



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

Электронный учебно-методический комплекс

Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники

Учебная программа дисциплины

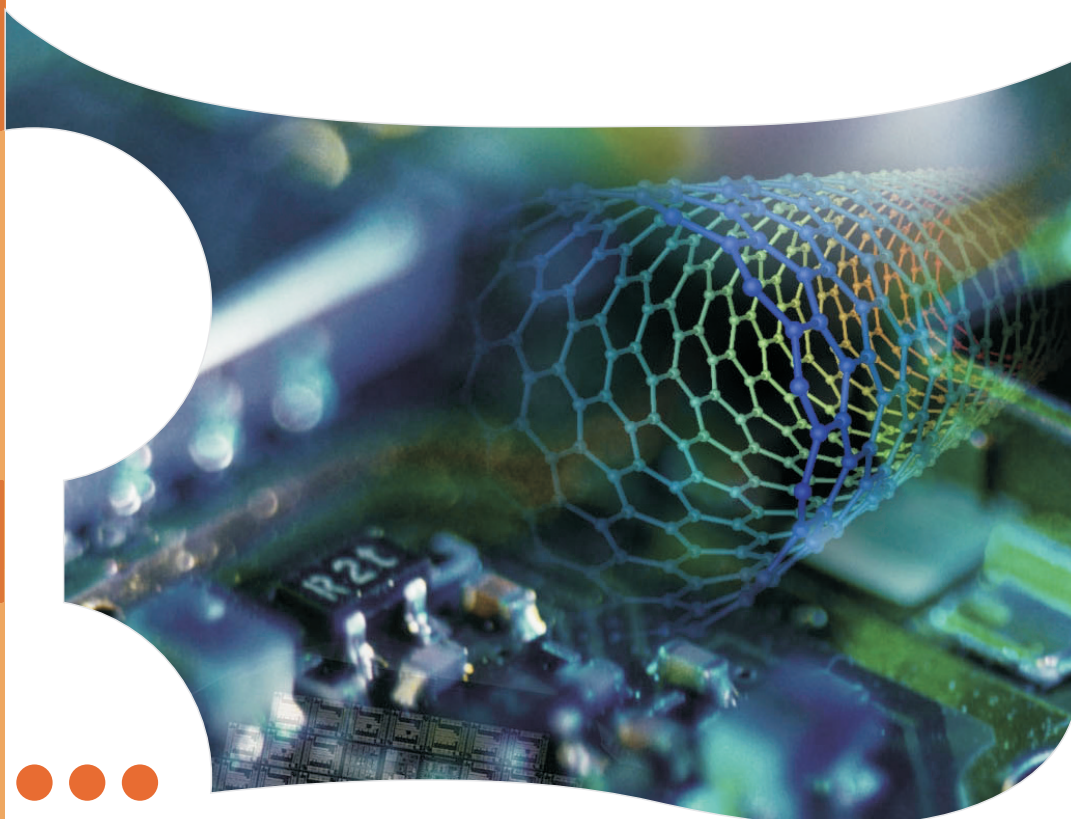
● **Курс лекций**

Лабораторный практикум

Пособие по курсовой работе

Методические указания по самостоятельной работе

Банк тестовых заданий в системе UniTest



Красноярск
ИПК СФУ
2009

УДК 621.38(075)
ББК 32.85я73
Ш42

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники» подготовлен в рамках реализации Программы развития федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) на 2007–2010 гг.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;

Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

Шелованова, Г. Н.

Ш42 Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники [Электронный ресурс]: курс лекций / Г. Н. Шелованова. – Электрон. дан. (6 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – (Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : УМКД № 1524/1092–2008 / рук. творч. коллектива Г. Н. Шелованова). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 50 Мб свободного дискового пространства ; привод DVD ; операционная система *Microsoft Windows XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf).

ISBN 978-5-7638-1686-0 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1753-9 (курса лекций)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320902505 (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники», включающего учебную программу дисциплины, лабораторный практикум, пособие по курсовой работе, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники. Презентационные материалы».

В данном издании представлены материалы, отражающие современное состояние микро- и нанoeлектроники, а также перспективы развития этих отраслей.

Предназначен для студентов направления подготовки магистров 210100.68 «Электроника и микроэлектроника» укрупненной группы 210000 «Электроника, радиотехника и связь», а также может быть использован всеми интересующимися электроникой и нанoeлектроникой.

© Сибирский федеральный университет, 2009

Рекомендовано к изданию Инновационно-методическим управлением СФУ

Редактор Л. И. Вейсова

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения Информационно-телекоммуникационного комплекса СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 30.11.2009

Объем 6 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ЛЕКЦИЯ 1 РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ В СОЗДАНИИ УСТРОЙСТВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	8
1.1. Поверхность и её свойства	8
1.2. Поверхностный потенциал	10
1.3. Поверхностные состояния. Уровни Тамма	12
1.4. Быстрые и медленные поверхностные состояния	13
Вопросы для самопроверки	14
ЛЕКЦИЯ 2 МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫЕ АТОМНЫЕ КЛАСТЕРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИХ СВОЙСТВА	15
2.1. Микрокластеры и их энергетическое состояние	15
2.2. Методы получения и применения структур с атомными кластерами	17
2.3. Межфазные границы и их свойства	20
2.4. Возможность формирования структур с минимальным рассогласованием по параметрам решетки	22
2.5. Напряженные полупроводниковые структуры, их свойства и применение	23
Вопросы для самопроверки	26
ЛЕКЦИЯ 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ ЭПИТАКСИИ	27
3.1. Достижения молекулярно-лучевой эпитаксии	27
3.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	31
Вопросы для самопроверки	34
ЛЕКЦИЯ 4 СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ ЛИТОГРАФИИ	35
4.1. Традиционная фотолитография и ее проблемы	35
4.2. Электронно-лучевая литография	43
4.3. Рентгеновская литография	52
Вопросы для самопроверки	56
ЛЕКЦИЯ 5 ЛИТОГРАФИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ	57
5.1. Методы безмасочной технологии	57
5.2. Электронный и ионный луч как инструмент современной технологии	59
Вопросы для самопроверки	63



ЛЕКЦИЯ 6 КВАНТОВЫЕ ОСНОВЫ**НАНОИНЖЕНЕРИИ 64**

6.1. Эффект размерного квантования	64
6.2. Квантовое ограничение	67
6.3. Интерференционные эффекты.....	69
6.4. Туннелирование.....	70
6.5. Устройства на основе квантовых эффектов	74
Вопросы для самопроверки.....	78

ЛЕКЦИЯ 7 НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ**СРЕДЫ 79**

7.1. Актуальность использования низкоразмерного кремния в производстве изделий микро- и нанoeлектроники.....	79
7.2. Формирование низкоразмерного кремния	82
7.3. Структурные модификации пористого кремния	84
7.4. Применение низкоразмерного кремния	85
Вопросы для самопроверки.....	89

