестве элемента памяти современного компьютера?

1.1.2. Нанотехнические устройства

Под влиянием книги Э. Дрекслера «Машины созидания» в 1990-е годы под нанотехнологиями стали понимать создание различных устройств из отдельных молекул. В качестве перспектив нанотехнологии описывались, например, миниатюрные автономные роботы, которые запускались в человеческий организм и, плаывая по кровеносной системе, находили больные органы и осуществляли их «ремонт». Пока «молекулярные машины» Дрекслера создавались с помощью формул и компьютерного моделирования, происходил неуклонный рост традиционных технологий, которые в результате миниатюризации объектов производства и повышения точности их характеристик вступили в область нанотехнологии. **Роботы, созданные из наноматериалов и имеющие размеры, сопоставимые с размерами молекул, обладающие при этом функциями движения, исполнения программ, обработки и передачи информации получили название НАНОРОБОТОВ.** На рис.1.1.3 приведен вид предполагаемого молекулярного робота-хирурга.

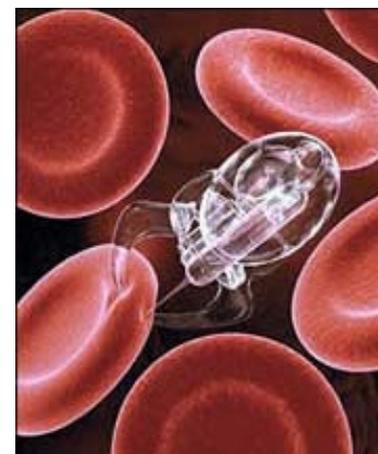


Рис. 1.1.3. Вид предполагаемого молекулярного робота-хирурга

Нанороботов принято разделять на АССЕМБЛЕРЫ, которые сами будут строить нанобъекты и самовоспроизводиться, и ДИЗАССЕМБЛЕРЫ, которые будут разбирать вещества и сортировать атомы. С помощью нанороботов будут строиться нанофабрики, которые также автоматически будут создавать объекты уже нормальных зримых размеров. В качестве сырья им потребуются самые распространенные элементы – атомы кислорода, водорода, азота, углерода и в меньшем количестве – более редких элементов. Нанофабрики по программам, заданным человеком, смогут строить все – новые материалы, одежду, пищу и даже органические живые существа.

Кратко рассмотрим модели конкретных наномеханизмов – **наношестерни** и **наноподшипники**. Валами шестеренок в коробке передач могут служить углеродные нанотрубки (о них речь будет идти в других главах), а зубцами – молекулы бензола (рис.1.1.4). Характерные частоты вращения наношестеренок составляют несколько десятков гигагерц. Устройства «работают» либо в глубоком вакууме, либо в инертной среде при комнатной температуре. Инертные газы используются для «охлаждения» устройств.

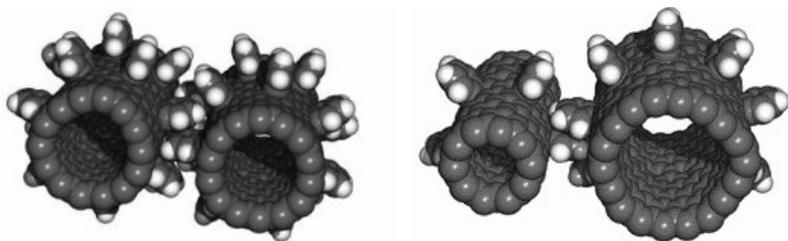


Рис. 1.1.4. Модели молекулярных шестерен

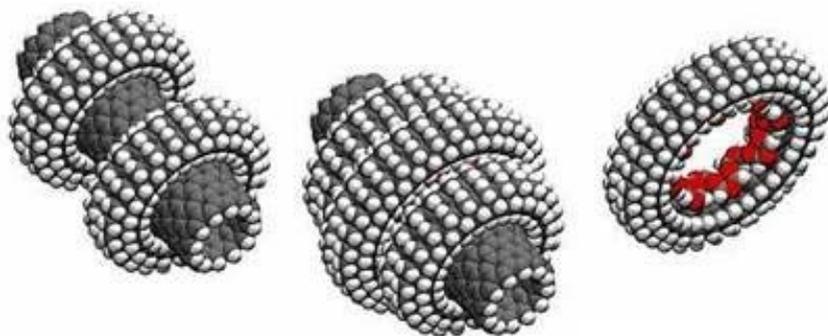


Рис. 1.1.5. Различные варианты наноподшипников

Американские ученые, занимающиеся исследованиями в области нанотехнологий и созданием различных наномеханизмов, изготовили сверхминиатюрный «наноавтомобиль», который по своим характеристикам значительно превосходит все ранее изготовленные подобные образцы. Его форма отдаленно напоминает форму гоночных автомобилей Формулы-1, он имеет меньшие колеса, закрепленные на короткой передней оси, и более крупные задние колеса, закрепленные на широкой задней оси. Этот наноавтомобиль имеет размеры в 50 тысяч раз меньше, чем толщина человеческого волоса и приводится в движение комбинацией высокой температуры и воздействия магнитного поля. Процесс его «сборки» происходил поэтапно – атом за атомом. Сначала была выращена короткая передняя ось, потом на ее концах были выращены колеса маленького диаметра из молекул полимера. Затем из двух молекул углеводорода была создана рама наноавтомобиля, к кото-

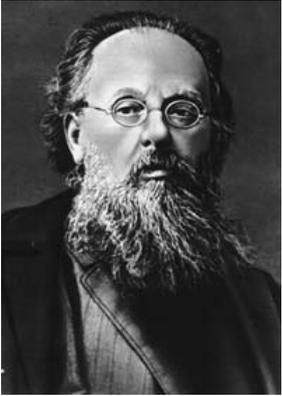
рой прикрепили переднюю ось с колесами. И завершило процесс сборки присоединение к конструкции более длинной задней оси с выращенными углеродными задними колесами. После создания соответствующих условий этот наноболид смог разогнаться до скорости $1,4 \times 10^4$ нанометров в час (или 3,9 нанометров в секунду), что является достаточно высокой скоростью для наномеханизма таких размеров.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит отличие ассемблеров и дисассемблеров?
2. За счет какой энергии происходит движение наноавтомобиля в рассматриваемой выше модели?
3. Какое полезное наноустройство Вы предложили бы для разработки и создания ученым?
4. Наношестерня радиусом 10 нм вращается с частотой 1 ГГц. За какое время совершается один оборот вокруг своей оси и какую линейную скорость имеют точки на внешней поверхности шестерни?

1.1.3. Космический лифт

Сегодня для того, чтобы оказаться на орбитальной станции и выйти в открытый космос, необходимо попасть в состав космонавтов или астронавтов (либо стать космическим туристом), а затем проделать довольно опасное путешествие на космическом корабле. Но чтобы вас взяли в космос, необходимо иметь хорошее здоровье, крепкие нервы и много денег. Альтернативой выхода на орбиту спутника Земли в ракете является путешествие на орбиту в капсуле **космического лифта**. Этой идее уже больше ста лет. Впервые о подъемнике такого рода заговорил в 1895 году основоположник современной космонавтики русский ученый **Константин Эдуардович Циолковский**. Однако самым прочным материалом в то время была сталь, которая для создания всей конструкции космического подъемника была слишком тяжела. Если бы не быстрое развитие нанотехнологий и открытие углеродных нанотрубок, концепция космического лифта не продвинулась бы дальше научной фантастики. Отметим, что однослойные углеродные нанотрубки, открытые в 1991 году, прочнее стали в 100 раз и достаточно прочны для того, чтобы служить основой ленты лифта. Нанотрубки и материалы на их основе могут вытеснить большинство современных аэроконструкционных материалов. Композитные материалы на основе нанотрубок позволят намного уменьшить вес современных космических аппаратов. Отметим также, что нанотрубки будут весьма полезны при разработке различных наноэлектронных устройств, сверхмощных компьютеров и устройств памяти. Кроме этого, покрытые специальными белками нанотрубки могут входить в качестве ключевых компонентов в конструкцию биочипов-анализаторов.



Константин Эдуардович Циолковский (1857–1935) – русский учёный, школьный учитель, основоположник современной космонавтики. Автор многих идей по освоению космоса: использования многоступенчатых ракет, орбитальных станций, космического лифта. Считал, что развитие науки на Земле достигнет такого уровня, который позволит преодолевать силы тяготения и распространять разумную жизнь во Вселенной. Ему принадлежат слова **«Планета есть колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели».**

КОСМИЧЕСКИЙ ЛИФТ – это лента (или трос), один конец которой присоединен к поверхности Земли, а другой находится в космосе на **ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ орбите** и прикреплен к массивному спутнику земли. Гравитационное притяжение нижнего конца ленты компенсируется силой, вызванной **центростремительным ускорением спутника, удерживающего ленту.**

Таким образом, лента постоянно находится в натянутом состоянии. Космическая капсула, содержащая полезный груз, будет передвигаться вдоль ленты (рис. 1.1.6). Масса километра ленты из ткани, созданной на основе углеродных нанотрубок, будет менее 10 кг. Для начального старта капсулы потребуется усилие, но, как только она будет приближаться к конечной станции, ее скорость будет увеличиваться из-за центростремительного ускорения всей системы. Таким образом, затраты на пуск капсулы будут только в начале ее пути на орбиту. Спуск будет производиться в обратном порядке – в конце спуска капсулу будет ускорять гравитационное поле Земли. Можно использовать космический лифт в качестве «пусковой платформы» для космических кораблей, запускаемых к другим планетам, спутникам и астероидам (Марсу, Венере, Луне). Для этого на конечной станции капсула может отсоединиться от лифта и выйти в открытый космос. Скорость капсулы при этом будет составлять 11 км/с. Этой скорости будет достаточно для того, чтобы начать путешествие к Марсу и другим планетам. Это поможет сократить расходы, связанные с традиционным запуском ракет на химическом топливе. Оценки показывают, что можно построить космический лифт грузоподъемностью до 100 тонн и с его помощью строить на орбите большие колонии и орбитальные станции.

В настоящее время в США несколько компаний ведут разработки с целью построения космического лифта. Естественно, что в процессе работы над проектом его авторы должны решить много сложных инженерных проблем, связанных не только с конструкцией самого лифта, но и с его сохранением в течение длительного времени в открытом космосе. Такими проблемами

являются, например, защита от столкновений с различными космическими объектами (метеоритами, космическим мусором), влияние на лифт неблагоприятных погодных условий на разных высотах (ветер, молнии, смерчи), защита от возможной раскачки лифта. Тем не менее, согласно ежегодным отчетам, запуск этого грандиозного сооружения *намечен на 12 апреля 2018 года, когда будет отмечаться очередная годовщина запуска первого человека в космос – Юрия Гагарина.*



Рис. 1.1.6. Вид на космический лифт, поднимающий с Земли грузы на «космический порт» – орбитальную станцию.



Юрий Алексеевич Гагарин (1934 - 1968) – советский лётчик-космонавт, первый человек, совершивший полёт в космическое пространство. 12 апреля 1961 года с космодрома Байконур стартовал космический корабль «Восток» с человеком на борту. День полёта Гагарина в космос в настоящее время объявлен праздником – Днём космонавтики.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие конкретные идеи были выдвинуты К.Э. Циолковским для освоения космического пространства?
2. Какие технические проблемы надо решить для создания космического лифта?
3. Оцените массу стального троса диаметром в 1 см и длиной, достаточной для создания космического лифта. Выдержит ли подобный трос свой вес, если предел прочности стали принять равным 1 ГПа?
4. Что такое геостационарная орбита (ГСО) и каков ее радиус для Земли на ее экваторе?

1.1.4. Нанопорошки и нанопокрyтия

С веществом в виде порошков мы встречаемся очень часто и в быту, и в производственной деятельности. Обычно мы имеем дело с порошками, у которых размеры частиц составляют десятки и сотни микрон. Даже в порошковой металлургии используются в основном порошки с частицами, размер которых более 10 мкм. Вещество при переходе от грубодисперсного состояния к состоянию с размером частиц менее 100 нм резко изменяет ряд своих фундаментальных свойств. Для обозначения этого отличия в прошлом веке использовался термин *ультрадисперсные порошки*, однако в настоящее время для обозначения подобных сред используется термин *нанопорошки*. Изменение фундаментальных свойств традиционных материалов в нанодисперсном состоянии (понижение температуры плавления, теплоты испарения, энергии ионизации, работы выхода электронов и др.) открывает широчайшие возможности в области создания новейших материалов и технологий, принципиально новых приборов и устройств.

Напомним, что наночастица меньше футбольного мяча во столько раз, во сколько футбольный мяч меньше Земного шара. В нанoeлектронике основное значение приобретают квантовые эффекты, проявляющиеся в наночастицах. В самолетах, автомобилях, производственных материалах, покрытия наночастицы обеспечивают экстремальную прочность поверхности, защиту от царапин и коррозии, экстремальные антиадгезионные свойства (под *адгезией* понимают способность к сцеплению поверхностей разнородных твердых или жидких тел, она обусловлена взаимодействием молекул, находящихся на поверхностях соприкасающихся слоев; в некоторых случаях это взаимодействие может оказаться сильнее, чем сцепление молекул внутри отдельного материала. В таких случаях при приложении разрывающего усилия происходит разрыв в объеме менее прочного из соприкасающихся слоев). Поэтому порошки из наночастиц в последнее время находят все более широкое применение в качестве исходного сырья при производстве как керамических, лакокрасочных, смазочных материалов, фильтров, так и солнечных батарей, высокотемпературных сверхпроводников, различных нанокomпозиционных материалов.

В краткосрочной перспективе ожидается использование порошков для покрытий, переработки отходов, в электронике и в качестве катализаторов. В течение ближайших пяти лет на рынке появятся легкие и стойкие краски и устойчивые к загрязнению покрытия. Нанопорошки из различных материалов будут использоваться для производства батареек с продолжительным сроком службы, увеличения срока службы дизельного топлива, получения более ярких цветов и более четкого изображения индикаторных и плазменных дисплеев. В более поздней перспективе нанопорошки все чаще будут использоваться для очистки и опреснения вод. Как только станет возможным производство более однородных по размеру и форме частиц

порошков, появится новая разновидность смазочных материалов. Производители автомобилей будут использовать нанопорошки для производства керамических двигателей. Активно начнут использоваться магнитные свойства нанопорошков, которые дадут возможность усовершенствовать аппаратуру магнитно-резонансного изображения.

С нанопорошками тесно связаны *нанопокрyтия*. Посвященным известно, что листья лотоса обладают удивительным свойством отталкивать капли воды. Если их целиком окунуть в грязную воду, на них не останется ни единого пятнышка. Любая влага, попадающая на лист, тут же собирается в шарики и падает вниз, забирая с собой частички пыли и грязи. Дождевая вода отскакивает от листа лотоса, не оставляя на нем следа. Лист лотоса невозможно испачкать ни медом, ни маслом, ни клеем на водяной основе, ни другими вязкими и липкими субстанциями. Удивительными свойствами лотоса восхищались ученые и поэты Востока тысячи лет назад. В Китае лотос символизирует целомудрие, так как, произрастая в илистых водоемах, лотос сохраняет свою чистоту и очарование (*рис. 1.1.7*).



Рис. 1.1.7. Цветок лотоса и вид его поверхности в электронном микроскопе

Только с изобретением электронного микроскопа секрет лотоса стал известен. Все дело – в микроскопических бугорках, которыми покрыты листья. А бугорки, в свою очередь, покрыты еще более мелкими *нановолосками*. Капля воды, попадая на такую бугристую поверхность, не может равномерно расположиться на ней, т.к. этому мешают силы поверхностного натяжения. Поэтому капли скатываются с поверхности листа, не оставляя следа и смывая грязь, пыль и бактерии. Детальные исследования явления самоочистки показали, что природа таким оригинальным образом защищает себя от загрязнений и вредоносных микроорганизмов. Такой эффект свойственен не только лотосу, но и ряду других растений – камышу, кактусу, тюльпану и даже обыкновенной капусте. Способности к самоочищению были замечены и у некоторых насекомых. Как оказалось, ими обладают крылья бабочек и стрекоз.

Лишь в начале 1990-х годов учёным удалось воспроизвести природный механизм самоочищения в лаборатории на искусственных поверхностях. Можно ли, используя эффект лотоса, сделать поверхности

зданий и сооружений самоочищающимися? Представьте себе фасад многоэтажного здания с несколькими подъездами. Вымыть такую большую площадь нелегко, даже если это горизонтальная поверхность. Что уж говорить о высотных работах. Вот если бы найти способ их вообще не мыть. Изучив природу **лотос-эффекта**, ученые пришли к выводу, что основан он не на специфике живой системы, а на физико-химических явлениях, и вполне может быть воспроизведен для многих покрытий и материалов. Сегодня с применением этого эффекта проектируются и производятся антивандальные покрытия поездов, гидрофобные фасадные краски, незапотевающие зеркала, водоотталкивающие купальные костюмы для спортсменов, непромокаемые зонты и плащи, малозагрязняющийся бактерицидный текстиль и многое другое. В автомобильной промышленности этот эффект используется при нанесении и полировке лакокрасочного покрытия автомобилей, пропитке тентов кабриолетов и обивки салонов антибактериальными и водоотталкивающими составами, специальной обработке остекления автомобиля. При относительно небольших затратах использование такой нанотехнологии, как эффект лотоса, позволяет надолго сохранить привлекательный внешний вид автомобиля.

Контрольные вопросы и задания

1. Сравните отношения размеров Земли и футбольного мяча с одной стороны, а также мяча и наночастицы – с другой. Какой размер должна иметь наночастица, чтобы эти отношения были одинаковы?
2. В чем состоит причина самоочищения листа лотоса? Где может быть применен лотос-эффект в быту?
3. Возьмите немного порошка железа и рассыпьте его на листе бумаги. Поместите под листом магнит и начните его перемешать. Что происходит с частицами порошка и почему?
4. Какое количество сферических наночастиц серебра радиуса 5 нм содержится в 100 граммах нанопорошка этого металла?

1.1.5. Нанотехнологии в быту

Благодаря удивительным свойствам наночастиц, мир нанотехнологий выходит за рамки известных научно-технических приложений, но и входит в нашу повседневную жизнь. Достаточно оглянуться вокруг, чтобы понять, что нанотехнологии уже существенным образом изменили наш быт и это только начало процесса. Без нанотехнологий уже немыслима современная электроника и бытовая техника. Домохозяйкам они помогают увеличить срок хранения продуктов и получить любой вкус продукта «на заказ». Их мечтой, наверняка, станет хозяйственная наносумка, которая не только са-

моочищается и ликвидирует все вредные микробы, но и не изнашивается. Без нанотехнологий трудно представить производство тормозной системы современных автомашин или автомобильных шин. На их основе стало возможным изготовление велосипедной рамы, в шесть раз более легкой и в 100 раз более прочной, чем из стали. Нанотехнологии позволяют создавать практически неизнашиваемую модную одежду, мягкую и гибкую обувь.

В пищевой промышленности нанотехнологии найдут широкое применение, прежде всего, при контроле качества и безопасности пищи с помощью различных **наносенсоров**, а также при создании различных вкусовых добавок. Уже сейчас разработаны и исследованы новые экологически безопасные катализаторы для этого процесса – наночастицы, состоящие из золотого «ядра» и палладиевой оболочки. Активно внедряются **наномембраны**, которые обеспечивают эффективную фильтрацию воды от многочисленных примесей и микроорганизмов.

Покрытие наночастицами серебра сотовых телефонов обеззараживает их поверхность, а покрытие барабана стиральной машины обеззараживает белье при стирке. Их введение в одежду, постельное белье и детские игрушки позволяет бороться с кожными заболеваниями и аллергией. В косметике наночастицы помогают получать нанокосметические комплексы, которые свободно проникают в глубокие слои кожи и переносят активные вещества до самой клетки. В медицине одно из важнейших применений нанотехнологий состоит в изменении структуры клетки на молекулярном уровне, т.е. «молекулярная хирургия» с помощью наноботов (**рис. 1.1.3**). Прогнозируется создание молекулярных роботов, которые могут «жить» внутри человеческого организма, устраняя все возникающие повреждения или предотвращая возникновение таковых. Манипулируя отдельными атомами и молекулами, наноботы смогут осуществлять ремонт клеток. Прогнозируемый срок создания роботов-врачей – первая половина XXI века.

Широко используемые в быту материалы (камень, дерево, стекло, бумагу) можно покрывать специальным нанослоем, придающим этому материалу необычные свойства. В частности, не допускать запотевания стекол в автомобилях и защитных очках, которое может привести к серьезным авариям. Самоочищающиеся покрытия для тканей создают защиту одежды от пятен грязи и жира. Интерес представляет водонепроницаемая бумага с защитным слоем из наночастиц. Такая бумага не боится воды, на ней можно писать ручкой, карандашом или краской даже под водой. Выпущена девятислойная бумага для струйных принтеров, в каждом слое присутствует свой сорт наночастиц, обеспечивающий определенную функцию. Так, в верхнем слое керамические наночастицы создают блеск и плотность бумаги. Пигментные наночастицы улучшают качество печати, а полимерные обеспечивают быструю фиксацию краски.

Большинство бытовых нанотехнологий находятся пока в стадии разработки или испытаний. Тем не менее, они оказались в центре оживленной полемики относительно тех опасностей, которые могут представлять для окру-

жающей среды, человека и прав человека. А опасаться есть чего. Близится время, когда нанороботы размером в одну клетку смогут не только «чинить» человеческий организм без оперативного вмешательства, но и установить за человеком наблюдение путем вживления микрочипа или даже беспилотного летающего микроробота. Ученые признают, что для создания таких роботов понадобятся годы, но возможность их создания отнюдь не исключают.

Контрольные вопросы и задания

1. Что мы понимаем под понятиями «сенсор» и «датчик»?
2. Почему наночастицы получили широкое распространение в косметике?
3. Какие функции могут выполнять нанороботы в медицине? Реальны ли на Ваш взгляд такие наноустройства?
4. Приведите примеры, где нанотехнологии уже используются в быту.

1.1.6. «Умная» одежда

В будущем мы все будем носить «умную» одежду. Достижения нанотехнологий в текстильной промышленности позволят уже через несколько лет выпускать платья и костюмы, изменяющие цвет в зависимости от настроения их обладателя, белье, которое следит за состоянием здоровья, а также плащи и пальто со встроенным прогнозом погоды. Одежда из хлопка и шерсти уходит в прошлое. На смену натуральным тканям приходят ткани, создаваемые на основе современных технологий с использованием искусственных волокон, которые придают ей необходимые свойства. В структуру такого волокна на стадии его приготовления можно вносить наночастицы наполнителя. В качестве нанонаполнителей используют различные формы углерода (в том числе фуллерены), природные минералы, окислы различных металлов (Ti, Mn, Si, Zn и др.). В принципе нет ограничений по введению наночастиц любой природы в структуру волокон. Идет широкий поиск в этом направлении. в зависимости от химической природы можно получать волокна с разными свойствами (высокая механическая прочность, электропроводность, фотоактивность, антимикробные, сенсорные свойства, чувствительность к изменению температуры и т.д.). Отсюда и широкие области применения тканей из таких волокон, одна из которых – создание «умной» одежды. Одежда из «умной» синтетики убивает бактерии, массирует, смягчает кожу и реагирует на состояние организма, охлаждая и согревая при необходимости. Рубашки из новых тканей совершенно не мнутся и меняют свою форму в зависимости от погоды. По самым скромным оценкам, через 10 лет две трети всей одежды будут шить из таких тканей.

Хлопок и шерсть давно перестали быть фаворитами из-за низкой износостойкости и свойства накапливать влагу. Одежда из современных тка-

ней уже не напоминает воздухонепроницаемый скафандр, она не только комфортна для носки, но и обладает новыми качествами, на первый взгляд, нетипичными для одежды. Уже созданы принципиально новые ткани для одежды, способные убивать бактерии и разрушать токсины. Они покрыты защитным слоем, состоящим из молекул-разрушителей и пористых мембран. Размеры пор мембран способны пропускать сквозь себя мельчайшие капельки пота и в то же время не пропускать бактерии. При контакте бактерий или ядовитых веществ с мембраной они наталкиваются на молекулы, которые убивают бактерии и разрушают токсины. Такая ткань комфортна в носке, так как дает возможность коже дышать, она может быть самоочищающейся. Для самоочистки используют покрытия из активных наночастиц, которые на свету расщепляют органические загрязнители.

Особое направление при создании «умной» одежды занимает производство сенсорных волокон, тканей и трикотажа. Такой текстиль еще называют электронным, он позволяет в непрерывном режиме отслеживать основные параметры организма человека (температура, давление, пульс). Из него можно производить «умную» одежду для опасных, экстремальных условий. Так, специальная одежда для работников атомных электростанций не пропускает радиацию, содержит сенсоры физического состояния и передает на пульт физиологические параметры человека. В последнее время сделан также важный шаг в получении одежды, обеспечивающей электропитание для носимой человеком электроники. Оно осуществляется за счет встроенного в одежду термогенератора, использующего разность температур между телом человека и поверхностью одежды. Разность температур обеспечивает выходную мощность в несколько микроватт на квадратный сантиметр, что достаточно, например, для питания простых датчиков и микросхем.

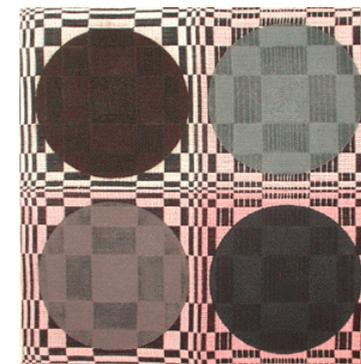


Рис. 1.1.8. «Электронная пряжа», выполняющая роль дисплея

В последнее время делаются попытки создавать одежду, полностью состоящую из дисплеев, или производить ткань, которая не содержит никаких дисплеев, но сама по себе является дисплеем. Такая «электронная пряжа» представляет собой набор проводящих и непроводящих нитей,

покрытых специальными чернилами, изменяющими цвет в зависимости от температуры (рис. 1.1.8). Нагрев нитей, вызванный протеканием по ним тока, заставляет чернила изменять цвет. При этом нанесенный ранее «шаблон» в виде определенной конфигурации нитей начинает проявляться на ткани. Для нагрева нитей используется низкое напряжение, поэтому одежда из такой ткани безопасна. Некоторые ведущие фирмы-производители одежды ведут разработку гибких дисплеев, которые будут вшиты в карманы или полы одежды и могут быть использованы как записные книжки, навигаторы и т.д.

Нанотехнологии получают также широкое распространение в спорте. Это диктуется возможностью достижения все более высоких результатов за счет использования новых композиционных наноматериалов при создании спортивного инвентаря, спортивных машин и сооружений. Наноматериалы позволяют не только уменьшать вес спортивного инвентаря при увеличении его прочности, но и значительно улучшать его физико-механические свойства – упругость, жесткость, сопротивление движению. Так, ведущие мастера велосипедного спорта уже используют велосипеды с массой всего 1 кг. Рамы таких велосипедов изготовлены из композиционного материала на основе углеродных нанотрубок, гораздо более прочного, чем стальная проволока. Широкое распространение среди спортсменов-профессионалов получили легкие и прочные шлемы различной формы, клюшки для хоккея и гольфа, теннисные ракетки, беговые и горные лыжи, лыжные палки, различные щитки и другой спортивный инвентарь, при изготовлении которого применялись материалы, выполненные на основе нановолокна.

Из новых «умных» тканей, выполненных на основе нанотехнологий, изготавливаются в последнее время костюмы пловцов, легкоатлетов, велосипедистов и т.д., которые не только прочны и эластичны, но позволяют телу хорошо «дышать» и способствуют повышению спортивных результатов. Для альпинистов, туристов и путешественников из сверхпрочных и легких тканей изготавливаются палатки и рюкзаки со встроенными панелями солнечных батарей, которые позволяют заряжать сотовые телефоны, GPS-приемники, карманные компьютеры, видеокамеры.

Важным элементом альпинистской и туристической обуви является утеплительный материал для обувных стелек. Материал на основе полимера с нанопорами обладает уникальными теплоизоляционными свойствами. На рис. 1.1.9 показано, как стелька из такого материала не позволяет сильно повысить температуру на верхней ее поверхности, если нижняя подогревается пламенем газовой горелки с температурой 1000° С.

Становится популярной «умная» спортивная обувь. В ближайшее время планируется выпустить в продажу кроссовки, которые будут оснащены датчиками биологических параметров человека. Такая обувь будет распознавать сердечный ритм, кровяное давление, температуру их хозяина,

а затем передавать данные посредством беспроводной связи на ноутбук. Кроссовки с измерительными датчиками понадобятся спортсменам и их тренерам, которые будут корректировать физическую нагрузку своих подопечных, наблюдая за состоянием их здоровья.

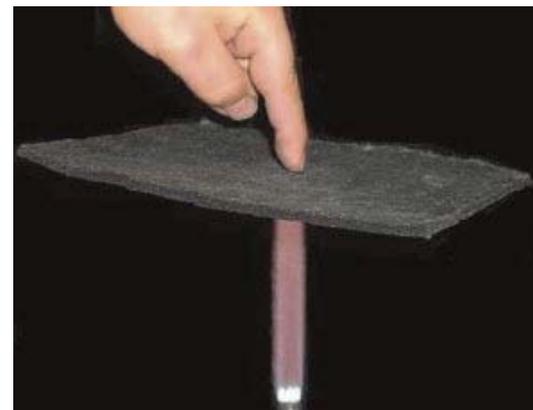


Рис. 1.1.9. Теплоизолирующий материал с нанопорами (температура факела газовой горелки внизу 1000° С)

В ближайшей перспективе также создание «умных» кроссовок, которые будут помогать спортсменам и путешественникам меньше уставать при больших и сложных переходах. В кроссовки может быть, например, встроен GPS-приемник (система спутниковой локализации) и вмонтирована тревожная кнопка, которые не позволят потеряться детям и туристам, они предупредят родных и близких о возникновении экстренной ситуации. Как выразился один из авторов статей об «умной» обуви, лет через десять для завязывания шнурков достаточно будет прикрикнуть на кроссовки.

Контрольные вопросы и задания

1. Какой смысл Вы вкладываете в термин «умная» одежда?
2. Что такое мембрана, какие функции она осуществляет и каков ее механизм работы?
3. Почему одни материалы (например, металлы) хорошо проводят тепло, а другие (например, керамика) – плохо?
4. Объясните, почему современные (пластиковые) оконные рамы, имеющие небольшую толщину, лучше удерживают тепло, чем обычные деревянные рамы.
5. Найдите в Интернете информацию о применении нанотехнологий в спорте и напишите на эту тему реферат.

1.1.7. Нанотехнологии в военном деле

Использование нанотехнологий в военном деле, по мнению специалистов, может привести к изменению многих военных доктрин. Их применение в этой области, прежде всего, связано с достижениями в современной электронике и робототехнике. Ясно, что новая модель армии должна отвечать веку нанотехнологий и включать мощную информационную сеть, связывающую между собой все ее компоненты – от солдат до боевых машин наземного и морского базирования, авиацию и ракетные войска, подразделения управляемых и автоматических роботов и т.д. Вся боевая техника создается с учетом последних достижений нанотехнологий. Прежде всего, это невидимые летательные аппараты, космическая авиация, лазерное оружие. При этом кардинально изменяется отношение к экипировке солдата будущего. Когда речь идет о военном человеке, работающем в экстремальных условиях (солдате, космонавте, спасателе, пожарнике), его костюм должен не только обеспечить механическую, химическую, радиационную, биологическую защиту, связь с центром управления и другими членами группы, но и быть при этом достаточно легким и удобным. Радикальное повышение боеспособности солдата и выживаемости его в сложных условиях возможны только при использовании нанотехнологий.

Экипировка солдата армий всех экономически развитых стран непрерывно совершенствуется. Она должна за счет «умного» костюма, системы позиционирования и навигации, информационной защиты, обеспечивающей встроенность в общую структуру боевой группы, делать солдата автономным, быстродействующим и выживаемым. Большинство необходимого оборудования будет интегрировано в костюм солдата, между волокнами основной ткани будут вплетены разнообразные «умные» наноструктуры, позволяющие распознавать химические и биологические токсины, поддерживать нормальную температуру тела, защищать от вредных излучений. В костюм будут вмонтированы гибкие солнечные панели, что заметно повысит автономность солдата. Предполагается также автоматическое камуфляжное отражение и преломление света с целью достижения частичной «невидимости».

Одна из основных деталей костюма солдата будущего – бронезилет, который будет иметь толщину всего в несколько миллиметров. Создавать его предполагается на основе композиционного материала из полиуретановых волокон диаметром около 100 нм с включением наночастиц с необходимыми свойствами, которые будут объединять волокна в прочную сетку. Разработка костюма солдата будущего, учитывая его разнообразные функции – сложная задача. В него будут вмонтированы акселерометры (аналогичные детекторам подушек безопасности в автомобиле), благодаря которым реакция экзоскелета костюма на внешнее силовое воздействие будет мгновенной и не зависящей от солдата. Например, определенные

его участки могут стать по сигналу медицинского компьютера жесткими и превратиться в шину для поврежденной конечности. Аналогична реакция на ударную волну от пуль и осколков: поражаемая часть костюма мгновенно становится жесткой, а особенности применяемых в костюме полимерных материалов позволят распределить кинетическую энергию удара по достаточно большой площади.



Рис. 1.1.10. Предполагаемый вид костюма солдата будущего

Ожидается, что к 2020 году специальные наномашин-усилители, используемые в разных узлах конструкции экзоскелета, увеличат силу солдата на 300%. По словам специалистов, скорее не солдат будет носить броню, а броня будет носить солдата. В настоящее время в наибольшей степени в этом направлении продвинулась разработка роботизированных ног (рис. 1.1.11). На ноги надевается гидравлический каркас с сенсорами и датчиками, которые улавливают напряжение и движение мышц, а солдат передвигается в достаточно тяжелом экзоскелетоне и с большой амуницией, почти не ощущая их веса. Устройство ботинок позволит аккумулировать, а затем в нужный момент использовать часть энергии бега. Солдат сможет перепрыгивать через рвы, высокие и широкие препятствия, легко взбираться на стены. Защитный противобаллистический шлем солдата станет высокотехнологичной частью костюма и будет начинен устройствами, позволяющими получать информацию от его собственного организма, от других членов группы, центра управления. Все эти сведения, а также информация от

приборов, заменяющих прибор ночного видения и бинокль, через проектор будут передаваться непосредственно на сетчатку глаз. «Субъективный» размер экрана со множеством таких «операционных окон» близок к 17-дюймовому. На него, по желанию солдата, будет отражаться вид местности со всех сторон, в том числе сверху (от космического спутника или беспилотного воздушного аппарата). На экран могут выводиться также изображения, получаемые датчиками других бойцов подразделения. Шлем будет оснащен лазерной системой опознавания «свой-чужой»: маркеры на рукавах костюмов, видимо, будут основаны на фотонных кристаллах.



Рис. 1.1.11. «Суперноги» – часть общего скелетона костюма солдата

В комплект снаряжения войдет также специальная майка, в которую и будут вмонтированы сенсоры костюма. Они будут фиксировать основные физиологические параметры человека. Все эти сведения будут с помощью индивидуального медицинского компьютера передаваться на камеру, которая спроектирует информацию прямо на сетчатку глаз. В случае необходимости, медицинский компьютер по данным датчиков сам заблокирует солдата в экзоскелете, включит нужные системы жизнеобеспечения (например, герметизирует костюм при попадании в опасную среду) и вызовет медицинскую помощь. Врач, находящийся в тысячах километров, проконтролирует этот процесс и отдаст нужные команды.

Отметим, что применение нанотехнологий в военном деле может привести к ряду сложных международных проблем. Оно может привести к изменению в расстановке сил различных стран и, как следствие, к дестабилизации военного равновесия в мире, поскольку в настоящее время военные нанотехнологии разрабатываются, в основном, только высокоразвитыми странами.

Контрольные вопросы и задания

1. Где могут быть использованы нанотехнологии при создании военной техники?
2. На каких физических принципах основан эффект «невидимости» самолетов? Возможно ли создание «шапки-невидимки»?
3. Каким образом нанотехнологии смогут улучшить амуницию солдата?
4. Найдите информацию в Интернете о лазерном оружии. В чем его разрушительная сила и каковы его энергетические характеристики?
5. Попробуйте пофантазировать и нарисовать свой костюм солдата будущего, а также военной техники будущего. Проведите конкурс таких рисунков.

ГЛАВА 1. 2.

Наночастицы и наноструктуры

При переходе вещества от макроразмеров к наноразмерам происходит резкое изменение их свойств. Изменения связаны с двумя основными причинами: увеличением доли поверхностных атомов у наночастиц и проявлением квантовых эффектов. Поэтому необходимо определить границы, при переходе через которые объект можно считать наноразмерным. Под наноматериалами (нанокристаллическими, нанокомпозитными, нанофазными, нановолокнистыми, нанопористыми и т.д.) принято понимать материалы, основные структурные элементы (кристаллиты, волокна, слои, поры) которых не превышают 100 нм, по крайней мере, в одном направлении. Общепринято к нанообъектам относить структуры, размеры которых хотя бы в одном из пространственных направлений составляют примерно 0,1 – 100 нм. **Объекты, имеющие размеры по всем направлениям менее 100 нм, принято подразделять на НУЛЬМЕРНЫЕ (квантовые точки, сфероидные наночастицы), ОДНОМЕРНЫЕ (квантовые проводники, нанотрубки), ДВУМЕРНЫЕ (тонкие пленки, поверхности разделов) и ТРЕХМЕРНЫЕ (многослойные структуры с наноразмерными дислокациями, сверхрешетки, нанокластеры) – по количеству направлений, в которых линейные размеры $L \gg 100$ нм.**

1.2.1. Классификация наноструктур

В настоящее время известно достаточно большое число разнообразных наноструктур, находящихся в твердом и жидком (дисперсном) состояниях. Классификация наноструктур может быть проведена по различным их характеристикам. Одна из возможных классификаций наноструктур представлена в следующей таблице.

Отдельную нишу в нанoeлектронике занимают такие материалы, как нанокомпозиты, нанокерамика, а также нанопористые материалы.

НАНОКОМПОЗИТЫ определяются наличием четкой границы разделов элементов и объемным сочетанием компонентов. По характеру связности структурных элементов композиты делятся на матричные (включения в матрице), каркасные (взаимопроникающие жесткие компоненты) и однокомпонентные поликристаллы. По форме структурных элементов нанокомпозиты делятся на волокнистые, зернистые и слоистые, а по объемному расположению – регулярные и стохастические.

Твердотельные	Синтетические	Биомолекулярные
Наночастицы	Нанополимеры	Биомолекулярные
Нанотрубки	Синтетические	комплексы
Тонкие пленки	нановолокна	Модифицированные
Квазидномерные	Синтетические	вирусы
проводники	тонкие пленки	Органические
Квазинульмерные	Наноклоиды	наноструктуры
объекты	Нанокристаллы	
Нанокристаллы	(каучук, тефлон)	

НАНОКЕРАМИКА – поликристаллические материалы, полученные спеканием неметаллических порошков с размером частиц менее 100 нм. Нанокерамику обычно делят на конструкционную (для создания механически прочных конструкций) и функциональную (со специфическими электрическими, магнитными, оптическими и термическими функциями). Перспективность нанокерамики обусловлена сочетанием многообразия свойств (проводящих, полупроводниковых, магнитных, оптических, термических), доступностью сырья, экономичностью технологии производства и экологичностью. Особый интерес как структуры для изготовления нанoeлектронных изделий представляют **нанопористые материалы** с размером пор меньше 100 нм. В настоящее время на практике получают достаточно большое число разнообразных наноструктур. Далее мы рассмотрим наиболее важные из них.

Контрольные вопросы и задания

1. Какая основная отличительная особенность наноматериалов? Почему они часто оказываются лучше традиционных материалов?
2. Что Вам известно о применении наноматериалов в прошедших столетиях? Каким образом эти материалы изготавливались в те времена?
3. Что понимают под нанокомпозитным материалом? Приведите примеры таких материалов и укажите области их применения.
4. Найдите в Интернете информацию о нанопористых материалах. Какими необычными свойствами они могут обладать?

1.2.2. Наночастицы и нанокластеры

НАНОЧАСТИЦЫ – это объекты, которые состоят из связанных между собой атомов или молекул и размер которых не превышает 100 нм. При максимальных размерах наночастицы состоят из относительно небольшого числа атомов – не более 10^6 . Количество атомов в наночастице во много раз меньше числа атомов в частице макроскопических размеров (в металлическом шарике объемом 1мм^3 содержится порядка 10^{19} атомов).

В макроскопических образцах физические характеристики не зависят от их объема (температура плавления, удельное электрическое сопротивление) или пропорциональны ему (теплоемкость). Для формирования тех или иных свойств вещества очень важно коллективное взаимодействие отдельных частиц. При небольшом числе атомов не полностью проявляется коллективный характер их взаимодействия, поэтому свойства нанообъектов проявляются по-иному, по сравнению с макрообъектами, состоящими из большого числа атомов. В формировании наночастиц существенную роль играют процессы самоорганизации. По этой причине свойства наночастиц существенно отличаются от свойств объемного вещества, состоящего из таких же атомов. Многие физические законы, справедливые в физике макрообъектов, для наночастиц нарушаются. Так, температура плавления наночастиц существенно меньше температуры плавления массивных образцов, вода в нанопорах может не замерзать даже при -30°C , а известные формулы сложения сопротивлений проводников при их параллельном и последовательном соединении для нанопроводов не справедливы.

Наночастицы, размеры которых по каждому из трех направлений не превышает 10 нм, обычно называют НАНОКЛАСТЕРАМИ (от английского «cluster» – скопление, гроздь). Кластеры состоят из сравнительно небольшого числа атомов или молекул, от единиц до десятков тысяч. Особенности их физических свойств во многом определяются двумя факторами – характером коллективного взаимодействия атомов и с возрастающей ролью поверхностных атомов. Для небольших кластеров практически все атомы являются «поверхностными», чем объясняется, например, их повышенная химическая активность. Металлические кластеры плавятся при существенно более низкой температуре, чем массивные тела, а точка их плавления не совпадает с точкой замерзания. При определенных условиях кластеры могут иметь отрицательную теплоемкость (при сообщении некоторого количества теплоты их температура не возрастает, а понижается за счет перестройки структуры). В зависимости от размеров, кластеры металла могут быть как проводниками, так и полупроводниками, и даже диэлектриками.

