

В.Л. Ткалич
А.В. Макеева
Е.Е. Оборина

Физические основы наноэлектроники



Санкт-Петербург
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

В. Л. Ткалич, А. В. Макеева, Е. Е. Оборина

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2011

УДК 389.001

Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е. «Физические основы наноэлектроники». Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 83с.

В учебном пособии рассмотрены физические основы наноэлектроники. Технологии создания твердотельных наноструктур, применение квантово-размерных структур в приборах наноэлектроники.

Учебное пособие соответствует утвержденным учебным программам по направлениям 211000 – «Конструирование и производство электронно-вычислительных средств» для бакалавров и 210200.6805 – «Технологии и инструментальные средства проектирования электронных средств» для магистров.

Печатается по решению Совета факультета КТиУ СПбГУ ИТМО от 17.05.11 (протокол № 5).



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

© Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Свойства индивидуальных наночастиц.....	7
1.1 Металлические нанокластеры.....	7
1.1.1 Магические числа.....	7
1.1.2. Геометрическая структура	7
1.1.3. Электронная структура.....	8
1.1.4. Реакционная способность.....	9
1.1.5. Магнитные кластеры	9
1.2. Полупроводниковые наночастицы.....	10
1.2.1. Оптические свойства	10
1.2.2. Фотофрагментация.....	10
1.3. Кластеры инертных газов.....	11
1.4. Заключение	11
Глава 2. Углеродные наноструктуры	13
2.1. Углеродные молекулы	13
2.1.1. Природа углеродной связи	13
2.2. Углеродные кластеры	15
2.2.1. Малые углеродные кластеры	15
2.2.2. Фуллерен C ₆₀	16
2.2.3. Неуглеродные шарообразные молекулы	17
2.3. Углеродные нанотрубки.....	18
2.3.1. Методы получения.....	18
2.3.2. Применение углеродных нанотрубок	19
Глава 3. Объемные наноструктурированные материалы.....	21
3.1. Разупорядоченные твердотельные структуры.....	21
3.1.1. Методы синтеза	21
3.1.2. Основные свойства.....	23
3.1.3. Другие свойства.....	25
Глава 4. Физические принципы наноэлектроники.....	27
4.1. Наноэлектроника. Предисловие	27
4.2. Введение.....	28
4.3. Принцип квантования и квантовое ограничение.....	29
4.3.1. Структуры с двумерным электронным газом	31
4.3.2. Структуры с одномерным электронным газом	33
4.3.3. Структуры с нульмерным электронным газом	34

4.4. Транспорт носителей заряда вдоль потенциальных барьеров ..	35
4.4.1. Фазовая интерференция электронных волн	36
4.4.2. Квантовый эффект Холла	36
4.4.3. Приборы на интерференционных эффектах	38
4.5. Туннелирование носителей заряда	40
4.5.1. Структуры с вертикальным переносом и квантовые сверхрешетки	42
4.5.2. Одноэлектронное туннелирование	44
4.5.3. Приборы на одноэлектронном туннелировании	45
4.5.4. Резонансное туннелирование	48
4.5.5. Приборы на резонансном туннелировании	49
4.6. Спиновые эффекты	52
4.6.1. Гигантское магнитосопротивление	53
4.6.2. Спин-зависимое туннелирование	54
4.6.3. Манипулирование спинами носителей заряда в полупроводниках	54
4.6.4. Эффект Кондо	55
4.6.5. Спинтронные приборы	56
Глава 5. Технологии создания твердотельных наноструктур ...	59
5.1. Традиционные методы осаждения пленок	59
5.2. Методы, использующие сканирующие зонды	59
5.3. Нанолитография	61
5.3.1. Нанопечать	62
5.3.2. Сравнение нанолитографических методов	62
5.4. Саморегулирующиеся процессы	65
5.4.1. Самоупорядочение	65
5.4.2. Самосборка	66
Глава 6. Применение квантово-размерных структур в приборах нанoeлектроники	68
6.1. Лазеры с квантовыми ямами и точками	68
6.2. Фотоприемники на квантовых ямах	70
6.3. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика	73
6.4. Нанокomпьютеры	76
История кафедры	79
Список литературы	82

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 210200.6805 «Технологии и инструментальные средства проектирования электронных средств», а также для бакалавров по направлению 211000 «Конструирование и проектирование электронно-вычислительных средств».

Нанoeлектроника является новой областью науки и техники, формирующейся сегодня на основе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии и технологии полупроводниковой электроники. Ее содержание определяется необходимостью установления фундаментальных закономерностей, определяющих физико-химические особенности формирования наноразмерных структур (структур с размером от единиц до десятков нанометров, $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), их электронные и оптические свойства. Исследования в области нанoeлектроники важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации.

Первым электронным переключающим прибором был вакуумный диод, запатентованный в 1904 году англичанином Д.А. Флемингом. С тех пор развитие электроники отмечено изобретением и практическим освоением вакуумного триода (1906 год, Л. Де Форест и Р. Либен) и полупроводникового транзистора (1947 год, У. Браттейн, Дж. Бардин, У. Шокли), а затем интегральных микросхем на кремнии (1958-1959 годы), положившим начало новому направлению в электронике - микроэлектронике. Главной тенденцией этого развития является уменьшение размеров приборных структур. В современных интегральных микросхемах они составляют единицы и десятые доли микрона ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области, а это образования из единиц и десятков атомов,

все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой - открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных систем. Последние и являются основным объектом исследований и разработок новой области электроники - наноэлектроники, зародившейся в 80-х годах нашего века.

Учебное пособие предназначается для применения как в учебном процессе, так и при выполнении научно-исследовательских работ.

Глава 1.

СВОЙСТВА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

1.1 Металлические нанокластеры

1.1.1 Магические числа

Кластерами называются нанообъекты, состоящие из сравнительно небольшого числа атомов или молекул, от единиц до сотен тысяч. Кластеры имеют наноразмеры по трем направлениям.

Обычно кластеры делят на газовые и твердотельные, имея в виду источник их получения. Чтобы получить газовые кластеры, надо резко охладить газ, желательно при высоком давлении. Для получения твердотельных кластеров поверхность твердого тела облучают лазерным лучом или пучком заряженных частиц (электронов, ионов) с большой кинетической энергией. С поверхности материала при этом вылетает некоторое количество макроскопических капель, отдельные частицы и кластеры разных размеров. Затем кластеры направляют в специальный прибор – масс-спектрометр, позволяющий определить их распределение по массам, то есть по числу частиц в кластере.

Чаще всего в потоке кластеров встречаются кластеры, состоящие из определенного числа частиц, что означает, что эти кластеры наиболее устойчивы, стабильны. Эти числа называются магическими.

1.1.2. Геометрическая структура

С уменьшением диаметра кластера, резко возрастает соотношение величины поверхности к объему, из-за чего вклад

поверхности в полную энергию становится все более важным. В результате этого, кластер стремится образовать как можно более сферичную поверхность, что для наночастиц ГЦК металлов приводит к формированию кубоктаэдрической формы. Ниже определенного критического размера у малых кластеров некоторых металлов, было замечено образование и иных кристаллических модификаций с икосаэдрической или декаэдрической 5-ти частичной симметрией.

Но полной ясности в понимании процесса формирования той или иной кристаллической фазы не наблюдается. Исследования с помощью электронного микроскопа высокого разрешения отчетливо показали, что могут наблюдаться изменения геометрии кластеров со временем. Эти изменения связаны с флуктуациями поверхностных атомов, колебания которых ограничены соседями слабее, чем колебания внутренних. А доля поверхностных атомов растет с уменьшением размера наночастиц.

1.1.3. Электронная структура

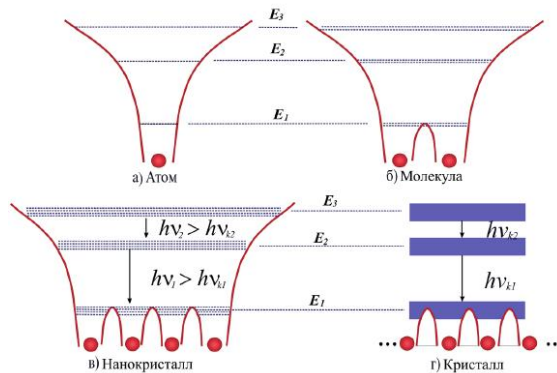


Рис. 1.1. Расположение уровней в атоме (а), молекуле (б), нанокристалле (в), кристалле (г)

Когда частица металла уменьшается в размерах до нескольких сотен атомов, плотность состояний (количество энергетических уровней в заданном интервале энергий) в зоне проводимости – в верхней зоне, содержащем электроны радикально меняется. Непрерывная плотность состояний в зоне заменяется набором дискретных уровней. Маленький кластер аналогичен молекуле с ее дискретным набором энергетических уровней, связывающими и антисвязывающими орбиталями.

Данный эффект получил название квантового размерного эффекта – при уменьшении размера наночастиц энергия между

энергетическими переходами, а значит и энергия квантов излучения увеличивается. Именно поэтому цвета окраски и излучения коллоидных растворов наночастиц зависят от их размера.

Кластеры разных размеров имеют разную электронную структуру и, соответственно, разные расстояния между уровнями.

1.1.4. Реакционная способность

Многочисленные экспериментальные результаты свидетельствуют о зависимости реакционной способности (характеристика химической активности веществ, учитывающая как разнообразие реакций, возможных для данного вещества, так и их скорость) наночастиц от количества атомов в них.

1.1.5. Магнитные кластеры

В кластере магнитный момент каждого атома взаимодействует с моментами других атомов, что может выстроить все моменты в одном направлении по отношению к какой либо оси симметрии кластера. Такой кластер обладает суммарным ненулевым магнитным моментом. Однако атомы в кластере колеблются, причем энергия колебаний увеличивается с ростом температуры. Эти колебания вызывают некоторое разупорядочивание магнитных моментов отдельных атомов кластера, так что его полным магнитным моментом становится меньше, чем он был бы в случае строго параллельного положения всех атомов. Магнитный момент отдельного кластера взаимодействует с приложенным постоянным полем таким образом, что его расположение по полю становится более вероятным, чем против поля. Полный магнитный момент обратно пропорционален температуре. Этот эффект называют суперпарамагнетизмом. Когда энергия взаимодействия магнитного момента кластера с приложенным магнитным полем больше энергии колебаний, усреднения из-за осцилляции не происходит, зато происходит усреднение из-за вращения кластера как целого. Такая ситуация называется магнетизмом замороженных моментов[1].

1.2. Полупроводниковые наночастицы

1.2.1. Оптические свойства

Оптические спектры поглощения существенно сдвигаются в голубую сторону (в сторону уменьшения длин волн) при уменьшении размеров частиц. Это объясняется локализацией экситонов, связанных электрон-дырочных пар, образующихся под действием фотона с энергией больше ширины щели для данного вещества. Возможны две ситуации, называемые режимами слабой и сильной локализации. В режиме слабой локализации радиус наночастицы больше радиуса экситона, но область перемещения экситона ограничена, что приводит к смещению спектра поглощения в голубую сторону. Когда радиус частицы меньше радиуса орбиты электрон-дырочной пары, движение электрона и дырки становятся независимыми и экситон перестает существовать. Электрон и дырка имеют собственные наборы энергетических уровней. Это также приводит к голубому смещению и к возникновению нового набора линий поглощения.

Таким образом, при уменьшении размеров наночастицы наименьшая энергия поглощения, называемая границей поглощения, сдвигается в сторону больших энергий, щель увеличивается, увеличивается и интенсивность поглощения.

1.2.2. Фотофрагментация

При облучении лучом лазера с модулируемой добротностью наблюдалась фрагментация наночастиц. Продукты зависят от размера кластера, интенсивности светового пучка и длины волны. Зависимость сечения фотофрагментации (меры вероятности развала кластера) под действием излучения лазера от размера фрагментов наночастиц показала, что диссоциация частиц одних размеров более вероятна, чем других.

Многokратная ионизация кластера вызывает его нестабильность, что приводит к очень быстрой высокоэнергичной диссоциации, или взрыву. Скорость разлета фрагментов в этом процессе очень высока. Такое явление называется кулоновским взрывом. Многokратная ионизация кластера вызывает быстрое перераспределение зарядов на его атомах, делающее каждый атом более положительно заряженным.

Если энергия электростатического отталкивания между атомами становится больше энергии связи, атомы быстро разлетаются друг от друга с большими скоростями. Минимальное количество атомов N , необходимое для стабильности кластера с зарядом Q , зависит от типа атомов и природы связи между атомами кластера.

1.3. Кластеры инертных газов

Существуют структурные магические числа. Хотя у атомов инертных газов электронные оболочки заполнены, из-за движения электронов около атомов они могут иметь ненулевое мгновенное значение дипольного момента P_1 . Два атома инертного газа создают притягивающий их друг к другу потенциал:

$$U(R) = \frac{2P_1P_2}{R^3} = \frac{-4\alpha P_1^2}{R^6},$$

где P_2 – дипольный момент второго атома,
 R – расстояние между ними,
 α – электронная поляризуемость.

Этот потенциал известен как потенциал Ван дер Ваальса и применим на относительно больших расстояниях между атомами. При тесном сближении двух атомов возникает отталкивание между перекрывающимися электронными облаками. Экспериментально показано, что этот потенциал имеет вид B/R^{12} . Таким образом, полный потенциал взаимодействия двух атомов инертных газов имеет вид

$$U(R) = \frac{B}{R^{12}} - \frac{C}{R^6}$$

Этот потенциал, известный как потенциал Леннарда-Джонса. Сила взаимодействия, вызываемая этим потенциалом, равна нулю на равновесном расстоянии $R_{\min} = (2B/C)^{1/6}$. На большем расстоянии она притягивает атомы, на меньшем – отталкивает. Обобщая вышесказанное, заметим, что эта сила слабее сил, связывающих в кластеры атомы металлов и полупроводников.

1.4. Заключение

Физические, химические и электронные свойства наночастиц сильно зависят от количества и типа атомов, составляющих наночастиц. В некоторых случаях наночастицы демонстрируют новые

свойства, отсутствующие у того же материала в объеме, например магнетизм кластеров, состоящих из немагнитных атомов. Помимо постановки перед учеными новых задач, связанных с объяснением природы нового поведения, эти результаты имеют огромный потенциал использования на практике, позволяя выбирать свойства материала путем варьирования размерами частиц.

Глава 2.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ

2.1. Углеродные молекулы

2.1.1. Природа углеродной связи

Для понимания природы углеродной связи необходимо рассмотреть электронную структуру атома углерода. В нем имеется шесть электронов, которые в невозбужденном атоме находятся на низших энергетических уровнях. Когда атом углерода связан в молекуле с другими атомами, его электронная структура выглядит так: $(1s)^2, (2s), (2p_x), (2p_y), (2p_z)$. На нижнем уровне $1s$ с квантовым числом $n = 1$ находятся два электрона с противоположно направленными спинами. Распределение заряда электрона в s состоянии сферически симметрично. Эти $1s$ - электроны не принимают участия в образовании химических связей. Остальные четыре электрона находятся на уровнях с $n = 2$: один на сферически симметричной s - орбитали, три на p_x, p_y и p_z орбиталях. Распределения заряда на p орбиталях имеют сильно удлиненную в одном направлении форму и их оси взаимно перпендикулярны, как показано на Рис. 2.1.

Внешняя s орбиталь и три p орбитали формируют химические связи атома углерода с другими атомами. Распределения зарядов, связанных с этими орбиталями, смешиваются, или другими словами перекрываются с распределениями зарядов каждого связанного с углеродом атома. В сущности можно рассматривать облако

электронного заряда между двумя связанными атомами как клей, сцепляющий эти атомы.

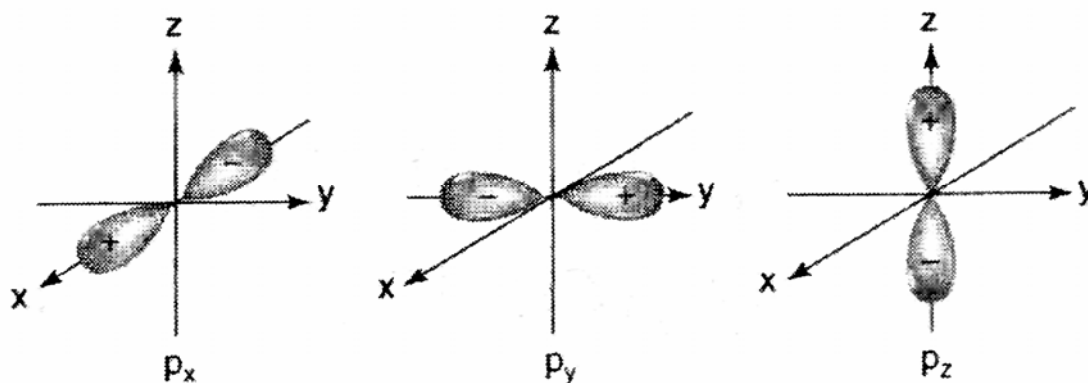


Рис.2.1. Схемы p_x -, p_y - и p_z -орбиталей атома углерода

В атоме углерода разность энергий между $2s$ - и $2p$ - уровнями очень мала, что позволяет волновым функциям $2s$ - состояния смешиваться с одной или несколькими волновыми функциями $2p$ состояния. Ненормализованная волновая функция Ψ валентного состояния может быть записана в виде:

$$\Psi = s + \lambda p$$

где p означает смесь p_i орбиталей. При такой гибридизации направления лепестков p -орбиталей и угла между ними меняются. Твердый углерод имеет две основные формы, называемые аллотропными модификациями, алмаз и графит. Они стабильны при комнатной температуре. Алмаз состоит из атомов углерода, тетраэдрически связанных друг с другом посредством sp^3 -гибридизированных связей, образующих трехмерную сетку. У каждого атома углерода четыре ближайших соседа. Графит имеет слоистую структуру, причем каждый слой образован шестиугольниками из атомов углерода, связанных посредством sp^2 -гибридизированной связи, угол между которыми составляет 120° . У каждого атома углерода есть три ближайших соседа в плоскости слоя. Эти гексагональные слои связаны друг с другом относительно слабыми силами Ван дер Ваальса.

