**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**Учреждение Российской академии наук**

**ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ им. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА РАН Саратовский филиал**

**(СФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)**

**Отчет**

 **«Создание баз данных в области наноэлектроники как элементов информационной составляющей инфраструктуры наноиндустрии»**

Саратов 2008

**РЕФЕРАТ**

Отчет содержит 140 стр., в том числе 3 табл., 17 рис., 1 приложение.

НАНОЭЛЕКТРОНИКА, НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ, СТРУКТУРИРОВАНИЕ

Работа посвящена 1-му этапу разработки баз данных по направлению «Наноэлектроника» в рамках создания системы сбора, хранения, обработки и управления потоками научных и технологических данных для наноиндустрии. Результаты работы предназначены для использования в национальной информационной нанотехнологической сети (ННС).

Задачей этапа являлось формирование и первичное структурирование предметной области поиска и извлечения знаний по заданному тематическому направлению деятельности ННС. На основе имеющихся литературных данных и поисковых действий в Интернет проведены описание и анализ современного состояния исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в наноэлектрнике. Осуществлено структурирование и описание взаимосвязей элементов полученной информации в виде понятий предметной области.

Предложена инфологическая модель предметной области, которая включает в себя пять основных типов наноматериалов. Среди них: различные виды низкоразмерных полупроводниковых наноструктур (нуль, - одно и двумерных), магнитные наноструктуры, двумерные многослойные структуры из пленок нанометровой толщины и слоев квантовых точек (сверхрешеточные структуры), молекулярные наноструктуры, фуллереноподобные материалы, а также методы их диагностики. Предложены содержания информационного наполнения баз данных по наноматериалам, нанотехнологиям и наноустройствам, на основании которых на следующем этапе будет сформиро-вана логическая модель хранилища данных - прототипа будущей базы данных.

Разработаны оптимальный перечень источников информации по направлению и методика поисковой работы. В результате проведенного поиска информации по установленным источникам разработаны предварительные реестры наноматериалов и нанотехнологий по направлению наноэлектроника.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Основные рабочие термины……………………………………………………….6

Введение…………………………………………………………………………….7

1.Формирование предметных областей поиска и извлечения знаний по тематическому направлению деятельности ННС наноэлектроника……………11

1.1. Задачи наноэлектроники………………………………………………………11

1.2. Анализ современного состояния исследований в области наноматериалов и нанотехнологий в наноэлектрнике............…………………………..……………16

1.2.1. Полупроводниковые наноструктуры……………………………………….17

1.2.1.1. Современные технологии формирования спонтанно упорядоченных наноструктур……………………………………………………………………….19

1.2.1.2. Концентрационные упругие домены в твердых растворах полупроводников…………………………………………………………………..26

1.2.1.3. Периодически фасетированные поверхности……………………………28

1.2.1.3.1. Гетероэпитаксиалыные структуры на периодически фасетированных подложках…………………………………………………………………………..28

1.2.1.4. Упорядоченные массивы трехмерных когерентно напряженных островков……………………………………………………………………………31

1.2.1.4.1. Равновесное состояние в системе когерентно напряженных трехмерных островков……………………………………………………………..33

1.2.1.4.2. Эффекты упорядочения ………………………………………………….37

1.2.1.4.3. Размеры и плотность островков: возможности управления ………….39

1.2.1.5. Формирование массивов вертикально связанных квантовых точек…….41

1.2.2. Полупроводниковые сверхрешеточные структуры……………………….42

1.2.2.1. Композиционные сверхрешетки……………………………………….. ..47

1.2.2.1.1. Композиционные сверхрешетки типа I………………………………..48

1.2.2.1.2. Композиционные сверхрешетки типа II……………………………….52

1.2.2.1.3. Политипные сверхрешетки……………………………………………..54

1.2.2. 2. Легированные сверхрешетки…………………………………………….55

1.2.2.3. Легированные композиционные сверхрешетки…………………………57

1.2.2.4. Классификация полупроводниковых сверхрешеток…………………….60

1.2.3. Магнитные наноструктуры………………………………………………….62

1.2.4. Двумерные многослойные структуры из пленок нанометровой толщины…………………………………………………………………………….65

1.2.5. Фотонные нанокристаллы и пористый кремний…………………………..67

1.2.6. Молекулярные наноструктуры……………………………………………..70

1.2.7. Фуллереноподобные материалы……………………………………………72

1.2.7.1. Углеродные нанотрубки…………………………………………………..75

1.2.7.2. Характеристики углеродных нанотрубок и требования для их применения в полупроводниковых приборах……………………………………79

1.2.8. Диагностика наноструктур…………………………………………………81

## 2. Поиск и исследование источников получения информации для разработки баз данных…………………………………………………………………………..85

## 2.1. Разработка предметного структурного классификатора по нанотехноло-гиям и наноматериалам…………………………………………………………….85

2.2. Поиск источников получения информации для разработки баз данных… .88

2.3. Организация поиска информации (на примере работы с реферативными БД)……………………………………………………………………………...……91

2.4. Разработка структуры информационного наполнения баз данных………...93

2.5. Формирование реестров баз данных 1-ой очереди………………………….95

3. Список использованных источников информации……………………………99

4. Приложение 1. Список источников информации по тематике ННС наноэлектроника ………………………………………………………………….111

**Основные рабочие термины Концепции развития в России работ в области нанотехнологий на период до 2010 года**

«Нанотехнология» - совокупность методов и приемов, обеспечи­вающих возможность контролируемым образом создавать и модифициро­вать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле - этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и исследований таких объектов;

«Наноматериал» - материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых, хотя бы в одном измерении, не превы­шают 100 нм, и, благодаря этому, обладающий качественно новыми свой­ствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками;

«Наносистемная техника» - созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

**Введение**

Развитие современной полупроводниковой электроники включает применение нанотехнологий, которые определяются как наука и техника создания, изготовления, характеризации и реализации материалов и функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровнях. Нанотехнологии должны обладать атомной точностью при получении полупроводниковых наносистем с необходимым химическим составом и конфигурацией и включают методы комплексной диагностики наноструктур, в том числе контроль в процессе изготовления и управление на этой основе технологическими процессами.

Развитие нанотехнологий было стимулировано разработкой полупроводниковых наноструктур, выращенных методами молекулярно-пучковой и металлоорганической эпитаксии, и созданием на их основе принципиально новых приборов и устройств электроники и оптоэлектроники, широко используемых сейчас в системах хранения, пердачи и обработки информации (лазеры на квантовых ямах и свехрешетках, СВЧ – транзисторы с двумерным электронным газом и др.).

Мощным толчком развития нанотехнологий послужило открытие в 80-х годах ХХ века туннельной микроскопии, идеи которой легли в основу разработки широкого спектра современных зондовых методов диагностики материалов на наноуровне, а также ряда технологических приемов (нанолитография, молекулярная сборка, саморганизация). Существенно усовершенствованы известные технологии (электронная и рентгеновская литография, техника сфокусированных ионных пучков) и диагностические методы (электронная микроскопия свервысокого разрешения, сканирующая зондовая микроскопия, рентгеновские методы, в том числе с использованием синхротронного излучения, фемтосекундная спектроскопия), что позволяет контролируемым образом создавать наноструктуры, наноматериалы и устройства различного назначения на их основе.

Современный опыт разработки приборов и устройств на основе квантовых гетероструктур (лазеры на квантовых точках, сверхбыстродействующие транзисторы, запоминающие устройства с гигантским магнитосопртивлением) показывает, что результаты фундаментальных исследований в этой области находят практическое применение за весьма короткое время. Эти достижения уже в ближайшие годы способны привести к кардинальным изменениям во многих сферах человеческой деятельности – в электронике, информатике, энергетике, медицине и др. По оценкам зарубежных экспертов объем мировго рынка нанотехнологий к 2010 году составит более 1 трлн. долларов США.

Развитие в стране нанотехнологий и связанных с ними направлений науки, техники и производства направлено на повышение конкурентоспособности и расширение присутствия России на мирвом рынке, повышение степени безопасности страны путем широкого внедрения специальной наносистемной техники, совершенствования вооружений, военной и специальной техники.

В связи с вышеизложенным государственная научно-техническая и инновационная политика в этой сфере деятельности должна быть приоритетной и иметь, прежде всего, технологическую направленность, включая анализ рынка наукоемкой нанотехнологической продукции, прогнозирование возможного развития отдельных технологических направлений в области создания наносистем.

Обеспечение перехода от исследований к использованию их результатов для развития основ наноиндустрии заключается в создании благоприятных условий для поддержки проведения работ, включая информационную поддержку. Этому служат разрабатываемые в рамках настоящей работы региональный сегмент телекоммуникационной национальной нанотехнологи-ческой сети (ННС) и базы данных по тематическому направлению деятельности ННС наноэлектроника, обеспечивающих информационно-технологическую и аналитическую поддержку проведения исследований и разработок в области наноэлектроники, а также опытно-конструкторских работ, направленных на создание конкурентоспособных продуктов в этой области, их ускоренное промышленное освоение и коммерциализацию.

## Создание современных баз данных в определенной предметной области, в частности, наноэлектронике, включает в себя несколько основных стадий:

- формирвание самой предметной области, представляющей собой часть реального мира, данные о которой мы хотим отразить в базе данных. Предметная область бесконечна и содержит как существенно важные понятия и данные, так и малозначащие или вообще не значащие данные, при этом их важность зависит от выбора предметной области и определяется разработчиком.

- разработку модели предметной области, представляющую собой формализованную модель предметной области, которая описывает процессы, происходящие в предметной области и данные используемые этими процессами. Наиболее информативным и полезным при разработке баз данных являются формальные описания процессов предметной области, выполненные при помощи специализированных графических нотаций.

- построение логической модели данных, которая описывает взаимосвязь понятий предметной области, а также ограничения на данные, налагаемые предметной областью. Логическая модель данных является начальным прототипом будущей базы данных. Она позволяет пользователям и разработчикам трактовать данные уже как информацию, то есть сведения, содержащие не только данные, но и взаимосвязь между ними. Логическая модель данных отражает три аспекта работы с данными – задание структуры данных, правила обеспечения целостности данных, правила манипулирования данными.

- создание физической модели данных, которая описывает данные средствами конкретной Системы Управления Базами Данных (СУБД). Отношения, разработанные на стадии формирования логической модели данных, преобразуются в таблицы, атрибуты становятся столбцами таблиц, для ключевых атрибутов создаются уникальные индексы, домены преображаются в типы данных, принятые в конкретной СУБД.

 Согласно техническому заданию, задачами первого этапа настоящей работы были формирование предметных областей поиска и извлечения знаний по тематическому направлению деятельности ННС наноэлектроника, определение источников информации в глобальной телекоммуникационной Интернет- сети по заданному тематическому направлению деятельности ННС, поиск, выборка электронных материалов и представление записей в формате Excel с глубиной охвата с 1998 года по настоящее время, определение коллекций и отдельных источников, на которые необходимо оформить платную подписку.

**1.Формирование предметных областей поиска и извлечения знаний по тематическому направлению деятельности ННС наноэлектроника.**

**1. 1. Задачи наноэлектроники**

Современный научно-технический прогресс несомненно определяется развитием электроники, основой которой являются достижения в различных областях фундаментальных наук, главным образом, физики твердого тела, физики полупроводников, а также твердотельной технологии. Последние достижения науки показывают, что, в отличие от традиционной микроэлектроники, потенциальные возможности которой в ближайшее десятилетие, по-видимому, будут исчерпаны, дальнейшее развитие электроники возможно только на базе принципиально новых физических и технологических идей.

Так, на протяжении ряда десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия систем достигалось увеличением плотности размещения и уменьшением размеров элементов, принцип действия которых не зависел от их масштаба. При переходе к размерам элементов порядка десятков или единиц нанометров возникает качественно новая ситуация, состоящая в том, что квантовые эффекты (туннелирование, размерное квантование, интер-ференционные эффекты) оказывают определяющее влияние на физические процессы в наноструктурах и функционирование приборов на их основе.

Многообещающим является также создание наноструктур, в которых роль функциональных элементов выполняют отдельные молекулы. В перспективе это позволит использовать принципы приема и переработки информации, реализуемые в биологических объектах (молекулярная наноэлектроника). Новые возможности в повышении мощности, температурной и радиационной стойкости, расширении диапазона частот, улучшении эргономических характеристик приборов открывает направление, в котором синтезируются идеи и технологические достижения вакуумной и твердотельной электроники (вакуумная наноэлектроника).

Создание наноструктур базируется на новейших технологических достижениях в области конструирования на атомном уровне твердотельных поверхностных и многослойных структур с заданным электронным спектром и необходимыми электрическими, оптическими, магнитными и другими свойствами. Требуемая зонная структура таких искусственных материалов обеспечивается выбором веществ, из которых изготовляются отдельные слои структуры («зонная инженерия»), поперечных размеров слоев (размерное квантование), изменением степени связи между слоями («инженерия волновых функций»). Наряду с квантово-размерными планарными структурами (двумерный электронный газ в квантовых ямах, сверхрешетки) исследуются одно- и нуль-мерные квантовые объекты (квантовые нити и точки), интерес к которым связан с надеждами на открытие новых физических явлений и, как следствие, на получение новых возможностей эффективного управления электронными и световыми потоками в таких структурах.

Нанотехнологии призваны решить следующие задачи в электронике [1]:

- резкое повышение производительности вычислительных систем;

- резкое увеличение пропускной способности каналов связи;

- резкое увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат;

- резкое повышение чувствительности сенсорных устройств и расширение спектра измеряемых величин, что важно, в частности, для задач экологии;

- создание высокоэкономичных твердотельных осветительных приборов;

- существенное увеличение удельного веса использования электронных и оптоэлектронных компонентов в медицинских, биологических, химических, машиностроительных и других технологиях.

*Резкое повышение производительности вычислительных систем* необходи-мо в связи с переходом технологии интегральных схем к нанометровому масс-штабу. В табл. 1 приведен прогноз уменьшения характерных размеров ИС па-мяти и процессоров (ITRS Roadmap 2002), в табл. 2 — перспектива уменьшения энергии на одно переключение.

*Таблица.1*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Year of production, нм | 2003 | 2010 | 2013 | 2016 |
| DRAM | 1/2 Pitch | 100 | 45 | 32 | 22 |
| MPU | 1/2 Pitch | 107 | 45 | 32 | 22 |
| MPU | Printed Gate Length | 65 | 25 | 18 | 13 |
| MPU | Physical Gate Length | 45 | 18 | 13 | 9 |

Таким образом, развитие «традиционной микроэлектроники» подразумевает переход к нанотехнологии. Развитие нанотехнологии позволит сконструировать и принципиально новые элементы ИС, такие, например, как «одноэлектронные» устройства, потребляющие предельно малые энергии на переключение, или сверхбыстродействующие биполярные Si—Ge-транзисторы с базами толщиной в несколько нанометров. Устройства на основе наноструктур принципиально необходимы и для считывания информации в вычислительном процессе из-за предельно низких уровней сигналов. Примером могут служить магнитные считывающие устройства, основанные на эффекте гигантского магнетосопротивления, возникающем в слоистых металлических магнитоупорядоченных средах с толщиной слоев в несколько нанометров.

*Таблица 2*

|  |  |
| --- | --- |
| Год | Энергия на |
|  | переключение, фДж |
| 2003 | 0,137 |
| 2010 | 0,015 |
| 2013 | 0,107 |
| 2016 | 0,002 |

*Резкое увеличение пропускной способности каналов связи* подразумевает создание высокоэффективных излучающих и фотоприемных устройств для ВОЛС и устройств СВЧ-техники для терагерцового и субтерагерцовых диапазонов. Следует отметить, что эффективные лазерные диоды для линий связи есть типичный продукт нанотехнологии, поскольку они представляют собой квантово-размерные наногетероструктуры с характерной толщиной слоев в несколько нанометров. Эффективные фотоприемные устройства также базируются на таких полупроводниковых гетероструктурах. Дальнейшее развитие излучающих и фотоприемных приборов с неизбежностью связано с развитием нанотехнологии квантовых точек — нанообластей в полупроводнике, ограничивающих движение электронов в трех направлениях. Здесь можно ожидать появления устройств принципиально нового типа, использующих квантово-механические закономерности.

То же относится и к твердотельным устройствам СВЧ-электроники. Переход на наноуровень позволит существенным образом улучшить характеристики СВЧ-транзисторов и создать приборы, основанные на квантово-механических эффектах (например, резонансно-туннельные диоды и приборы на основе сверхрешеток).

*Резкое увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат* связано с развитием нескольких направлений. Прежде всего, это монолитные и гибридные матрицы светоизлучающих диодов (когерентных и некогерентных). И здесь наиболее эффективны и многофункциональны полупроводниковые источники на основе наноструктур. Полупроводниковые лазеры средней и большой мощности, изготовленные на основе наноструктур, эффективны для использования в проекционных системах различного назначения (в том числе для проекционных телевизоров). Наноструктурированные материалы (например, на основе углеродных нанотрубок) чрезвычайно перспективны при создании эффективных катодов для плазменных панелей любой площади.

*Резкое повышение чувствительности сенсорных устройств и значительное расширение спектра измеряемых величин* как путем улучшения характеристик уже существующих приборов и устройств при переходе к размерам, при которых становятся существенными квантово-механические эффекты, так и за счет создания принципиально новых приборов, основанных на возможности «калибровать» различные объекты (атомные кластеры и молекулы) в нанометровом диапазоне размеров и использовать высокую поверхностную чувствительность наноструктурированных материалов. Примером использования нанотехнологий для этих целей может служить создание на основе квантовых полупроводниковых наноструктур лазеров дальнего и среднего ИК-диапазонов, позволяющих контролировать загрязнение атмосферы с высокой чувствительностью и точностью.

*Создание высокоэкономичных твердотельных осветительных приборов* — важнейшая задача современного общества. На освещение сейчас расходуется около 20 % потребляемой в мире энергии, и перевод хотя бы половины освещения на высокоэкономичные полупроводниковые источники света на основе наноструктур существенно уменьшит мировые затраты энергии.

*Существенное увеличение удельного веса использования электронных и оптоэлектронных компонентов в медицинских, биологических, химических, машиностроительных и других технологиях.* Благодаря возможности создавать с помощью нанотехнологий вещества и структуры с наперед заданным оптическим спектром можно «настраивать» источники и приемники излучения, что позволяет селективно воздействовать на биологические и химические процессы и получать сигналы в необходимых спектральных диапазонах для контроля таких процессов. Другое важное обстоятельство состоит в том, что именно благодаря применению наноструктур удается использовать очень компактные мощные источники лазерного излучения. Это позволит развить высокоточные, экономичные и экологически чистые технологии обработки материалов. Эти же источники очень эффективны для применения в медицине.

Интерес к физике низкоразмерных структур связан как с принципиально новыми фундаментальными научными проблемами и физическими явлениями, так и с перспективами создания на основе уже открытых явлений совершенно новых квантовых устройств и систем с широкими функциональными возможностями для опто- и наноэлектроники, измерительной техники, информационных технологий нового поколения, средств связи и пр. Результатом исследований низкоразмерных систем стало открытие принципиально новых, а теперь уже широко известных явлений, таких как целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе, вигнеровская кристаллизация квазидвумерных электронов и дырок, обнаружение новых композитных квазичастиц и электронных возбуждений с дробными зарядами, высокочастотных блоховских осцилляции, а также многое другое. Современные полупроводниковые лазеры на гетеропереходах также основаны на использовании низкоразмерных систем (структуры с квантовыми ямами, самоорганизованными квантовыми точками и квантовыми нитями). Наиболее выдающиеся достижения в этой области отмечены тремя Нобелевскими премиями по физике (1985 г. — за открытие квантового эффекта Холла; 1998 г. — за открытие дробного квантового эффекта Холла; 2000 г. — за труды, заложившие основы современных информационных технологий).

Развитие этой области открыло возможности конструирования средствами зонной инженерии и инженерии волновых функций и последующего изготовления с помощью современных высоких технологий наноструктур (сверхрешетки, квантовые ямы, точки и нити, квантовые контакты, атомные кластеры и т.д.) с электронным спектром и свойствами, требуемыми для обнаружения и изучения новых физических явлений или для соответствующих приложений. Сконструированные таким образом наноструктуры являются, по существу, искусственно созданными материалами с наперед заданными свойствами.

Достижения в разработке и изготовлении наноструктур различного назначения в наибольшей степени определяются уровнем развития технологий, которые позволяют с атомной точностью получать наноструктуры необходимой конфигурации и размерности, а также методов комплексной диагностики свойств наноструктур, включая контроль в процессе изготовления (in situ) и управление на его основе технологическими процессами.

Ниже дан краткий обзор сегодняшнего состояния и некоторых перспектив в области наноматериалов и нанотехнологий, который, как ожидается, позволит получить общее представление об этой предметной области заданного тематического направления деятельности ННС наноэлектроника.

**1.2. Анализ современного состояния исследований в области наноматериалов и нанотехнологий наноэлектроники**

Если при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество или это качество возникает в композиции из таких объектов, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними — к нанотехнологиям. Подавляющее большинство новых физических явлений на наномасштабах проистекает из волновой природы частиц (электронов и т. д.), поведение которых подчиняется законам квантовой механики. Проще всего это пояснить на примере полупроводников. Когда по одной или нескольким координатам размеры становятся порядка и меньше длины волны де Бройля носителей заряда — полупроводниковая структура становится резонатором, а спектр носителей заряда — дискретным. То же самое с рентгеновскими зеркалами. Толщина слоев, способных отражать в фазе рентгеновское излучение, лежат в нанометровом диапазоне. В других случаях возникновение нового качества может быть связано с менее наглядными явлениями. Представляется, что такой подход позволяет составить достаточно полное представление о наноматериалах и возможных областях их использования.

**1.2.1. Полупроводниковые наноструктуры**

Используя методы «зонной инженерии», можно конструировать квантово-размерные структуры с заданным электронным спектром и требуемыми оптическими, электрическими и другими свойствами.