Форма некоторых нанокластеров удивительно напоминает высоко-симметричные объекты живой природы (цветы, деревья, шишки), что под-

тверждает единство процессов самоорганизации при образовании подобных структур в неживой и живой природе (рис. 1.2.1).



Рис. 1.2.1. Примеры реальных нанокластеров (а, в) и живого цветка (б)

Одним из наиболее широко встречающихся на практике видов кластеров являются **НАНОТОЧКИ**, которые представляют собой регулярные «наноостровки» одного полупроводника на поверхности другого, близкого по составу и структуре. Наноточка для электронов фактически является трехмерным ящиком, за пределы которого электрон не может уйти (о поведении электронов в таких структурах будем говорить во второй части книги). на основе структур с наноточками разработаны технологии нового поколения полупроводниковых приборов, лазеров, солнечных батарей и др. Примеры изображений наноточек из InAs, выращенных на поверхности GaAs, полученных при различном увеличении, приведены на рис. 1.2.2. Полупроводниковые наноточки имеют размер порядка нескольких десятков нанометров и содержат тысячи и сотни тысяч атомов.

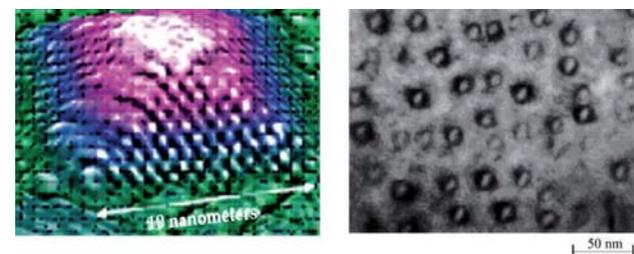


Рис. 1.2.2. Изображение отдельной наноточки (в атомно-силовом микроскопе, слева) и системы наноточек InAs на поверхности GaAs (в просвечивающем электронном микроскопе, справа)

На основе полупроводниковых структур из наноточек уже создаются миниатюрные источники света – светодиоды с высоким коэффициентом полезного действия, который в ближайшие годы предполагается увеличить почти до 100%! Варьируя размеры и состав наноточек, можно получать светодиоды с разным цветом излучения. В полупроводниковых устройствах микронных размеров регулируется ток, соответствующий потоку из сотен тысяч электронов. С помощью наноточек можно управлять движением нескольких или даже одиночных электронов, что открыло огромные возможности по дальнейшей миниатюризации устройств и снижению их энергопотребления.

Изучение кластеров помогает понять, как формируются свойства макроскопических тел, сколько частиц должно объединиться, чтобы их ансамбль обладал характеристиками макроскопических образцов. Физические свойства кластера часто существенно зависят от числа атомов в нём, поэтому некоторые исследователи называют это число третьей координатой таблицы Менделеева. Верхняя граница размеров кластера отвечает такому числу атомов, при котором дальнейшее добавление уже не меняет его физических и химических свойств.

Контрольные вопросы и задания

1. Во сколько раз число атомов в сферической наночастице радиуса R_1 меньше, чем в наночастице радиуса $R_1 < R_2$?
2. Какие наночастицы относятся к нанокластерам? Чем определяется верхняя граница размера кластера?
3. Дайте свои объяснения тому факту, что физические закономерности, справедливые для макрообъектов, не выполняются для наночастиц.
4. Познакомьтесь в Интернете с физическими свойствами наноточек. Объясните, почему наноточки играют важную роль в нанoeлектронике.
5. Нанокластер сферической формы из 200 атомов воды попадает на плоскую поверхность и растекается, образуя мономолекулярный слой. Оцените размеры кластера и пятна.

1.2.3. Роль поверхностных атомов

Многие физические свойства макрообъектов при уменьшении размеров составляющих их частиц до наноразмеров начинают существенно изменяться. Одной из причин такого изменения является то, что **при уменьшении размера частиц доля атомов, расположенных на их поверхности, и их вклад в свойства объекта становятся все более существенными**. Но почему увеличение доли поверхностных атомов так влияет на свойства частиц при приближении их размера к нанометровому диапазону?

Для ответа на этот вопрос вспомним хорошо известные поверхностные явления (поверхностное натяжение, смачивание, капиллярность). Все они обусловлены тем, что силы взаимодействия между частицами, составляющими тело, не скомпенсированы на его поверхности. Другими словами, атомы на поверхности любого тела находятся в особых условиях, отличных от условий для внутренних атомов. Поверхностные атомы находятся в «несимметричных» условиях и их поведение отличается от поведения таких же атомов в объеме. Поэтому поверхностные атомы имеют меньшую энергию связи, чем атомы внутренние, им ничего не стоит под действием теплового или другого возбуждения порвать связи с соседними атомами. Такое поведение характерно для атомов нескольких поверхностных слоёв (**рис. 1.2.3**). Так как число поверхностных атомов в нанобъектах резко возрастает, то их вклад в свойства всего

объекта становится определяющим и растет с дальнейшим уменьшением его размера. Именно это и является одной из причин проявления новых свойств на наноуровне. Впервые, вероятно, ученые и технологи вплотную столкнулись с этой проблемой в физике полупроводников. В своем стремлении к миниатюризации они дошли до размеров частиц в несколько десятков нанометров, при которых их оптические и электронные свойства стали резко отличаться от таковых для частиц «обычных» размеров. Именно тогда стало окончательно понятно, что шкала «наноразмеров» – это особая область, отличная от области существования макрочастиц или сплошных сред.

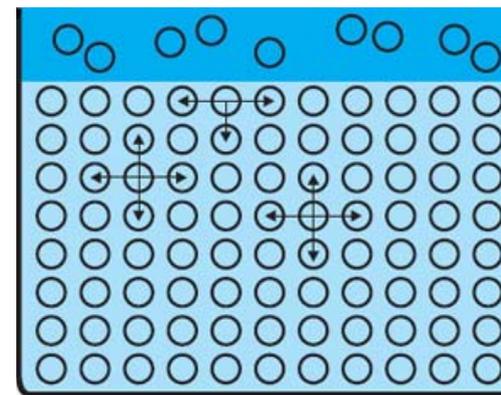


Рис. 1.2.3. Симметрия объемных и асимметрия поверхностных сил

Покажем, что у наночастиц доля «поверхностных» атомов очень большая. Проведем оценку числа поверхностных атомов для наночастиц алюминия кубической формы. Так как атомный вес алюминия $A = 27$ г/моль, а плотность $\rho = 2,7$ г/см³, то в кубике с ребром $d = 1$ см содержится

$$n = \rho V N_A / A \approx 6 \cdot 10^{22} \quad (1.1)$$

атомов, где $V = d^3$. Расстояние между соседними атомами в таком кубике можно оценить с помощью выражения $a \approx (V/n)^{1/3}$, из которого следует $a \approx 2,55 \cdot 10^{-8}$ см. При этом число атомов на одной грани кубика равно $n_s \approx (d/a)^2 = 1,5 \cdot 10^{15}$, а число всех поверхностных атомов в таком кубике алюминия будет равно $9 \cdot 10^{15}$, тогда как полное число атомов $n = 6 \cdot 10^{22}$. Таким образом, доля поверхностных атомов у алюминиевого кубика макроскопических размеров составляет всего $1,5 \cdot 10^{-7}$. На поверхности нанокубика с ребром $d = 5$ нм находится уже 12% всех его атомов, а для нанокубика размером $d = 1$ нм больше половины всех атомов являются поверхностными! Зависимость доли поверхностных атомов $D = n_s/n$ от числа атомов в кубике n показана на **рис. 1.2.4**.

Определим аналитический вид приведенной на рисунке зависимости. Если в ребре кубика укладывается a атомов, то в одном слое укладывается

a^2 , а во всем кубике – a^3 атомов (отметим, что это не самая плотная упаковка атомов). Число атомов, находящихся в объеме и не являющихся поверхностными, определяется выражением $n_v = (a - 2)^3$. При этом число поверхностных атомов $n_s = n - n_v = 6a^2 - 12a + 8$, а доля поверхностных атомов определяется следующим образом:

$$D = \frac{n_s}{n} = \frac{6a^2 - 12a + 8}{a^3} = \frac{6}{n^{1/3}} - \frac{12}{n^{2/3}} + \frac{8}{n}. \quad (1.2)$$

Так, если в ребре кубика укладывается $a = 4$ атома, то полное число атомов в кубике $n = 64$. Подставляя эти значения в (1.2), получаем $D = 7/8 = 0,875$.

Теперь оценим долю поверхностных атомов в кластере сферической формы, состоящем из n атомов. Объем такого кластера можно записать в виде:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \nu n, \quad (1.3)$$

где R – радиус нанокластера, ν – объем, приходящийся на одну частицу. Будем считать, что объем, приходящийся на одну частицу, можно представить в виде:

$$\nu = \frac{4}{3}\pi a^3, \quad (1.4)$$

где a – средний радиус одной частицы. Тогда можно записать:

$$R = an^{1/3}. \quad (1.5)$$

Размер одной частицы (атома) для большинства нанокластеров равен примерно $a \approx 0,1$ нм. С помощью последней формулы легко показать, что состоящий из 1000 частиц кластер будет иметь размер порядка 1 нм.

Важной характеристикой нанокластеров является площадь их поверхности, которая определяется выражением

$$S = 4\pi R^2. \quad (1.6)$$

Число атомов на поверхности n_s связано с площадью поверхности соотношением

$$S = sn_s = \pi a^2 n_s, \quad (1.7)$$

где $s = \pi a^2$ – площадь, которую занимает один атом на поверхности кластера.

Рассмотрим теперь соотношение числа атомов на поверхности к полному числу атомов в кластере. Используя соотношения (1.5) и (1.6), получаем

$$\frac{n_s}{n} = \frac{S}{s} \cdot \frac{\nu}{V} = \frac{3\nu}{sR} = \frac{4a}{R}, \quad (1.8)$$

откуда следует, что число атомов на поверхности кластера связано с полным числом атомов соотношением

$$n_s = \frac{4a}{R} n = 4n^{2/3}. \quad (1.9)$$

Как видно из этой формулы, доля атомов на поверхности кластера быстро уменьшается с ростом размера кластера. Заметное влияние поверхности проявляется при размерах кластеров меньших 100 нм. С уменьшением размера кластера величина n_s/n начинает резко возрастать.

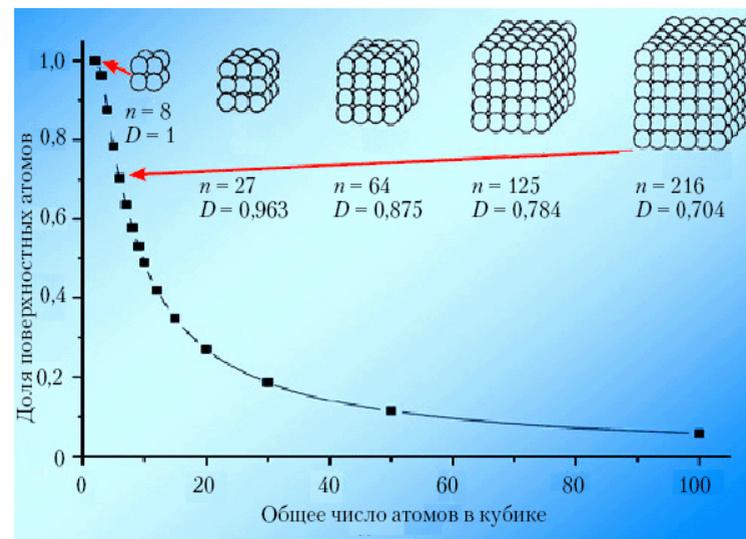


Рис. 1.2.4. Зависимость доли поверхностных атомов от числа атомов в кубике

Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит различие атомов (молекул) в поверхностном слое и в объеме тела с точки зрения действующих сил?
2. Объясните физическую природу поверхностного натяжения. Почему капли дождя и капли рассыпанной ртути имеют сферическую форму?
3. Какова природа капиллярных явлений, каким образом они связаны со смачиваемостью поверхности, что такое угол смачиваемости?
4. Почему, на Ваш взгляд, при увеличении доли поверхностных атомов в частице изменяются ее физические свойства?
5. Оцените число поверхностных атомов в наноточке, имеющей форму правильной четырехугольной пирамиды, в основании которой находится 36 атомов и которая состоит из шести плотно упакованных атомных слоев.
6. Два сферических нанокластера, состоящих из 800 атомов, объединяются в один кластер. Во сколько раз изменятся размер образовавшегося кластера и число поверхностных атомов по сравнению с этими величинами у исходных кластеров?

1.2.4. Магические числа

Оказалось, что *чаще всего встречаются кластеры, состоящие из определенного числа атомов. Это означает, что кластеры с таким числом атомов наиболее устойчивы и стабильны. Эти числа называются МАГИЧЕСКИМИ*, их набор позволяет понять, как из отдельных атомов формируются кластеры, от самых маленьких до больших. Тем самым можно проследить путь формирования структуры и свойств макроскопического тела, начиная от отдельных атомов и молекул. На **рис. 1.2.5** показано распределение по числу атомов кластеров криптона, полученное на *масс-спектрометре*. Этот прибор позволяет определить распределение частиц по массам, которое легко пересчитать в распределение по числу атомов в кластере. Видно, что максимумы такого распределения приходятся на определенные – магические числа, которые для атомов криптона равны 13, 69, 87, 104, 147 и т.д.



Рис. 1.2.5. Распределение кластеров криптона по числу атомов (нижняя ось – число атомов в кластере)

Примером структуры устойчивых кластеров служит плотная упаковка одинаковых сфер, при которой они касаются друг друга. Первому магическому числу $n = 13$ соответствует внутренняя сфера, окруженная 12 сферами того же радиуса. Если последующие оболочки из частиц также полностью заполнены, это соответствует числу частиц (магическим числам) 55, 147, 309, 567. Число частиц n_l в оболочке под номером l можно подсчитать по формуле

$$n_l = 10l^2 + 2. \quad (1.10)$$

Таким образом, в первой оболочке вокруг одного атома находится 12 атомов, и магическое число n_1 равно 13. Во второй оболочке находится 42 атома; добавляя 42 к 13, получаем магическое число $n_2 = 55$ и т.д. Структура кластера при этом оказывается наиболее стабильной, а кластер имеет структуру *икосаэдра* (**рис. 1.2.6, б**), в некоторых случаях кластеры «упаковались» в структуру *додекаэдра* (**рис. 1.2.6, а**), для которой набор магических чисел 7, 29, 66, 118 и т.д. Исследование магических чисел для углерода привело к открытию фуллеренов и углеродных нанотрубок. Изучение магиче-

ских чисел некоторых твердотельных кластеров помогает понять природу многих свойств вещества. В последние годы получены разнообразные нанокластеры сложного состава, состоящие не только из одинаковых атомов, но и из многоатомных молекул.

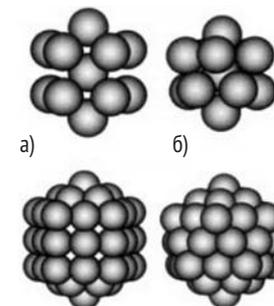


Рис. 1.2.6. Нанокластеры из 13 и 55 атомов с разным типом упорядочения: додекаэдр (а); икосаэдр (б)

К нанокластерам можно также отнести многие молекулы, состоящие из большого числа атомов. Примером таких кластеров могут быть *ФУЛЛЕРЕНЫ* – молекулы углерода, состоящие из разного числа атомов и представляющие сфероподобные каркасные структуры, напоминающие по форме футбольный мяч (**рис. 1.2.7**). Эта форма углерода была открыта в 1985 году. Фуллерены получили свое название в честь американского архитектора Б. Фуллера, который в середине прошлого века широко пропагандировал подобные конструкции для использования их в архитектуре в качестве куполов зданий.



Рис. 1.2.7. Модель молекулы фуллерена C_{60} и футбольный мяч

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом формируются нанокластеры? Почему нанокластеры с разным числом одинаковых атомов обладают различной стабильностью?
2. Объясните причину стабильности кластеров, содержащих «магическое» число атомов. Почему таких чисел может быть несколько?

3. Какие типы плотной упаковки сферических атомов могут быть при образовании нанокластеров?
4. Узнайте из Интернета физические принципы работы масс-спектрометра. Каким образом происходит разделение частиц вещества по массам?
5. Рассчитайте магические числа для наночастиц кубической формы. Дайте математическое выражение этих чисел.

1.2.5. Углеродные наноструктуры

Ни один химический элемент не обладает таким разнообразием уникальных свойств, иногда прямо противоположных, которое присуще углероду. Именно это является причиной того, что и сам углерод, и его соединения, и материалы на его основе служат объектами фундаментальных исследований и применяются в самых различных областях. Углерод имеет четыре валентных электрона и является неметаллическим химическим элементом IV группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Свойства углерода таковы, что он является основой огромного числа органических соединений и молекул, из которых состоит все живое.

Чистый углерод также имеет несколько модификаций. Наиболее известные и встречающиеся в природе модификации – графит и алмаз. В настоящее время обнаружены еще несколько модификаций. Сюда можно отнести различные виды упоминавшихся выше фуллеренов, *графен* и *углеродные нанотрубки*, *карбин* и ряд других. Рассмотрим подробнее некоторые из этих структур.

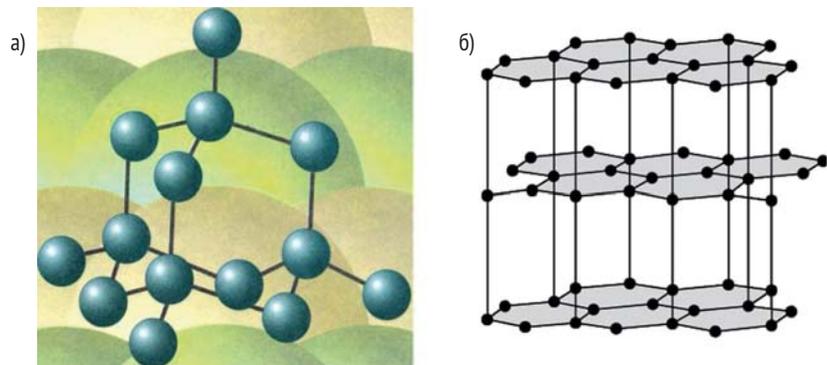


Рис. 1.2.8. Кристаллическая структура алмаза (а) и графита (б)

Алмаз. Все четыре валентных электрона атомов углерода у алмаза образуют высокопрочные ковалентные связи C–C. Поэтому у него отсутствуют электроны проводимости, и он относится к диэлектрикам. По этой причине алмаз обладает исключительной твердостью и высокой температурой плавления (3550°C).

Графит. Другой формой углерода является графит, сильно отличающийся от алмаза по свойствам. *Графит – мягкое черное вещество из легко сляющихся плоскостей, называемых ГРАФЕНОВЫМИ. В пределах графеновой плоскости атомы углерода соединены сильными ковалентными связями. Эти связи образуют двухмерную гексагональную решетку, в основе которой лежит правильный шестиугольник (рис. 1.2.8).* Однако, в отличие от алмаза, в образовании связей участвуют только 3 электрона. Четвертые электроны атомов свободны, что объясняет хорошую электропроводность графеновых плоскостей. Между плоскостями существует слабое притяжение, обусловленное слабыми молекулярными силами.

Хотя графит известен с незапамятных времен, изолированные графеновые плоскости впервые были получены российскими учеными А. Геймом и К. Новоселовым только в 2004 году. Они сумели получить материал толщиной в один атом углерода. Этот *материал, названный ГРАФЕНОМ, представляет собой двухмерную плоскую молекулу углерода толщиной в один атом* (рис. 1.2.9).

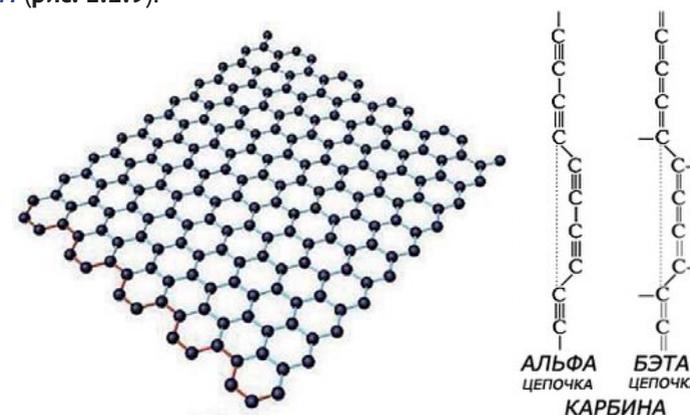


Рис. 1.2.9. Модель графена в виде двухмерной гексагональной решетки и углеродные цепочки α - и β - модификаций карбина

Свойства графена оказались совершенно удивительными. Оказалось, что в графене электроны обладают большой подвижностью. Их подвижность в сотни раз превосходит подвижность электронов и дырок в кристаллическом кремнии, который является самым распространенным материалом современной микроэлектроники. Графен позволяет создавать транзисторы и другие полупроводниковые приборы с размерами порядка нескольких нанометров. С уменьшением размеров происходит переход в наномир, где усиливается роль квантовых эффектов. Электроны в виде волн де Бройля перемещаются по структуре, что уменьшает количество их столкновений с узлами решетки и, соответственно, уменьшает потери энергии, неизбежные при рассеянии электронов.

Третьей аллотропической формой углерода является **карбин**, который был открыт в 60-х годах прошлого века группой российских ученых (А.М.Сладков, В.В.Коршак, В.И.Касаточкин и Ю.П.Кудрявцев). **КАРБИН представляет собой линейную структуру, в которой атомы углерода соединены либо чередующимися одинарными и тройными связями (α -карбин), либо двойными связями (β -карбин).** Вид этих структур приведен на **рис. 1.2.9**. На основе карбиновых структур могут формироваться углеродные волокна, обладающие чрезвычайно большой прочностью и высокими проводящими свойствами.

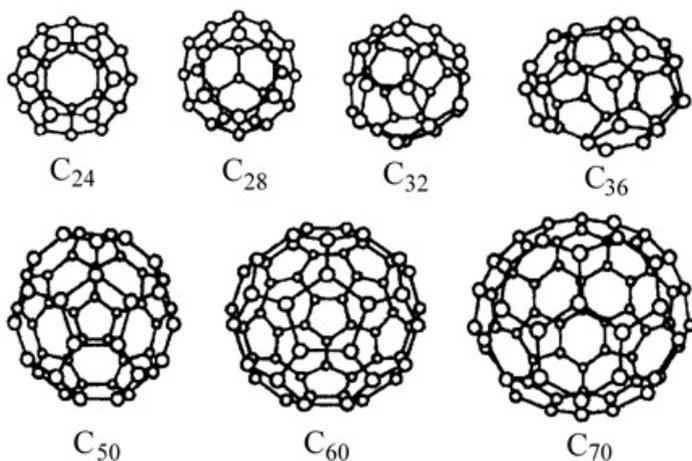


Рис. 1.2.10. Модели молекул фуллеренов C_n

Четвертая аллотропическая форма углерода – это **фуллерены**, о которых уже упоминалось выше. **В ФУЛЛЕРЕНЕ каждый атом углерода соединён тремя прочными химическими связями с другими атомами. Благодаря этим связям, фуллерен образует замкнутую выпуклую поверхность, состоящую из правильных шести и пятиугольников.**

Научный интерес к изучению фуллеренов проявился после изобретения способа их производства в больших количествах. Молекула C_{60} обладает наиболее высокой среди всех фуллеренов симметрией и наибольшей стабильностью. Существуют и более крупные молекулы, насчитывающие до 400 атомов. На **рис. 1.2.10** приведен модельный ряд молекул фуллеренов C_n с числом атомов углерода $n = 24, 28, 32, 36, 50, 60, 70$. **На основе фуллеренов могут формироваться кристаллические решетки. Полученные таким образом вещества получили названия ФУЛЛЕРИТОВ**, они обладают целым рядом интереснейших электрических и оптических свойств.

Углеродные нанотрубки. Еще одним интереснейшим нанообъектом, состоящим из атомов углерода, являются УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ. Они представляют собой полые продолговатые цилиндрические структуры диаметром от единиц до десятков нанометров и длиной в несколько

десятков микрон (рис. 1.2.11). Идеальная нанотрубка представляет собой свернутую в цилиндр графеновую плоскость, т. е. поверхность, выложенную правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Формы углеродных нанотрубок очень разнообразны. Они могут быть одностенными или многостенными (однослойными или многослойными), прямыми или спиральными, длинными и короткими и т. д. Нанотрубки необыкновенно прочны на растяжение и на изгиб. Под действием больших механических напряжений они не рвутся, не ломаются, а просто перестраивают свою структуру. Углеродные нанотрубки обладают важными для практического использования свойствами: они способны проводить ток очень высокой плотности, менять свои свойства при присоединении (адсорбции) других атомов и молекул, испускать электроны со своих концов при низких температурах (холодная электронная эмиссия) и т.д.

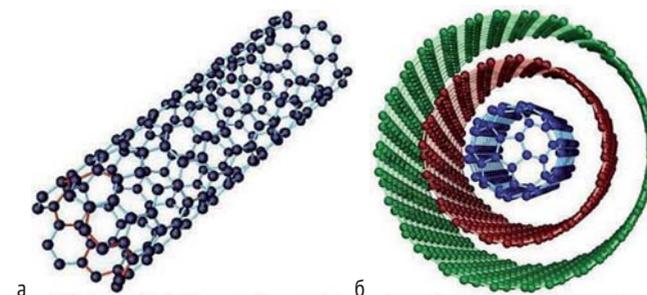


Рис. 1.2.11. Модели УНТ: одностенная (а) и многостенная (б)

В настоящее время ведутся интенсивные исследования свойств различных углеродных наноструктур. Интерес к их исследованиям обусловлен не только разнообразием новых физико-химических явлений, происходящих в этих структурах и при их участии, но и уникальными перспективами практического применения новых материалов, создаваемых на их основе.

Контрольные вопросы и задания

1. Укажите валентность атома углерода и перечислите наиболее известные углеродные наноструктуры.
2. В чем отличие кристаллических структур алмаза и графита и почему различие в структуре существенно влияет на физико-механические свойства этих материалов?
3. Какие вам известны молекулы фуллерена и какова их структура?
4. Узнайте из Интернета, за какие достижения была присуждена Нобелевская премия российским физикам А.Гейму и К.Новоселову?
5. Почему для создания троса космического лифта наиболее подходящим материалом считаются углеродные нанотрубки?
6. Перечислите основные физические свойства нанотрубок и укажите для некоторых из них количественные характеристики.

1.2.6. Наноккомпозиты, нанопористые и нанофазные материалы

Многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью и жесткостью, называют КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ или КОМПОЗИТАМИ. Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Наличие многочисленных границ раздела между компонентами делает композит, как правило, гораздо более прочным, чем исходные компоненты. Примерами композиционных материалов являются обычная фанера, железобетон, стеклопластик. Широкое распространение в промышленности получили слоистые композиционные материалы, у которых матрица (основа) и наполнитель расположены послойно. На **рис.1.2.12** представлено особо прочное стекло, армированное несколькими слоями полимерных пленок. Такие стекла в настоящее время находят широкое применение в строительстве, на железнодорожном транспорте, в автомобильной промышленности.



Рис. 1.2.12. Стекло, армированное несколькими слоями полимерных пленок

НАНОКОМПОЗИТОМ является композиционный материал, в качестве одного из компонентов которого взяты нанобъекты (наночастицы, нанотрубки и т.п.). При этом процент нанодобавок должен быть невелик (не более 5%), так как их эффективность во многих случаях зависит от поверхности соприкосновения компонентов, которая у нанобъектов велика. В качестве примера можно привести композит на полимерной основе с наполнителем из наночастиц серебра. При концентрации серебра всего в несколько десятитысячных долей процента композит проявляет необычайно сильное бактерицидное действие. Композиционные материалы, содержащие в неорганических матрицах наноразмерные частицы переходных металлов и сплавов на их основе (с узким распределением по размерам), представляют

интерес в качестве магнитных материалов, катализаторов, компонентов магнитных жидкостей.

К композитным материалам можно также отнести и слоистые структуры, получившие название ГЕТЕРОСТРУКТУР. Это искусственные структуры, изготовленные из двух или более полупроводниковых материалов. В гетероструктурах важная роль принадлежит переходным слоям, т. е. границам раздела двух материалов. В состав полупроводниковых гетероструктур входят элементы II–VI групп таблицы Менделеева, соединения $A^{III}B^V$ и их твердые растворы, а также соединения $A^{II}B^{VI}$. Из соединений типа $A^{III}B^V$ наиболее часто используются GaAs и GaN, из твердых растворов – $Al_xGa_{1-x}As$. Использование твердых растворов позволяет создавать гетероструктуры с непрерывным, а не скачкообразным изменением состава и, соответственно, непрерывным изменением ширины запрещенной зоны. Для изготовления гетероструктур важно согласование (близость по величине) параметров кристаллической решетки двух контактирующих соединений (веществ). Если два слоя соединений с сильно различающимися постоянными решетки выращиваются один на другом, то при увеличении их толщины на границе раздела появляются большие деформации и возникают дислокации несоответствия. В связи с этим для изготовления гетероструктур часто используют твердые растворы системы AlAs–GaAs, так как арсениды алюминия и галлия имеют почти одинаковые параметры решетки. В этом случае монокристаллы GaAs являются идеальной подложкой для роста гетероструктур.

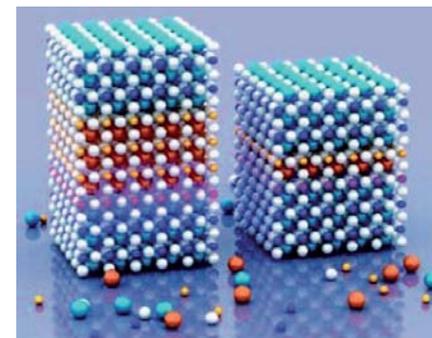


Рис. 1.2.13. Модель гетероструктуры

На **рис. 1.2.13** приведена модель такой структуры, которая может состоять из последовательности десятков слоев различных полупроводников, толщиной в несколько нанометров. Полупроводниковые гетероструктуры используются для создания ярких светодиодов, лазеров и других приборов современной электроники. Развитие нанотехнологий как научного направления фактически началось с момента получения и начала исследований первых гетероструктур. В 2000 году российский ученый Ж.И. Алферов получил Нобелевскую премию по физике за разработку технологий гетероструктур и создание на их основе полупроводникового лазера.

К важной группе материалов, широко используемых в быту и промышленности, относятся **пористые** материалы, которые характеризуются наличием большого количества пустоты в своем объеме. Эту пустоту называют порами. Численной характеристикой таких веществ является их пористость, которая определяется отношением объема пор $V_{пор}$ и объема материала V :

$$\rho = (V_{пор} / V) \cdot 100\%. \quad (1.10)$$

Для некоторых подобных материалов пористость достигает (80 – 90)%. В пористых материалах пустоты легко заполняются газом, водой или другой жидкостью. Поэтому пористые материалы применяют в качестве фильтров, сит, сорбентов. **СОРБЕНТЫ – это вещества, которые используются для поглощения различных химических элементов.** Примером широко используемого сорбента является активированный уголь.

Нанопористые материалы имеют размер пор, лежащий в пределах 1-100 нм. При уменьшении размеров пор у наноматериалов появляются новые способности к фильтрации и сорбции различных химических элементов. Одним из таких материалов является **ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ, который считается перспективным во многих областях электроники (например, для создания источников видимого излучения,** которые на чистом кремнии создать нельзя). Модель пористого кремния, полученного из монокристаллического кремния, представлена на **рис. 1.2.14.**

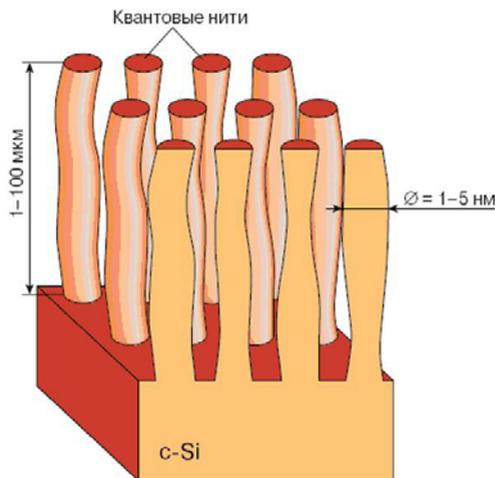


Рис. 1.2.14. Модельное представление пористого кремния

Во многих случаях различные пористые материалы, размер полостей которых лежит в нанометровом диапазоне, используют в качестве матрицы для создания **НАНОКОМПОЗИТОВ.** В эти поры можно вводить различные соединения и после химической обработки получать частицы искомого материала, размер и форма которых повторяют форму полостей матрицы, а ее стенки

предотвращают их агрегацию и защищают от воздействий внешней среды. В частности, большие перспективы применения в качестве сред для записи и хранения информации имеют **магнитные наноконкомпозиты,** получаемые в результате заполнения пор в немагнитной матрице магнитным материалом. На **рис.1.2.15** приведен поперечный разрез пленки пористого оксида алюминия, заполненного нанонитями металлического никеля.

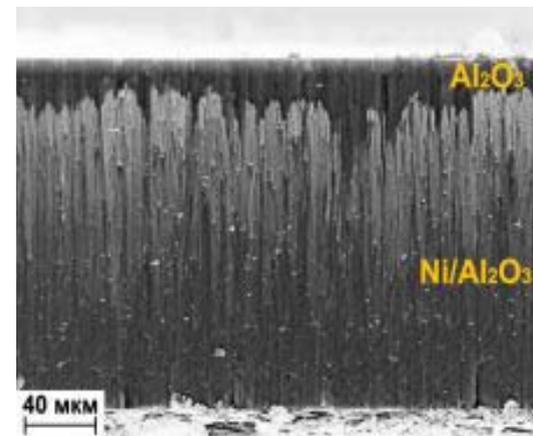


Рис.1.2.15. Схема наноконкомпозита на основе пористой немагнитной матрицы и магнитных нанонитей

НАНОФАЗНЫМИ называют материалы, составленные из одного или нескольких типов наночастиц. Примером такого однофазного материала является нанофазная медь. Чтобы ее изготовить, лист обычной меди нагревают до высокой температуры, при которой с его поверхности начинают испаряться атомы меди. С конвективным потоком эти атомы движутся к поверхности холодной трубки, на которой они осаждаются, образуя конгломераты наночастиц. Плотный слой наночастиц меди на поверхности холодной трубки и является нанофазной медью.

При достаточно большой нагрузке все материалы ломаются, а в месте излома соседние слои атомов навсегда отходят друг от друга. Однако прочность многих материалов зависит не от силы, которую надо приложить, чтобы отделить два соседних слоя атомов. Материал обычно рвется по внутренним трещинам, его прочность зависит от того, сколько в нём микротрещин и каких, как трещины распространяются по этому материалу. Распространению трещин часто мешает микроструктура твёрдого тела. Если тело состоит из микрокристаллов (например, металлы), то трещина, расколов надвое один из них, может наткнуться на внешнюю поверхность соседнего микрокристалла и остановиться. Поэтому чем меньше размер частиц, из которых сформирован материал, тем труднее по нему распространяются трещины. Материалы, у которых в качестве зерен выступают наночастицы, оказываются гораздо более прочными, чем материалы с большим разме-

ром зерна. Например, прочность образца нанофазной меди может в 10 раз превышать прочность обычной меди, состоящей, как правило, из кристаллических зерен размером 50 мкм.

Получение рассмотренных выше и других наноструктур является важной технологической проблемой. Отметим, что совмещение массового производства с атомной точностью формирования наноструктур возможно лишь в том случае, если в технологическом процессе существенную роль играют процессы самоорганизации и самосборки, т.е. нанотехнологии.

Контрольные вопросы и задания

1. Можно ли графит считать гетероструктурой, поскольку он состоит из графеновых плоскостей?
2. Что представляют из себя полупроводниковые гетероструктуры и где они используются?
3. Узнайте из Интернета, за какие научные достижения была присуждена Нобелевская премия российскому физику Ж. Алферову?
4. Какие полупроводники являются собственными, а какие относятся к типу $A^{III}B^V$. Какова структура межатомных связей в указанных полупроводниках?
5. Почему нанофазные металлы оказываются прочнее металлов с большим размером кристаллитов?

ГЛАВА 1.3. Методы получения и исследования наноструктур

В предыдущих главах мы познакомились с различными примерами наноструктур, с их применением в различных областях науки и техники. В этой главе мы рассмотрим основные принципы и часто применяемые методы получения и исследования нанообъектов. Как уже отмечалось, понятие «нанотехнологии» можно применить к достаточно большому классу процессов и явлений, в которых участвуют объекты с характерным размером 10^{-10} - 10^{-7} м. Количество разновидностей таких объектов огромно, и для каждого из них имеются свои особенности получения и обращения с ними. Поэтому к настоящему моменту известно большое число различных методов как создания наноструктур, так и их диагностики и исследования.

1.3.1. Общие характеристики физических методов

Методы получения наноструктур. Принципиально все современные методы получения наноструктур основаны на использовании твердофазного, жидкого, и газообразного состояний. Их условно можно разделить на два больших класса – физические и химические методы. К физическим методам относятся такие методы, как механическое или ультразвуковое измельчение твердого материала, распыление расплава металла при его вращении с очень большой угловой скоростью (более 300 об/с), вакуумное осаждение испаряемого материала на охлажденную подложку, лазерное импульсное испарение материала в вакууме или жидкости, электролиз. При этом наночастицы, синтезированные разными методами, могут иметь различную внутреннюю структуру, что оказывает существенное влияние на их свойства.

С другой стороны, перечисленные методы можно разделить на два принципиально различающихся подхода. **Первый – измельчение макроскопических тел до получения частиц с нужными размерами и свойствами, названный технологией «СВЕРХУ-ВНИЗ».** Второй – **выращивание наночастиц из отдельных атомов и молекул, названный технологией «СНИЗУ-ВВЕРХ».** Здесь «верхом» принято считать объекты обычных макроскопических размеров, а «низом» – отдельные атомы. Рассмотрим характерные особенности формирования наноструктур на основе двух указанных технологий.

Внедрение в мир наноразмеров, по которому в течение долгого времени шли изготовители электронных микросхем, является традиционным и его можно назвать дорогой «сверху-вниз». На этом пути используются технологии, хорошо зарекомендовавшие себя в макромире и основанные на уменьшении размера обрабатываемых объектов. Наиболее широко используемый в подобных технологиях метод получения ультрамелких частиц – это постепенное механическое **измельчение** или перемалывание материала в специальных шаровых мельницах. Методы измельчения могут быть самые разные. В частности, для некоторых материалов применяется измельчение ультразвуком. В этом случае мощный ультразвуковой импульс заставляет недостаточно измельченные частицы материала сталкиваться друг с другом с очень большой частотой и, тем самым, продолжать измельчаться до необходимых размеров. Эти методы сравнительно просты и дешевы. Однако, путем перемалывания тяжело получить однородные частицы с необходимыми свойствами, заданной формы и размеров. К этому же типу технологий относится и другой распространенный метод получения наночастиц – центробежный метод распыления расплава металла.

К нанотехнологиям «снизу-вверх» могут быть отнесены методы **вакуумного осаждения** материала на подложки. На начальной стадии осаждения на подложке происходит формирование nanoостровков напыляемого материала. Методы вакуумного осаждения имеют широкое промышленное использование для нанесения металлических пленок в технологиях микро- и нанoeлектроники. Они различаются по типу нагрева, под действием которого происходит испарение материала. Этими методами получают наноструктуры самой разнообразной формы, среди которых нанопровода и нанотрубки из различных материалов. Отметим также, что подход «снизу-вверх» в большей степени характерен для химических методов получения наночастиц.

Методы исследования наноструктур. Нанотехнологии – одно из самых современных и бурно развивающихся направлений исследований и разработок, охватывающее очень широкий спектр дисциплин: от молекулярной биологии и геной инженерии до физики поверхности твердого тела, электрохимии, микроэлектроники и т. д. Здесь оперируют величинами, сопоставимыми с размером молекул и атомов. Чтобы представить сложность проводимых операций, скажем, что толщина человеческого волоса приблизительно равна 30 мкм (или 3×10^4 нм). Очевидно, что для реализации ново-

го направления науки и технологий, где оперируют с объектами, размеры которых 1–100 нм, необходимы новые уникальные инструменты. Такие инструменты появились только в конце прошлого века, они получили название **сканирующих зондовых микроскопов.** Принцип их работы основывался не на «осматривании», как у оптических микроскопов, а на «ощупывании» изучаемой поверхности острой иглой-зондом (радиус кривизны острия может достигать 0,5 нм). Эти приборы могут применяться для изучения поверхностей твердого тела любых размеров и форм в широком интервале температур и давлений. Они обеспечивают высокое разрешение и создают широкие возможности изучения физических свойств различных поверхностей.

Развитие нанотехнологий требует также создания высокоразрешающих систем, способных распознавать молекулярный и атомный состав nanoэлементов. Это возможно лишь при создании комбинированных приборов, сочетающих в себе возможности высокоточного позиционирования, измерения топографических параметров и спектральных методов анализа. Исключительное значение имеет и создание методов быстрых воздействий на систему, которые способны управлять кинетикой структуры, а также инициировать направленные ее превращения.

Широкое внедрение нанотехнологических методов во многие сферы деятельности человека стало возможным только благодаря параллельному развитию вычислительной техники. Качественное усиление мощности персональных компьютеров создало предпосылки для интеллектуализации технологии. Уже сегодня совершенствование программных сред позволяет создавать сложные комплексы, в составе которых работает целый ряд независимо управляемых элементов. Дальнейшее развитие программного обеспечения существенно упростит использование нанотехнологического оборудования и обеспечит их проникновение в массовое производство.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем различие нанотехнологий «сверху-вниз» и «снизу-вверх»?
2. С помощью Интернета найдите материал по вакуумному напылению тонких металлических пленок. Для каких целей используется этот метод?
3. Какой смысл вкладывается в понятие «дифракционный предел» в оптической микроскопии? Какой минимальный размер может иметь объект, различимый в оптическом микроскопе?
4. Определите основной принцип «видения» nanoобъекта в сканирующих микроскопах.
5. Выясните из Интернета, что представляет собой игла сканирующего микроскопа, ее характерные размеры и из какого материала она делается.