ЛЕКЦИЯ 8 ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК**И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР 90**

8.1. Введение	90
8.2. Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок	91
8.3. Жидкофазная эпитаксия.....	93
8.4. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.....	96
8.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия	96
Вопросы для самопроверки.....	99

ЛЕКЦИЯ 9 КВАНТОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ 100

9.1. Введение	100
9.2. Размерное квантование. Квантовые точки	101
9.3. Изготовление гетероструктур с квантовыми точками	104
9.4. Методы исследования СКТ	106
9.5. Лазеры на самоорганизованных квантовых точках	109
9.6. Сверхрешетки.....	110
Вопросы для самопроверки.....	112

ЛЕКЦИЯ 10 МНОГОСЛОЙНЫЕ**НАНОСТРУКТУРЫ 113**

10.1. Многослойное осаждение посредством магнетронного распыления...	113
10.2. Электролитическое осаждение	116
10.3. Поверхностные наноструктуры	118
10.4. Получение поверхностных структур методом МЛЭ	120
10.5. Получение поверхностных структур методом газофазной эпитаксии..	121
10.6. Химическая сборка поверхностных наноструктур	122
10.7. Низкоразмерные структуры на основе пористого кремния.....	125

10.8. Углеродные нанотрубки	128
Вопросы для самопроверки	133
ЛЕКЦИЯ 11 ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА	
СВЕРХПРОВОДИМОСТИ	134
11.1. Понятие сверхпроводимости	134
11.2. Сверхпроводники первого и второго рода	135
11.3. Теория Бардина – Купера – Шриффера	139
11.4. Эффект Джозефсона	142
11.5. Эффект Мейснера	144
Вопросы для самопроверки	145
ЛЕКЦИЯ 12 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ	
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ	146
12.1. История открытия высокотемпературной сверхпроводимости	146
12.2. Методы получения ВТСП пленок	149
12.3. Применение ВТСП материалов	153
Вопросы для самопроверки	156
ЛЕКЦИЯ 13 МИКРОВОЛНЫ И ИХ ПРИРОДА	157
13.1. Открытие теплового воздействия микроволн	157
13.2. Физическая природа микроволн	159
13.3. Микроволновая передача и средства связи	163
13.4. Сверхвысокочастотная терапия	164
Вопросы для самопроверки	165
ЛЕКЦИЯ 14 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА	
МИКРОВОЛНОВЫХ СИСТЕМ	166
14.1. История создания лазера	166
14.2. Полупроводниковые лазеры	168
14.3. Нанолазеры	169
14.4. Светоизлучающие диоды	170
14.5. Оптоволоконные кабели	172
Вопросы для самопроверки	175
ЛЕКЦИЯ 15 СИСТЕМЫ СВЯЗИ	176
15.1. Системы телевизионного вещания	176
15.2. Спутниковая связь	179
15.3. Мобильная связь	181
15.4. Сотовая связь	182
15.5. Оптоэлектронные системы	183
Вопросы для самопроверки	185
ЛЕКЦИЯ 16 ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ	
СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ	
ТЕХНИКИ	186

16.1. Введение	186
16.2. Температурная стойкость и механизмы теплопередачи	187
16.3. Способы теплоотвода	189
16.4. Перспективные жидкие диэлектрики для охлаждения	191
16.5. Криогенная электроника	192
16.6. Влияние радиации на параметры электронных устройств	194
Вопросы для самопроверки	197
ЛЕКЦИЯ 17 ПЕРСПЕКТИВЫ КРЕМНИЯ КАК МАТЕРИАЛА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	198
17.1. Структуры «кремний-на-изоляторе» и их преимущества	198
17.2. Технологии изготовления структур КНИ	200
17.3. Структуры КНС, их преимущества и перспективы применения	204
17.4. Преимущества и перспективы карбидокремниевой электроники	206
Вопросы для самопроверки	208
ЛЕКЦИЯ 18 МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	209
18.1. Карбид кремния – материал для экстремальной электроники	209
18.2. Возможности углерода в решении задач экстремальной электроники	211
18.3. Структуры и приборы экстремальной электроники	212
Вопросы для самопроверки	217
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	218
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	219

ПРЕДИСЛОВИЕ

Теоретический курс по дисциплине «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники» представлен в виде подробного курса лекций. Материал распределён по темам, включённым в два модуля. Лекции снабжены планом и вопросами для самопроверки. Для более углубленного изучения теоретической части дисциплины в каждой лекции даются ссылки на доступные литературные источники. В данном издании изложены теоретические сведения в соответствии с учебной программой дисциплины, читаемой в Институте инженерной физики и радиоэлектроники СФУ магистрантам направления 210100.68 «Электроника и микроэлектроника».

Основной целью создания курса лекций является систематизация материала, имеющегося как в широко используемых учебных изданиях, так и в образовательных и научных журналах. Систематизация осуществляется для адаптации материала к разработанной учебной программе дисциплины.

Курс лекций включает модуль № 1 «Современные тенденции реализации микро- и наноструктур» и модуль № 2 «Технологические аспекты создания устройств электроники и нанoeлектроники». При написании курса лекций использован опыт преподавания дисциплины «Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники» в Красноярском государственном техническом университете. В данном издании изложен теоретический материал в расчёте на 36 часов (18 лекций). Информационным стержнем читаемой дисциплины является формирование целостной картины состояния электроники и нанoeлектроники. Поскольку потенциальные возможности традиционной микроэлектроники исчерпали себя, дальнейшее развитие возможно только на базе принципиально новых физических и технологических идей. Для их правильного восприятия и понимания нужны знания о новейших технологических достижениях в области конструирования на атомном уровне твердотельных поверхностных и многослойных структур с необходимыми свойствами.

Книга адресована магистрантам направления 210100.68 «Электроника и микроэлектроника» укрупненной группы 210000 «Электроника, радиотехника и связь», но может быть полезна всем интересующимся электроникой и нанoeлектроникой.



ЛЕКЦИЯ 1

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ В СОЗДАНИИ УСТРОЙСТВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

План лекции

- 1.1. Поверхность и её свойства.
- 1.2. Поверхностный потенциал.
- 1.3. Поверхностные состояния. Уровни Тамма.
- 1.4. Быстрые и медленные поверхностные состояния.

Литература: [3, 5, 17].

1.1. Поверхность и её свойства

Поверхность служит местом взаимодействия с твердым телом различных фаз (газ, жидкость, твердая фаза), что определяет возникновение многих так называемых поверхностных явлений. Наиболее существенные из них – сцепление (когезия), прилипание (адгезия), смачивание, трение, скол (разрушение твердого тела), образование и развитие зародышей новой фазы при осаждении вещества на подложку, адсорбция (прилипание чужеродных атомов или молекул к поверхности из газообразной или жидкой фазы), хемосорбция (адсорбция с последующей химической реакцией и образованием устойчивого слоя нового химического соединения); гетерирование, включающее перенос вещества вдоль поверхности (миграция, поверхностная диффузия, поверхностный электронный или гравитационный дрейф) с последующим закреплением (абсорбцией, связыванием) чужеродных атомов и дефектов в поверхностном слое, обладающем либо особым (по отношению к объему или другим, очищаемым, участкам поверхности), либо иным фазовым составом, коэффициент растворения в которых повышен.