2.2. Углеродные кластеры

2.2.1. Малые углеродные кластеры

Для получения кластеров углерода может быть использовано лазерное испарение углеродной подложки в потоке гелия с помощью установки, показанной на рисунке.

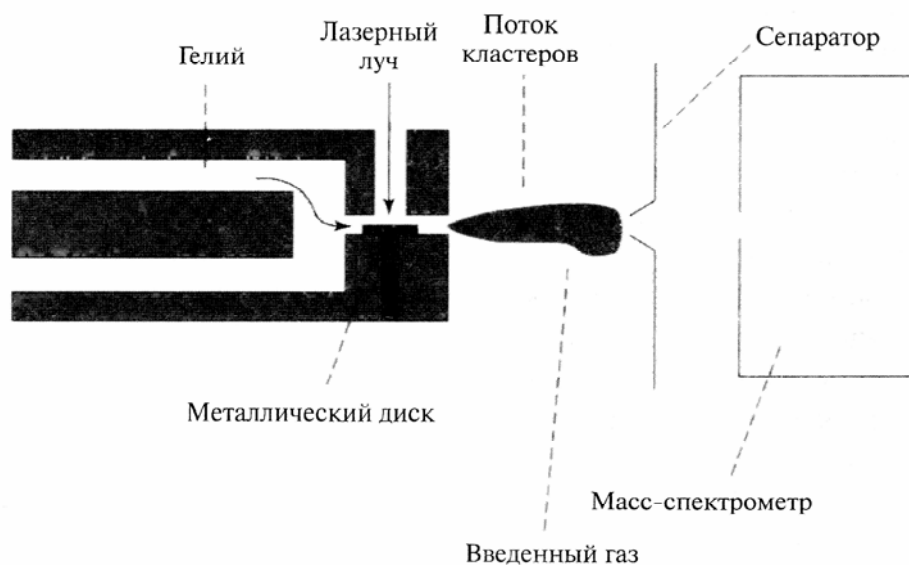


Рис. 2.2. Установка для получения наночастиц металлов лазерным испарением атомов с поверхности.

Пучок электронейтральных кластеров фото ионизируется ультрафиолетовым лазером и анализируется масс-спектрометром. Вычисления структуры малых кластеров методом молекулярных орбиталей показывают, что такие кластеры имеют линейную или замкнутую неплоскую моноциклическую геометрию. Линейная структура с sp гибридизацией наблюдается при нечетных значениях N (N -число атомов в кластере), циклическая при четных. Открытые структуры из 3, 11, 15, 19 и 23 атомов со стандартными углами наиболее заметны на спектре и, следовательно, более стабильны. Замкнутые структуры имеют углы между углеродными связями, отличающиеся от предсказаний обычной теории гибридизации.

2.2.2. Фуллерен C₆₀

Открытие молекулы, похожей на футбольный мяч и состоящей из 60 атомов углерода, явилось в некоторой степени случайным результатом исследования природы материи в межзвездном пространстве. Они были посвящены изучению поглощения света межзвездной пылью, т.е. малыми частицами вещества, находящимися в межзвездном и межгалактическом пространстве. При прохождении света удаленной звезды через космическое пространство его интенсивность уменьшается. Это явление называется оптическим поглощением и происходит вследствие поглощения и рассеяния света на межзвездной пыли, находящейся на пути распространения света от звезды к Земле. Ученые изучают это поглощение, измеряя интенсивность приходящего от звезд света на разных длинах волн, то есть разных цветов. В результате проведения подобных исследований выяснилось, что в ультрафиолетовом диапазоне поглощение увеличивается при длинах волн около 220 нм (что соответствует энергии квантов 5,6 эВ). Это поглощение приписывалось рассеянию света на гипотетических малых частицах графита, находящихся в межзвездной среде.

Структура C₆₀ и его кристаллов

Молекула C₆₀ была названа фуллереном по имени архитектора и изобретателя Р. Бакминстера Фуллера, сконструировавшего геодезический свод, напоминающий структуру C₆₀. Первоначально молекулу называли бакминстерфуллереном, но это название несколько неудобно, так что оно было сокращено до фуллерена. Фуллерен имеет 12 пентагональных (пятиугольных) и 20 гексагональных (шестиугольных) симметрично расположенных граней, образующих форму, близкую к шару. На самом деле, геометрия молекулы фуллерена ближе к форме футбольного мяча, также состоящего из пяти и шестигранных фасеток. Эти шарообразные молекулы могут соединяться друг с другом в твердом теле с образованием гранецентрированной (ГЦК) кристаллической решетки. Расстояние между центрами ближайших молекул в гранецентрированной решетке, удерживаемых слабыми Ван дер Ваальсовыми силами, составляет около 1 нм. поскольку C₆₀ растворим в бензоле, его монокристалл можно вырастить при медленном выпаривании раствора C₆₀ в бензоле.

Сверхпроводимость C_{60}

Сверхпроводимость - это состояние вещества, при котором электрическое сопротивление образца становится равным нулю, а магнитное поле в него проникать не может. Последнее проявляется как уменьшение магнитной восприимчивости χ образца до значения $\chi = -1$. В 1991 году, когда А. Ф. Хебард с группой в Bell Telephone Laboratory залегировал кристалл C_{60} калием и проверил полученное таким способом вещество на сверхпроводимость, то к всеобщему удивлению были найдены свидетельства перехода в сверх проводящее состояние при температуре 18 К. Обнаружилось, что новый класс сверхпроводящих веществ имеет простую кубическую решетку и содержит всего два химических элемента. Вскоре после первого сообщения было обнаружено, что решетку можно легировать многими щелочными атомами, а температура сверхпроводящего перехода может быть поднята до 33 К. При увеличении радиуса атома примеси параметр кубической решетки C_{60} увеличивается, а с ним увеличивается и критическая температура сверхпроводящего перехода[1].

2.2.3. Неуглеродные шарообразные молекулы

Возможно ли существование шарообразных молекул из других атомов, например, кремния или азота? Исследователи в Японии сумели создать корзинообразные структуры из кремния. Однако в отличие от углерода один лишь кремний не может образовывать замкнутые структуры. Исследователи показали, что кремний может формировать замкнутую структуру вокруг атома вольфрама в виде гексагональной клетки. Потенциальными применениями таких структур являются компоненты квантовых компьютеров, химические катализаторы и новые сверхпроводники. Существует множество предсказанных на основе вычислений молекулярных орбиталей стабильных замкнутых структур из других атомов. Например, методом функционала плотности показано, что кластер N_{20} должен быть стабильным и иметь додекаэдрическую структуру. Вычисления также показали, что этот кластер будет очень мощным взрывчатым веществом, примерно в 3 раза мощнее наиболее энергоемких

современных материалов. Однако синтез N_{20} может оказаться очень сложным.

2.3. Углеродные нанотрубки

2.3.1. Методы получения

- лазерное испарение

Кварцевая труба, содержащая газообразный аргон и мишень из графита, нагревается до 1200°C . Внутри трубки, но за пределами печи находится охлаждаемый водой медный коллектор. Графитовая мишень содержит небольшие количества кобальта и никеля, выступающие в качестве каталитических зародышей образования нанотрубок. При попадании высокоинтенсивного пучка импульсного лазера на мишень графит испаряется. Поток аргон выносит атомы углерода из высокотемпературной зоны к охлаждаемому медному коллектору, на котором и происходит образование нанотрубок. Таким методом можно получить трубки диаметром 10-20 нм и длиной 100 микрон.

- углеродная дуга

К электродам из углерода диаметром 5 - 20 мм, разнесенным на расстояние около 1 мм, в потоке гелия при давлении 500 Торр прикладывается напряжение 20 - 25 В. Атомы углерода вылетают из положительного электрода и образуют нанотрубки на отрицательном, при этом длина положительного электрода уменьшается, а на отрицательном электроде осаждается углеродный материал. Для получения однослойных нанотрубок в центральную область положительного электрода добавляют небольшие количества кобальта, никеля или железа в качестве катализаторов. Если не использовать катализаторы, получают вложенные или многослойные нанотрубки, то есть нанотрубка внутри нанотрубки. Дуговым методом можно получить однослойные нанотрубки диаметром 1 - 5 нм и длиной порядка 1 мкм.

- химическое осаждение

Метод: химического осаждения из паровой фазы заключается в разложении газообразного углеводорода, например, метана (CH_4), при температуре 1100°C . При разложении газа образуются свободные атомы углерода, конденсирующиеся затем на более холодной подложке, которая может содержать разнообразные катализаторы, такие как железо. Этот процесс позволяет получать продукт непрерывно и, возможно, является наиболее предпочтительным для увеличения масштабов при промышленном производстве.

Механизм роста нанотрубок до сих пор неясен. Так как для роста однослойных трубок необходим металлический катализатор, механизм должен объяснять роль атомов кобальта или никеля. Одно из предложений, называемое «механизмом скутера», состоит в том, что атомы металлического катализатора присоединяются к оборванным связям на открытом конце трубки и обегая ее по краю, способствуют захвату атомов углерода из паровой фазы и их встраиванию в стенку трубки.

2.3.2. Применение углеродных нанотрубок

- полевая эмиссия и экранирование

- компьютеры

- топливные элементы

- химические сенсоры

- катализ

- механическое упрочнение

Необычные свойства углеродных нанотрубок допускают множество возможных применений: от электродов батареек до электронных устройств и армирующих волокон для получения более прочных композитов. В этом разделе будут описаны некоторые потенциальные применения, над которыми уже ведется работа.

Однако для реализации этого потенциала необходимо разработать технологию крупномасштабного производства однослойных нанотрубок. Существующие методы синтеза обеспечивают лишь небольшой выход конечного продукта, стоимость которого на сегодня составляет около 1 500\$ за грамм (680 000\$ за фунт). С другой стороны, разработаны основанные на химическом

осаждении методы крупномасштабного производства многослойных нанотрубок стоимостью 60\$ за фунт, причем при увеличении спроса ожидается дальнейшее существенное падение этой цифры. Методы, используемые для увеличения масштабов производства многослойных нанотрубок, должны лечь в основу широкомасштабного производства и однослойных нанотрубок. Можно надеяться, что из-за их громадного потенциала использования будут разработаны технологии крупнотоннажного синтеза, что приведет к падению цен до цифр порядка 10\$ за фунт.

Глава 3.

ОБЪЕМНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Объемные наноструктурированные материалы это твердые тела с наноразмерной микроструктурой. Их основными элементами являются наномасштабные структурные единицы или наночастицы. Эти элементы структуры могут быть разупорядочены друг по отношению к другу, иначе говоря, их оси симметрии ориентированы случайно, а положение в пространстве не обладает никакой симметрией. Частицы также могут быть и упорядоченными, создавая решетку, обладающую симметрией.

3.1. Разупорядоченные твердотельные структуры

3.1.1. Методы синтеза

- компактирование

В качестве примера такого процесса рассмотрим способ изготовления наноструктурированного сплава Cu-Fe. Смесь медного и железного порошков с составом $Fe_{85}Cu_{15}$ перемалывается в шаровой мельнице в течение 15 часов при комнатной температуре, затем материал уплотняется в штампах из карбида вольфрама при давлении 1 Па в течение 24 часов. Эта прессовка далее обрабатывается горячим обжимом в течение 30 минут при температуре вблизи $400^{\circ}C$ и давлении 870 МПа. Окончательная плотность составляла 99,2% от максимально возможной для материала без пор.

- быстрое отвердевание

Металл расплавляется с помощью радиочастотных нагревательных катушек и выдавливается через форсунку с образованием потока жидкости. Этот поток непрерывно набрызгивается на охлаждаемый изнутри металлический барабан, вращающийся в атмосфере инертного газа. В таком процессе образуются полосы или ленты толщиной от 10 до 100 микрон. На структуру материала влияют размер форсунки, расстояние от форсунки до барабана, давление расплава в форсунке и скорость вращения металлического барабана. Потребность в легких высокопрочных материалах привела к созданию таким способом сплавов, состоящих из 85 - 94 % алюминия и добавок других металлов, например, Y, Ni и Fe. Полученный сплав Al-Y-Ni-Fe, состоящий из 10 - 30 нанометровых частиц алюминия, встроенных в аморфную матрицу, может иметь напряжение на разрыв, превышающее 1,2 ГПа. Такое высокое значение объясняется наличием бездефектных наночастиц алюминия.

-газовая атомизация

Способ состоит в охлаждении расплава металла с помощью высокосортного потока инертного газа. При взаимодействии струи газа с металлом кинетическая энергия газа передается расплаву, и образуются тонкодисперсные капли. Этот метод можно использовать для крупномасштабного производства наноструктурированных порошков, из которых впоследствии методом горячего компактирования можно получить объемные образцы.

- гальванический способ

Например, лист наноструктурированной меди можно получить, помещая два электрода в электролит из медного купороса CuSO_4 и прикладывая напряжение между электродами. Медь, выделяющаяся на отрицательном электроде из титана, образует наноструктурированный слой. Таким способом можно получить лист меди толщиной 2 мм со средним размером зерна 27 нм и пределом текучести 119 МПа.

3.1.2. Основные свойства

- механические

Внутренний модуль упругости наноструктурированного материала, по сути, тот же, что и у объемного с микронными размерами зерен, однако только до тех пор, пока размеры наночастиц не становятся очень малыми, скажем, менее 5 нм. Модуль Юнга это коэффициент между напряжениями и относительной деформацией, то есть наклон кривой нагружения в ее линейной области. Чем меньше модуль Юнга, тем материал более эластичен. На рисунке показана кривая зависимости модуля Юнга E для железа с наноразмерными зернами, нормированного на значение E_0 для железа с обычными зернами, от размера нанозерна. Из этого рисунка видно, что при размере зерен менее 20 нм модуль Юнга начинает быстро падать.

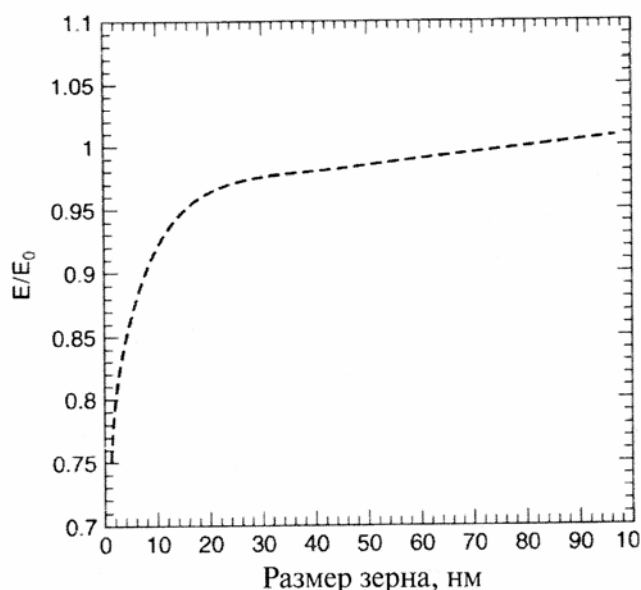


Рис. 3.1. Зависимость отношения модуля Юнга нанозернистого железа E к модулю Юнга железа с обычным размером зерен E_0 от размера зерна.

Предел текучести у традиционных материалов связан с размером зерна посредством уравнения Холла – Петча

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-(1/2)},$$

где σ_0 напряжение сил вязкого трения, тормозящих дислокацию, K - константа, d - размер зерна. Твердость также можно описать аналогичным уравнением. Предполагая, что это уравнение справедливо и в манометровой области размеров зерен, при $d = 50$ нм

получим предел текучести 4,14 ГПа. Причина такого увеличения σ_y при уменьшении d состоит в том, что у материала с меньшими зёрнами больше границ зёрен, блокирующих движение дислокаций. Отклонение от поведения по закону Холла Петча наблюдается при $d < 20$ нм. Оно может заключаться в отсутствии зависимости от размера зёрна (нулевой наклон), так и в падении σ_y с уменьшением d (отрицательный наклон). Считается, что традиционная деформация по дислокационному механизму в материалах с размером зёрна меньше 30 нм невозможна ввиду малой вероятности появления подвижных дислокации. Исследования объёмных наноматериалов с малыми размерами зёрен средствами просвечивающей электронной микроскопии не выявляют никаких признаков наличия подвижных дислокаций в процессе деформации. Следовательно, пластичность в них обеспечивается другими, недислокационными механизмами.