1.3.2. Технологии «сверху-вниз»

В последние десятилетия характерный размер отдельных элементов полупроводниковых микросхем, из которых изготавливают процессоры, память и другие компоненты многочисленных электронных устройств, перешел рубеж 100 нм и неуклонно продолжает уменьшаться. В настоящее время в серийном производстве находятся изделия, многие электронные компоненты которых имеют размеры 32 и даже 25 нм. Поэтому такие производства по праву могут быть отнесены к нанотехнологиям. В настоящее время основным методом, с помощью которого на участке кремниевой пластины размером в несколько квадратных сантиметров размещается огромное количество отдельных транзисторов, соединенных в сложнейшую схему, является **фотолитография**.

Этот сложный технологический процесс состоит в следующем: на окисленную поверхность кремниевой пластины наносится слой **фоторезиста** – полимерного светочувствительного материала, который под действием теплового воздействия изменяет структуру поверхности, на которую он нанесен. Для создания на пластине необходимого рисунка предварительно изготавливается **фотошаблон** – стеклянная пластинка с рисунком элементов интегральной схемы. Для этого на стеклянной пластинке, покрытой слоем хрома и фоторезиста, лучом лазера наносят необходимый рисунок, после чего удаляют освещенные части фоторезиста вместе с хромом. В местах, где проходил луч лазера и происходило термическое воздействие, на стекле образуются непрозрачные участки, через которые в дальнейшем свет проникать не будет. Пример фотошаблона для получения интегральной схемы электронных часов приведен на **рис. 1.3.1**.

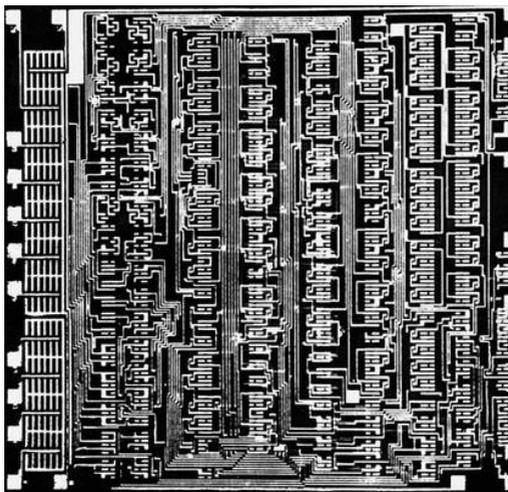


Рис. 1.3.1. Фотошаблон для интегральной схемы электронных часов

Готовый фотошаблон помещают в параллельный пучок ультрафиолетового света, который проходит через прозрачные участки фотошаблона. Прошедший свет фокусируется линзой и падает на поверхность кремниевой пластинки, покрытой тонким слоем фоторезиста, и засвечивает его. В результате, под прозрачными участками фотошаблона происходит изменение структуры поверхности, вызванное действием фоторезиста. Измененная фоторезистом часть поверхности может быть удалена вместе с фоторезистом с помощью **химического травления**, которое основано на растворении поверхности, изменившей свою структуру, специальными химическими веществами. Таким образом, можно светом создавать на поверхности кремниевых пластин достаточно сложные двумерные структуры бороздок (канавок), необходимых в дальнейшем для формирования различных электронных схем. Схема изготовления микросхем с использованием фотолитографии приведена на **рис. 1.3.2**.

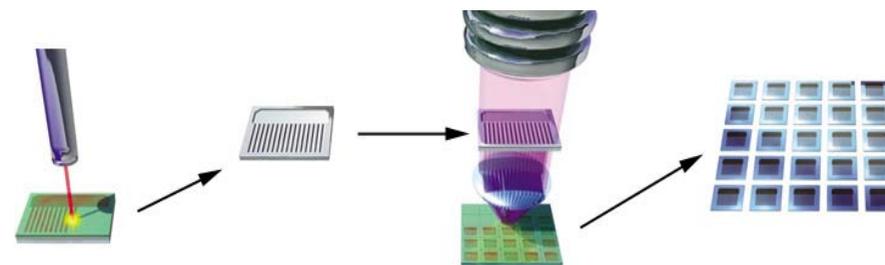


Рис. 1.3.2. Упрощенная схема процесса фотолитографии

Размеры первых транзисторов были порядка 1 см. Совершенствование фотолитографических методов позволило существенно уменьшить размер транзистора. Но основой фотолитографии является геометрическая оптика, а значит, с помощью этого метода невозможно провести две параллельные прямые на расстоянии, меньшем длины световой волны. Поэтому для того, чтобы нарисовать с помощью фотолитографии объект нанометрового размера, необходимо использовать источники дальнего ультрафиолетового излучения с длиной волны в несколько десятков нанометров. Однако, дальнейшее уменьшение длины волны сложно и дорого, поэтому для создания микросхем современные технологии уже используют электронные пучки.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте примеры технологии «сверху-вниз».
2. Назовите основные этапы технологического процесса получения фотолитографии. Каковы достоинства и недостатки у фотолитографии?
3. Какие устройства создают при помощи фотолитографии? Какой минимальный размер элементов можно получить на основе ультрафиолетовой фотолитографии с длиной волны $\lambda = 100$ нм?

3. Что Вы понимаете под словосочетанием «геометрическая оптика»? А какие разделы оптики еще существуют?
4. Почему лучом лазера можно выжигать на поверхности фоторезиста необходимый рисунок?

1.3.3. Технологии «снизу-вверх»

Но есть и другой путь создавать нанобъекты, который получил название технологий «снизу-вверх». В этих технологиях существенной является способность самих атомов и молекул самоорганизовываться в упорядоченные группы и структуры. Поэтому технология «снизу-вверх» сводится к получению наноразмерного объекта путем сборки из отдельных атомов и молекул. В большинстве технологий сборки наноматериалов из отдельных атомов лежат явления конденсации или кристаллизации.

КОНДЕНСАЦИЯ – переход вещества из газообразного состояния в жидкое или твёрдое вследствие его охлаждения или сжатия. Дождь, снег, роса, иней – все эти проявления природы представляют собой следствие конденсации водяного пара в атмосфере. Аналогично молекулам воды, можно «конденсировать» атомы и молекулы других химических элементов. Конденсация, как и обратный процесс – испарение, является примером фазовых превращений, т.е. перехода вещества из одного фазового состояния в другое. Процессы фазового превращения (из газа в жидкость или из жидкости в твердое вещество) протекают за определенное время. На начальной стадии такого процесса образуются наночастицы, которые затем перерастают в макроскопические объекты. Наночастицы можно получить, если «заморозить» фазовый переход на начальной стадии.

Обычно создаются условия, такие, чтобы необходимые для сборки наночастиц атомы присутствовали в жидкой или газовой фазе. После чего необходимо с учетом свойств используемых атомов и молекул подобрать такие методы воздействия, при которых наночастицы будут приобретать необходимые размеры, форму и химический состав. Этими методами могут быть различные электромагнитные излучения, магнитные и электрические поля, ударные волны и другие внешние воздействия. С помощью конденсации получают фуллерены, углеродные нанотрубки, нанокластеры и другие наночастицы различного размера. Управляемая конденсация атомов на поверхности кристалла (подложки) лежит в основе технологии эпитаксии.

ЭПИТАКСИЯ – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого. Эпитаксию необходимых атомов на поверхность кристалла можно производить как из жидкой, так и газовой фазы. Процесс эпитаксии обычно начинается с возникновения на подложке отдельных кристалликов, которые, срастаясь друг с другом, образуют сплошную плёнку. Современные методы эпитаксии позволяют наращивать слои толщиной всего в несколько атомов, а

также последовательно наращивать слои с различными физико-химическими свойствами. Самым современным методом осуществления процесса эпитаксии является **молекулярно-лучевая эпитаксия**. При этом методе на подготовленную и очищенную подложку направляются потоки отдельных атомов. Скорость потока каждого сорта атомов регулируется независимо. На **рис. 1.3.3** приведена схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии (а) и процесс эпитаксиального роста пленки тройного соединения GaAlAs (б). Достигая поверхности подложки, атомы упорядочиваются, образуя необходимые нам структуры.

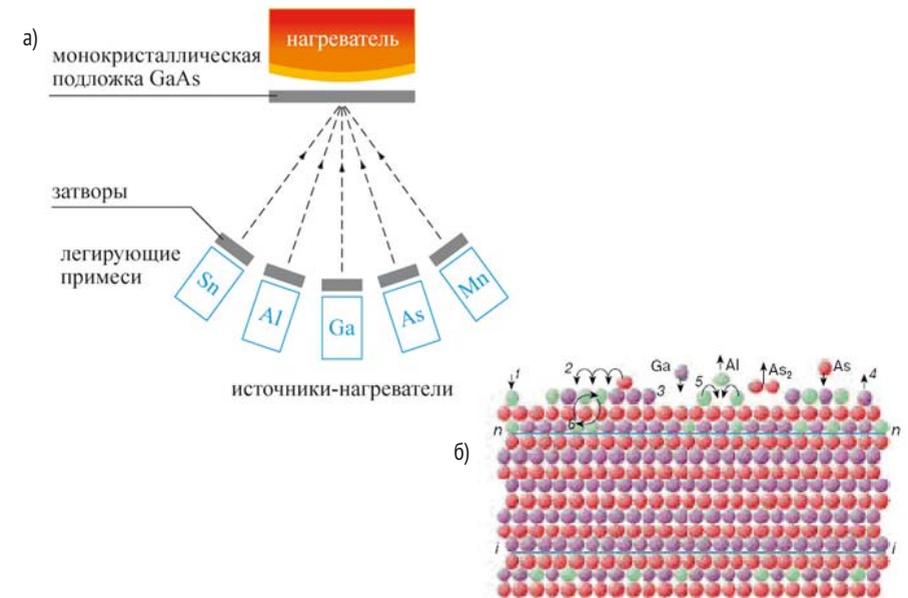


Рис. 1.3.3. Схема установки для молекулярно-лучевой эпитаксии (а) и процесс эпитаксиального роста пленки GaAlAs (б)

Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит смысл методики создания нанобъектов, получившей название технологии «снизу-вверх»?
2. Назовите примеры технологии «снизу-вверх».
3. Какой физический смысл вкладывается в понятие фазового перехода? Какие фазовые переходы Вы знаете?
4. В чем состоит основное различие процессов конденсации и эпитаксиального роста вещества? Участвуют ли механизмы самоорганизации в формировании структур в процессе эпитаксии?
5. Найдите в Интернете материал по молекулярно-лучевой эпитаксии и структурам, получаемым этим методом. Каковы особенности этой технологии получения наноструктур?

1.3.4. Самоорганизация и самосборка в нанотехнологиях

Человека всегда интересовали следующие вопросы: как из отдельных атомов и молекул возникают сложные организмы и системы, каким образом на Земле возникли первые живые существа? Для ответа на них нужно понять принципы возникновения более сложного из простого.

Процесс возникновения сложных упорядоченных структур из более простых называется САМООРГАНИЗАЦИЕЙ. В физике и химии самоорганизация представляет собой переход от неупорядоченного движения атомов и молекул к упорядоченным структурам. *Науку о самоорганизующихся системах называют СИНЕРГЕТИКОЙ, главная идея которой – принципиальная возможность спонтанного возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса самоорганизации.* Методы синергетики в настоящее время используются практически во всех научных дисциплинах: от физики и химии до социологии и филологии.

Самоорганизация – одно из наиболее удивительных явлений природы. В природе известно много самоорганизующихся систем. В качестве примера можно привести строительство шестиугольных сот у пчел (рис. 1.3.4), коллективное поведение муравьев и т.д.



Рис. 1.3.4. Пчелиные соты (фото)

Классическим примером возникновения пространственной упорядоченной структуры является возникновение ячеек Бенара (рис. 1.3.5). В 1900 году появилась научная статья этого автора с фотографией структуры, напоминающей пчелиные соты. Данная структура возникла в широком плоском сосуде, наполненном ртутью и подогреваемом снизу. В слое ртути (или другой вязкой жидкости) при разогреве возникает разница температур между нижней и верхней поверхностью. При достижении некоторого критического значения разницы температур в слое ртути можно наблюдать образование одинаковых шестигранных призм. В центральной части такой призмы разогретая снизу жидкость поднимается вверх, а по граням охлажденная жидкость опускается

вниз. Такая структура поддерживается за счет неоднородности распределения температуры по толщине слоя жидкости. Неоднородность температуры создается притоком энергии (разогревом) с нижней стороны слоя жидкости и оттоком энергии с верхней поверхности слоя.

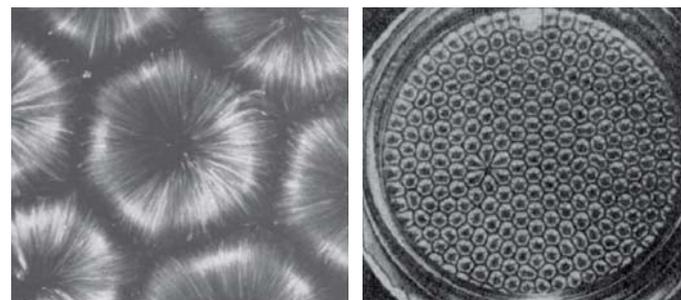


Рис. 1.3.5. Ячейки Бенара

Среди различных перспективных подходов формирования наноструктур все большее значение приобретают нанотехнологии, использующие самоорганизацию. Предполагается, что самоорганизация позволит создавать наноструктуры из отдельных атомов как вышеупомянутая технология «снизу-вверх». Одна из важнейших проблем, стоящих перед нанотехнологией – заставить молекулы группироваться определенным способом, самоорганизовываться, чтобы в итоге получить новые материалы или устройства.

Какие наноструктуры можно строить, используя данные технологии? Могут ли они образовываться в процессе самоорганизации? Если могут, то это позволит создавать устройства, формируя их из атомов и молекул, используя процессы самоорганизации так, как их использует природа. В природе действительно существуют подобные системы и осуществляются подобные процессы. Ярким примером самосборки является образование сложнейших биологических объектов на основе информации, записанной в ДНК (пример самосборки биологического объекта изображен на рис. 1.3.6).

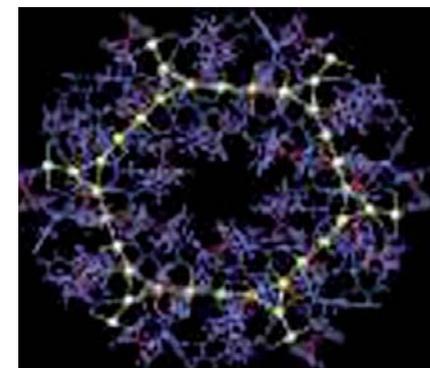


Рис. 1.3.6. Пример самосборки в биологии

Обладая технологиями «сверху-вниз», для изготовления, например, мотка мы брали кусок железа необходимого объема и убирали все лишнее. Нанотехнология же в ближайшем будущем позволит делать изделия из материалов с «нуля», причем не всегда будет нужно складывать атом к атому «вручную», а можно будет использовать явление самоорганизации, самосборки наноструктур и наноустройств. При этом достаточно трудно ожидать, что на наноуровне возможна искусственная манипуляция отдельными нанообъектами с целью «ручной» сборки материала. Это пока что нецелесообразно (медленно и требует выполнения большого объема работы). При определенных условиях микро- или нанообъекты сами начинают выстраиваться в виде упорядоченных структур. Поэтому естественным способом получения наноматериалов должна стать самоорганизация. При этом нам не нужно выстраивать требуемую структуру вручную, помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим, нанообъекты делают это сами и одновременно. Подобные процессы называются самосборкой, она уже сейчас играет важнейшую роль во многих областях науки и техники.

Многие знают игру в бильярд и укладку шаров в «пирамиду» – в замкнутом объеме шары сами складываются в равносторонний треугольник, причем одним способом. Если же их высыпать в большой ящик и немного потрясти, то они самопроизвольно образуют практически идеально упорядоченную структуру. В некоторых случаях атомы одного сорта также можно рассматривать в виде однородных по размеру шаров, которые аналогичным образом упорядочиваются в ограниченном объеме. Аналогично бильярдным шарам, наночастицы способны самопроизвольно укладываться на поверхности твердых тел. Основными причинами такого «слипания» наночастиц являются различные межмолекулярные силы, которые стремятся уменьшить общую площадь поверхности наночастиц и, следовательно, их поверхностную энергию.

Впервые упорядоченные массивы наночастиц золота диаметром ~4 нм были получены в 1995 году, а двумя месяцами позже удалось «уложить» монокристаллы селенида кадмия размером 5 нм. Чем однороднее исходные наночастицы, тем «правильнее» оказывается их упаковка в массиве. На сегодняшний день синтезированы двумерные и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, сплавов Fe-Pt, Au-Ag, наноструктур CdS/CdSe, CdSe/CdTe, Pt/Fe, Pd/Ni. Кроме того, для анизотропных наночастиц удалось добиться формирования ориентационно-упорядоченных массивов. Однородные по размеру наночастицы можно «собрать» в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные «нитки», двумерные плотно упакованные слои, трехмерные массивы или «малые» кластеры. Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы внешнего воздействия. Сегодня известны различные методы самосборки, позволяющие получать полезные упорядоченные структуры из микрочастиц. Для создания

особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поля, капиллярные силы, «игра» на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы. В настоящее время процессы самосборки начинают активно использоваться и в производстве. Все чаще процессы самосборки внедряются для создания компьютерных чипов нового поколения.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие известны Вам процессы самоорганизации? Какова роль этих процессов в нанотехнологиях?
2. Дайте основные характеристики науки «синергетика». Поведение каких систем может быть описано с помощью этой науки?
3. К какому типу нанотехнологий относится самосборка? Приведите примеры этого процесса из биологии и нанотехнологий.
4. Какие факторы могут влиять на процессы самосборки?

1.3.5. Электронная микроскопия

Минимальный размер объектов, доступный человеческому глазу, на расстоянии наилучшего зрения 25 см составляет величину порядка 0,1 мм. Для изучения более мелких объектов применяются различные оптические приборы – как простейшие, например лупа, так и более сложные, состоящие из нескольких линз – оптические микроскопы. Современные оптические микроскопы дают увеличение в 1500 раз, это означает, что с их помощью можно различать объекты размером порядка 10^{-7} м, т. е. в сотни нанометров.

На пути дальнейшего увеличения разрешающей способности оптических микроскопов возникают трудности принципиального характера. Дело здесь в существовании так называемого **дифракционного предела разрешения** (установленного Рэлеем в семидесятых годах XIX века), в соответствии с которым нельзя различить объекты, расстояние между которыми меньше величины

$$d = 0.61\lambda / n$$

где λ – длина световой волны, а n – показатель преломления среды.

Как уже отмечалось, оптический диапазон (т.е. видимый глазом свет) простирается от 400 (фиолетовый) до 760 нм (красный). Таким образом, даже теоретически при помощи самого сильного оптического микроскопа нельзя рассмотреть объекты меньше 200 нм. Это означает, что атомы и многие молекулы, размеры которых не превышают одного нанометра, оптическому микроскопу уже недоступны. Естественным выходом в данной ситуации представляется уменьшение длины волны излучения. Причем для того,

чтобы при помощи такого микроскопа можно было различать отдельные атомы, длину волны излучения придётся уменьшить в тысячу раз.

В тридцатые годы XX века была предложена схема микроскопа, использующего для построения изображения вместо световой волны поток электронов. Изобретение электронного микроскопа стало возможным вследствие бурного развития квантовой механики в начале века, когда было установлено, что все частицы микромира обладают свойствами как частицы, так и волны. Как оказалось, электронам свойственны интерференция, дифракция и другие свойства, которые, как считалось, присущи только волнам. В то же время электроны – это заряженные частицы, движением которых легко управлять при помощи электрического и магнитного поля; электронные пучки отклоняются электрическими и магнитными полями примерно так же, как световые лучи – оптическими линзами. Поэтому **в электронном микроскопе устройства фокусировки и рассеивания электронного пучка называют ЭЛЕКТРОННЫМИ ЛИНЗАМИ.**

Схема электронного микроскопа, во многом, аналогична схеме оптического микроскопа. Она включает электронную пушку, испускающую поток электронов, систему электрических или магнитных линз, фокусирующих поток электронов на исследуемом предмете, систему преобразования в видимое изображение сигнала, полученного при взаимодействии потока электронов с исследуемым предметом. На **рис. 1.3.7** приведена схема современного **просвечивающего электронного микроскопа**. В таких микроскопах источником электронов чаще всего является нагретая вольфрамовая нить – основной элемент электронной пушки. Испускаемые электроны проходят через электростатическую линзу-конденсор, регулирующую интенсивность электронного потока, после чего попадают на поверхность исследуемого образца. Затем прошедшие через исследуемый образец электроны проецируются на люминесцентный экран, позволяющий преобразовать «электронную тень» в обычное изображение, которое можно сфотографировать или же наблюдать непосредственно. Разрешающая способность просвечивающих микроскопов достигает 0,2 нм, что даёт возможность получать изображения отдельных атомов и молекул. К недостаткам этого прибора необходимо отнести следующие его принципиальные особенности. Поскольку электронный поток сильно поглощается веществом, то внутри установки должен быть создан вакуум. По этой же причине исследуемый образец должен быть очень тонким (порядка 100 нм), и его изготовление является достаточно сложной задачей. От последнего недостатка свободен **сканирующий электронный микроскоп**. Его конструкция имеет много общего с конструкцией просвечивающего микроскопа. Принципиальное отличие заключается в том, что электронный пучок освещает не всю поверхность исследуемого предмета, а фокусируется в определённой его точке, которая при помощи отклоняющей системы перемещается по поверхности, сканируя её. Разрешающая способность этих микроскопов достигает в настоящее время величины 0,5 нм. На **рис. 1.3.8** приведена микрофотография наночастиц CeO_2 , полученная при помощи электронного сканирующего микроскопа.

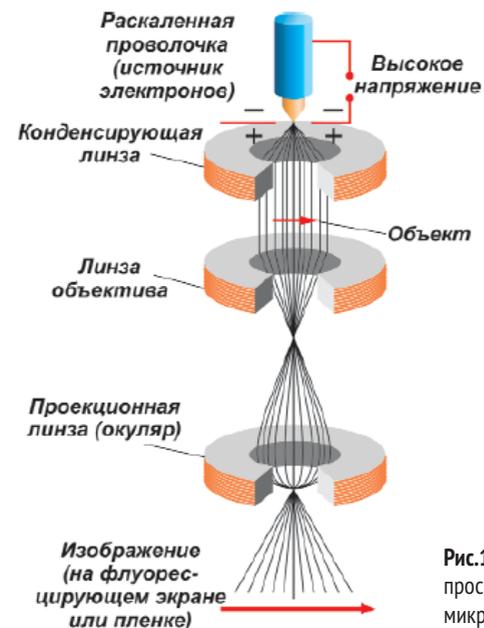


Рис.1.3.7. Схема работы просвечивающего электронного микроскопа

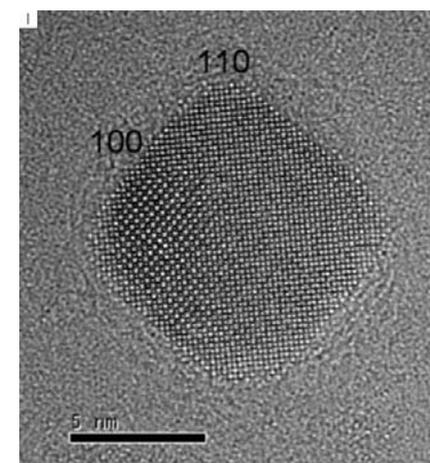


Рис. 1.3.8. Микрофотография наночастиц CeO_2

Контрольные вопросы и задания

1. Каков дифракционный предел разрешения оптического микроскопа с $l = 500$ нм?
2. Чем обусловлен предел разрешения электронного микроскопа?

3. Опишите принцип действия просвечивающего электронного микроскопа. Возможен ли просвечивающий ионный микроскоп?
4. Дайте характеристику принципиальных особенностей сканирующего электронного микроскопа.
5. Каковы достоинства и недостатки электронной микроскопии?
6. Какова длина волны электрона в сканирующем электронном микроскопе, если его разрешающая способность порядка 0,1 нм?

1.3.6. Сканирующая туннельная микроскопия

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) был первым устройством, давшим реальные изображения поверхностей с атомным разрешением. СТМ исторически является предшественником всех сканирующих зондовых микроскопов. Принцип его действия заключается в измерении туннельного тока, возникающего между зондом и образцом. Известно, что электрический ток может возникать в различных средах и иметь различную природу. Это может быть направленное движение ионов в электролите, поток заряженных частиц в ускорителе, электрический ток в проводниках. Туннельный ток между зондом и образцом возникает, если приложить напряжение, несколько меньшее, чем нужно для отрыва электронов с поверхности образца. В силу законов квантовой механики, главная особенность туннельного тока – его экспоненциальная зависимость от расстояния между поверхностью образца и зондом. С уменьшением этого расстояния туннельный ток резко возрастает (об этом будет идти речь во второй части настоящего курса). Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния придает СТМ очень высокую чувствительность. Именно благодаря своей чрезвычайно высокой чувствительности, СТМ способен формировать изображения поверхностей с точностью до сотых долей нанометра по вертикали и с точностью до размеров атомов по горизонтали.

Технически работа СТМ происходит следующим образом. Между острием иглы и образцом прикладывается рабочее напряжение порядка 1 В. При подводе острия к образцу примерно на 0,5-1,0 нм электроны с образца начинают «туннелировать» через зазор к острию. Игла движется над поверхностью и сканирует образец. На основании данных о величине тока в каждой точке восстанавливается рельеф поверхности с поатомным ее изображением (рис. 1.3.9).

Чтобы обеспечить протекание тока, образец и острие должны быть проводниками или полупроводниками. Изображений диэлектриков СТМ дать не может. Остановившись на физических принципах, положенных в основу работы СТМ, отметим, что процесс туннелирования электронов происходит при перекрытии волновых функций атомов острия сканирующей иглы и исследуемой поверхности (о волновых функциях и туннельном эффекте будет

идти речь в следующей главе). Туннельный ток экспоненциально спадает с увеличением расстояния между иглой и поверхностью, т.е. $I(z) \approx I_0 \exp(-\alpha z)$, где I_0 – ток в отсутствие зазора (при $z = 0$), а параметр α связан с высотой потенциального барьера (т.е. разностью потенциалов между иглой и поверхностью). При типичной высоте потенциального барьера $eU \approx 4$ эВ туннельный ток снижается на порядок, если высота зазора z увеличивается на 0,1 нм. Это является причиной того, что острие туннельного микроскопа обычно должно находиться близко к образцу, а именно на расстоянии 0,5 – 1 нм. Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния придает СТМ очень высокую чувствительность. Считается, что с помощью туннелирования можно измерять объекты порядка 10^{-3} нм.

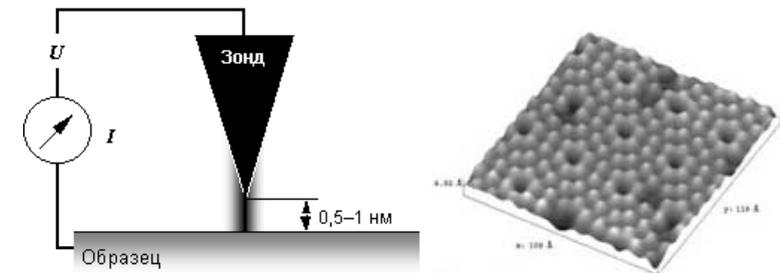


Рис. 1.3.9. Схема сканирующего туннельного микроскопа и поатомное изображение поверхности монокристаллического кремния

Измерение туннельного тока в процессе работы СТМ можно проводить в двух режимах, в соответствии с которыми для исследования поверхности различных материалов на практике применяются две методики (рис. 1.3.10). **В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ** острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется. Исходя из данных о величине туннельного тока, измеренного в каждой точке сканирования поверхности образца, восстанавливается рельеф поверхности. **В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА** используется система обратной связи для поддержания постоянного тока путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой точке. Например, когда система детектирует увеличение туннельного тока, то она так подстраивает напряжение, прикладываемое к пьезоэлектрическому сканирующему устройству, чтобы отвести острие дальше от образца. В режиме постоянного тока визуализация рельефа поверхности осуществляется на основании данных о величине вертикальных перемещений зонда.

У каждого режима есть свои преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты более быстрый, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх и вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких поверхностей. В режиме

постоянного тока можно с высокой точностью измерять нерегулярные поверхности, но измерения занимают больше времени. Качество получаемого снимка рельефа исследуемой поверхности и разрешающая способность СТМ существенно зависят от качества иглы и радиуса ее острия. Промышленные зонды имеют радиус острия иглы, равный размеру нескольких атомов.

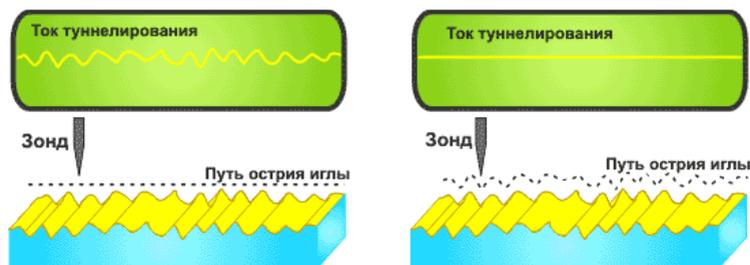


Рис. 1.3.10. Схема работы СТМ в режимах постоянной высоты (слева) и постоянного тока (справа)

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается принцип действия СТМ?
2. Чем определяется высокая чувствительность СТМ?
3. Укажите особенности работы СТМ в режимах постоянного тока и постоянной высоты.
4. Поверхности каких материалов могут исследоваться с помощью СТМ?

1.3.7 Атомно-силовая микроскопия

Вскоре после изобретения сканирующего туннельного микроскопа был разработан новый тип микроскопа, который авторы назвали **атомно-силовым микроскопом** (АСМ). Он также является зондовым микроскопом, но измеряемой величиной при сканировании поверхности является не туннельный ток, а непосредственно сила взаимодействия острия иглы и поверхности образца. На рис. 1.3.11 схематично показано изменение силы взаимодействия атомов при изменении расстояния между ними.

Опуская подробности, работу АСМ можно описать следующим образом: по мере приближения иглы к поверхности атомы иглы начинают все сильнее притягиваться к атомам образца. Сила притяжения будет возрастать до тех пор, пока атомы не сблизятся настолько, что их электронные оболочки начнут отталкиваться. При дальнейшем уменьшении межатомного расстояния электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются при расстоянии между атомами поверхности и иглы порядка двух ангстрем.

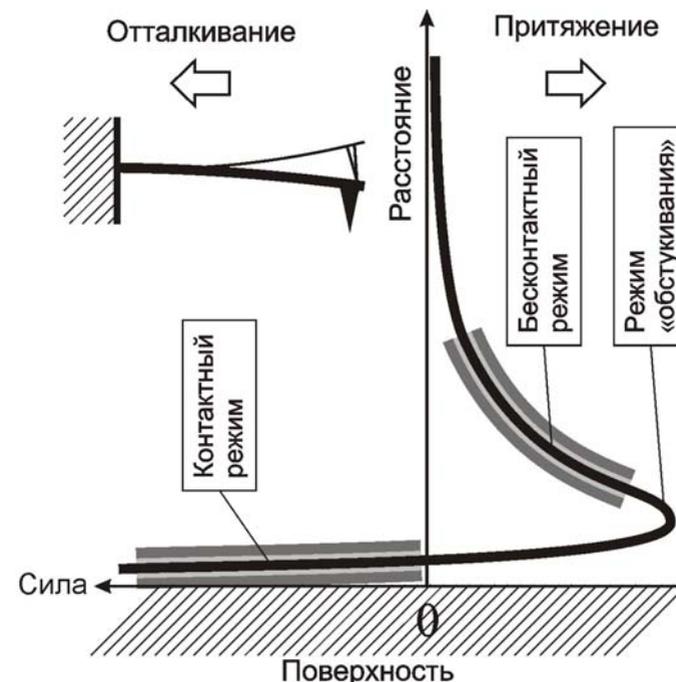


Рис. 1.3.11. Кривая зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом

Основным измерительным инструментом АСМ является тонкая консоль, или КАНТИЛЕВЕР (cantilever) с закрепленным на конце зондом. С помощью лазерных датчиков изгиб консоли и отклонение зонда измеряются с очень высокой точностью (до 0.1 нм). Затем по известной жесткости консоли вычисляется сила взаимодействия зонда с поверхностью образца. На рис. 1.3.12 показан зонд кантилевера при различных увеличениях.

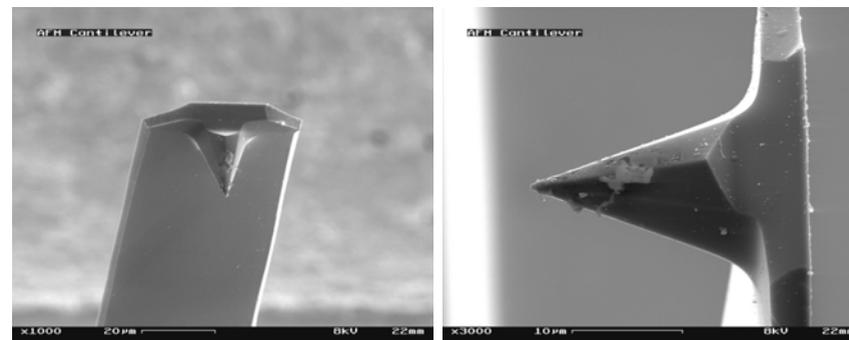


Рис. 1.3.12. Кантилевер с зондом при различных увеличениях.

В зависимости от типа взаимодействия зонда кантилевера с атомами поверхности, АСМ может работать в одном из следующих трех режимов.

В **контактном режиме** зонд прижимается к образцу и его отклонение вызвано взаимным отталкиванием атомов острия иглы и поверхности в результате перекрывания их электронных оболочек и кулоновского отталкивания ядер. Этот режим соответствует области отталкивания на графике межатомных сил.

В **бесконтактном режиме** АСМ отслеживает слабые притягивающие силы между острием сканирующей иглы и образцом. Зазор между острием и образцом обычно составляет 5-10 нм. Этот режим соответствует области притяжения на графике межатомных сил.

Промежуточное положение между контактными и бесконтактными режимами занимает режим периодического кратковременного контакта иглы с поверхностью в процессе сканирования, который получил название **режима «обстукивания»**. В этом режиме консоль колеблется на собственной резонансной частоте с высокой амплитудой порядка 50-100 нм. При таких амплитудах игла соприкасается с поверхностью в момент максимального отклонения консоли вниз от положения равновесия, что существенно изменяет частоту, фазу и амплитуду ее колебаний. Режим «обстукивания» характеризуется более высоким разрешением в горизонтальной плоскости по сравнению с контактными режимами.

Новый микроскоп позволил обойти ограничения своих предшественников. С его помощью можно получать изображения поверхности как проводящих, так и непроводящих материалов с атомарным разрешением, причем в атмосферных условиях. Дополнительным преимуществом АСМ является возможность, наряду с измерениями рельефа поверхностей, визуализировать их электрические, магнитные, упругие и другие свойства. Перечисленные выше методы в настоящее время широко используются для контроля технологических процессов, связанных с лабораторным и промышленным производством наноструктур.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким участкам на кривой зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом отвечают силы отталкивания и притяжения?
2. Какой смысл Вы вкладываете в понятия «короткодействующие» и «дальнодействующие» силы? Приведите примеры этих сил.
3. Какие различия между туннельным и атомно-силовым микроскопами Вы можете указать?
4. Сравните разрешение в атомно-силовой и туннельной микроскопии. Где оно лучше и почему?
5. Укажите на особенности конструкции кантилевера. Каковы его функции?

ЧАСТЬ 2. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О НАНОСТРУКТУРАХ

ГЛАВА 2.1.

Квантовая физика и наноструктуры

Уникальность нанообъектов во многом определяется тем, что при размерах 100 нм и менее становятся существенными их волновые свойства, которые следуют из квантовых представлений о поведении частиц. Классическая физика рассматривает частицы и волны как различные компоненты «физической реальности», воспринимаемой нашими органами чувств. Механика частиц и волновая оптика традиционно считаются самостоятельными и не перекрывающимися разделами физики, основанными на своих фундаментальных законах. Но воспринимаемая нами в повседневности физическая реальность обусловлена явлениями, которые происходят в макромире. Так, прохождение электромагнитных волн через препятствия объясняется интерференцией и дифракцией, хорошо изученными волновыми явлениями. Электроны мы считаем частицами, поскольку они обладают зарядом и массой, их поведение в электронно-лучевой трубке, кинескопе телевизора и других электронно-вакуумных приборах достаточно хорошо описывается законами классической механики. Между тем, физическая реальность в микромире электронов и ядер, атомов и молекул входит в противоречие с нашим повседневным опытом восприятия и объяснения физических процессов и явлений. По мере развития физики микромира появляется все большее количество фактов, указывающих на то, что электромагнитные волны ведут себя как поток частиц, а движущиеся электроны проявляют волновые свойства.

2.1.1. Электромагнитные волны

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ (ЭМВ) представляют собой распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью $v = c/n$ колебания двух перпендикулярных векторов – напряженностей электрического E и магнитного H полей (рис. 2.1.1). Здесь $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды, заполняющей пространство. Основными па-

раметрами ЭМВ являются частота ν и длина волны λ . Частота волны связана с ее периодом соотношением $\nu = 1/T$ и измеряется в Гц = 1/с. Полезно помнить, что кГц = 10^3 Гц, МГц = 10^6 Гц, ГГц = 10^9 Гц. При теоретическом анализе более удобно использовать круговую частоту ω , которая связана с частотой ν соотношением $\omega = 2\pi\nu$. При этом единицей измерения круговой частоты является обратная секунда (c^{-1}). Длина волны – это путь, который волна проходит за один период, т.е. $\lambda = \nu \cdot T$. Математическое выражение для электрического поля плоской монохроматической волны, распространяющейся вдоль оси x , имеет вид:

$$\mathbf{E}(t, x) = \mathbf{E}_m \cos(\omega t - kx) = \mathbf{E}_m \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right], \quad (2.1)$$

где \mathbf{E}_m – амплитуда электрического поля, $\omega = 2\pi/T$, а $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Для магнитного поля волны справедливо аналогичное выражение. Существование электромагнитных волн в 1832 году предсказал английский физик Майкл Фарадей. Другой английский ученый – Джордж Максвелл в 1865 году ввел систему уравнений классической электродинамики (**уравнения Максвелла**), которые явились теоретическим обоснованием существования ЭМВ. Они позволили на основе единого подхода проводить описание различных типов электромагнитного излучения – радио-, высокочастотного, инфракрасного, видимого и других диапазонов. Оказалось, что все виды электромагнитного излучения родственны по своей природе, так как представляют собой ЭМВ с различной длиной волны. При распространении в различных средах ЭМВ могут испытывать преломление и отражение, интерференцию и дифракцию, поглощение и рассеяние, что присуще и другим волновым процессам.

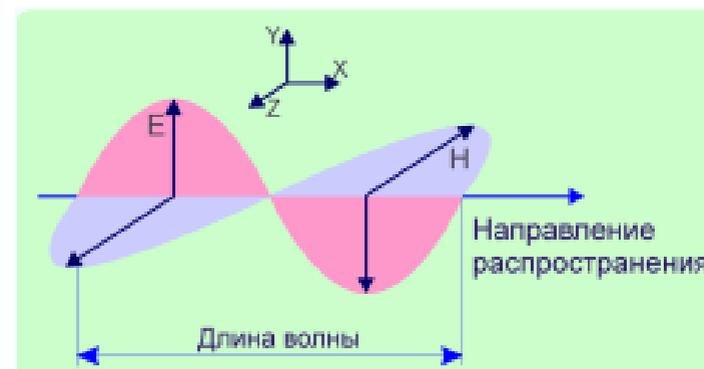


Рис. 2.1.1. Структура электромагнитной волны

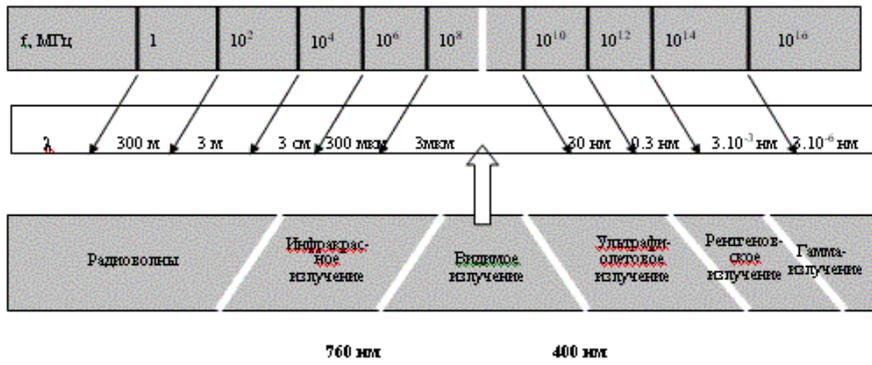


Рис. 2.1.2. Шкала электромагнитных волн

Каждое из различных видов излучения имеет своё определённое место в единой шкале ЭМВ (рис. 2.1.2). Излучение различных диапазонов длин волн характеризуется различными способами возбуждения и регистрации, по-разному взаимодействуют с веществом. Процессы излучения и поглощения ЭМВ от самых длинных волн до волн инфракрасного диапазона достаточно полно описываются соотношениями классической электродинамики. В диапазонах более коротких длин волн, в особенности в диапазонах рентгеновских и γ -лучей, доминируют процессы, имеющие квантовую природу. Эти процессы могут быть описаны только в рамках квантовой электродинамики на основе представлений о дискретности этих процессов.