Особенности атомного и электронного состояния поверхности обуславливают появление характерных мод фундаментальных зонных квазичастиц – поверхностных фононов (сурфонов), поверхностных экситонов, поверхностных плазмонов, спектр которых является более длинноволновым (по сравнению с объемными модами), а константы взаимодействия с другими элементарными возбуждениями – большими. Иначе говоря, поведение поверхностных электронов, электронно-дырочных пар (в том числе экситонов) и атомных колебательных процессов будет существенно отличаться от таковых в объеме.

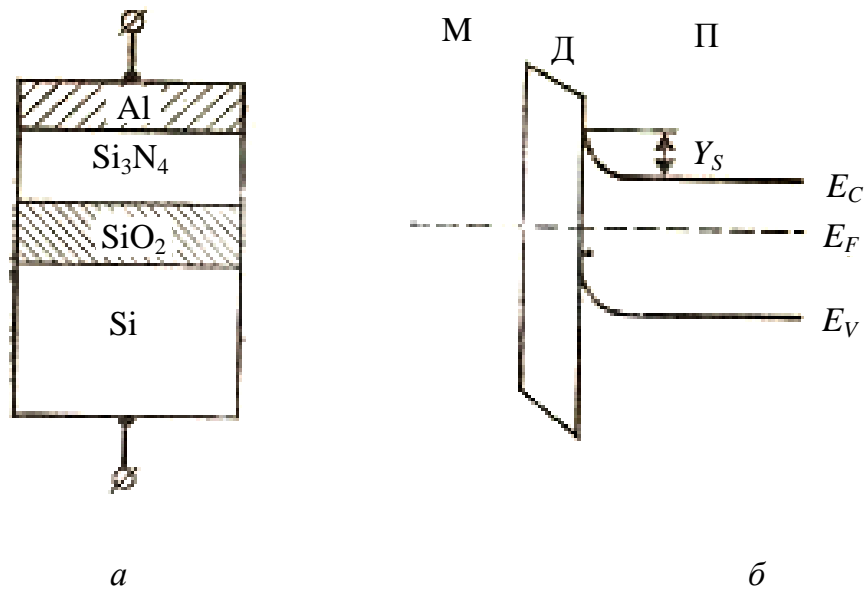


Рис. 1.1. Схематическое изображение структуры «металл – диэлектрик – полупроводник» с двухслойным диэлектриком (а) и ее энергетическая зонная диаграмма (б)

Изучение всех эффектов имеет особое значение для микро- и нанoeлектроники, где влияние их, как правило, необходимо ограничивать или исключать вообще. При этом в некоторых случаях поверхностные эффекты, напротив, используются для разработки полупроводниковых приборов нового поколения с уникально высокими параметрами.

Рассмотрим характеристику поверхности полупроводников. Различают несколько типов поверхности полупроводников: атомно-чистая, контактирующая со сверхвысоким вакуумом или реактивной очищаемой средой; реальная, обычно получаемая методом химического травления, находящаяся в контакте с реальным воздушным окружением и в связи с этим содержащая адсорбированные гидроксильные, окисные и другие чужеродные (в том числе примесные) слои; содержащая гетеропереходы – специально сформированные тонкие слои непроводниковых фаз – диэлектрических, металлических (структуры «диэлектрик – полупроводник», «металл – диэлектрик-полупроводник», «металл – полупроводник», [рис. 1.1](#)), а также полупроводники разной природы (тонкопленочные гетеропереходы). Кроме того, известна внутренняя поверхность полупроводников – граница бикристалла, двумерных дислокаций (дефектов упаковки).

Донорный, или акцепторный, характер поверхностных примесных атомов определяется их химическим электронным сродством по отношению к веществу подложки. Поэтому для элементов, проявляющих значительное сродство, тип центра определяется однозначно (например, кислород, фтор, хлор всегда являются акцепторами, а водород и щелочные элементы – доно-

рами). Для двухслойных гетероструктур поверхностные уровни границ разделов между фазами близки по природе к уровням свободной поверхности, они определяются главным образом искажением химической связи «диэлектрик – полупроводник», комплексами дефектов структуры, а также наличием на поверхности чужеродных атомов.

1.2. Поверхностный потенциал

Параметр, характеризующий изгиб зон в полупроводнике на поверхности раздела «полупроводник – окисел», называется поверхностным потенциалом (на [рис. 1.1](#) это Y_s). Методы определения поверхностного потенциала основаны на измерении ряда параметров поверхности, таких как поверхностная проводимость, поверхностная емкость и др. Существуют таблицы и номограммы, по которым можно построить зависимость поверхностной проводимости от поверхностного потенциала для полупроводников. Поверхностная проводимость является достаточно сложной функцией поверхностного потенциала и степени легирования полупроводника.

Качественно оценить поверхностную проводимость можно следующим образом. При положительном изгибе зон поверхностная проводимость полупроводника n -типа повышается вследствие образования у поверхности обогащённого слоя. При достаточно больших отрицательных изгибах зон из-за образования вблизи поверхности инверсионного слоя поверхностная проводимость полупроводника n -типа оказывается также весьма значительной. Минимального значения она достигает, когда имеется незначительный отрицательный изгиб зон, при котором поверхностная проводимость определяется проводимостью обеднённого слоя.

В полупроводнике p -типа, наоборот, поверхностная проводимость будет возрастать из-за образования обогащённого слоя при отрицательных изгибах зон и инверсионного слоя, возникающего при больших положительных изгибах зон. Минимальное значение она будет иметь в этом случае при незначительном положительном изгибе зон, ибо, как и в предыдущем случае, она будет определяться проводимостью обеднённого слоя. Сказанное можно пояснить с помощью [рис. 1.2](#).