***Квантовые ямы****.* Этим термином обозначаются системы, в которых имеется размерное квантование движения носителей заряда в одном направлении. Первоначально основные исследования квантовых ям проводились на инверсионных каналах кремниевых МОП-транзисторов, позднее и до настоящего времени широко исследуются свойства квантовых ям в гетероструктурах. Основные физические явления в квантовых ямах: размерное квантование электронного спектра, квантовый эффект Холла (целочисленный и дробный), при специальном приготовлении очень высокая подвижность электронов. Основные методы получения квантовых ям на гетероструктурах: металлоорганическая газовая эпитаксия и молекулярно-пучковая эпитаксия.

Приборные применения: высокочастотные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, полупроводниковые гетеролазеры и светодиоды от ближнего ИК до голубого света, лазеры дальнего ИК-диапазона, параметрические источники света среднего ИК-диапазона, фотоприемники среднего ИК-диапазона, примесные фотоприемники дальнего ИК-диапазона, приемники дальнего ИК-диапазона на квантовом эффекте Холла, модуляторы в ближнем ИК-диапазоне.

***Квантовые проволоки***— это системы, в которых достижение носителей заряда квантовано в двух направлениях. Первые квантовые проволоки выполнялись на основе квантовых ям посредством создания потенциального рельефа с помощью двух затворов, расположенных над квантовой ямой. Основные физические явления в квантовых проволоках: квантование проводимости, сильно коррелированный электронный транспорт. Основные методы получения квантовых проволок те же, что и квантовых ям, плюс использование прецизионного травления или специальных затворов. Приборных применений пока нет.

***Квантовые точки***— нанообъекты, в которых движение носителей заряда квантовано во всех трех направлениях. Имеют дискретный энергетический спектр (искусственный атом). Основные физические явления в квантовых точках: одноэлектронные и однофотонные явления. Методы получения те же, что и для квантовых ям, однако несколько иные режимы, если происходит спонтанный рост квантовых точек по механизму Странски—Крастанова. Или использование прецизионной литографии для создания квантовых точек из квантовых ям.

Приборные применения: лазеры и светодиоды в ближнем ИК-диапазоне, фотоприемники для среднего ИК-диапазона, однофотонные приемники, однофотонные генераторы, одноэлектронные транзисторы.

***Структуры с туннелъно-прозрачными барьерами***(системы квантовых ям и сверхрешетки). Основные физические явления в таких системах: резонансное туннелирование; формирование минизонного спектра в сверхрешетках — периодических системах, содержащих много квантовых ям, разделенных туннельно-прозрачными барьерами; нелинейные электрические и оптические явления в сверхрешетках. Методы выращивания этих структур те же, что и для квантовых ям.

Приборные применения: резонансно-туннельные диоды (генераторы и сме-сители в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах); мощные генераторы и смесители на сверхрешетках: каскадные лазеры среднего и дальнего ИК-ди-апазонов.

***Фотонные кристаллы***— системы, в которых имеется зонный спектр для фотонов. Основные физические явления: отсутствие пропускания (полное отражение) света в определенном диапазоне частот, резонансные фотонные состояния.

Возможные приборные применения: эффективные лазеры с низкими пороговыми токами, системы управления световыми потоками.

**1.2.1.1. Современные технологии формирования спонтанно упорядоченных наноструктур.**

В последнее время бурно развиваются технологии создания композитных материалов, в частности, нанотехнология. Одним из основных достоинств нанотехнологии является возможность использования принципиально новых подходов в создании искусственных сред. Среди материалов, содержащих наночастицы, особое место занимают образцы, содержащие наноразмерные частицы металла и полупроводников. В периодических публикациях [2-8] их называют “квантовыми точками”, подчёркивая тем самым, что в этих образованиях, в отличие от массивных материалов, отсутствует широкая зонная структура и имеется структура минизон или набор дискретных электронных уровней. Одна из областей применения материалов содержащих квантовые точки это разработка высокоселективных и чувствительных оптических сенсоров, смесителей электромагнитных колебаний в широком спектральном диапазоне, а также одноэлектронных транзисторов для квантовых компьютеров [9]. Исследовались наноразмерные плёнки, слоистые плёночные структуры, массивные материалы с наноразмерными кристаллитами, а также отдельные наночастицы и различные матрицы, содержащие такие наночастицы. Последние объекты представляют особый интерес, т.к. позволяют непосредственно исследовать особенности наноразмерного состояния. В качестве матриц используется стекло, окислы (напр., SiO2), металлы (например, Hg), полимерные пленки [10], коллоидные частицы [11]. Необходимо отметить, что несмотря на всё возрастающее число экспериментальных и теоретических работ по «квантовым точкам», механизм электронных взаимодействий в наночастицах и природа их спектральных свойств всё еще далеки от полного понимания. Попытка сочетать свойства полимеров и неорганических материалов ведутся на протяжении последних нескольких десятков лет и это является одним их основных направлений науки о материалах, направленных на создание гибких электронных устройств из органических материалов. Таким путем предполагается решить ряд фундаментальных задач органической электроники, связанных с получением новых материалов на основе наночастиц металла и полупроводниковых оксидов, изолированных друг от друга в полимерной диэлектрической матрице. Изучаются оптические спектральные (рассеяние, отражение и поглощение света) и люминесцентные свойства полученных материалов вблизи критической концентрации наночастиц в диэлектрической матрице.

В последнее время в этом направлении наблюдается значительный прогресс. Получены материалы, содержащие наночастицы различного состава, обладающие рядом уникальных электрических, оптических и магнитных свойств [10, 12]. Среди методов получения наночастиц можно выделить метод **электроискровой эрозии, распыление, осаждение из газовой фазы, механическое размалывание, химические методы**. При получении наночастиц без матрицы (в виде порошка) основной проблемой является их агломерация, приводящая к образованию крупных агрегатов из частиц и к утрате присущих наноразмерному состоянию уникальных свойств. С практической точки зрения предпочтительнее исследовать наночастицы в матрице, а в качестве матрицы использовать полимеры, в которых имеются естественные пустоты наноразмера (нанореакторы), пригодные для формирования наночастиц. Использование полимерных матриц также предпочтительнее потому, что уровень технологии получения полимеров достаточно высок. Предложенный метод [13] включает введение в **раствор/расплав полимера раствора металлсодержащих соединений (МСС),** высокоскоростное терморазложение которых in situ приводит к образованию металлсодержащих наночастиц. Этот метод использован для получения наночастиц металлов Fe, Cu, Zn и их оксидов.

Важное место в нанотехнологии занимают физические, в частности, **плазменные методы** получения нанокомпозитных материалов. В работе [14], например, исследована тонкая структура углеводородных пленок, полученных в **плазме микроволнового газового разряда низкого давления**. Показано, что размеры алмазоподобных наночастиц в углеводородной матрице могут составлять от 10 до 100 нм.

В течение долгого времени во всем мире предпринимались попытки изготовления квантовых точек и приборов на их основе "традиционными способами", например путем селективного травления структур с квантовыми ямами, роста на профилированных подложках, на сколах, или конденсации в стеклянных матрицах. При этом приборно-ориентированные структуры так и не были созданы, а принципиальная возможность реализации атомоподобного спектра плотности состояний в макроскопической полупроводниковой структуре не была продемонстрирована в явном виде. Качественный прорыв в данной области связан с использованием эффектов самоорганизации полупроводниковых наноструктур в гетероэпитаксиальных полупроводнико-вых системах. "Самоорганизация" наноструктур понимается в широком смысле, как самопроизвольное возникновение макроскопического порядка в первоначально однородной системе.

Одним из эффективных способов изготовления размерно-ограниченных структур является **молекулярно- пучковая эпитаксия (МПЭ)** [15]. Ее отличие от ранее существовавших различных методов вакуумного напыления заключается в высоком уровне контроля условий конденсации атомов или молекул и возможности управления этим процессом с высокой точностью. Успехи технологии были связаны в основном с соединениями А3В5. При последовательном выращивании слоев GaAs и Ga1-xAlхAs, имеющих практически одинаковые параметры кристаллической решетки, можно вырастить совершенные структуры, содержащие двумерные электроны.

В последние годы было обнаружено, что при пониженных температурах роста при многослойном росте полупроводника с параметрами кристаллической решетки, отличающимися от параметров решетки подложки, можно получать на поверхности роста практически одинаковые по размеру островки (квантовые точки). Такой процесс получил название самоорганизации квантовых точек в процессе роста.

Другим способом получения гетероструктур с самоорганизованными КТ является **метод газофазной эпитаксии**. В этом методе осаждение структуры происходит в химическом реакторе путем **термического разложения металлоорганических соединений Ga, In и арсина AsH3 на поверхности подложки, нагретой до температуры 500- 650С**. Процесс ведется в потоке водорода в качестве газа-носителя соединений. Наличие плотной, горячей и химически активной атмосферы в реакторе практически исключает возможность прямого контроля за процессом осаждения и формированием структуры, например, с использованием **дифракции электронов**, как это осуществляется в процессе МПЭ. Это является существенным недостатком метода. Однако его относительная простота и экономичность, особенно важные при массовом производстве структур, способствуют развитию и этого метода.

Способ получения квантовых точек, характеризуемый тем, что получаются нанокристаллы без внутренних упругих напряжений, основан на методах **коллоидной химии**. Он позволяет получать **нанокристаллы элементов II—IV (например, CdS) или III—V (например, InP, GaP, GaInP2, GaAs, InAs)** групп сферической формы размером от 1 до 5 нм в органических растворителях, полимеризующихся при комнатной или более низкой температуре. Отличительными особенностями этого метода являются низкая температура (около 200°С) синтеза коллоидных частиц, возможность широкого изменения концентрации полупроводниковых частиц, небольшая концентрация поверхностных дефектов. Раствор химических реагентов, содержащих соединения элементов II и IV групп, вводят в растворитель, содержащий молекулы, взаимодействующие с поверхностью возникающих наночастиц. Это ограничивает рост частиц. Более крупные частицы можно осадить и получить раствор практически одинаковых по размеру частиц. В настоящее время удается отделить частицы с диаметрами, различающимися только на несколько процентов.

Синтез таким способом веществ III—V групп более трудоемок. Самые хорошие результаты получены в настоящее время при синтезе **InP.** Берется In(C2O4)3 и InF3 или InCl3. Эти вещества взаимодействуют со сложными соединениями, содержащими фосфор. Реакция идет несколько дней при температуре 270—290°С. От продолжительности реакции зависит размер получаемых частиц. В этом способе частицы покрыты сверху слоем молекул из раствора, которые могут быть замещены на другие, например полимерные. Полученные частицы можно изучать в растворе, в виде порошка или помещать в прозрачный полимер или органическое стекло.

Существует еще довольно распространенный способ приготовления неорганического стекла, окрашенного нанокристаллами соединений **II—VI (CdS) и I—VII (CuCl, CuBr, CuI).** Рост полупроводниковых нанокристаллов происходит при **распаде пересыщенного раствора ионов в стекле**. При этом способе получаются стабильные твердотельные стекла с вкрапленными нанокристаллами. Рост кристаллов в стеклянной матрице происходит при температуре 550— 700°С. Эта температура обычно превышает температуру плавления объемных полупроводниковых кристаллов, составляющую 400—500°С. С уменьшением размера нанокристалла до 1—2 нм температура плавления понижается до 200—250°С. К недостаткам такого роста относятся широкий разброс размеров частиц, невозможность воздействовать на параметры границы раздела стекло -нанокристалл.

При рассмотрении физических механизмов спонтанного возникновения упорядоченных наноструктур принято различать две принципиальные возможности. Во-первых, упорядоченные наноструктуры могут возникать в замкнутых системах, например, **при отжиге образцов или при длительном прерывании роста**. Такие структуры являются равновесными, и для их описания используется термодинамический подход. Во-вторых, упорядоченные структуры могут возникать в открытых системах в процессе роста кристалла. Эти структуры не являются равновесными, и для их описания применяется кинетическое рассмотрение. Использование термина "самоорганизация" наноструктур охватывает как равновесные явления, так и неравновесные процессы, а также их комбинацию. Этот подход дает возможность анализировать с единых позиций различные механизмы спонтанного возникновения наноструктур, при котором, как правило, равновесие успевает установиться только частично (например, равновесие успевает установиться на поверхности и не успевает в объеме).

Анализ современного состояния исследований в области технологий формирования спонтанно упорядоченных наноструктур позволяет выделить четыре большие класса, приведенные на рис. 1 [16]. Это:

— структуры с периодической модуляцией состава в эпитаксиальных пленках твердых растворов полупроводников;

— периодически фасетированные поверхности;

— периодические структуры плоских доменов (например, островков монослойной высоты);

— упорядоченные массивы трехмерных когерентно напряженных островков в гетероэпитаксиальных рассогласованных системах.

Хотя причина неустойчивости однородного состояния различна для каждого класса наноструктур, причина упорядочения в неоднородном состоянии общая для всех классов наноструктур. Во всех этих системах соседние домены различаются постоянной кристаллической решетки и (или) структурой поверхности, и, следовательно, доменные границы являются источниками дальнодействующих полей упругих напряжений. Это позволяет использовать единый подход ко всем четырем классам упорядоченных наноструктур и рассматривать их как равновесные структуры упругих доменов, соответствующие минимуму свободной энергии. До недавнего времени доменные структуры, приведенные на рис. 1*, а-с,* традиционно рассматривались вне связи с полупроводниковыми наноструктурами. Единый подход позволяет проследить основные закономерности образования упорядоченных структур на более простых примерах (рис. 1, *а—с*)и затем, с одной стороны, применить их к описанию массивов трехмерных когерентно напряженных островков (рис. 1*, d*)*,* и с другой стороны, использовать при разработке новой технологии получения полупроводниковых наноструктур.

**1.2.1.2. Концентрационные упругие домены в твердых растворах полупроводников**

Возможность спонтанного возникновения структур с модулированным составом в твердых растворах связана с неустойчивостью однородного твердого раствора относительно спинодального распада [17,18]. Эта неустойчивость для твердого раствора A1-cBcC означает, что твердый раствор с некоторым неоднородным профилем состава с(**r**) = *с* + *δс*(**r**) имеет меньшую свободную энергию, чем однородный твердый раствор с составом с (**r**) = *с.*

Изменение свободной энергии системы, обусловленное флуктуацией состава δ*с(****r****),* равно

где *Н* — энтальпия, *Smix* — энтропия смешивания, *Т* — температура, Eelastic — упругая энергия. Неустойчивость однородного твердого раствора относительно флуктуации состава возникает, когда энтальпия образования твердого раствора A1-c BcC из бинарных компонентов АС и ВС положительна, Δ*H*formation = *H*(А1-сВсС) - (1-*с*)*H*(АС) - c*H*(ВС) > О, что справедливо для всех тройных твердых растворов полупроводников AIIIBV. Тогда при *Т =* 0 двухфазная смесь чистых материалов АС и ВС имеет меньшую свободную энергию, чем однородный твердый раствор A1-cBcC, и последний оказывается неустойчивым. При конечных *Т* вклад *Smix* в свободную энергию способствует перемешиванию компонентов и стабилизирует однородный твердый раствор.

Упругая энергия обусловлена зависимостью равновесного параметра решетки твердого раствора *а* от состава *с* в соответствии с правилом Вегарда. Области твердого раствора с различным составом имеют различные значения равновесной постоянной решетки. Сопряжение двух областей происходит путем упругой деформации, с которой связана упругая энергия. Именно упругая энергия, зависящая от пространственного профиля состава, определяет "мягкую моду", соответствующую наиболее неустойчивым флуктуациям состава. В объемном образце "мягкая мода" обусловлена только упругой анизотропией кристалла и может быть представлена как волна состава с волновым вектором, параллельным направлению наилегчайшего сжатия кристалла [17]. Для большинства кубических материалов — это направления [100], [010] и [001]. Конечное состояние распадающегося твердого раствора — это 1D слоистая структура концентрационных упругих доменов, чередующихся вдоль одного из направлений наилегчайшего сжатия [18].

Для исследования возможности спонтанного образования наноструктур в работах [19, 20] была построена теория спинодального распада в эпитаксиальных пленках твердых растворов, где релаксация напряжений вблизи свободной поверхности должна уменьшать эффект упругой стабилизации однородного твердого раствора. Для твердого раствора в эпитаксиальной пленке на (001) -подложке кубического кристалла, согласованного по постоянной решетки с однородным твердым раствором с составом *с*, была найдена "мягкая мода" флуктуации состава. Показано, что "мягкая мода" локализована вблизи свободной поверхности z = 0 и затухает экспоненциально в глубину пленки δ*с (r)* ~ ехр(- |*kz*|) exp(*i*k||r||), а волновой вектор в плоскости поверхности k|| = *(kx, ky)* направлен вдоль оси наилегчайшего сжатия [100] (или [010]). Благодаря релаксации упругих напряжений вблизи свободной поверхности упругая энергия, связанная с "мягкой модой", уменьшена на множитель ≈ 1/3 по сравнению с упругой энергией в объемном образце, и многие твердые растворы оказываются неустойчивыми относительно спинодального распада уже при 450- 500° С. Была найдена равновесная структура с модуляцией состава, для которой состав модулирован в плоскости вдоль направления [100] или [010], а амплитуда модуляции максимальна на свободной поверхности и затухает вглубь пленки. Данные исследования показали, что релаксация упругих напряжений вблизи свободной поверхности способствует спонтанному образованию наноструктур, а упругая анизотропия материала определяет ориентацию наноструктур.

**1.2.1.3. Периодически фасетированные поверхности**

Причиной спонтанного фасетирования плоской поверхности кристалла является ориентационная зависимость поверхностной свободной энергии. Если плоская поверхность имеет большую удельную поверхностную энергию, то она спонтанно трансформируется в структуру "холмов и канавок" [21]. Это уменьшает полную свободную энергию поверхности, несмотря на увеличение ее площади.

Теория спонтанного образования периодически фасетированных поверхностей была построена в работах Андреева [22] и Марченко [23]. Позднее этот подход был распространен на фасетированные поверхности в гетероэпитаксиальных напряженных системах и является одной из отправных точек для рассмотрения массивов трехмерных напряженных островков.

Согласно [23], полная энергия периодически фасетированной поверхности с периодом *D,* определенная на единицу площади первоначально плоской поверхности, равна

где *E*facets = const (*D*) - поверхностная свободная энергия наклонных граней, *E*edges= *C*1*D*-1 *-* короткодействующая составляющая энергии ребер, Δ*E*elastic = - *C2D-1* ln(*D)/a*) - энергия упругой релаксации. Поскольку деформации создаются линейными источниками (ребрами), Δ*E*elastic зависит логарифмически от *D,* и полная энергия (3) всегда имеет минимум при некотором оптимальном периоде *D*opt.

**1.2.1.3.1. Гетероэпитаксиалыные структуры на периодически фасетированных подложках**

Периодически фасетированные поверхности дают возможность для прямого получения упорядоченных массивов квантовых проволок в том случае, когда рост материала 2, осаждаемого на поверхность материала 1, происходит в "канавках" (рис.2). Для изучения этой возможности было выполнено оригинальное теоретическое исследование возможных структур гетероэпитаксиальной системы, образующейся при осаждении материала 2 на фасетированную поверхность материала 1[24]. Рассматривалась ситуация, для которой, во-первых, два материала почти согласованы по постоянной решетки (примером является система GaAs/AlAs), и, во-вторых, как поверхность материала 1, так и поверхность материала 2 неустойчивы относительно фасетирования. При температурах значительно ниже температуры плавления такая неустойчивость должна иметь место для вицинальных и высокоиндексных поверхностей.

Согласно [24], полная энергия гетерофазной системы равна

В это выражение, помимо трех вкладов, имеющихся в энергии фасетированной поверхности одного материала, входит энергия границы раздела. Сравнение энергий для нескольких различных типов гетероэпитаксиальных структур, дает следующее заключение.

Выбор между двумя возможными режимами роста определяется тем, смачивает ли осаждаемый материал 2 фасетированную подложку 1 или не смачивает. В случае смачивания возникает однородное покрытие периодически фасетированной подложки (рис. 2*,а*)*.* Примером служит AlAs, осажденный на периодически фасетированную вицинальную поверхность GaAs(001), разориентированную на 3° в направлении [110] [25].

Если осаждаемый материал не смачивает подложку, то изолированные кластеры осаждаемого материала образуются в "канавках" периодически фасетированной поверхности (рис. 2, b)*.* Такая ситуация реализуется при осаждении GaAs на вицинальную поверхность AlAs(00l), разориентированную на 3° в направлении [110] [25,26], а также при осаждении GaAs/AlAs(311) и AlAs/GaAs(311). Экспериментальные работы на системе GaAs/AlAs(311) [27,28] показали возможность прямого получения изолированных кластеров GaAs на AlAs и последующего образования квантовых проволок при заращивании структуры.

В случае неоднородного кластерного покрытия периодическое фасетирование поверхности восстанавливается после осаждения нескольких монослоев. Тогда "холмы" на поверхности осаждаемого материала образуются над "канавками" подложки и наоборот, и возникает непрерывный слой с модуляцией толщины (рис. 2*, d*)*.* Таким образом, формирование кластеров при гетероэпитаксиальном росте дает возможность прямого получения изолированных квантовых проволок, сверхрешеток квантовых проволок, квантовых ям с модулированной толщиной. Так, периодическая модуляция толщины квантовой ямы наблюдалась методом просвечивающей электронной микроскопии для ямы GaAs в матрице AlAs при средней ориентации границы (775) [29], период модуляции составлял 12нм, а амплитуда модуляции - 1,2нм.

В гетероэпитаксиальной рассогласованной системе для случая, когда поверхность материала пленки неустойчива относительно фасетирования, имеются два источника деформаций: во-первых, рассогласование по постоянной решетки между пленкой и подложкой, и, во – вторых, скачок тензора поверхностных натяжений на ребрах [30,31]. Найдена зависимость периода фасетирования от величины рассогласования. Было показано, что при увеличении величины рассогласования сначала период фасетирования растет, а затем исчезает возможность равновесного фасетирования.

**1.2.1.4. Упорядоченные массивы трехмерных когерентно напряженных островков**

В гетероэпитаксиальном росте обычно принято различать три режима:

Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merwe) — реализуется послойный (двумерный рост) материала *В* на подложке *А;*

Фолмера-Вебера (Volmer-Weber) — имеет место островковый (трехмерный) рост *В* на открытой поверхности подложки *А;*

Странского-Крастанова (Stranski-Krastanow) — первоначально реализуется послойный рост *В и А с* последующим образованием трехмерных островков *В* на покрытой подложке.