Контрольные вопросы и задания

1. Электромагнитная волна, распространяющаяся в свободном пространстве, является поперечной. Что это означает?
2. После вспышки молнии гром прогремел через пять секунд. На каком расстоянии от наблюдателя произошел грозовой разряд?
3. В какой среде пройдет большее расстояние за один период электромагнитная волна заданной частоты – в вакууме или в воде?
4. Какие основные физические явления указывают на волновую природу света и в чем их суть?
5. Что такое поляризация электромагнитной волны? Дайте характеристику основных типов поляризации электромагнитных волн.
6. Какая световая волна пройдет за один период большее расстояние – относящаяся к «зеленой» или «красной» области видимого диапазона? Какое расстояние пройдут эти волны за одну наносекунду в вакууме и в воде?

2.1.2. Квантовые свойства излучения, фотоны

Впервые проблема непригодности классических представлений встала перед физиками при объяснении энергетического спектра излучения нагретых тел. Нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называется тепловым, в него переходит часть внутренней энергии, которая накапливается телом в результате подвода к нему энергии извне. Многочисленные исследования этого излучения показали, что его спектр является непрерывным, и частоты этого излучения принадлежат всему диапазону электромагнитных волн. Распределение энергии теплового излучения по различным частотам существенно зависит от температуры излучающего тела. С ее увеличением максимум этого распределения смещается в область более высоких частот, а энергия, излучаемая телом во всем спектральном диапазоне, увеличивается. Так, находящиеся при комнатной температуре тела максимальное количество энергии излучают в невидимой инфракрасной области спектра (вблизи длины волны $\lambda \approx 10$ мкм). Для поверхности Солнца, имеющей температуру $T \approx 6000$ К, максимум излучения приходится на область видимого спектра ($\lambda \approx 0,5$ мкм); при ядерном взрыве в его начальный момент достигаются температуры $T \sim 10^7$ К, поэтому большая доля энергии взрыва уносится жестким рентгеновским излучением ($\lambda \sim 10^{-10}$ м).

Распределение энергии теплового излучения по частотам ω характеризуют функцией u_ω с размерностью Дж/м³·с⁻¹. Эта величина определяет энергию теплового излучения, которая приходится на единицу объема и на единичный интервал частот (круговая частота ω имеет размерность с⁻¹). Величина $u_\omega \Delta\omega$ определяет энергию излучения, приходящуюся на единицу объема и интервал частот $\Delta\omega$. Так как эта функция описывает распределение энергии электромагнитного поля по частотам, то долгое время считалось, что ее можно построить на основе классических представлений. Однако все попытки такого построения не привели к положительному результату. Действительно, согласно классическому подходу к данной проблеме функция u_ω пропорциональна квадрату частоты и имеет вид

$$u_\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} k_B T, \quad (2.2)$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Но из выражения (2.2) следует, что при заданной температуре тела с ростом частоты растет и энергия его излучения (рис. 2.1.3, кривая 1), что указывает на несостоятельность классического подхода. Это означает, что нагретое тело практически всю свою энергию должно излучить на высоких частотах, т.е. в ультрафиолетовой

области. Этот факт противоречит данным эксперимента и повседневному опыту, поэтому указанная ситуация в физике была названа «ультрафиолетовой катастрофой».

Днем рождения квантовой физики можно считать 14 декабря 1900 года, когда Макс Планк в докладе, посвященном проблеме излучения нагретых тел, сообщил, что ему удалось решить эту проблему на основе довольно необычного с точки зрения классической физики предположения о квантовом характере излучения. **Планк предположил, что нагретое тело представляет собой систему одинаковых атомных ОСЦИЛЛЯТОРОВ (колеблющихся атомов), которые излучают энергию не непрерывно, а конечными порциями – КВАНТАМИ.** Энергия каждого осциллятора кратна минимально возможному для данной частоты излучения кванту энергии ε , т.е. $E_n = n \cdot \varepsilon$, где n – целое (квантовое) число. Минимальная порция энергии пропорциональна частоте $\varepsilon = \hbar\omega$, где $\hbar = h/2\pi$. Величина $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж·с в дальнейшем получила название постоянной Планка (такое же название имеет и величина \hbar , которая более удобна при теоретическом анализе различных вопросов квантовой физики).

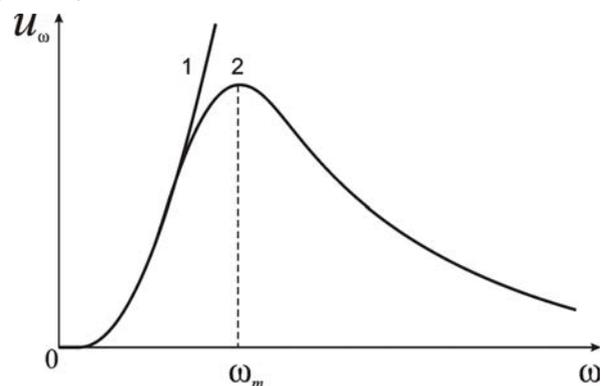


Рис. 2.1.3. Зависимость спектральной плотности теплового излучения нагретого тела от частоты

После проведения суммирования излучаемой энергии по всем осцилляторам, Планку на основе указанного подхода удалось получить формулу для функции u_ω , которая оказалась в полном согласии с экспериментом во всем спектральном диапазоне теплового излучения (рис. 2.1.3, кривая 2). При достаточно малых частотах, когда энергия кванта $\hbar\omega$ значительно меньше энергии тепловых колебаний осциллятора $k_b T$, полученная Планком кривая 2 совпадает с классической кривой 1. На высоких частотах, как и при стремлении частоты к нулю, функция $u_\omega \rightarrow 0$. Хотя выведенная Планком формула удивила и поразила его коллег – физиков, принятые им квантовые допущения долгое время для многих оставались непонятными, так как противоречили классической физике. Тем не менее, **именно слово «квант» дало название новому ее**

разделу – КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ, которая стала основой развивающихся атомной и ядерной физики, микро- и нанoeлектроники.

В 1905 году, основываясь на выдвинутой Планком идее квантования, Альберт Эйнштейн предположил, что квантовые свойства света (электромагнитного излучения видимого диапазона) проявляются не только при испускании, но и в процессе его распространения и поглощения веществом. **Согласно этой гипотезе, свет можно представить в виде потока частиц, получивших название ФОТОНОВ. Фотоны не могут находиться в состоянии покоя и движутся со скоростью света.** При этом фотоны обладают энергией, которая дается выражением

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega = 2\pi\hbar c / \lambda . \quad (2.3)$$

Если фотон испытывает абсолютно неупругий удар при столкновении с поверхностью или с другой частицей, то он просто исчезает, передавая всю свою энергию объекту, с которым сталкивается.

Для фотона, как и для любой материальной частицы, можно определить массу. Так как фотон имеет скорость c , то масса покоя фотона должна быть равна нулю. Используя известную формулу Эйнштейна $E = mc^2$, определяющую связь полной энергии частицы с ее массой, для фотона можно записать $mc^2 = \hbar\omega$, откуда $m = \hbar\omega/c^2$. Фотон, обладая массой и скоростью, должен иметь и импульс, величина которого для частицы с нулевой массой покоя определяется соотношением

$$p = mc = \hbar\omega / c = 2\pi\hbar / \lambda . \quad (2.4)$$

Наличие импульса у фотонов приводит к тому, что свет, аналогично газу молекул, оказывает давление на поверхность, на которую он падает.

Излучение нагретого тела также может быть представлено в виде потока фотонов, т.е. ФОТОННОГО ГАЗА. Однако фотонный газ не может быть описан как классический газ, состоящий из молекул. В отличие от газа молекул, фотоны не имеют распределения по скоростям, так как при любой температуре имеют одну и ту же скорость c . Поведение фотонного газа в полной мере описывается лишь законами квантовой физики.

Контрольные вопросы и задания

1. В каких экспериментах проявляются квантовые свойства излучения? Волновые свойства электрона?
2. Что Вы понимаете под равновесным излучением нагретого тела? Какова природа этого излучения?
3. Используя формулу (2), оцените спектральную плотность энергии, излучаемую телом человека на частоте 10 ГГц.
4. В чем состоит физическая сущность известного парадокса, названного «ультрафиолетовая катастрофа»?

5. Какую гипотезу выдвинул Планк для объяснения излучения нагретого тела? В чем она противоречила классическим представлениям об излучении?
6. При какой частоте фотона его масса окажется равной массе покоя электрона?

2.1.3. Гипотеза де Бройля

Двойственная природа электромагнитного излучения, понимание которой сформировалось в начале двадцатого века, позволила объяснить многие явления на основе корпускулярного подхода, согласно которому электромагнитное излучение представляет собой поток фотонов – частиц, с массой покоя равной нулю. Успехи такого описания электромагнитного излучения сформировали интерес к **корпускулярно-волновым** представлениям и привели к их переносу на частицы, обладающие массой покоя. Первым это сделал в 1924 году Луи де Бройль, высказав идею об универсальности соотношения $p = 2\pi\hbar/\lambda$, связывающего импульс фотона с его длиной волны. **Любой частице, обладающей импульсом p , соответствует волна, для которой справедливо соотношение**

$$\lambda_{Бр} = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{h}{p}. \quad (2.5)$$

Эта величина получила название ДЛИНЫ ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ. Из соотношения (2.5) следует, что с импульсом частицы связана важная характеристика волны – ее волновое число $k = p/\hbar$. Вторым основным соотношением, объединяющим параметры частицы и волны де Бройля, является формула $\omega_{Бр} = E/\hbar$, выражающая связь частоты волны с энергией частицы. На **рис. 2.1.4** для свободной частицы (на которую не оказывает действия силовое поле, т.е. потенциальная энергия частицы $U = 0$) приведена графическая зависимость энергии от импульса $E = p^2/2m$ и дано схематичное изображение волны де Бройля для свободной частицы. Отметим, что волны де Бройля не являются электромагнитными волнами, а имеют особую (вероятностную) природу, о которой мы поговорим чуть позже.

Оценим длину волны де Бройля для электрона, находящегося в различных условиях. Для свободного электрона, движущегося внутри металла при комнатной температуре с тепловой скоростью

$$v_T = \sqrt{3k_B T / m_e} \cong 10^5 \text{ м/с,}$$

длина волны де Бройля $\lambda_{Бр} \approx 7 \text{ нм}$, тогда как расстояние между соседними атомами в решетке $a \approx 0,3 \text{ нм}$ (при вычислении использовалось значение массы электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$). **Для электрона в атоме водорода на ПЕРВОЙ БОРОВСКОЙ ОРБИТЕ скорость $v \approx 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, поэтому $\lambda_{Бр} \approx 0,4$**

нм, тогда как размер атома составляет величину $\sim 0,1 \text{ нм}$. Для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов V (при которой он не достигает еще скоростей, близких к скорости света), приобретаемая электронном кинетическая энергия $K = mv_T^2/2 = eV$. С учетом (5) это соотношение приводит к следующему выражению для длины волны де Бройля электрона:

$$\lambda_{Бр} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_e K}} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_e eV}}. \quad (6)$$

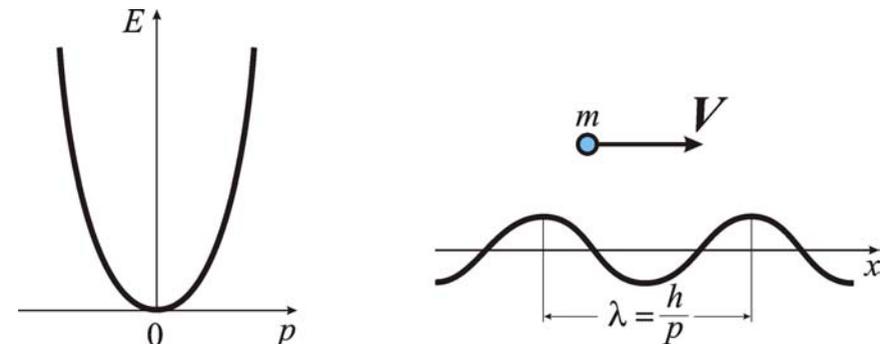


Рис. 2.1.4. Зависимость энергии от импульса и схематичное изображение волны де Бройля для свободной частицы

При значении $V \approx 150 \text{ В}$ эта величина составляет $\lambda_{Бр} \approx 0,1 \text{ нм}$.

Теперь оценим $\lambda_{Бр}$ для тяжелых частиц. Для иона меди, находящегося в узле кристаллической решетки металла (масса иона составляет $m_{Cu} \approx 10^{-25} \text{ кг}$), при комнатной температуре $\lambda_{Бр} \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}$, что на порядок меньше размера иона и расстояния между ионами. Если же рассмотреть макроскопический объект даже с малой массой, то его длина волны де Бройля оказывается намного меньше размеров этого объекта. Так, для пылинки с массой $m \sim 10^{-9} \text{ кг}$, движущейся со скоростью $v \sim 10^{-2} \text{ м/с}$, $\lambda_{Бр} \sim 10^{-22} \text{ м}$.

Так как принципиального различия между микро- и макрообъектами не существует, то возникает вопрос: в каких случаях проявляются волновые свойства, а в каких – корпускулярные? Проведем аналогию с оптикой. Волновая природа света максимально проявляется при длинах волн, соизмеримых с характерными размерами препятствий, т.е. $\lambda \sim L$ (например, интерференция и дифракция). Если же $\lambda \ll L$, то волновые свойства становятся несущественными, и можно пользоваться геометрической оптикой (прямолинейное распространение лучей). Если перенести указанные рассуждения на волны материи, то волновые свойства частиц будут проявляться в том случае, когда размеры области, в которой они движутся, меньше или порядка $\lambda_{Бр}$. Если же размеры этой области намного больше $\lambda_{Бр}$, то волновые свойства проявляются слабо и их можно не учитывать.

Первая ситуация ($L \leq \lambda_{Бр}$) имеет место для электронов в металле и атоме. Вторая ситуация – для электрона в электронно-лучевой трубке, для иона меди в металле и для пылинки.

В соответствии с гипотезой де Бройля, с движущейся вдоль оси X свободной частицей связана волна, которая описывается так называемой **волновой функцией**

$$\Psi(t, x) = A \exp \left[\frac{i}{\hbar} (Et - px) \right].$$

Введенная здесь функция $\exp(iu)$ широко используется в различных разделах физики и является обычной показательной функцией e^{iu} с основанием натурального логарифма $e \cong 2,718...$ Волновая функция является комплексной величиной, так как в ее аргумент входит мнимая единица $i = \sqrt{-1}$ (здесь полезным является математическое соотношение $e^{iu} = \cos u + i \sin u$, оно позволяет увидеть, что действительная часть волновой функции свободной частицы совпадает по своему виду с формулой (1) для ЭМВ). Принципиальное отличие волны де Бройля от ЭМВ заключено в ее физическом смысле, которое состоит в том, что квадрат ее модуля $|\Psi(t, x, y, z)|^2$ является мерой вероятности нахождения частицы в момент времени t в точке с координатами x, y, z .

В некотором смысле ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ являются «волнами вероятности», связанными с движущейся частицей. Именно вероятностная трактовка волн де Бройля явилась ключиком к пониманию многочисленных квантовых эффектов, имеющих место в микромире. Волновая функция $\Psi(t, x, y, z)$ является основной характеристикой состояния частицы в квантовой физике. Для определения этой функции в 1926 году Эрвин Шредингер предложил уравнение, которое в настоящее время называется **уравнением Шредингера** и которое в квантовой физике играет такую же важную роль, как второй закон Ньютона в классической физике.

Гипотеза де Бройля о наличии волновых свойств у частиц получила многочисленные экспериментальные подтверждения. Так, в 1927 году в опытах по рассеянию электронов на кристаллической решетке никеля были обнаружены волновые свойства у рассеянных электронов. Если бы электроны вели себя как классические частицы, они должны были бы отражаться от кристалла в соответствии с законами геометрической оптики (угол падения равен углу отражения). Но опыты показали, что при одном угле падения электронов на поверхность кристалла количество рассеянных электронов различно по разным направлениям. При этом имеется чередование максимумов и минимумов числа электронов, рассеянных под разными углами, т.е. явно наблюдается дифракция электронов. Представляют также интерес дифракционные эксперименты по обнаружению волновых свойств одиночных, поочередно летящих электронов. Величина электронного потока в этих экспериментах выбирается настолько малой, что на тонкую пленку металла одновременно попадает лишь

один электрон. Проходящие через пленку электроны дают на фотопластинке при достаточно большой длительности эксперимента дифракционную картину в виде concentric rings. При небольшой длительности экспозиции точки на фотопластинке, отвечающие попаданию электронов, распределены случайным образом. Однако при увеличении времени экспозиции распределение точек приобретает вид, характерный для дифракции рентгеновского излучения на поликристаллическом образце (**рис. 2.1.5**).

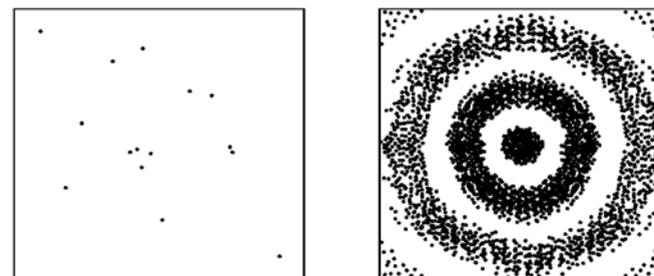


Рис. 2.1.5 Распределение дифрагировавших электронов на фотопластинке при малой и большой длительности экспозиции процесса дифракции

В дальнейшем волновые свойства были обнаружены у нейтронов, входящих в состав атомного ядра, α -частиц, представляющих собой ядро атома гелия, а также у других элементарных частиц.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие эксперименты подтверждают наличие волновых свойств у микрочастиц?
2. В чем суть гипотезы де Бройля? При каких условиях проявляются волновые свойства частиц?
3. Выразите зависимость длины волны де Бройля от кинетической энергии. Сравните значения длины волны де Бройля электрона и протона, имеющих одинаковую скорость.
4. Какие уравнения описывают поведение электрона в кинескопе телевизора, наночастице, атоме?
5. Каков физический смысл волновой функции? В чем отличие волны де Бройля от электромагнитной волны?
6. Оцените длину волны де Бройля релятивистского электрона, скорость которого составляет 90 процентов от скорости света.

2.1.4. Соотношения неопределённости

В классической физике полное описание состояния частицы определяется динамическими параметрами (координаты, импульс, момент импульса, энергия и др.). Однако реальное поведение микрочастиц по-

казывает, что существует принципиальный предел точности, с которой указанные параметры могут быть измерены. **Пределы применимости классического способа описания поведения микрочастиц определяются так называемыми СООТНОШЕНИЯМИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ, устанавливающими связь между неопределенностями двух сопряженных физических величин.**

Наиболее важными являются два типа соотношений. Первый тип соотношений, полученный Вернером Гейзенбергом в 1927 году, связывает между собой неопределенности в значениях координат частицы и соответствующих компонент ее импульса в один и тот же момент времени:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar, \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar, \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar. \quad (2.8)$$

Соотношение второго типа, полученное в те же годы Нильсом Бором, связывает неопределенность в изменении энергии частицы и неопределенность в моменте времени, когда это изменение произошло:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. \quad (2.9)$$

Невозможность одновременного точного задания величин, входящих в соотношения неопределенностей, есть проявление двойственной корпускулярно-волновой природы микрообъектов. Соотношения неопределенностей (2.8) и (2.9) являются фундаментальными законами природы и подтверждаются всей совокупностью имеющихся экспериментальных фактов. Применение соотношений неопределенностей к конкретным физическим системам позволяет не только установить границы применимости классической теории, но и без сложного математического анализа провести численные оценки значений параметров исследуемых систем.

Используя соотношения неопределенностей, можно связать неопределенность координаты частицы и длину волны де Бройля, а также определить условия, при которых можно пренебречь квантовыми эффектами. Предположим, что частица занимает область с линейным размером L . Согласно соотношению (2.8) для неопределенности координаты x имеем

$$\Delta x \geq \hbar / \Delta p_x \approx \hbar / p. \quad (2.10)$$

Здесь мы учли, что для частицы, движущейся в ограниченной области пространства, неопределенность импульса имеет значение, равное самому импульсу или близкое к нему. Учитывая связь импульса с длиной волны де Бройля, получаем $\Delta x \geq \lambda_{Бр} / 2\pi$. Понятие **траектории частицы** можно использовать только в том случае, если неопределенность ее координаты мала по сравнению с характерным размером области движения, т.е. $\Delta x \ll L$. Следовательно, условием корректности классического описания поведения частицы является $\lambda_{Бр} \ll L$. Полученное соотношение нарушается для электронов в атоме, или когда размер области движения соизмерим с атомными размерами.

Рассмотрим еще один пример применения соотношения неопределенностей. Электрон находится в сферической области с непроницаемыми стенками, диаметр которой $d = 10^{-9}$ м = 1 нм (подобный объект в дальнейшем назовем **квантовой точкой**). Оценим минимальную энергию электрона. В рассматриваемом случае неопределенность координаты электрона $\Delta x \approx d$, а неопределенность в определении импульса сравнима с величиной самого импульса $\Delta p \approx p$. Импульс электрона связан с его энергией соотношением $p = \sqrt{2m_e E}$, поэтому, с учетом соотношения неопределенностей, имеем:

$$\Delta x \cdot \Delta p = d \sqrt{2m_e E} \geq \hbar, \quad (2.11)$$

откуда для минимальной энергии электрона получаем $E_{\min} = \hbar^2 / 2m_e d^2$. Подставляя в это выражение значения всех входящих в него величин, получаем $E_{\min} \approx 3,75 \cdot 10^{-2}$ эВ (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Так как минимальная энергия электрона в рассматриваемой сферической области является конечной величиной, то электрон не может в ней находиться в состоянии покоя.

Контрольные вопросы и задания

1. Каков физический смысл соотношений неопределенности Гейзенберга и в чем их необычность с точки зрения классической физики?
2. Электрон находится в наночастице, размер которой вдоль оси Ox составляет 5 нм. Оцените неопределенность соответствующей проекции скорости электрона.
3. Используя соотношение неопределенностей Гейзенберга, оцените минимальную кинетическую энергию электрона в атоме водорода, считая его диаметр равным 0,1 нм.
4. Внутри сферической полости радиуса 5 нм в состоянии с минимальной энергией находится электрон. Оцените давление, оказываемое электроном на стенки полости.

2.1.5. Квантовые представления об атоме

Как было уже показано, длина волны де Бройля электрона в атоме сравнима с размером атома. В этих условиях нельзя пренебрегать волновыми свойствами электрона и описание его поведения в атоме необходимо проводить на основе квантовых представлений. Первым такие представления в теорию атома водорода в 1913 году ввел Нильс Бор. Атом водорода представляет собой связанный электрон, движущийся в электростатическом поле протона (ядра) с зарядом $+e$. Так как масса электрона m_e составляет всего лишь 1/1836 часть массы протона, в простейшем случае можно считать электрон вращающимся вокруг неподвижного ядра по круговым орбитам.

В соответствии со вторым законом Ньютона движение электрона по круговой орбите при наличии кулоновской силы, действующей на него со стороны протона, описывается уравнением

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{k_e e^2}{r^2}. \quad (2.12)$$

Это уравнение классической механики было дополнено Бором квантовым уравнением (**УСЛОВИЕМ КВАНТОВАНИЯ ВАЖНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ – МОМЕНТА ИМПУЛЬСА $L = pr = m_e v r$**):

$$m_e v r = n \hbar, \quad (2.13)$$

где величина $n = 1, 2, 3, \dots$ называется **КВАНТОВЫМ ЧИСЛОМ** и может принимать лишь значения целых положительных чисел. Это означает, что не на любой круговой орбите может оказаться электрон. В теории Бора электрону доступны лишь так называемые **СТАЦИОНАРНЫЕ орбиты, для которых выполняется условие (2.13)**. Именно квантовое число определяет номер стационарной электронной орбиты в атоме. Решая уравнения (2.12) и (2.13) совместно, получаем выражение для радиуса n -ой орбиты

$$r_n = n^2 r_1, \quad r_1 = \hbar^2 / k_e m_e e^2 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (2.14)$$

где r_1 – является в атоме водорода радиусом **первой боровской орбиты**. Легко показать, что условие квантования (2.13) показывает, сколько длин волн де Бройля уложится на длине окружности, представляющей соответствующую стационарную электронную орбиту. Действительно, соотношение (2.13) можно переписать следующим образом:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad 2\pi r_n = n \frac{h}{m_e v_n} = n \lambda. \quad (2.15)$$

Квантовое число n определяет также полную энергию электрона на соответствующей орбите, т.е. энергетическое состояние электрона в атоме. Действительно, на n -ой орбите полная энергия электрона в атоме равна сумме его кинетической и потенциальной энергий

$$E_n = T_n + U_n = \frac{m v_n^2}{2} - \frac{k_e e^2}{r_n}. \quad (2.16)$$

Используя уравнения (2.13) и (2.14), можно получить выражение для скорости электрона на соответствующей орбите и определить его полную энергию. **Важнейшим результатом теории Бора явился тот факт, что полная энергия электрона в атоме является не непрерывной величиной, а ДИСКРЕТНОЙ (или КВАНТОВАННОЙ).**

Величина полной энергии электрона на n -ом энергетическом уровне равна

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, \quad E_1 = -\frac{k_e^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13,6 \text{ эВ}. \quad (2.17)$$

Здесь E_1 – энергия электрона в основном (невозбужденном) состоянии в атоме водорода (энергия на первой «боровской» орбите). Величина $E_i = |E_1| = 13,6$ эВ является энергией ионизации атома водорода. Именно такую минимальную энергию необходимо затратить для удаления электрона из атома водорода, находящегося в основном энергетическом состоянии. На **рис. 2.1.6** приведены схема энергетических уровней и электронные орбиты в атоме водорода. Для наглядности уровни E_n нанесены на кривую потенциальной энергии электрона $U = -k_e e^2/r$.

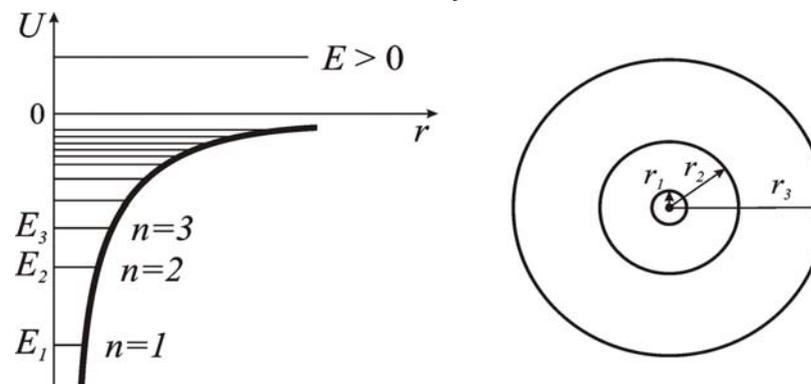


Рис. 2.1.6. Схема энергетических уровней в атоме водорода и электронные орбиты

Самый низкий уровень энергии E_1 соответствует ближайшему расположению электрона от ядра и характеризует ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ атомов. Такую энергию имеет атом, если он не получает энергию извне. В основном состоянии изолированный атом может пребывать сколь угодно долго. **Все энергетические уровни, начиная со второго, соответствуют ВОЗБУЖДЁННЫМ СОСТОЯНИЯМ АТОМА.** Эти значения энергии электрон в атоме может иметь, если он приобретает дополнительную энергию за счёт воздействия каких-либо внешних факторов. Находясь в возбуждённом состоянии электрон долгое время не может, поэтому он самопроизвольно переходит в нормальное состояние, отдавая при этом излишек энергии в виде электромагнитного излучения (света). Обратим также внимание на то, что энергия электрона в атоме имеет отрицательное значение. Это означает, что нулевая энергия соответствует состоянию электрона, удалённого на бесконечно большое расстояние от ядра и не взаимодействующего с ним.

Зная структуру энергетических уровней можно определить и структуру оптического спектра излучения атома водорода. При переходе электро-

на с m -го энергетического уровня E_m на n -ый уровень E_n в случае $m > n$ и $E_m > E_n$ электрон теряет энергию $E_m - E_n$, излучая фотон с частотой

$$\omega_{nm} = (E_m - E_n) / \hbar. \quad (2.18)$$

Набор частот, отвечающих различным переходам в атоме водорода, определяет спектр излучения атома водорода. Наряду со спектрами излучения, могут наблюдаться и спектры поглощения. Наличие спектров поглощения связано с тем, что каждому переходу электрона с вышележащего уровня на нижележащий с излучением фотона соответствует обратный переход ($m < n$ и $E_m < E_n$) с поглощением фотона той же частоты. Таким образом, излучение и поглощение квантов энергии в виде фотонов происходит в результате перехода электрона с одного энергетического уровня на другой. При рассмотрении энергетического спектра атома следует обратить внимание также и на то, что при увеличении главного квантового числа n происходит сближение уровней энергии. **При достаточно большом n можно считать, что энергия атома практически не квантуется, а изменяется непрерывно. В этом находит своё выражение ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ квантовых и классических представлений.**

Отметим еще один из важнейших принципов квантовой физики. Как уже отмечалось, из возбуждённого состояния электрон, испуская фотон, переходит в основное, невозбуждённое состояние с наименьшей из всех возможных значений энергией. Состояние с наименьшей энергией – устойчивое. Очевидно, что стремление перейти в энергетически более устойчивое состояние характерно не только для электрона в атоме водорода, но и для электронов многоэлектронных атомов. Означает ли это, что все электроны в устойчивом состоянии имеют одно значение энергии, т.е. занимают один и тот же энергетический уровень? Ответить на этот вопрос позволяет **ПРИНЦИП ПАУЛИ, в соответствии с которым в любой системе взаимодействующих частиц в одном энергетическом состоянии могут находиться не более двух электронов с противоположными СПИНАМИ** (об этой физической величине речь будет идти ниже). Поэтому невозможно «скопление» электронов на одном энергетическом уровне. В соответствии с принципом Паули электроны занимают попарно все уровни, начиная с самого нижнего. Принцип Паули регулирует распределение электронов по энергиям в любой системе, содержащей большое число электронов.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие различия Вы можете указать в строении и поведении атома и Солнечной системы?
2. В чем отличие атома, находящегося в основном и возбужденном состояниях?
3. Какую физическую величину использовал Н. Бор при формулировке правила квантования в атоме водорода? Какова ее размерность?

4. С какой частотой вращается электрон в атоме водорода, находясь на первой боровской орбите?
5. Фотоны какой длины волны могут вызвать ионизацию атома водорода, находящегося в основном (невозбужденном) состоянии?
6. Фотоны какой длины волны излучаются при переходе электрона с третьей боровской орбиты на вторую в атоме водорода?

2.1.6. Кристаллы и энергетические зоны

После объяснения на основе квантовых представлений энергетического спектра отдельных атомов эти представления стали широко использоваться в физике кристаллов. Эта область физики изучает закономерности при формировании многочисленных кристаллических структур и их энергетических спектров. **Основные эффекты, широко используемые в нанотехнологиях, связаны с ЗОННОЙ СТРУКТУРОЙ энергетических спектров кристаллов.** Кратко рассмотрим природу возникновения **энергетических зон** в кристаллах. Как изменится энергетическая структура каждого из двух отдельных атомов, если из них образуется молекула? По мере сближения на каждый атом (его электроны и ядро) увеличивается силовое воздействие со стороны электрических полей электронов и ядра другого атома. Подобное взаимодействие между атомами приводит к тому, что вместо каждого одиночного атомного уровня, определяемого главным квантовым числом n и одинакового для всех одинаковых изолированных атомов, возникают два близко расположенных, но не совпадающих подуровня (**рис. 2.1.7**). В таких случаях говорят, что происходит **расщепление** энергетических уровней. Если теперь сближать N одинаковых атомов, то в результате их взаимодействия вместо соответствующего энергетического уровня, одинакового для всех изолированных атомов, появятся N близких подуровней, которые и образуют энергетическую зону разрешённых значений энергии. Таким образом, разрешённая энергетическая зона кристалла состоит из N подуровней, на которых может разместиться, согласно принципу Паули, не более $2N$ электронов. В кристалле объемом 1 см^3 имеется порядка 10^{22} атомов. Такой же порядок величины имеет и число подуровней в каждой энергетической зоне. Величина расщепления, т.е. расстояние между ближайшими подуровнями и, следовательно, ширина разрешённой зоны в целом различны для атомных уровней с разными значениями главного квантового числа n . Уровни энергии с большим главным квантовым числом дают разрешённые зоны большей ширины. Объясняется это тем, что при сближении атомов их электрические поля наиболее сильно воздействуют на валентные (внешние) электроны, которые слабее внутренних связаны с ядрами своих атомов. Поэтому расщепление уровней валентных электронов наибольшее, ширина образующейся при этом зоны разрешённых значений энергии равна нескольким электрон-вольтам. Влияние

электрических полей взаимодействующих атомов на внутренние электроны намного слабее и поэтому в кристалле малыми оказываются расщепление энергетических уровней внутренних электронов и ширина отвечающих им разрешенных зон. **Разрешённые энергетические зоны в кристалле разделены ЗАПРЕЩЁННЫМИ ЗОНАМИ.** Ширина запрещённых зон E_g соизмерима по величине с шириной разрешенных зон. С ростом энергии ширина разрешённых зон увеличивается, а ширина запрещённых зон уменьшается.

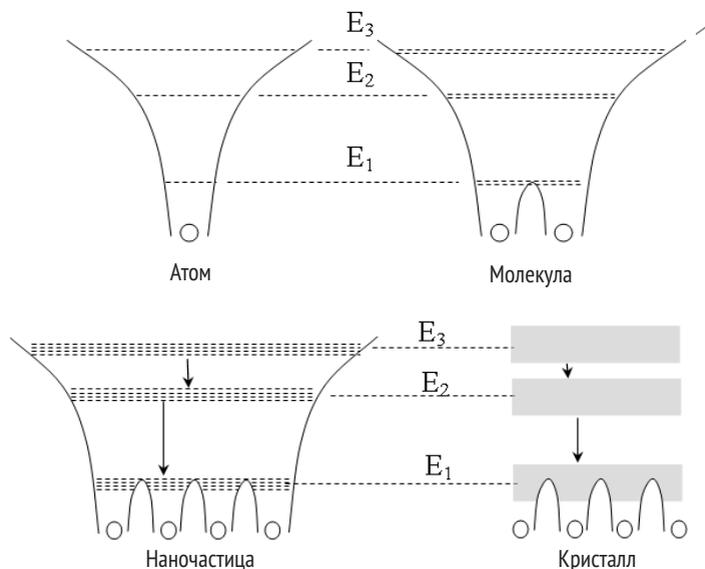


Рис. 2.1.7 Схема расположения энергетических уровней в атоме, молекуле, наночастице, кристалле

Многие физические свойства кристалла определяются характером заполнения электронами соответствующих зон. Что произойдёт, если кристалл подвергнуть нагреванию, облучению или просто создать внутри него электрическое поле? Так как в этом случае кристалл получает энергию извне, то и энергия электронов должна увеличиваться. С позиции квантовой механики это означает, что электроны получают возможность перейти в новое состояние, соответствующее более высокому энергетическому уровню, если порция энергии, получаемая извне, достаточна для перевода электронов на один из возбуждённых уровней энергии. Такая возможность представляется в первую очередь электронам последней заполненной зоны, так как для перехода электронов из заполненных зон, лежащих еще ниже, нужна слишком большая энергия возбуждения. Многие процессы в кристаллах объясняются состоянием именно валентных электронов. Поэтому на упрощенной схеме энергетических зон изображают только три зоны – последнюю, полностью заполненную при абсолютном нуле температур, запрещенную зону и следующую за ней зону, которая может быть либо полностью свободной, либо частично заполненной (рис. 2.1.8).

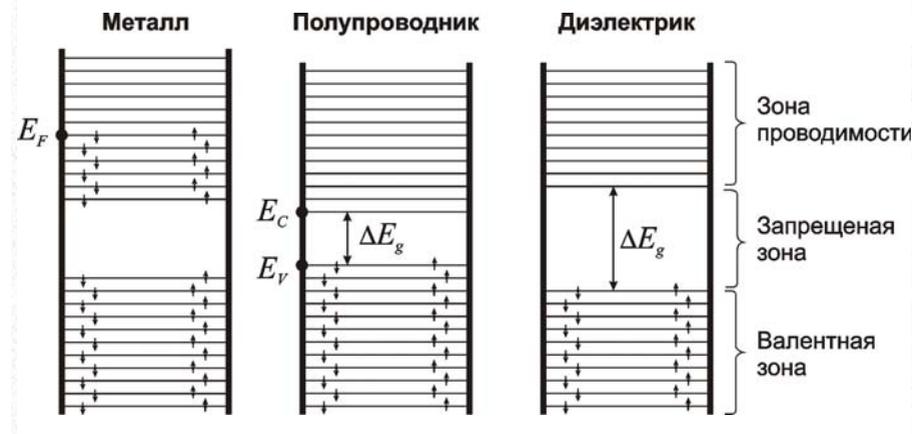


Рис. 2.1.8.

Полностью заполненную зону называют ВАЛЕНТНОЙ ЗОНОЙ, а следующую за ней – ЗОНОЙ ПРОВОДИМОСТИ. Такое название эта зона получила потому, что находящиеся в ней электроны, получив энергию от внешнего электрического поля, могут переходить на свободные подуровни (так как зона неполностью заполнена) и таким образом принимать участие в направленном переносе заряда.

В зависимости от характера заполнения зоны проводимости и ширины запрещенной зоны, возможны три случая, представленных на рис. 2.1.7. **Если зона проводимости полностью незаполнена, а ширина запрещенной зоны составляет величину в несколько электронвольт, то такой кристалл принято относить к ДИЭЛЕКТРИКАМ (случай а).** **Если зона проводимости полностью незаполнена, а ширина запрещенной зоны имеет величину не более одного электронвольта, то такой кристалл относится к ПОЛУПРОВОДНИКАМ (случай б).** **Если зона проводимости заполнена не полностью, то кристалл является ПРОВОДНИКОМ (случай в).** **Последний занятый электронами энергетический уровень в зоне проводимости (при $T=0$ К) называют УРОВНЕМ ФЕРМИ.**

Уровень Ферми и соответствующая ему **энергия Ферми E_F** играют важную роль в современных квантовых представлениях о кристаллах. С энергией Ферми, например, связана величина средней энергии электронов в металле $\langle E \rangle = (3/5) E_F$. Так как $E_F \approx 5$ эВ намного превышает тепловую энергию электронов в металле ($k_B T \approx 3 \cdot 10^{-2}$ эВ при $T \approx 300$ К), то и средняя энергия намного превышает их тепловую энергию, что является проявлением квантовых законов.

Так как для полупроводников ширина запрещённой зоны сравнительно мала, то энергия теплового движения $k_B T$ оказывается достаточной для «за-

броса» части электронов из валентной зоны в свободную зону проводимости. При этом электроны, попавшие в свободную зону, и электроны в валентной зоне получают возможность переходить на более высокие незанятые уровни энергии. С переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости создаются условия для перемещения электронов в самой валентной зоне. При этом оказывается, что движение заряда в такой почти полностью заполненной зоне может быть описано движением «пустых» мест – «дырок», если им приписать положительный знак (рис. 2.1.9). Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов, поэтому под действием электрического поля в полупроводнике возникает суммарный ток электронов и дырок. Таким образом, в качестве носителей заряда в любой среде могут выступать способные перемещаться под действием электрического поля электроны и дырки.

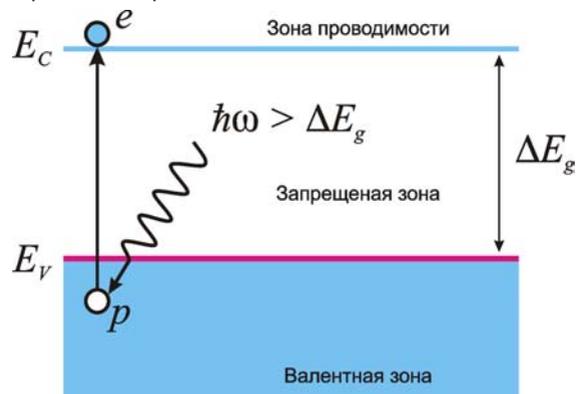


Рис. 2.1.9. Энергетическая диаграмма, поясняющая возникновение электрона и дырки в совершенном кристалле

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются кристаллы от некристаллических (аморфных) твердых тел?
2. Какова природа образования разрешенных и запрещенных энергетических зон?
3. Почему энергетические зоны кристаллов называются разрешенными и запрещенными?
4. Укажите особенности заполнения электронами энергетических зон в металлах, диэлектриках и полупроводниках.
5. Выразите частоту излучаемого фотона, образуемого при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону, через ширину запрещенной зоны полупроводника?
6. В чем отличие собственных полупроводников от примесных? Какие бывают типы примесных полупроводников?

7. Каков физический смысл понятия «дырка» в полупроводниках? Какое участие в процессе направленного переноса заряда принимают «дырки»?
8. Величина энергии Ферми для меди равна 7 Эв. Оценить расстояние между энергетическими уровнями в зоне проводимости медного кристалла объемом 1 см³. Плотность меди $\rho=8,9$ г/см³, атомный вес $A=64$ г/моль.