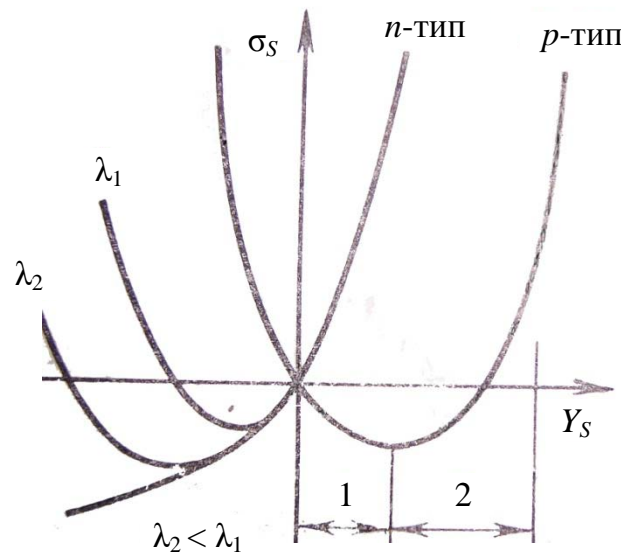


Рис. 1.2. Зависимость проводимости и приповерхностного слоя от изгиба зон

Сделаем следующие замечания. Во-первых, минимальное значение проводимости достигается при $Y_{s \min} = \ln \lambda^2/b$;

здесь

$$\lambda = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0},$$

где n_0 , p_0 – концентрации электронов и дырок в полупроводнике; n_i – собственная концентрация носителей заряда.

Это означает, что положение минимума на кривых $\sigma_s(Y_s)$ определяется лишь объёмными свойствами полупроводника: при увеличении степени легирования минимальное значение поверхностной проводимости смещается в сторону возрастания абсолютного значения Y_s . Во-вторых, в собственных полупроводниках минимум поверхностной проводимости смещён в сторону отрицательных значений изгибов зон. Это объясняется тем, что подвижность электронов больше подвижности дырок. Наконец, при очень сильном изгибе зон уровень Ферми у поверхности может оказаться в одной из разрешённых зон – у поверхности возникает слой полупроводника вырожденного типа. Поверхностная проводимость в этом случае будет особенно большой. Для положительного изгиба зон $Y > 0$, для отрицательного $Y < 0$. Параметр λ , характеризующий объёмные свойства полупроводника, принимает следующие значения: $\lambda = 1$ для собственного полупроводника, $\lambda > 1$ при дырочной проводимости, $\lambda < 1$ при электронной проводимости.

1.3. Поверхностные состояния. Уровни Тамма

Процессы, протекающие на поверхности полупроводников и диэлектриков, существенно влияют на работу большинства полупроводниковых приборов. При взаимодействии поверхности полупроводника с внешней средой (парами воды, кислородом и другими веществами) образуются различные плёнки, окислы, гидраты и прочие соединения, свойства которых отличаются от свойств полупроводникового кристалла. Различные адсорбционные процессы, протекающие на поверхности кристалла, приводят к возникновению рекомбинационных центров, которые также влияют на работу полупроводниковых приборов.

Таким образом, надёжная и эффективная работа различных радиоэлектронных устройств во многом зависит от качества обработки поверхности и степени защиты её от окружающей среды. Очень важно также получить поверхность с заданными свойствами, так как это позволит при создании полупроводниковых приборов и различных функциональных микроэлектронных устройств задавать параметры поверхности, наиболее приемлемые для надёжной работы приборов. Энергетический спектр кристалла имеет зонную структуру: зоны разрешённых значений энергии чередуются с областями запрещённых значений. Однако это справедливо лишь для идеального кристалла при неограниченных размерах. Реальные же кристаллы имеют конечные размеры. Это свидетельствует, прежде всего, о том, что имеется некоторая поверхность раздела «кристалл – внешняя среда», на которой происходит обрыв кристаллической решётки. Поэтому энергетические спектры ограниченного и неограниченного кристаллов существенно различаются. В 1932 г. И. Е. Тамм установил, что разрешённые для неограниченного кристалла уровни энергии разрешены и для ограниченного. Однако в последнем, вследствие обрыва кристаллической решётки, возникают новые дискретные разрешённые уровни (состояния), расположенные в зоне запрещённых значений энергий для неограниченного кристалла. Эти энергетические уровни получили название уровней (состояний) Тамма. Соответствующие им волновые функции электронов имеют максимум на границе кристалла и быстро затухают по мере удаления от поверхности как в глубину кристалла, так и в сторону внешней среды (вакуума). Это означает, что электроны, занимающие уровни Тамма, не могут проникать в глубь кристалла – они локализируются вблизи поверхности. В 1939 г. Шокли показал, что аналогичные поверхностные состояния возникают из-за адсорбции атомов чужеродных веществ.

Обрыв кристаллической решётки происходит в каждой цепочке атомов, нормальной к поверхности кристалла. Поэтому плотность таммовских состояний должна определяться плотностью поверхностных атомов, т. е. составлять $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Экспериментально это было подтверждено в 1962 г.

Оба типа поверхностных состояний возникают на совершенно чистой, идеальной поверхности кристалла. Реальная же поверхность значительно отличается от идеальной, так как она всегда содержит различные структурные дефекты, вызванные как условиями роста кристалла, так и условиями его обработки (резка, полировка, шлифовка). Более того, реальная поверхность всегда взаимодействует с внешней средой, поэтому на ней возможна адсорбция посторонних атомов и молекул, образование различных плёнок и т. д. Всё это также вызывает появление на поверхности кристалла локальных состояний, рекомбинационных ловушек, доноров или акцепторов.

1.4. Быстрые и медленные поверхностные состояния

Поверхностные состояния, возникающие на чистой не окислившейся поверхности полупроводника (состояния Тамма, а также состояния, определяемые абсорбцией и различными нарушениями поверхности), электрически хорошо контактируют с объёмом. Это означает, что время перехода электронов из объёма на поверхностные уровни, т. е. время установления равновесия таких поверхностных состояний с объёмом, оказываются весьма небольшим – порядка 10^{-4} – 10^{-7} с. Поэтому такие состояния называют быстрыми ([рис. 1.3](#)).

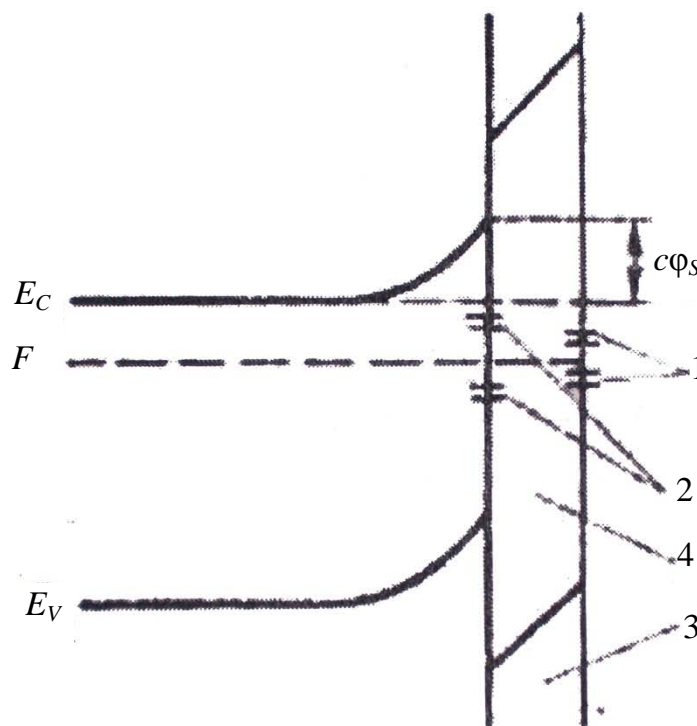


Рис. 1.3. Быстрые и медленные состояния на поверхности германия: 1 – медленные состояния; 2 – быстрые состояния; 3 – слой окиси германия; 4 – запрещённая зона окиси