В гетероэпитаксиальных системах, согласованных по постоянной решетки, режим роста определяется только соотношением энергий двух поверхностей и энергии границы раздела. Если сумма поверхностной энергии эпитаксиального слоя γ2 и энергии границы раздела γ12 меньше, чем энергия поверхности подложки γ2 + γ12 <γ1 т. е. если осаждаемый материал 2 смачивает подложку, то возникает режим роста Франка-ван дер Мерве.

Изменение величины γ2 + γ12 может приводить к переходу от режима Франка-ван дер Мерве к режиму Фолмера-Вебера.

В гетероэпитаксиальной системе при наличии рассогласования по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой первоначальный рост может происходить послойно. Однако более толстый слой имеет большую упругую энергию, и возникает тенденция уменьшить упругую энергию путем образования изолированных островков. В этих островках происходит релаксация упругих напряжений и соответственное уменьшение упругой энергии. Так возникает режим роста Странского-Крастанова.

Эксперименты на InAs /GaAs (001) [32] и на Ge/Si(001) [33,34] действительно продемонстрировали возможность образования трехмерных когерентно напряженных, т. е. бездислокационных островков. В теоретических работах [35,36] было показано, что формирование трехмерных когерентно напряженных островков приводит к уменьшению упругой энергии и при не очень большом объеме островка (до ≈ 106 атомов) более выгодно, чем возникновение островка с дислокациями.

Традиционно считалось, что в системе трехмерных островков неизбежно должна происходить коалесценция, когда большие островки растут за счет диффузионного перераспределения материала, приводящего к уменьшению и исчезновению маленьких островков [37], и в конечном итоге образуются островки такого объема, в которых энергетически выгодно формирование дислокаций несоответствия. Такое сосуществование когерентных островков и островков с дислокациями наблюдалось в работе [38].

Однако последующие экспериментальные исследования массивов когерентно напряженных островков в системах InGaAs/ GaAs (001) и InAs /GaAs (001) неожиданно показали, что возможно узкое распределение островков по размерам [39,40]. В работах [41-47], помимо узкого распределения островков по размерам, была обнаружена корреляция в расположении островков, характерная для квадратной решетки. Было показано, что при прерывании роста размеры островков и их взаимное расположение достигают предельного значения и далее не изменяются со временем.

В обоснование такого результата в ряде работ было показано, что упругие деформации в эпитаксиальных пленках и возникающих *3D* островках могут являться ключевым и многозначным фактором, в большинстве случаев кардинально изменяющим картину классических механизмов фазообразования [48]. Так, в случае роста Gе-нa-Si и InAs-нa-GaAs именно наличие этих деформаций приводит к переходу от послойного роста к образованию *3D* кластеров на поверхности подстилающего слоя германия (или InAs), т.е. реализации механизма Странского-Крастанова. Существенная неоднородность упругой релаксации островка по его высоте приводит к зависимости энергетического выигрыша от формы островка. Появляются несколько дискретных энергетически наиболее выгодных форм *("hut", "dome",' "superdome").* Упругие искажения в прилегающей области подложки по периферии кластера возрастают с увеличением размеров последнего, что изменяет закономерности присоединения адатомов к кластеру, уменьшая его скорость роста [49-51]. Считается, что появление и увеличение связанного с этим барьера — одна из главных причин, сужающих распределение островков по размерам по сравнению с предсказаниями теории оствальдовского созревания (OC) (см., например, [50]). При некоторых условиях роль упругих деформаций и их релаксации в островках становится доминирующей вплоть до установления квазиравновесного состояния, при котором ансамбль островков неизменен во времени как по форме, так и по их распределению по размерам и, соответственно, не описывается закономерностями модели ОС [52 – 58].

 **1.2.1.4. 1. Равновесное состояние в системе когерентно напряженных трехмерных островков.**

В связи с экспериментальными данными [41-47] в работах [59-64] проведено теоретическое исследование равновесия в системе трехмерных когерентно напряженных островков. Рассматривалась гетерофазная система, состоящая из *Q* монослоев материала 2, осажденного на подложку материала 1, в условиях прерывания роста, когда общее количество материала 2 фиксировано. Если толщина *Q* превышает критическую толщину смачивающего слоя *Qc,* то избыточное количество материала *(Q — Qc)* монослоев формирует островки. Для исследования принципиальной возможности образования упорядоченного массива островков предполагалось, что все островки имеют одинаковую форму и размеры и образуют периодичес-кую сверхрешетку на плоскости. Рассчитывалось как изменение полной энер-гии системы при переходе части материала из плоского напряженного слоя в островки в расчете на единицу площади поверхности, так и изменение энергии системы за счет образования одного островка. При этом для системы напря-женных островков учитывались две особенности, отличающих ее от остальных классов наноструктур. Во-первых, в системе островков имеются два источника полей упругих напряжений: с одной стороны, рассогласование по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой, и, с другой стороны, скачок тензора поверхностных натяжений на ребрах островков. Соответ-ственно, упругая энергия равна сумме энергии объемной упругой релаксации, энергии упругой релаксации на ребрах и энергии взаимодействия двух упругих полей. Во-вторых, существенной является зависимость поверхностной энергии от деформации, обусловленная капиллярными эффектами.

Для разреженного массива островков, когда среднее расстояние между островками велико по сравнению с размером островка *L,* время миграции атомов по поверхности одного островка значительно меньше, чем время миграции между островками. Поэтому равновесная форма одного островка устанавливается быстрее, чем равновесная структура всего массива островков, и для любого объема островка существует равновесная форма. Эта форма определяется минимумом энергии при условии фиксированного объема островка. При температурах, далеких от температур плавления, равновесная форма содержит только грани с малой поверхностной энергией, как правило, это грани с низкими индексами Миллера. Для анализа возможности образования равновесного массива трехмерных напряженных островков достаточно считать, что равновесная форма островка не зависит от его объема и совпадает с экспериментально наблюдаемой формой островка — пирамидой с квадратным основанием.

Равновесное состояние в системе островков достигается за счет обмена веществом между островками путем миграции по поверхности смачивающего слоя. Для разреженной системы островков упругим взаимодействием между островками можно пренебречь. В этом случае зависимость энергии разреженного массива островков на единицу площади поверхности от размера островка имеет вид представленный на рис. 3 [59]*.*

Анализ этой зависимости для различных значений *а* позволяет установить, имеется ли в системе островков термодинамическая тенденция к коалесценции. Если α *>* 1, то минимум энергии *E'(L)* соответствует островкам, размер которых стремится к бесконечности. Физически это означает, что при образовании одного островка изменение поверхностной энергии системы положительное и большое. Поэтому энергетически выгодным оказывается объединить все островки в один, т. е. в системе имеется тенденция к коалесценции. Если *а ≤* 1, то минимум энергии *E'(L)* достигается при некотором оптимальном размере островков. В этом случае при образовании одного островка изменение поверхностной энергии системы либо положительное и малое, либо вообще отрицательное. Тогда объединение всех островков в один не является энергетически выгодным, и в системе отсутствует тенденция к коалесценции.

Для плотного массива островков, когда расстояние между островками оказывается сравнимо с размером одного островка, существенным становится их упругое взаимодействие, обусловленное проникновением в подложку неоднородного поля напряжений, создаваемого островками. Главным взаимодействием на больших расстояниях является диполь-дипольное взаимодействие, *U ≈ F(ϕ)/r3,* где *F(ϕ)* — зависящий от азимутального угла в плоскости множитель, определяемый упругой анизотропией подложки. В отличие от объемного кристалла, в котором взаимодействие упругих включений является знакопеременным в зависимости от направления между включениями [65], взаимодействие между островками на поверхности является отталкиванием при любом направлении между островками, что обеспечивает устойчивость массива островков.

Исследование влияния взаимодействия между островками на возможность существования оптимального размера островка, проведенное в работе [59], показало, что при *а ≤* 0 минимум энергии, соответствующий конечному размеру островка для разреженного массива, сохраняется и для плотного массива, и тенденция к коалесценции не возникает. Таким образом, теоретическое рассмотрение подтвердило возможность существования равновесного массива упорядоченных островков, имеющих оптимальный размер, соответствующий минимуму свободной энергии системы.

Эти результаты свидетельствуют о существовании нового класса спонтанно упорядоченных наноструктур - упорядоченных массивов трехмерных когерентно напряженных островков на поверхности. Морфологическая неустойчивость поверхности напряженного слоя и крайнее ее проявление – образование 3*D* когерентных островков – развиваются, если выигрыш в свободной энергии системы за счет упругой релаксации напряжений в островках превышает добавку поверхностной энергии за счет увеличения площади поверхности и возникновения фасеточных граней с большой поверхностной энергией. Поэтому морфология поверхности, на которой формируются 3*D* островки, играет существенную роль и может использоваться как управляющий фактор, способствующий упорядочению островков как по размерам, так и по их пространственному распределению.

**1.2.1.4.2. Эффекты упорядочения**

Процесс упорядочения вызывает появление в системе островков предпочтительных значений их характеристик: размеров, формы, расстояний между островками и их взаимного расположения. Это является результатом минимизации суммарной свободной энергии системы. Распределению островков Ge по размерам в литературе уделяется большое внимание, так как этот параметр системы квантовых точек чрезвычайно важен для практических применений. Среди возможных путей улучшения однородности размеров островков, кроме реализации энергетически наиболее выгодных их форм сужающих распределение по размерам (см. п.4), можно выделить следующие: а — использование отклоненных подложек; б — специального метода организации одновременного синхронного зарождения кластеров [66]. Обоснование этих путей могут служить следующие известные факты и рассуждения. В работе Goldfarb et al. [67] демонстрируются подробности перехода от *2D* к 3D росту и начальные стадии образования hut-кластеров. *3D* островки появляются в заметно разное время и зарождаются они на несовершенствах *2D* слоя Ge, что экспериментально подтверждает устоявшееся мнение о гетерогенном зарождении кластеров. Следовательно, предварительное создание мест, предпочтительных для зарождения кластеров, может явиться полезным приемом для улучшения упорядочения последних. Предварительное упорядочение ступеней на плоскостях, разориентированных от (001), широко используется при создании массивов квантовых точек в системе InAs-GaAs (см., например, одну из последних работ Kim et al. [68] и ссылки в ней). При выращивания островков Ge-на-Si такой подход менее распространен, однако в работе [69] для улучшения упорядочения ступеней на *2D* стадии роста авторы использовали не только упорядочение ступеней, связанное с отклонением подложки от сингулярного направления, но и улучшили его путем предварительного наращивания многослойной напряженной сверхрешетки GeSi-Si. В результате сообщается о получении островков Ge с однородностью их распределения как по высоте, так и по площади лучше 10% с одновременным существенным пространственным упорядочением *.*

 По данным Johansson, Seifert [70], ширина распределения островков по размерам (InAs/InP) немонотонно зависит от скорости роста. Распределение становится уже с увеличением скорости, достигая минимума. Затем, при дальнейшем увеличении скорости роста, его ширина начинает вновь возрастать. Такое поведение подтверждает важность одномоментного гетерогенного зарождения. С увеличением скорости роста повышается вероятность зарождения островков в самом начале процесса и вследствие этого островки растут в течение равного времени и имеют близкие размеры. Дальнейшее увеличение скорости роста приводит к тому, что пересыщение адатомов на поверхности становится настолько большим, что новые островки зарождаются непрерывно. Вследствие этого момент зарождения вновь "размазывается" во времени, и распределение островков по размерам становится шире.

Возможно обеспечить почти одномоментное зарождение островков на всей поверхности подложки, создав в первый момент роста значительное пересыщение адатомов германия. Этого можно добиться, например, кратковременным увеличением плотности молекулярного пучка или кратковременным снижением температуры подложки. Эффект синхронизации зародышеобразования при воздействии периодических кратковременных изменений поверхностного пересыщения на двумерное зародышеобразование был обнаружен при гомоэпитаксии кремния и германия [66]. Позже был предложен и теоретически обоснован оптимизированный метод синтеза таких квантово-размерных структур, как вертикальные сверхрешетки, наносистемы из квантовых нитей или точек и т.п. при циклическом изменении пересыщения во время выращивания каждого атомного слоя пленки [71].

Упорядочение по площади — наиболее слабая форма упорядочения, что связано со слабостью взаимодействия островков на начальном этапе их формирования. Поэтому предварительное создание упорядоченных мест для зарождения нанокластеров является основным путем для получения их последующего пространственно-упорядоченного состояния [48]. Пространст-венное упорядочение островков возрастает с увеличением покрытия (отноше-ния суммарной площади островков к площади подложки), что обусловлено минимизацией отталкивающих сил упругого взаимодействия между сосед-ними островками [72, 76]. Поэтому наиболее пространственно упорядоченные массивы островков занимают большую часть площади подложки.

В работе [77] было показано, что последовательное наращивание слоев с островками Ge, которые заращиваются материалом, согласованным с подлож-кой (Si), приводит к улучшению упорядочения островков, как по их размерам, так и по площади. Возмущения полей упругой деформации от кластера проникают на разные расстояния в заращивающий слой в зависимости от объема конкретного островка и от их скопления. На поверхности заращиваю-щего слоя создаются места преимущественного зарождения новых островков на следующем "этаже". Регулируя толщину заращивающего слоя, можно отфиль-тровывать влияние слабых островков. Такие исследования были проведены как теоретически, так и экспериментально и можно привести несколько идентич-ных примеров для системы III—V [16] и Ge-Si [73,77]. Такие многослойные гетерострукутры с квантовыми точками имеют прикладное значение в связи с открывающимися новыми возможностями (например, электронная связь кластеров по вертикали, формирование трехмерных решеток, состоящих из островков-кластеров, часто называемых "искусственными атомами" [74,75]).

**1.2.1.4.3. Размеры и плотность островков: возможности управления**

Практический интерес исследователей концентрируется на системах с размером наноостровков около 10 нм и менее (чистый Ge-на-Si), что в первую очередь связано с их оптическими свойствами. Плотность островков имеет также важное значение, поскольку отклик системы на внешнее воздействие напрямую связан с числом островков, а значит, и с их плотностью. Оба этих параметра (размер и плотность) зависят от таких условий выращивания, как температура подложки и скорость роста. Понижение температуры роста, так же как и увеличение потока Ge, ведет к уменьшению диффузионной длины адатомов Ge на подложке. Соответственно область сбора адатомов для одного островка уменьшается, уменьшаются и его размеры, а плотность возрастает. Abstreiter et al. [78], понизив температуру роста до 550◦C и увеличивая поток Ge, закономерно варьировали плотность островков вплоть до 1010 см−2. Дальнейшее понижение температуры роста до 300◦ C позволило существенно повысить плотность нанокластеров Ge до ~ 3 ∙ 1011 см−2 [79]. Peng et al. [80], используя сурьму как сурфактант, понижающий поверхностную диффузионную длину адатомов Ge, достигли рекордно высокой на сегодняшний день величины плотности островков ~5 ∙ 1011 см−2.

Таким образом, управление параметрами процесса спонтанного упорядочения наноструктур на поверхности может быть осуществлено следующими путями:

- использование подложек, отклоненных от поверхности (001), и связанные с этим различные способы упорядочения ступеней, являющихся в дальнейшем шаблонами для зарождения островков [69,81-87];

- использование сурфактантов, модифицирующих поверхностные характеристики (поверхностная энергия, длина диффузии адатомов) как подложки, так и эпитаксиального слоя [80,88-91];

- создание на поверхности подложки микрострессоров, инициирующих зарождение островков в определенных местах [92-94];

- литография: создание окон на подложке, ограничивающих область сбора адатомов в островок и отделяющих островки друг от друга [95,96]. Формирование с помощью фотолитографии фасеточных граней, локализующих места зарождения островков [97,98].

Каждое из этих направлений получило свое развитие, но исследования находятся в стадии активного поиска [48].

**1.2.1.5. Формирование массивов вертикально связанных квантовых точек**

Заращенные островки (квантовые точки) материала 2 в матрице материала 1 представляют собой когерентные упругие включения, создающие дальнодействующие поля упругих напряжений во всей заращенной гетерофазной системе. При повторном осаждении материала 2 на заращенную гетероструктуру возникает принципиально новый режим роста: рост в поле упругих напряжений, со­зданных заращенными точками первого слоя. Поскольку в полупроводниках A3B5 при характерных температурах для МПЭ коэффициенты объемной диффузии атомов основных компонентов на несколько порядков меньше коэффициентов поверхностной диффузии, диффузией в объеме можно пренебречь. Поэтому распределение компонентов гетерофазной системы в объеме заращенной гетероструктуры "заморожено". Это распределение создает статическое поле упругих напряжений, определяющее кинетику поверхностной миграции. Поверхностная миграция состоит из диффузии и дрейфа в поле упругих напряжений.

Подобная кинетика роста в открытой системе исследовалась теоретически в работах [99,100] для эпитаксиального роста твердого раствора. Были установлены критерии усиления флуктуаций состава твердого раствора с толщиной эпитаксиальной пленки, что является начальной стадией процесса самоорганизации структур с периодической модуляцией состава твердого раствора. Было показано, что усиление флуктуаций состава в процессе роста в открытой системе возникает в более широком интервале температур, чем спинодальный распад в условиях равновесия в замкнутой системе.

Если в процессе осаждения материала 2 на структуру с заращенными точками ввести прерывание роста, то осажденный материал будет стремиться прийти к частичному равновесию, т. е. к равновесной поверхностной морфологии при "замороженном" распределении материала в объеме гетерофазной структуры.

Ранее было известно [32], что в многослойной системе точек InAs в матрице GaAs точки располагаются коррелированно друг над другом. Однако в этих работах рас- стояние между слоями точек заметно превышало размер самих точек. В таком случае корреляция в расположении точек не изменяет их электронной структуры.

Чтобы получить возможность управления и оптимизации электронной структуры квантовых точек с целью их применения в оптоэлектронике, была разработана технология получения массивов электронно-связанных квантовых точек [6,102 - 105]. С этой целью с использованием метода МПЭ применялось поочередное осаждение InAs и GaAs, причем количество осаждаемого GaAs выбиралось таким образом, чтобы InAs-пирамида была заращена только частично. Тогда в следующем цикле осаждения точки InAs, вырастающие над точками первого слоя, оказывались электронно связанными с точками первого слоя [6].

Аналогичные результаты при росте вертикально связанных точек методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений были получены в работе [106].

**1.2.2. Полупроводниковые сверхрешеточные структуры**

Термин «сверхрешетка» обычно используют для периодических структур, состоящих из тонких слоев двух полупроводников, повторяющихся в одном направлении. Период по толщине обычно составляет от нескольких до десятков нанометров, что меньше длины свободного пробега электронов, но больше постоянной кристаллической решетки. Такой периодический потенциал сверхрешетки существенно изменяет зонную структуру исходных полупроводников, создавая минизоны в пространстве волнового вектора и энергетические подзоны. В этом отношении сверхрешетку можно рассматривать как новый синтезированный полупроводник, не существующий в природе, который обнаруживает необычные электронные и оптические свойства.

В основном можно различать два типа таких «искусственных» сверхрешеток. Это композиционные сверхрешетки, или сверхрешетки с гетероструктурами, состоящие из периодической последовательности двух полупроводников разного химического состава, и легированные сверхрешетки, представляющие собой последовательность слоев *п-* и *р*-типа с возможными безпримесными слоями между ними, выращенных в гомогенном массивном полупроводнике.

Потенциал сверхрешетки создается в композиционных сверхрешетках за счет периодического изменения ширины энергетической запрещенной зоны в направлении роста кристалла; в *nipi-*кристаллах он обусловлен электростатическим потенциалом ионизованных примесей, который может быть частично компенсирован подвижными электронами и дырками, находящимися в слоях *п-* и р-типа соответственно.

Кроме явлений, характерных для композиционных сверхрешеток, в *nipi* -кристаллах можно ожидать присутствия ряда, других особенностей, связанных с электростатической природой потенциала сверхрешетки. Низшая электронная и высшая дырочная подзоны отделены друг от друга (непрямой полупроводник в реальном пространстве). В зависимости от конструкции кристалла электронно-дырочная рекомбинация может быть подавлена почти полностью. Как следствие этого эффективная ширина запрещенной зоны и концентрация электронов и дырок могут изменяться в таких сверхрешетках в широких пределах за счет либо оптического возбуждения, либо введения в кристалл носителей.

В настоящее время полупроводниковые сверхрешетки представляют собой одну из наиболее быстро развивающихся областей физики твердого тела. Они являются объектами особого интереса для физиков. Композиционные сверхрешетки и особенно легированные сверхрешетки с их широкими возможностями перестройки представляют собой важный новый класс полупроводников, оказывающий большое влияние не только на физику твердого тела, но также на современную технологию электронных приборов

Первая искусственная полупроводниковая сверхрешетка была выращена с помощью **молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)** — метода тонкопленочной технологии, получившего развитие в конце 60-х годов [107]. В этом методе кристалл выращивают в сверхвысоком вакууме с помощью атомарных или молекулярных пучков требуемых компонент, направляемых из высокотемпературных эффузионных ячеек на нагреваемую монокристаллическую пластину — подложку. Пучки осаждают вещество со скоростью приблизительно один атомный слой в секунду. Рост кристаллических слоев в этом процессе происходит за счет химических реакций веществ пучка с поверхностью подложки.

Испробовав несколько различных материалов и технологий, Чанг, Есаки и др. [108] достигли успеха в выращивании с помощью МЛЭ композиционной сверхрешетки в системе **GaAs—AlxGa1-xAs**. Это не было случайностью. Во-первых, А1, имеющий такую же валентность и ионный радиус, что и Ga, будучи введен в решетку GaAs, не вызывает заметных искажений кристаллической структуры, создавая одновременно достаточную амплитуду сверхрешеточного потенциала в зоне проводимости, что удобно для изучения динамики электронов. Во-вторых, для указанных полупроводников была отработана технология МЛЭ, которая в то время являлась единственной технологией, позволяющей удовлетворить жестким требованиям, необходимым для создания сверхрешетки.