2.1.7. Потенциальные яма и барьер. Туннельный эффект

Если частица движется в ограниченной области, где ее потенциальная энергия меньше, чем вне этой области, то говорят, что частица находится в ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ. Термин «потенциальная яма» происходит от вида графика, изображающего зависимость потенциальной энергии частицы, находящейся в силовом поле, от её положения в пространстве. *Основное свойство потенциальной ямы – способность удерживать частицу, полная энергия которой меньше ее потенциальной энергии, т.е. глубины ямы. Говорят, что такая частица находится в СВЯЗАННОМ СОСТОЯНИИ, при этом ее полная энергия принимает одно из дискретных значений.* Потенциальные ямы могут быть одно-, двух- и трехмерными в зависимости от того, сколько из трех независимых направлений движения имеет частица, находящаяся в потенциальной яме. Примером трехмерной потенциальной ямы является кулоновская потенциальная энергия электрона в атоме водорода $U(r) = -k_e e^2/r$. На рис. 2.1.10(а) схематически представлен вид одномерной потенциальной ямы и энергетических уровней частицы в этой яме. Полная энергия частицы E является суммой её кинетической энергии, которая всегда положительна $T \geq 0$, и потенциальной U , которая может быть как положительной, так и отрицательной. Если частица находится внутри ямы, то её кинетическая энергия T_1 меньше глубины ямы U_0 . В этом случае полная энергия частицы в яме отрицательна ($E_1 = T_1 + U_1 = T_1 - U_0 < 0$) и частица не может покинуть яму, т.е. находится в связанном состоянии. Она движется в яме с кинетической энергией T_1 , отражаясь от ее «стенок». Причем, в классическом случае частица, двигаясь от одной «стенки» к другой, принимает любое значение энергии, в зависимости от сообщенного ей импульса. Если кинетическая энергия частицы $T_2 = 0$, то её полная энергия $E_2 = -U_0 < 0$ и частица находится на «дне» ямы. Это положение частицы наиболее устойчиво, но оно возможно только в рамках классической физики. Если кинетическая энергия частицы T_3 больше глубины потенциальной ямы U_0 и полная энергия частицы положительна ($E_3 = T_3 + U_0 > 0$), то она уходит за пределы ямы.

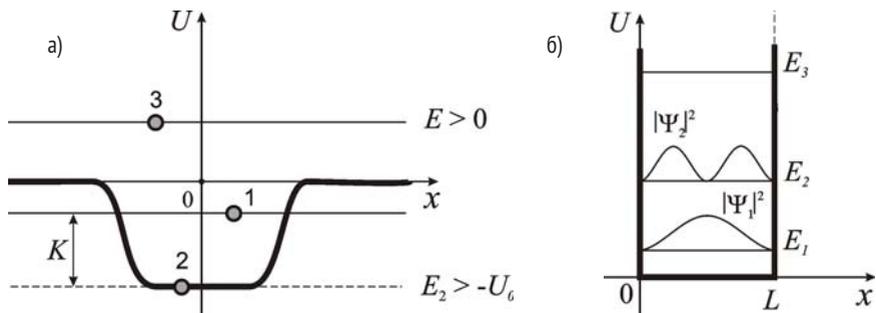


Рис. 2.1.10

Согласно квантовым представлениям, если движение частицы происходит в ограниченной области пространства, т.е. частица находится в связанном состоянии, то ее полная энергия может принимать лишь определённые дискретные значения. Это означает, что в потенциальной яме существуют дискретные уровни энергии, на одном из которых частица находится. На примере движения частицы в одномерной прямоугольной яме с бесконечно высокими (непроницаемыми) стенками рассмотрим, как могут быть получены значения энергии, отвечающие различным квантовым состояниям (уровням). На рис. 2.1.10 (б) представлен вид такой ямы, причем «дно» ямы имеет значение $U_0 = 0$. Для этого воспользуемся правилом квантования Бора, согласно которому разрешены лишь те квантовые состояния, на которых импульс частицы p_n и ширина ямы L связаны соотношением $p_n L = \pi \hbar n$, где n – квантовое число, определяющее номер энергетического уровня. Тогда разрешенные значения импульса частицы в яме даются выражением $p_n = \pi \hbar n / L$, с учетом которого для полной энергии частицы на соответствующем уровне получаем:

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{p_n^2}{2m_e} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m_e L^2}. \quad (19)$$

Обратим внимание на тот факт, что минимальная энергия частицы в яме не может быть равной нулю. Всегда существует минимальная энергия (так называемая энергия нулевых колебаний), которая для рассматриваемой потенциальной ямы, согласно формуле (19), равна $E_1 = \pi^2 \hbar^2 / 2m_e L^2$. В потенциальной яме шириной $L = 0,5$ мкм значение энергии первого уровня $E_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ эВ, расстояние между первым и вторым уровнями энергии $\Delta E_{21} = E_2 - E_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ эВ, что значительно меньше энергии теплового возбуждения ($k_B T \approx 3 \cdot 10^{-2}$ эВ при $T = 300$ К). На рис. 2.1.10 (б) также приведен вид соответствующих квадратов модулей волновых функций $|\Psi_i|^2$, определяющих вероятность обнаружить частицу с энергией E_i в том или ином месте потенциальной ямы. Видно, что в основном энергетическом состоянии E_1 вероятность обнаружить частицу наибольшая в центре ямы. Это означает, что частица в средней части ямы проводит значительно больше

времени, чем у краев ямы. В возбужденном состоянии с энергией E_2 частица большую часть времени пребывает в областях, примыкающих к координатам $x = L/4$ и $x = 3L/4$.

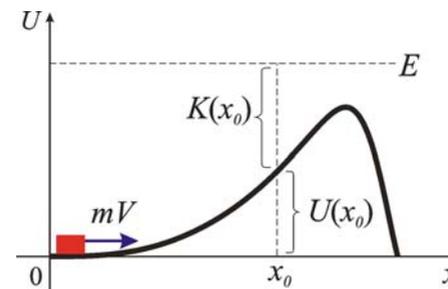


Рис. 2.1.11. Пример потенциального барьера для скользящей шайбы

Если частица налетает на область пространства, в которой ее потенциальная энергия U больше, чем в области, из которой она налетает, то такая область для частицы представляет **потенциальный барьер**. Рассмотрим вначале простой пример классического потенциального барьера в поле силы тяжести. Пусть шайба без трения скользит в направлении горки, изображенной на рис. 2.1.11. Профиль горки, определяемый видом потенциальной энергии шайбы на ней $U(x) = m g h(x)$, может считаться потенциальным барьером (здесь m – масса частицы, g – ускорение свободного падения). Так как движение шайбы происходит без потери полной энергии, с высотой подъема потенциальная энергия шайбы должна возрастать, а кинетическая энергия падать. Если кинетическая энергия K больше максимальной высоты потенциального барьера, то шайба преодолет горку. Если же K меньше высоты горки, то шайба вкатится только на часть «склона горки» и покатится назад, т.е. она отразится от барьера. Потенциальный барьер может соответствовать любому другому виду потенциальной энергии. На рис. 2.1.12 приведена зависимость потенциальной энергии частицы от координаты, представляющая простейший потенциальный барьер прямоугольной формы шириной l и высотой U_0 . Полная энергия частицы E равна сумме её кинетической энергии K и потенциальной U . Вне барьера потенциальная энергия частицы равна нулю, поэтому ее полная энергия равна кинетической $E = K$. Частица с полной энергией $E = K < U_0$, налетающая на барьер слева, с точки зрения классической физики не может преодолеть его и должна от него отразиться. Действительно, если частица с $E < U_0$ вошла внутрь барьера, то она должна иметь там отрицательную кинетическую энергию (только в этом случае её полная энергия сохраняется), что невозможно по смыслу кинетической энергии (так как она равна $mv^2/2$).

С точки зрения квантовой физики частица с $E < U_0$ может с некоторой вероятностью пройти сквозь барьер. Это явление носит название ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА или ТУННЕЛИРОВАНИЯ, смысл которого за-

ключается в квантовом переходе частицы через область движения, запрещённую классической механикой. В этом случае определяемый из соотношения $E = p^2 / 2m + U$ импульс частицы $p = \sqrt{2m(E - U_0)}$, был бы внутри барьера мнимой величиной.

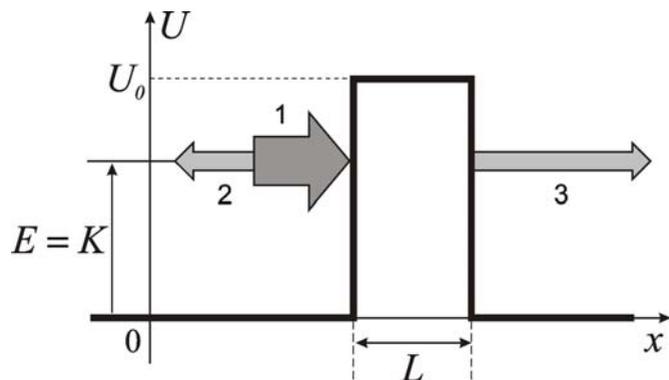


Рис. 2.1.12. Потенциальный барьер конечной высоты с вертикальными стенками

В квантовой механике движение частицы сквозь потенциальный барьер оказывается возможным ввиду справедливости соотношения неопределенностей (2.7). Действительно, чтобы кинетическая энергия частицы внутри барьера не была отрицательной, необходимо, чтобы ее неопределенность ΔK была больше величины $U_0 - E$. Так как неопределенность кинетической энергии связана с неопределенностью импульса $\Delta K = (\Delta p)^2 / 2m$, то $\Delta p > \sqrt{2m(U_0 - E)}$. Для частицы, находящейся внутри барьера неопределенность координаты $\Delta x = a$. С учетом соотношения неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ условием просачивания частицы через барьер можно считать неравенство $a \cdot \sqrt{2m(U_0 - E)} \leq \hbar$. Поэтому чем «тоньше» барьер геометрически и чем меньше разность между высотой барьера U_0 и полной энергией E , тем больше вероятность у частицы пройти этот барьер и продолжить движение за его пределами.

Основной результат точного квантово-механического рассмотрения этой задачи состоит в следующем. Пусть на барьер падает поток частиц 1 с интенсивностью I_0 (число частиц, падающих на единичную площадку в единицу времени). Часть потока 2 отражается от него, а часть потока 3 с интенсивностью $I(a)$ проходит через него. Величина прошедшего потока определяется выражением $I(a) = D \cdot I_0$. Здесь коэффициент прозрачности барьера (или вероятность туннельного перехода), равный отношению интенсивностей прошедшего и падающего потоков, дается выражением

$$D = D_0 \exp \left[-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \right], \quad (2.20)$$

где величина D_0 сравнима с единицей. С ростом толщины барьера и его высоты вероятность просачивания частиц через барьер падает, но не обращается в ноль.

Комбинируя два типа полупроводников с различной шириной запрещенных зон, можно получить либо потенциальный барьер, либо потенциальную яму. Чтобы приготовить структуру, содержащую потенциальный барьер, следует поместить слой полупроводника с широкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещенной зоной. Чтобы приготовить структуру, содержащую потенциальную яму, следует поместить слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя полупроводниками с широкой запрещенной зоной.

Туннельный эффект объясняет ряд важных физических явлений: **холодную эмиссию электронов из металла, контактную разность потенциалов** и т.д. Кроме того, этот эффект находит очень широкое применение в технических приложениях. В частности, на его основе был создан **сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)**, который произвел подлинную революцию в физике и технике поверхности и имеет широкие перспективы в связи с развитием нанотехнологий.

Контрольные вопросы и задания

1. Как может изменяться энергия частицы, находящейся в потенциальной яме?
2. Нарисуйте вид потенциальной ямы (т.е. зависимость потенциальной энергии от координаты) и расположите энергетические уровни электрона в атоме водорода.
3. Используя соотношение неопределенностей, оцените минимальное значение энергии для частицы массы m в одномерной потенциальной яме шириной L .
4. В чем состоит сущность процесса туннелирования? Возможен ли такой эффект в классической физике?
5. От каких величин и каким образом зависит вероятность прохождения частицы через потенциальный барьер?
6. Какой ширины должен быть прямоугольный потенциальный барьер высотой $U_0 = 1$ Эв, чтобы через него просачивалась треть падающих на него электронов с энергией $E = 0,6$ Эв?

2.1.8. Квантовые ямы, нити, точки

Выше нами было установлено, что локализация электронов в потенциальной яме приводит к дискретному энергетическому спектру электрона. Расстояние между энергетическими уровнями существенно зависит от геометрических размеров потенциальной ямы. Если эти размеры являются макроскопическими (при $L > 1$ мкм), то расстояние между уровнями энергии настолько мало, что энергетический спектр можно считать практически непрерывным. Это означает, что электрон в потенциальной яме может принимать практически все допустимые значения энергии. В другом предель-

ном случае, когда электрон находится в потенциальной яме, сформированной ядром атома, дискретность спектра такова, что расстояние между энергетическими уровнями с малым квантовым числом имеет порядок нескольких электронвольт. Поэтому при уменьшении одного или нескольких геометрических размеров потенциальной ямы от макроскопических до размеров менее 100 нм характер энергетического спектра электрона меняется от практически непрерывного (как у макрообразца) до существенно дискретного (как у атома). Причиной этого изменения является тот факт, что **при уменьшении одного из размеров области, в которой происходит движение электрона, до значений, сравнимых с длиной волны де Бройля, все более значительно проявляются его волновые свойства. Чтобы этот факт подчеркнуть, такую структуру называют КВАНТОВО-ОГРАНИЧЕННОЙ.**

При анализе электронных процессов в квантово-ограниченных структурах наиболее существенной оказывается так называемая **квантовая размерность** электронной системы. Под квантовой размерностью понимают количество измерений, в которых структура квантово-ограничена. Если соотношение между де-бройлевской длиной волны электрона и размерами структуры $\lambda_{бр} \geq L_i$ справедливо лишь для одного измерения (направления), то структура имеет квантовую размерность 2D, а электронный газ в такой структуре считается двумерным. Если указанное соотношение между де-бройлевской длиной волны и размерами структуры справедливо для двух измерений, то структура имеет квантовую размерность 1D, а электронный газ в такой структуре считается одномерным. Наконец, при выполнении условия $\lambda_{бр} \geq L_i$ для всех трех измерений структура становится нульмерной (0D).

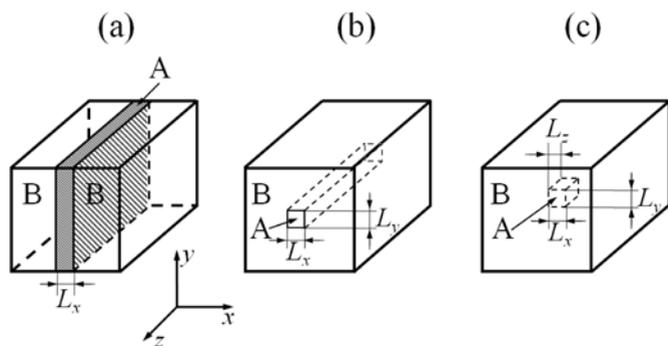


Рис. 2.1.13

Отличие квантово-размерной структуры от макроструктуры проявляется наиболее отчетливо при размерах потенциальной ямы всего лишь в несколько раз превышающих расстояние между атомами в кристалле ($L_i \approx 10$ нм). Именно при таких размерах и происходит кардиналь-

ная перестройка энергетического спектра. Изменение спектра влечет за собой изменение многих физических свойств наноструктур. Особенности энергетического спектра электрона, т.е. характер его движения, существенно зависит от размерности потенциальной ямы. На (рис. 2.1.13) приведены схематически три различных типа квантово-размерных структур. Ввиду их важности кратко обсудим каждую из этих структур.

Под КВАНТОВОЙ ЯМОЙ (или 2D-СТРУКТУРОЙ) принято понимать структуру, в которой движение электронов квантово-ограничено в одном измерении, а в двух других – неограниченно (рис. 2.1.13 а). Поэтому в квантовой яме электроны проявляют волновые свойства в одном измерении, но ведут себя как свободные частицы в двух других измерениях. Характерной особенностью энергетического спектра электрона в квантовой яме является его дискретность для направления с квантовой ограниченностью движения и непрерывность для двух других направлений движения. Простейшая квантовая структура, в которой движение электрона ограничено в одном направлении, это тонкая пленка металла или достаточно тонкий слой полупроводника. Именно на тонких пленках полуметалла висмута и полупроводника InSb впервые наблюдались эффекты размерного квантования, характерные для квантовой ямы. В настоящее время квантовые структуры изготавливают иначе. Для этого тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной помещают между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной. В результате электрон оказывается запертым в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что в квантовой яме электронный газ становится двумерным.

Под КВАНТОВОЙ НИТЬЮ (или 1D-СТРУКТУРОЙ) принято понимать структуру, в которой движение электронов квантово ограничено в двух измерениях (например, вдоль осей x и y), а в третьем (вдоль оси z) – неограниченно (рис. 2.1.13 б). Чтобы явно проявлялись эффекты размерного квантования, размеры L_x и L_y должны быть порядка нескольких нанометров.

Если движение электрона квантово ограничено в трех направлениях, то его энергетический спектр становится полностью дискретным, как в изолированном атоме. Такую систему называют КВАНТОВОЙ ТОЧКОЙ (рис. 2.1.13 с) или 0D-СТРУКТУРОЙ (ее можно было бы называть и КВАНТОВЫМ ЯЩИКОМ). В связи с этим основной характеристикой квантовой точки является энергетический спектр, который зависит от многих факторов – формы «ящика», степени непрозрачности стенок (т.е. высоты потенциальных барьеров), числа электронов и т.д. Так, энергетический спектр электрона в квантовой точке прямоугольной формы с размером ребер L_x, L_y, L_z и непроницаемыми стенками определяется выражением

$$E_{n_x n_y n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right) \quad (2.21)$$

где n_x , n_y и n_z – квантовые числа. Согласно (2.22), спектр электрона в квантовой точке кубической формы с размером ребра $L_\alpha = L$ содержит бесконечное число уровней энергии, значения которой задаются набором трех квантовых чисел n_α .

Основному состоянию всегда соответствует один набор квантовых чисел $n_x = n_y = n_z = 1$ и энергетический уровень с минимальной энергией

$$E^{(1)} = E_{111} = \frac{3\pi^2\hbar^2}{2m_e L^2}. \quad (2.22)$$

Следующему энергетическому уровню отвечают три набора квантовых чисел (112), (121) и (211) с одинаковыми значениями энергии

$$E^{(2)} = E_{112} = E_{121} = E_{211} = \frac{3\pi^2\hbar^2}{m_e L^2}. \quad (2.23)$$

Такой уровень называется **вырожденным**, **кратность его вырождения** равна трем. Следующему энергетическому уровню электрона в квантовой яме также отвечают три набора квантовых чисел (122), (212) и (221) со значениями энергии $E^{(3)} = 9\pi^2\hbar^2 / 2m_e L^2$. Потенциальная яма, уровни энергии и вид функций $|\Psi_i|^2$ для электрона в квантовой точке имеют вид, аналогичный представленному на **рис. 2.1.10(б)**. Если размер квантовой точки $L = 5$ нм, то значение $E_{min} \approx 0,04$ эВ, а первое возбужденное состояние имеет энергию $E_{112} \approx 0,08$ эВ.

На **рис. 2.1.14** приведено объёмное изображение реальной квантовой точки - гетероструктуры, вид которой в данном случае напоминает пирамидку. Эта пирамидка, состоящая из атомов германия, образовалась при создании условий для самопроизвольного прилипания атомов германия друг к другу (т.е. самосборки) на поверхности подложки из кремния.

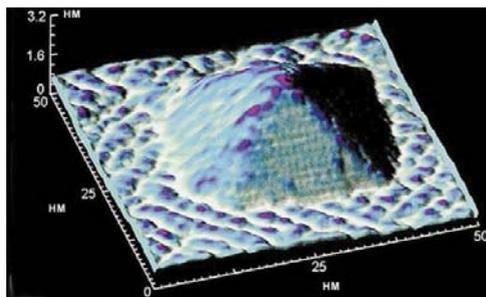


Рис. 2.1.14. Фотография в атомно-силовом микроскопе реальной квантовой точки

Квантовые точки, имеющие наноразмеры, подобны искусственным атомам, хотя могут состоять из достаточно большого числа настоящих атомов. Именно дискретность энергетического спектра электрона в отдельной квантовой точке позволяет называть ее искусственным атомом. Такое сопоставление иллюстрируется на **рис. 2.1.15** схемой энергетических уровней в

атоме и в квантовой точке и переходами электрона с более высокого уровня на нижний с излучением фотона. Ведь электроны и в атомах, и в квантовых точках, переходя с одной орбиты на другую, излучают квант света строго определённой частоты. Но в отличие от настоящих атомов, внутреннюю структуру которых и спектр излучения мы изменить не можем, параметры квантовых точек зависят от нас. Как и настоящий атом, квантовая точка может содержать один или несколько электронов. Если содержится один электрон, то можно говорить об искусственном атоме водорода, если два – об искусственном атоме гелия.

Реальная изолированная квантово-размерная структура, как правило, имеет потенциальные барьеры конечной высоты. Это приводит к конечному числу энергетических уровней, оказывающихся внутри потенциальной ямы, т.е. с энергией, не превышающей высоту потенциальных барьеров. Изменяя размеры квантовой точки и высоту потенциального барьера, можно менять число уровней в яме и энергетическое расстояние между ними. При конечной высоте стенок потенциальной ямы U_0 имеется конечная вероятность обнаружить электрон с энергией $E < U_0$ за пределами потенциальной ямы.

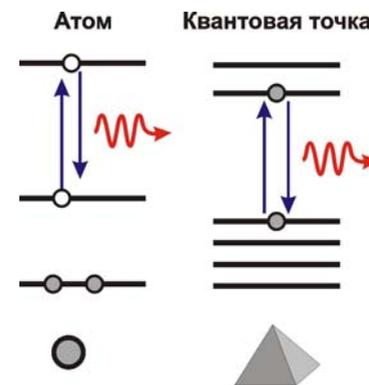


Рис. 2.1.15. Механизм излучения индивидуального атома и квантовой точки

Возможность туннелирования электрона под барьером конечной высоты позволяет создавать **наноструктуры, содержащие две и более связанных ям, а также одномерные периодические структуры, получившие название СВЕРХРЕШЕТОК**, с необходимым для решения конкретных практических задач энергетическим спектром. Обычно под термином «сверхрешётка» принято понимать твердотельную структуру, в которой помимо **периодического потенциала** кристаллической решётки имеется дополнительный потенциал, период которого существенно превышает **постоянную решётки**. Классическим примером сверхрешетки может быть структура, состоящая из чередующихся тонких слоев полупроводника (**рис. 2.1.16**). Потенциал, обусловленный периодичностью ее структуры, называется потенциалом сверхрешетки. Широкое распространение получили сверхрешетки, период

которых лежит в нанометровом диапазоне. Наряду со сверхрешётками из полупроводников, существуют также сверхрешётки металлов, магнитные и сегнетоэлектрические сверхрешётки.

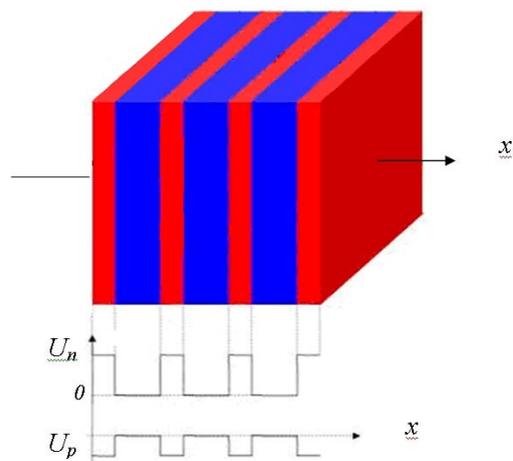


Рис. 2.1.16. Сверхрешётка GaAs/AlAs и профиль потенциала электронов и дырок вдоль направления роста структуры

Контрольные вопросы и задания

1. Какую структуру называют квантово-ограниченной?
2. К каким типам квантово-размерных структур относятся квантовые ямы и квантовые точки?
3. Какие уровни энергии являются вырожденными и что такое кратность вырождения?
4. Почему квантовые точки называют искусственными атомами?
5. Что понимают под энергетическим спектром квантово-размерной структуры?
6. Какой размер ребра L должна иметь квантовая точка кубической формы, чтобы разность энергий двух нижних энергетических уровней была равна энергии ионизации в атоме водорода?

ГЛАВА 2.2. Уникальные свойства наноструктур

Свойства наноструктур существенно отличаются от свойств массивных материалов. В предыдущих главах было показано, что во многом это связано с увеличением доли поверхностных атомов, а также с изменением энергетического спектра электронов в наноструктурах. Укажем еще на одну важную причину различия свойств наноструктур и массивных материалов. Каждому физическому явлению, протекающему в веществе, отвечает некоторая характеристическая длина. Поэтому конкретное физическое свойство, связанное с этим явлением, существенно зависит от того, как соотносятся размеры образца с характеристической длиной. Так, электрическое сопротивление металла объясняется «столкновениями» электронов проводимости (свободных электронов, принимающих участие в переносе заряда) с колеблющимися ионами кристаллической решетки. В качестве характеристической длины в данном случае выступает длина свободного пробега электрона, которая зависит от температуры образца, числа примесных атомов и различного рода дефектов в нем. При приближении одного из размеров образца к характеристической длине значение электрического сопротивления может измениться на порядок. Совокупность указанных факторов и определяет уникальные свойства наноструктур, с некоторыми из которых мы познакомимся в данной главе.

2.2.1. Число «ближайших соседей» в наночастице

С числом атомов в наночастице тесно связано понятие числа «ближайших соседей», т.е. числа ближайших к данному атому соседних атомов. Когда число атомов в частице невелико и значительная их часть расположена на поверхности, среднее число ближайших соседей гораздо меньше того, которое соответствует кристаллической решётке массивного образца.

При увеличении размеров частицы и, соответственно, числа атомов в ней, число ближайших соседей приближается к предельному значению, отвечающему данной кристаллической решётке, как это видно из диаграммы, представленной на **рис. 2.2.1**. От числа ближайших соседей в кристаллической решетке как макроскопических тел, так и наночастиц существенно зависят многие их физические свойства и характеристики. В качестве примера приведем одну из таких зависимостей.

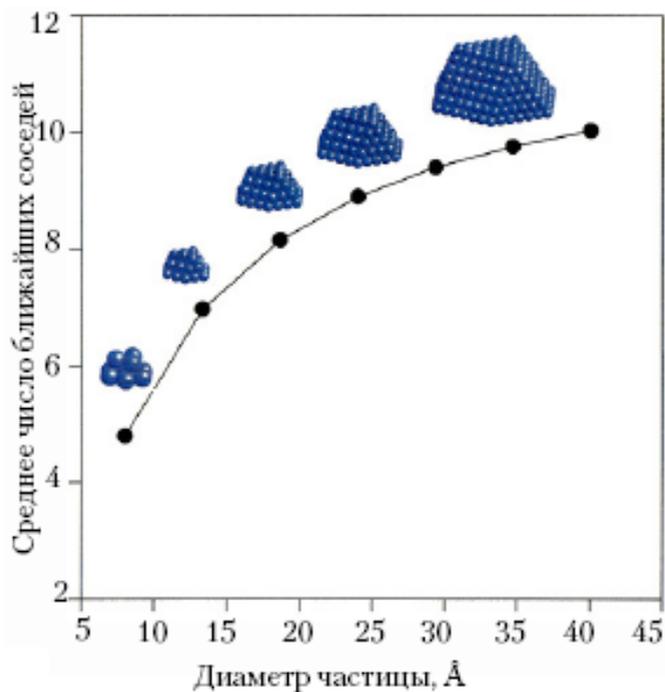


Рис. 2.2.1. Зависимость числа ближайших атомов от размера наночастицы.

На **рис. 2.2.2** представлена экспериментальная зависимость величины работы выхода электрона от размера наночастицы железа. Видно, что с увеличением размера наночастицы (т.е. числа атомов в ней), работа выхода падает, стремясь к предельному значению, соответствующему работе выхода для образцов макроскопических размеров. Такая зависимость работы выхода связана с тем, что минимальная энергия, необходимая для перевода атомного валентного электрона в зону проводимости, зависит не только от заряда атомного ядра и положения электрона в атоме. Чем больше вокруг соседних атомов, тем легче вырвать электрон из атома, так как ядра соседних атомов тоже притягивают его к себе. Этот же вывод справедлив и в том случае, если идет речь о вырывании электрона из частицы, а также и для ионизации самих атомов.

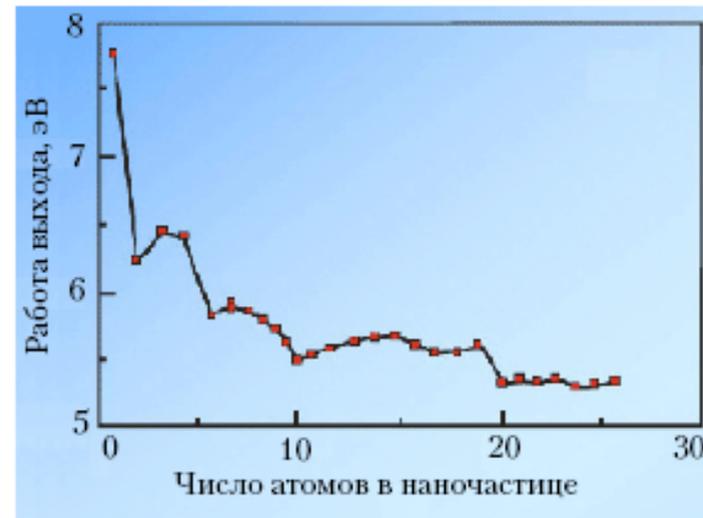


Рис. 2.2.2. Зависимость работы выхода электронов от числа атомов в наночастице.

Контрольные вопросы и задания

1. Какой смысл Вы вкладываете в понятие «число ближайших соседей» применительно к кристаллу?
2. По графику, приведенному на **рис. 2.2.1**, найдите отношение среднего числа ближайших соседей для наночастиц диаметром 10 нм и 40 нм.
3. Чем объясняется нелинейный характер зависимости работы выхода электрона от числа атомов?
4. Рассчитайте долю поверхностных атомов в кубической наноточке, на ребре которой укладывается 5 атомов.

2.2.2. Механическая прочность нанотрубок

Одним из таких важнейших физических свойств твёрдых тел является механическая **ПРОЧНОСТЬ – свойство под действием внешних нагрузок сопротивляться разрушению и необратимому изменению формы (так называемой ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ)**. На **рис. 2.2.3** показан образец цилиндрической формы с исходной длиной L_0 , который под действием растягивающей силы F удлиняется на величину $L-L_0$. На рисунке также представлена графическая зависимость механических напряжений $\sigma = F/S$, возникающих в образце, от относительной деформации, определяющая различные стадии деформации твердого тела. Стрелками указаны пределы прочности для трех материалов – титана, стали и бронзы.

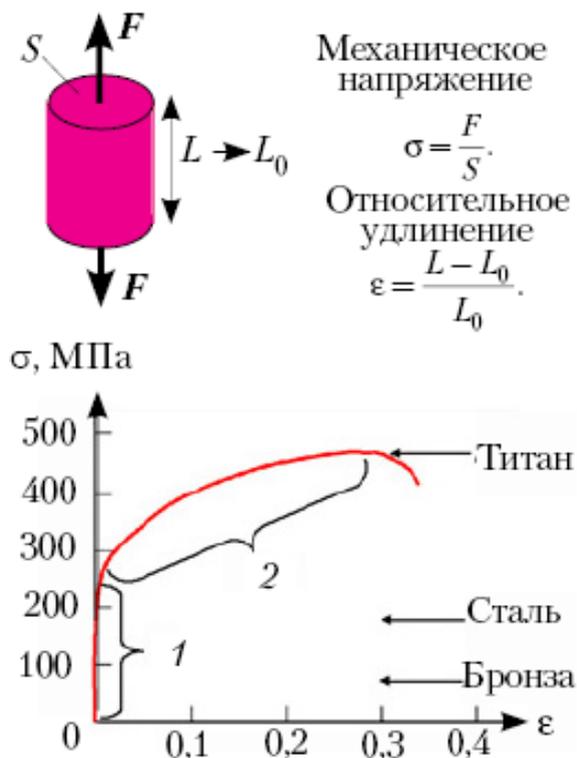


Рис. 2.2.3. Зависимость относительной деформации от механического напряжения.

Когда цилиндрический образец с поперечным сечением площадью S растягивают силой F , он на начальной стадии процесса растяжения деформируется упруго, т.е. с сохранением формы после снятия нагрузки (участок 1). Затем при увеличении нагрузки деформация становится пластической (участок 2). При дальнейшем увеличении нагрузки структурные неоднородности образца (дефекты кристаллической решётки или дислокации) начинают двигаться и, сталкиваясь с другими, образуют микротрещины. Чем больше дислокаций и чем быстрее они двигаются по образцу, тем больше микротрещин. Когда растягивающие напряжения достигают предела прочности материала, соседние микротрещины, объединяясь друг с другом, достигают критического размера, после чего образец разрушается, распадаясь на части.

НАНОТРУБКАМИ или **НАНОПРОВОЛОКАМИ** называют одномерные наноструктуры из металла, полупроводника или диэлектрика, диаметр которых составляет несколько десятков нанометров и менее. Длина таких нанотрубок часто может превышать их диаметр в 1000 и более раз. Их чрезвычайно малый диаметр (около 100 размеров атома) позволяет проявляться различным квантово-размерным эффектам, ввиду чего нанотрубки иногда называют **квантовыми проволоками**. В лабораториях такие структуры чаще

всего получают методом послойного наращивания (эпитаксии), при этом кристаллизация вещества происходит только в одном направлении, что приводит к росту нанотрубки. Например, нанотрубку из кремния можно вырастить так, как это схематически показано на рис. 2.2.4. Для этого наночастицу золота помещают в атмосферу газа силана (SiH_4), и при высокой температуре она становится катализатором реакции распада силана на водород и жидкий кремний. Жидкий кремний скатывается с золотой наночастицы и кристаллизуется под ней. Если концентрация силана вокруг наночастицы поддерживается неизменной, то процесс эпитаксии продолжается, и всё новые слои жидкого кремния кристаллизуются на его уже затвердевших слоях. В результате нанотрубка из кремния растёт, приподнимая наночастицу золота всё выше и выше. Очевидно, что размер исходной наночастицы определяет диаметр нанотрубки. Справа на рисунке показана щётка из нанотрубок, выращенных аналогичным образом из оксида цинка (ZnO). Этот снимок сделан в сканирующем электронном микроскопе.

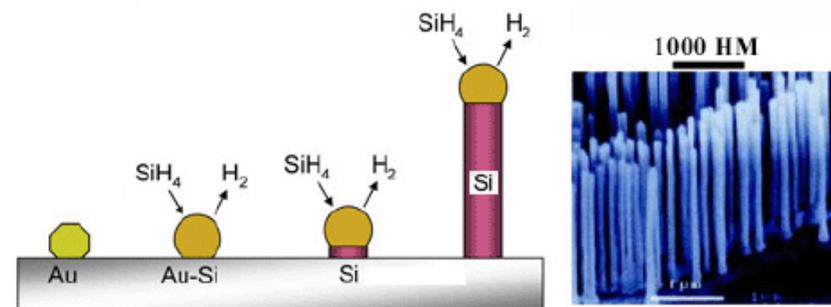


Рис. 2.2.4. Схема получения кремниевой нанотрубки (слева) и щётки из нанотрубок (справа).

Нанотрубка – это монокристалл, в котором практически отсутствуют дефекты (дислокации). Отношение числа поверхностных атомов к числу атомов, находящихся в объёме, для нанотрубок гораздо больше, чем для обычных образцов, поэтому поверхность легко «поглощает» выходящие наружу дислокации, не образуя микротрещин. Кроме того, поверхность нанотрубки, имеющая чрезвычайно малый радиус кривизны (около 10 нм), сильно сжата и поэтому препятствует движению дислокации наружу, следовательно, и образованию микротрещины. Всё это приводит к тому, что у нанотрубок почти отсутствуют пластические деформации, а предел прочности в десятки раз выше, чем у обычных образцов. При этом предел прочности нанотрубки растёт с уменьшением диаметра.

Рассмотрим теперь прочность одностенной **углеродной нанотрубки**. Пусть один ее конец закреплен, а к другому концу приложена растягивающая сила F . В нанотрубке атомы углерода, как правило, образуют между собой одинаковые С-С связи, углы между которыми равны 120° . Синими отрезками на рис. 2.2.5 обозначены связи, ориентированные вдоль оси трубки

и направления действия растягивающей силы F . Именно эти связи в первую очередь будут испытывать разрыв, а при растяжении нанотрубки они будут деформироваться одинаково. Расчёты показывают, что одна связь рвётся, если приложенное к ней усилие достигает значения $F_1 \geq 3,8 \text{ нН}$. Известно, что расстояние между ближайшими атомами углерода в нанотрубке приблизительно равно $a = 0,15 \text{ нм}$. Легко показать, что если диаметр трубки равен d , то число параллельных оси С-С связей в одном поперечном сечении трубки, ориентированных вдоль оси трубки, равно $N = \pi D / 1,73a$. При этом к каждой такой связи приложена сила, равная F/N . Нанотрубка разорвётся, когда растягивающая трубку сила F станет больше $3,8\pi \cdot N \text{ нН}$. Пусть диаметр нанотрубки $d = 1,5 \text{ нм}$. Из приведенных рассуждений следует, что $N = 18$ и нанотрубка разорвётся при $F_{\max} \approx 69 \text{ нН}$. Чтобы вычислить возникающие при этом напряжения σ_{\max} нанотрубки, разделим F_{\max} на площадь поперечного сечения $S = \pi d^2/4$, в результате чего для предела прочности получаем $\sigma_{\max} \approx 39 \text{ ГПа}$. Полученное значение предела прочности нанотрубки довольно близко к максимальным экспериментально полученным величинам (63 ГПа). Как и следовало ожидать, это значение гораздо больше предела прочности самых лучших сортов стали (0,8 ГПа). Отметим также, что у многостенных нанотрубок предел прочности будет в несколько раз выше!

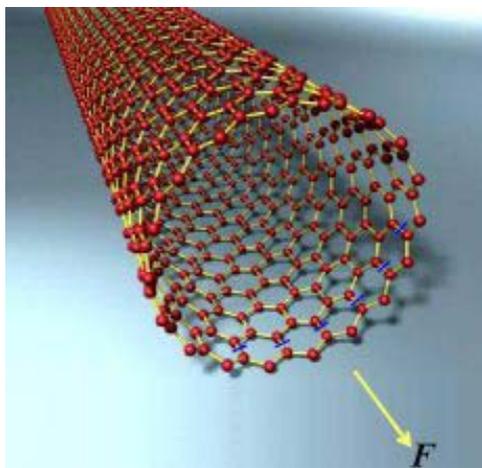


Рис. 2.2.5. Углеродная нанотрубка, для которой предел прочности $\sigma_{\max} \approx 39 \text{ ГПа}$.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему значение предела прочности углеродной нанотрубки гораздо больше предела прочности самых лучших сортов стали?
2. Покажите, что число С-С связей (т.е. связей соседних атомов углерода), ориентированных вдоль оси углеродной нанотрубки, в одном ее поперечном сечении равно $N = \pi D / 1,73a$, где D – диаметр трубки, а a – расстояние между соседними атомами.

3. Расстояние между ближайшими атомами углерода в нанотрубке равно $a = 0,15 \text{ нм}$. При этом к каждой такой связи приложена сила, равная F/N . Нанотрубка разорвётся, когда растягивающая трубку сила F станет больше $3,8 \cdot N \text{ нН}$. Вычислите возникающее при этом механическое напряжение.

2.2.3. Температура плавления наночастиц

Особые условия для атомов на поверхности кристаллов приводят к тому, что атомы нескольких поверхностных слоев «разрывают» связь с соседними атомами и становятся подвижными. В совокупности эти слои представляют из себя тонкую плёнку жидкости на поверхности кристалла. Толщина этой плёнки растёт с температурой, так как более высокая тепловая энергия молекул приводит к разрушению кристаллического состояния у все большего числа поверхностных слоёв. Теоретические оценки и эксперименты показывают, что как только толщина жидкой плёнки на поверхности кристалла начинает превышать 1/10 размера кристалла, кристаллическая решётка разрушается не только на поверхности, но и в объеме, и вещество переходит в жидкое состояние. Кстати, лёд является скользким по той причине, что разрушение кристаллического состояния у поверхностных слоев для кристаллов льда происходит при не очень высоких температурах (по сравнению, например, с металлами).

Так как у наночастиц очень велика доля поверхностных слоев и эти слои переходят в жидкое состояние при более низких температурах, чем вещество в объеме кристалла, то это существенно сказывается на температуре плавления наночастицы в целом. Именно поэтому температура плавления наночастиц становится гораздо ниже, чем у образцов обычного размера. Так, температура плавления наночастиц алюминия с уменьшением их размеров до 4 нм падает на 140°C по сравнению с массивным материалом. Резкое падение температуры плавления, как правило, начинается с размеров наночастиц порядка 10-15 нм (рис. 2.2.6). В этой области зависимость температуры плавления от размера наночастицы носит экспоненциальный характер. Такая зависимость объясняется как проявлением квантовых эффектов, так и увеличивающимся влиянием поверхности. Аналогичные зависимости получены для многих металлов. Температура плавления наночастиц олова падает от 230°C до 130°C при уменьшении их диаметра до 8 нм. Чемпионом в этом виде стало золото, у него обнаружено самое большое падение температуры плавления (более чем на 500°C) при переходе от массивных образцов к наночастицам с размером 5 нм. Очевидно, что «легкоплавкость» наночастиц следует учитывать на любых нанопроизводствах. Известно, например, что размеры современных элементов электронных микросхем лежат в нанодиапазоне. Поэтому **пониже-**

ние температуры плавления кристаллических нанообъектов накладывает определённые ограничения на температурные режимы работы современных и будущих микросхем.