- электрические

Для того чтобы множество наночастиц образовало проводящую среду, необходимо чтобы они имели электрический контакт друг с другом. Одна из форм объёмного наноструктурированного материала, обладающего проводимостью, состоит из наночастиц золота, соединённых друг с другом длинными молекулами. Такая сеть образуется при взаимодействии аэрозоля частиц золота с аэрозолем тонко распыленного тиола RSH, например, додекантиола, в котором R это $C_{12}H_{25}$ - такие алкиловые тиолы содержат группу SH, которая может при соединяться к метилу CH_3 , и парафиновую цепочку длиной 8-12 элементов, обеспечивающую стерическое отталкивание между цепочками. Цепные молекулы располагаются по радиусам вокруг каждой наночастицы. Инкапсулированные частицы золота стабильны в алифатических растворах, таких, как гексан. Однако добавление к раствору небольшого количества дитиола вызывает формирование трёхмерных кластерных сетей, выпадающих из раствора в осадок. Кластеры частиц можно также получить осаждением на плоскую поверхность, если уже сформировалась коллоидная взвесь инкапсулированных наночастиц. Электронная проводимость в плоскости была измерена на двумерных массивах 500 нанометровых золотых частиц, попарно связанных друг с другом органическими молекулами. На рисунке изображено полученное литографическим путем устройство, позволяющее проводить электрические измерения на таких массивах.

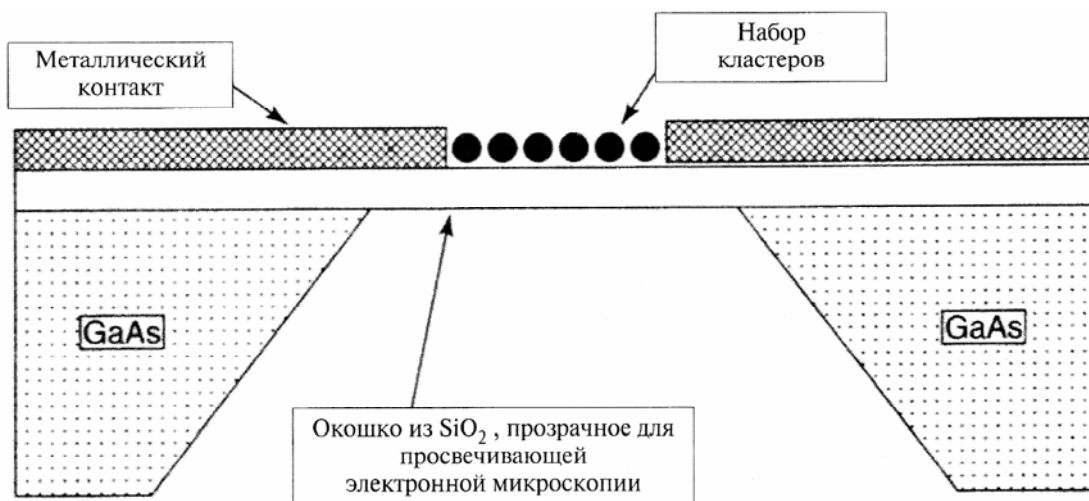


Рис.3.2. Созданное литографическим способом устройство для измерения электропроводности двумерного кластера наночастиц золота, связанных органическими молекулами, показано в разрезе.

3.1.3. Другие свойства

В то время как в предыдущем обсуждении упор делался на описание влияния наноразмерной микроструктуры на механические и электрические свойства, многие другие свойства объемных наноструктурированных материалов также зависят от характера и размеров наноструктуры. Например, магнитное поведение объемных ферромагнитных материалов, состоящих из наноразмерных зерен, заметно отличается от свойств того же материала с обычным размером зерен. Собственная реакционная способность наночастиц зависит от количества атомов в кластере. Можно ожидать, что такое поведение будут демонстрировать и объемные материалы с наноразмерными зернами, что даёт возможность создавать защиту от коррозии и разрушительного воздействия окисления, такую как при образовании пленки черного оксида на поверхности серебра. И действительно, в этой области уже имеется некоторый прогресс. Так, обнаружено, что наноструктурированный сплав $Fe_{73}B_{13}Si_9$ обладает повышенной стойкостью к окислению при температурах между 200 и 400 градусами Цельсия. Материал состоит из смеси 30 нм частиц $Fe(Si) Fe_2B$. Увеличение стойкости приписывается большому количеству границ зерен и тому факту, что диффузия атомов при высоких температурах в наноструктурированных материалах происходит быстрее. В этом материале атомы кремния в фазе $FeSi$ выделяются на границах зерен, где они могут диффундировать к поверхности образца. На

поверхности они реагируют с кислородом воздуха, образуя пленку из SiO_2 , которая препятствует дальнейшему окислению.

Температура плавления наноструктурированных материалов также зависит от размера зерен. Показано, что индий в виде 4-нанометровых частиц плавится при температуре на 110 К ниже, чем обычно. В сверхпроводящей фазе максимальный ток, который может пропускать материал, называется критическим током I_c . При превышении этой величины материал переходит в обычное состояние с конечной проводимостью. Обнаружено, что в объемном гранулированном сверхпроводнике Ni_3Sn уменьшение размера зерна приводит к увеличению критического тока. Оптическое поглощение наночастиц, определяющееся переходами между возбужденными состояниями, зависит от их размера и структуры. Следовательно, в принципе, возможно, конструировать оптические свойства объемных наноструктурированных материалов. Прозрачный высокопрочный металл имел бы много возможных применений. В следующем параграфе будут обсуждаться некоторые примеры того, как наноструктура влияет на оптические свойства материала.

Глава 4.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

4.1. Нанoeлектроника. Предисловие

Нанoeлектроника – область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем и устройств на их основе с размерами элементов менее 100 нм.

Основная задача нанoeлектроники состоит в разработке новых электронных устройств со сверхмалыми размерами, создании методов их получения и объединения в интегральные схемы. Научные исследования и технологические разработки в нанoeлектронике опираются на передовые знания в области электроники, механики, материаловедения, физики, химии, биологии и медицины. И объединяет их объект исследований – структуры со сверхмалыми размерами и необычными для «большого» мира свойствами.

Известно, что основной тенденцией развития всей электроники в целом является миниатюризация, или уменьшение массы и размеров электронных приборов и устройств. Последовательные технологические переходы от электротехнических компонентов – к электронным лампам, от ламп – к транзисторам, от транзисторов – к интегральным схемам позволили создать современные мобильные телефоны, карманные компьютеры, индивидуальные медицинские аппараты и многие другие продукты электроники, прочно вошедшие в жизнь современного человека.

В 1965 году один из основателей компании Intel Гордон Мур сделал интересное открытие. Он заметил, что процесс постоянного

уменьшения размеров элементов интегральных схем подчиняется некоторому закону, позднее названному законом Мура. В соответствии с этим законом плотность компоновки электронных компонентов в интегральной схеме удваивается приблизительно каждые полтора–два года, что приводит к соответствующему росту мощности вычислительных средств и их производительности.

В настоящее время увеличение плотности компоновки элементов в составе интегральной схемы возможно только за счет уменьшения их физических размеров. Очевидно, что эта закономерность не может действовать бесконечно и непрерывное уменьшение размеров электронных изделий должно когда-то и как-то закончиться. Тогда возникает вопрос: «А какие минимальные размеры могут иметь элементы современных микросхем?». Ответ на этот вопрос уже существует. Сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит (состояния логического «0» или «1») информации с помощью одного электрона, положение которого в пространстве может быть задано одним атомом. Таким образом, размеры элементов интегральных схем будут составлять всего несколько атомных слоев. Но при таких размерах элементов (порядка нескольких нанометров) законы классической физики уже перестают действовать, и поведение таких элементов описывается законами квантовой механики. С момента формулировки закона Мура прошло более 40 лет. Несмотря на некоторые колебания в периоде удвоения, закон Мура продолжает работать. Однако, в 2007 году сам Мур признал, что его закон перестаёт действовать уже из-за атомарных ограничений и влияния скорости света.

4.2. Введение

Интегральные схемы становятся все более сложными и объединяют в себе все большее количество элементов, следовательно, должны уменьшаться размеры этих элементов. Эти размеры достигли долей микрона. В этот момент описание на языке классической физики теряет всякий смысл, и создатели вынуждены обратиться к квантовой механике.

В классической физике электроны, как и все другие частицы, движутся по траекториям. В любом случае, задав начальную координату и импульс, можно вычислить траекторию.

В квантовой механике картина движения совершенно иная. Эта теория не описывает движение по траектории. Здесь накладывается ограничение на точность, с которой могут быть заданы начальная координата и импульс электрона. Если координата электрона известна с точностью Δx , то его импульс можно определить не точнее, чем

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{\Delta x}, \text{ где } \hbar = 1,05 * 10^{-27} \text{ эрг*с} - \text{приведенная постоянная Планка.}$$

Это соотношение неопределенностей Гейзенберга. Из этого соотношения видно, что очень точное задание координаты электрона приводит к большой неопределенности импульса и, значит, направлению, по которому будет двигаться электрон, предвидеть невозможно.

Физики уже накопили большой опыт в разработке приборов, действие которых основано на квантовомеханических принципах. Укладывая атомы с точностью до одного-двух слоев, можно создавать искусственные кристаллы, молекулы и атомы с заданными свойствами. Такие полупроводниковые структуры имеют размеры порядка нескольких нанометров. Можно выделить несколько основных типов микроструктур: квантовые ямы, нити, точки, сверхрешетки.

Поведение подвижных носителей заряда (электронов и дырок) в наноразмерных структурах определяют три группы фундаментальных явлений: квантовое ограничение, баллистический транспорт и квантовая интерференция, а также туннелирование. Все эти эффекты по своему происхождению представляют собой типичные квантово-механические явления[5].

4.3. Принцип квантования и квантовое ограничение

Как известно электрон обладает корпускулярно-волновым дуализмом. Следовательно, он может испытывать интерференцию, проникать через узкие щели и барьеры, но вместе с тем сохраняет признаки обычной частицы. Он имеет строго определенную массу и заряд. Кроме того, электрон, подобно классической частице, обладает импульсом и энергией.

Необходимо сказать о главной особенности

квантовомеханического описания. Если в некоторый момент времени частица находилась в ограниченной области пространства, то в будущем невозможно достоверно предсказать ее местоположение. Можно говорить о распределении частицы в пространстве и о вероятности этого распределения. Величина, описывающая это распределение, получила название Ψ -функции или волновой функции. Она не описывает усредненное поведение большого числа электронов или одного электрона, заряд которого "размазан" по всему пространству, она дает вероятностное, статистическое описание отдельного электрона. Интенсивность этой функции, а точнее, ее квадрат $|\Psi|^2$ определяет вероятность обнаружить частицу в той или иной области, точнее, вероятность обнаружить частицу в интервале Δx равна $|\Psi|^2 \Delta x$. Волновая функция - это основная характеристика квантовой системы. Она содержит полную информацию об электронах или других частицах в атоме, молекуле, кристалле.

Известно, что волны различной физической природы, возбуждаемые в ограниченном объеме, имеют строго определенную длину волны и частоту. В том случае, когда движение электрона происходит в ограниченной области, его энергия имеет строго определенные, дискретные значения. Говорят, что спектр энергий квантован. Если электрон заперт в атоме, молекуле или любой потенциальной яме, то волновая функция Ψ представляет стоячую волну. Если речь идет о прямоугольной потенциальной яме, которая изображена на рисунке, то по своей форме волна будет такой же, как и в случае натянутой струны, однако, во-первых, природа волны здесь иная, а во-вторых, дискретным в этом случае будет не спектр частот, а спектр энергий. Стоячие волны, описывающие электронные состояния в яме, — это синусоиды, обращающиеся в точках $x=0$ и $x=a$ в нуль.

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a} n$$

, где n – номер квантового состояния,

a – размер ямы.

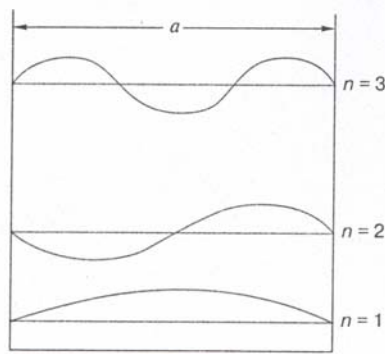


Рис. 4.1. Волновые функции и уровни энергии частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме. Показаны три нижних энергетических уровня и три волновые функции.

На данном рисунке изображены три такие функции, соответствующие $n = 1, 2, 3, \dots$. Видно, что электронная плотность в яме распределяется неравномерно, есть максимумы и минимумы плотности вероятности. Также следует, что длины волн Ψ -функций, описывающих электронные состояния с различными n , удовлетворяют условиям $\lambda_n/2 = a/n$, то есть в яме укладывается целое число полуволен.

Ограничение движения электронов (дырок) в низкоразмерной структуре, приводящее (вследствие их квантово-волновой природы) к ненулевому минимальному значению их энергии и к дискретности энергий разрешенных состояний, называют квантовым ограничением. В твердых телах квантовое ограничение может быть реализовано в трех пространственных направлениях.

4.3.1. Структуры с двумерным электронным газом (квантовые ямы)

Одним из примеров таких структур являются тонкие пленки. В такой структуре одно из направлений (z) очень мало, следовательно, энергетический спектр в этом направлении можно описать формулой

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2}$$

, где m – эффективная масса электрона,

a – толщина пленки, т.к. в данном направлении образуется потенциальная яма. В оставшихся двух направлениях электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо

считать бесконечно глубокой, следовательно, E_n должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы Φ . Данное условие приводит к толщине пленки порядка нанометров, что соответствует нескольким межатомным расстояниям. Полная же энергия носителей в квантово-размерной пленке носит смешанный дискретно-непрерывный спектр, представляя собой сумму дискретных уровней, связанных с движением в направлении квантования, и непрерывной компоненты, описывающей движение в плоскости слоя:

$$E = E_n + \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m}, \text{ где } p_x \text{ и } p_y \text{ – компоненты импульса в плоскости слоя.}$$

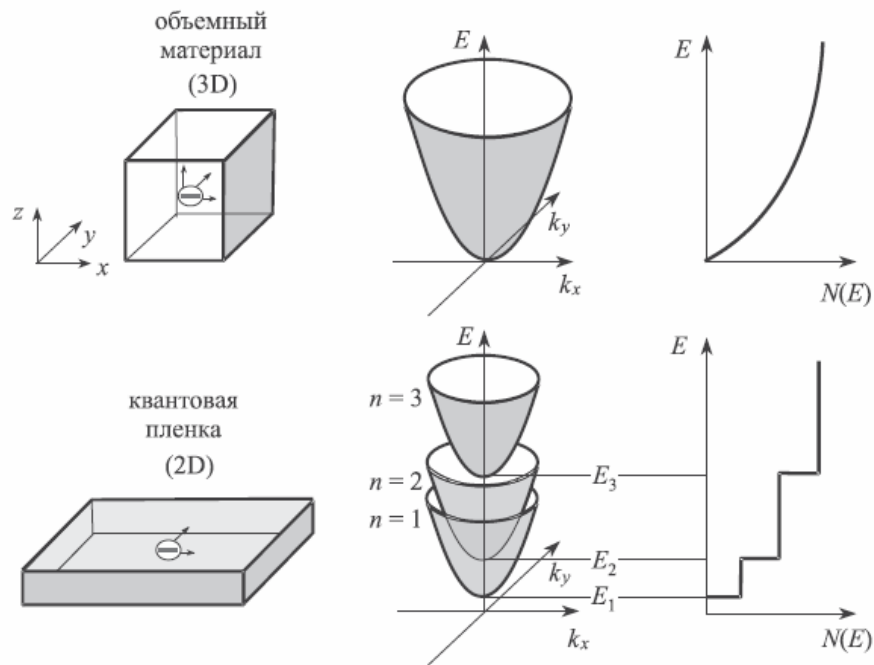


Рис. 4.2. Элементарная низкоразмерная структура, ее энергетическая диаграмма и плотность состояний $N(E)$ в сравнении с трехмерной структурой

При облучении хорошего проводника, например, алюминия быстрыми электронами, энергия которых достаточна для выбивания электрона с некоторого внутреннего уровня атома, оставшийся пустым уровень образует дырку во внутренней зоне. Электрон из зоны проводимости может рекомбинировать с такой дыркой с испусканием кванта излучения. Интенсивность излучения пропорциональна плотности состояния электронов проводимости, так как вероятность захвата дыркой электрона с заданной энергией пропорциональна

плотности состояний $D(E)$. Таким образом, спектр испускаемого излучения отражает энергетическую зависимость плотности состояния. Зависимость плотности электронных состояний от энергии в квантовой пленке имеет ступенчатый вид (вместо параболической зависимости в трехмерных структурах):

$$n_{2D}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 l_z} \sum_i \Theta(E - E_i), \quad i = 1, 2, \dots,$$

где $\Theta(E - E_i)$ – ступенчатая функция.

Производство таких тонких пленок в явном виде весьма проблематично, и поэтому наблюдения в основном проводят на МДП-структурах, где в качестве тонкой пленки выступает диэлектрик. Но в настоящее время эффекты наблюдают на гетероструктурах (контакты между п/п с различной шириной запрещенной зоны). На таком контакте края энергетических зон испытывают скачки, ограничивающие движение носителей и играющие роль стенок квантовой ямы.

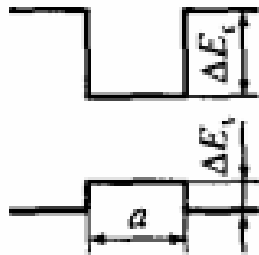


Рис. 4.3. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры

4.3.2. Структуры с одномерным электронным газом (квантовые нити)

Квантовые структуры, где движение носителей ограничено не в одном, а в двух направлениях (y и z). В этом случае носители могут свободно двигаться лишь в одном направлении, вдоль нити (ось x). В поперечном сечении (плоскость yz) энергия квантуется и принимает дискретные значения E_{nm} (как любое двумерное движение, оно описывается двумя квантовыми числами, n и m). Полная энергия носителей в квантово-размерной нити, аналогично тонким пленкам,

носит смешанный дискретно-непрерывный спектр, но лишь с одной

$$E = E_{mn} + \frac{p_x^2}{2m}$$

непрерывной степенью свободы:

где p_x – компонента импульса в направлении нити (x).