Первоначальные структуры состояли из нескольких сотен нелегированных слоев **GaAs и AlxGa1-xAs (0,15 <x<0,35)** с периодами, имеющими в различных образцах значения от 5 до 20 нм. Первые эксперименты на сверхрешетках GaAs— AlxGa1-xAs проводились для изучения особенностей переноса носителей [109] и для демонстрации квантовых свойств электронов в прямоугольных ямах, образованных краями зон в этих сверхрешетках [110].

С тех пор достигнут значительный прогресс в таких вопросах, как доказательство двумерного характера подзон в опытах по резонансному комбинационному рассеянию [111] и осцилляциям Шубникова — де Гааза [112], создание сверхрешеток со сверхтонкими слоями [113] и использованию сверхрешеточных эмиттеров в инжекционных лазерах [114].

В дальнейшем использование модулированного легирования в сверхрешет-ках GaAs-AlxGa1-xAs [115] обогатило установившуюся было картину прямо-угольных ям и расширило круг изучаемых физических явлений, включив в него новые фундаментальные эффекты, такие как квантовый эффект Холла [116], состояние с близким к нулю сопротивлением [117] и локализация электронов двумерного электронного газа (2-МЭГ) в сильных магнитных полях [118].

Обнаружение уникального взаимного расположения краев зон на гетерогранице **InAs — GaSb** [119] привело к открытию нового типа композиционных сверхрешеток [120], примером которых является комбинация материалов **GaxIn1-xAs и GaAsySb1-y** [121]. В этой системе край валентной зоны GaSb лежит выше по энергии, чем край зоны проводимости InAs, — ситуация, весьма необычная для бинарных соединений с близкими постоянными решетки. Изменяя независимо состав **тройных соединений GaxIn1-xAs и GaAsySb1-y*,***можно менять указанное взаимное расположение зон, создавая или ликвидируя их перекрытие. Одновременно возможно обеспечить точное согласие постоянных решетки. Эти особенности привели к появлению сверхрешеток с новыми свойствами, недостижимыми в системе GaAs—AlxGa1-xAs. Поскольку состояния зоны проводимости в слоях GaxIn1-xAs сосуществуют с состояниями валентной зоны в соседних слоях GaAsySb1-y*,* возможен переход электронов из вторых слоев в первые при достаточно малой их толщине. Это приводит к переходу полупроводник — полуметалл в сверхрешетках [122, 123] и к возможности обратного перехода при наложении магнитного поля [124].

После большой предварительной работы по повышению до атомного уровня точности контроля за распределением примесей при МЛЭ вдоль оси роста стало возможным создание первых легированных сверхрешеток [125]. Исходные образцы таких новых искусственных полупроводниковых структур состояли из тонких (5 нм < *d* <300 нм) слоев GaAs, легированных Si (n) и Be(p), в некоторых случаях разделенных тонкими прослойками с собственной проводимостью (i-GaAs). Многие особенности электронных свойств легированных сверхрешеток GaAs, предсказанные в работе [126], были продемонстрированы в детальных экспериментах [127].

На основе полумагнитных полупроводников [128] был предложен принципиально новый тип сверхрешеток — так называемые «спиновые сверхрешетки» [129]. В них эффективный сверхрешеточный потенциал приблизительно прямоугольной формы может меняться от нуля до некоторого предельного значения, зависящего от внешнего магнитного поля, температуры и уровня «спинового легирования» материала.

Спиновое легирование легко осуществляется путем замены малой доли компонент кристалла на парамагнитные ионы. Поэтому для создания спиновой сверхрешетки надо периодически легировать исходный кристалл парамагнитными ионами так, чтобы изменять лишь эффективный g-фактор электронов проводимости. Было предложено создать подобные **спиновые сверхрешетки в системе Hg0,99Mn0,01Se—Hg0,976Cd0,024Se.** Роль парамагнитного элемента («спиновой примеси») здесь играет Mn, а концентрация немагнитной добавки Cd выбрана так, чтобы вещества имели одинаковую ширину запрещенной зоны.

Первые спиновые сверхрешетки, называемые также сверхрешетками из разбавленных магнитных полупроводников [130], были выращены в системе **Cd1-xMnxTe—Cd1-yMnyTe** [131, 132]. Они обнаружили даже больше интерес-ных свойств, чем ожидалось на основании теоретических предсказаний [129].

Добавление к двум полупроводникам, составляющим сверхрешетку, третьего, например включение в систему **InAs—GaSb слоев AlSb**, создает новую степень свободы по сравнению с обсуждавшимися выше сверхрешетками [133]. Подобные трехкомпонентные системы, называемые также политипными сверхрешетками, обладают рядом характеристик, недостижимых в двухкомпонентных системах. Очевидно поэтому, такие системы существенно расширяют перспективы применения искусственных сверхрешеток.

Существующее разнообразие полупроводниковых сверхрешеток требует классификации. Такая классификация должна подчеркивать характерные черты конкретных сверхрешеток и помогать в выборе материалов для создания желаемых сверхрешеточных структур.

**1.2.2. 1. Композиционные сверхрешетки**

Расположение в энергетическом пространстве краев зон различных полупроводников обычно сравнивают, используя в качестве единого начала отсчета уровень вакуума [134]. Подобное сопоставление можно проводить, характеризуя каждый из рассматриваемых полупроводников величиной электронного сродства *θ.*

Электронное сродство определяет энергию, требуемую для переноса электрона со дна зоны проводимости полупроводника на уровень вакуума. Поэтому в полупроводнике с большим значением *θ* край зоны проводимости лежит ниже по энергии, чем в полупроводнике с меньшим *θ.* Отсчитывая энергию от уровня вакуума, можно разделить композиционные сверхрешетки на три различных типа (рис. 4).

В сверхрешетке типа I (рис. 4, a) разрывы в зоне проводимости *∆Ес* и в валентной зоне *∆EV* имеют противоположные знаки, и запрещенные зоны *Egi* полностью перекрываются. Подобные сверхрешетки иногда называют «контравариантными» композиционными сверхрешетками [135].

В сверхрешетке типа II (рис. 4, *б*)модуляция краев зоны проводимости и валентной зоны имеет один и тот же знак, и запрещенные зоны перекрываются лишь частично, либо не перекрываются вообще («ковариантная» сверхрешетка [135]).

Рис. 4. Расположение краев зоны проводимости и валентной зоны относительно вакуумного уровня (штриховая линия) в отдельных неконтактирующих веществах (слева) и в композиционных сверхрешетках различных типов (справа): в—сверхрешетка типа I; б—сверхрешетка типа II; в—политипная сверхрешетка. По оси абсцисс отложена пространственная координата, по оси ординат—энергия.

Наконец, политипная сверхрешетка (рис. 4, *в)* представляет собой трехкомпонентную систему, где слои, образующие сверхрешетку типа II, дополняются широкозонным полупроводником, создающим потенциальные барьеры как для электронов, так и для дырок.

**1.2.2. 1.1. Композиционные сверхрешетки типа I**

Первая композиционная сверхрешетка такого типа была выращена в системе GaAs—AlxGa1-xAs. На рис. 5 показаны последовательность слоев в такой сверхрешетке и ее энергетический профиль в реальном пространстве. Разрывы зон на гетерограницах служат потенциальными барьерами для электронов и дырок и тем самым создают периодический сверхрешеточный

 *Энергия, Е*

Рис. 5. Схема расположения последовательности слоев (слева) и зонная диаграмма в зависимости от координат (справа) для сверхрешетки GaAs—AlxGa1-xAs. Стрелка на левом рисунке показывает направление роста слоев; 1—дырочные подзоны в валентной зоне; *2*—электронные подзоны в зоне проводимости.

потенциал в зоне проводимости и в валентной зоне. Характерной чертой такой сверхрешетки является то, что узкозонный слой, зажатый между двумя широкозонными полупроводниками, образует две прямоугольные квантовые ямы — одну для электронов и одну для дырок. Глубины этих потенциальных ям зависят от того, какая часть разности ширин запрещенной зоны *∆Eg = EgAiGaAs - EgGaAs* приходится на разрыв в зоне проводимости *∆Ес,* а какая - на разрыв в валентной зоне *∆Еу.*

Результаты первых экспериментальных исследований различных эффектов в прямоугольных квантовых, ямах GaAs [110] согласуются со значениями *∆Ес* = (0,85 ± 0,03)·*∆Еg* и *∆EV =* (0,15 ± 0,03)·*∆Еg*. Но исследования параболических квантовых ям, выращенных в системе GaAs— GaAs—AlxGa1-xAs [136], привели к выводу о том, что разрыв *∆Eg* делится почти поровну между зоной проводимости и валентной зоной. Объяснение этого противоречия дано в работе [137], где показано, что экспериментальные данные как для прямоугольных, так и для параболических квантовых ям на основе GaAs можно согласовать, если положить, что разрыв в зоне проводимости *∆Ес* равен 0,57 *∆Eg (∆Еу* = 0,43 *∆Eg),* а носители в квантовых ямах характеризуются эффективными массами

 *m\*e* = 0,0665 *m0* для электронов,

*mh\*h* = 0,34 *m0* для тяжелых дырок и

 *mI\*h* = 0,094 *т0* для легких дырок.

Указанные значения разрывов зон были позднее подтверждены независимыми экспериментальными данными по явлениям переноса [138]. Согласно другим экспериментальным результатам [139—144], наиболее правдоподобные значения разрывов зон в гетеропереходе GaAs—AlxGa1-xAs составляют *∆Ес = 0,6∆Eg* и *∆EV*=0,4*∆Eg* независимо от молярной доли А1 в тройном соединении.

Другой класс сверхрешеток типа I составляют так называемые **сверхрешетки с напряженными слоями (CHC)** [145—147]. Это высококачественные сверхрешетки из материалов с несовпадающими постоянными решетки. Слои в этих структурах делаются такими тонкими, чтобы согласование решеток обеспечивалось исключительно за счет напряжений в слоях без образования дефектов несоответствия.

Свойствами СНС можно управлять путем должного выбора материалов и геометрических параметров. При величине рассогласования решеток в несколько процентов для слоев с толщинами порядка 10 нм может быть достигнуто высокое качество эпитаксии [148—150]. При этом вся сверхрешетка характеризуется постоянным параметром решетки в направлении, параллельном границам. Рассогласование между сверхрешеткой в целом и подложкой также может компенсироваться упругими напряжениями до тех пор, пока толщина сверхрешетки не превышает некоторого критического значения [149].

К настоящему времени для выращивания СНС использовались пять полупроводниковых систем: **GaAs—InxGa1-xAs** [149, 151**], GaAs—GaAsxP1-x** [145, 152]**, GaP—GaAsxP1-x** [153]**, ZnS—ZnSe** [154] и **GaSb—AlSb** [155]. Следует отметить, однако, что возможно создание и новых СНС из весьма широкого класса материалов с несогласующимися решетками.

Среди сверхрешеток типа I существуют также сверхрешетки вида полуметалл — полупроводник, обладающие интересными свойствами. Типичным их представителем является сверхрешетка **HgTe—CdTe**.

Такая сверхрешетка представляет собой предельный случай многослойной гетероструктуры **Hg1-xCdxTe—CdTe** при *х = 0* [156]. Например, она может состоять из отдельных чередующихся слоев HgTe (полуметалл с отрицательной запрещенной зоной) толщиной 18 нм и CdTe (широкозонный полупроводник с *Eg=1,49* эВ при 300 К) толщиной 4 нм. Согласно «правилу общего аниона» [157], которое утверждает, что потенциалы ионизации полупроводниковых соединений определяются исключительно анионной компонентой, разрывы в валентной зоне сверхрешетки HgTe—CdTe близки к нулю. Поэтому в данной сверхрешетке вся разность запрещенных зон *∆Eg,* равная ширине запрещенной зоны CdTe, сосредоточена в зоне проводимости. Это приводит к достаточно редкому соотношению для разрыва в зоне проводимости: *∆Ес = ∆Eg = EgCdTe.*

Семейство сверхрешеток типа I завершают **сверхрешетки на основе кремния.** Рамки кремниевой технологии (исключающей полупроводниковые соединения типов AIIIBV, AIIBVI и AIVBVI) сильно ограничивают число возможных структур.

Что касается обычных слоистых структур, то здесь примером кремниевой сверхрешетки является система **Si—Si1-xGex** [158]. Помимо этой кристаллической системы кремниевая технология предлагает и некоторые другие новые возможности. Одна из них — это **аморфные сверхрешетки из гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si:H) и гидрогенизирован-ного аморфного германия (a-Ge:H) (либо нитрида кремния (a-SiNx:H) или карбида кремния (a- Si1-xCx:H),** которые не являются ни решеточно-согласованными, ни эпитаксиальными, хотя имеют гетерограницы в основном бездефектные и почти атомно-гладкие [159, 160]. Вторая возможность — это МОП-структуры (металл — оксид — кремний) с сеточным электродом, представляющим совокупность тонких параллельных металлических нитей, однородно нанесенных на поверхность оксида [158, 161]. Предполагается, что в этой системе дополнительный периодический потенциал будет глубже проникать в кремний, если в сетке чередовать нити с различными приложенными напряжениями. Третья возможная кремниевая сверхрешеточная структура представляет собой легированную сверхрешетку [126], но она здесь не будет обсуждаться.

**1.2.2. 1.2. Композиционные сверхрешетки типа II**

Характерные черты композиционных сверхрешеток типа II определяются взаимным расположением краев зон исходных полупроводников на гетерогранице. Зона проводимости одного из материалов здесь близка к валентной зоне другого. Это вызывает пространственное разделение носителей, локализованных в квантовых ямах. Электроны сосредоточены в квантовых ямах, образованных первым полупроводником, а дырки — в квантовых ямах, образованных вторым полупроводником. Таким образом, в этих многослойных структурах мы имеем дело с «непрямой в реальном пространстве запрещенной зоной» (в отличие от непрямой запрещенной зоны в пространстве импульсов, реализующейся в ряде объемных полупроводников).

До сих пор лишь одну полупроводниковую систему можно с уверенностью считать образующей сверхрешетку типа II. Это система, основанная на **тройных соединениях In1-xGaxAs и GaSb1-yAsy**, где предельный случай *х* = 0, *у* = 0 отвечает сверхрешетке InAs—GaSb [119].

Согласно имеющимся данным по электронному сродству и запрещенной зоне обоих бинарных соединений, край зоны проводимости InAs лежит на 0,14 эВ ниже края валентной зоны GaSb [120]. Для тройных соединений запрещенные зоны частично перекрываются, стремясь в пределе *х=* 1, *у* = 1 к полному перекрытию (отвечающему запрещенной зоне GaAs).

Если выбор тройных соединений In1-xGaxAs и GaSb1-yAsy удовлетворяет условию *у* = 0,918x: + 0,082, то на гетерограницах в сверхрешетке имеется идеальное согласие постоянных решетки [120]. На рис. 6 показаны зависимости энергий краев зон от состава соединений, а также схематические энергетические диаграммы сверхрешеток типа II, выполненных из этих материалов.

Рис. 6. Зависимость положения краев зон (отсчитанных от вакуумного уровня) в твердых растворах In1-xGaxAs и GaSb1-yAsy от состава последних (a) и схематические зонные диаграммы сверхрешеток InAs—GaSb (б) и In1-xGaxAs—GaSb1-yAsy (в) [119]. Заштрихованные области отвечают энергиям подзон и тем участкам пространства, где концентрируются носители. На рис. б и в по оси абсцисс отложена пространственная координата.

Опубликованные экспериментальные результаты [162] привлекли внимание к другой системе, предположительно также образующей сверхрешетки типа II. Это система **РbТе—Pb1-xSnxTe**. Электронная зонная структура и характер сверхрешеток **РbТе—Pb1-xSnxTe** еще не достаточно исследованы [163—165], хотя их энергетическая схема, использующая зависимость от *х* (молярной доли олова) энергий краев зон, отсчитанных от уровня Ферми в легированном In (~ 1%)объемном Pb1-xSnxTe (где уровень Ферми зафиксирован амфотерной примесью In), позволяет предположить [162], что сверхрешетки из этих соединений принадлежат к типу II. Но это явно противоречит данным магнитооптических экспериментов [163, 165], согласно которым сверхрешетки РbТе—Pb1-xSnxTe принадлежат к семейству сверхрешеток типа I.

**1.2.2.1.3. Политипные сверхрешетки**

Как говорилось выше, политипные сверхрешетки могут быть созданы, если дополнить систему InAs—GaSb третьим веществом — AlSb (рис. 4, в). На рис. 7, *а* показаны энергии краев зон AlSb по отношению к зонам GaSb и InAs. Минимум зоны проводимости в AlSb расположен в точке *X* импульсного пространства в отличие от GaSb и InAs, где он находится в точке Г. Тем не менее благодаря относительно широкой запрещенной зоне AlSb (1,6 эВ), перекрывающей запрещенные зоны GaSb и InAs, слои AlSb в сверхрешетках и гетероструктурах служат потенциальными барьерами как для электронов, так и для дырок. Следует отметить, что близость постоянных решеток AlSb (6,136 A), GaSb (6,095 А) и InAs (6,058 А) [133] способствует гетероэпитаксии. Поэтому указанные полупроводники, существенно различные по параметрам зон, состав-ляют уникальную комбинацию среди всего класса соединений типа AIII BV.

Рассматриваемые политипные сверхрешетки конструируются из базовых многопереходных элементов типа ВАС, АВСА, АСВСА и т. д. (рис. 7, б), где А означает AlSb, В —GaSb, а С —InAs.

Гетеропереходы между отдельными составляющими политипной сверхрешетки сами по себе обладают интересными характеристиками [133]. Гетеропереходы GaSb—AlSb, например, имеют очень интересную зонную картину. В соответствии с правилом общего аниона [157, 166] разрыв в валентной зоне *∆ЕV* для них должен быть очень малым, в то время как разрыв в зоне проводимости *∆Ес* весьма велик. Поэтому квантовые ямы в зоне проводимости сверхрешеток GaSb—AlSb столь глубоки, что энергии квантовых уровней не зависят от точного значения *∆Ес.* Кроме того, не слишком малая разность постоянных решетки GaSb и AlSb *(∆а0/а0*= 0,65% [155]) позволяет изучать влияние напряжений несоответствия на свойства сверхрешетки.

Рис. 7. Энергии краев зон AlSb по отношению к GaSb и InAs *(а)* и энергетические диаграммы двух типов политипных сверхрешеток (б) [133] Заштрихованные области отвечают запрещенным зонам.

Очевидно, что все характеристики гетеропереходов между отдельными компонентами определяют и свойства политипной сверхрешетки в целом.

**1.2.2.2. Легированные сверхрешетки**

Термином «легированная сверхрешетка» принято называть периодическую последовательность слоев одного и того же полупроводника, легированных двумя различными способами. Донорные атомы в слоях n-типа поставляют электроны, которые связываются акцепторными атомами в слоях р-типа. Результирующее распределение заряда создает совокупность параболических потенциальных ям.

Необычные электронные свойства легированных сверхрешеток вытекают из специфического характера сверхрешеточного потенциала, который в этом случае является потенциалом ионизованных примесей в легированных слоях [126, 127, 167] в отличие от потенциала в композиционных сверхрешетках, определяемого различием ширин запрещенной зоны компонент сверхрешетки. Потенциал объемного заряда в легированных сверхрешетках модулирует края зон исходного материала таким образом, что электроны и дырки оказываются пространственно разделенными. Соответствующим выбором параметров структуры (уровней легирования и толщин слоев) это разделение можно сделать практически полным.

Одной из привлекательных черт легированных сверхрешеток является возможность использования для их создания любого полупроводника, допускающего легирование примесями как n-, так и р-типа. Чаще всего используется GaAs, получаемый методом МЛЭ [158], но предлагались также такие материалы, как Si [167], и соединения **РbTе, Pb1-xGexTe или Pb1-xSnxTe** [168].

Другое характерное преимущество легированных сверхрешеток связано со структурным совершенством этих многослойных систем. Относительно малая концентрация примесей в легированных сверхрешетках, как правило 1017—1019 см -3 [167], вносит несущественные искажения в решетку исходного материала. Следовательно, легированные сверхрешетки не содержат типичных для композиционных сверхрешеток гетерограниц, с которыми связаны возможности разупорядочения состава или появления напряжений несоответствия.

Мы имеем дело с однородным полупроводником, который лишь модулирован чередующимся типом легирования. Кроме того, эффективной ширине запрещенной зоны в легированной сверхрешетке можно придавать любое значение от нуля до ширины зоны исходного материала путем должного подбора уровней легирования и толщин слоев.

**1.2.2.3. Легированные композиционные сверхрешетки**

В обычных композиционных сверхрешетках полупроводниковые слои не легированы, благодаря чему квантовые ямы можно считать прямоугольными (см. рис. 5). Ситуация меняется, если один из полупроводников в сверхрешетке, например широкозонный, легировать донорной примесью. Эта специфическая ситуация изучалась в сверхрешетке GaAs—AIxGa1-xAs с модулированным легированием [115]. Поскольку край зоны проводимости в GaAs лежит ниже по энергии, чем донорные состояния в AIxGa1-xAs, электроны, покинувшие доноры в AIxGa1-xAs, могут диффундировать в нелегированные слои GaAs, пространственно разделяясь с породившими их ионизованными донорами. В конечном итоге все подвижные носители становятся локализованными в слоях GaAs, где они могут двигаться параллельно гетерогранице, не рассеиваясь на ионизованных примесях. Это приводит к существенному возрастанию подвижности указанных электронов в слоях узкозонных полупроводников.

Но пространственный перенос подвижных носителей создает в сверхрешетке области объемного заряда чередующегося знака, что вызывает периодические изгибы краев зон, показанные на рис. 8. Подвижность электронов, заполняющих состояния в квантовых ямах GaAs сверхрешеток с модулированным легированием вплоть до уровня Ферми EF, можно еще увеличить, если ввести тонкие нелегированные широкозонные прослойки [169], т. е. оставить нелегированными участки барьеров толщиной 5 —10 нм вблизи границ с GaAs. Эффект возрастания подвижности в указанных сверхрешетках наиболее выражен при низких температурах, когда слабы процессы фононного рассеяния, конкурирующие с сильно подавленным кулоновским рассеянием. При 4,2 К были достигнуты максимальные подвижности, превышающие 106 см2/(В·с) [170].