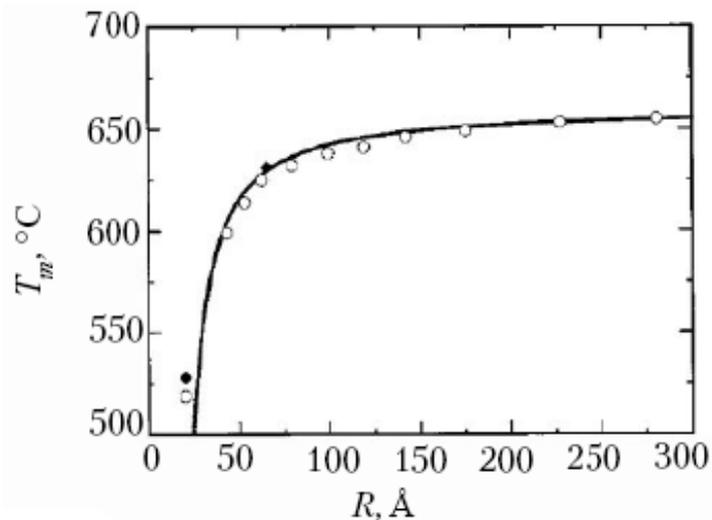


Рис. 2.2.6. Зависимость температуры плавления наночастиц алюминия T_m от их радиуса R (в ангстремах)

Контрольные вопросы и задания

1. Во сколько раз отличаются температуры плавления наночастиц алюминия с размером 20 нм и 5 нм?
2. Почему температура плавления наночастиц существенно ниже, чем у образцов обычного размера? Связано ли это с ролью поверхности или это скорее квантовое свойство?
3. Будет ли отличаться температура плавления тонкой пленки от температуры плавления объемного материала и наночастицы? Если будет, то при каких толщинах пленки?

2.2.4. Электросопротивление наноструктур

В наном мире изменяются не только механические и тепловые свойства веществ, но и их электромагнитные характеристики. Одним из удивительных свойств, обнаруженных в наноструктурах, является независимость электросопротивления от размеров и материала нанообъекта. Оказалось, что сопротивление цилиндрического нанорезистора нельзя вычислять по известной формуле $R = \rho l / S$, где ρ – удельное сопротивление материала резистора, l – длина, S – площадь поперечного сечения. Его сопротивление вообще не

зависит от входящих в эту формулу параметров, а определяется только двумя фундаментальными физическими константами – постоянной Планка и зарядом электрона, т.е.

$$R_0 = h / 2e^2 = \pi \hbar / e^2 = 12,9 \text{ кОм.} \quad (2.24)$$

Эта величина получила название *кванта электрического сопротивления*. Подобное поведение электрического сопротивления – не единственная особенность протекания тока в нанопроводнике. Оказалось также, что в нанорезисторе не выделяется *джоулево тепло*. Такую необычную *проводимость, не зависящую от длины резистора, площади его поперечного сечения и не сопровождающуюся выделением теплоты, назвали БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ*. Этим хотели подчеркнуть, что электроны, подобно выпущенным из орудия снарядам, движутся через нанорезистор, не сталкиваясь с его атомами, находящимися в узлах кристаллической решётки (баллистика – наука о движении артиллерийских снарядов, пуль и т.п.).

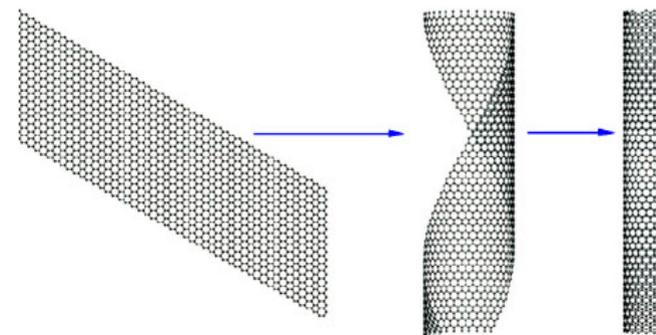


Рис. 2.2.7. Один из способов воображаемого изготовления нанотрубки

Примером нанорезисторов, обладающих баллистической проводимостью, являются углеродные нанотрубки диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров. На **рис. 2.2.7** представлен один из способов воображаемого изготовления нанотрубки из графена – мономолекулярного слоя графита. Способ сворачивания, т.е. задания угла между направлением оси нанотрубки и осями симметрии графена (т.е. угла закручивания), во многом определяет её свойства. В зависимости от этого угла нанотрубки могут обладать высокой проводимостью (как у металлов), а могут иметь свойства полупроводников.

Квантовая проводимость была открыта на углеродных нанотрубках при измерении зависимости их сопротивления от размеров. Диаметр нанотрубок менялся от 1,4 до 50 нм, а длина – от 1 до 5 мкм. Но, несмотря на такой большой разброс в размерах, сопротивление всех нанотрубок оказалось равным R_0 . Попробуем разобраться в этом явлении и получить из простых соображений выражение для кванта электрического сопротивления.

Электрический ток в проводнике создается дрейфовым движением свободных электронов, которые образуют внутри него так называемый ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ. Оценим величину среднего значения импульса одного из таких электронов. Ее можно найти из соотношения для средней тепловой энергии молекулы идеального газа:

$$E_T = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{3}{2} k_B T. \quad (2.25)$$

Подставляя в эту формулу значение комнатной температуры $T = 300$ К, получаем величину импульса $p \approx 1,1 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с. Как мы уже говорили, каждую частицу можно представить в виде волны де Бройля с длиной волны $\lambda_{Бр} = h/p$. Используя полученное значение импульса, для электрона проводимости получаем $\lambda_{Бр} \approx 6$ нм. Из этого следует, что в углеродных нанотрубках с диаметром в несколько нанометров для электронов проводимости наиболее существенными будут их волновые свойства! Поэтому через такие нанотрубки электроны будут проходить подобно световым волнам в световодах, т.е. без потерь. Таким образом, электричество в наном мире превращается в оптику, а джоулево тепло выделяется только на границах нанотрубки, где она соединяется с проводником обычных размеров.

Так как нанотрубка обладает баллистической проводимостью и джоулево тепло в ней не выделяется, можно считать, что её длина меньше длины свободного пробега электронов проводимости. Пусть между сечениями A и B нанотрубки (рис. 2.2.8) приложено напряжение U , а сила тока в ней равна I . Так как энергия не рассеивается, то изменение энергии ΔE электрона между сечениями A и B составляет $\Delta E = eU$. Это изменение энергии электрона происходит с ним за интервал времени Δt , равный времени пролёта между сечениями A и B . Соотношение неопределённостей Гейзенберга накладывает определённые ограничения на изменение энергии и временной интервал, т.е. $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$, откуда следует, что $U \approx h / e \Delta t$.

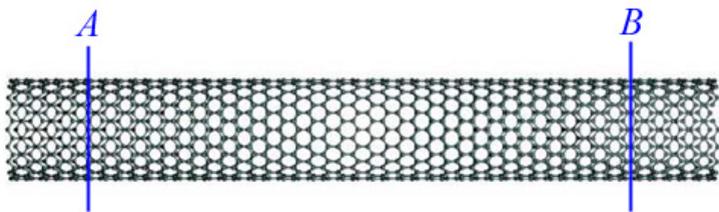


Рис. 2.2.8. К вычислению формулы для кванта сопротивления

Оценим теперь силу тока в нанотрубке. Для этого примем во внимание, что нанотрубка – одномерная квантовая структура и в ней, как в атоме гелия, могут уживаться только два электрона, имеющие противоположные направления спина. Это означает, что ток I между сечениями A и B нанотрубки равен $I = 2e/\Delta t$.

Из полученных соотношений получаем выражение для сопротивления нанотрубки между сечениями A и B

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{h}{2e^2} \quad (2.26)$$

Так как нагрев у нанотрубок отсутствует, они способны пропускать токи огромной плотности – более 10^7 А/см². Если бы у углеродных нанотрубок была обычная (не баллистическая) проводимость, то при токах аналогичной плотности их температура выросла бы до 20 000 К, что гораздо выше температуры их сгорания (700 К). Существование баллистической проводимости даёт зелёный свет инженерам, старающимся ещё и ещё уменьшить размеры электронных микросхем. Уменьшайте элементы микросхем до наноразмеров, и схемы перестанут нагреваться!

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните причину того, что электрическое сопротивление нанотрубок является независимым от сорта материала, длины резистора, площади его поперечного сечения.
2. Почему протекание тока по нанотрубке не сопровождается выделением теплоты и они способны пропускать токи большой плотности?
3. При каких критических температурах могут работать приборы, полностью изготовленные из углеродных нанотрубок?
4. К углеродной нанотрубке диаметром 10 нм приложили напряжение $U=1$ мВ. Рассчитайте скорость движения электронов в трубке, а также ток и плотность тока в ней.

2.2.5. Магнетизм наноструктур

Современная электроника основана на использовании направленного движения электронов, представляющего электрический ток. В каждой микросхеме в управляемом перемещении заряда принимают участие огромное число электронов, при этом все перемещения согласуются с законом сохранения электрического заряда. Именно на использовании электрического заряда держится все многообразие компьютерной техники и бытовой электроники. Но перечень физических характеристик электрона не ограничивается только его массой и электрическим зарядом. Одной из наиболее фундаментальных квантовых характеристик электрона также является его **спин**. Дадим некоторые пояснения этому термину.

Что такое спин? Понятие слова «спин», тесно связано с английским словом «spin» – вращение. Любое вращающееся вокруг фиксированной оси тело обладает моментом импульса относительно своего центра масс. Век-

тор момента импульса L такого тела параллелен оси вращения и направлен в сторону перемещения винта с правой резьбой при таком же направлении вращения. **Спиновый момент, или просто СПИН, элементарной частицы, атома или ядра является характеристикой, аналогичной моменту импульса вращающегося волчка. Спин электрона – это внутренняя характеристика электрона, имеющая чисто квантовую природу и не связанная с вращением электрона. Спин электрона может находиться в одном из двух состояний – либо «спин-вверх», либо «спин-вниз» (рис. 2.2.9).** Обычно электроны в веществе в отсутствие внешнего магнитного поля в среднем неполяризованы, т.е. электронов со спином вверх и со спином вниз примерно поровну. Если же электроны поместить в магнитное поле, то при нуле температур все они выстроятся своими магнитными моментами вдоль направления поля. При отличной от нуля температуре ориентированной по полю окажется большая часть электронов, а против поля – меньшая часть. Спин электрона измеряется в единицах постоянной Планка \hbar . Экспериментально установлено, что в этих единицах в соответствии с правилами квантовой механики наблюдаемые проекции спина электрона на заданное направление принимают одно из двух значений $L_z = \pm \hbar / 2$ Дж·с.

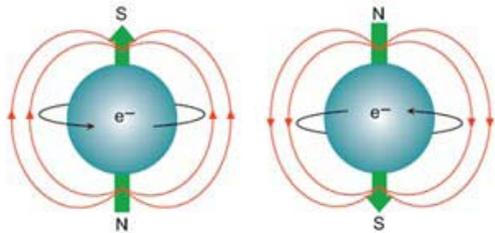


Рис. 2.2.9.

Наряду с механическим моментом электрон обладает собственным магнитным моментом, который противоположен по направлению спиновому моменту и связан с ним соотношением $\mu = -\gamma L$, где величина $\gamma = e / 2m$ называется ГИРОМАГНИТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ. Именно благодаря магнитному моменту электрон, независимо от его движения, взаимодействует с магнитным полем аналогично магнитной стрелке компаса. Магнитный момент электрона измеряют в единицах магнетона Бора $\mu_B = e\hbar / 2m = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Поскольку основным свойством электрона является то, что проекция его спина на любое направление может принимать всего два значения, т.е. у электрона имеется всего два возможных спиновых состояния, то одной из важнейших задач современной нанофизики является изучение возможностей их использования в информационных технологиях.

На современном уровне развития науки объяснить механизм возникновения у электрона спина невозможно, поэтому исследователи ограничиваются изучением его свойств. Одним из последних достижений науки в этом направлении можно считать получение физиками «фотографии»

спина атома. Несмотря на то, что спин является ключевой характеристикой квантовых частиц и используется в квантовой физике уже десятки лет, его изображение получено учеными впервые. Для этого физики использовали специально созданный сканирующий туннельный микроскоп, с помощью которого перемещали атомы кобальта по марганцевой подложке. Атомы кобальта при этом меняли свой спин и на изображениях четко видна зависимость высоты и формы пиков атомов от направления спинов (рис. 2.2.10). Исследования показали, что ученые могут наблюдать и управлять спинами атомов, что может привести к созданию электроники атомных размеров и новым направлениям спинтроники. Так, различные направления спина можно использовать для хранения и обработки информации, а вместо десятков тысяч атомов в ячейке памяти современного компьютера достаточно будет использовать один. Однако до практического применения полученных результатов пока далеко. Для этого необходимо научиться получать необходимый эффект при комнатной температуре, а не охлаждать пластину марганца жидким гелием до 10 К.

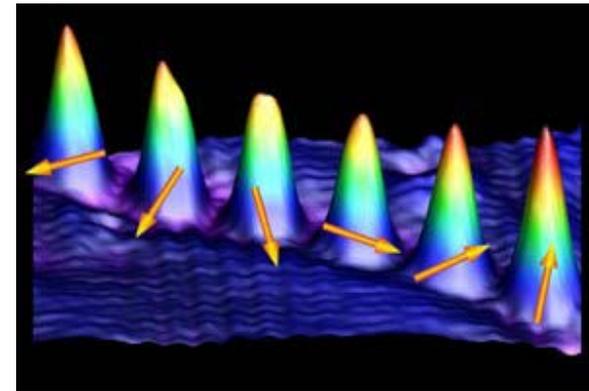


Рис. 2.2.10.

Гигантское магнитосопротивление. Всем знакомо явление электрического сопротивления материалов – способности мешать протеканию электрического тока. Если проводник с током поместить во внешнее магнитное поле, то оно лишь слегка изменит величину силы тока. Это можно интерпретировать так, словно **под действием магнитного поля изменилось электрическое сопротивление материала. Это изменение называется МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕМ (МС)**, оно было открыто 150 лет назад, когда люди еще толком не знали, откуда вообще берется сопротивление. Сама связь электрического тока и магнитного поля совершенно естественна и никого не удивляет. Между тем, за открытие **гигантского магнитосопротивления (ГМС)** Петеру Грюнбергу и Альберту Ферту в 2007 году была присуждена Нобелевская премия по физике. Важность их открытия заключалась в том, что за более чем вековую историю изучения электромагнитных явлений в самых разнообразных веществах величина МС никогда не превышала нескольких процентов. В обычных материалах большему МС неоткуда и взяться.

Лишь после того, как ученые научились создавать принципиально новые материалы, до которых природа не додумалась сама, стало ясно, что в них могут таиться физические явления, казавшиеся ранее невозможными. Наблюдение ГМС в новых слоистых материалах стало одним из ярчайших примеров того, как человек превзошел изобретательность природы.

Попытаемся представить, как ведут себя электроны проводимости, находясь в ферромагнитном металле (в никеле, железе, кобальте и др.). Магнитное поле внутри металла влияет на электроны, но влияет по-разному на электроны со спином по полю и против поля. В результате возникает несколько необычная картина. Электрический ток в ферромагнитном металле состоит из двух разных потоков электронов – со спином по направлению внутреннего магнитного поля и против него (внутреннее поле в магнетике определяется его магнитным моментом). Эти два потока электронов испытывают со стороны металла разное сопротивление. Те электроны, которые ориентированы против поля, двигаются более свободно, чем те, которые ориентированы по полю.

Подчеркнем, что в обычной медной проволоке такого разделения нет, эта картина специфична именно для ферромагнетиков, например для намагниченного куска железа. Итак, «внутренний мир» ферромагнетика оказывается очень богатым, но пока не видно способа им воспользоваться для манипуляции сопротивлением образца. Ведь если металл ферромагнитный, то он таким остается и при воздействии внешних полей, разве только у него может измениться направление намагниченности. Тут-то и пришли на помощь новые искусственные наноструктуры – **сверхрешетки**, не существующие в природе. Как оказалось, именно в них стало возможным управление не просто величиной намагниченности, а магнитной упорядоченностью, и с ее помощью – электрическим сопротивлением. **СВЕРХРЕШЕТКА (СР) – это слоеный кристалл, состоящий из строго чередующихся слоев то одного, то другого материала толщиной всего в несколько атомов. Приставка «сверх» отражает здесь наличие периодической структуры еще большего размера, чем период кристаллической решетки.** Изготовление таких структур технологически непростая задача. Их выращивают в глубоком вакууме, насылая на подложку слой за слоем нужное вещество. Оба типа вещества, а также сама подложка, должны обладать схожей кристаллической решеткой, иначе слойку перекорезит, а это самым негативным образом скажется на протекании через нее электрического тока. Кроме этого, надо следить, чтобы атомарные слои насылались ровно, чтобы не было бугорков и впадин и чтобы слои разных веществ ровно накрывали друг друга, не перемешиваясь.

Как только ученые научились изготавливать СР, они принялись экспериментировать с разными комбинациями материалов, в том числе и с чередующимися слоями ферромагнетика и немагнитного металла. В ходе этих исследований выяснилась одна интересная вещь. Если правильно подобрать толщину немагнитных слоев, то магнитные слои приобретут «противосто-

тельную» для ферромагнетика тенденцию чередовать ориентацию намагниченности в отсутствие внешнего поля (рис. 2.2.11, слева). Экспериментально доказать это оказалось совсем не просто.

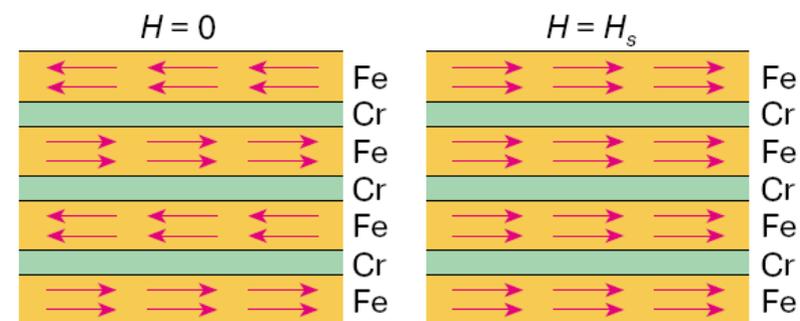


Рис. 2.2.11. Сверхрешетка (Fe/Cr) в отсутствие внешнего поля (слева) и в достаточно сильном внешнем поле (справа).

У авторов был шанс «проглядеть» это замечательное свойство СР «железо/хром». Исследователи одновременно изучали также и СР «железо/золото», но в них ничего подобного найдено не было. Если бы исследования ограничились только такими решетками, открытие эффекта, возможно, задержалось бы. Между тем, наличие зависимости ориентации магнитных моментов слоев от внешнего магнитного поля позволила экспериментаторам легко изменять тип магнитной упорядоченности.

Разберемся теперь с тем, что происходит с электрическим током, который течет сквозь такую СР поперек слоев. В отсутствие внешнего магнитного поля слои железа намагничены в чередующемся направлении. Двигаясь поперек, электроны со спином вверх чувствуют большое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вверх, но слабое сопротивление внутри слоев с магнитным полем вниз. Для электронов со спином вниз всё в точности наоборот. Поскольку и тех, и других слоев одинаковое число, то оба сорта электронов оказываются в равноправной ситуации. Если же приложить внешнее поле и выровнять намагниченность всех слоев, то электроны двух типов окажутся в разных условиях. Электроны, ориентированные по полю, во всех слоях испытывают большое сопротивление, то есть их вклад в ток уменьшится. В то же время электроны, ориентированные в противоположном направлении, испытывают во всех слоях маленькое сопротивление. Иными словами, для таких электронов слойка выглядит как короткое замыкание, и переносимый ими ток заметно возрастает. Во сколько раз уменьшится ток со спином по полю и увеличится ток со спином против поля, зависит от свойств вещества, но в любом случае увеличение пересилит уменьшение тока, и в результате суммарное сопротивление уменьшается. Иными словами, для таких электронов на СР происходит «короткое замыкание», и переносимый ими ток заметно возрастает. Во сколько именно раз уменьшится ток со спином по полю и увеличится ток

со спином против поля зависит от материалов слоев и их толщин. Но в любом случае увеличение тока пересилит его уменьшение, и в результате суммарное сопротивление уменьшается. Эту ситуацию легко объяснить с помощью простых рассуждений. Для этого необходимо представить, что два сорта электронов с противоположно направленными спинами создают токи, которые протекают по двум параллельным участкам цепи. Все наводящие соображения и обозначения показаны на **рис. 2.2.12**.

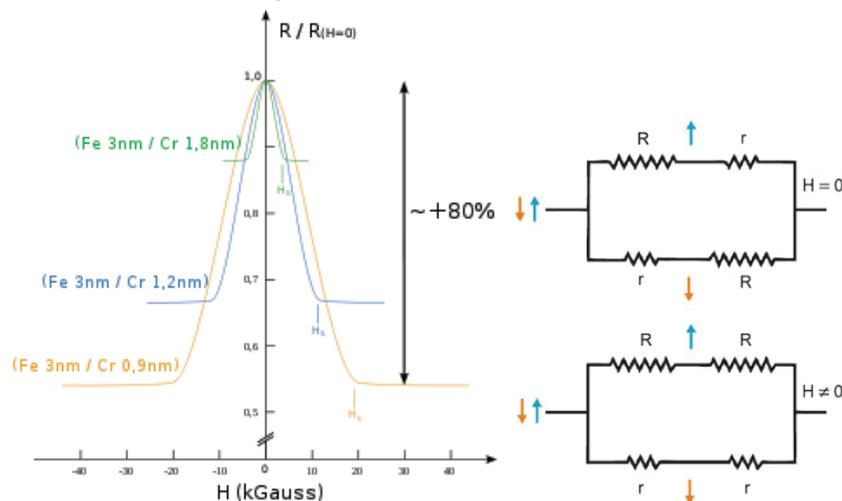


Рис. 2.2.12. Гигантское магнитосопротивление.

Первоначальные эксперименты показали уменьшение сопротивления образца почти в два раза. Правда, такой результат был достигнут лишь с использованием сильных магнитных полей и при очень низкой температуре, всего 4,2 градуса выше абсолютного нуля. Несколько лет исследований позволили добиться уменьшения сопротивления в два раза уже при комнатной температуре и гораздо меньших магнитных полях.

В заключение отметим следующее. Хотя явление ГМС формулируется чрезвычайно просто (электрический ток и магнитное поле – это классическая физика), однако реальные микроскопические причины, приводящие к такому интересному эффекту, очень непросты и опираются на квантовую физику. В этом эффекте проявляются основные положения квантовой физики, отличающие ее от классической – волновая природа и спин частиц. В последние годы идет накопление экспериментальных данных по другому не менее важному эффекту, который уже назвали **колоссальным магнитосопротивлением**. Это явление совсем иного уровня сложности, его детальное понимание пока ускользает от исследователей, но сенсоры на его основе уже запатентованы.

Контрольные вопросы и задания

1. Есть ли отличие в понятиях «спин» и «магнитный момент» электрона?
2. Что определяет гиромангнитное отношение электрона и чему оно равно?
3. В каком случае проявляются магнитные свойства электрона: при его вращении вокруг ядра атома или в любой ситуации?
4. Почему в магнитных сверхрешетках наблюдается гигантское магнитосопротивление, а в обычных кристаллах – нет?
5. Являются ли гетероструктуры сверхрешетками? Являются ли сверхрешетки гетероструктурами?

2.2.6. Цвет наночастиц

Нас окружают предметы обычных – макроскопических размеров, и мы привыкли к тому, что их цвет зависит только от свойств вещества, из которого они сделаны, или красителя, которыми они покрашены. Из курса обычной оптики следует, что свет не может чувствовать наночастицы, т.к. их размеры существенно меньше длины волны видимого света, лежащей в диапазоне 400–800 нм. Согласно волновой теории света, наночастицы не должны иметь тени, и свет от них не может отражаться. Сфокусировать видимый свет на площади, соответствующей нескольким нанометрам, тоже нельзя. В рамках классической оптики получается, что «увидеть» наночастицы невозможно.

Тем не менее, световая волна, как и любое электромагнитное поле, всё-таки должна действовать на наночастицы. Например, упав на полупроводниковую наночастицу, свет с частотой ω_1 может своим электрическим полем оторвать от одного из её атомов один из валентных электронов. Поглотив фотон с энергией $\hbar\omega_1 > \Delta E_g$, возбужденный электрон на некоторое время перейдет из валентной зоны в зону проводимости. За счет столкновений свободного электрона с ионами кристаллической решетки часть его энергии переходит в тепло, в результате чего электрон вначале переходит на дно зоны проводимости, а затем опять возвращается в валентную зону, испустив при этом квант света с энергией, соответствующей ширине запрещенной зоны, т.е. $\hbar\omega_2 = \Delta E_g$. На схеме, представленной на **рис. 2.2.13**, показано, как под действием синего света электрон отрывается от атома, в результате возбуждения переходит в зону проводимости. Через некоторое время он переходит на самый нижний энергетический уровень этой зоны и, испуская квант красного света, переходит обратно в валентную зону.

Таким образом, полупроводниковые наночастицы «чувствуют» падающий на них свет, испуская при этом свет меньшей частоты и большей длины волны. Другими словами, полупроводниковые наночастицы на свету могут люминесцировать, испуская свет строго определённой частоты, соот-

ветствующей ширине запрещенной зоны и размеру частицы (*под ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЕЙ понимают холодное свечение вещества, в отличие от всегда существующего теплового излучения, возбуждаемое светом или другими видами излучения*). В результате такого переизлучения «цвет» наночастиц будет зависеть от их размера. Как показывают квантовомеханические расчеты, ширина запрещенной зоны ΔE_g существенно зависит от размеров полупроводниковой частицы: с увеличением размера наночастицы величина ΔE_g уменьшается. Поэтому и длина волны люминесценции полупроводниковых наночастиц растёт с увеличением их диаметра, а энергия излучения, как и ширина запрещенной зоны, уменьшается. Процесс поглощения энергии фотонов веществом с последующим испусканием лучей с другой длиной электромагнитной волны известен достаточно давно как физическое явление – **ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ**, которая является частным случаем люминесценции. При этом испущенные лучи имеют большую длину волны, по сравнению с поглощёнными. Рассмотренное явление широко используется при изучении коллоидных растворов, созданных на основе микро- и наночастиц.

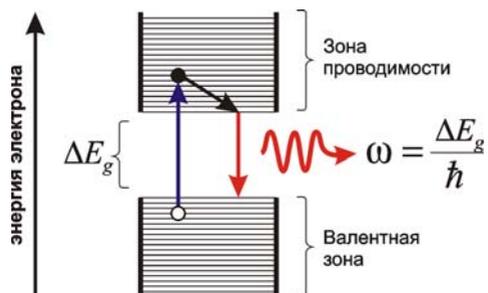


Рис. 2.2.13. Схематическое изображение переходов электрона и переизлучения им энергии

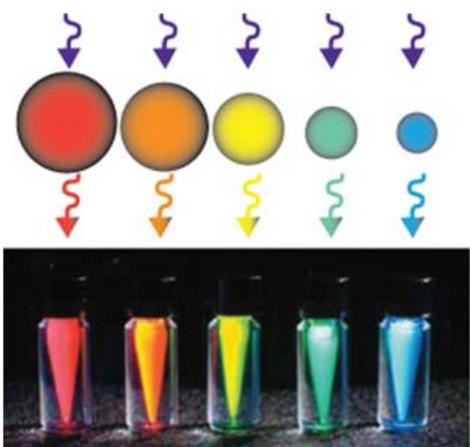


Рис. 2.2.14. Зависимость «цвета» квантовых точек от их размера и флуоресценция коллоидных растворов с наночастицами различного размера.

В качестве иллюстрации эффекта зависимости частоты переизлучаемого света от размера частиц, на рис. 2.2.14 показано, как цвет суспензии на основе коллоидных частиц CdTe меняется при изменении их диаметра от 2 до 5 нм (слева направо). Хотя все колбы освещаются светом одной длины волны (синим светом с $\lambda \approx 0,4$ мкм), видна зависимость цвета флуоресценции от размера наночастиц. При увеличении размеров наночастиц цвет флуоресценции меняется от зеленого к красному. Это означает, что ширина запрещенной зоны ΔE_g наночастиц и частота излучаемого ими света ω при переходе от колбы к колбе уменьшается, так как $\hbar\omega = \Delta E_g$.

Контрольные вопросы и задания

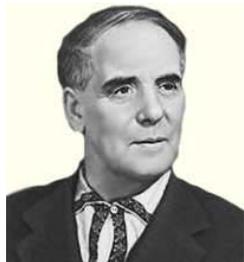
1. В чем состоит отличие спонтанного и индуцированного излучения? К какому из них относится люминесценция?
2. Чем можно объяснить, что с изменением размера частиц меняются их люминесцентные свойства?
3. На основе данных рис. 2.2.14 рассчитайте, как меняется ширина запрещенной зоны для наночастиц CdTe при изменении их размера от 2 до 5 нм, если длина волны свечения меняется от 550 нм до 780 нм.
4. Ознакомьтесь в Интернете с тем, какие виды люминесценции существуют и в чем их отличия?

2.2.7. Сверхнизкие температуры и нанобъекты

С тех пор как в 1848 году лорд Кельвин ввел понятие абсолютной температуры и абсолютного нуля, физиков не оставляло стремление приблизиться к заветной нулевой отметке, где должно прекратиться тепловое движение частиц. Интуиция подсказывала ученым, что здесь можно ожидать новых явлений и необычного поведения вещества. Через полвека после публикации работ Кельвина голландцу Камерлинг-Оннесу удалось получить температуру 4,2 К и обнаружить совершенно новое физическое явление – **сверхпроводимость**. Результат был поразительным: в сверхпроводящем состоянии электрическое сопротивление ртути не просто уменьшается, а становится точно равным нулю. Поэтому ток в сверхпроводящем кольце может беспрепятственно течь сколь угодно долго.

В конце 30-х годов советский физик П. Капица обнаружил, что жидкий гелий, охлажденный до 2,2 К, теряет свои вязкие свойства и свободно проникает через любые самые маленькие отверстия. Отметим, что гелий – единственное известное вещество, которое еще остается жидким при таких низких температурах. Новое необычное свойство жидкого гелия было названо **сверхтекучестью**. Оба явления – сверхпроводимость и сверхтекучесть не могли быть объяснены на основе общепринятых классических представле-

ний. Стало ясно, что низкие температуры оказались окном в новый квантовый мир. Ведь когда практически прекращается хаотическое тепловое движение атомов, молекул и электронов, на первый план выходят квантовые свойства вещества. И действительно, только с помощью квантовой физики ученым удалось в конце концов объяснить, почему материалы так радикально меняют свои свойства при сверхнизких температурах.



Пётр Леонидович Капица (1894–1984) – российский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (за 1978 год) за фундаментальные открытия в области физики низких температур. С 1921 по 1935 год работал под руководством Резерфорда в знаменитой Кавендишской лаборатории в Великобритании. С 1934 по 1984 год – директор организованного им Института физических проблем Академии наук СССР. Один из основателей знаменитого Московского физико-технического института

Природа сверхпроводимости. Переход металла в особое, сверхпроводящее состояние происходит ниже определенной температуры $T_{кр}$, называемой критической. Возникновение сверхпроводящего состояния принято объяснять появлением особого вида носителей электрического заряда – не отдельных электронов, а связанных электронных пар с зарядом каждой пары $2e$, образуемых при $T < T_{кр}$. Объединение двух электронов в пару вызвано поляризацией кристаллической решетки, которая приводит к эффективному притяжению между двумя электронами в том случае, если они движутся в противоположных направлениях и спины отдельных электронов противоположно направлены (спин каждой пары равен нулю). На **рис. 2.2.15** показано, как за движущимся электроном из-за притяжения к нему положительных ионов кристаллической решетки образуется локальная область избыточного положительного заряда, который создаёт притягивающий потенциал для другого электрона. Когда в образовавшуюся потенциальную яму попадает другой электрон, то его потенциальная энергия понижается, и между парой электронов возникают силы притяжения. При этом притяжение возникает только тогда, когда электроны движутся в разные стороны. Кроме того, для образования пары электронов их спиновые моменты должны быть противоположно направленными, т.е. антипараллельными.

Таким образом, **два электрона с противоположными спинами и направлениями движения объединяются в пару, получившую название КУПЕРОВСКОЙ ПАРЫ** (по имени американского физика Л. Купера, одного из авторов теории сверхпроводимости, созданной в 1957 году). Энергия связи такой пары электронов имеет порядок $2\Delta \approx 10^{-3}$ эВ. Эти пары обладают нулевым суммарным спином и именно поэтому обладают одним замечательным свойством: при температуре ниже $T_{кр}$ они могут скапливаться на самом нижнем энергетическом уровне. Чем больше их там соберется, тем труднее

какой-либо частице выйти из этого состояния. Для этого необходимо преодолеть энергетический барьер величиной $N \cdot \Delta$, где N – число свободных электронов в сверхпроводнике (т.е. по Δ на каждый электрон). Интересно, что характерное расстояние между двумя связанными электронами, т.е. размер куперовской пары, различно для разных сверхпроводников и может принимать значения от 1 до 100 нм (при том, что расстояние между соседними электронами и ионами имеет порядок 0,1 нм). Подчеркнем еще раз, что именно целое значение спина (а не полуцелое, ноль – это целое число) каждой пары делает возможным переход металла из нормального состояния в сверхпроводящее.

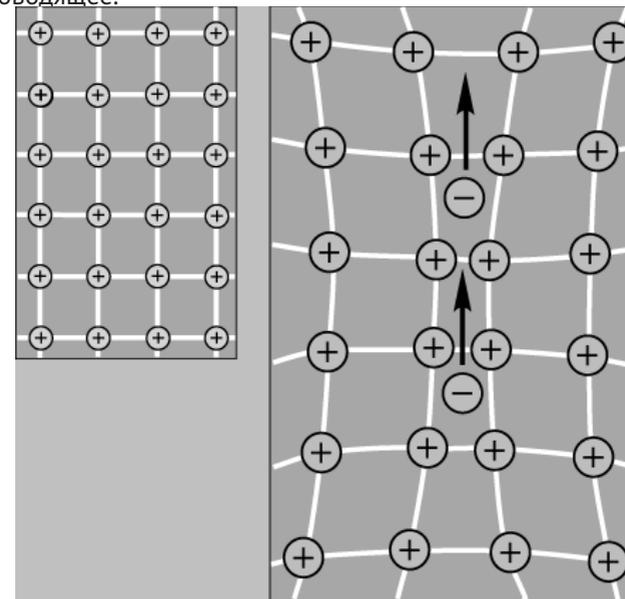


Рис. 2.2.15. Образование в кристаллической решётке локального избыточного положительного заряда при прохождении электрона

Электрический ток, возникающий в замкнутой цепи при $T < T_{кр}$, переносится куперовскими парами, то есть элементарными носителями тока с зарядом $2e$. Одной паре совсем не просто рассеяться на примесном атоме или каком-либо другом дефекте кристаллической решетки металла, включая тепловые колебания ионов. Для этого ей нужно вырваться из синхронизированного движения всего ансамбля скоррелированных куперовских пар, на что требуется определенная энергия. Поэтому **сверхпроводящий ток является незатухающим. Такой ток принято называть СВЕРХТОКОМ.** Разрушить сверхтоковое состояние можно только повысив температуру выше $T_{кр}$, либо поместив цепь в магнитное поле, индукция которого выше $B_{кр}$.

Одним из наиболее интересных явлений, имеющих место в сверхпроводящем состоянии, является **квантование магнитного потока**. Так как

электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю, то возбужденный в сверхпроводящем кольце электрический ток будет существовать бесконечно долго. В этом случае ток в кольце напоминает ток, создаваемый электроном на орбите в атоме, это как бы очень большая **боровская орбита**. Незатухающий ток и создаваемое им магнитное поле (рис. 2.2.16) не могут иметь произвольную величину. Обе эти величины квантуются так, что **магнитный поток**, пронизывающий кольцо, принимает значения, кратные элементарному кванту потока Φ_0 , т.е. $\Phi = n \Phi_0$, где n – целое число, а $\Phi_0 = \pi \hbar / e = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Тл · м².

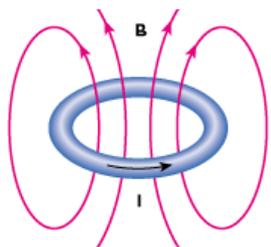


Рис. 2.2.16. Незатухающий ток и создаваемое им магнитное поле в сверхпроводящем кольце

В 1925 году Эйнштейн, развивая идеи индийского физика Бозе, выдвинул смелую гипотезу о поведении вещества при сверхнизких температурах и предсказал новое явление, которое позже получило название **конденсации Бозе–Эйнштейна**. Представим себе молекулы газа в сосуде, хаотически движущиеся в разных направлениях с разными скоростями. Чем ниже становится температура, тем медленнее и медленнее передвигается большая часть молекул и тем больше частиц вообще останавливается. Понижение температуры газа до температур, близких к абсолютному нулю, может в конце концов привести к тому, что подавляющее число частиц перестанет двигаться. Это состояние и было названо **конденсатом**.

На первый взгляд кажется, что здесь нет ничего необычного. Всем известно, что средняя скорость движения молекул связана с температурой соотношением $\langle v \rangle = \sqrt{3k_B T / m}$. И то, что молекулы при очень низкой температуре практически останавливаются, вовсе не противоречит нашим обычным представлениям. Но с точки зрения квантовой физики это совершенно особое состояние. Частицы конденсата с одинаковой нулевой скоростью принципиально неразличимы, они имеют одинаковую массу, энергию, заряд и все прочие параметры. Более того, все они одновременно находятся в одном и том же месте, и каждая из них, обладая волновыми свойствами, «размазана» по всей области пространства, которую занимает конденсат. Такое состояние физики называют **когерентностью**. Поэтому бозе-эйнштейновский конденсат – это не просто замершие в неподвижности атомы. Он отличается от обычного охлажденного газа так же, как луч лазера отличается от света обычной лампочки накаливания.

Долгое время наблюдать подобное явление никому не удавалось. Однако для объяснения других необычных свойств веществ при низких температурах эта теория пришла как нельзя кстати. В 1938 году Ф. Лондон предположил, что наблюдаемая в гелии сверхтекучесть не что иное, как следствие бозе-эйнштейновской конденсации. А еще через двадцать лет после этого на основе теоретических соображений о конденсате в системе электронных пар была построена теория сверхпроводимости. Но можно ли непосредственно наблюдать бозе-эйнштейновскую конденсацию обычного газа?

Вопрос оставался открытым почти семьдесят лет. Чтобы ответить на него утвердительно, пришлось охладить газ до фантастических температур, всего на миллиардные доли градуса выше абсолютного нуля температур (достижение которого, как следует из второго начала термодинамики, запрещено). В 1995 году американские ученые провели удачные эксперименты и сообщили о наблюдении нового экстремального состояния вещества. Вначале они получили бозе-эйнштейновский конденсат для почти двух тысяч атомов рубидия при температуре 20 нК, а затем им удалось наблюдать конденсат из ста тысяч атомов натрия.

Как часто бывает в экспериментальной физике, работая на пределе возможностей, ученые проявляют чудеса изобретательности. Вот и на этот раз, чтобы увидеть газ в состоянии бозе-эйнштейновской конденсации, им потребовалось решить ряд занимательных задач. Для начала пришлось сделать газ из металла (рубидия или натрия) и умудриться охладить его так, чтобы он не перешел в твердое состояние. При таких низких температурах газ чрезвычайно неустойчив и при любом взаимодействии с окружающим миром стремится стать твердым. Тут решение было очевидно – магнитная ловушка, где вещество удерживается магнитным полем. В такой ловушке можно достаточно долго хранить газ в холодном состоянии. В ней нет никакого взаимодействия со стенками сосуда, поскольку нет стенок. Более того, изменяя магнитное поле, можно управлять поведением атомов газа. Чтобы пролетающие посторонние молекулы случайно не разрушили такую систему, ловушка с атомами помещалась в вакуумную установку. Каким образом происходит охлаждение газа до сверхнизких температур – это достаточно сложная проблема и объяснение методов ее решения выходит за рамки нашей книги. Надо отдать должное искусству экспериментаторов. Им не только это удалось, но они сохранили при этом достаточное количество атомов, чтобы увидеть завораживающую картину бозе-эйнштейновской конденсации, которая представлена двумя фотографиями на рис. 2.2.17.

Последние годы усилия ученых сосредоточены не только на фундаментальных исследованиях бозе-эйнштейновского конденсата, но и на практическом его использовании. Мы уже говорили о том, что конденсат, как и лазерный луч, обладает когерентностью (т.е. тождественностью всех своих элементов). Поэтому устройство, которое будет испускать когерентный пучок атомов в состоянии бозе-конденсата, получило название **«атомный лазер»**.

В 1999 году ученые уже продемонстрировали устройство, где испускался когерентный пучок атомов рубидия длительностью около 100 мс (рис. 2.2.18). Такой пучок ультрахолодных атомов удается сфокусировать в точку с размером в одну миллионную долю миллиметра. Это позволяет буквально «выкладывать» из атомов тончайшие конструкции и создавать различной конфигурации наноструктуры.