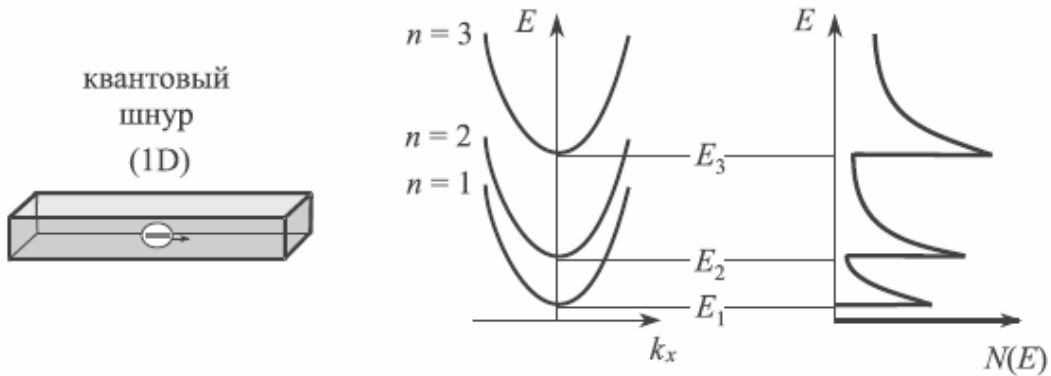


Рис. 4.4. Элементарная низкоразмерная структура, ее энергетическая диаграмма и плотность состояний $N(E)$

Спектр квантовых нитей также представляет собой совокупность подзон размерного квантования, но уже не двумерных, а одномерных.

4.3.3. Структуры с нульмерным электронным газом (квантовые точки)

В такой структуре движение носителей ограничено во всех трех направлениях (x, y и z). Такие структуры особенно интересны тем, что их свойства аналогичны свойствам дискретного атома, поэтому их иногда называют искусственными атомами. Здесь энергетический спектр уже не содержит непрерывной компоненты, т. е. не состоит из подзон, а является чисто дискретным. Как и в атоме, он описывается тремя дискретными квантовыми числами (не считая спина) и может быть записан в виде $E = E_{lmn}$, причем, как и в атоме, энергетические уровни могут быть вырождены и зависеть лишь от одного или двух чисел.

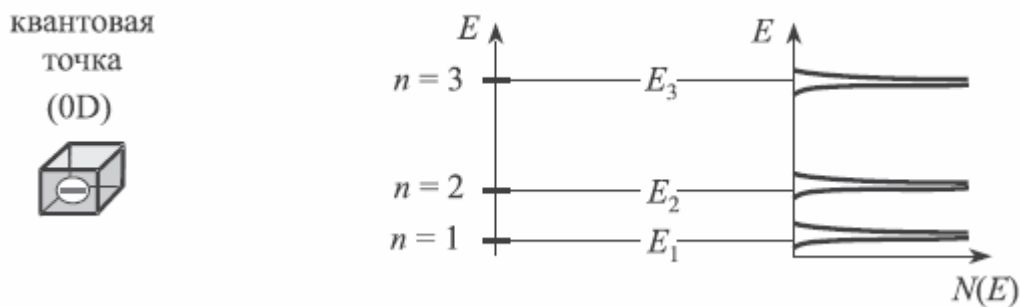


Рис. 4.5. Элементарная низкоразмерная структура, ее энергетическая диаграмма и плотность состояний $N(E)$

На основе квантовых точек были созданы миниатюрные источники света с высоким коэффициентом полезного действия. Варьируя размеры и состав квантовых точек, можно получать светодиоды с разным цветом излучения. В полупроводниковых устройствах микронных размеров регулируется (включается или выключается) ток, соответствующий потоку из сотен тысяч электронов. С помощью квантовых точек можно управлять движением одиночных электронов, что открыло огромные возможности по дальнейшей миниатюризации полупроводниковых устройств и снижению их энергопотребления. Открылись новые возможности для развития криптографии.

4.4. Транспорт носителей заряда вдоль потенциальных барьеров

Транспорт носителей заряда в низкоразмерных структурах демонстрирует множество интересных явлений, совершенно новых в сравнении с поведением носителей заряда в макроскопических системах. В явном виде они проявляются тогда, когда размеры структур меньше, чем длина фазовой когерентности электрона. Это расстояние между двумя ближайшими точками, в которых происходит рассеяние электрона на примесных атомах, фононах или других неоднородностях в материале, вследствие чего изменяется фаза электронной волны.

Так как фазы невзаимодействующих электронных волн сохраняются на протяжении всего пути, который они проходят в таких структурах, естественно ожидать появления интерференционных эффектов, когда волны с различными фазами встречаются друг друга. В

данном случае большинство предположений, основанных на применении уравнения Больцмана для описания процесса переноса носителей заряда, нарушаются.

В данном разделе рассматриваются особенности переноса носителей заряда в низкоразмерных структурах вдоль потенциальных барьеров только в квантовом режиме.

4.4.1. Фазовая интерференция электронных волн

Фазовая интерференция происходит в структурах с размерами порядка длины фазовой когерентности электрона в данном материале, что типично для твердотельных структур с нанометровыми размерами. Это имеет место в чисто баллистических или квазibalлистических режимах переноса носителей заряда.

Рассмотрим интерференцию двух волн, представленных волновыми функциями в общем виде $\psi = A \exp(i\phi)$. Когда две таких волны складываются, вероятность появления новой волны определяется соотношением:

$$W = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 4|A_1 * A_2| \cos(\phi_1 - \phi_2).$$

Эта вероятность может изменяться в пределах от суммы амплитуд двух взаимодействующих волн до их разности, в зависимости от соотношения их фаз (ϕ_1 и ϕ_2). В отличие от наноразмерных структур для макроскопических систем не важно сохранять какую-либо информацию относительно фаз взаимодействующих электронных волн, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, их размеры больше и длины фазовой когерентности, и средней длины свободного пробега носителей заряда при неупругом рассеивании. Во-вторых, усреднение по большому количеству парных взаимодействий полностью сглаживает эффект от интерференции отдельных электронных волн, потому что все они объединяются случайным образом. Этого не происходит в наноструктурах, где усреднение сведено к минимуму, что и позволяет наблюдать квантовые интерференционные эффекты.

4.4.2. Квантовый эффект Холла

Когда эффект Холла измеряется при низких температурах в образце, содержащем двумерный электронный газ, в котором

электроны способны двигаться только в пределах плоскости, обнаружено, что сопротивление Холла отклоняется от классического поведения. При достаточно высоких полях на графике зависимости напряжения Холла от магнитного поля (рис. 4.6. б) появляется ряд плоских ступенек (плато). Это явление назвали квантовым эффектом Холла. На плато напряжения Холла продольное напряжение становится нулевым. Впервые этот эффект наблюдали Клауз фон Клитинг и его сотрудники в 1980 г. при исследовании полевых транзисторов на кремнии со структурой металл – окисел – полупроводник. Они показали, что сопротивление Холла на участках, соответствующих плато ступенек, должно быть квантованным и равным $R_H = h/(ie^2)$, где h – постоянная Планка, i – некоторое целое число. Этот эффект называется интегральным квантовым эффектом Холла. Он независим от свойств материала. Квант сопротивления h/e^2 , измеренный многократно с высокой точностью с использованием квантового эффекта Холла, стал стандартом сопротивления.

Двумя годами позже исследователи интегрального квантового эффекта Холла Даниель Цуи, Хорст Стюрмер и Артур Госсард нашли, что шаг квантования $i = p/q$, где p и q – целые числа, причем q – нечетные. Явление получило название дробного квантового эффекта Холла.

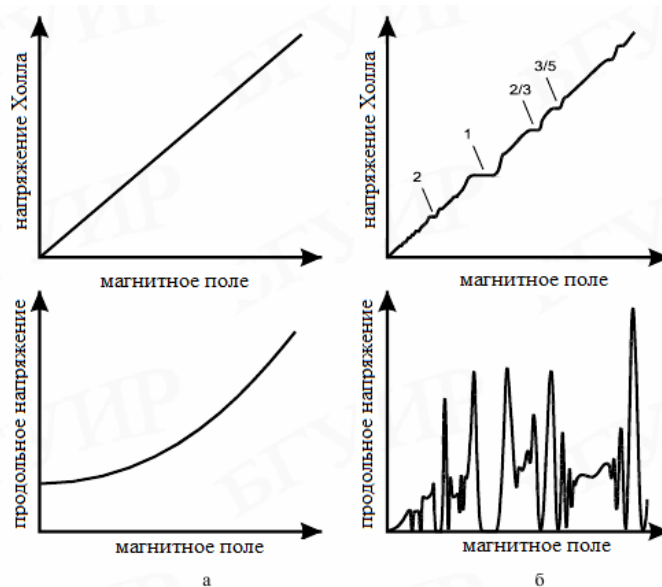


Рис. 4.6. Сравнительная характеристика классического (а) и квантового (б) эффектов Холла

Сопутствующим квантованию R_H обстоятельством является то, что магнитосопротивление R понижается до исчезающе малых

величин. Это – другой признак квантового эффекта Холла. Исчезновение продольного сопротивления R является признаком отсутствия рассеяния энергии в системе. Таким образом, уместно ожидать существование энергетического зазора между основным состоянием системы и ее первым возбужденным состоянием[5].

4.4.3. Приборы на интерференционных эффектах

Интерференционные транзисторы

Электроны в некоторых полупроводниках способны поддерживать фазовую когерентность на длине в несколько микрон. Перенос электронов через области меньше, чем длина фазовой когерентности, контролируется испытываемой ими интерференцией. Если управлять интерференцией с помощью какого-либо внешнего механизма, например, через управляющий электрод – затвор, получим квантовый интерференционный транзистор. Предложено два принципиальных типа конструкций квантовых интерференционных транзисторов. Один из них является развитием идеи электронного согласующего волновода, в другом же используется принцип кольцевого интерферометра.

Квантовые интерференционные транзисторы, основанные на электронном согласующем волноводе, были проанализированы Солсом (1989) и Даттом (1989). Оба рассматривали трехвыводные приборы, в которых эффективная длина волновода может варьироваться с помощью внешнего затвора. Ток может течь от истока к стоку либо непосредственно (по коротким траекториям), либо по более длинным путям через волновод. Разность хода (расстояние) между двумя путями прохождения тока может регулироваться с помощью затвора. Электронные волны, если только они не испытывают никаких изменяющих их фазу столкновений, достигая стока по двум разным путям, будут конструктивно интерферировать (складываться) всякий раз, когда разность хода равна целому числу длины волны Ферми. Конструктивная интерференция локализует электроны на выходе согласующего волновода, и проводимость между истоком и стоком увеличивается.

Кольцевой интерференционный транзистор был предложен Фаулером (1984). Он рассмотрел кольцевую конструкцию, в которой одну половину кольца пересекает затвор, имеющий короткую область, составляющую часть его полной длины. Затвор может быть

использован для изменения электронной плотности, в результате чего получается различная энергия Ферми и, следовательно, длина волны Ферми для электронов под затвором. Это приведет к разности хода между электронными волнами, которые распространяются через различные ветви конструкции. Электроны из различных ветвей конструкции покидают кольцо в одной и той же точке, и, если разность фаз равна 2π , они будут аддитивно интерферировать и проводимость кольца будет максимальной.

Интерес к квантовому интерференционному транзистору связан с тем, что он может быть быстродействующим прибором, что осуществляется главным образом благодаря малым размерам. Ограничением же для таких приборов являются низкие рабочие температуры, что диктуется необходимостью отсутствия рассеяния носителей заряда в рабочей области прибора, и требование однододовости проводящего канала. Это приводит к тому, что рабочие токи в интерференционных транзисторах должны быть очень маленькими. Как следствие, такие приборы нуждаются в дополнительных усилителях и имеют очень низкую помехоустойчивость.

Полевые транзисторы на отраженных электронах

В гетероструктурах с модулируемым легированием GaAs/AlGaAs средняя длина свободного пробега электронов в двухмерном электронном газе может превышать 10 мкм при низких температурах. Это позволяет создавать по существующей микроэлектронной технологии приборы, в которых электроны распространяются баллистически между стоком и истоком, кроме случайных столкновений с границами раздела. Соответствующий электрический ток может отражаться, следуя траекториям отдельных электронов, таким же путем, как и световые лучи, то есть по законам геометрической оптики. Аналогия с геометрической оптикой была использована для того, чтобы конструировать линзы и призмы с полевым эффектом, которые могут изменять траектории баллистических электронов. Изменяя отражение границ раздела с помощью внешнего смещения, можно контролировать ток, текущий между парой контактов, что позволяет строить полевые транзисторы на отраженных электронах. Линзы и призмы могут быть сделаны из металлических затворов, которые изменяют плотность основного двумерного электронного газа,

обеспечивая отражение на границе раздела между управляемой и неуправляемой областями.

Полевой транзистор на преломленных электронах может работать (переключать), находясь между многоканальными выходами и даже многоканальными входами, так как встречные пучки баллистических электронов имеют незначительное взаимодействие. Эти приборы могут быть сконструированы так, чтобы выполнять довольно сложные операции, такие как переключение элементов при параллельной обработке сигналов. Ограничением же для таких приборов, по-прежнему, остается требование низких рабочих температур.

4.5. Туннелирование носителей заряда

Термин туннелирование означает перенос частицы через область, ограниченную потенциальным барьером, высота которого больше полной энергии данной частицы (или проникновение в эту область). Такой эффект невозможен с точки зрения классической механики, однако имеет место для квантовых частиц, которым, как известно, присущ корпускулярно-волновой дуализм. Волновые свойства квантовых частиц приводят и к другому, аномальному с точки зрения классической механики, эффекту — надбарьерному отражению.

Взаимодействие квантовых частиц с различными потенциальными барьерами иллюстрирует рис. 4.7.

На языке квантовой механики движение частицы в одномерном потенциальном поле $U(x)$ описывается уравнением Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x),$$

где m — масса частицы, $\psi(x)$ — ее волновая функция.

Из квантовой теории следует, что даже в случае, когда энергия падающей на потенциальный барьер частицы больше высоты этого барьера, коэффициент ее отражения может быть отличен от нуля. Этим квантовая частица отличается от классической, для которой никакого отражения в подобной ситуации быть не может. Существование прошедшей через барьер волны, отвечающей

квантовой частице с энергией меньше высоты барьера, называют туннельным эффектом.

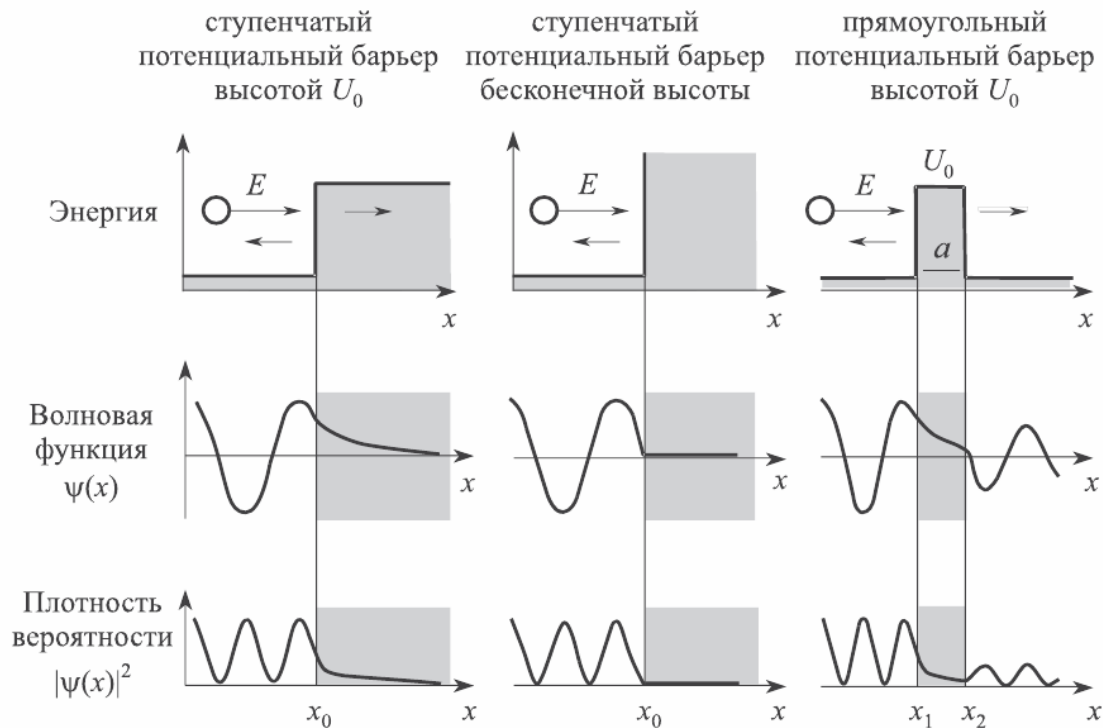


Рис. 4.7. Взаимодействие квантовой частицы с полной энергией E со ступенчатым барьером конечной высоты U_0 , с бесконечно высоким потенциальным барьером и с прямоугольным барьером высотой U_0 и шириной a

Туннелирование электронов является достаточно общим явлением для твердотельных структур. В низкоразмерных структурах это явление приобретает специфические особенности, отличающие его от эффектов в объемных системах. Одна из таких особенностей связана с дискретной природой переносимого электронами заряда и обнаруживает себя в явлении, которое получило название «одноэлектронное туннелирование». Другая особенность определяется дискретностью энергетических состояний носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах с квантовыми колодцами, которая возникает из-за квантового ограничения. Туннельный перенос носителей заряда через потенциальный барьер с определенного уровня в эмиттирующей области на энергетически эквивалентный ему уровень в квантовом колодце происходит с сохранением энергии и импульса электрона. Такое совпадение уровней приводит к возрастанию туннельного тока, известному как эффект резонансного

туннелирования. Более того, в наноструктурах, содержащих магнитные и немагнитные материалы, определенная спиновая поляризация туннелирующих электронов приводит к дополнительным эффектам. Все эти явления находят широкое применение в нанoeлектронных приборах.