Как видно из рис. 8, в сверхрешетках с модулированным легированием привычные прямоугольные ямы сверхрешеток типа I следует трансформиро-

Рис. 8. Схема расположения последовательности слоев (слева) и координатная зависимость зонной диаграммы (справа) для сверхрешеток i-GaAs—n + - AIxGa1-xAs с модулированным легированием. Изгибы зон вблизи гетерограниц создаются пространственными зарядами, возникающими при переходе свободных электронов с ионизованных доноров в барьерах n + - AIxGa1-xAs в потенциальные ямы i-GaAs.

вать в квантовые ямы параболического типа. Новый тип легированных сверхрешеток на гетероструктурах, обладающих перестраиваемыми электронными свойствами (характерная черта легированных сверхрешеток) и одновременно существенно увеличенными подвижностями электронов и дырок в квантовых ямах (характерная черта сверхрешеток с модулированным легированием), был предложен Делером [171] и экспериментально реализован с помощью метода МЛЭ [172]. В такой сверхрешетке используется периодически повторяющаяся система из десяти различным образом легированных сверхтонких слоев. В общем случае структура является периодическим повторением элементов вида *n-*AIxGa1-xAs/i-AIxGa1-x As/i-AIyGa1-yAs/i-AIxGa1-xAs/n-AIxGa1-xAs/p-AIxGa1-xAs/i-AIxGa1-xAs/i-AIyGa1-y As/ i-AIxGa1-xAs/p-AIxGa1-xAs с *у << х* или *у* = 0. Основная идея, которой руководствовались при создании такой легированной гетеросверхрешетки, состоит в модификации обычной легированной сверхрешетки из широкозонного материала, например AIxGa1-xAs, путем периодического включения в нее специально нелегированных i-слоев из материала с меньшей шириной запрещенной зоны, например AIyGa1-yAs. В качестве иллюстрации на рис. 9 показаны последовательность расположения слоев в рассматриваемой периодической структуре с *у* = 0 и ход краев энергетических зон (в реальном пространстве) в пределах одного периода структуры.

↑

Рис. 9. Схема расположения последовательности слоев (слева) и координатная зависимость зонной диаграммы (справа) для легированной сверхрешетки GaAs — AIxGa1-xAs. Период сверхрешетки состоит из десяти отдельных слоев. Стрелка на левом рисунке показывает направление роста.

Сверхтонкие нелегированные слои i-GaAs зажаты между чередующимися легированными *п-* и р-слоями AIxGa1-xAs. Желаемый эффект пространственного разделения перешедших в слои GaAs свободных носителей и породивших их ионизованных примесей усиливается при введении тонких нелегированных прослоек i - AIxGa1-xAs на гетерограницах. Таким образом, период такой сверх-решетки содержит по одной легированной области AIxGa1-xAs *n-* и р-типа, т. е. в целом каждый период сверхрешетки состоит из 10 слоев. Это означает, что обычный ход потенциала легированной сверхрешетки периодически преры-вается потенциальными ямами, образованными материалом с меньшей шириной запрещенной зоны. Отсюда следует, что движение носителей параллельно слоям сверхрешетки почти свободно (если пренебречь остаточным примесным и фононным рассеянием), в то время как движение в направлении периодичности квантовано одномерным потенциалом, модулирующим края зон.

В основном состоянии системы амплитуда периодического потенциала объемного заряда определяется уровнями легирования и толщинами чередующихся n- и р-слоевAIxGa1-xAs. Таким образом, зонную диаграмму легированных гетеросверхрешеток можно намеренно перестраивать в широких пределах, задавая необходимым образом параметры в ходе эпитаксиального роста. Кроме того, потенциал объемного заряда, а следовательно, зонную структуру, можно изменять путем электрического или оптического возбуждения кристалла.

 **1.2.2.4. Классификация полупроводниковых сверхрешеток**

На рис. 10 показана общая классификация сверхрешеток по структурным признакам. Здесь основным классификационным критерием является кристалличность слоев, образующих сверхрешетку.

В качестве вторичного критерия используется физическая природа сверхрешеточного потенциала. На рис. 11 представлена классификация композиционных сверхрешеток. Здесь критерием является характер относительного расположения краев зон на гетерограницах в сверхрешетке. Наконец, на рис. 12 приведена классификация композиционных сверхрешеток типа I. Здесь критериями служат характер материалов, образующих сверхрешетку, и степень согласия постоянных решетки на гетерограницах.

В настоящее время в литературе накоплен достаточно большой объем информации по сверхрешеткам и он постоянно растет. Поэтому, естественно, что некоторые вопросы остались неохваченными или же охвачены не в той степени, чтобы удовлетворить пожелания всей достаточно разнородной пользовательской аудитории. Можно было бы более подробно рассмотреть эффекты переноса в сверхрешетках и, в первую очередь, их вольтамперную характеристику, фотопроводимость, высокочастотные свойства сверхрешеток и их приборные применения. Для более углубленного изучения этих вопросов можно рекомендовать следующие статьи: [172] (описание большого числа зарубежных статей и патентов, содержащих идеи приборов на основе сверх-

Рис. 10. Общая классификация полупроводниковых сверхрешеток — многослойных структур, содержащих одномерный искусственный периодический потенциал с периодом, меньшим длины свободного пробега электронов. Приведены примеры сверхрешеток.

Рис. 11. Классификация композиционных сверхрешеток —структур, в которых сверхрешеточный потенциал создается периодическим изменением состава слоев. Приведены примеры сверхрешеток.

Рис. 12. Классификация композиционных сверхрешеток типа I—структур, в которых запрещенные зоны соседних слоев полностью перекрываются, создавая в узкозонных полупроводниках две потенциальные ямы: одну для электронов и одну для дырок. Приведены примеры сверхрешеток.

решеток); [173] (обзор целого ряда современных аспектов физики сверхрешеток); [174] (подробный анализ высокочастотных свойств сверхрешеток); [175] (исследование электронных свойств сверхрешеток с помощью комбинационного рассеяния света); [176] (длинноволновая фотопроводимость сверхрешеток и фотоприемник на ее основе); [178] (квантовый эффект Холла в сверхрешетках); [179] (проводимость вдоль оси сверхрешетки в сильных электрических полях).

**1.2.3. Магнитные наноструктуры**

Магнитные свойства наноструктур обладают большим разнообразием и значительно отличаются от массивного материала. Основной вклад здесь вносят размерные эффекты, влияние поверхности, образующих наноструктуру кластеров, межкластерные взаимодействия или взаимодействия кластера с матрицей и межкластерная организация. Особенности формирования наноструктур и их свойства позволяют синтезировать новые магнитные наноматериалы и магнитные наноустройства на их основе. К числу наиболее характерных и впечатляющих свойств нанокластеров и наноструктур следует отнести, прежде всего, суперпарамагнетизм, который проявляется при размерах магнитных кластеров 1-10 нм, магнитную однодоменность нанокластеров и наноструктур вплоть до 20 нм, процессы намагничивания, которые чувствительны не только к характеру магнитного упорядочения кластера, но и к его размеру, форме, магнитной анизотропии, эффекты магнитного квантового туннелирования, при которых намагниченность меняется скачками, подобно эффектам одноэлектронной проводимости, и эффекты гигантского магнетосопротивления. Представляют большой интерес магнитные фазовые переходы первого рода в нанокластерах и наноструктурах, когда магнитное упорядочение в наносистеме исчезает скачком и наносистема переходит в парамагнитное состояние, минуя суперпарамагнитное состояние, для которого характерно сохранение магнитного упорядочения ниже точки Кюри.

Развитие методов напыления сверхтонких пленок и нанолитографии привело в последнее десятилетие к активному изучению магнитных наноструктур. Стимулом этой активности является идея о создании новых магнитных наноматериалов для сверхплотной записи и хранения информации. При этом предполагается, что каждая частица несет один бит информации. Если расстояние между частицами составляет 100 нм, то ожидаемая плотность записи — 10 Гбит/см2. Принципиальными ограничениями плотности записи при таком подходе являются магнитостатическое взаимодействие частиц и значительные термические флуктуации. Последние имеют существенную специфику для малых ферромагнитных частиц, которая проявляется в экспоненциальном росте вероятности распада намагниченного состояния с уменьшением размера частицы (суперпарамагнетизм).

Достижением в исследовании магнетизма наноматериалов является открытие эффекта гигантского магнитосопротивления. Суть эффекта заключается в изменении сопротивления (порядка нескольких десятков процентов) многослойной структуры из сверхтонких ферромагнитных и диамагнитных слоев (например, Со/Сu) при смене ферромагнитного упорядочения в структуре на антиферромагнитное. Можно сказать, что такие многослойные структуры представляют собой новый тип доменной структуры ферромагнетика, в котором роль доменов играют ферромагнитные пленки, а доменными стенками являются пленки диамагнетика. Этот эффект находит свое применение при создании новых датчиков магнитного поля, а также при разработке сред для сверхплотной записи информации.

Дальнейшее продвижение в область малых размеров привело к открытию нового явления — туннелирования магнитного момента в сверхмалых ферромагнитных частицах. К этой группе наноматериалов относятся искусственные кристаллы, содержащие магнитные кластеры Мn12 и Fe3. Магнитный момент таких кластеров равен 10 магнетонам Бора, т. е. занимает промежуточное положение между магнитными моментами атомов и макроскопических частиц. Обменное взаимодействие между кластерами в кристалле отсутствует, а магнитная анизотропия весьма высока. Таким образом, появляется возможность квантовых переходов между магнитными равновесными состояниями в кластерах. Изучение этих процессов представляется интересным и важным с точки зрения разработки элементной базы квантовых компьютеров.

Прямым следствием уменьшения размеров существующих магнитных, а также электронных и оптических устройств до наноразмеров является значительная миниатюризация различных схем и развитие нанотехнологий для их получения. Для ЭВМ это ведет к резкому росту плотности записи информации, емкости и быстродействию. По поводу миниатюризиции устройств представляет интерес закон Мура, согласно которому размеры микроэлектронных устройств должны уменьшаться вдвое каждые четыре года. Согласно этому прогнозу, размеры наноустройств должны быть в 2006 г. около 100 нм, в 2012 г. — 50 нм, к 2020 г. — 10 нм, а к 2035 г. — порядка атомов. В действительности совершенствование логических устройств по этому закону должно прекратиться еще ранее (около 2012 г.) вследствие нарастания квантовых эффектов при уменьшении размеров нанокластеров. Это стимулирует, в свою очередь, развитие новых методов ЭВМ для хранения и обработки информации.

Перспективным направлением здесь являются квантовые вычислительные устройства. В таких компьютерах квантовые эффекты, например магнитного квантового туннелирования или гигантского магнитного резонанса, не ограничивают, а расширяют возможности вычислений и увеличивают быстродействие. Следует пояснить, что в обычных, цифровых ЭВМ, информация сохраняется в виде последовательности символов «0» и «1» (бит информации соответствует набору одной из этих цифр). Информация в квантовых битах записывается суперпозицией состояний «0» и «1», точное значение которых одновременно определяется в момент измерения. Последовательность из *N* цифровых битов может представлять любое число в интервале от 0 до *2N* — 1, в то время как *N* квантовых битов могут представить все эти *2N* чисел одновременно. К примеру, квантовый компьютер с 300 такими битами может описывать систему с числом элементов 2300 ~ 10100, что превышает число атомов Вселенной. При поиске данных в массиве из *N* элементов скорость квантовых компьютеров в *N1/2* раз превосходит скорость цифровых ЭВМ [180]. Таким образом, именно нанотехнология может решить проблему изготовления большого числа квантовых битов и вывести вычислительную технику к пределам действия закона Мура.

**1.2.4. Двумерные многослойные структуры из пленок нанометровой толщины**

В данном случае рассматриваются такие комбинации материалов, которые обеспечивают наиболее сильное отражение электромагнитных волн. Длина волны излучения, эффективно взаимодействующего с многослойной структурой, и ее период связаны соотношением λ *= 2d* sinα, где α — это угол скольжения падающего луча. Диапазон длин волн, в котором эффективно использование этих устройств, простирается от экстремального ультрафиолетового излучения (λ = 60 нм) до жесткого рентгеновского (λ= 0,01 нм), т. е. диапазон, в котором наиболее длинные волны в 6000 раз больше самых коротких. Для видимого света это соотношение равно ~ 2. Соответственно, столь же велико количество явлений природы, физические проявления которых находятся в этой спектральной области.

Структуры представляют собой искусственные одномерные кристаллы из пленок нанометровой толщины, и кроме возможности их использовать для управления излучением в зависимости от материалов слоев (диэлектрик, полупроводник, металл, сверхпроводник), они могут быть интересны и для других физических приложений. Так, если одним из материалов многослойных

наноструктур служит сверхпроводник, то это система множественных последовательно включенных совершенно идентичных джозефсоновских переходов. Если металл чередуется с полупроводником — это система последовательно включенных диодов Шоттки.

В наиболее коротковолновой части диапазона 0,01—0,02 нм рентгеновские зеркала позволяют фокусировать излучение синхротронов или рентгеновских трубок на исследуемые объекты или формировать параллельные пучки. В частности, их применение увеличивает эффективность рентгеновских трубок в 30—100 раз, что делает возможным заменить синхротронное излучение в ряде биологических, структурных и материаловедческих исследований. Приблизительно в этом же диапазоне лежит излучение высокотемпературной плазмы (лазерной и ТОКАМАКов). Здесь зеркала нашли применение как дисперсионные элементы для спектральных исследований.

В диапазоне 0,6—6 нм лежит характеристическое излучение легких элементов от бора до фосфора. Здесь рентгеновские зеркала также используются для исследования спектров в приборах элементного анализа материалов.

Рентгеновская многослойная оптика широко применяется для формирования фильтрации и управления поляризацией в синхротронных источниках. В области 10—60 нм лежат линии излучения солнечной плазмы. Объективы космических телескопов из рентгеновских зеркал и сейчас находятся на орбите и регулярно передают на Землю изображение Солнца на линиях Fe IX—Fe XI (17,5 нм) и Не II (30,4 нм).

Особое место занимает применение многослойных зеркал в технологиях микроэлектроники: это переход на длину волны более чем в 10 раз короче (от 157 нм к 13 нм) в литографии — процессе, обеспечивающем получение рисунка полупроводниковых приборов и интегральных схем. Именно длина волны излучения, используемого для получения рисунка, отвечает за размеры его минимальных элементов. До сих пор изменение длины волны излучения от поколения к поколению литографических установок не превышало 25 %. Одновременно в 10 раз повышаются требования к точности изготовления всех элементов оптики и механизмам настройки и экспонирования. Фактически это означает переход всех обрабатывающих технологий на атомарную точность.

**1.2.5. Фотонные нанокристаллы и пористый кремний.**

Наноматериалы приобретают новые свойства, связанные как квантовым ограничением длины пробега носителей, так и организацией нанокластеров в нанокристаллы. В качестве примера наноматериалов, приобретающих новые свойства, приведем пористый кремний и фотонные нанокристаллы.

Пористый кремний представляет собой пример появления новых оптических свойств, связанных с квантовым ограничением [181]. Он представляет из себя материал, состоящий из изогнутых кремниевых нитей нанометрового диаметра. Для кристаллического кремния радиационные переходы между валентной зоной и зоной проводимости формально запрещены по условиям симметрии. Переходы, однако, происходят, но только с участием фононов, и поэтому скорость радиационных переходов мала. Это является причиной того, что кремний не используется для генерации оптических сигналов.

В пористом кремнии наблюдается интенсивная фотолюминесценция, что вначале связывалось с возможным нарушением правила отбора в наносистеме, которая не удовлетворяет трансляционной симметрии. Квантовые ограничения действительно играют основную роль в появлении фотолюминесценции путем изменения соотношения интенсивности радиационных и не радиационных переходов. Интенсивность радиационных переходов несколько возрастает, но, главным образом, уменьшается интенсивность нерадиационных переходов, в частности, резко убывает вероятность трехчастичных Оже-процессов, связанных с испусканием электронов после поглощения светового излучения, по сравнению с кристаллическим кремнием.

Фотонные кристаллы образуются из нанокластеров с размерами, сравни-мыми с длиной волны фотонов. Для видимого диапазона света это сотни нано-метров. Благодаря этому, для таких наноструктур наблюдаются дифракцион-ные процессы и выполняются условия Брэгга, подобно рассеянию рентгенов-ских лучей на атомной кристаллической решетке. Это приводит к возникно-вению когерентных эффектов при рассеянии и поглощении света, весьма чувствительных к энергии фотонов и направлению их распространения.

Так, фотонные кристаллы имеют периодически меняющийся коэффициент отражения, что позволяет изменять оптические свойства материалов. Одномерные наноструктуры используются как интерференционные фильтры, однако большой интерес представляют трехмерные нанокристаллы. Для таких наносистем было получено существование щелей фотонных состояний в энергетических и дисперсионных спектрах подобно запрещенным зонам в энергетических и дисперсионных спектрах электронов в атомных кристаллах. Это предсказывает существование фотонной щели с частотами, при которых фотон не может распространяться внутрь кристалла и происходит его упругое отражение от нанокристаллического слоя. Такие возможности позволяют создавать наноматериалы с изменяющимися оптическими свойствами.

Создание фотонных кристаллов с фотонной щелью включает разнообразные приемы синтеза. Один из таких приемов состоит в использовании свойства сфер субмикронного размера произвольно организовываться в гранецентрированную решетку. В результате получается наноматериал — синтетический опал, включающий монодисперсные сферы окиси кремния. Однако такой нанокристалл не обладает устойчивой фотонной щелью, которая легко разрушается различного рода дефектами и несовершенством нанокристалла. Такой синтетический опал далее используется как матрица для получения полупроводникового материала путем его фильтрации в поры нанокрасталлического опала (рис. 13). Удаление матрицы опала позволяет получать нанокристалли-ческий обращенный опал, в котором кремний включает упорядоченную структуру пустот [182].

Рис. 13. Сечение нанокристалла, образованного после фильтрации кремния (серое поле) в структуру опала и выщелачивания сфер SiO2. Не­полная фильтрация приводит к появлению дополнительных треугольного типа (или алмазного типа) пор

Было рассчитано, что если полупроводник обладает достаточно высоким коэффициентом отражения >2,85, то такая структура будет иметь фотонную щель, что экспериментально было обнаружено для фотонного кристалла, сделанного из кремния [183].

В этой области большой интерес вызывает создание фотонных кристаллов, которые способны к интенсивному испусканию света, например на основе GaS, InS, GaP, или созданию упорядоченных полостей на основе алмазной структуры, которая по расчетам может иметь еще большую фотонную щель и меньше зависеть от дефектов и разупорядоченности.

**1.2.6. Молекулярные наноструктуры**

Органические материалы в последнее время интенсивно вовлекаются в нанотехнологии и как неотъемлемые участники технологического процесса (например, в нанолитографии), и как самостоятельные объекты и устройства — в так называемой молекулярной электронике.

Многообразие органического мира хорошо известно (около 2 млн синтезированных соединений, и это количество непрерывно растет) — от «полунеорганических» комплексов (углеродные кластеры, металлоорганика) до биологических объектов (ДНК, гены). С точки зрения материалов для нанотехнологий и молекулярной электроники условно можно выделить **три основных класса: *полимеры, молекулярные ансамбли* (molecular assemblies, self-aggregated systems) и *единичные молекулы****:* последние называются также «умные» или «функциональные» молекулы (smart molecules).

***Первый класс***изучается наиболее давно и по общей совокупности работ, наверное, наиболее интенсивно. Кроме того, диэлектрические, оптические и люминесцентные свойства различных поли- и олигомеров уже широко используют в технике и электронике, они стоят ближе всего к рынку и экономическому эффекту.

***Второй класс***— молекулярные ансамбли нанометровых размеров — изучается сравнительно недавно. К ним относятся, например, агрегаты на основе порфиринов (в том числе хлорофилла) и других амфифильных молекул, получаемые из растворов. Супрамолекулярная (то есть надмолекулярная, иерархическая) организация сложна и интересна, ее исследование и связь с (фото-) электрическими свойствами проливает свет на биологические и природные процессы (клеточный транспорт, фотосинтез). Обнаружена чувствительность, а главное — уникальная избирательность таких систем к внешним воздействиям (свет, атмосфера, вибрация), что позволяет использовать их в различных сенсорах, в том числе со смешанной электронно-ионной проводимостью. Исследуются наноразмерные молекулярные стержни и проволоки (molecular rods and wires), в том числе в качестве интерфейса между неорганическими материалами (например, двумя металлическими электродами). Предполагается, что со временем будет происходить интегрирование с классической приборной базой.

Вообще системы, построенные в основном на ван-дер-ваальсовых или водородных связях, представляют собой очень перспективный с точки зрения дизайна твердого тела объект с двумя уровнями свободы: внутримолекулярная структура, которая может быть модифицирована (изменена при синтезе) и которая ответственна, например, за поглощение или испускание света; межмолекулярная структура, которая может быть изменена при росте кристалла (пленки, эпитаксиального слоя) и которая ответственна за фазовые явления, транспорт носителей заряда, магнитные свойства. В качестве примера: фталоцианин меди и периферийно-фторированный фталоцианин меди структурно изоморфны, однако представляют собой полупроводники *р-* и n-типа соответственно. Полностью органические выпрямляющие переходы на основе вакуумно-осажденных слоев интенсивно исследуются в настоящее время. Вместе с тем, допирование пленок фталоцианина сильным акцептором (например, йодом) изменяет фазовую структуру вплоть до получения квазиодномерной металлической проводимости.

Важную группу составляют также самоорганизующиеся монослои (self-assembled monolayers, SAM's) на основе органических молекул или цепочек различного строения, которые исследуют как перспективные передающие материалы при литографии, так и для изучения электропереноса вдоль контура сопряжения молекулы. Здесь уже начинается третий класс.