Реальная поверхность полупроводника всегда взаимодействует с внешней средой, поэтому она практически всегда покрыта слоем окисной плёнки,

на поверхности которой также возникают поверхностные состояния. Однако равновесие этих состояний с объёмом полупроводника устанавливается в течение сравнительно продолжительного времени – от 10^{-2} с до нескольких часов и даже суток. Это объясняется тем, что для прохождения электронов сквозь окисный слой, являющийся изолятором, требуется значительное время. Такие поверхностные состояния называются медленными. Энергия и концентрация медленных состояний изменяются в широких пределах при изменении окружающей газовой среды, обычно их концентрация более 10^{13} см^{-2} .

Концентрация быстрых состояний значительно меньше. Обычно имеется несколько типов быстрых состояний. Плотность уровней вблизи середины запрещённой зоны около 10^{11} см^{-2} . Вблизи краёв запрещённой зоны плотность быстрых состояний однозначно не выяснена, однако установлено, что примеси в травителе меняют их энергетический спектр, а изменение окружающей среды – их концентрацию.

От состояния поверхности зависят многие важные характеристики полупроводниковых приборов, например, обратный ток диодов, напряжение пробоя p – n -переходов, работа выхода и т. д.

Для более подробного изучения этих аспектов см. источники [2, 4, 13, 24].

Вопросы для самопроверки

1. Что вы понимаете под идеальным кристаллом и идеальной поверхностью?
2. Что вы понимаете под реальным кристаллом и реальной поверхностью?
3. Какова природа поверхностного потенциала?
4. Какова природа уровней Тамма?
5. Какие внешние факторы оказывают влияние на свойства поверхности?
6. Какие энергетические состояния называются быстрыми?
7. Каково время установления равновесия быстрых состояний с объёмом?
8. Какие энергетические состояния называются медленными?
9. Каково время установления равновесия медленных состояний с объёмом?
10. Каковы концентрации поверхностных состояний?

ЛЕКЦИЯ 2

МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫЕ АТОМНЫЕ КЛАСТЕРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИХ СВОЙСТВА

План лекции

- 2.1. Микрокластеры и их энергетическое состояние.
- 2.2. Методы получения и применения структур с атомными кластерами.
- 2.3. Межфазные границы и их свойства.
- 2.4. Возможность формирования структур с минимальным рассогласованием по параметрам решётки.
- 2.5. Напряжённые полупроводниковые структуры, их свойства и применение.

Литература: [[9](#), [14](#), [24](#), [29](#), [32](#), [33](#)].

2.1. Микрокластеры и их энергетическое состояние

В ряде случаев традиционный подход к управлению свойствами полупроводниковых материалов наталкивается на принципиальные ограничения:

- отсутствие в природе примесей с подходящими свойствами;
- низкий предел растворимости атомов многих примесей в кристаллической решетке полупроводника;
- высокая концентрация электрически активных собственных дефектов решетки в легированном материале и др.

В связи с этим в последние годы активно развивается новый подход к управлению свойствами полупроводников, основанный на формировании в полупроводниковой матрице наноразмерных кластеров, в состав которых могут входить атомы вводимых примесей, атомы собственных компонентов, а также собственные точечные дефекты кристаллической решетки.

Атомным кластером называется атомное образование (в том числе с участием собственных точечных дефектов кристаллической решетки), вызывающее изменение энергетического состояния составляющих его компонентов и их влияние на фундаментальные свойства полупроводниковой матрицы при сохранении неизменным фазового состояния основного вещества. В отличие от кластеров, формирующихся в газовой или жидкой фазах, в нашем случае образование кластера происходит в кристаллической решетке полупроводника, играющей роль матрицы и оказывающей существенное влияние на все стадии кластерообразования, а также на свойства конечного



продукта. На [рис. 2.1](#), [рис. 2.2](#) изображены схемы простейших унитарных и бинарных кластеров.

Движущей силой образования кластера в общем случае является стремление системы к состоянию с минимальной свободной энергией. В реальных объектах равновесное состояние многокомпонентной системы в силу энергетических или кинетических ограничений достигается далеко не всегда, поэтому в большинстве случаев мы имеем дело с метастабильными образованиями, которые, тем не менее, могут обладать значительной устойчивостью и в значительной мере влиять на свойства полупроводникового материала.

Впервые микроскопические характеристики кластеров были открыты посредством наблюдения аномалий спектра массы (спектрального анализа) кластерного луча натрия особых размеров. Такие размеры (количество атомов) называют магическими числами. Затем было экспериментально подтверждено, что магические числа связаны со строением оболочки коллективизированных электронов. Исследование микрокластеров быстро продвигается вперед, чему способствуют открытия в области микрокластеров металлов и экспериментальные достижения в создании плотных, не взаимодействующих микрокластеров разных размеров в форме кластерных лучей. Также прогресс произошел за счет совершенствования компьютерных технологий.

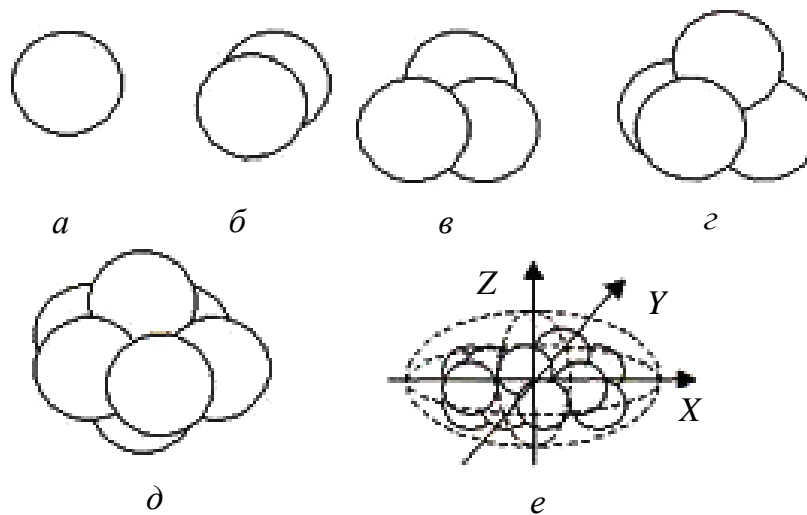


Рис. 2.1. Схемы простейших унитарных кластеров. *a – д* – строение простейших наиболее устойчивых центрально-симметричных кластеров; *е* – схема искривления окружения асимметричного (удлиненного) менее стабильного кластера (сферы превращаются в подобие эллипсоида, и меньшая кривизна окружения посередине ускоряет его разрыв)