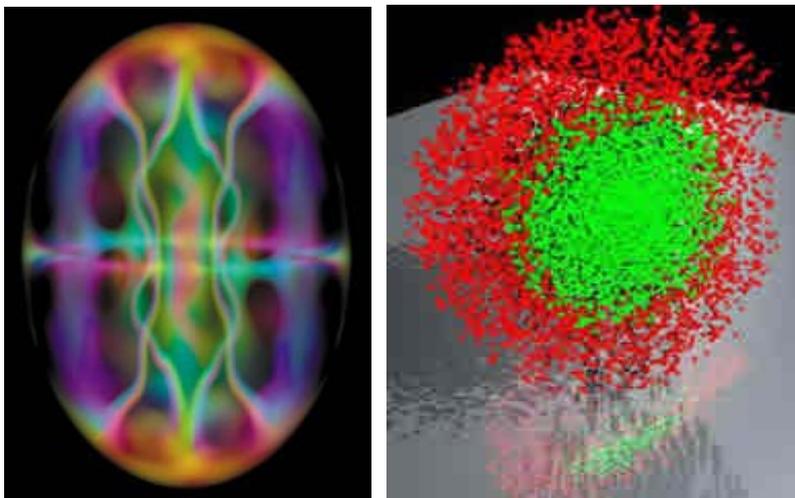


Рис. 2.2.17. Бозе-эйнштейновский конденсат в магнитной ловушке

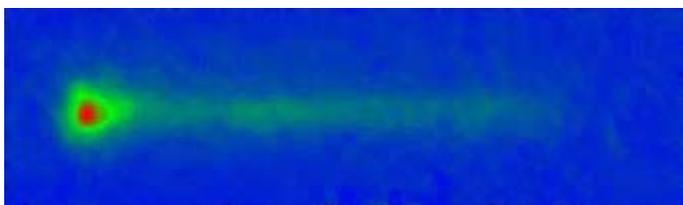


Рис. 2.2.18. Луч атомного лазера

В настоящее время атомные лучи уже используются в ряде научных и промышленных приборов, в частности, в атомных часах, в высокоточных измерительных инструментах для определения фундаментальных констант и в производстве компьютерных чипов. Однако можно предположить, что широкое внедрение атомных лазеров займет довольно долгое время, судя по тому, что между изобретением оптического лазера и его повсеместным применением в бытовой технике прошло 30 лет. Основная проблема использования атомного лазера заключается пока что в том, что его луч может распространяться только в вакууме. Среди научно прогнозируемых сфер применения атомного лазера – **атомная голография**. Теоретически возмож-

но создание в будущем атомно-лазерных принтеров и факсов, которые позволят распечатывать и передавать на большие расстояния не плоские изображения объектов, но их материальные трехмерные модели.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом два отрицательно заряженных электрона могут перейти в связанное состояние и образовать куперовскую пару?
2. Чем Вы можете объяснить отсутствие электрического сопротивления у металлов при температуре ниже критической, т.е. в сверхпроводящем состоянии?
3. Объясните природу квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце. Какой формулой определяется магнитный поток кольца с током?
4. Оцените средний магнитный поток, пронизывающий первую бордовскую орбиту атома водорода, считая, что ток создается движением электрона на этой орбите.
5. В чем схожесть явлений сверхтекучести и сверхпроводимости?
6. Какой основной особенностью обладает бозе-эйнштейновский конденсат?

ГЛАВА 2.3.

Наноэлектроника

Современный уровень развития науки и техники неразрывно связан с тенденциями уменьшения размеров объектов, инструментов и приборов, используемых человеком. Например, широко известные электронные приборы, такие как мобильные телефоны, коммуникаторы, карманные персональные компьютеры, индивидуальные медицинские аппараты и многое другое, которые еще несколько лет назад казались просто фантастическими, сегодня прочно вошли в жизнь современного человека. Это стало возможным благодаря тому, что современная наука обратила более пристальное внимание на объекты, размеры которых составляют несколько микро- и даже нанометров. При использовании этих объектов в электрических схемах и приборах сформировалось новое направление электроники сверхмалых размеров.

2.3.1. Наноэлектроника и тенденции ее развития

НАНОЭЛЕКТРОНИКА – это область электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем с размерами элементов менее 100 нм. Основная задача наноэлектроники состоит в создании новых миниатюрных электронных устройств и разработке методов их объединения в интегральные схемы. Научные исследования в наноэлектронике охватывают различные области знаний: физику, электронику, механику, химию, материаловедение, биологию, медицину. Для создания приборов наноэлектроники необходимо развивать технологии, в которых интегрируются средства и методы современной науки и техники. Уменьшение размеров элементов современных интегральных схем лежит в основе прогресса всей технологии.

Развитие современной электроники осуществлялось в результате последовательных переходов от электротехнических компонентов – к электронным лампам, от ламп – к транзисторам, от транзисторов – к интеграль-

ным схемам. Каждый из этих переходов означал не только изменение технологии, но и появление новых изменений в физике, технике и обществе. **Процесс постоянного уменьшения размеров элементов интегральных схем описывается известным ЗАКОНОМ МУРА – эмпирическим наблюдением, сделанным Г. Муром в 1965 году. В соответствии с этим законом плотность компоновки электронных компонентов удваивается приблизительно каждые полтора–два года, что приводит к соответствующему росту мощности вычислительных средств и их производительности.** Очевидно, что указанная закономерность не может действовать бесконечно долго, так как непрерывное уменьшение размеров электронных изделий должно все-таки когда-то закончиться. Это должно произойти, так как существуют принципиальные ограничения дальнейшего уменьшения размеров, имеющие квантово-физическую природу.

Тем не менее, в настоящее время тенденция миниатюризации в электронике не сбавляет своего темпа. Создаются новые типы электронных элементов со сверхмалыми размерами, которые и составят в ближайшем будущем элементную базу наноэлектроники. Для знакомства с такими элементами обратимся к наиболее важным эффектам в современной физике, на базе которых реализуются приборы, отличающиеся по принципам работы от существующих полупроводниковых диодов и транзисторов.

Контрольные вопросы и задания

1. Что Вы относите к области науки и техники, которая названа наноэлектроникой?
2. Найдите в сети Интернет примеры наноэлектронной продукции.
3. Какой смысл вкладывается в закон Мура?
4. Используя закон Мура, оцените количество транзисторов и их минимальные геометрические размеры, которые могут быть достигнуты в 2030 году.

2.3.2. Одноэлектронное туннелирование

Одноэлектронный транзистор. В середине прошлого века был изобретен плоскостной полупроводниковый триод, получивший название транзистора и представляющий собой комбинацию двух близко расположенных друг к другу *p-n*-переходов. Размер подобного транзистора сравним с размером «спичечной головки», а энергия питания намного меньше энергии, потребляемой вакуумными лампами. Это привело к революции в электронике, которая в то время базировалась, в основном, на электронно-вакуумных приборах. В 1986 году советскими учеными **К. Лихаревым** и **Д. Авериним** было предложено устройство, которое получило название – **ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР**. Это устройство представляет собой трехвыво-

дной переключающий прибор, в котором электроны «поштучно» переносятся от истока к стоку через разделяющую их квантовую точку, электронные состояния в которой электростатически контролируются затвором. Работа одноэлектронного транзистора основана на эффекте так называемой **кулоновской блокады**. Данный эффект обусловлен отталкиванием электронов в контактах от электрона, находящегося на нанообъекте (квантовой точке), а также дополнительным кулоновским потенциальным барьером, который создает электрон, закрепившийся на квантовой точке. Кулоновский барьер препятствует вылету электрона из квантовой точки, а также попаданию новых электронов на нее. При этом электрический ток в цепи может протекать лишь порциями, отвечающими прохождению единичных электронов.

Рассмотрим более подробно конструкцию и принцип работы одноэлектронного транзистора (рис. 2.3.1). Так же как и любой полупроводниковый транзистор, он имеет три электрода, называемые истоком, стоком и затвором. В области между электродами располагается металлическая или полупроводниковая наночастица (квантовая точка), изолированная от электродов диэлектрическими прослойками, через которые и могут при определенных условиях проходить одиночные электроны. Если приложить напряжение между истоком и стоком транзистора, то ток протекать не будет, поскольку электроны в данный момент заблокированы на наночастице. Для появления тока необходимо увеличить потенциал на управляющем электроде – затворе. Только когда потенциал на затворе станет больше некоторого порогового значения, блокада прорывается, электрон получает возможность пройти через барьер, и в цепи исток-сток начинает протекать электрический ток. Таким образом, управляя потенциалом на затворе, можно пропускать через барьеры одиночные электроны. Количество электронов в наночастице должно быть не более 10 (желательно и меньше), что может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 10 нм.

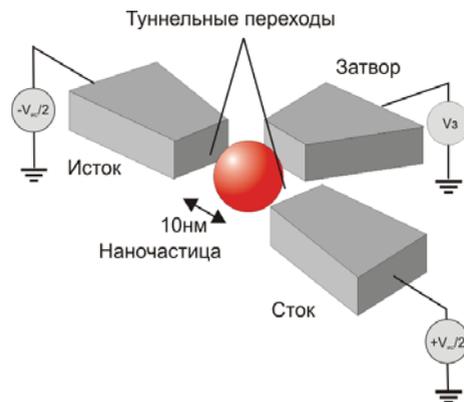


Рис. 2.3.1. Схема одноэлектронного транзистора

Рассмотрим квантовые состояния электрона при разных потенциалах на затворе. В заблокированном состоянии у электрона на истоке нет доступных энергетических уровней в пределах диапазона туннелирования (красная точка на рис. 2.3.2). Все уровни с меньшей энергией на острове заняты. Когда к затвору прикладывается положительный потенциал, энергетические уровни на наночастице понижаются. Электрон в состоянии 1 может туннелировать через потенциальный барьер на наночастицу (в состояние 2), занимая свободный энергетический уровень. Отсюда он может протуннелировать на сток (в состояние 3), где он **неупруго рассеивается и достигает на нём уровня Ферми** (состояние 4). Энергетические уровни на наночастице распределены практически равномерно с расстоянием между ними ΔE . Для попадания на наночастицу каждому последующему электрону необходима энергия ΔE . Так как наночастица обладает ёмкостью C , то чем ниже C , тем больше ΔE . При этом для преодоления кулоновской блокады и успешной работы всего устройства необходимо выполнение важных двух условий. Во-первых, тепловая энергия электрона $k_B T$ должна быть ниже энергии зарядки наночастицы $E_C = e^2/2C$, так как в противном случае электрон должен пройти квантовую точку за счёт теплового возбуждения. Во-вторых, сопротивление туннелирования $R_{\text{тун}}$ должно быть больше кванта сопротивления h/e^2 , которое вытекает из принципа неопределенностей.

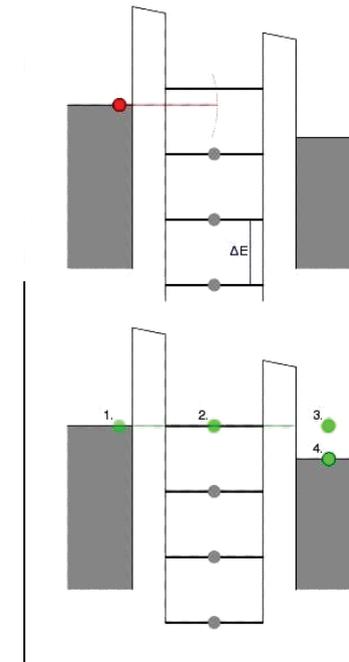


Рис. 2.3.2. Схема энергетических уровней одноэлектронного транзистора.

В цифровых интегральных схемах на одноэлектронных транзисторах один бит информации (два возможных состояния 0 и 1), может быть представлен как присутствие или отсутствие одного электрона на наночастице. Простые оценки показывают, что созданная на основе таких транзисторов память емкостью 10^{12} бит (это в 1000 раз больше, чем у современных сверхбольших интегральных схем) может разместиться на кристалле площадью всего около 7 см^2 . Над практической реализацией такой памяти сегодня активно работают специалисты во всем мире.

Одноэлектронная ловушка. Различные одноэлектронные приборы можно получить при увеличении количества туннельно-связанных наностроек. Один из таких приборов – одноэлектронная ловушка. Главное свойство данного прибора – бистабильная или мультистабильная внутренняя зарядовая память. У одноэлектронной ловушки (рис. 2.3.3) в пределах некоторого диапазона напряжения, прикладываемого к затвору, один из наностроек (обычно ближайший к затвору) может быть в одном, двух или более устойчивых зарядовых состояниях, т.е. содержать один или несколько электронов. На этой основе уже сегодня создаются различные логические элементы, которые в ближайшем будущем могут стать элементной базой нанокomпьютеров.

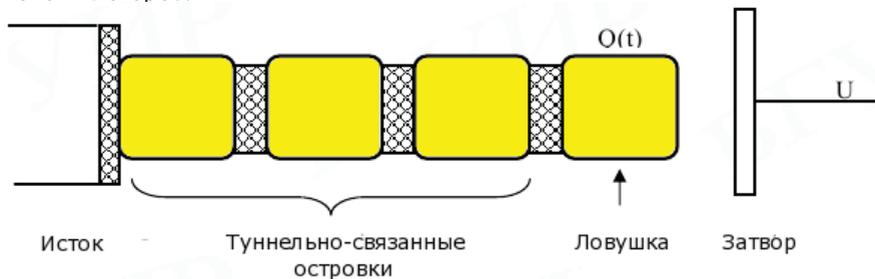


Рис. 2.3.3. Одноэлектронная ловушка

Контрольные вопросы и задания

1. Что представляет собой структура одноэлектронного транзистора, каков принцип его работы?
2. В чем состоит эффект кулоновской блокады?
3. Каким образом реализуются информационные состояния «0» и «1» в одноэлектронном транзисторе?
4. Рассчитайте примерную площадь кристалла, на которой можно разместить память емкостью 10^{10} бит, реализованную на одноэлектронных транзисторах.

2.3.3. Резонансное туннелирование

При более детальном рассмотрении прохождения электронов через потенциальные барьеры, создаваемые при контакте двух различных полупроводниковых материалов всей совокупностью заряженных частиц, было установлено несколько интересных фактов. Оказалось, что в структуре со сверхмалыми размерами проявления этого эффекта зависят от характера энергетического спектра (т.е. набора разрешенных энергетических состояний) электронов внутри самой квантовой структуры. В результате этого **в наноструктуре с двумя потенциальными барьерами наблюдается резкое возрастание протекающего через нее тока только при совпадении УРОВНЕЙ ФЕРМИ в электроде, поставляющем электроны, и в самой наноструктуре.** Это явление получило название **РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ**. Оно впервые было описано в 1958 году японским исследователем **Л. Эсаки** и затем детально им исследовалось, за что в 1973 году ему была присуждена Нобелевская премия. Однако всестороннее теоретическое обоснование и экспериментальные транзисторы на резонансном туннелировании появились лишь в начале 90-х годов XX века.

Резонансно-туннельный диод представляет собой сложную плоско-слоистую полупроводниковую структуру, помещенную между металлическими электродами (рис. 2.3.4 а). Размеры некоторых внутренних слоев полупроводника, играющих роль потенциальных барьеров, составляют всего лишь несколько нанометров. Условное обозначение резонансно-туннельного диода, используемое в электрических схемах, приведено на рис. 2.3.4 б. Энергетическая схема этого прибора показана на рис. 2.3.5. Он состоит из двух потенциальных барьеров, разделенных областью с малой потенциальной энергией. Область между барьерами – это как бы потенциальная яма, в которой есть один или несколько дискретных уровней. Характерная ширина барьеров и расстояние между ними составляют несколько нанометров. Области слева и справа от двойного барьера играют роль резервуаров электронов проводимости, к которым примыкают контакты. Электроны занимают здесь довольно узкий энергетический интервал. В приборе используется следующая особенность двойного барьера: его туннельная прозрачность имеет ярко выраженный резонансный характер.

Поясним природу этого эффекта. Как отмечалось выше, в наноразмерных структурах квантовые эффекты не запрещают туннелирования электронов через потенциальные барьеры. Квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, последовательно расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер. Это означает, что туннельно просочиться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией. Предположим, что прозрачность каждого барьера мала. Это, однако, не означает, что одновременно будет

мала и вероятность туннелирования через двойной барьер. В том случае, когда энергия электронов, налетающих на барьеры, равна энергии одного из дискретных уровней в потенциальной яме, туннельная прозрачность резко возрастает. Электрон, проникший в область между барьерами, надолго задерживается там, поскольку испытывает многократное отражение от левого и правого барьеров. На языке волн де Бройля можно сказать, что в этом случае из-за интерференции прямой и обратной волн во внутренней области гасится волна, отражающаяся от двойного барьера. При этом существенно возрастает вероятность туннелирования и волна, падающая на двойной барьер, проходит через него.

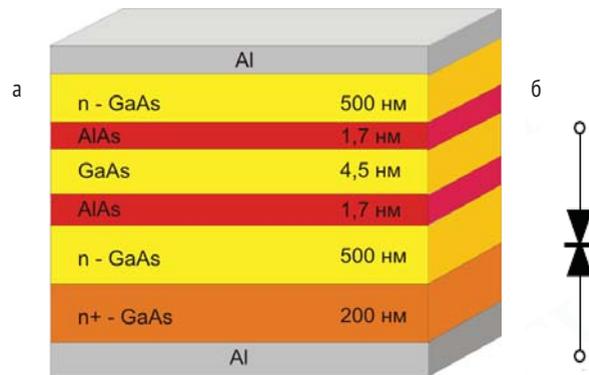


Рис. 2.3.4. Структура (а) и схемное обозначение (б) резонансно-туннельного диода

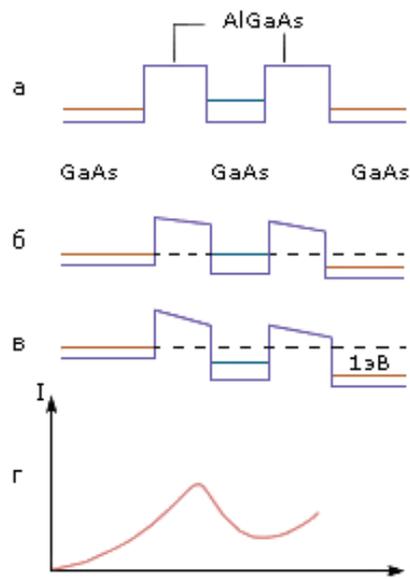


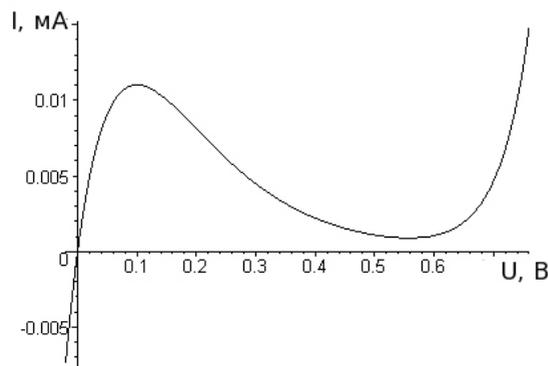
Рис. 2.3.5. Схема расположения потенциальных барьеров и ям (а, б, в) и вольт-амперная характеристика (г) резонансного туннельного диода

Рассмотрим теперь работу резонансного диода. Ток, протекающий через него, зависит от величины приложенного напряжения. Если приложенное напряжение мало и энергия электронов, проходящих через потенциальный барьер, меньше энергии дискретного уровня (а), то прозрачность барьера и, следовательно, протекающий ток будут малы. Ток достигает максимального значения при таких напряжениях, когда энергия электронов равна энергии дискретного уровня (б). При более высоких напряжениях энергия электронов станет больше энергии дискретного уровня (в), и прозрачность барьера для электронов уменьшится. При этом ток также уменьшится. Видно, что на **вольт-амперной характеристике** резонансного туннельного диода (рис. 2.3.5 г) имеется максимум и участок, на котором при увеличении напряжения происходит уменьшение тока (область с **отрицательным дифференциальным сопротивлением**), что чрезвычайно привлекательно для создания многоуровневых логических элементов, элементов памяти и твердотельных СВЧ-генераторов.

Транзисторы на резонансном туннелировании. Добавление управляющего электрода к резонансно-туннельному диоду превращает его в **резонансно-туннельный транзистор** и расширяет возможности его применения. Такие транзисторы имеют частоты переключения порядка 10^{12} Гц, что в 100-1000 раз выше, чем у самых лучших современных кремниевых транзисторов, являющихся основным элементом современных интегральных микросхем. Потенциал, подаваемый на дополнительный электрод, смещает вольт-амперную характеристику диода вдоль оси тока. Можно также объединить резонансно-туннельный диод с обычным транзистором, чтобы сделать комбинированный прибор. Этот вариант используется для создания резонансно-туннельного биполярного транзистора, который представляет собой биполярный транзистор с резонансно-туннельной структурой, встроенной в область перехода эмиттер-база или в базе. Этот прибор имеет отрицательную крутизну вольт-амперной характеристики в схеме включения с заземленным эмиттером. Широко используются также транзисторные структуры, представляющие собой управляемые затвором резонансно-туннельные диоды. Затворы в них создаются в виде p-n-переходов вокруг эмиттера для внешнего управления условиями резонанса тока в диоде. Резонансно-туннельные диоды и транзисторы широко применяются как в аналоговых, так и в цифровых интегральных микросхемах как логические элементы, имеющие вольт-амперную характеристику с участком отрицательного дифференциального сопротивления. Исследуются и уже нашли применение принципы построения сверхбыстродействующих логических вентилях, использующих переход из моностабильного в бистабильное состояние. Такие логические вентили состоят из двух последовательно соединенных приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При этом по крайней мере один из приборов должен иметь третий вывод для модуляции пикового тока.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается эффект резонансного туннелирования?
2. Укажите на особенности структуры резонансно-туннельного диода и объясните принцип его работы.
3. Что означает отрицательное дифференциальное сопротивление прибора?
4. Рассчитайте значение отрицательного дифференциального сопротивления туннельного диода по вольт-амперной характеристике, представленной на нижеследующем рисунке.



2.3.4. Спинтроника

Далеко не всем известны принципы функционирования таких наноустройств, как считывающие головки жестких дисков компьютера или сенсоры магнитного поля. Подобные устройства были бы невозможны без развития *науки, названием которой является комбинация двух слов – «спин» и «электроника» – СПИНТРОНИКА. К этой области фундаментальных и прикладных исследований относятся явления, связанные со спин-зависимым переносом носителей заряда в твердотельных структурах, а также разработка на основе обнаруженных явлений спинэлектронных приборов и устройств.* Спинтроника сформировалась как самостоятельное направление только в конце прошедшего столетия в результате накопления фундаментальных знаний и создания первых электронных приборов со спин-зависимым транспортом на основе быстро развивающейся нанотехнологии. Управляя спиновым состоянием электронов, т.е. их ориентацией, можно тем самым иметь возможность записывать и считывать переносимую электронами информацию. При этом состоянию электрона «спин-вверх» будет отвечать в двоичной системе счисления логический «0», а состоянию «спин-вниз» – «1». Интерес к спинтронным электронным приборам и устройствам вызван тем, что они, как ожидается, должны иметь лучшие характеристики

по сравнению с их обычными полупроводниковыми аналогами и обеспечат базу для реализации квантовых компьютеров.

Принцип работы спинового транзистора. Интерес исследователей к спиновой электронике возник в связи с одним удивительным открытием, сделанным в 1988 году при измерении электрического сопротивления многослойных магнитных наноструктур. Было обнаружено, что в многослойной структуре Fe/Cr, в соседних слоях которой в отсутствие магнитного поля магнитные моменты выстроены антипараллельно, сопротивление уменьшается более чем на 50% при выстраивании всех магнитных моментов параллельно под воздействием внешнего магнитного поля. Так как уменьшение сопротивления было столь велико, ученые назвали этот эффект гигантским магнитосопротивлением (ГМС). Открытие этого эффекта позволило создать работающие на новых принципах транзисторы, высокоточные сенсоры магнитного поля, датчики углового вращения и, самое главное, считывающие головки жестких дисков. Первые считывающие ГМС-головки в настоящее время используются практически во всех жестких дисках. Аномальное поведение сопротивления обусловлено различиями в поведении электронов «спин-вверх» и «спин-вниз» в указанных структурах. На **рис. 2.3.6** показан принцип работы спинового транзистора, основанного на эффекте магниторезистивного туннелирования электронов с определенным направлением спинов через прослойку изолятора, помещенную между слоями ферромагнитного металла. В таком устройстве электроны с разными направлениями спинов инжектируются (т.е. «впрыскиваются») из магнитного истока к стоку, намагниченному в том же либо противоположном направлении, что и исток, через полупроводниковый канал. В случае параллельной ориентации магнитных моментов в двух слоях «F» ферромагнитного металла (**a**) ток через структуру выше, чем при антипараллельном направлении магнитных моментов в этих слоях (**b**). Отметим, что в слоях ферромагнетика суммарный магнитный момент создает большое по величине внутреннее магнитное поле, направленное вдоль магнитного момента. При этом первый режим функционирования устройства, которое называют режимом «открытого ключа», можно сравнить с футбольным матчем без вратаря: все мячи, посланные в ворота, оборачиваются голом (режим соответствует большому току). Режиму «закрытого ключа» отвечает игра с очень хорошим вратарем, отражающим практически все мячи (этому режиму отвечает малый ток). **Два состояния спинового транзистора (открытый и закрытый) можно сопоставить с логическим «0» и «1» одного БИТА информации.**

Следует отметить, что при комнатной температуре рассмотренное устройство имеет не очень высокую эффективность работы, так как высокая тепловая энергия не позволяет создать высокую спиновую поляризацию. Хорошие результаты работы устройства были получены при достаточно низкой температуре (≈ 150 К). Исследователям и разработчикам еще нужно потрудиться над увеличением температурных интервалов функционирования

транзистора. Для этого необходимо научиться получать спиновую поляризацию электронов, близкую к ста процентам, при которой практически все инжектированные электроны имеют ориентацию либо «спин-вверх», либо «спин-вниз». Высокая степень поляризации позволяет более точно определять величину спинового тока, избавляя логическое устройство (в данном случае подразумевается конечное устройство на базе массива из спиновых транзисторов) от ошибок при анализе и обработке информации.

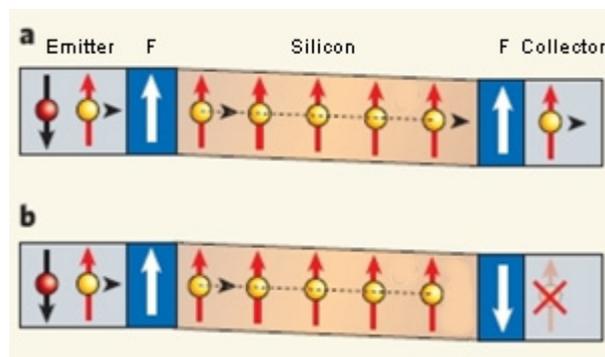


Рис. 2. 3.6. Пояснение механизма работы спинового транзистора.

Перспективы спинтроники. В чем состоит миссия спинтроники? Дело в том, что кремниевые процессоры в ближайшие десять-пятнадцать лет достигнут предела своих возможностей, поэтому именно сейчас необходимо искать иные физические принципы, на которых будут построены быстродействующие устройства с низким энергопотреблением и тепловыделением. В спинтронных устройствах перевернуть спин практически не требует затрат энергии, а в промежутках между операциями устройство отключается от источника питания. Если изменить направление спина, то кинетическая энергия электрона не изменится. Это означает, что тепло практически не выделяется. Скорость изменения положения спина очень высока, перевернуть спин осуществляется всего лишь за время порядка нескольких пикосекунд ($1 \text{ пкс} = 10^{-12} \text{ с}$).

Чего же ждать от спинтроники в ближайшее десятилетие? Специалисты выделяют три главных направления ее развития: спиновый транзистор, спиновая память и квантовый компьютер. О спиновом транзисторе речь шла выше, а о квантовом компьютере мы поговорим ниже в отдельном разделе. Пожалуй, самое важное и близкое сегодня к техническому воплощению спиновое устройство – **спиновая память**. Из проведенного нами рассмотрения ясно, что для управления спином используется магнитное поле. А если спинов миллионы и каждому нужен «индивидуальный подход»? Очень трудно представить модуль памяти, содержащий миллионы наномангнитов, которые к тому же еще и не взаимодействуют друг с другом. Есть ли альтернативное решение этой проблемы? Есть, и решение это подсказано более полувека назад самим Эйнштейном.

Великий ученый предположил, что для быстро движущегося электрона электрическое поле будет выглядеть как магнитное. Буквально полтора года назад физики подтвердили эту гипотезу, взяв два различных по составу полупроводника и образовав из них единую структуру путем напыления в вакууме. В результате в структуре возникают внутренние механические напряжения, приводящие к появлению электрического поля, которое и становится движущей силой для электронов. Чем сильнее электрическое поле, тем больше эффективное магнитное поле, заставляющее быстрее прецессировать спины электронов. Это говорит о том, что у нас появляется возможность управлять углом наклона спинов или, иначе говоря, их фазой (направлением спина). Другими словами, направление спина необязательно принимает два фиксированных положения, соответствующих логическим «0» и «1» в классических бинарных компьютерах, а может иметь и промежуточные фазы. То есть спинтроника позволяет перейти от битов к так называемым **фитам** (т.е. фазовым числам), способным принимать больше значений. Представим себе модуль памяти, в котором группы спинов направлены на север, юг, восток, запад, северо-восток, северо-запад, юго-восток и юго-запад. Всего восемь направлений, соответствующих восьми фитам: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Чем точнее мы определим фит, тем большей плотности записи информации сможем достигнуть. Уже существует ряд методов точного определения фазового угла спинов, и можно ожидать, что сверхплотная, энергонезависимая и сверхбыстродействующая память не за горами. Вполне возможно, через десять-пятнадцать лет новая область науки – спинтроника – будет так же важна, как сегодня важна электроника.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие физические закономерности лежат в основе спинтроники?
2. Как работает спиновая память, в чем ее преимущества по сравнению с памятью на полупроводниках?
3. Опишите принцип работы спинового транзистора.
4. Приведите примеры использования спинтронных приборов в электронике.

2.3.5. Сверхпроводниковая электроника

Более полувека на базе **сверхпроводящих** материалов и криогенной техники создаются различные низкотемпературные (при $T \leq 20\text{K}$) уникальные сверхпроводниковые установки и приборы. Это, прежде всего, ускорители заряженных частиц на сверхвысокие энергии, детекторы для ядерной физики и физики элементарных частиц, установки для термоядерных исследований с магнитным удержанием горячей плазмы, лабораторные сверхпроводящие магнитные системы, различные измерительные приборы рекордной чувствительности и точности. Во многом это связано с удивительными явле-

ниями, которые проявляются в сверхпроводящем состоянии вещества. Рассмотрим некоторые из них.

Контактные явления в сверхпроводниках. В 1962 году английский физик Б. Джозефсон опубликовал научную статью, в которой предсказывалось существование *двух удивительных эффектов, которые должны были наблюдаться при туннелировании куперовских пар из одного сверхпроводника в другой через какой-либо барьер.* Когда мы щелкаем тумблером выключателя, цепь замыкает контакт и по цепи начинает циркулировать ток. Таким образом, для включения цепи необходим «хороший контакт», т.е. соприкосновение двух проводников. Даже тонкая пленка диэлектрика создает огромное сопротивление и препятствует протеканию тока. Отсутствие контакта мешает также протеканию и сверхтока, причем препятствием в этом случае может оказаться не только диэлектрик, но и несверхпроводящий металл.

Однако физика сверхпроводящего контакта (перехода) гораздо сложнее, чем несверхпроводящего. Проведем мысленный эксперимент: возьмем две пластины сверхпроводника. Пока они находятся на достаточно большом расстоянии, движение электронов в каждой из них никак не связаны между собой. Теперь сблизим эти пластины и приведем их в контакт. В этом случае движение всех электронных пар становится взаимосвязанным. *Если на сверхпроводник нанести тонкую пленку нормального металла толщиной меньше размера куперовской пары, то эта пленка тоже приобретает сверхпроводящие свойства. Такое явление называется ЭФФЕКТОМ БЛИЗОСТИ.*

Если две пластины сверхпроводника разделены пленкой нормального металла или диэлектрика – достаточно тонкой, чтобы они еще чувствовали сверхпроводимость друг друга, и достаточной толстой, чтобы всё же разделить их, то в таком контакте проявляются два эффекта Джозефсона. Взаимное влияние сверхпроводников друг на друга в этом случае называется *слабой сверхпроводимостью*. Подобный сверхпроводящий переход называют *слабым звеном* сверхпроводящей цепи. Слабое звено можно создать не только с помощью разделяющей два сверхпроводника пленки. Некоторые применяющиеся в технических устройствах виды слабых звеньев показаны на **рис. 2.3.7**, хотя на практике используется значительно большее число вариантов. Один из широко распространенных вариантов (**а**) представляет подложку 1, на которую напыляется полоска сверхпроводника 2, затем диэлектрическая прослойка 3, а сверху полоска сверхпроводника 4. Приведенная на рисунке структура образует джозефсоновский переход. Подобная структура может быть также частью напыленного на той же подложке более сложного устройства. На двух других рисунках показаны слабые звенья, образованные точечным контактом одного сверхпроводника с другим (**б**) и канавкой в пленке сверхпроводника, причем поперечные размеры канавки должны быть порядка размера куперовской пары. В каж-

дом из сверхпроводников, находящихся в контакте, движение ансамбля куперовских пар происходит с определенной фазой волновой функции. Эти фазы для обоих сверхпроводников, вообще говоря, различны. Именно их различие приводит к туннелированию пар через сверхпроводящий переход, т.е. к электрическому току.

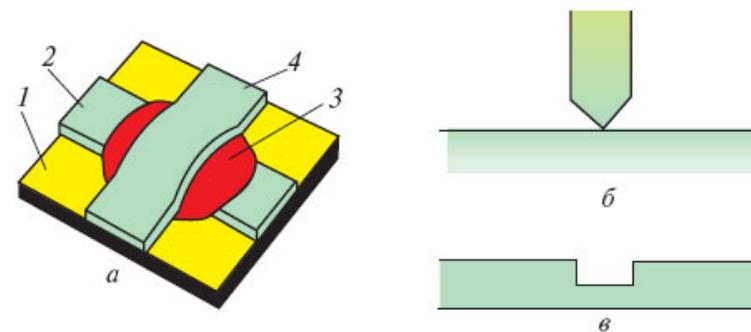


Рис. 2.3.7. Рисунки а, б, в схематически показывают возможности создания слабых сверхпроводящих звеньев

СТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА заключается в том, что *через сверхпроводящий переход самопроизвольно течет сверхток без приложения какого-либо напряжения. Этот ток определяется разностью фаз $\theta = \theta_2 - \theta_1$ волновых функций ансамблей куперовских пар обоих сверхпроводников:*

$$I_s(\theta) = I_{кр} \sin \theta, \quad (2.27)$$

где $I_{кр}$ – *максимальный сверхток в контакте*. Из этой формулы видно, что джозефсоновский ток не может превышать критическую величину сверхтока $I_{кр}$. Этот ток довольно слабый, но вполне ощутимый. Для обычно применяемых переходов этот ток составляет величину порядка нескольких миллиамперов.

Нестационарный эффект Джозефсона. Рассмотрим, что будет происходить с джозефсоновским переходом, если через него протекает постоянный ток $I > I_{кр}$. Так как сверхток не может быть больше критического, то часть куперовских пар распадается на отдельные электроны и контакт приобретает активное сопротивление (отметим, что критический ток слабого звена гораздо меньше критического тока, при котором разрушается сверхпроводимость отдельного сверхпроводника). Поэтому кроме сверхтока через переход будет идти ток несвязанных в пары электронов, при прохождении которого, как известно, в цепи выделяется тепло. В этом случае джозефсоновский переход можно представить в виде параллельного включения сверхпроводящего участка, пропускающего только сверхток, и нормального (резистивного) участка, через который протекает обычный ток. При этом полный ток через переход I равен сумме нормального тока $I_n = U(t)/R$ и сверхтока

$I_s(\theta) = I_{кр} \sin \theta$, где R – сопротивление перехода в нормальном состоянии, а $U(t)$ – периодически зависящее от времени напряжение с частотой

$$\omega = \frac{2e}{\hbar} R \sqrt{I^2 - I_{кр}^2}. \quad (2.28)$$

Таким образом, частота колебаний напряжения на джозефсоновском переходе зависит от того, насколько ток через переход I превышает значение $I_{кр}$.

Если же на джозефсоновском переходе поддерживается постоянная разность потенциалов U_0 , то на нем генерируется излучение частотой $\omega = 2e U_0 / \hbar$.

При напряжении $U_0 = 1$ мВ частота составляет величину $\omega \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Эта частота лежит в области сверхвысоких частот (СВЧ). Таким образом, джозефсоновский контакт двух сверхпроводников не только преобразует постоянное напряжение в переменный ток, но и работает как колебательный контур, т.е. излучает электромагнитные волны в СВЧ-диапазоне. Отметим, что нестационарный эффект Джозефсона обратим: **если сверхпроводящий переход облучать электромагнитным полем с частотой ω , то на переходе возникает разность потенциалов $U = \omega \hbar / 2e$** . При объяснении эффектов Джозефсона полезно вспомнить явление интерференции в оптике. Это аналогичные явления, только на контакте сверхпроводников интерферируют не световые волны, а электронные волны де Бройля. Именно о разности фаз этих волн идет речь.

Если джозефсоновский переход поместить во внешнее высокочастотное поле, то при совпадении частоты этого поля с частотой джозефсоновской генерации $\omega = 2eU/\hbar$, должен возникнуть резонанс. Оказывается, он возникает не только при совпадении частот, но и когда частота джозефсоновской генерации в целое число раз больше частоты внешнего поля. В этом случае вольт-амперная характеристика для усредненных значений тока и напряжения имеет вид ступенчатой кривой (рис. 2.3.8). Расстояния по напряжению между ступеньками в точности равны $\omega \hbar / 2e$.

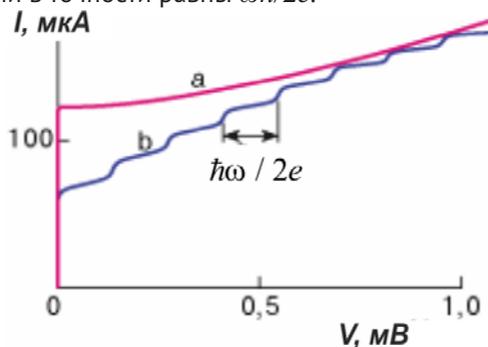


Рис. 2.3.8. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского перехода: а – без высокочастотного поля, б – высокочастотное поле включено.

Практические применения сверхпроводимости. Неудивительно, что столь своеобразные явления быстро нашли применение во многих областях техники. Открытие в 1988 году высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), наблюдаемой при температурах жидкого азота, стало мощным стимулом как для самих разработок по сверхпроводниковой электронике, так и для их практического использования в телекоммуникационной, приборной, компьютерной и медицинской технике. Использование сверхпроводимости приводит к малым потерям, практическому отсутствию дисперсии (расплывания) сигнала, возможности эффективно управлять параметрами устройств за счет изменения резистивных свойств. Это относится к широкому кругу пассивных СВЧ-устройств: линиям передач, полосовым фильтрам, модуляторам, переключателям, малогабаритным антеннам и т.д. Разработаны, успешно испытаны и начали эксплуатироваться сверхпроводниковые спутниковые системы связи, миниатюризированные и с повышенной пропускной способностью; системы связи с подвижными объектами (сотовой связи) третьего поколения, в которых применяются ВТСП-фильтры СВЧ-диапазона. Здесь уместно отметить, что криостатирование подобных устройств обеспечивается микроохладителями, масса которых – единицы килограмм, а срок непрерывной работы до 40-50 тыс. часов. Отметим также, что основным рабочим ВТСП-веществом современной сверхпроводниковой электроники является соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

В области сверхпроводниковой цифровой электроники происходит постоянный рост на одном чипе числа элементов, представляющих собой туннельные сверхпроводящие переходы, в основе работы которых лежат рассмотренные выше контактные эффекты. Эффект Джозефсона используется в микроэлектронике для создания генераторов и детекторов излучения СВЧ-диапазона, а свойство переключения подобных структур из проводящего в непроводящее состояние (это происходит, если ток превышает критическое значение и сверхпроводимость исчезает), позволяет применять устройства, работающие на этом эффекте, в качестве быстродействующих логических элементов ЭВМ.

Однако, **самое распространенное практическое применение получило устройство под названием «СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ КВАНТОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР», или СКВИД (от английской аббревиатуры SQUID – Superconducting Quantum Interference Device)**. «Сердцем» СКВИДа является сверхпроводящее кольцо с четырьмя выводами, которые служат для подачи тока и съема напряжения. В кольце есть одно или два слабых звена. Кольцо с одним слабым звеном и кольцо с двумя слабыми звеньями – два разных вида СКВИДа, различающиеся по устройству и режиму работы. Здесь мы остановимся лишь на свойствах, общих для всех СКВИДов. Для их работы существенны два рассмотренных выше явления – стационарный эффект Джозефсона и квантование магнитного потока в сверхпроводящем кольце. Дело в том, что на СКВИД подается магнитное поле, которое может быть внешним или специально создаваемым в устройстве. Если бы кольцо не со-

держало слабых звеньев, то оно бы жестко сохраняло величину магнитного потока Φ , пронизывающего его, причем эта величина была бы кратна кванту потока Φ_0 , т.е. $\Phi = n\Phi_0$.

Сверхпроводящее кольцо со слабым звеном ведет себя во внешнем магнитном поле следующим образом. Если увеличивать внешний магнитный поток, то магнитный поток через кольцо тоже немного увеличивается, так как сверхпроводящий ток кольца не может полностью экранировать внешнее поле.

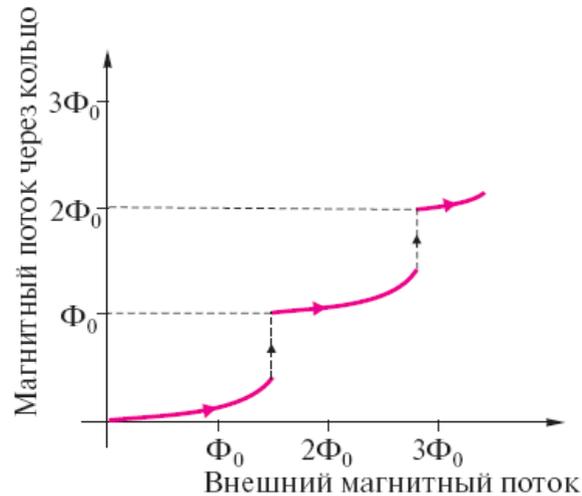


Рис. 2.3.9.

Затем настает момент, когда этот сверхпроводящий ток превышает критический ток слабого звена, и оно переходит в нормальное состояние. При этом один квант потока Φ_0 проникает внутрь кольца (на рисунке это момент скачка) и экранирующий ток резко падает. Слабое звено вновь переходит в сверхпроводящее состояние, и кольцо снова начинает сопротивляться дальнейшему нарастанию внешнего магнитного поля. (рис. 2.3.9).