***Третий класс***или способ применения органических материалов в нанотехнологиях самый молодой. Это то, что в западных конкурсах называется *emergent* или *futuristic technologies* (внезапно возникающие или футуристические технологии). Если жидкокристаллические дисплеи, технологии CD-R, фотопреобразователи, сенсоры и другие устройства на органических материалах хорошо известны и постепенно (хотя и медленно — из-за торможения со стороны уже широко инвестированного и раскрученного «силиконового» и GaAs-ro приоритета) приходят на рынок, то одномолекулярные устройства в реальном производстве отсутствуют. Более того, если макроскопические свойства классических органических твердых тел (молекулярных кристаллов) имеют удовлетворительное теоретическое описание, то процессы, ожидаемые в одномолекулярных устройствах, видятся гораздо менее отчетливо. Самый упрощенный подход: берем некую молекулу, которая представляет собой хорошо организованную квантовую систему, делаем к ней электроды и получаем, например, диод. Тут сразу возникает много новых вопросов. В частности, граница металл/молекулярный полупроводник даже на макроуровне весьма неопределен.

Тем не менее истинно «наноразмерные» эффекты ожидаются именно в этом классе. Конструируются молекулярные наномашины и наномоторы (роторы), динамические молекулярные переключатели, транспортировщики энергии, устройства распознавания, хранения информации. Для исследования инжекции носителей и туннельного тока в отдельных молекулах совершенствуются методы зондовой микроскопии.

Следует учитывать, что в числе главных достоинств (если не самых главных) органики находятся дешевизна и доступность. Изощренный синтез новых соединений делает их едва ли не дороже высокочистых неорганических веществ, поэтому наибольшие практические перспективы имеют исследование и модификация (оптимизация) широко распространенных и изученных (более или менее) соединений с высокой стабильностью и способностью интегрироваться в разработанные технологические процессы. Из наиболее известных — это фталоцианины, фуллерены, политиофены и полиарены.

**1.2.7. Фуллереноподобные материалы**

Графит, алмаз и карбин в течение долгого времени считались основными аллотронными состояниями углерода. Их применяли во многих отраслях промышленности и техники, в том числе в микро- и оптоэлектронике. За 10 лет до конца XX века были обнаружены сначала в космосе, а потом получены в лаборатории новые молекулярные формы углерода — фуллерены и фуллереноподобные индивидуальные вещества и материалы. В настоящее время фуллереновые материалы начинают широко применять в промышлен-ности: от микро- и наноэлектроники до эффективных медицинских препаратов.

К фуллереновым материалам относятся следующие:

***Фуллерены.***Они образуют молекулярно-кристаллические твердые тела, часто вследствие большого размера и высокой симметрии своих молекул — пластические кристаллы без температуры плавления. Они образованы молекулами *С2n ,* имеющими форму либо сфер, либо эллипсов, хотя возможны их другие комбинации (полусферы с цилиндрами из углерода). Возможны многослойные сферы или эллипсы («оолитовые» или «луковичные» структуры). Размер молекул главного представителя фуллеренов С60 составляет 1 нм, и в растворе молекулы обладают свойствами броуновской частицы.

***Углеродные нанотрубки****.* Они образованы из свернутых по различным направлениям графитовых плоскостей и закрыты на концах сетчатыми углеродными полусферами. Такие «графитовые» нанотрубки могут быть однослойными и многослойными. Последние могут быть переведены окислением и травлением в однослойные. Углеродные нанотрубки могут иметь разветвления и изгибы. В этом случае они теряют исходную «графитовую» структуру и не называются «графитовыми». Однослойные нанотрубки имеют размеры от 1 до 10 нм в диаметре и длину 100—1000 нм и более, а многослойные имеют диаметры и длину в 10—100 раз больше. Твердые тела могут быть образованы из жгутов нанотрубок или коллинеарных (но более коротких) образований.

***Наполненные фуллерены***(эндопроизводные). Наполнением могут быть молекулы инертных или других газов, небольшие органические и неорганические молекулы, атомы металлов (щелочных, щелочноземельных, лантанидов и др.). Несмотря на трудности получения и малый выход таких производных, присущие им свойства заставляют исследовать их синтез и возможные применения. Эти производные в большинстве своем имеют крайне низкие потенциалы ионизации по сравнению с металлами, и по-видимому, обладают металлическими свойствами.

***Наполненные углеродные нанотрубки****.* Помимо перечисленного выше для наполнения могут быть использованы фуллерены меньшего диаметра.

***Неорганические нанотрубки* (MoS2, WSe2 и др**.). Патентная литература и применения фуллереноподобных материалов чрезвычайно разнообразны. Фуллереноподобные материалы обладают рядом замечательных характеристик, включая химическую стойкость, высокую прочность, жесткость, ударную вязкость, теплопроводность и электропроводность. В зависимости от тонких особенностей молекулярной симметрии фуллерены и нанотрубки могут быть диэлектриками, полупроводниками, обладать металлической проводимостью и высокотемпературной сверхпроводимостью. Эти свойства в сочетании с наномасштабной геометрией делают их почти идеальными — возможно даже уникальными — материалами для изготовления электрических проводов, сверхпроводящих соединений или целых устройств, которые с полным основанием можно назвать изделиями молекулярной электроники. Химической сборке элементов различных схем благоприятствуют свойства фуллерена, который может образовывать ионы от +6 до -6 и в различных матрицах — связи с донорами, акцепторами, свободными радикалами и ионами. Фуллерены могут также использоваться при создании средств молекулярной оптоэлектроники для фемтосекундной оптоволоконной передачи информации. Полимеризация фуллеренов при электронно-лучевом или ионизирующем воздействии дает возможность получать резисты нового поколения.

Углеродные нанотрубки используются в качестве игольчатых щупов сканирующих зондовых микроскопов и в дисплеях с полевой эмиссией, в высокопрочных композиционных материалах, электронных устройствах со схемами из коротких нанотрубок, подвергнутых манипулированию и сборке. Молекулярный характер фуллереновых материалов позволяет разработать химическую стратегию сборки этих элементов в пригодные для использования структуры, материалы и, возможно, даже молекулярные электронные устройства.

**1.2.7.1. Углеродные нанотрубки**

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются наноструктурами с широким потенциалом применения. Впервые они были получены в 1991 г. Ижимой [184].

Кроме фундаментальных исследований УНТ оказались перспективными материалами для получения новых наноматериалов и наноустройств. Это прежде всего возможность регулировать проводимость нанотрубки путем изменения ее структуры. Второе важное свойство — это высокая напряженность электронного поля, порождаемая малым нанометровым диаметром нанотрубки по отношению к среднему приложенному напряжению. Это приводит к аномально высокому току эмиссии при относительно малых напряжениях и лежит в основе создания холодных катодов и эмиттеров на основе УНТ. Поскольку УНТ представляют собой полости, они могут использоваться не только как адсорбенты, но и как хранилища газообразных или жидких веществ, в частности для хранения водорода.

УНТ образуются в результате химических превращений углерода при высоких температурах. Можно выделить три основных способа их получения: **электродуговое распыление графита, абляция графита с помощью лазерного или солнечного облучения и каталитическое разложение углеводородов в процессах химической газофазной эпитаксии и СВЧ плазменного эпитаксиального осаждением из газовой фазы** [185].

Метод электродугового распыления состоит в использовании дугового разряда с графитовыми электродами, горящими в атмосфере инертного газа. К электродам из углерода диаметром 5-20 мм, разнесенным на расстояние около 1 мм, в потоке гелия при давлении 66500 Па прикладывается напряжение 20 - 25 В. Нанотрубки образуются на отрицательном электроде. Для получения однослойных нанотрубок в центральную область положительного электрода добавляют небольшие количества кобальта, никеля или железа в качестве катализаторов. Отсутствие катализатора приводит к получению многослойных или вложенных нанотрубок, то есть нанотрубка внутри нанотрубки, как показано на рис. 14, с внутренним диаметром от 1 до 3 нм и внешним диаметром от 2 до 25 нм. Применение катализатора, например Fe, Co, Ni, Cr, Pd и т. д., приводит к образованию однослойных УНТ с диаметром от 0,79 нм и длиной порядка 1 мкм.

Второй основной способ получения УНТ состоит в испарении лазером мишени из графита нагретой до 1200°С в атмосфере инертного газа. Графитовая мишень содержит небольшие количества кобальта и никеля, выступающие в качестве каталитических зародышей образования нанотрубок. Здесь опять применение металлических катализаторов ведет к изменению характера синтеза и переходу от многослойных трубок к однослойным, при этом размеры УНТ определяются длительностью лазерного импульса и его интенсивностью. Таким методом можно получить трубки диаметром 10 - 20 нм и длиной 100 микрон.

Рис. 14. Схема вложенных нанотрубок, когда одна трубка находится внутри другой.

Наибольшие достижения в получении УНТ получены с помощью каталитического разложения углеводородов на поверхности металлического катализатора. Этот метод подобен CVD методу получения тонких плёнок. Катализатор представляет из себя, например, высокодисперсный порошок металлического железа при *Т* = 700° С, который помещен в тигель внутри трубки, через которую пропускается смесь, например; С2Н2:N2 в соотношении 1:10. В результате на поверхности катализатора образуются различного рода УНТ и металлические нанокластеры внутри многослойной графитовой оболочки. Однако наиболее высокая степень однородности УНТ получается при использовании пористой подложки с высокой степенью однородности пор, которые заполнены нанокластерами металлического катализатора. В этом случае диаметр УНТ будет совпадать с размером кластера и размером нанопоры. Если поры обладают достаточной глубиной и поверхностной плотностью, то нанотрубки образуются перпендикулярно к поверхности и обладают высокой степенью однородности. Размеры УНТ и ее структура определяются температурным режимом процесса, составом газовой фазы, но, главным образом, составом и размером нанокластеров катализатора.

Схема процесса **плазменного эпитаксиального осаждения из газовой фазы** нанотрубок состоит из следующих этапов [186]: 1) в камеру реактора подают технологический газ (метан, водород); 2) через кварцевое окно зажигают плазму путем ввода микроволнового излучения в камеру реактора, и 3) к подложке, на которую напылен металл-катализатор для роста углеродных нанотрубок, прикладывают отрицательное напряжение смещения.

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.

В другой модели роста углеродных нанотрубок активные радикалы углерода (либо атомы, либо ионы), диссоциированные из газообразного метана в металл-катализатор на подложке, растворяются в этом металле и прорастают вверх, поднимая при этом мельчайшие частицы металла-катализатора.

В случае одностенной нанотрубки на ее концах можно обнаружить металлические частицы, что свидетельствует в пользу каталитической роли атомов металла в формировании структуры трубки.

Как правило, имеет место селективный рост углеродных нанотрубок на металле-катализаторе, нанесенном на подложку. Учитывая эту особенность селективного роста, можно использовать нанотрубки в полупроводниках, где необходимо контролировать изготовление шаблона с размерами порядка нанометров.

Обычно при синтезе получается смесь нанотрубок разных типов с различным характером и величиной электропроводности, причем в зависимости от диаметра и хиральности две трети из них имеют полупроводящие свойства, и одна треть — металлические. Металлические трубки обычно имеют кресельную структуру. На рис. 15 приведены способы организации нанотрубок в зависимости от хиральности и угла сворачивания [184]. Однослойная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 микрон, что делает ее квазиодномерной структурой, способной служить нанопроволокой.

Рис. 15. Схемы сворачивания нанотрубок [184]: *а)* часть графитовой поверхности, которая при сворачивании образует однослойную нанотрубку; *б)* свертывание под углом α = 0 (кресельная структура); *в)* α= 30\* (зигзагообразная структура); *г)* — хиральная структура с индексами хиральности (10,5)

Группа из IBM разработала метод отделения полупроводящих нанотрубок от металлических. Для разделения смешанные пучки нанотрубок осаждают на кремниевую подложку, а затем на эти пучки напыляют металлические электроды. Используя подложку как электрод, на него подают небольшое напряжение смещения, запирающее полупроводниковые трубки и эффективно превращающее их в изоляторы. Затем между металлическими электродами прикладывается высокое напряжение, создающее большой ток в металлических нанотрубках, что приводит к их испарению, после чего на подложке остаются только полупроводниковые нанотрубки.

**1.2.7.2. Характеристики углеродных нанотрубок и требования для их применения в полупроводниковых приборах**

На современном этапе исследований возможны два применения углеродных нанотрубок в полупроводниковых приборах. Одно из них состоит в использовании углеродных нанотрубок в качестве канала затвора в полевых транзисторах, учитывая, что характеристики, подобные характеристикам полупроводника, могут быть получены путем контроля вектора хиральности. Другое применение заключается в использовании углеродных нанотрубок в качестве межслойных контактов или многослойных пленок, принимая во внимание такие преимущества нанотрубок, как высокая плотность электрического тока, высокая электропроводность, высокая теплопроводность и высокое аспектное отношение. В таблице 3 приведены характеристики УНТ в сравнении с обычными материалами. Как видно из этой таблицы, плотность тока в нанотрубке выше, чем в кремнии и меди примерно в 2 раза. Также подвижность выше, чем в кремнии. Ввиду того, что теплопроводность углеродной нанотрубки в 10-20 раз выше, чем у кремния и меди и ее упругость очень высока, можно говорить о том, что углеродная нанотрубка является наилучшим материалом для межслойных контактов.

**Табл. 3.**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Углеродные нанотрубки | Кремний (транзистор) | Медь (разводка) |
| Плотность тока(А/см2) | 1 х 109 | 1 х 107 | 1 х 107 |
| Скорость переноса электронов (см/с) | 2т8хЮ9 | 1 х 107 |  |
| Удельное сопротив-ление (Ом х см) |  | 4 х 10~4 2х 106 | 1,67 х 10"6 |
| Тепропроводность (Вт/мК) | 3000 Ч- 5500 | 150 | 398 |
| Технология процесса | Самоорганизация | Литография | Литография |

На рис. 16 приведена зависимость ширины щели полупроводящих нанотрубок от их наружного диаметра. Только одностенная углеродная нанотрубка демонстрирует характеристики, похожие на характеристики полупроводника. Можно видеть, что одностенная УНТ может иметь разную ширину запрещенной зоны: 1,5 эВ, как у арсенида галлия, приблизительно 1 эВ, как у кремния или 0,7эВ, как у германия, в зависимости от различий в диаметре. Однако, из вышеприведенных значений становится ясно, что ширина запрещенной зоны изменяется уже при возрастании диаметра нанотрубки всего на 0,1 нм, что вызывает необходимость жесткого контроля диаметра одностенной углеродной нанотрубки с точностью приблизительно 0,1 нм для того, чтобы получить желаемую ширину запрещенной зоны. Следует отметить, что большое внимание должно уделяться не только контролю числа стенок нанотрубки и наружного диаметра. Имеется и множество других параметров: типа хиральности, длины, направления, положения роста и других параметров, контролирующих характеристики углеродных нанотрубок. Поэтому для того, чтобы УНТ можно было применять в технологии полупроводников, необходимо тщательно контролировать каждый из этих параметров.

Рис. 16. Зависимость ширины щели полупроводящих нанотрубок от их наружного диаметра

Для того, чтобы контролировать наружный диаметр углеродной нанотрубки, необходимо также иметь оборудование для изменения формы и толщины каталитической металлической поверхности, либо использовать мельчайшие частицы с заранее заданным диаметром. Необходимо иметь возможность выращивания точно заданного количества углеродных нанотрубок в точно заданном месте, и с точно заданными длиной и диаметром.

Таким образом, основными требованиями к технологии выращивания нанотрубок являются: 1- контроль положения; 2- контроль плотности; 3 - контроль направления роста; 4- контроль хиральности; 5 - рост при низкой температуре.

Технологии изготовления полупроводниковых приборов с использованием УНТ должны обеспечивать: 1 - сопротивление контакта; 2 – травление; 3 – легирование; 4 - пассивацию и т.д.

Что касается других применений нанотрубок, то, например, по сообщению фирмы IBM, углеродные нанотрубки обладают свойством электролюминесценции, что предполагает использование углеродных нанотрубок в качестве оптических элементов.

**1.2. 8. Диагностика наноструктур**

Современное развитие физики и технологии твердотельных наноструктур, проявляющееся в непрерывном переходе топологии элементов электронной техники от субмикронных размеров к нанометровой геометрии потребовало разработки новых и усовершенствования существующих диагностических методов, а также создания новых образцов оборудования для анализа свойств и процессов в низкоразмерных системах, в наноматериалах и в искусственно создаваемых наноструктурах. В этом плане особое внимание уделяется созданию и применению взаимодополняющих высокоразрешающих методов практической диагностики и характеризации наноструктур, обеспечивающих получение наиболее полной информации об основных физических, физико-химических и геометрических параметрах наноструктур и протекающих в них процессов.

В настоящее время существует огромное число методов диагностики, еще больше методик исследования физических и физико-химических параметров и характеристик твердотельных и молекулярных структур. Вместе с тем, получение наноструктур, низкоразмерных систем и новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами, предназначенных для применения в современной электронике, ставит и новые диагностические задачи. Для решения современных задач диагностики наноструктур требуется адаптация к этим задачам традиционных методов (оборудования), а также развитие новых, прежде всего локальных (до масштабов 0,1 нм) методов исследования и анализа свойств и процессов, присущих объектам нанометровой геометрии и системам пониженной размерности.

Методы нанодиагностики должны быть по возможности неразрушающими и давать информацию не только о структурных свойствах нанообъектов, но и об их электронных свойствах с атомным разрешением. Для разработки нанотехнологий решающей оказывается также возможность контролировать атомные и электронные процессы *in situ* с высоким временным разрешением, в идеале до времени, которое равно или меньше периода атомных колебаний (до 10-13 с и менее). Необходима также диагностика электронных, оптических, магнитных, механических и иных свойств нанообъектов на «наноскопическом» уровне. Невозможность полного удовлетворения этих требований приводит к использованию комплекса методов диагностики нанообъектов, среди которых необходимо выделить следующие основные группы методов:

1. ***электронная микроскопия высокого разрешения****,* которая исторически явилась первым методом, реально обеспечивающим визуализацию структуры объектов с атомным разрешением. К этому методу примыкают различные модификации электронной микроскопии, обеспечивающие проведение химического анализа нанообъектов, исследования *in situ,* поверхностно-чувствительные методы, такие как отражательная электронная микроскопия, микроскопия медленных электронов и другие. Во многих случаях электронная микроскопия высокого разрешения является единственным источником получения информации о внутренней структуре и структуре границ раздела таких нанообъектов,как квантовые ямы и квантовые точки;
2. ***методы сканирующей электронной микроскопии****,* которые вплотную приближаются по разрешению к атомному разрешению, сохраняя возможность получения информации без существенного (разрушающего)воздействия на исследуемые объекты с получением разнообразной информации о химическом составе нанообъектов, их электрических (метод наведенного тока), оптических (катодолюминесценция) и других свойствах. Для получения информации об объеме нанообъектов развиты методы электронной томографии;

***сканирующая туннельная микроскопия****, в частности,* ***сканирующая туннельная микроскопия в режиме локальной электронной спектроскопии,*** которая используется для исследования электронной структуры углеродных нанотрубок, являющаяся поверхностно-чувствительным методом визуализации атомной структуры твердых тел; проведение спектроскопических исследований с атомным разрешением вместе с привлечением возможностей для *in situ* экспериментов при повышенных и пониженных температурах, использование других методов зондовой микроскопии и возможности манипулирования на уровне отдельных атомов делают эти методы важнейшим инструментом для нанотехнологий и нанодиагностики;

1. ***рентгендифракционные методы****,* особенно с использованием высокой светимости синхротронных источников, они дают уникальную информацию об атомной структуре нанообъектов без их разрушения;
2. ***методы электронной спектроскопии* для химического анализа, *оже-электронной спектроскопии, методы фотоэлектронной спектроскопии, романовской и ИК-спектроскопии, метод фотолюминесценции****,* которые активно развиваются с повышением разрешающей способности, что делает эти методы весьма полезными при диагностике нанообъектов.

Дальнейшее развитие всевозможных методов диагностики (в частности, диагностики, встроенной в технологию), учитывающих специфику нанообъектов и их характерные размеры, является неотъемлемой частью развития высоких технологий получения и анализа свойств наноструктур нового поколения. При этом формирование комплексных методов практической диагностики диктуется как технологическими задачами получения наноструктур и создания на их базе следующего поколения электронных и оптических устройств (транзисторов, лазеров и др.), так и их специфическими физическими, физико-химическими и топологическими свойствами, часто не укладывающимися в рамки стандартных представлений о свойствах вещества.

## 2. Поиск и исследование источников получения информации для разработки баз данных

##  2.1. Разработка предметного структурного классификатора по нанотехнологиям и наноматериалам.

 Описанные выше предметные области поиска и извлечения знаний по тематическому направлению деятельности ННС наноэлектроника (наноматериалы и нанотехнологии) формируют общее, порой избыточное для отдельных пользователей, но недостаточно полное представление о той части материального мира, данные о котором являются предметом деятельности определенных групп пользователей. Поэтому процесс расширения предметной области будет продолжаться и на следующих этапах выполнения настоящей работы.

С развитием новых компьютерных и телекоммуникационных технологий расширяются массивы электронных ресурсов и возможности оперативного получения новой информации. Основная часть ее представляется в виде баз данных (БД), доступных на различных физических носителях или в режиме удаленного доступа. Их создание осуществляется, как правило, с использованием специальных программных комплексов, называемых Системы Управления Базами Данных (СУБД).

Особенность СУБД – это наличие процедур для ввода и хранения не только самих данных, но и описаний их структуры. БД – это файл, в котором данные разделены на однородные группы, объекты, а внутри каждого объекта на поля. База данных снабжается описанием хранимых в ней данных. Одна или несколько баз данных, работающих под управлением СУБД, называются Банком Данных (БнД).

После проведенного анализа предметной области в заданном направлении деятельности ННС наноэлектроника (наноматериалы и нанотехнологии), следующим этапом создания (проектирования) БД является первичное структурирование полученной информации в соответствие с указанными запросами пользователей. Этот этап позволяет создать, так называемую, инфологическую модель данных, представляющую собой обобщенное неформальное описание создаваемой базы данных, по сути своей объединяющей представления отдельных конечных пользователей о том, какая должна быть база данных.