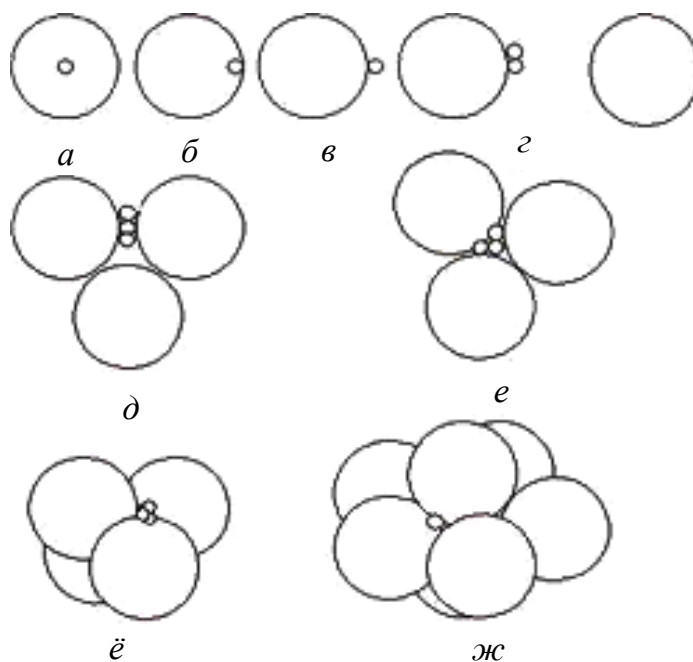


Рис. 2.2. Схемы простейших бинарных кластеров

Процессы формирования нанокластеров, их имплантация в аморфную и кристаллическую матрицу оказывают существенное влияние на фундаментальные свойства получаемых функциональных материалов, изменяя ширину запрещенной зоны, проводимость и др. Именно нанокластеры от нескольких сотен до порядка тысячи атомов образуют так называемые квантовые элементы, составляющие сложные цепи и ансамбли в современных электронных устройствах.

2.2. Методы получения и применения структур с атомными кластерами

Наноэлектроника интенсивно развивается, уже созданы приборы, размеры элементов которых составляют единицы нанометров. Наряду с достижениями в технологии изготовления наноструктур происходит совершенствование методов их исследования. Как известно, свойства твердотельных наноструктур (энергетический спектр носителей тока, электронные и оптические свойства) определяются в значительной мере размером, формой и химическим составом нанообъектов. Для геометрической характеристики наноструктур успешно применяются методы сканирующей зондовой микроскопии. Элементный состав наноструктур оценивается по результатам измерений методами рентгеновской дифракции, рамановского рассеяния и электронной оже-спектроскопии. Основной недостаток этих методов – недостаточное латеральное разрешение, т. е. невозможность получить достоверную информацию о химическом составе отдельных нанообъектов.

Одним из способов анализа объектов нанометрового масштаба может быть комбинация методов электронной оже-спектроскопии (ЭОС) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) – растровая оже-микроскопия (РОМ). Диаметр электронного зонда современных РЭМ может составлять менее 3 нм. Благодаря малой длине пробега оже-электронов в материале образца (~0,5–1 нм) возможен локальный элементный анализ в области, латеральные размеры которой лишь незначительно превышают диаметр электронного зонда. Например, наноструктуры GeSi/Si получены методом самоорганизованного роста по механизму Странского – Крастанова. Суть эффекта заключается в переходе от двухмерного роста к трехмерному кластерообразованию вследствие рассогласования параметров решеток выращиваемых слоев кремния и германия. Образцы были выращены двумя способами:

1. Сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия кремния в среде германа (GeH_4). На подложке высоколегированного бором кремния ($n \sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) ориентации (111) выращивался буферный слой кремния толщиной 500 нм, легированный бором ($n \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а затем слой германия номинальной толщиной 20 нм. Морфология поверхности исследовалась методом атомно-силовой микроскопии. Наблюдались массивы островков с латеральными размерами 100 нм, высотой 20 нм и поверхностной плотностью $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ и островки с большим числом дислокаций с латеральными размерами 900 нм, высотой 100 нм и поверхностной плотностью $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ (рис. 2.3, а).

2. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). На подложке высоколегированного мышьяком кремния ($n \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) ориентации (001) выращивался буферный слой кремния толщиной 100 нм, легированный бором ($n \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а затем слой германия номинальной толщиной 1,4 нм. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет выявить на поверхности наличие массивов однородных островков с латеральными размерами 300 нм, высотой 40 нм и поверхностной плотностью $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (рис. 2.3, б).

При исследовании полупроводниковых объектов методом РЭМ/РОМ проявляется эффект зарядки поверхности образца, в результате чего происходит смещение и дефокусировка электронного зонда. Как следствие наличия заряда на поверхности, пространственное разрешение в РЭМ/РОМ-режимах на таких структурах в 2–3 раза хуже, нежели при анализе хорошо проводящих структур. При исследовании нанокластеров GeSi/Si разрешение в режиме РЭМ составило 50 нм (рис. 2.4, б), в режиме РОМ – 70 нм (рис. 2.4, в, д). РОМ – изображение регистрировалось в пике германия (линия LMM $E = 1141 \text{ эВ}$). На рис. 2.4, а приведена полученная АСМ-морфология исследуемой GeSi наноструктуры, используемой для определения латерального разрешения РЭМ/РОМ.

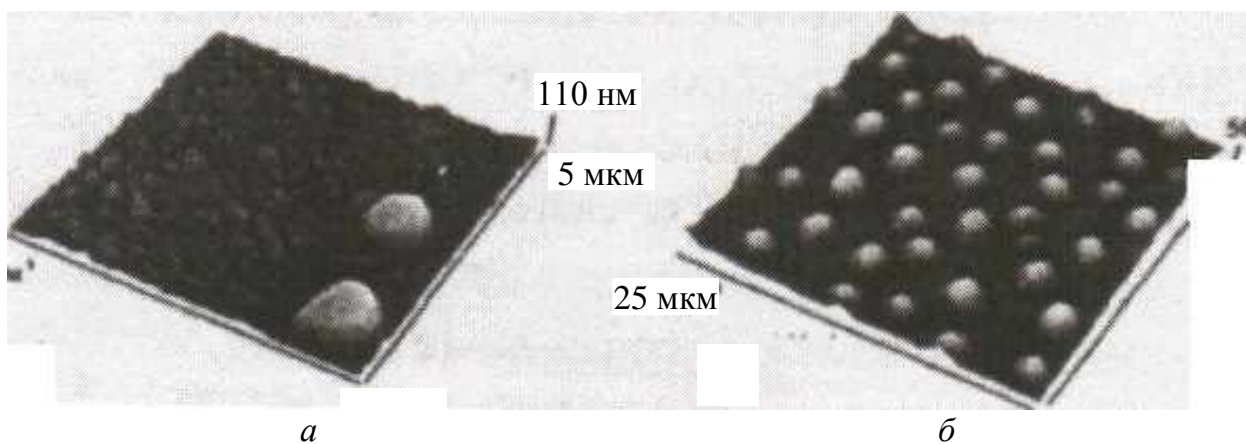


Рис. 2.3. АСМ-изображение GeSi/Si гетероструктур: а – сублимационная МЛЭ; б – МЛЭ