4.5.1. Структуры с вертикальным переносом и квантовые сверхрешетки

Рассмотренные ранее выше элементарные низкоразмерные структуры в определенном смысле являются идеализированными объектами. Реальные экспериментальные образцы содержат большое количество одинаковых или почти одинаковых квантовых объектов. Как правило, это не меняет физической картины, т.к. вклады от всех объектов просто суммируются. Ситуация резко меняется, если отдельные объекты находятся так близко друг к другу, что носители заряда могут туннелировать между ними.

Рассмотрим систему параллельных квантовых ям, показанную на рис. 4.8., с очень тонкими (порядка единиц нанометров) широкозонными разделяющими слоями. При этом ямы уже не являются независимыми и могут обмениваться электронами за счет туннелирования через широкозонный слой.

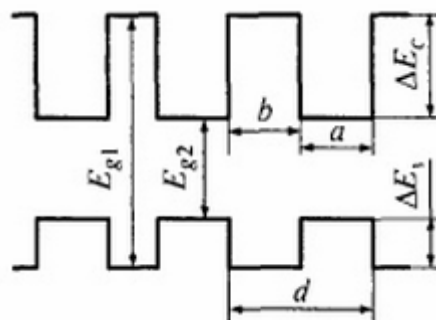


Рис. 4.8. Система параллельных квантовых ям

Подобные структуры принято называть структурами с вертикальным переносом. Рисунок отвечает системе квантовых ям, но, подвергнув эту систему литографической процедуре, можно иметь систему квантовых нитей или точек, между которыми возможен вертикальный перенос. Подобные структуры служат основой для ряда приборов нанoeлектроники.

Если число параллельных слоев в структурах с вертикальным переносом велико (как минимум, несколько десятков), мы имеем искусственную периодическую структуру, или сверхрешетку. Наиболее важным свойством сверхрешеток, определяющим все их уникальные физические свойства, является видоизменение их энергетического спектра по сравнению со спектром одиночной квантовой ямы. На электроны и дырки в сверхрешетке действует дополнительный прямоугольный потенциал $V(z)$, связанный с разрывами зон на гетерограницах. Этот потенциал является периодическим, как и потенциал кристаллической решетки, и к нему применимы все основные выводы о свойствах уравнения Шредингера с периодическим потенциалом.

Движение носителей вдоль оси z (ось сверхрешетки) может быть описано с помощью квазиимпульса p_z , причем энергия является периодической функцией с периодом $h/(a + b)$. Энергетический спектр носит зонный характер и представляет собой чередование разрешенных и запрещенных зон. Эти зоны есть результат дробления исходной зоны проводимости (для электронов) и валентной зоны (для дырок), поэтому их принято называть минизонами.

Между энергетическими спектрами сверхрешетки и обычной кристаллической решетки существуют большие различия.

Во-первых, зонным спектром характеризуется лишь движение вдоль оси сверхрешетки z . В плоскости слоев носители движутся как свободные и полный спектр сверхрешетки резко анизотропен, так же как в рассмотренных выше двумерных системах.

Во-вторых, благодаря тому, что период сверхрешетки намного больше, чем параметр решетки кристалла, характерный масштаб энергий и импульсов в спектре оказывается значительно меньшим. Характерные ширины минизон измеряются десятками или сотыми долями электронвольта, что сравнимо с тепловой энергией электрона. Поэтому движение по минизоне нельзя описать постоянной эффективной массой. Динамика в направлении оси сверхрешетки носит сложный характер, что служит причиной ряда необычных эффектов.

4.5.2. Одноэлектронное туннелирование

Известно, что электрический ток в проводнике обусловлен движением

электронов относительно неподвижных ионов решетки. Хотя каждый электрон несет дискретный единичный заряд, общий перенесенный ими заряд изменяется не скачкообразно, как можно было бы ожидать, а непрерывно, поскольку этот заряд определяется суммой смещений всех электронов относительно ионов. Свободные электроны в проводнике могут смещаться на сколь угодно малые расстояния. Поэтому суммарный переносимый ими заряд изменяется монотонно с дискретностью меньшей, чем единичный заряд электрона.

В структуре, состоящей из двух областей проводника, разделенных тонким диэлектриком, электрический заряд переносится комбинированно – непрерывно в проводнике и дискретно через диэлектрик.

Первоначально граница раздела между проводником и диэлектриком электрически нейтральна. При приложении к внешним контактам структуры электрического потенциала начинается непрерывное изменение заряда в проводнике. Оно сопровождается накоплением заряда на границе с диэлектриком. Этот заряд возникает вследствие небольших непрерывных смещений электронов в приграничной области проводника относительно своих равновесных положений. Накопление заряда продолжается до тех пор, пока его величина не окажется достаточной для отрыва и туннелирования через диэлектрик одного электрона. После акта туннелирования система возвращается в первоначальное состояние. При сохранении внешнего приложенного напряжения все повторяется вновь.

Электрон приобретает возможность туннелировать через диэлектрик, когда накопленный заряд становится больше $+e/2$ (туннелирование в «прямом» направлении) или меньше $-e/2$ (туннелирование в «обратном» направлении), поскольку только при этом уменьшается электростатическая энергия системы. Внутри этого интервала туннелирование невозможно из-за кулоновского взаимодействия электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в проводнике. Данное явление называют кулоновской блокадой.

Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской

блокады было впервые рассмотрено советскими учеными Д. Авериним и К. Лихаревым. На основе их работ (1985–1986 гг.) сформировалось новое направление в наноэлектронике – одноэлектроника.

4.5.3. Приборы на одноэлектронном туннелировании

Электронные приборы, использующие одноэлектронное туннелирование, состоят из одной или нескольких квантовых точек, соединенных туннельными переходами – как между собой, так и с подводными электродами. Простейший одноэлектронный прибор – одноэлектронная ячейка, каковой является двухбарьерная структура. На ее основе строятся более сложные одноэлектронные приборы.

Одноэлектронный транзистор

В 1986 году советскими учеными К.К. Лихаревым и Д.В. Авериним был предложен одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады. Данный эффект заключается в блокировании прохождения электронов через квантовую точку (включенную между двумя туннельными контактами), обусловленном отталкиванием электронов в контактах от электрона на квантовой точке, а также дополнительным кулоновским потенциальным барьером, который создает электрон, закрепившийся на точке. Кулоновская блокада препятствует вылету электрона из точки, а также попаданию новых электронов на нее. Для преодоления кулоновской блокады необходимо понизить высоту потенциального барьера и повысить энергию электронов.

Рассмотрим более подробно конструкцию и принцип работы одноэлектронного транзистора. Также как и полевой полупроводниковый транзистор, он имеет три электрода, называемые истоком, стоком и затвором. В области между электродами (рис. 4.9.) располагается дополнительный металлический или полупроводниковый «наноостровок» – наночастица или кластер нанометровых размеров, изолированный от электродов диэлектрическими прослойками, через которые и может при определенных условиях происходить движение электрона. 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 способность пройти через барьер, и в цепи исток-сток начинает протекать ток. При этом электрический ток в цепи протекает порциями, что соответствует движениям единичных электронов. Таким образом, управляя потенциалом на затворе, можно пропускать через барьеры одиночные электроны. Количество электронов в наночастице должно быть не более 10 (а желательно и меньше). Это может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 10 нм.

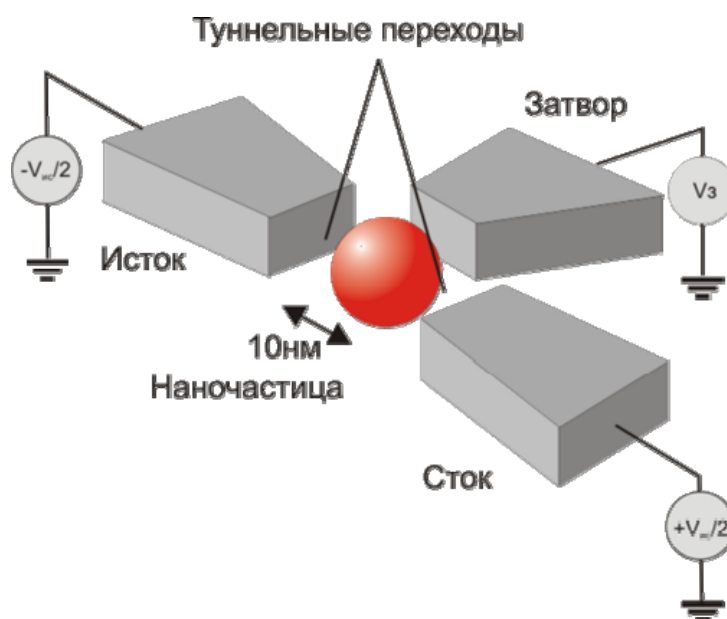


Рис. 4.9. Одноэлектронный транзистор

Преимуществами одноэлектронных транзисторов являются малые размеры (вплоть до размеров нескольких атомов) и связанная с ними возможность высокой степени интеграции, а также чрезвычайно низкая потребляемая мощность.

Разработано два метода реализации логических операций в схемах на одноэлектронных транзисторах. В одном из них один бит информации представляется одним электроном. Также одноэлектронные приборы используются как устройства, позволяющие осуществлять перенос электронов один за другим, то есть контролировать каждый бит информации, представленной таким образом. В другом методе один бит информации представлен, как и в классической микроэлектронике, двумя состояниями одноэлектронного транзистора – включен (ток течет через прибор) и

выключен (ток через прибор не течет). С точки зрения потребляемой мощности первый метод является более предпочтительным. Однако в этом случае даже один ложный электрон, обусловленный шумами или тепловым возбуждением, полностью видоизменяет результаты работы. Поэтому с точки зрения рабочей стабильности второй метод предпочтительнее.

Одноэлектронная ловушка

Различные одноэлектронные приборы можно получить при увеличении количества туннельно-связанных островков. Один из них – одноэлектронная ловушка. Главное свойство данного прибора – это би- или мультстабильная внутренняя зарядовая память, то есть в пределах определенного диапазона напряжения U , прикладываемого к затвору, ближайший к затвору островок может быть в одном, двух или более устойчивых зарядовых состояниях.

Генераторы на одноэлектронных транзисторах

Одноэлектронные транзисторы можно использовать для генерации узкополосных сигналов с частотой, по существу, пропорциональной постоянному току $f = I/e$.

Стандарты постоянного тока

Одноэлектронный прибор может быть использован в качестве стандарта постоянного тока. Принцип его работы основан на стабилизации фазы одноэлектронных колебаний с помощью внешнего высокочастотного источника с характерной частотой f . Стабилизация фазы обеспечивает передачу определенного количества электронов n за период внешнего высокочастотного сигнала и, таким образом, генерацию постоянного тока, который фундаментально связан с частотой через уравнение $I = nef$.

Логические элементы

Имеются две принципиальные возможности построения логических элементов на одноэлектронных транзисторах. Это управляемые напряжением логические элементы и управляемые зарядом логические элементы.

В первых напряжение, подаваемое на затвор, контролирует ток в цепи исток–сток одноэлектронного транзистора, что и используется

для построения логических элементов, аналогичных по принципу действия тем, которые создаются на основе традиционных полевых транзисторов. В этом случае игнорируются специфические свойства одноэлектронного транзистора, а он лишь используется как электронный прибор с управляемым высоким или низким уровнем выходного напряжения, соответствующим логическим «1» и «0».

В управляемых зарядом логических элементах один бит информации представлен наличием или отсутствием одного электрона в проводящем островке. В предложенных логических элементах один электрон можно продвигать через управляемые сегменты типа сдвигового регистра, а резистивно присоединенные к ним транзисторы обеспечивают расщепление сигнала и выполнение бинарных логических операций.

Проблемы и ограничения

Главные преимущества одноэлектронных приборов по сравнению с известными биполярными и полевыми полупроводниковыми транзисторами связаны с намного меньшими размерами и с расширенными функциональными возможностями. Однако следует иметь в виду и их недостатки.

Во-первых, работоспособность одноэлектронных транзисторов обычно ограничена областью низких температур. Во-вторых, одноэлектронные транзисторы имеют высокий выходной импеданс из-за высокого сопротивления туннельных переходов. В-третьих, напряжение исток — сток для одноэлектронных транзисторов должно быть меньше, чем амплитуда (размах) напряжения затвора. В-четвертых, определенные трудности в воспроизводимости характеристик одноэлектронных приборов возникают в связи с появлением неконтролируемого заряда вблизи островка. Такой заряд возникает вследствие захвата хотя бы одного примесного атома диэлектрическим окружением островка. Заряд примеси поляризует островок и изменяет, таким образом, условия для кулоновской блокады в нем.

4.5.4. Резонансное туннелирование

Туннелирование электронов в низкоразмерной структуре определяется не только характеристиками составляющих ее потенциальных барьеров, но и разрешенными энергетическими

состояниями для электронов внутри самой структуры. В низкоразмерной структуре, ограниченной двумя потенциальными барьерами, имеет место резкое возрастание протекающего через нее туннельного тока при совпадении уровня Ферми в инжектирующем электроде и дискретного уровня в низкоразмерной структуре. Это явление получило название резонансное туннелирование. Оно приводит к появлению на вольтамперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что чрезвычайно привлекательно для создания твердотельных сверхвысокочастотных генераторов. Типичными структурами для наблюдения этого эффекта являются квантовые колодцы.

Квантовое ограничение приводит к квантованию энергетических уровней в колодце. В двумерной структуре – квантовой пленке толщиной a – образуется подзона с энергией, соответствующей $E_1 = \hbar^2 \pi^2 / (2m^* a^2)$. Предполагается, что в отсутствие внешнего напряжения она располагается выше уровня Ферми в отделенных барьерами электродах. Электрод, с которого осуществляется инжекция электронов, называют эмиттером, а собирающий электрод – коллектором. При приложении к структуре небольшого внешнего напряжения основное падение напряжения приходится на области барьеров, так как их электрическое сопротивление много больше сопротивления колодца. В них происходит наибольшее искривление энергетических уровней, однако электрический ток через структуру незначителен. С увеличением приложенного напряжения уровень E_1 в колодце понижается, обеспечивая появление туннельного тока через эмиттерный барьер. Туннелирование электронов из колодца в коллектор не вызывает ограничений, так как идет с высокого энергетического уровня на более низкий. Величина туннельного тока становится максимальной при совпадении уровня Ферми в эмиттере и энергетического уровня E_1 в колодце. При этом электроны туннелируют в колодец, сохраняя свою энергию и импульс. Благодаря этому они там не задерживаются и быстро уходят в коллектор. Происходит резонансное прохождение электронов через колодец.

4.5.5. Приборы на резонансном туннелировании

Явление резонансного туннелирования позволяет создавать диоды и транзисторы, работающие с временами переключения,

составляющими единицы и десятые доли *ис*, то есть в диапазоне частот вплоть до нескольких ТГц (10^{12} Гц).

Диоды на резонансном туннелировании

В общем случае резонансно-туннельный диод представляет собой периодическую структуру, которая состоит из последовательно расположенных квантовых колодцев, разделенных потенциальными барьерами, с электрическими контактами к двум крайним противоположным областям.

Рассмотрим работу резонансно-туннельного 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, то прозрачность барьера и, следовательно, протекающий ток будут малы. Ток достигает максимального значения при таких напряжениях, когда энергия электронов равна энергии дискретного уровня. При более высоких напряжениях энергия электронов станет больше энергии дискретного уровня, и прозрачность барьера для электронов уменьшится. При этом ток также уменьшится. Вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода показана на рис. 4.10. в. Видно, что на вольт-амперной характеристике имеется максимум и участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 4.10. в – область уменьшения тока при увеличении напряжения), что чрезвычайно привлекательно для создания многоуровневых логических элементов, элементов памяти и твердотельных сверхвысокочастотных генераторов.

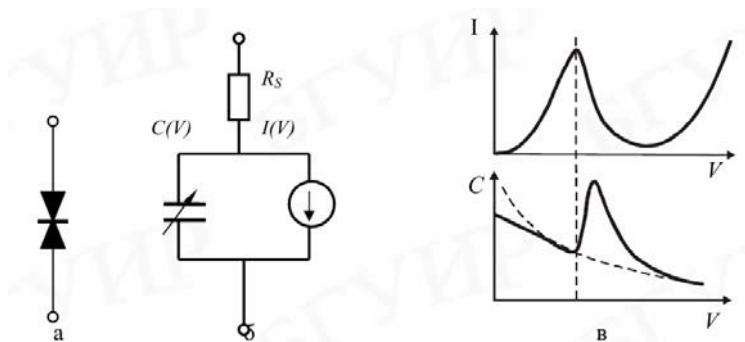


Рис. 4.10. Условное обозначение резонансно-туннельного диода (а), его эквивалентная схема (б), вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики (в)

С точки зрения практического использования наиболее привлекательными характеристиками резонансно-туннельных диодов являются их чрезвычайно высокие скорости переключения.