СКВИД является на сегодняшний день самым точным прибором для измерения магнитных полей, и при этом весьма компактным (размеры СКВИДа – порядка десятков и сотен микрон). Он находит самое широкое практическое применение в разных областях, начиная с предсказания землетрясений и заканчивая медицинской диагностикой. В электронике используется непревзойденная чувствительность СКВИДов к изменению магнитного потока. Благодаря этому СКВИДы находят применение в прецизионных приборах, измеряющих предельно малые токи, напряжения и изменения магнитного потока. По этим параметрам можно оценивать многообразные свойства и явления – от перемещения в пространстве до химического превращения. Технология ВТСП-СКВИДов быстро совершенствуется. Из-за проблемы температурных шумов устройства, работающие при температурах жидкого гелия, будут всегда иметь определенное преимущество перед устройства-

ми, функционирующими при азотных температурах. Однако область использования ВТСП-СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. В этой связи весьма интересными представляются разработки нового поколения магнитометрических систем неразрушающего контроля, необходимых, в первую очередь, атомной, авиационной и космической промышленности. Весьма перспективно развиваемое в последнее время направление медицинской диагностики – магнитокардиография и магнитоэнцефалография.

Основанные на СКВИДах датчики магнитного поля широко применяются в геофизике для измерения колебаний магнитного поля Земли. С использованием СКВИДов созданы пиковольтметры, измерители магнитной восприимчивости и другие сверхточные приборы. С помощью СКВИДов в медицинских исследованиях ведутся записи магнитных сигналов от органов человеческого тела – в дополнение к электрическим исследованиям (электрокардиограммы или электроэнцефалограммы). Для съемки магнитных сигналов не нужен непосредственный контакт с телом. Более того, возможна регистрация сигналов, гораздо более слабых или исходящих от небольших участков тела. Магнитограммы могут быть получены практически от всех органов человеческого тела, причем удастся регистрировать сигналы с напряженностью $5 \cdot 10^{-11}$ Тл. Напомним, что напряженность магнитного поля Земли в миллион раз больше.

На основе СКВИДов и контактов Джозефсона созданы и иные измерительные приборы – чувствительные вольтметры, низкотемпературные термометры (для диапазона температур 10^{-6} – 10^{+1} К), детекторы электромагнитного излучения и многие другие. С помощью эффекта Джозефсона установлен новый, более точный эталон единицы потенциала – 1 Вольта, удалось также почти в 10 раз уточнить значения некоторых фундаментальных физических констант. Немного найдется в физике эффектов, столь используемых в фундаментальных исследованиях и прикладных разработках.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), на каких материалах она наблюдается и каких значений достигает температура сверхпроводящего перехода?
2. В чем состоит смысл стационарного эффекта Джозефсона?
3. В каких условиях реализуется нестационарный эффект Джозефсона, что означает его обратимость?
4. Какое устройство получило название СКВИД, каковы принципы его работы? Почему эти устройства обладают очень высокой чувствительностью к магнитному полю?
5. Приведите примеры применения СКВИДов и укажите порядки измеряемых ими физических величин.

6. Найдите в Интернете материал о сверхпроводящих свойствах наноструктур. Насколько перспективно их использование в электронике?

2.3.6. Нано– и квантовые компьютеры

Наноэлектроника в настоящее время вплотную приблизилась к созданию и новых типов вычислительной техники – **нанокomпьютеров**. Эти компьютеры будут иметь высокую производительность и логические элементы молекулярных размеров, вся их сборка будет проводиться на основе нанотехнологий. С переходом на уровень нанотехнологий станет возможным снижение минимально допустимых размеров компьютера до субклеточного уровня. Уже сейчас можно предположить, что нанокomпьютеры будут развиваться одновременно по нескольким направлениям, реализующим различные способы представления информации – на основе классической либо квантовой логики, нейробиологии, а также некоторые другие.

В настоящее время наиболее развито направление, в основе которого лежит использование электронных нанотранзисторов, в том числе одноэлектронных (SET, single-electron transistor), включая также транзисторы со спин-поляризованными электронами и сверхпроводящими контактами. В таких транзисторах уже достигнут квантовый предел передачи классической информации, налагаемый принципом Паули и принципом неопределенности Гейзенберга. Несмотря на то, что до реального применения SET в компьютерной технике еще далеко, проработка различных архитектурных вариантов будущих нанокomпьютеров на их основе идет полным ходом.

Однако в основу всех этих направлений можно поместить теорию так называемых квантовых вычислений, которая учитывает не элементную базу, а новый тип квантово-механических логических операций. Вычислительные устройства, построенные на таком типе вычислений, называются **квантовыми компьютерами**. Идея квантовых вычислений впервые была высказана в конце семидесятых годов прошлого столетия русским математиком Ю.И. Маниным. Им было предложено использовать для вычислений операции с состояниями квантовой системы. Известно, что состояние квантовой системы, в отличие от классической, может находиться в состоянии суперпозиции. В терминах классического компьютера квантовый бит – *кубит* (от сочетания английских слов quantum bit) в соответствии с законами квантовой механики может находиться одновременно в двух равновероятных состояниях «0» и «1». Тогда два кубита могут быть уже в четырех смешанных состояниях – «00», «01», «10» и «11», представляя четыре числа сразу. Это увеличение растёт по степенному закону: на m кубитах можно выполнять одновременно вычисление над 2^m числами парал-

лельно. Это значит, что, используя всего несколько сотен кубитов, можно представить одновременно больше чисел, чем имеется атомов во Вселенной. Данный факт также позволяет предполагать такое же увеличение скорости вычислений квантового компьютера по сравнению с классическим. Это предположение основано на том, что при квантовых вычислениях элементарным шагом является отдельная операция над m -кубитной суперпозицией. Если в классическом компьютере вычисляется единственное выходное значение для одного входного состояния, то в квантовом компьютере вычисляются выходные значения сразу для всех входных состояний. Иначе говоря, квантовый компьютер может за короткое время решать задачи, с которыми современные компьютеры не могли бы справиться лишь в течение многих лет.

Общая структура квантового компьютера, предложенная Р. Фейнманом в 1986 году, приведена на **рис. 2.3.9**. Основной частью такого компьютера является квантовый регистр – совокупность некоторого числа кубитов. При вводе информации в компьютер все кубиты регистра должны быть приведены в базовое состояние, соответствующее «0» или «1». После этого цепочка кубитов (т.е. данных) поступает в квантовый процессор, который выполняет последовательность квантовых логических операций. На выходе компьютера необходимо измерить состояния кубитов, проанализировать их на обычном компьютере и получить готовое решение.



Рис. 2.3.10.

Конечно, на пути практической реализации квантовых компьютеров стоит огромное количество сложнейших теоретических и практических задач. Тем не менее, уже созданы процессоры на базе кубитов. Например, компьютер «Orion» одной из канадских компаний основан на микросхеме, содержащей 16 «кубитов» (**рис. 2.3.11**). Каждый такой кубит состоит из частиц ниобия, окруженных соленоидами. По сути, «Orion» представляет собой аналоговый компьютер, решающий задачи методом физического моделирования.

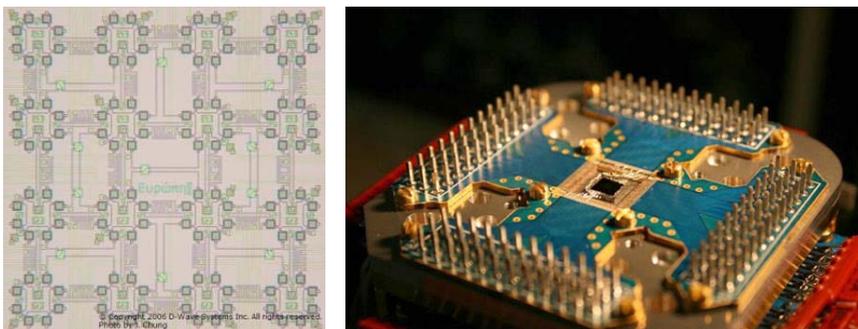


Рис. 2.3.11. Схема 16-ти кубитного процессора «Orion» (а) и его фотография (б)

В последнее время также предложены реалистичные варианты конструкций квантовых компьютеров на основе квантовых точек, сверхпроводящих переходов, спинов. Так, большие ожидания связаны с созданием спинового квантового компьютера. Для его реализации предполагается задействовать спины в полупроводниковых квантовых точках и ямах, которые могут рассматриваться как спиновые кубиты. Спиновый кубит может находиться в двух устойчивых состояниях – «спин-вверх» и «спин-вниз», которые соответствуют логическим «0» и «1» в классических компьютерах. По прогнозам ученых работоспособная версия спинового квантового компьютера будет готова к 2020 году. Бурное развитие нанотехнологий позволяет надеяться на создание суперкомпьютера, каким несомненно должен быть квантовый компьютер.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение квантового компьютера, в чем его отличие от современных компьютеров?
2. Сколько возможных смешанных квантовых состояний могут иметь три кубита?
3. Почему емкость памяти и скорость выполнения логических действий квантового компьютера должна быть намного выше, чем у современного компьютера?
4. В сети Интернет найдите примеры возможной реализации квантовых компьютеров.

2.3.7. Нанотехнологии в оптоэлектронике

Одним из важнейших направлений применения нанотехнологий является оптоэлектроника – область современной науки и техники, которая занимается вопросами преобразования оптического излучения в электрический ток и обратно, совместным использованием оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации. Здесь основная задача нанотехнологии состоит в создании источников оптического излучения на основе полупроводниковых наноструктур. Толщина полупроводниковых слоев в современных оптоэлектронных приборах в настоящее время достигла 5–10 нм. При этом управление приборами на таких наноструктурах приводит к резкому повышению их эффективности и возможности работы на больших токах. Из полупроводниковой пластины диаметром 50 мм можно получить порядка 10 тысяч излучающих структур видимого диапазона. Это открывает неограниченные возможности по созданию на основе полупроводниковых наноструктур и применению различных светотехнических устройств.

Все мы хорошо знакомы с продуктами оптоэлектроники, поскольку основная информация, которую получает человек, является зрительной. Каждый день мы сталкиваемся с рекламными экранами и светофорами, экранами компьютеров, телевизоров и мобильных телефонов, пользуемся многими другими оптоэлектронными устройствами. К широко используемым оптоэлектронным устройствам относятся **ФОТОПРИЕМНИКИ – преобразователи света в электрический ток, ФОТОРЕЗИСТОРЫ – фотоприемники, работающие на принципе изменения сопротивления под действием света, СВЕТОИЗЛУЧАТЕЛИ – преобразователи электрического тока в световое излучение.** Однако самыми распространенными приборами, использующими достижения полупроводниковых нанотехнологий, на сегодняшний день являются **СВЕТОДИОДЫ и ЛАЗЕРЫ – источники некогерентного и когерентного излучения. Некогерентный свет – это электромагнитные волны с различными частотами и хаотически изменяющимися фазами.** Подобный свет дают естественные источники (нагретые тела, костры, Солнце) и такие искусственные источники, как лампы накаливания и газоразрядные трубки, широко используемые в качестве осветительных приборов. В последнее время все чаще в этом качестве используют светодиоды, к которым у разработчиков осветительной техники наблюдается повышенный интерес. Связан этот интерес, в первую очередь, с малым энергопотреблением светодиодов.

Учитывая, что почти четверть всей потребляемой в стране электроэнергии тратится на освещение, снижение потребляемой энергии в 5–7 раз по сравнению с лампами накаливания приведет не только к ощутимому снижению затрат, но и к улучшению экологического климата за счет уменьшения вредных выбросов в атмосферу остатков топлива при выработке электроэнергии. Повышенная надежность полупроводниковых светильников

приводит к снижению в 4–5 раз затрат на их обслуживание. Повышенная прочность и малые габариты предоставляют разработчикам светотехнических приборов широкие возможности оригинальных конструктивных и эстетических решений. Исключение отрицательного воздействия на человека ультрафиолетового и инфракрасного излучений, экологическая чистота и безопасность за счет малых напряжений приводит к улучшению комфортных условий среды обитания человека. Замена ламп накаливания светодиодами излучателями аналогична замене вакуумных ламповых триодов твердотельными транзисторами и представляет подлинную революцию в области светотехники. Лет через двадцать лампа накаливания будет таким же анахронизмом, каким в настоящее время является кerosиновая лампа.

Светоизлучающие диоды. Почему полупроводниковый $p-n$ -переход может светиться? Этот вопрос вызывает еще один, более общий: как вообще излучается свет? Как говорилось выше, излучают атомы, причем для этого их надо перевести из основного в возбужденное состояние. Если атомы возбуждать нагревом, то соответствующее излучение называется тепловым. Оно некогерентно, и при не очень сильном нагреве относится к ИК области спектра. Нагревая гвоздь сильнее, мы видим, как он становится темно-красным, затем ярко-желтым. А нагретый до значительно большей температуры металл в доменной печи сияет белым или даже бело-голубым светом. Итак, с повышением температуры максимум теплового излучения смещается в сторону коротковолновой части спектра. И хотя тепловое излучение имеет квантовую природу, оно не имеет никакого отношения к полупроводниковым светодиодам.

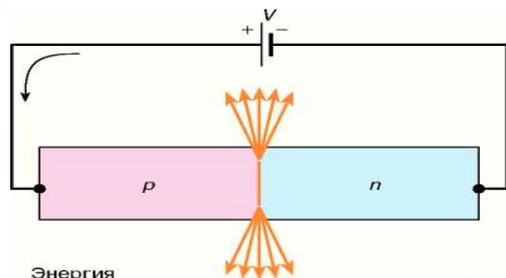


Рис. 2.3.12. Схема полупроводникового светоизлучающего диода

Рассмотрим принцип работы светодиода, построенного на $p-n$ -переходе, у которого p - и n -области сделаны из одного материала (гомопереход). В том случае, когда p - и n -области сделаны из разных материалов, переход называют гетеропереходом. Светодиод излучает свет только в том случае, когда ток протекает в прямом направлении. Электроны из n -области и дырки из p -области попадают в область $p-n$ -перехода. Как известно, дырки несут положительный заряд и представляют собой отсутствие электронов в химической связи атомов кристаллической решетки. Поэтому при столкновении дырки и электрона оба носителя тока исчезают, и выделяется энергия

в виде кванта света. При этом яркость пропорциональна току светодиода. Однако с увеличением тока растет и тепловой нагрев, что очень сильно ограничивает сферу применения гомогенных светодиодов.

Светодиод будет «гореть» только при прямом включении, как показано на рис. 2.3.12. При обратном включении светодиод «гореть» не будет. Более того, возможен выход из строя светодиода при малых допустимых значениях обратного напряжения. Зависимости тока от напряжения при прямом (синяя кривая) и обратном (красная кривая) включениях показаны на приведенной на рис. 2.3.13 **ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ, в соответствии с которой каждому значению напряжения соответствует своя величина тока, протекающего через диод. Чем выше напряжение, тем выше значение тока (и тем выше яркость).** Для каждого светодиода существуют допустимые значения напряжения питания U_{max} и $U_{maxобр}$ (соответственно для прямого и обратного включений). При подаче напряжений свыше этих значений наступает электрический пробой, в результате которого светодиод выходит из строя. Существует и минимальное значение напряжения питания U_{min} , при котором наблюдается свечение светодиода. Диапазон питающих напряжений между U_{min} и U_{max} называется «рабочей» зоной, так как именно здесь обеспечивается работа светодиода.

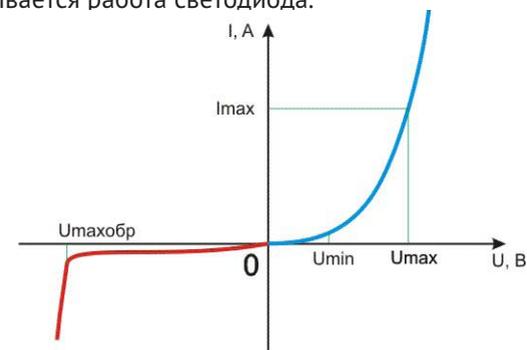


Рис. 2.3.13. Вольт-амперная характеристика светоизлучающего диода.

Долгое время массовое производство светодиодов ограничивалось приборами, излучающими в красной и инфракрасной областях спектра. Первые зеленые светодиоды стали делать из фосфида галлия GaP, а синие – из карбида кремния SiC. Однако эти материалы создают излучение слабой интенсивности либо быстро перегреваются. Исследования свойств нитридов элементов III группы таблицы Менделеева (AlN, GaN, InN) показали, что они являются наиболее перспективными материалами для изготовления светодиодов. Эти материалы излучают во всей видимой и ультрафиолетовой областях спектра от 240 до 620 нм. В 70-х годах прошлого века в лаборатории компании IBM были созданы фиолетовые и голубые диоды на основе эпитаксиальных пленок GaN, однако они довольно быстро перегревались и выходили из строя.

С развитием нанотехнологий удалось усовершенствовать процесс выращивания нанометровых слоев от 20 до 100 нм на подложке из другого материала. Такие структуры получили название **гетероструктур**. В результате в 1989 году впервые были получены гетероструктуры на основе GaN и созданы светодиоды на гетеропереходах GaInN – GaAlN. В отличие от гомоперехода, *p*- и *n*-области гетероперехода можно сильно легировать.

ЛЕГИРОВАНИЕ – это добавление примеси в полупроводник, которая и определяет его тип проводимости – *p* или *n*. При сильном легировании сопротивление гетероперехода существенно уменьшается и, следовательно, при протекании тока выделяется меньше тепла, чем в гомопереходе. Кроме этого, концентрация электронов и дырок в таких светодиодах будет значительно выше, а значит, будет выше и их яркость. Применяемые современные материалы позволяют получать светодиоды, спектры излучения которых перекрывают весь видимый диапазон излучения (рис. 2.3.14).

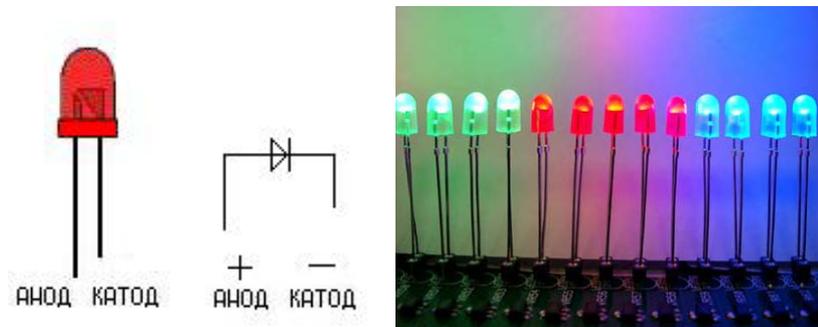


Рис. 2.3.14. Светодиоды с различным спектральным диапазоном излучения

Светодиоды могут иметь размеры от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Потребляемый ими ток составляет десятки миллиампер при напряжении в несколько вольт, мощность оптического или ИК излучения не превосходит нескольких милливатт.

ЛАЗЕРЫ (**LASER** – аббревиатура английского словосочетания «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», перевод которого – усиление света с помощью вынужденного излучения) – это источники когерентного излучения, использующие не спонтанные переходы из возбужденного состояния в основное (как у нагретых тел), а индуцированные. Именно с изобретением оптического квантового генератора – лазера наступила эпоха когерентной оптики и открылись невиданные прежде возможности в оптоэлектронике. Так, с помощью лазерного локатора расстояние до Луны определяется с точностью до нескольких сантиметров, а мощные лазеры способны «прожигать» толстые стальные листы.

Полупроводниковый лазер является самым компактным, экономичным и надежным из всех имеющихся типов лазеров. Именно поэтому его используют в CD- или DVD-плеерах, лазерных принтерах, компьютерах. Интернет,

телефония, оптическая и другие виды связи также получили «второе дыхание» благодаря применению полупроводниковых лазеров. За 40 лет полупроводниковые лазеры прошли много этапов развития и усовершенствования и получили самое широкое распространение. Этому способствовало увеличение количества лазерных полупроводников, перекрывающих широкий спектральный диапазон – от ультрафиолетового до инфракрасного.

Современный уровень развития нанотехнологий позволяет контролировать рост слоев толщиной всего в один атом, т.е. менее 1 нм. Переход к подобным гетероструктурам позволил снизить плотность тока полупроводниковых лазеров примерно в 10^4 - 10^5 раз. Другой важнейший показатель качества лазера – это ресурс его работы. В первых непрерывных полупроводниковых лазерах ресурс был всего несколько секунд, в современных лазерах – десятки лет.

Физической основой работы лазера служит явление индуцированного излучения. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называется **спонтанным**. Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, так как каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона с верхнего энергетического уровня на нижний с излучением фотона может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля с частотой, равной собственной частоте перехода. Такое излучение называют вынужденным, или индуцированным. Экспериментально явление усиления света при его прохождении через среду с инверсной населенностью впервые было обнаружено в 1951 году советскими физиками В.А. Фабрикантом, М.М. Вудинским, Ф.А. Бутаевой.

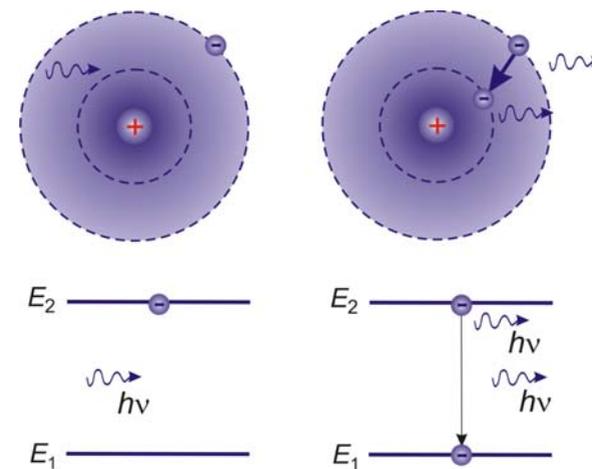


Рис. 2.3.15. к иллюстрации вынужденного излучения

ИНДУЦИРОВАННОЕ излучение возникает при наличии инвертированного состояния рабочей среды и при совпадении частоты электромагнитного поля, вызывающего излучение, с собственной частотой излучения возбужденного атома $\omega = (E_2 - E_1) / \hbar$. Это излучение сопровождается синхронным переходом всех возбужденных атомов на более низкий энергетический уровень (рис. 2.3.15). При этом в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, получаются два совершенно одинаковых по энергии и направлению движения фотона-близнеца. **ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТЬ** – это состояние рабочей среды, при котором больше половины атомов (в полупроводниковых лазерах – электронов) находится в возбужденном состоянии. При этом на пути фотонов чаще встречаются возбужденные атомы, чем невозбужденные, поэтому индуцированное излучение фотонов происходит чаще, чем их поглощение.

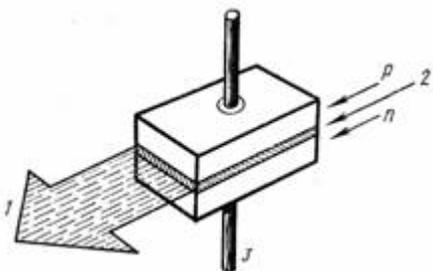


Рис. 2.3.16. Схема устройства полупроводникового лазера

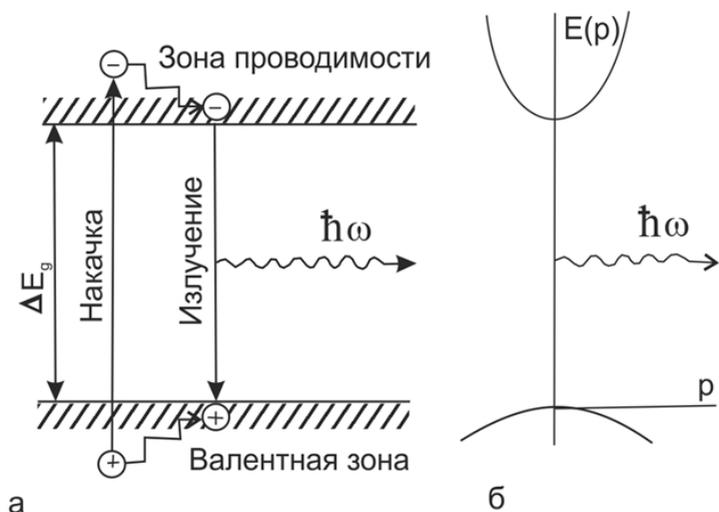


Рис. 2.3.17. Схема накачки (а) и зонная диаграмма (б) полупроводникового лазера

Лазер на p - n -переходе представляет собой полупроводниковый диод, две плоскопараллельные грани которого, перпендикулярные плоскости p - n -перехода, служат зеркалами оптического резонатора с коэффициентом отражения порядка 30 % (рис. 2.3.16). Если через p - n -переход в прямом направлении пропускается достаточно сильный электрический ток, то в области перехода создается инверсия населенностей. Необходимая инверсия населенностей достигается при большой плотности прямого тока через диод (порог генерации – минимальный ток, при котором лазер способен когерентно излучать, соответствует току ~ 1 кА/см²). Для получения достаточно интенсивной накачки применяют сильно легированные полупроводники. В результате в полупроводнике поддерживается состояние, при котором на дне более высокой зоны проводимости находится больше электронов, чем на потолке более низкой валентной зоны (рис. 2.3.17). В этом случае вынужденные излучательные переходы из зоны проводимости в валентную зону преобладают над обратными поглощательными переходами.

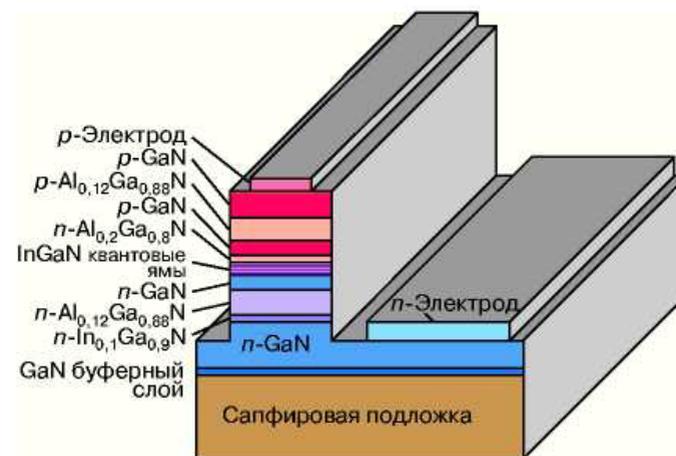


Рис. 2.3.18. Структура эпитаксиальных слоев инжекционного лазера

В качестве лазерных материалов, как правило, используются прямозонные полупроводники (например, GaAs, CdS, PbS). Разнообразие полупроводниковых лазерных материалов позволяет перекрыть широкий спектральный диапазон с помощью набора полупроводниковых лазеров. Использование в качестве лазерных материалов гетероструктур позволило существенно уменьшить пороговый ток генерации полупроводниковых лазеров. Впервые уменьшение порогового тока и размеров активной области за счет использования гетеропереходов было достигнуто в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) в лаборатории, руководимой академиком Ж.И. Алферовым. Примером гетеролазера может служить лазер, схема которого приведена на рис. 2.3.18. В такой структуре избыточные носители

сосредоточены внутри активной области (квантовой ямы InGaN), ограниченной с обеих сторон потенциальными барьерами (GaN), что исключает их распространение в прилегающие области.

Оптоэлектронные элементы в последнее время приобретают большое значение для волоконно-оптических линий связи, которые должны заменить современные кабельные линии связи на длинные и короткие дистанции, решить проблемы кабельного телевидения и видеотелефонов. Несколько свето-волоконных кабелей соединили Америку с Европой, прокладываясь опто-волоконные линии связи через Тихий океан. Источниками световых сигналов в этих линиях являются инжекционные лазеры, приёмники – быстродействующие лавинные фотодиоды; через несколько десятков километров располагаются ретрансляционные узлы (лазер – фотоприёмник), компенсирующие ослабление и дисперсию световых сигналов.

Оптоэлектроника позволяет создать перестраиваемые процессоры, управляемые пространственно-временными модуляторами света и матрицами фотоприёмников, а также обеспечивает построение больших интегральных схем, допускающих интеграцию в третьем (вертикальном) измерении. С оптоэлектроникой связывают надежды на возможность дальнейшего совершенствования вычислительной техники: передача информации будет осуществляться оптическими сигналами, что позволит вести обработку одновременно по многим параллельным каналам, близко расположенным друг к другу, но обладающим высокой помехозащитностью. Проводятся интенсивные исследования по созданию новых оптоэлектронных элементов, которые имели бы два устойчивых состояния с различными оптическими свойствами (оптически бистабильные элементы) и выполняли бы в оптике роль, аналогичную роли транзисторов в электронике. Создание таких элементов позволит начать конструирование оптических (или оптоэлектронных) вычислительных машин, превосходящих по производительности ЭВМ и способных выполнять до 10^{12} операций в секунду.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте характеристику разделов науки и техники, получивших название «оптоэлектроника» и «квантовая оптоэлектроника».
2. В чем состоит отличие излучения светодиодов и лазеров?
3. Объясните принцип работы светодиода на гомоструктуре.
4. Что представляет собой светодиод на гетероструктуре?
5. Найдите в Интернете информацию об имеющихся типах полупроводниковых лазеров и их основных характеристиках.
6. Что представляет собой лазер на гомоструктуре?
7. Объясните принцип работы полупроводникового лазера на квантовых ямах.
8. Определите длину волны излучения полупроводникового светодиода на гомопереходе с шириной запрещенной зоны 1,7 эВ.

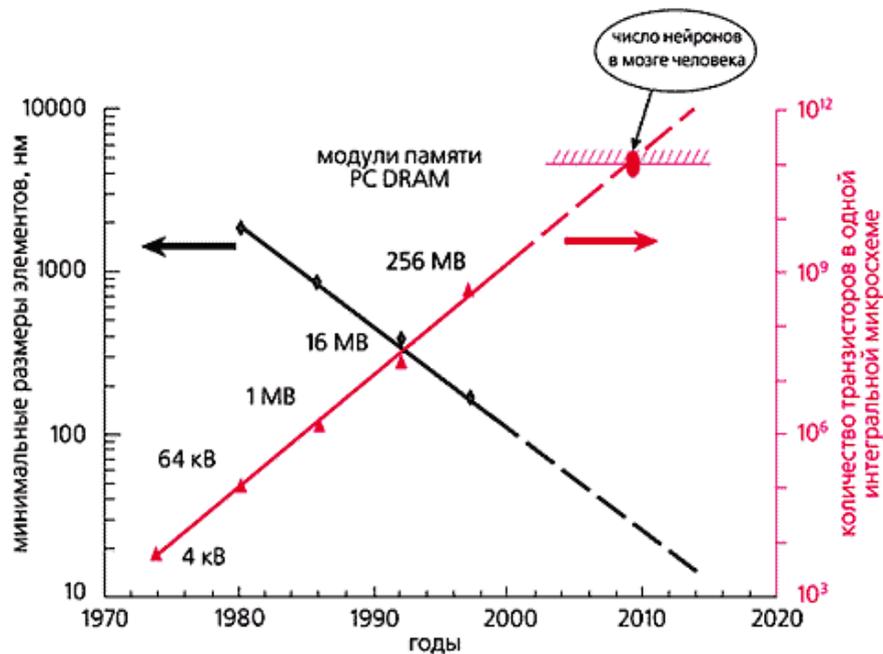
Ближайшие перспективы нанотехнологий

Бурное развитие нанотехнологий, которое наблюдается в настоящее время, указывает на огромные возможности их применения в различных сферах человеческой деятельности. По мнению ученых, нанотехнологии в будущем могут даже стать настоящим спасением для человечества. Когда на Земле запасы нефти, газа и угля окажутся недостаточными для поддержания энергетики, на помощь людям придут созданные на основе нанотехнологий дешевые солнечные батареи, способные превращать солнечную энергию в электрическую. Применение порошковых нанотехнологий позволит создать топливные элементы нового поколения, способные генерировать из любого типа органического топлива электрическую энергию с КПД не ниже 60-70%.

Очень перспективны нанотехнологии для исследования и освоения космоса. Так, освоению ближнего и дальнего космоса людьми, скорей всего, будет предшествовать освоение его наноспутниками и нанороботами. На сегодняшний день наноспутниками называют космические аппараты массой не более 10 кг. Они представляют собой полнофункциональные устройства для измерений и наблюдений из космоса. На таких спутниках можно устанавливать практически все присущие большому космическому аппарату, но выполненные на основе нанотехнологий, бортовые системы: ориентации, электропитания, радиосвязи, бортовой вычислительный комплекс. Малый вес таких спутников определяет минимальные энергозатраты для вывода их на нужные орбиты. Большое количество нанороботов специального назначения будут выпущены в космическое пространство для подготовки его к заселению человеком. Они сделают пригодными для обитания Луну, астероиды, ближайшие планеты, соорудят из «подручных материалов» (метеоритов, комет) космические станции. Это будет намного дешевле и безопаснее существующих ныне методов построения космических станций, когда при их строительстве на орбите присутствует человек.

Любые достижения в нанонауке прежде всего рассматриваются обществом под углом их применимости к информационным технологиям. Не-

смотря на нарастающий уровень трудностей, в течение нескольких последних десятилетий поддерживается неизменный и очень высокий темп роста всех существенных характеристик в электронике, что отражено на представленном ниже рисунке. Наиболее революционные достижения в этой области приближаются к квантовым пределам, выдвигаемым самой природой, когда работает только один электрон, один квант энергии, один квант магнитного потока. С принципиальной точки зрения для оперирования в двоичной системе счисления необходимы устройства, которые способны реализовывать два устойчивых состояния «0» и «1» и допускать быстрое переключение между ними. Подобными наноустройствами могут служить рассмотренные выше одноэлектронный транзистор, сверхпроводящий джозефсоновский переход и наномагнитная спинтронная структура. Их использование позволяет ожидать достижения быстродействия порядка $\sim 10^{12}$ операций в секунду и плотности записи информации порядка 10^5 Тбит/см², что на много порядков выше, а энергопотребление – на несколько порядков ниже, чем достигнутые сегодня. При такой плотности записи в жестком диске размером с наручные часы можно будет разместить библиотеку национального масштаба.



Динамика эволюции параметров больших интегральных схем оперативной памяти для персональных компьютеров.

В ближайшем будущем предполагается, что в качестве ячеек хранения информации будут также применяться углеродные нанотрубки. В последнее время активно ведется разработка модуля памяти на их основе. Не исключено, что в перспективе подобные устройства станут альтернативой традиционной флэш-памяти. Ожидается также переход от планарных структур к объемным микросхемам, размеры активных элементов уменьшатся до размеров молекул. Получат распространение объемные решения на нейронно-подобных элементах. Появится быстродействующая долговременная память на белковых молекулах, емкость которой будет измеряться терабайтами.

В ближайшем будущем планируется создание «умных» материалов с памятью, самозалечивающихся материалов, нанороботов, существующих внутри человеческого тела и обеспечивающих его нормальное функционирование, и т.д. Предугадать, а тем более перечислить все области человеческой деятельности, где могут найти применение нанотехнологии, нет никакой возможности. Первые прогнозы путей развития нанотехнологий, часто воспринимавшиеся как фантастический кинофильм, оправдываются, причем с опережением по времени. Так, многие исследователи полагают, что внедрение нанотехнологических методов в «классическую» биологию приведет в течение ближайшего столетия к замене биологического вида «человека разумного» новым биологическим видом. Этот человек будет гибридом искусственного и естественного интеллектов, представляя сложнейший синтез генных модификаций и имплантаций технологических систем. Электронные имплантаты, размещаемые непосредственно в человеческом организме, будут обеспечивать непрерывную связь с сетями, подобными Internet.

Сегодня уже применяется множество имплантируемых устройств различного назначения: от простых механических суставов и соединительных деталей до сложных сердечных электростимуляторов. В будущем сложность и разнообразие подобного рода устройств будет возрастать в геометрической прогрессии и, прежде всего, за счет новейших достижений нанотехнологий.

Нанотехнологии – без сомнения самое передовое и многообещающее направление развития науки и техники на сегодняшний день. Возможности этого направления поражают воображение, а мощь вселяет страх. Видимо, будущее развитие нанотехнологии будет основываться на балансе между созиданием и разрушением. Как и у любого передового направления, у нанотехнологии обязательно появятся и военные применения. Трезвомыслящие ученые прекрасно понимают, что нанотехнология способна породить серьезные проблемы, поскольку может быть использована для нанесения ущерба, а не только для всеобщего блага. В 1989 году была создана специальная организация «Институт Предвидения» (Foresight Institute) с девизом «Готовься к нанотехнологиям». Здесь был подготовлен набор правил «техники безопасности» для разработчиков и изготовителей наносистем.

Основатель и глава этого института – Эрик Дрекслер, который в своей книге «Машины созидания» проанализировал возможные опасности, связанные с неконтролируемым развитием нанотехнологии. По инициативе Дрекслера проводятся ежегодные Форсайтовские конференции, которые фиксируют достижения нанотехнологий и отмечают возможные опасные для общества моменты ее развития. На одной из первых таких конференций было принято обращение к ученым и правительствам – не проводить наноразработки в военных целях. К сожалению, диктовать реальный спектр нанотехнологических разработок и приложений будут вовсе не ученые, а правительства и индустрия.

Третья научно-техническая революция требует не только научной и технической подготовки новых кадров, но и общей психологической подготовки. Учитывая это, в ряде промышленно развитых стран (США, Германия, Япония) курсы нанотехнологии уже введены в школьные программы.

Историческая ретроспектива

Ниже приводится хронология значимых событий в развитии нанотехнологий:

- в 1931 году немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать нанобъекты;
- в 1959 году Ричард Фейнман прочитал свою знаменитую лекцию, в которой заложил основные принципы нанотехнологий и предсказал перспективность их развития;
- в 1966 году Роберт Янг предложил идею использования пьезодвигателей, которые в настоящее время обеспечивают перемещения острия зонда сканирующего туннельного микроскопа с точностью до 10^{-2} нм;
- в 1968 году Альфред Чо и Джон Артур разработали теоретические основы нанотехнологии обработки поверхностей;
- в 1971 году компаниями Bell и IBM (США) получены первые одноатомные полупроводниковые пленки – «квантовые ямы». Началась эпоха практической нанотехнологии – технологии низкоразмерных полупроводниковых структур.

- в 1974 году японский физик Норио Танигучи в своем докладе «Основные принципы нанотехнологий» ввел в научный оборот слово «нанотехнология», которым предложил называть процессы, происходящие в областях размером менее одного микрона;
- в 1982 году немецкие физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), способный показывать отдельные атомы;
- в 1985 году американские физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смэйли открыли фуллерен – молекулу, по форме напоминающую футбольный мяч и содержащую 60 атомов углерода, чем предопределили стремительное развитие технологии углеродных нанотрубок;
- в 1986 году появился сканирующий атомно-силовой микроскоп;
- в 1986 году выходит книга Эрика Дрекслера «Машины творения: грядет эра нанотехнологий». В ней дано описание молекулярных самовоспроизводящихся роботов, способных производить сборку молекул, их декомпозицию, запись в память нанокomпьютера программ воспроизведения и реализацию этих программ. Прогноз развития нанотехники в течение 20 лет невероятным образом сбывается шаг за шагом с существенным опережением по времени; американский физик А. Эшкин создает лазерный пинцет – устройство манипулирования микро- и нанообъектами с помощью сфокусированного лазерного луча;
- в 1987 году французский физик Ж.М. Лен вводит в обиход понятия «самоорганизация» и «самосборка»;
- в 1989 году показана возможность создания молекулярных автоматов. С помощью СТМ, произведенного фирмой IBM, были набраны три буквы (IBM) из 35 атомов ксенона на грани кристалла никеля. Дальнейшие работы подтвердили возможность «надежного закрепления» атомов на поверхностях, выполненных из различных материалов. Субмолекулярная сборка с этого момента становится реальностью;
- в 1991 году японским физиком С. Ииджимой получены первые углеродные нанотрубки;
- в 1998 году созданы первые полевые транзисторы на основе нанотрубок, разработана технология создания нанотрубок длиной не больше 300 нм;
- в 1999 году американскими физиками М. Ридом и Дж. Туром разработаны единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и молекулярными цепочками;

- в 2000 году российскому ученому Жоресу Алферову присуждена Нобелевская премия по физике за развитие полупроводниковых гетероструктур, ставших основой многочисленных наноэлектронных устройств;
- в 2001 году специалистами компании IBM созданы первые образцы логических микросхем на основе полевых транзисторов на углеродных нанотрубках;
- в 2002 году голландский ученый С. Деккер путем синтеза углеродной нанотрубки с молекулой ДНК создал первый бионаномеханизм;
- в 2004 году российские ученые Андрей Гейм и Константин Новосёлов получили первые образцы графена (двумерного материала с гексагональной решеткой, состоящего из атомов углерода), за что в 2010 году удостоились Нобелевской премии;
- в 2007 году интернациональной группой физиков разработан сканирующий электронный микроскоп с субатомным разрешением в 0,05 нм; группой американских ученых разработана технология сканирующей нанолитографии с разрешением 12 нм и скоростью нанесения дорожек более 1 мм/с.

В настоящее время принято считать, что первое упоминание о структурах и методах, которые в современном понимании объединяются термином «нанотехнологии», было высказано Нобелевским лауреатом Ричардом Фейнманом в лекции «Там внизу много места», которую он прочитал в конце 1959 года в Калифорнийском технологическом институте на ежегодной встрече Американского физического общества. В этой лекции Р. Фейнман высказал предположение, что в будущем «возможно будет механически перемещать одиночные атомы при помощи манипулятора соответствующего размера, по крайней мере, такой процесс не противоречит известным на сегодняшний день физическим законам. С помощью такого манипулятора можно будет производить поатомную сборку макрообъектов. Таким нанороботам требуется только дать необходимое количество молекул и энергию и написать программу для сборки необходимых предметов. Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы химии и биологии». Остается только восхищаться столь удивительному предвидению ученого.

Рекомендуемая литература

Физика: учебник для 11 класса с углубленным изучением физики / Под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. М.: Просвещение, 2005.

Нанотехнологии: Азбука для всех / Под ред. Ю.Д. Третьякова. М.: Физматлит, 2008.

Введение в нанотехнологию: пер. с японск. / Н. Кобаяси. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.

Очарование нанотехнологии: пер. с нем. / У. Хартманн. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.

Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 80-86.

Кульбачинский В.А. Полупроводниковые квантовые точки // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 4. С. 98-104.

Бахтизин Р.З. Голубые светодиоды // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, №3. С. 75-83.

Юнович А.Ю. Свет из гетероперехода // Природа. 2001. № 6. С. 38-46.