 Нанотехнология и наноиндустрия – новые направления знаний, объединяющие все научные дисциплины (физика, химия, биология) и сочетающие все технические приложения. Это создает глобальную структуру области в целом. Информационное обеспечение существования и развития этой области науки и техники, естественно, требует определенной формальной классификации. В работе Классификатор требуется как базовая научно предметная система для разработки электронной библиотеки и разграничения всей аппаратно-программной структуры системы ННС. Проведение этой работы было осуществлено на основе поисков, исследований и обзоров существующей в России и мире научно-технической информации по направлениям. Концентрированная единая сводка этих результатов по направлению **Наноэлектроника** приведена ниже в виде перечня, который по мере дальнейшего изучения предмета будет уточняться и расширяться.

**Структурный классификатор по нанотехнологиям и наноматериалам**

* Нанотранзисторы.
* Микросхемы на элементной базе наноэлектроники.
* Электронные нанокомпоненты (элементная база) для интегрированных сверхскоростных систем генерации, хранения, передачи и обработки информации.
* Оптические нанокомпоненты систем сверхскоростной «сверхплотной» высокопомехозащитной передачи и обработки информации.
* Магнитные нанокомпоненты «сверхплотного» хранения информации
* Запоминающие устройства мультитерабитной емкости. Спинтроника.
* Наноструктурированные процессоры.
* Твердотельные квантовые компьютеры
* Наноэлементы и приборы с использованием квантовых эффектов.
* Интегральные наносенсорные устройства минимального размера, веса, энергопотребления, способные аккумулировать, обрабатывать и передавать большие массивы данных.
* Сверхяркие полупроводниковые диоды и мощные полупроводниковые лазеры на основе наноразмерных гетероструктур.
* Лазеры на квантовых ямах и свехрешетках,
* Лазеры на квантовых точках
* СВЧ – транзисторы с двумерным электронным газом
* Запоминающие устройства с гигантским магнитосопртивлением
* Новые поколения сегнетоэлектрических наноструктур для электроники и устройств на их основе.
* Молекулярная наноэлектроника. Политроника.
* Наноэлектронные компоненты для датчиков, регистрирующих и анализирующих устройств, работающих в экстремальных условиях (перемещения, давления, износа, температуры и др.).
* Информационно-аналитические системы для создания надежных виртуальных моделей нанопроцессов и новых наноструктур с использованием супер-ЭВМ.
* Системы виртуальной реальности, основанные на наноструктурной электронике, обеспечивающие более доступные и эффективные методы тренинга.
* Структуры на основе сверхтонких слоев полупроводников, металлов, диэлектриков, магнитных материалов для наноэлектроники и спинтроники.
* Квантовые точки и нити
* Сверхрешетки, спи­новые сверхрешетки, сверхрешетки с напряженными слоями, легированные сверхрешетки, политипные сверхрешетки
* Фотонные кристаллы
* Фуллерены
* Нанотабулярные материалы
* Полимерные полупроводники
* Термо - и магнитоэлектрические материалы для микропроцессорной техники на основе полупроводниковых молекулярных соединений
* Наноразмерные зондовые элементы для бесконтактной сверхлокальной высокочувствительной регистрации электромагнитных, оптических, акустических и тепловых полей и излучений
* Принципы и технологические приемы самосборки неорганических и органических наноструктур
* Наноразмерные локальные процессы нанесения, удаления и модифицирования материалов
* Зондовые и пучковые нанотехнологии, обеспечивающие синтез материалов с точностью до моноатомных (мономолекулярных) слоев
* Плазменные нанотехнологии создания наноструктур, нанотрубок и покрытий
* Полевые методы наноразмерного структурирования пленок материалов наноэлектроники
* Гетерогенные технологии наноструктур
* Технологическое и контрольно-диагностическое оборудование нового поколения на основе сверхвысоковакуумных, нанозондовых и нанолитографических систем, прецизионных средств формирования и измерения наноразмерных объектов и величин
* Атомно-силовые и туннельные технологические и диагностические устройства
* Экспресс-методы регистрации электрических, оптических, магнитных, акустических и других видов полей наноразмерных объектов и их влияния на экосистему.

 **2.2. Поиск источников получения информации для разработки баз данных**

Поисковые действия в периодической печати и Интернет с использованием данных приведенного классификатора и других требований задания работы позволили выделить следующие источники получения информации:

 - Сканирование и распознавание печатных материалов: книг, статей и т.д.

- Реферативные БД

базы ВИНИТИ – полный доступ (оплата за открытые рефераты)

- Патентные БД:

PATFT (США) – полный доступ

Questel (Европа) – доступа нет

Патенты РФ – доступа нет

Патенты Японии – доступа нет

- Локальные и интернет-БД нормативно-методических и правовых документов:

КонсультантПлюс – полный доступ (для некоммерческого использования)

- Научная периодика:

Полнотекстовые интернет-БД издательств отдельных журналов или издательских консорциумов

ScienceDirect – очень ограниченный доступ

SpringerLink – полный доступ

Nature Publishing Group – частичный доступ

Wiley InterScience – частичный доступ

SPIE Digital Library – полный доступ

**Informa**world (Taylor & Francis) – частичный доступ

Science – полный доступ (1997–2009)

Институт Физики (IOP) – полный доступ

arXiv (препринты) – полный доступ

Oxford University Press – частичный доступ

Cambridge University Press – очень ограниченный доступ

ACS Publications – полный доступ

Royal society of chemistry – частичный доступ

PROLA – полный доступ

AIP Journals – полный доступ

HighWire Press – частичный доступ

Журналы ФТИ им. А.Ф. Иоффе – полный доступ

Успехи Физических Наук – полный доступ

ЖЭТеоретической Физики – полный доступ (с 2000 г.)

Письма ЖЭТФ – полный доступ

Микросистемная техника – полный доступ.

- Полнотекстовые интернет-БД аггрегаторов периодики:

**EBSCO** – частичный доступ

Научная электронная библиотека РФФИ – частичный доступ

БД на компакт-дисках

- Научно-популярная периодика:

«Наука и жизнь» – открытый доступ

«Знание – Сила» – частичный доступ

«Химия и жизнь» – частичный доступ

«В Мире Науки» – частичный доступ

- Средства массовой информации: газеты, теле- и радиоканалы, «общественные» журналы

- Научные монографии, учебные пособия для ВУЗов

SpringerLink – полный доступ

- Новостные сайты, RSS-ленты по научной тематике

Science – полный доступ

Nature – полный доступ,

А также:

Научно-популярные и образовательные сайты и порталы:

Сайты радиостанций

Сайты официальных и государственных учреждений, фондов

Сайты университетов, академических и научных обществ

Сайты промышленных компаний, фирм-производителей программного обеспечения

Web-страницы научных групп, лабораторий, личные страницы учёных

Блоки научной тематики.

Количественная оценка ссылок по тематике и годам по некоторвм из приведенных выше источников имеет вид:

ВИНИТИ Физика: поиск по термину «нано»:

2006 г. – 2008 г. – 21842 реферата,

2001г. – 2005 г. – 22207 рефератов,

1996 г. – 2000 г. – 8193 реферата

Поисковый научный сервер Scirus ([www.scirus.com](http://www.scirus.com))

Поиск по термину «nano\*» с 1998 по 2008 гг. – 5873431 ссылка

Распределение по источникам:

Научные журналы – 383245 ссылок

* ScienceDirect (213251)
* MEDLINE / PubMed (68100)
* Scitation (49374)
* Institute of Physics (25,544)
* Nature Publishing Group (9,873)
* American Physical Society (6,812)
* Pubmed Central (3,734)
* BioMed Central (1,884)
* Crystallography Journals Online (1,700)
* Royal Society Publishing (1,027)
* Hindawi Publishing Corporation (919)
* SAGE Publications (624)
* Maney Publishing (394)
* SIAM (6)
* Project Euclid (3)

Предпочтительные web-страницы – 409752 ссылки

* Patent Offices (351,786)
* NDLTD (23,243)
* Digital Archives (18,716)
* E-Print ArXiv (7,944)
* IISc (1,296)
* RePEc (1,289)
* IISc Eprints (1,260)
* DiVA (1,256)
* Caltech (1,226)
* NASA (1,037)
* MIT OpenCourseWare (1,016)
* University of Toronto T-Space (844)
* The University of Hong Kong (746)
* Humboldt (706)
* Way (447)
* HKUST (180)
* Cognitive Sciences e-prints archive (51)
* IISc ETD (36)
* Organic Eprints (35)
* Curator (17)
* PsyDok (8)
* MD Consult (1)

Прочие web-страницы – 5080434 ссылки

Распределение по типам файлов:

* HTML (5,284,777)
* PDF (789,592)
* Word (26,766)
* PPT (19,040)
* PS (6,651)
* TeX (711)

**2.3. Организация поиска информации**

**(на примере работы с реферативными БД)**

Типовая методика работы с базой данных на примере работы с реферативными БД приведена на рис. 17.

Поисковый запрос

Словарь терминов

Рабочие инструкции

Проверка соответствия

Список рефератов

Перевод
на русский

занесение в базу данных рефератов

Нужен ли полный текст

Анализ,

интеллектуальный поиск

Пополнение словаря терминов

Скачивание полнотекстовых материалов

Заказ в МБА

Статистика заполнения БД

Занесение в базу данных текстов

Отчёт

Рис. 17. Типовая методика работы с базой данных

По этой методике могут осуществляться:

1. Работа с электронными версиями научных журналов: выбор из списка источников журналов, целиком посвящённых нанотехнологиям. Просмотр содержания по выпускам. Далее по схеме рис.17.

2. Работа с научными монографиями, учебными пособиями

3. Работа с патентными БД

4. Работа с правовыми БД: поиск в БД «КонсультантПлюс». Скачивание полных текстов законов (или отдельных статей), постановлений, разъяснений и т.п. В остальном – по схеме рис.17.

5. Работа с научно-популярной периодикой, и материалами СМИ: **с**оставление или заимствование библиографических описаний. Далее по схеме рис.17.

6. Работа с материалами Интернета: использование поисковых сайтов. Отслеживание избранных сайтов с помощью RSS-технологий. Составление коллекций закладок. В остальном – по схеме рис.17.

**2.4. Разработка структуры информационного наполнения баз данных**

На основании проведенных поисковых действий и первичного структурирования предметной области с целью формирования структуры баз данных на последующих этапах выполнения работы представляется возможным составить следующее совокупное логическое описание полей данных.

**Наноматериалы.**

Для отражения наиболее существенных свойств и связей наноматериалов с технологиями их получения и последующей приборной реализацией заданного тематического направления ННС наноэлектроника приходится строить сложную иерархическую структуру, позволяющую описать ряд качественных и количественных их характеристик. В качестве примера ниже приведены наиболее существенные и очевидные различия между наноматериалами:

- по поведению в магнитном поле: сильномагнитные (магнетики) и слабомагнитные

- по поведению в электрическом поле: проводники, полупроводники и диэлектрики

- по химическому составу: органические и неорганические, в том числе, полупроводники: элементарные (Si, Ge), химические соединения (А3В5, А2В6, А4В6, А4В4), твердые растворы

- по типу, параметрам и кристаллографической ориентации кристаллической решетки, ширине запрещенной зоны и т.д.

**Нанотехнологии**

Следует различать два вида нанотехнологий: нанотехнологии связанные с получением наноматериалов и нанотехнологии, связанные с изготовлением наносистемных устройств на основе наноматериалов. Нанотехнологии связанные с получением наноматериалов, в свою очередь, принято разделять на технологии «снизу – вверх» и технологии «сверху – вниз».

Подход «сверху – вниз» основан на уменьшении размеров физических тел механической или иной обработкой, вплоть до получения объектов с нанометровыми параметрами (например, литография, травление). Обратный подход - «снизу – вверх» - заключается в том, что сборка создаваемой конструкции осуществляется непосредственно из атомов, молекул и других структурных элементов, располагаемых в требуемом порядке. Примерами этого подхода являются поштучная укладка атомов на кристаллической поверхности при помощи сканирующего туннельного микроскопа или слоев атомов с помощью молекулярно – пучковой эпитаксии. В связи с этим для описания нанотехнологий должна быть построена сложная классификационная структура следующего обобщенного вида:

- по типу протекающих процессов (физические, химические и др.)

- по типу операций (создание, синтез, сборка, обработка, трансформация, разрушение, декомпозиция)

- по среде протекания процессов (вакуумные, газофазные, жидкофазные, твердотельные, комбинация сред на разных этапах) и т.д.

Технология характеризуется, кроме того, перечнем и определением последовательности процессов или операций, перечнем используемых материалов, связанных с процессами, в которых они участвуют, перечнем используемого оборудования с привязкой к процессам. Каждый процесс описывается широким набором количественных характеристик, определяющих условия проведения, временные параметры, количества или соотношения используемых материалов (веществ) или конструкционных элементов, физические параметры, химические параметры и др.

**Наноустройства**

Наиболее общими характеристиками наноустройств, как продукции предназначенной для выполнения определенных технических функций и подлежащих реализации могут быть следующие: наименование, назначение, область применения, технология, использованная при получении, использованные наноматериалы, элемент, имеющий наноразмер, конструкция и принцип работы, организация, обеспечивающая производство, объем продаж и т.д. Так же продукт может характеризоваться рядом количественных параметров - геометрических, физических, химических, биологических.

Многие категории данных предметной области при их отображении в ба-зе данных удобно использовать в форме словаря - специальной таблицы, содер-жащей, по крайней мере, слово словарной строки и код первичного ключа.

**2.5. Формирование предварительных реестров баз данных**

Из анализа собраной информации предварительные реестры наноматериалов и нанотехнологий наноэлектроники могут быть представлены в следующем виде:

**Наноматериалы:**

1. Нанокристаллы в органической матрице: групп II—VI (например, CdS), III—V (например, InP, GaP, GaInP2, GaAs, InAs) и стекле I—VII (CuCl, CuBr, CuI)

2. Квантовые точки: InAs /GaAs (001), Ge/Si(001), InGaAs/ GaAs (001), InAs/ GaAs (001)

3. Квантовые проволоки: GaAs на вицинальной поверхности AlAs(00l), а также GaAs/AlAs(311) и AlAs/GaAs(311), однослойные углеродные нанотрубки и др.

4. Сверхрешетки с квантовыми точками

5. Магнитные наноструктуры: многослойной структуры из сверхтонких ферромагнитных и диамагнитных слоев (например, Со/Сu), искусственные кристаллы, содержащие магнитные кластеры Мn12 и Fe3 и др.

6. Сверхрешетки в системе **GaAs—AlxGa1-xAs (0,15 <x<0,35), InAs — GaSb,** а также тройных соединений **GaxIn1-xAs и GaAsySb1-y*,***

7. Спиновые сверхрешетки в системе **Hg0,99Mn0,01Se—Hg0,976Cd0,024Se,**

**Cd1-xMnxTe—Cd1-yMnyTe**

8. Сверхрешетки с напряженными слоями (СНС) (пять полупроводниковых систем): **GaAs—InxGa1-xAs, GaAs—GaAsxP1-x , GaP—GaAsxP1-x , ZnS—ZnSe и GaSb—AlSb**.

9. Сверхрешетки вида полуметалл — полупроводник (КРТ): **HgTe-CdTe,** **Hg1-xCdxTe-CdTe**

10. Сверхрешетки на основе кремния, в том числе:

**- Si—Si1-xGex**

- аморфные сверхрешетки из гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si:H),

- гидрогенизированного аморфного германия (a-Ge:H),

- нитрида кремния (a-SiNx:H),

- карбида кремния (a- Si1-xCx:H),

11. Композиционные сверхрешетки типа II (тройные соединения): **In1-xGaxAs** и **GaSb1-yAsy**, **In1-xGaxAs и GaSb1-yAsy**, где предельный случай *х* = 0, *у* = 0 отвечает сверхрешетке InAs—GaSb, **РbТе—Pb1-xSnxTe**.

12. Политипные сверхрешетки **InAs—GaSb слоев AlSb**, конструируются из базовых многопереходных элементов типа ВАС, АВСА, АСВСА и т. д., где А означает **AlSb**, В —**GaSb**, а С —**InAs**.

13. Легированные сверхрешетки на основе: **GaAs, Si,** соединения **РbTе, Pb1-xGexTe или Pb1-xSnxTe**.

14. Легированные композиционные сверхрешетки: нелегированные слои **i-GaAs** зажаты между чередующимися легированными *п-* и р-слоями **AIxGa1-xAs**.

15. Пористый и нанокристаллический кремний

16. Углеродные нанотрубки различной хиральности и диаметра и др.

17. Гетероэпитаксиальные структуры AlGaN/GaN

**Нанотехнологии и методы характеризации:**

1. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)

2. Металлоорганическая газовая эпитаксия

3. Химическое парофазное осаждение (CVD)

4. Электронно - лучевая и рентгеновская литография

5. Литография сверхдальнего ультрафиолета (EUV – литография)

6. Наноимпринтинг (печать с помощью штампа) - развиваемые взамен оптической литографии новые групповые технологии получения рисунка с разрешением ≤ 10 нм. Технологии позволяют реализовать как получение маски для дальнейших технологических операций, так и функциональных структур.

7. Зондовые нанотехнологии с использованием атомно-силовой и туннельной микроскопии (технологии «снизу-вверх»), включая локальное анодное окисление ультратонких слоев КНИ и др.

8. АСМ – метод одновременной механической модификации и анодного окисления (TINE&MEMO)

9. Наноструктурирование, основанное на применении прецизионной литографии и селективного плазменного травления

10. Просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия

11. Отражательная электронная микроскопия в сверхвысоком вакууме (СВВ ОЭМ)

12. Дифракция медленных электронов (ДБЭ) и дифракция быстрых отраженных электронов (ДОБЭ)

13. Лазерная эллипсометрия

13. Полевая электронная и ионная микроскопия

14. Рентгеновская спектроскопия и дифракция

15. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС)

16. Ультрафиолетовая электронная спектроскопия (УФЭС)

17. Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС)

18. Инфракрасная и рамановская спектроскопия

19. Фотоэмиссия и рентгеновская спектроскопия

20. Магнитный резонанс

21. Ионная имплантация

22. Ионное и реактивно-ионное травление

23. Методы получения наночастиц:

электроискровая эрозия, ионно –плазменное распыление, осаждение из газовой фазы, механическое размалывание, химические методы, самоорганизация в плазме микроволнового газового разряда низкого давления**,** методы коллоидной химии, детонационный синтез и электровзрыв, кристаллизация аморфных сплавов и выделение нанофаз и др.

24. Методы получения УНТ:

электродуговое распыление графита, абляция графита с помощью лазерного или солнечного облучения, каталитическое разложение углеводородов в процессах химической газофазной эпитаксии и СВЧ плазменного эпитаксиального осаждения из газовой фазы.

**Список использованных источников информации**

1. Атомная структура полупроводниковых систем/ отв. Ред. А.Л. Асеев. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2006. – 292 с.

2. G.Markovich, C.P.Collier et all. Architectonic quantum dot solids. Acc. Chem. Res. 1999, v.32, p.415-423.

3. M. Nirman, L.Brus. Luminescence photophysics in semiconductor nanocrystals. Acc. Chem. Res. 1999, v.32, p.407-414.

4. S.Empedocles, M.Bawendi Spectroscopy of Single CdSe Nanocrystallites. applications. Pure Appl.Chem., 2000, v.72, p. 3-9.

5. R. Turton. The quantum dot. A journey into the future of microelectronics. 2000, New York, Freeman, p.211.

6. H.Jeong, A.M.Chang. The Kondo effect in an artificial q quantum dot molecule. Science 2001, v.293, p.2221-2223.

7. S.C.Farmer, T.E.Patten. Photoluminescent polymer/quantum dot composite nanoparticles.Chem Mater. 2001, v.13, p.3920-3926.

8. T.Baron, F.Martin, P.Mur et.al. Low pressure chemical vapor deposition growth of silicon quantum dots on insulator for nanoelectronics devices. Appl. Surf. Sci. 2000, v.164, p.29-34.

9. G.Markovich, C.Patrick, S.E.Henrichs, at. al. Architectonic quantum dot solids. Acc.Chem.Res. 1999, 32, 415-423.

10. H.-M.Xiong, Xu Zhao, Jie-Sheng Chen New polymer-Inorganic Nanocomposites: PEO-ZnO and PEO-ZnO-LiCLO4 films J.Phys. Chem.B 2001,105, 10169-10174.

11. S.Empedocles, M.Bawendi Spectroskopy of single CdSe nanocrystallines А.Chem.Res. 1999, 32, 389-396.

12. M.Nirmal, L.Brus Lumininescence Photophysics in semiconductor nanocrystals. Acc.Chem.Res. 1999, 32, 407-414.

13. S.P.Gubin Metalcontaining nano-particles within polymeric matrices: preparation, structure and properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002, 202, 155-163.

14. А.А.Алехин, С.Ю.Суздальцев, Р.К. Яфаров. Тонкая структура углеводородных пленок, полученных в плазме микроволнового газового разряда низкого давления. // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29, вып. 15. С. 73-79.

15. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры./ Под ред. Л.Ченга, Л. Плога, М.:Мир, 1989, 582 с.

16. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор. ФТП, 1998г, 32, №4. С.385 – 410.

17. J.W Cahn. Trans. Met. Soc., **242,** 166 (1968).

18. А.Г. Хачатурян. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов, М., Наука, 1974.

19. I.P. Ipatova, V.G. Malyshkin, V.A. Shchukin. J. Appl. Phys., **74,** 7198 (1993).

20. I.P. Ipatova, V.G. Malyshkin, V.A. Shchukin. Phil. Mag. B, **70,** 557 (1994).

21. Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков, С.И. Чикичев. Кремний-германиевые эпитаксиальные пленки: физические основы получения напряженных и полностью релаксированных гетероструктур. УФН. 2001 г.Том 171, № 7. С.689 – 715.

22. А.Ф. Андреев. ЖЭТФ, **80,** 2042 (1981).

23. В.И. Марченко. ЖЭТФ, **81,** 1141 (1981)

24. V.A. Shchukin, A.I. Borovkov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev. Phys. Rev. B, **51,** 17767 (1995).