Транзисторы на резонансном туннелировании

Добавление управляющего электрода к резонансно-туннельному диоду превращает его в резонансно-туннельный транзистор и расширяет возможности его применения.

Можно также объединить резонансно-туннельный диод с обычным транзистором, чтобы сделать комбинированный прибор. Этот вариант использован для создания резонансно-туннельного биполярного транзистора и резонансно-туннельного транзистора на горячих электронах. Резонансно-туннельный биполярный транзистор представляет собой биполярный транзистор с резонансно-туннельной структурой, встроенной в области перехода эмиттер–база или в базе. Похож на него и резонансно-туннельный транзистор на горячих электронах, у которого резонансно-туннельная структура встраивается в эмиттер.

Кроме названных приборов имеются и транзисторные структуры, представляющие собой управляемые затвором резонансно-туннельные диоды. Затворы в них создают в виде барьеров Шоттки или р-п-переходов вокруг эмиттера для внешнего управления условиями резонанса тока в диоде.

Логические элементы на резонансно-туннельных приборах

Резонансно-туннельные диоды и транзисторы применяются как в аналоговых, так и в цифровых интегральных микросхемах как элементы, имеющие вольт–амперную характеристику с участком отрицательного дифференциального сопротивления.

В заключение следует отметить, что наиболее важными особенностями рассмотренных наноэлектронных приборов на туннельных эффектах являются их расширенные, по сравнению с традиционными приборами, функциональные возможности, связанные с уникальностью вольт–амперных характеристик, и высокое быстродействие. Благодаря им эти приборы играют важную роль в разработке сверхбыстродействующих интегральных микросхем со сверхвысокой степенью интеграции.

4.6. Спиновые эффекты

Спиновые эффекты возникают, когда в материале появляется спиновый дисбаланс заселенности уровня Ферми. Такой дисбаланс обычно присутствует в ферромагнитных материалах, у которых плотности вакантных состояний для электронов с различными спинами практически идентичны, однако эти состояния существенно различаются по энергии, как схематически показано на рис. 4.11 (здесь и далее под различными спинами электрона понимаются различные проекции его спина на ось квантования).

Энергетический сдвиг приводит к заполнению разрешенных зон электронами с одним определенным спином и к появлению у материала собственного магнитного момента (намагниченности). Заселенность энергетических зон электронами с разным спином определяет как спиновую поляризацию инжектируемых из такого материала электронов, так и особенности транспорта носителей заряда через него.

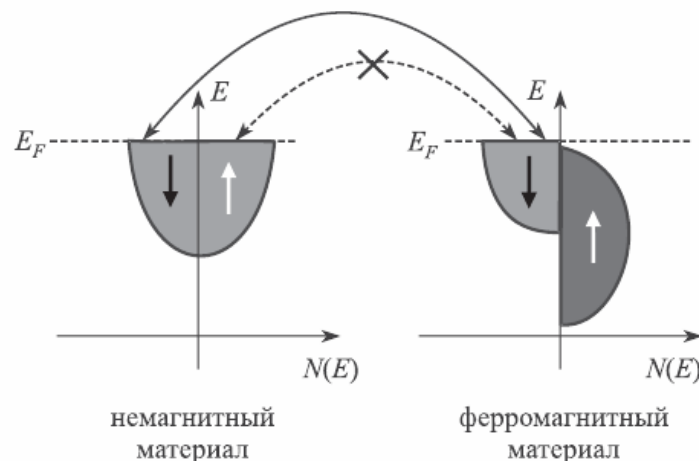


Рис. 4.11. Плотности состояний электронов с различными спинами в немагнитном и ферромагнитном материале и обмен электронами между ними

Два основных эффекта, а именно — гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление — являются следствием особенностей транспорта носителей заряда, контролируемого спином электронов в наноразмерных структурах. Эти эффекты составляют основу нового направления в науке и технике, которое получило название спинтроники. Целью спинтроники является создание элементов электронной обработки информации с

использованием в качестве носителей информации как заряда электрона, так и его спина. Возможность контролировать и управлять спиновыми состояниями в твердых телах представляет также значительный интерес для практической реализации идей квантовых вычислений, которые обещают революционный прогресс в развитии информационных систем.

Интерес к спинтронным электронным приборам вызван тем, что, во-первых, они, как ожидается, должны иметь лучшие свойства по сравнению с их обычными полупроводниковыми аналогами. Во-вторых, они, как полагают, обеспечат базу для реализации квантовых вычислений и основанных на них квантовых компьютеров[5].

4.6.1. Гигантское магнитосопротивление

Многослойные тонкопленочные структуры, составленные из чередующихся слоев немагнитного материала между противоположно намагниченными ферромагнитными материалами, демонстрируют значительное изменение сопротивления при помещении их в магнитном поле. Это явление называют эффектом гигантского магнитосопротивления. Эффект наблюдается, когда электрический ток пропускают как в плоскости этих слоев, так и перпендикулярно им.

Для примера рассмотрим тонкопленочную структуру с плоскопараллельной геометрией протекающих токов для наблюдения эффекта гигантского магнитосопротивления. Ферромагнитные слои с противоположной намагниченностью могут быть получены осаждением в магнитных полях, имеющих противоположную ориентацию. В отсутствие магнитного поля сопротивление, измеряемое током, проходящим в плоскости слоев, будет самым большим, когда магнитные моменты в чередующихся слоях противоположно направлены. При этом электроны со спином, соответствующим намагниченности одного слоя, не могут перемещаться по материалу с противоположной намагниченностью, поскольку в нем отсутствуют приемлемые для них энергетические состояния. Это приводит к отражению электронов от границы таких слоев и вынуждает ток течь внутри суженных каналов.

С увеличением напряженности внешнего магнитного поля магнитосопротивление постепенно уменьшается. Это связано с тем, что магнитное поле, которое имеет тенденцию выравнивать моменты магнитных параллельных слоев, должно преодолеть обменную связь,

которая предпочитает антипараллельное расположение моментов (для данной толщины немагнитного слоя). Полное выстраивание магнитных моментов в одном направлении достигается только в области поля насыщения, равного по величине полю обменной связи. Что будет соответствовать минимальному сопротивлению структуры.

4.6.2. Спин-зависимое туннелирование

Туннелирование между двумя по-разному намагниченными ферромагнитными слоями, разделенными тонким диэлектриком, предполагает зависимость туннельного тока от магнитного поля. Определенная намагниченность ферромагнитных слоев обеспечивается их осаждением в магнитном поле. Процесс туннелирования, строго зависящий от спиновой ориентации носителей заряда в электродах, управляется намагничиванием ферромагнитного материала. Обычно структура имеет высокое сопротивление, когда два ферромагнитных слоя имеют разные направления намагниченности. Сопротивление структуры значительно уменьшается, когда намагниченности слоев станут однонаправленными во внешнем магнитном поле, что обычно называют эффектом туннельного магнитосопротивления.

4.6.3. Манипулирование спинами носителей заряда в полупроводниках

Одна из сложнейших задач при разработке спинтронных приборов – это контроль спиновой поляризации электронного тока. Чтобы полностью контролировать степень свободы спина в полупроводниках, желательно конструировать интегральные элементы или приборы, которые могут эффективно инжектировать и распознавать электроны с определенным спином. Таким образом, практическое значение имеют полупроводниковые структуры с высоким коэффициентом спин-инжекции, большим временем спин-релаксации в полупроводнике, спин-ориентацией, регулируемой напряжением затвора, и высокой спин-чувствительностью для детектирования носителей заряда с определенным спином. Кроме того, спин-инжекция и детектирование представляют возможный механизм записи и считывания данных в полупроводниковых квантовых точках, которые являются необходимой составной частью

твердотельных квантовых компьютеров.

4.6.4. Эффект Кондо

Согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов уменьшается с понижением температуры, потому что электроны все меньше и меньше рассеиваются тепловыми колебаниями кристаллической решетки.

Между тем имеются три возможных сценария поведения сопротивления в области низких температур. Сопротивление большинства чистых металлов (например, Cu, Au, Al) уменьшается с увеличением температуры до тех пор, пока не достигнет некоторой остаточной величины. Некоторые металлы (например, Pb, Nb) при снижении температуры становятся сверхпроводящими, так как их сопротивление падает фактически до нуля при критической температуре. Однако в металлах, содержащих небольшое количество магнитных примесей, таких, как Fe, Co, Ni, сопротивление при очень низких температурах увеличивается, что называется эффектом Кондо и связано с ненулевым полным спином всех электронов в образце. Этот эффект наблюдается не только в металлах с магнитными примесями, но и в квантовых точках. Температуру, при которой сопротивление начинает снова увеличиваться, называют температурой Кондо.

Кондо-поведение квантовых точек

Квантовая точка, содержащая строго определенное число электронов, может действовать как магнитная примесь. Полный спин равен нулю или целому числу для четного числа электронов и половине целого числа для нечетного числа электронов. Последний случай – классический пример для наблюдения эффекта Кондо. Все электроны, кроме одного, с самой высокой энергией, могут игнорироваться, то есть это случай, эквивалентный наличию одного единственного носителя спина, $s = 1/2$.

Квантовую точку с затворами можно электрически переключать из состояния «кондо-система» в состояние «не-кондо-система», поскольку количество электронов в ней может быть изменено с нечетного значения на четное, например, с помощью следующей структуры. Квантовая точка соединена с двумя источниками электронов туннельными каналами с пропускной способностью,

управляемой смещением, прикладываемым к входному и выходному затворам. Связь точки со стоком и истоком электронов определяет расширение энергии ΔE состояния в точке. Число электронов в точке и их уровни энергии регулируются напряжением, прикладываемым к центральному затвору.

4.6.5. Спинтронные приборы

Разработанные спинтронные приборы используют эффект гигантского магнитосопротивления и спин-зависимое туннелирование. Переключение направления намагниченности в них осуществляется посредством собственного внутреннего или внешнего магнитного поля.

Считывающая головка на гигантском магнитосопротивлении

Этот прибор, называемый также спин-вентильной головкой воспроизведения, стал первым спинтронным прибором, который в промышленных масштабах стали производить в IBM начиная с 1997 г. Размеры головки, считывающей магнитные биты, которые записаны на поверхности дисков или лент в виде по-разному ориентированных магнитных областей (доменов), сведены к минимуму и составляют 10–100 нм. Там где соприкасаются головные части двух противоположно намагниченных доменов, некомпенсированные, положительные полюса генерируют магнитное поле. Это поле направлено за пределы носителя информации перпендикулярно поверхности домена, которая является положительной стенкой домена. В том месте, где соприкасаются хвостовые части двух доменов, стенки содержат некомпенсированные, отрицательные полюса. Последние образуют сток для магнитных силовых линий потока, возвращающегося в носитель информации, которым является отрицательная стенка домена. Головка «чувствует» изменения направления магнитного поля на стенках домена.

Энергонезависимая память на гигантском магнитосопротивлении

Элементы памяти, использующие эффект гигантского магнитосопротивления, объединяют в матрицы, для того чтобы получить совокупность элементов, функционирующих как энергонезависимая память. Элементы являются, по существу, спин-вентильными структурами, которые расположены в определенной

последовательности и соединены проводящими дорожками, образующими шины считывания. Шина считывания сохраняет информацию и имеет сопротивление, которое равно сумме сопротивлений ее элементов. Ток протекает через шину считывания, и усилители в конце линий обнаруживают изменения общего сопротивления. Магнитные поля, необходимые для манипулирования намагниченностью элементов, обеспечиваются дополнительными, литографически сформированными проводящими дорожками, проходящими над и под элементами. Эти дорожки пересекают шину считывания в виде двухкоординатной (ху) сеточной структуры, в каждом пересечении которой находится запоминающий элемент на гигантском магнитосопротивлении. Проводящая дорожка, проходящая параллельно шине считывания, действует как словарная шина при записи, а дорожка, пересекающая шину считывания перпендикулярно ей, действует как записывающая битовая шина. Все дорожки электрически изолированы. Когда импульсы тока проходят через словарные и битовые шины, они генерируют магнитные поля, управляющие сопротивлением элементов на гигантском магнитосопротивлении.

Энергонезависимая память на спин-зависимом туннелировании

Запоминающее устройство с произвольным порядком выборки сформировано из двух ортогональных в плоскости массивов параллельных ферромагнитных дорожек, разделенных в пространстве тонким изолирующим слоем. Каждое пересечение дорожек действует как магнитный туннельный переход. Когда направления намагниченности двух противоположных ферромагнитных областей выравниваются внешним магнитным полем, туннельное сопротивление будет ниже, чем в том случае, когда они противоположно направлены. Для практического применения в устройствах памяти необходимо изменение сопротивления по крайней мере на величину порядка 30 %.

Спин-вентильный транзистор

Спин-вентильный транзистор – это трехвыводной прибор, аналогичный транзистору с металлической базой. Базовая область транзистора содержит металлический, многослойный спиновой вентиль между двумя областями кремния n-типа проводимости, действующими как эмиттер и коллектор. В такой структуре горячий

электрон проходит через спин-вентильную базу, чтобы попасть из эмиттера в коллектор.

Транзистор работает следующим образом. Между эмиттером и базой устанавливается такой ток (ток эмиттера), при котором электроны инжектируются в базу перпендикулярно слоям спин-затвора. Так как инжектируемые электроны должны пройти через барьер Шоттки, они входят в базу как неравновесные, горячие электроны. Как только горячие электроны пересекут базу, они подвергаются воздействию неупругого и упругого рассеивания, которое изменяет и их энергию, и распределение их моментов. Электроны только тогда способны войти в коллектор, когда они накопили достаточную энергию для преодоления энергетического барьера со стороны коллектора. Часть собранных в коллекторе электронов и, следовательно, ток коллектора существенно зависят от рассеивания в базе, которое является спин-зависимым. Это регулируется переключением базы из согласованного по намагниченности низкоомного состояния в антисогласованное высокоомное состояние.

Важное преимущество спин-вентильного транзистора – большой относительный магнитный эффект при комнатной температуре при незначительных магнитных полях. Несмотря на низкий коэффициент усиления по току, это делает такой транзистор уникальным спинтронным прибором с большими перспективами для магнитной памяти и датчиков магнитного поля, где коэффициент усиления по току не критичен.

Глава 5.

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР

5.1. Традиционные методы осаждения пленок

Два метода, первоначально разработанных для технологии микроэлектроники, нашли применение в нанотехнологии. Это химическое осаждение из газовой фазы и молекулярно-лучевая эпитаксия.

5.2. Методы, использующие сканирующие зонды

Нанотехнологические подходы, использующие сканирующие зонды, базируются на научном фундаменте и технических приемах, разработанных для сканирующей туннельной микроскопии и атомной силовой микроскопии. В их основе лежит возможность позиционирования с высокой точностью атомарно острого зонда вблизи поверхности образца.

В сканирующем туннельном микроскопе эта идея реализуется следующим образом (рис. 5.1).

Металлический зонд, обычно изготавливаемый из вольфрама, закрепляют в держателе, пространственное положение которого регулируется тремя пьезоэлементами с помощью подаваемого на них управляющего напряжения. Зонд подводят к образцу на расстояние, обеспечивающее протекание туннельного тока, и

пьезоэлементами, задающими его положение в плоскости x, y , сканируют вдоль поверхности. При этом системой обратной связи протекающий туннельный ток поддерживают постоянным, меняя соответствующим образом приложенное напряжение V . Зависимость $V(x, y)$ отражает атомный рельеф поверхности, если ее электронные свойства (работа выхода) однородны. Локальное изменение работы выхода, характерное для образцов, состоящих из разнородных по своим свойствам атомов, учитывается с помощью дополнительной малой модуляции зазора между зондом и анализируемой поверхностью. Таким образом удается не только «увидеть» расположение атомов на поверхности, но и различить области разного атомного состава. Размер анализируемой поверхности обычно составляет сотни микрометров. Ограничением метода является необходимость хороших электропроводящих свойств у исследуемого материала, для того чтобы обеспечить протекание достаточного для регистрации туннельного тока. В атомной силовой микроскопии вместо туннельного тока для анализа поверхности регистрируются силы межатомного взаимодействия в зазоре зонд-подложка.