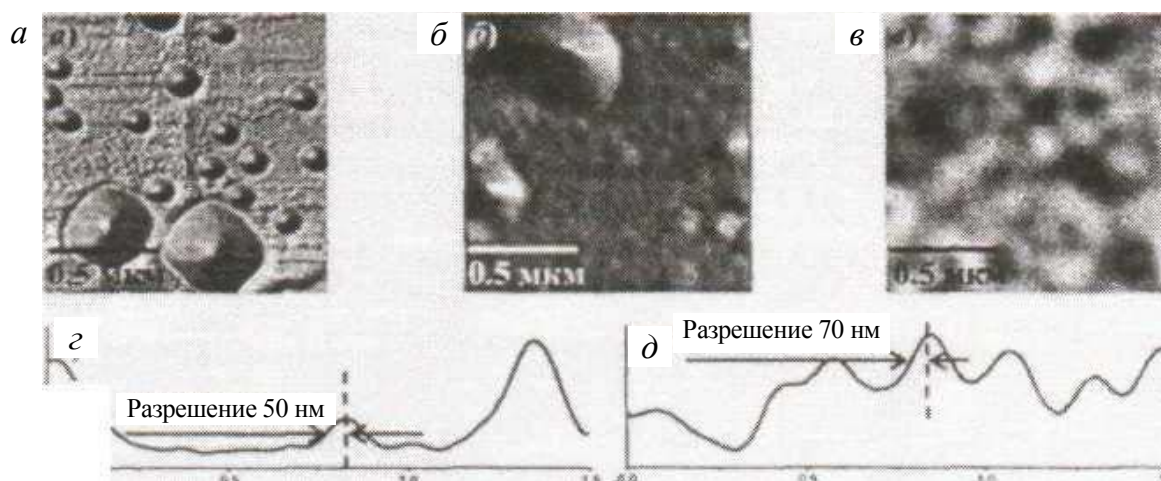


Рис. 2.4. АСМ (а), РЭМ (б), РОМ (в) – изображения нанокластеров GeSi/Si, профиль интенсивности излучения вторичных электронов в режиме РЭМ (г) и профиль интенсивности оже-линии германия в режиме РОМ (д)

Достижением является возможность проведения локального (нанометрового масштаба) элементного анализа самоорганизованных структур GeSi/Si методом растровой оже-микроскопии. Пространственное разрешение для проводящего тестового образца в режиме РЭМ составило 35 нм, в режиме РОМ – 25 нм. Пространственное разрешение для наноструктур GeSi/Si в режиме РЭМ составило 50 нм, в режиме РОМ – 75 нм. Минимальная обнаруживаемая концентрация германия составляет менее 20 % ат.; погрешность определения концентрации германия, оцененная статистически с помощью распределения Стьюдента, составляет ~ 4 % ат. Было получено качественное распределение концентрации германия по глубине наноструктур GeSi/Si.

Ключевыми компонентами устройства, которое изготавливается главным образом из арсенида галлия, широко применяемого в быстродействию-

ющих логических микросхемах и оптоэлектронике, служат нанокластеры из арсенида индия диаметром 12 нм и высотой 6 нм.

В процессе получения на точку воздействуют импульсом лазера, который возбуждает два электрона в атоме арсенида индия. Затем эта энергия преобразуется в два спутанных фотона с несколько отличающимися частотами, которые можно разделить и вывести из устройства независимо друг от друга. Свет близок к инфракрасному диапазону с длиной волны около 900 нм, а само устройство нужно охлаждать до чрезвычайно низких температур. Теоретически ничто не мешает воспроизвести этот эффект при комнатной температуре, и уже получали излучение с длиной волны 1300 нм, с которым работают телекоммуникационные лазеры.

Исследования в области нанокластеров и наносистем лежат в основе создания новой технологии XXI века – нанотехнологии. Это, например, одноэлектронные устройства, позволяющие на несколько порядков уменьшить размер современных вычислительных элементов и перейти от микро- к нанотехнологии. Работы в области полупроводниковых кластеров ведут к созданию лазеров с изменяемой длиной волны за счет изменения размера нанокластера, а также светодиодов. Конструирование наносистем из отдельных нанокластеров позволяет изменить электронные и магнитные свойства наносистемы за счет возникновения избыточных внутренних напряжений (давлений) и влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ). Перспективны газовые и жидкостные сенсоры на основе наносистем с полупроводниковыми кластерами. Кластерные катализаторы позволяют развивать новые направления управления конверсией и селективностью каталитических реакций за счет размера кластера и взаимодействия его с матрицей. Нанотехнология нанесения пленок создает предельно ровные поверхности и приводит к экономии дорогостоящих материалов для покрытий.

2.3. Межфазные границы и их свойства

Под межфазными границами (МФГ) в твердых телах понимают границы, разделяющие области твердого тела с различным химическим составом и другими физико-химическими свойствами. Свойства, характерные для МФГ, в полной мере присущи поверхности твердого тела, которую можно рассматривать как границу раздела между твердым телом и окружающей средой (вакуум, газ, жидкость), а также как дефекты, в качестве которых могут выступать различные неоднородности как в объеме, так и на поверхности твердого тела. Электронные процессы в области МФГ в различных гетероструктурах определяют работу практически всех основных элементов современной микро- и нанoeлектроники.

Гетероструктурой называется полупроводниковая структура с несколькими гетеропереходами (принятое обозначение гетероструктур на основе соединений A и B – A/B , соединения A и B называют гетеропарой). Схематиче-

ски зонная диаграмма двойной гетероструктуры изображена на [рис. 2.5](#). Отметим, что носителям заряда (электронам и дыркам) энергетически выгодно находиться в среднем слое. Идея использования структур с гетеропереходами в полупроводниковой электронике была выдвинута уже в начале 50-х годов XX столетия. На ранней стадии изучения гетероструктур важный теоретический вклад в исследования внес Г. Кремер (США), разделивший с Ж. И. Алферовым (Россия) Нобелевскую премию. В 1963 г. Ж. И. Алферов и Г. Кремер независимо сформулировали концепцию полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры.