25. M. Kasu, N. Kobayashi. Appl. Phys. Lett., **62,** 1262 (1993).

26. Н.Н. Леденцов, Г.М. Гурьянов, Г.Е. Цирлин, В.Н. Петров, Ю.Б. Самсоненко, А.О. Голубок, С.Я. Типисев. ФТП, **28,** 903 (1994).

27. R. Notzel, N.N. Ledentsov, L. D¨aweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. Phys. Rev. B, **45,** 3507 (1992).

28. Ж.И. Алфёров, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, Б.Я. Мельцер, В.М. Устинов. ФТП, **26,** 1715 (1992).

29. M. Higashiwaki, M. Yamamoto, T Higuchi, S. Shimomura, A. Adachi, Y Okamoto, N. Sano, S. Hiyamizu. Jpn. J. Appl. Phys., 35, L606 (1996).

30. V.A. Shchukin, A.I. Borovkov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Phys. Rev. B, **51,** 10104 (1995).

31. V.A. Shchukin, A.I. Borovkov. Abstracts Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 20-24, 1994; p. 227.

32. L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. Le Roux. Appl. Phys. Lett., **47,** 1099 (1985).

33. D.E. Eaglesham, M. Cerullo. Phys. Rev. Lett., **64,** 1943 (1990).

34. J.-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett., **65,** 1020 (1990).

35. D. Vanderbilt, L.K. Wickham. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **202,** 555 (1991).

36. C. Ratsch, A. Zangwill. Surf. Sci., **293,** 123 (1993).

37. И.M. Лифшиц, B.B. Cлезов. ЖЭТФ, 35, 479 (1958).

38. F. Glas, C. Guille, P. Henoc, F. Houzay. Inst Phys. Conf. Ser., **87,** 71 (1987).

39. J.M. Moison, F. Houzay, F. Barthe, L. Leprince, E. Andre, O. Vatel. Appl. Phys. Lett., **64,** 196 (1994).

40. D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbaars, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., 63, 3203 (1993).

41. N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirsraedter, J. Christen, R. Heitz, J. Bohrer, F. Heinrichsdorf, D. Bimberg, S.S. Ru-vimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Proc. 22nd Int. Conf. Phys. Semicond,* Vancouver, Canada, August 1994, ed. by D.J. Lockwood (World Scientific, Singapore) v. 3, p. 1855.

42. G. Cirlin, G.M. Guryanov, A.O. Golubok, S.Ya Tipissev, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, M. Grundmann, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **67,** 97 (1995).

43. M. Grundmann, J. Christen, N.N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. Lett., **74,** 4043 (1995).

44. D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U Richter, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Thin Sol. Films, **267,** 32 (1995).

45. S.S. Ruvimov, P. Werner, K. Scheerschmidt, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. B, **51,** 14766 (1995).

46. M. Grundmann, N.N. Ledentsov, R. Heitz, L. Eckey, J. Christen, J. Bhrer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Phys. St. Sol. (b), **188,** 249 (1995).

47. H.H. Леденцов, B.M. Устинов, C.B. Иванов, Б.Я. Meльцер, M.B. Maкcимов, П.С. Копьев, Д. Бимберг, Ж.И. Aлферов. УФН, **166,** 423 (1996).

48. О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства. Обзор. Физика и техника полупроводников, 2000, том 34, вып. 11. С.1281 – 1299.

49. Y. Chen, J. Washburn. Phys. Rev. Lett., **77,** 4046 (1996).

50. D.E. Jesson, G. Chen, K.M. Chen, S.J. Pennycook. Phys. Rev. Lett., **80,** 5156 (1998).

51. M. Kastner, B. Voigtl¨ander. Phys. Rev. Lett.,¨ **82,** 2745 (1999).

52. X.L Kamins, G. Medeiros-Ribeiro, D.A.A. Ohlberg, R. Stanley Williams. J. Appl. Phys., **85,** 1159 (1999).

53. X.L Kamins, E.C. Carr, R.S. Williams, S.J. Rosner. J. Appl. Phys., **81,** 211 (1997).

54. G. Medeiros-Ribeiro, A.M. Bratkovski, T.I. Kamins, D.A.A. Ohlberg, R.S. Williams. Science, **279,** 353 (1998).

55. G. Medeiros-Ribeiro, T.I. Kamins, D.A.A. Ohlberg, R.S. Williams. Phys. Rev. B, **58,** 3533 (1998).

56. T.I. Kamins, G. Medeiros-Ribeiro, D.A.A. Ohlberg, R.S. Williams. Appl. Phys. A, **67,** 727 (1998).

57. R.S. Williams, G. Medeiros-Ribeiro, T.I. Kamins, D.A.A. Ohlberg. J. Phys. Chem. B, **102,** 9605 (1998).

58. T.I. Kamins, G.A.D. Briggs, R. Stanley Williams. Appl. Phys. Lett., **73,** 1862 (1998).

59. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. Phys. Rev. Lett., **75,** 2968 (1995).

60. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. Abstracts Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 26-30, 1995; p. 392.

61. V.A. Shchukin, A.I. Borovkov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, M. Grundmann, D. Bimberg. Phys. Low-Dim. Structur., **12,** 43 (1995).

62. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. Proc. Int. Semicond. Dev. Res. Symp., December 1995, Charlottesville, Virginia, USA; v. 2. p. 581.

63. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, P.S. Kop'ev, D Bimberg. Surf Sci., **352-354,** 117 (1996).

64. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, V.G. Malyshkin, I.P. Ipa-tova, P.S. Kop'ev, D Bimberg. Abstracts Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 24-28, 1996; p. 439.

65. J.D. Eshelby. Proc. R. Soc. London, Ser. A, **241,** 376 (1957).

66. V.A. Markov, O.P. Pchelyakov, L.V. Sokolov et al. Surf Sci., **250,** 229 (1991).

67. I. Goldfarb, P.T Hayden, J.H.G. Owen, G.A.D. Briggs. Phys. Rev. Lett., **78,** 3959 (1997); Phys. Rev. B, **56,** 10459 (1997).

68. Y Kim, B.D. Min, E.K. Kim. J. Appl. Phys., **85,** 2140 (1999).

69. J. Zhu, K. Brunner, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **73,** 620 (1998).

70. J. Johansson, W Seifert Appl. Surf Sci., **148,** 86 (1999).

71. O.P. Pchelyakov, I.G. Neisvestnyi, Z.Sh. Yanovitskaya Phys. Low-Dim. Structur., **10/11,** 389 (1995).

72. J.A. Floro, E. Chason, M.B. Sinclair, L.B. Freund, G.A. Lucadamo. Appl. Phys. Lett., **73,** 951 (1998).

73. H. Omi, T. Ogino. Appl. Surf Sci., **130-132,** 781 (1998).

74. G. Springholz, V Holy, M. Pinczolits, G. Bauer. Science, **282,** 734 (1998).

75. Y.W. Zhang. S.J. Xu, C.-H. Chiu. Appl. Phys. Lett., **74,** 1809 (1999).

76. J.A. Floro, V.B. Sinclair, E. Chason et al. Phys. Rev. Lett., **84,** 701 (2000).

77. F. Liu, M.G. Lagally. Surf Sci., **386,** 169 (1997).

78. G. Abstreiter, P. Schittenhelm, C. Engel, E. Silveira, A. Zrenner, D. Meertens, W Jager. Semicond. Sci. Technol., ¨11, 1521 (1996).

79. A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, Yu.Yu. Proskuryakov, A.I. Nikiforov, O.P. Pchelyakov, S.A. Teys, A.K. Gutakovskii. Appl. Phys. Lett., **75,** 1413 (1999).

80. C.S. Peng, Q. Huang, W.Q. Cheng et al. Appl. Phys. Lett., **72,** 2541 (1998).

81. M. Abdallah, I. Berbezier, P. Dawson, M. Serpentini, G. Bremond, B. Joyce. Thin Sol. Films, 336, 256 (1998).

82. J. Zhu, K. Brunner, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., 72, 424 (1998).

83. K. Sakamoto, H. Matsuhata, M.O. Tanner, D. Wang, K.L. Wang. Thin Sol. Films, **321,** 55 (1998).

84. H. Omi, T. Ogino. Appl. Surf. Sci., **130-132,** 781 (1998).

85. H. Omi, T. Ogino. Phys. Rev. B, 59, 7521 (1999).

86. D. Martou, P. Gentile, N. Magnea J. Cryst Growth. **201/202,** 101 (1999).

87. Y. Homma, P. Finnie, T. Ogino, H. Noda, T. Urisu. J. Appl. Phys., 86, 3083 (1999).

88. C.W Oh, E. Kim, Y.H. Lee. Phys. Rev. Lett., 76, 776 (1996).

89. A. Nagashima, T. Kimura, J. Yoshino. Appl. Surf. Sci., 130-132,248 (1998).

90. T. Tezuka, N. Sugiyama J. Appl. Phys., 83, 5239 (1998).

91. V. Le Thanh. Thin Sol. Films, **321,** 98 (1998).

92. X. Deng, M. Krishnamurthy. Phys. Rev. Lett., 81, 1473 (1998).

93. O.G. Schmidt, С Lange, K. Eberl, О Kienzle, F. Ernst Thin Sol. Films, **321** 70 (1998).

94.О. Leifeld, R. Hartmann, E. Muller, E. Kaxiras, K. Kern, D. Grutzmacher. Nanotechnol., 10, 122 (1999).

95. E.S. Kim, N. Usami, Y Shiraki. Appl. Phys. Lett., 72, 1617 (1998).

96. A.A. Shklyaev, M. Shibata, M. Ichikawa Appl. Phys. Lett., 72, 320 (1998).

97. T.I. Kamins, R.S. Williams. Appl. Phys. Lett., 71, 1201 (1997).

98. T.I. Kamins, R.S. Williams, D.P. Basile. Nanotechnol., **10,** 117 (1999).

99. B.Г. Maлышкин, B.A. Щукин. ФTП, **27,** 1932 (1993).

100. V.A. Shchukin. Abstracts Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 24-28, 1996; p. 175.

101. N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, O. Schmidt, R. Heitz, J. Bohrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich. ¨Proc. 7th Int Conf. Modulated Semicond. Struct., Madrid, July, 10-14, 1995 [Sol. St Electron., **40,** 785 (1996)].

102. Ж.И. Алферов, H.A. Беpт, A.IO. Eropов, A.E. Жуков, П.С. Копьев, И.JI. Kpecтников, H.H. Jleденцов, A.B. Лунев, M.B. Maксимов, A.B. Caxapов, B.M. Устинов, A. Ф. Цапульников, IO.M. Шерняков, Д. Бимбepr. ФТT, 30, 351 (1996).

103. N.N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg, S.V. Zaitsev, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, M.V Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, O.A. Kosogov, U. Gosele, S.S. Ruvimov. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **421,** 133 (1996).

104. N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Bohrer, O. Schmidt, D. Bimberg, S.V Zaitsev, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, O.A. Kosogov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich. Phys. Rev. B, **54,** 8743 (1996).

105. N.N. Ledentsov. Proc. 23rd Int. Conf on the Physics of Semiconductors, Berlin, Germany, July 21-26, 1996, ed.by M. Scheffler, R. Zimmermann (World Scientific, Singapore, 1996), v. 1. p. 19.

106. N.N. Ledentsov, D. Bimberg, I.V. Kochnev, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, O.A. Kosogov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele. Appl. Phys. Lett.,¨ **69,** 1095 (1996).

1. Cho А. К, Arthur J. R. — Progr. Solid State Chem., 1975, v. 10, p. 157.
2. Chang L. L., Esaki L., Howard W. E, Ludeke R. — J. Vacuum Sci. Technol.1973, v. 10, p. 11.
3. Esaki L., Chang L.L. — Thin Solid Films, 1976, v. 36, p. 285.
4. Dingle R. — In: Advances in Solid State Physics, v. 15./Ed. H. J. Queisser. —Braunschweig: Pergamon-Vieweg, 1975, p. 21.
5. Manuel P., Sai-Halasz G. A., Chang L. L., Chang С A., Esaki L. — Phys.Rev. Lett., 1976, v. 37, p. 1701.
6. Chang L. L., Sakaki H., Chang С A., Esaki L. — Phys. Rev. Lett., 1977,v. 38, p. 1489.
7. Gossard A. C,- Petroff P. M., Wiegmann W., Dingle R., Savage A. — Appl.Phys. Lett., 1976, v. 29, p. 323.
8. Holonyak N, Kolbas R. M., Laidig W. D., Vojak B. A. — Appl. Phys. Lett.,1978, v. 33, p. 737.
9. Dingle R., Stormer H. L., Gossard A. C, Wiegmann W. — Appl. Phys. Lett.,1978, v. 33, p. 665.
10. von Klitzing K., Obloh H., Ebert G., Knecht J., Ploog K. — In: Precision Measurement and Fundamental Constants. II./Eds. B. N. Taylor,W. D. Phillips. — Nat. Bur. Stand. (USA) Spec Publ. No. 617, 1984, p. 519.
11. Tsui D. C, Stormer H. L., Gossard А. С — Phys. Rev. B, 1982, v. 25, p. 1405. [Имеется пер. в сб.: Квантовый эффект Холла. М.: Мир,1986, с. 69.]
12. Tsui D. С, Stormer Н. L., Gossard А. С. - Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 1559. [Имеется пер. в сб.: Квантовый эффект Холла. М.: Мир, 1986, с. 83]
13. Chang L. L., Esaki L. — Surf. Sci., 1980, v. 98, p. 70
14. Sai-Halasz G. A., Tsu R., Esaki L. — Appl. Phys. Lett., 1977, v. 30, p. 651.
15. Sakaki H., Chang L. L., Ludeke R., Chang С A., Sai-Halasz G. A., Esaki L. — Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, p. 211.
16. Sai-Halasz G. A., Esaki L., Harrison W. A. — Phys. Rev. B, 1978, v. 18,p. 2812.
17. Chang L. L., Kawai N., Sai-Halasz G. A., Ludeke R., Esaki L. — Appl. Phys.Lett., 1979, v. 35, p. 939.
18. Kawai N., Chang L. L., Sai-Halasz G. A^ Chang С A., Esaki L. — Appl.Phys. Lett., 1980, v. 36, p. 369.
19. Ploog K., Fischer A., Kunzel H.- J. Electrochem. Soc, 1981, v. 128, p. 400.
20. Dohler G. H. — Phys. Stat. Sol. (b), 1972, v. 52, p. 79, 533.
21. Dohler G. H. — In: Advances in Solid State Physics, /Ed. P. Grosse. — Braunschweig: Vieweg, 1983, v. 23, p. 207.
22. Galazka R. R. — In: Physics of Semiconductors 1978. Inst. Phys. Conf. Ser.43./Ed. R L. H. Wilson. — London: Inst. of Physics, 1979, p. 133.
23. von Ortenberg M. — Phys. Rev. Lett., 1982, v. 49, p. 1041.
24. Datta S., Furdyna J. K., Gunshar R. L. — Superlattices and Microstructures,1985, v. 1, p. 327.
25. Kolodziejski L. A., Bonsett T. C, Gunshor R. L., Datta S., 'Bylsma R. R, Becker W. M, Otsuka N. —Appl. Phys. Lett., 1984, v. 45, p. 440.
26. Bicknell R. N, Yanka R. W., Giles-Tbylor N. С Blanks D. K., Buckland E L.Schetzina J. F. — Appl. Phys. Lett., 1984, v. 45, p. 92.
27. Esaki L., Chang L. L., Mendez E. E. — Japan J. Appl. Phys., 1981, v. 20, p. L529.
28. Gobelli G. W., Allen EG— Phys. Rev., 1965, v. 137A, p. 245.
29. Шик А. Я. — ФТП, 1974, т. 8, с. 1841.
30. Miller R. С, Gossard А. С, Kleinman D. A., Munteanu О. — Phys. Rev. В,1984, v. 29, р. 3740.
31. Miller R. С, Kleinman D. A., Gossard А. С. — Phys. Rev. В, 1984, v. 29, p. 7085.
32. Batey 1, Wright S. L., DiMaria D. J. — J. Appl. Phys., 1985, v. 57, p.484.
33. Okumura H, Misawa S., Yoshida S., Gonda S. — Appl. Phys. Lett., 1985,v. 46, p. 377.
34. Kroemer H. — Appl. Phys. Lett., 1985, v. 46, p. 504.
35. Arnold D., Ketterson A Henderson T.Klem J., Morkoc H. — J. Appl. Phys., 1985, v. 57, p. 2880.
36. Kelly M. K, Niles D. W., Colavita E., Margaritondo G, Henzler M. — Appl.Phys. Lett., 1985, v. 46, p. 768.
37. Hickmott T. W., Solomon P. M., Fischer R., Morkoc H. — J. Appl. Phys., 1985, v. 57, p. 2844.
38. Meynadie'r M. H., Delalande C, Bastard G., Vos M., Alexandre E, Lievin J. L. — Phys. Rev. B, 1985, v. 31, p. 5539.
39. Matthews J. W., Blakeslee A. E. - J. Vacuum Sci. Tfechnol., 1977, v. 14, p. 989.
40. Osbourn G. С — J. Appl. Phys., 1982, v. S3, p. 1586.
41. Osbourn G. С — Phys. Rev. B, 1983, v. 27, p. 5126.
42. Dodson B. W. — Phys. Rev. B, 1984, v. 30, p. 3545.
43. Quillec M., Goldstein L., LeRoux G., Burgeat J., Primot J. — J. Appl. Phys.,1984, v. 55, p. 2904.
44. Tamargo M. C, Hull R., Greene L: H, Hayes J. R., Cho A. Y. — Appl.Phys. Lett., 1985, v. 46, p. 569.
45. Brown J. M., Holonyak N.. Kaliski R. W., Ludowise M. J., Dietze W. Т., Lewis C.R.— Appl. Phys. Lett., 1984, v. 44, p. 1158.
46. Guorley P. L., Biefeld R. M. — Appl. Phys. Lett., 1984, v. 45, p. 749.
47. Speriosu V. S., Nicolet M. A., Picraux S. Т., Biefeld R. M. — Appl. Phys.Lett, 1984, v. 45, p. 223.
48. Fujiyasu H, Takahashi H., Sasaki A., Kuwabara H. — Proc. 17th Intern. Conf.on Physics of Semiconductors. — San Francisco, 1984, p. 539.
49. Voisin P., Delalande C, Bastard G., Voos Af, Chang L. £., Segmuller A.,Chang С A., Esaki L. Superlattices and Microstructures, 1985, v. 1, p. 155.
50. Herman M. A, Pessa M. — J. Appl. Phys., 1985, v. 57, p. 2671.
51. McCaldin J. O., McGill T. C, Mead G. A. — Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, p. 56.
52. Krishnamurthy S., Moriarty J. A. — Superlattices and Microstructures, 1985, v. 1, p. 209.
53. Abeles В., Tiedje T, — Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, p. 2003.
54. Abeles R, Tiedje Т., Stasiewski H. C, Deckman H. W., Persons P. D., Liang K. S., Roxlo С В. — Superlattices and Microstructures, 1985, v. 1, p. 115.
55. Stiles P. J. — Surf. Sci., 1978, v. 73, p. 252.
56. Murase K, Shimomura S., Takaoka S., Ishida A., Fujiyasu H. — Superlatticesand Microstructures, 1985, v. 1, p. 177.
57. Ambrosch K. E, Clemens H., Fantner E. J., Bauer G., Kriechbaum M.,Kocevar P., Nicholas R. J. — Surf. Sci., 1984, v. 142, p. 571.
58. Fujiyasu H., Ishida A., Kuwabara H, Shimomura S., Takaoka S., Kurase K. —Surf. Sci., 1984, v. 142, p. 579.
59. Pichler P., Fantner E. J., Bauer G., Clemens H., Pascher H, von Ortenberg А.Л, Kriechbaum M. — Superlattices and Microstructures, 1985, v. 1, p. 1.
60. Harrison W. A. — J. Vacuum Sci. Technol., 1977, v. 14, p. 1016.
61. Ploog K., Dohler G. H. — Advances in Phys., 1983, v. 32, p. 285.
62. Ruden P. P., Reinecke T. L., Crowne F. — Superlattices and Microstructures, 1985, v. 1, p. 197.
63. Stormer H. L., Pinczuk A., Gossard A. C, Wiegmann W. — Appl. Phys. Lett.,1981, v. 38, p. 691.
64. Hiyamizu S., Mimura T. — J. Cryst. Growth, 1982, v. 56, p. 455.
65. Dohler G. H. — Physica Scripta, 1981, v. 24, p. 430.
66. Kunzel H, Fischer A., Knecht J., Ploog K. — Appl. Phys., 1983, v. A30, p. 73.7Г. Келдыш Л. В. — ФТТ, 1962, т. 4, с. 2265.
67. Маслюк В. Т., Феннич П. А. — Зарубежная электронная техника, 1981, 8 (241), с. 3.
68. Силин А. П. — УФН, 1985, т. 147, вып. 3, с. 485
69. Bass К G., Tetervov А. Р. Physics Reports, 1986, v. 140, No 5, p. 237.
70. Katayama S., Ando T. J. Phys. Soc Japan, 1985, v. 54, No 4, p. 1615.
71. Levine B. E, Bethea С G., Choi K. K., Walker J, Malik R. J. — J. Appl. Phys., 1988, v. 64, No 3, p. 1591.
72. Stormer H. L., Eisenstein J. P., Gossard A. C, Wiegmann W., Baldwin K. — Phys.Rev. Lett., 1986, v. 56, No 1, p. 85.
73. Movaghar & — Semicond. Sci. Technol., J987, v. 2, No 4, p. 185.

180. Эверитт Х. квантовые вычислительные устройства. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / Ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямс и П. Аливисатос. М.: Мир, 2002. С.45.

181. Alivisatos A.P.//Science. 1996. Vol. 271. P. 933.

182. Busch K., John S.// Phys. Rev. 1998. Vol. 58. P.3896.

183. Vlasov Yu.A., Bo X. Zh., Sturm J.C., Norris D.J. // Nature. 2001. Vol. 415. P.289.

184. Iijima S., Ichihashi T. // Nature. 1993. Vol. 363. P. 603.

185. Елецкий А.В. // УФН. 2002. Т. 172. С. 401.

186. Пул Ч., Оуэнс Ф. // Нанотехнологии. Москва: Техносфера, 2006. 336 с.