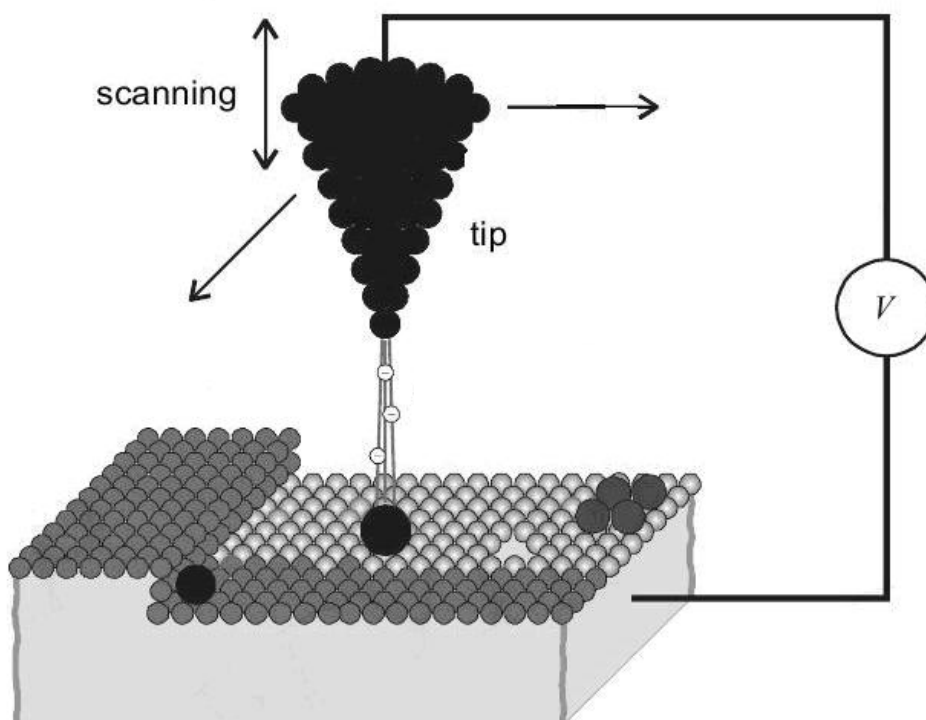


Рис. 5.1 Относительное расположение зонда и подложки в сканирующем туннельном микроскопе

Атомная силовая микроскопия, в отличие от сканирующей туннельной микроскопии, не чувствительна к электронным свойствам подложки. Поэтому она может быть использована для анализа поверхности как проводниковых материалов, так и диэлектрических. Атомную силовую микроскопию обычно проводят в контактном режиме, в котором зонд контактирует с анализируемой поверхностью. При этом на зонд действует сила отталкивания величиной порядка 10^{-9} Н. Эта сила задается пьезоэлектрическим элементом позиционирования, толкающим зонд к поверхности. Бесконтактный режим с зазором (5–15 нм) используется, когда имеется опасность того, что зонд может изменить (повредить) поверхность. Контролируя возмущение, создаваемое зондом у поверхности образца, возможно, осуществлять управляемую локальную модификацию этой поверхности с атомным разрешением. Этому способствуют экстремальные условия, которые можно реализовать у острия зонда, а именно – электрические поля напряженностью до 10^9 В/м – и пропускать токи с плотностью до 10^7 А/см². Манипулирование индивидуальными атомами – атомная инженерия, безмасочное локальное окисление и осаждение материалов, низкоэнергетическая электронно-лучевая литография – реализованы с использованием сканирующих зондов. Преимущества использования зондовых методов модификации материалов включают не только высокую локальность воздействия, но и возможности непосредственной визуализации результата воздействия и даже локальных электрических измерений с использованием того же самого зонда.

5.3. Нанолитография

Размеры элементов интегральных микросхем определяются, главным образом, литографическими процессами. В нанометровом диапазоне размеров используют два основных подхода. Первый берет свое начало из микроэлектронной технологии и использует принципы оптической, рентгеновской и электронно-лучевой литографии. Уменьшение длины волны света, используемого для экспонирования фоторезиста, так же как и применение рентгеновского излучения и электронных потоков, обеспечивает создание рисунков с размером элементов менее 100 нм. Другой подход является типично нанотехнологическим, поскольку основывается на использовании

сканирующего зонда – инструмента, обладающего самым высоким разрешением и позволяющего манипулировать даже индивидуальными атомами.

5.3.1. Нанопечать

Это новое направление в литографических процессах, сочетающее простоту, низкую стоимость, достаточно высокую производительность и нанометровое разрешение. Используется два подхода. В одном из них, который получил название чернильная печать, материал резиста в виде чернил наносится на эластичный штамп с требуемым рисунком и затем механически отпечатывается на подложке. Другой, использующий механическое вдавливание жесткого штампа в полимерную пленку резиста при повышенной температуре, получил название тиснение. Поскольку перенос изображения осуществляется без применения какого-либо излучения, оба подхода свободны от ограничений, связанных с дифракцией и рассеянием.

5.3.2. Сравнение нанолитографических методов

В разделе представлены различные литографические процессы, пригодные для создания резистивных масок с размерами элементов в диапазоне 10–1000 нм.

Оптическая литография с типичными скоростями экспонирования 10–100 см²/с полностью удовлетворяет требованиям массового производства. Однако по разрешающей способности она имеет существенные ограничения на минимальный воспроизводимый размер элемента, что главным образом связано с длиной волны излучения, используемого для экспонирования резистов. Повышение разрешающей способности и соответствующее уменьшение критических размеров формируемых элементов в этой группе методов идет по пути уменьшения длины волны излучения. Это использование G-линии (436 нм) и I-линии (365 нм) ртути, излучения эксимерных лазеров: KrF (248 нм), ArF (197 нм), F2 (157 нм). При этом достижимый минимальный размер составляет 100 нм. Дальнейшее уменьшение до 50 нм представляется физически возможным, что требует существенного

прогресса в технологии создания резистивных масок и повышения чувствительности фоторезистов с высоким разрешением.

Фотолитография в глубоком ультрафиолете является естественным развитием оптической литографии с применением коротковолнового излучения. Для этих целей применяется синхротронное излучение и излучение плазменных лазерных источников. Они обеспечивают формирование элементов размерами до 100 нм и могут быть усовершенствованы для создания 30 нм-элементов. Несмотря на физические преимущества, использование синхротронного излучения не находит широкого технологического применения в полупроводниковой электронике из-за сложности, энергоемкости и громоздкости синхротронов. Плазменные лазерные источники во многом лишены этих недостатков, что делает их более перспективными для практической нанолитографии.

Рентгеновская литография, использующая излучение с длиной волны около 1 нм, представляет собой последнюю ступень на пути уменьшения длины волны экспонирующего электромагнитного излучения для литографии. При этом в отсутствие подходящей рентгеновской оптики приходится вести прямое экспонирование (1:1). Достаточную для практических целей интенсивность рентгеновского излучения получают в синхротронах и с помощью плазменных лазерных источников. Достижимые минимальные размеры составляют 50–70 нм. Преимуществом рентгеновской литографии является возможность использования однослойных резистивных масок и высокая воспроизводимость. Недостатки же аналогичны тем, которые отмечены выше для литографии в глубоком ультрафиолете.

Электронно-лучевая литография является наиболее подходящей основой для массового производства наноструктур. С использованием одиночного луча она обеспечивает скорости экспонирования 10^{-3} – 10^{-2} см²/с, а в режиме модульного экспонирования – на два-три порядка выше. Типичное разрешение составляет 30 нм с возможностью опуститься до 5 нм при использовании неорганических резистов. Основным недостатком является невысокая производительность, которая определяется плотностью электронного тока и чувствительностью резиста. Повышение плотности тока в электронном луче помимо технических ограничений имеет и физические ограничения. При высоких плотностях тока взаимодействие между электронами приводит к внутреннему

расширению луча, которое пропорционально $I^{2/3}$, что ухудшает разрешение. Для приемлемой производительности необходимы резисты с порогом чувствительности ниже 10 мКл/см^2 . Чувствительность к вариациям экспозиционной дозы и глубины фокуса (деформации маски) намного меньше, чем в оптической литографии.

Ионно-лучевая литография по своим технологическим принципам близка к электронно-лучевой литографии. Она используется для экспонирования резистов толщиной до 20 нм. Ионы могут также использоваться для безмасочного создания рисунка элементов интегральных схем прямой модификацией свойств материала подложки. Установки для ионно-лучевой обработки материалов имеют приемлемые скорости экспонирования. Сравнивая эффективность экспонирования резиста ионами и электронами одного энергетического диапазона – 50–100 кэВ, следует отметить, что ионы полностью передают свою энергию резистивному слою, а электроны проходят глубже в подложку. Это ведет к существенным отличиям в пороговой чувствительности резистов, которая ниже для ионного экспонирования. Между тем, процесс последовательного экспонирования ионным лучом остается слишком медленным для массового производства.

Нанопечать является многообещающей технологией литографии, хотя необходимы дополнительные исследования, прежде чем она могла бы полноправно войти в промышленное производство. Одним из сдерживающих факторов остается сравнительно большое время обработки одной подложки, что связано с необходимостью ее нагрева и охлаждения в контакте со штампом, хотя имеются определенные резервы для интенсификации этого процесса.

Литография сканирующими зондами дает наиболее высокое разрешение, обеспечивая возможность манипулирования отдельными атомами. Типичное же разрешение лежит в пределах 30–50 нм. Основным недостатком этой группы методов является низкая скорость экспонирования одиночным зондом. Решение этой проблемы может быть осуществлено параллельным экспонированием с использованием многозондовых устройств с независимым управлением каждым зондом.

Для обеспечения приемлемой производительности количество зондов, интегрированных в одной головке, должно составлять 10^4 – 10^6 .

Положение каждого зонда относительно поверхности подложки должно задаваться индивидуально. Несмотря на существующие практические проблемы, формирование рисунка наноразмерных элементов интегральных микросхем с использованием сканирующих зондов рассматривается как наиболее перспективное направление с потенциальными возможностями для массового производства.

В заключение следует отметить, что имеющиеся нанолитографические методы обеспечивают разрешение в пределах 10–100 нм, чего вполне достаточно для создания большинства нанoeлектронных приборов. Однако производительность методов должна быть повышена для соответствия уровню требований промышленного производства.

5.4. Саморегулирующиеся процессы

Саморегулирование является одной из наиболее общих закономерностей в природе. Оно осуществляется различными путями, но всегда с одной общей целью – обеспечить наибольшую устойчивость системы.

5.4.1. Самоупорядочение

Самоупорядочение – это процесс адсорбции и специфического расположения молекул на твердой поверхности. Его движущей силой является хемосорбция, которая в особенности проявляется в высокоэнергетических реакциях между адсорбентом и адсорбирующей поверхностью. В отличие от сильного взаимодействия между адсорбируемой молекулой и поверхностью, взаимодействие между самими молекулами остается слабым. В органическом и неорганическом мире существует большое количество примеров самоупорядочения. Пленки мономолекулярной толщины, образовавшиеся по механизму самоупорядочения, имеют очень низкую плотность дефектов, достаточно стабильны и механически прочны. Их используют в качестве трафарета в литографических процессах. При этом нанометровое разрешение достигается с использованием сканирующих зондов в сканирующем туннельном или атомном силовом микроскопе.

Молекулярные блоки для самоупорядочения должны содержать три основные функциональные группы – группу, прикрепляющую их к поверхности, промежуточную группу и поверхностную функциональную группу. Эти группы не являются взаимозаменяемыми. Так, функции позиционирования и распознавания лучше реализуются с использованием органических групп, нежели неорганических, хотя электронные свойства последних изучены более глубоко. Комбинирование различных по составу групп постоянно рождает новые формы самоупорядочения.

5.4.2. Самосборка

Здесь используют самопроизвольную организацию малых молекул в большие, строго определенные, стабильные молекулярные комплексы или агрегаты и осаждение атомов или молекул на подложку с последующим самоупорядочением в полезные для разных приложений наноструктуры. Зачастую слабые обратимые взаимодействия между частями молекул позволяют получать равновесные структуры без какого-либо централизованного управления процессом. Процедура автоматически исправляет ошибки, то есть ошибочно или неправильно прикрепленные элементы могут быть заменены во время роста.

Разнообразные процессы самосборки используют слабые, нековалентные связывающие взаимодействия, например, водородные связи или силы Ван-дер-Ваальса, которые позволяют реакциям идти под термодинамическим контролем с непрерывным исправлением ошибок. Типов исходных молекул обычно немного, они небольшие и легко синтезируемые, а конечный продукт получается в термодинамически равновесном состоянии.

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 и т.д. Кроме того, для анизотропных наночастиц удалось добиться формирования ориентационно-упорядоченных массивов. Однородные по размеру наночастицы можно «собрать» в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные «нити», 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 на структуру.

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 поле, капиллярные силы, «игра» на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы. В настоящее время процессы самосборки начинают активно использоваться и в производстве. В частности, известная компания Intel внедряет процессы самосборки для создания компьютерных чипов нового поколения.

Глава 6.

ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО- РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР В ПРИБОРАХ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

6.1. Лазеры с квантовыми ямами и точками

Самым распространенным типом полупроводникового лазера является лазер на двойной гетероструктуре, где активная область представляет собой тонкий слой узкозонного полупроводника между двумя широкозонными. При достаточно малой толщине активной области она начинает вести себя как квантовая яма и квантование энергетического спектра в ней существенно меняет свойства лазеров.

Основное влияние на свойства лазеров оказывает изменение плотности состояний, происходящее под влиянием размерного квантования. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны эта величина мала, то в квантово-размерной системе она не убывает вблизи края, оставаясь равной $m/\pi\hbar^2$. Создание лазеров с квантово-размерной активной областью позволило получить непрерывную генерацию при комнатной температуре и в дальнейшем снизить пороговый ток инжекционного лазера до величин порядка 50 А/см^2 .

Благодаря иной энергетической зависимости плотности состояний меняется не только величина порогового тока, но и его температурная зависимость. Она становится более слабой, в силу чего

непрерывную генерацию удастся получить не только при комнатной температуре, но и при температурах на много десятков градусов выше.

Другой важной особенностью лазеров на квантовых ямах является возможность их частотной перестройки. Минимальная энергия излучаемых световых квантов равна $h\nu = E_g + E_1^e + E_1^h$. Она меняется при изменении a (ширина квантовой ямы, и т.п.), т. е. путем изменения ширины квантовой ямы можно осуществлять перестройку частоты генерации, сдвигая ее в коротковолновую сторону по сравнению с лазерами с широкой (классической) активной областью.

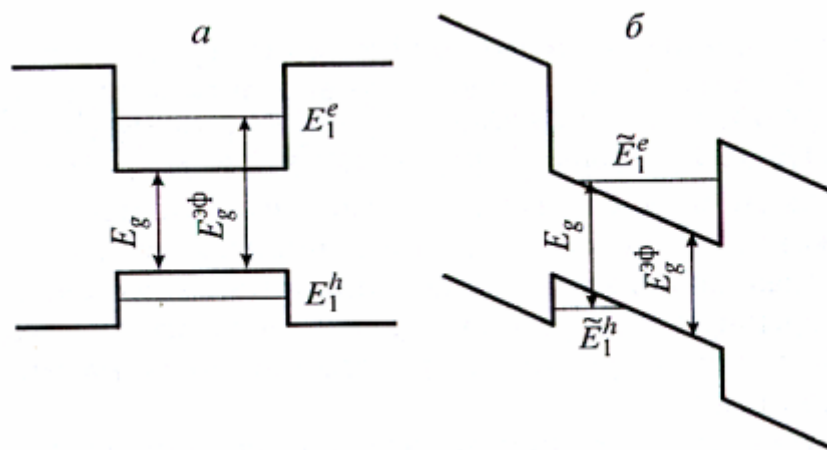


Рис. 6.1. Двусторонняя лазерная гетероструктура: а) в состоянии термодинамического равновесия; б) при работе

В квантовых точках энергетический спектр меняется еще более радикально, чем в квантовых ямах. Плотность состояний имеет δ -образный вид, и в результате отсутствуют состояния, которые не принимают участия в усилении оптического излучения, но содержат электроны. Это уменьшает потери энергии и как следствие уменьшает пороговый ток. Лазеры могут содержать одну или (для увеличения оптического усиления) несколько плоскостей, заполненных квантовыми точками. Согласно теоретическим оценкам, диодные лазеры с активной средой из квантовых точек должны обладать значительно лучшими свойствами по сравнению с лазерами на квантовых ямах, а именно: существенно большим коэффициентом усиления, меньшей пороговой плотностью тока, полной невосприимчивостью к температуре решетки, лучшими динамическими характеристиками и большими возможностями контроля над энергией кванта излучения[5].

6.2. Фотоприемники на квантовых ямах

Процессы оптической ионизации квантовых ям могут использоваться для создания новых типов приемников инфракрасного излучения. Принцип приемника весьма прост: выброс носителей в зону проводимости широкозонного полупроводника (потенциального барьера) увеличивает проводимость в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры.

По своему действию такой приемник напоминает примесный фоторезистор, где в роли центров выступают квантовые ямы. Поэтому в качестве времени жизни неравновесных носителей выступает характерное время захвата в квантовую яму τ_q . По сравнению с обычным временем жизни, связанным с захватом на рекомбинационные центры, τ_q обладает двумя важными отличиями.

Во-первых, τ_q значительно (на несколько порядков) меньше времени захвата на центры. Причина в том, что акт захвата связан с необходимостью передачи решетке от носителя достаточно большой энергии, равной энергии связи центра или же величине ΔE при захвате в квантовую яму. Наиболее эффективный механизм передачи энергии — это испускание оптических фотонов с энергией $\hbar\omega_0/2\pi$. Однако энергия связи центров отнюдь не совпадает с $\hbar\omega_0/2\pi$, и потому такой процесс невозможен. Электрон должен отдавать энергию в ходе значительно более медленного каскадного процесса испускания многих акустических фононов. В случае квантовой ямы наличие непрерывного спектра движения в плоскости ямы существенно меняет ситуацию. Становится возможным переход на связанное состояние в яме при испускании оптического фонона с одновременной передачей оставшейся избыточной энергии в движение в плоскости ямы (Рис. 6.2.). Если исходный электрон имел энергию, близкую к краю зоны в широкозонном материале, то из Рис. 6.2. видно, что испускаемый фонон должен иметь достаточно большой импульс:

$$q = [2m (\Delta E - E_1 - \hbar\omega_0/2\pi)]^{1/2}$$

в плоскости квантовой ямы. Значительно большая величина взаимодействия электронов с оптическими фононами, нежели с акустическими, определяет малость τ_q по сравнению со временем захвата из центра.

Во-вторых, τ_q немонотонным, осциллирующим образом зависит от параметров ямы. Это связано со свойствами волновой функции

электронов в делокализованных состояниях над квантовой ямой ψ_E . Если яма не является резонансной, то амплитуда этой волновой функции в непосредственной окрестности ямы при малой энергии электрона весьма мала. Собственно, τ_q будет относительно велико. Для резонансных квантовых ям вероятность захвата возрастает, т. е. τ_q падает.

Фотопроводимость рассматриваемой структуры, так же как и обычного фоторезистора, определяется произведением трех факторов: скорости оптической генерации, которая в свою очередь пропорциональна коэффициенту поглощения α , времени жизни в делокализованном состоянии τ_q и эффективной подвижности в нем $\mu_{эф}$, которая должна быть пропорциональна квантово-механическому коэффициенту прохождения электрона над квантовой ямой. Первый и третий факторы максимальны для резонансных квантовых ям, а τ_q , напротив, минимально для них. Однако совокупное действие всех факторов оказывается таковым, что фотоприемники на квантовых ямах будут иметь лучшие параметры в случае резонансных ям.

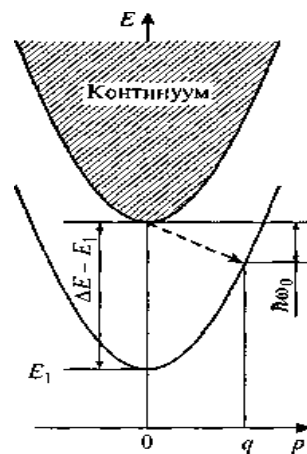


Рис. 6.2. Процесс захвата неравновесного электрона в квантовую яму с испусканием оптического фонона.

Приемники на основе квантовых ям могут составить конкуренцию фоточувствительным структурам на основе твердых растворов CdHgTe — важнейшему типу приемников для данного спектрального диапазона. Основным достоинством структур на квантовых ямах является большая стабильность и меньший разброс параметров, что особенно важно для матричных фоточувствительных структур[5].

Путем сравнительно небольших изменений состава широкозонных слоев и толщины ямы можно менять положение максимума и ширину полосы fotocувствительности. Последнее обстоятельство связано с тем, что по мере нарушения точного условия резонанса спектр фотоионизации квантовой ямы становится более плавным и имеет менее резкий максимум.

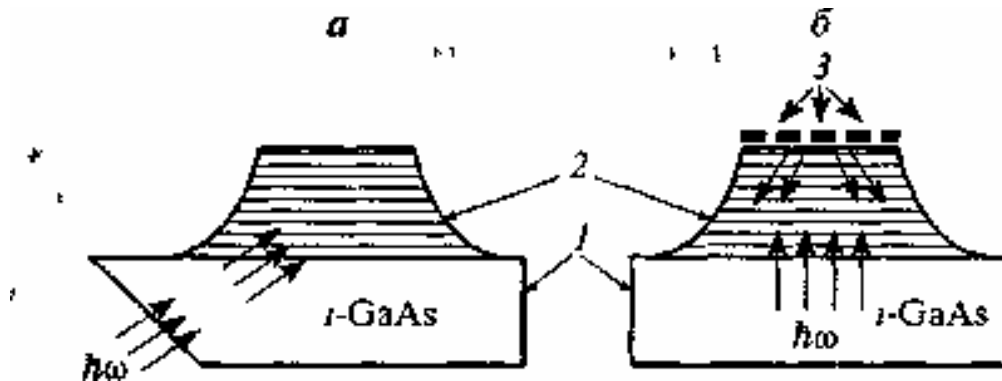


Рис. 6.3. Способы ввода излучения в фотоприемник с квантовыми ямами: *а* — через скошенный торец подложки, *б* — с помощью дифракционной решетки; *1* — подложка, *2* — fotocувствительная структура с квантовыми ямами, *3* — дифракционная решетка.

В связи с тем, что оптическая ионизация квантовых ям может вызываться лишь светом, поляризованным по нормали к квантовым слоям, описанные фотоприемники должны содержать специальные приспособления, поляризующие падающий свет требуемым образом. Есть два основных способа сделать это. Свет может направляться в fotocувствительную структуру под углом через скошенный торец подложки (Рис. 6.3. а). В другом варианте свет проходит через подложку по нормали, а должную поляризацию приобретает после дифракции на решетке, специально нанесенной на верхнюю поверхность структуры (Рис. 6.3. б).

Возможно альтернативное решение проблемы поляризации, позволяющее избежать описанных выше конструктивных усложнений. Речь идет о выращивании квантовых структур из полупроводников с анизотропным энергетическим спектром. При наличии анизотропии электрическое поле нормально падающей световой волны, лежащее в плоскости слоев, придает электронам импульс под некоторым углом к этой плоскости. С позиций квантовой механики это означает возможность переходов между различными квантово-размерными уровнями или между уровнем и континуумом

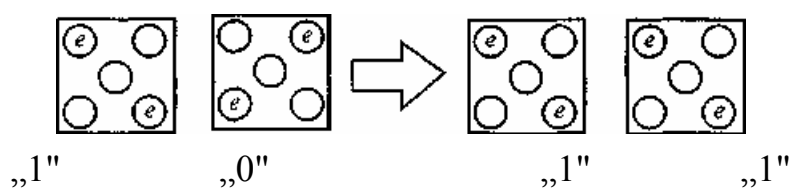
состояний над квантовой ямой, что и требуется для работы приемника. На практике для реализации этой идеи чаще всего используют гетероструктуры на основе той же, наиболее освоенной технологически, системы $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, но имеющие не n-, а p-тип легирования. При этом сложный характер энергетического спектра валентной зоны обеспечивает фоточувствительность при нормальном падении света.

6.3. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика

Потребности в разработке логических устройств для нанокomпьютеров с очень высокой плотностью логических элементов и с максимально возможно низким потреблением энергии на одно переключение привели к предложениям использовать в логических элементах проводящие островки очень малого размера — квантовые точки. В таких приборах для реализации вычислений логических булевых функций используют массивы связанных взаимодействующих квантовых точек. Эти новые приборы называют квантово-точечными клеточными автоматами.

Основу прибора составляет ячейка, состоящая из четырех или пяти квантовых точек. На Рис. 6.4. представлена ячейка из пяти квантовых точек: четыре точки расположены в углах квадрата, а одна — в его центре. В ячейку при помощи внешнего напряжения через дополнительный электрод вводятся два избыточных электрона, и ячейка приобретает электрический заряд. Квантовые точки в ячейке располагаются таким образом, что возможно туннелирование только через центральную точку. Из-за электростатического отталкивания между избыточными электронами вся система будет иметь минимальную энергию только в том случае, если электроны расположатся как можно дальше друг от друга, т. е. в углах квадрата, соединенных диагональю. Поскольку таких возможных положений всего два, то система имеет всего два устойчивых состояния (две поляризации), и, следовательно, одно из этих состояний можно считать логической единицей («1»), а второе — логическим нулем («0»). При переходе системы из одного устойчивого состояния в другое меняются поляризация системы и распределение электрических полей вокруг ячейки. С помощью дополнительных

электродов, связанных с ячейкой емкостной связью, можно навязать ячейке необходимое состояние и перевести ее в состояние «1» или «0». Если рядом с первой ячейкой расположить вторую (в которой также находится два дополнительных электрона), то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы (Рис. 6.4.). Составляя комбинации из расположенных разным образом ячеек, можно реализовать разнообразные логические функции и выполнить необходимые логические преобразования и вычисления. На Рис. 6.5. представлен пример комбинации ячеек, при которой состояние на выходе определяется большинством состояний на входе. Предложены разнообразные комбинации ячеек для реализации логических операций. На основе таких элементов возможно создание нанокomпьютера. Важно отметить, что взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов вдоль цепочки — в бестоковом режиме, только за счет передачи вдоль цепочки состояния поляризации.



Состояние с высокой энергией Состояние с низкой энергией

Рис. 6.4. Различные конфигурации ячеек квантово-точечных автоматов.

Преимущества логических устройств на основе квантово-точечных клеточных автоматов состоят в том, что по сравнению с аналогичными устройствами на основе полевых транзисторов требуется значительно меньший объем активной области. Например, полный сумматор на основе клеточных автоматов с размером точки 20 нм можно расположить на площади около 1 мкм², в то время как такую же площадь занимает всего лишь один полевой транзистор. Для построения такого же сумматора на основе полевых транзисторов требуется примерно 40 транзисторов. Если еще учесть области коммутации транзисторов между собой, а они, как известно, занимают объем, сравнимый или даже превосходящий объем, занятый

активными приборами, то преимущества использования клеточных автоматов становятся очевидными.

Принципиальная возможность функционирования логических элементов на основе клеточных автоматов была продемонстрирована при $T = 15$ мК на примере ячейки, изготовленной при помощи стандартной электронно-лучевой литографии из алюминиевых островков на поверхности окисленной кремниевой пластины. Площадь прибора составляла величину $\sim 50 \times 50$ нм².

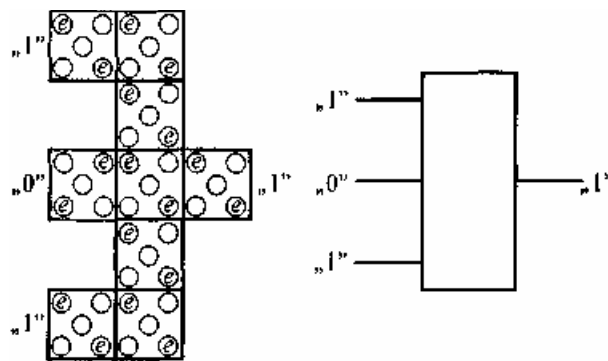


Рис. 6.5. Комбинации ячеек квантово-точечного автомата, при которых состояние на выходе определяется большинством состояний на входе.

Вычислительный процесс в приборах на основе клеточных автоматов осуществляется при переходе всей совокупности ячеек в состояние с минимальной энергией — в основное состояние. Поскольку сложные вычислительные устройства должны содержать большое число ячеек, то состояние с минимальной энергией можно получить разными способами. Это может приводить к ошибкам в вычислениях. Кроме того, такие системы чувствительны к внешним воздействиям и поэтому требуют строгого контроля внешних условий. При повышении температуры вычислительный процесс может быть разрушен. Для ячеек, у которых размер одной квантовой точки — 20 нм, изменение энергии при перезарядке точки составляет величину ~ 1 мэВ (примерно $1/20$ кТ при комнатной температуре). Так же как и для одноэлектронного транзистора, рабочую температуру нужно повышать за счет уменьшения размеров ячейки (и соответственно каждой квантовой точки). Существует еще одна проблема, которая должна быть решена для успешной работы устройств на основе клеточных автоматов. Она состоит в том, что поскольку электростатическое поле ячейки влияет на соседние ячейки как в

направлении выхода устройства, так и в направлении входа, то из-за случайных воздействий возможно распространение сигнала не только от входа к выходу, но и наоборот. Для устранения этого недостатка предложены устройства на основе квантовых точек, у которых направление передачи сигнала определяется внешним электрическим полем. Практическое изготовление устройств на основе клеточных автоматов находится в самой начальной стадии и требует разрешения целого ряда проблем, в основном технологических.

6.4. Нанокomпьютеры

Нанoeлектроника в настоящее время вплотную приблизилась к созданию и новых типов вычислительной техники – нанокomпьютеров. Можно предположить, что нанокomпьютеры будут развиваться одновременно по нескольким направлениям, реализующим различные способы представления информации (на основе квантовой логики, классической логики), а также появятся некоторые другие, например, генетические, молекулярно-биологические, молекулярно-механические. Рассмотрим одно из направлений разработки нанокomпьютеров, основанное на теории квантовых вычислений с помощью квантовомеханических логических операций. Устройства, построенные на таком типе вычислений, называются квантовыми компьютерами.

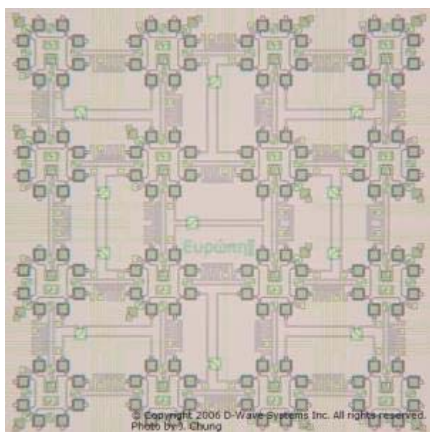
Квантовый компьютер – вычислительное устройство, использующее при работе квантовомеханические эффекты и реализующее выполнение квантовых алгоритмов. Квантовые компьютеры работают на основе квантовой логики.

Идея квантовых вычислений впервые была высказана Ю.И. Маниным в 1980 году, но активно эта проблема стала обсуждаться после появления в 1982 году статьи американского физика-теоретика Р. Фейнмана. В этих работах было предложено использовать для вычислений операции с состояниями квантовой системы. Каждое состояние квантовой системы, в отличие от классической, может находиться в состоянии суперпозиции. В терминах классического компьютера квантовый бит (кубит) в соответствии с законами квантовой механики может находиться одновременно в двух равновероятных состояниях «0» и «1». Тогда два кубита могут быть уже в четырёх смешанных состояниях – 00, 01, 10 и

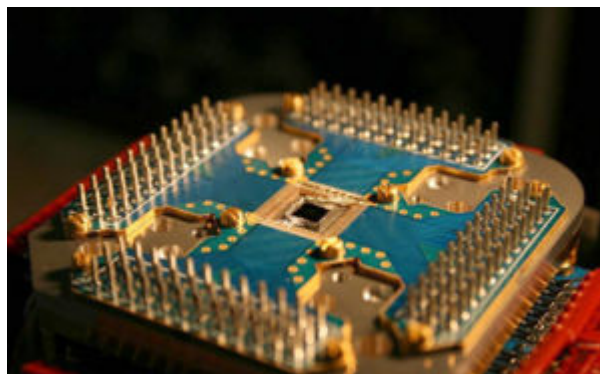
11, представляя четыре числа сразу. Видно, что увеличение растёт по степенному закону: на m кубитах можно выполнять одновременно вычисление над 2^m числами параллельно. Это значит, что, используя всего несколько сотен кубитов, можно представить одновременно больше чисел, чем имеется атомов во Вселенной. 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 – принцип квантового параллелизма. Иначе говоря, когда в классическом компьютере вычисляется единственное выходное значение для одного входного состояния, в квантовом компьютере вычисляются выходные значения для всех входных состояний. Иначе говоря, квантовый компьютер может за короткое время решать задачи, с которыми современные компьютеры не могли бы справиться в течение сотен лет.

Конечно, на пути практической реализации квантовых компьютеров стоит огромное количество сложнейших теоретических и практических задач. На сегодняшний день предложены варианты конструкции квантовых компьютеров на основе квантовых точек и сверхпроводящих переходов. Более того, есть заявления коммерческих организаций о создании реальных процессоров на базе кубитов, например, компьютер «Orion». Он основан на микросхеме, содержащей 16 «кубитов» (Рис. 6.6.). Однако здесь необходимо оговориться, что в квантовых компьютерах существуют проблемы, связанные с неоднозначностью интерпретации информации, поэтому заявления о создании квантовых компьютерах ставятся в научном сообществе под сомнение.

Каждый такой кубит состоит из частиц ниобия, окруженных соленоидами. По сути, «Orion» представляет собой аналоговый компьютер, решающий задачи методом физического моделирования. Такой компьютер лучше всего подходит для расчета сложных и занимающих много машинного времени моделей – финансовых, химических или фармацевтических.



а)



б)

Рис. 6.6. 16-q-битный процессор «Orion»: его схема (а) и фотография (б)

Таким образом, все приведенные здесь факты и бурное развитие нанотехнологий позволяют надеяться на то, что фантастические мечты о суперкомпьютерах в скором времени найдут реальное воплощение.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

1945–1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д. т. н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. - радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б. С. Мишин, доцент И. П. Захаров, доцент А. Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А. Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям - автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д. т. н., проф. В. В.Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г. А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров, конструкторов, технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф.С. А. Арустамов, затем снова проф. Г. А. Петухов.

С 1997 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, проекта и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д. т. н., профессор Ю.А. Гатчин. За время своего существования кафедра выпустила 4364 инженеров. На кафедре защищено 65 кандидатских и семь докторских диссертаций.

На кафедре Проектирования Компьютерных систем осуществляется магистратурская подготовка по направлению 210200.05 «Информационные технологии и проектирование электронных средств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. – Издательство: Техносфера, 2010. – 336 с.
2. Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. – Издательство: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 136 с.
3. Ю.Д. Третьяков. Нанотехнологии: Азбука для всех. – Издательство: Физмалит, 2008. – 368 с.
4. У. Хартманн. Очарование нанотехнологии. – Издательство: Бином, 2008. – 173 с.
5. В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина. Наноэлектроника: учебное пособие для студ. – Мн: БГУИР, 2004. – 48 с.
6. Ю.А. Чаплыгина. Нанотехнологии в электронике. – Издательство: Техносфера, 2005. – 448 с.
7. А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. Физика низкоразмерных систем. – Издательство: Наука, 2001. - 160 с.
8. В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. Основы Наноэлектроники. – Новосибирск: НГТУ, 2000. – 340 с.
9. В.В. Парфенов. Квантово-размерные структуры в электронике: оптоэлектроника. – Казань: КГУ, 2007. – 16 с.

Вера Леонидовна Ткалич
Анастасия Викторовна Макеева
Екатерина Евгеньевна Оборина

Физические основы нанoeлектроники

Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн обложки

Компьютерный набор и вёрстка

Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО

Зав. РИО

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 24.05.11

Заказ № 2386

Тираж 100

Отпечатано на ризографе

В.Л. Ткалич

А.В. Макеева

Е.Е. Оборина

А.В. Макеева

Е.Е. Оборина

А.В. Макеева

Е.Е. Оборина

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