На [рис. 2.5](#) внутри полупроводника с большей шириной запрещенной зоны содержится слой (толщиной несколько десятых долей микрона) полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны: E_c – край зоны проводимости; E_v – край валентной зоны; незаштрихованная часть рисунка между кривыми E_v и F_p – область, заполненная дырками; заштрихованная часть между кривыми E_c и F_n – область, заполненная электронами: F_p и F_n – положение уровня Ферми для дырок и электронов соответственно.

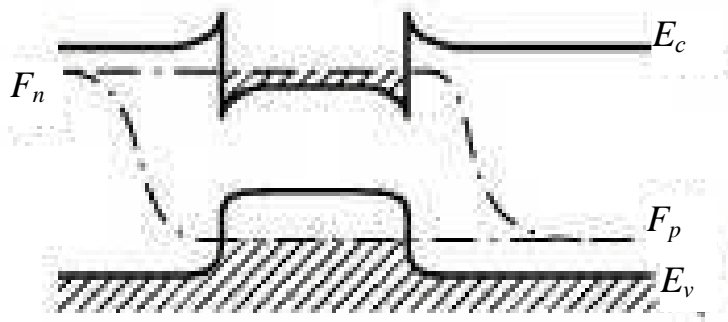


Рис. 2.5. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры

Такая гетероструктура была впервые реализована в системе «галлий – алюминий – мышьяк» методом жидкостной эпитаксии и в дальнейшем с развитием прецизионных методов эпитаксии (газовая, молекулярно-лучевая) стала модельным элементом квантовой ямы.

Одним из примеров гетероструктуры может служить сверхрешетка, которая представляет собой последовательность чередующихся слоев более узкозонного (яма) и более широкозонного (барьер) полупроводников, по сути, набор связанных квантовых ям. Появление дополнительного периода (толщина слоя ямы + толщина слоя барьера), превышающего период кристаллической решетки (отсюда термин «сверхрешетка»), приводит к изменению энергетического спектра структуры. Из-за того, что волновые функции электронов перекрываются (электроны «чувствуют» друг друга), система уровней энергии атомов преобразуется в систему энергетических полос (зон), в пределах которых электроны могут свободно перемещаться по кристаллу. Так и в сверхрешетке уровни в отдельных квантовых ямах сливаются в энергетиче-

ские «минизоны», только, в отличие от естественного кристалла, ширинами минизон можно управлять, меняя толщины барьеров.

Для создания сверхрешеток используют много методов, среди которых можно выделить два:

1. Молекулярно-лучевая эпитаксия – эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно-гладкими гетерограницами и заданным профилем легирования. В установках МЛЭ имеется возможность исследовать качество плёнок «in situ» (т. е. прямо в ростовой камере во время роста). Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарно-гладкой поверхностью.

2. МOCVD-осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы (англ. – metalorganic chemical vapour deposition) – метод эпитаксиального роста материалов, особенно полупроводников, путём термического разложения (пиролиз) из органических газов, содержащих необходимые химические элементы. Например, арсенид галлия выращивают на подложке с использованием в реакторе триметил галлия $((\text{CH}_3)_3\text{Ga})$ и трифенил мышьяка $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{As}$). Сам термин предложил в статье основоположник метода Гарольд Марасевит в 1968 г. В отличие от молекулярно-лучевой эпитаксии, рост происходит не в вакууме, а в присутствии газа при умеренном давлении (от 2 до 100 кПа).

Первый метод позволяет выращивать гетероструктуры с прецизионной точностью (с точностью до долей атомного монослоя). Второй же не отличается такой точностью, но по сравнению с первым методом обладает более высокой скоростью роста.

2.4. Возможность формирования структур с минимальным рассогласованием по параметрам решетки

Эпитаксия – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Различают гетероэпитаксию, когда вещества подложки и нарастающего кристалла различны, и гомоэпитаксию (автоэпитаксию), когда они одинаковы. Эпитаксия наблюдается, например, при кристаллизации, коррозии и определяется условиями сопряжения кристаллических решеток нарастающего кристалла и подложки, причем существенно их структурно-геометрическое соответствие. Легче всего сопрягаются вещества, кристаллизующиеся в одинаковых или близких структурных типах, но эпитаксию можно получить и для различающихся структур.

Эпитаксия особенно оптимально осуществляется, если разность параметров обеих решеток не превышает ~ 10 %. При больших расхождениях сопрягаются наиболее плотно упакованные плоскости и направления. При этом часть плоскостей одной из решеток не имеет продолжения в другой; края таких оборванных плоскостей образуют так называемые дислокации несоот-

ветствия, обычно образующие сетку. Плотность дислокаций в сетке тем больше, чем больше разность параметров сопрягающихся решеток. Меняя параметр одной из решеток (добавлением примеси), можно управлять количеством дислокаций в эпитаксиальном нарастающем слое.

Эпитаксия происходит таким образом, чтобы суммарная энергия границы, состоящей из участков «подложка – кристалл», «кристалл – маточная среда» и «подложка – среда», была минимальной. У веществ с близкими структурами и параметрами (например, Au на Ag) образование границы сопряжения энергетически невыгодно и нарастающий слой имеет в точности структуру подложки (псевдоморфизм). При увеличении толщины упругонапряженной псевдоморфной пленки запасенная в ней энергия растет и при толщинах более критической (для Au на Ag это около 60 нм) нарастает пленка с собственной структурой.

Помимо структурно-геометрического соответствия, сопряжение данной пары веществ при эпитаксии зависит от температуры процесса, степени пересыщения (переохлаждения) кристаллизующегося вещества в среде, от совершенства подложки, чистоты ее поверхности и других условий кристаллизации. Для разных веществ и условий существует так называемая эпитаксиальная температура, ниже которой нарастает только неориентированная пленка.

Эпитаксия обычно начинается с возникновения на подложке отдельных кристалликов, которые срастаются, образуя сплошную пленку. Наблюдалась также эпитаксия на подложке, покрытой тонкой пленкой (несколько десятков нанометров) C, O, O₂ и др., что можно объяснить реальной структурой кристалла подложки, влияющей на слой. Возможна эпитаксия на аморфной подложке, на которой создан кристаллографический симметричный микрорельеф (графоэпитаксия).

Эпитаксиальные пленки выращивают методами жидкостной, газофазной и молекулярно-пучковой эпитаксии, вакуумным напылением и др.

Эпитаксию широко используют в микроэлектронике (транзисторы, интегральные схемы, светодиоды и др.), квантовой электронике (многослойные полупроводниковые гетероструктуры, инжекционные лазеры), устройствах интегральной оптики, в вычислительной технике и прочее.

2.5. Напряженные полупроводниковые структуры, их свойства и применение

Открытие гетеропары GaAs/AlGaAs позволило создать решеточно-согласованную гетероструктуру, т. е. избежать возникновения в структуре напряжений. Это очень важно, потому что при превышении некоторой (зависящей от различия параметров решетки) толщины кристаллической решетке в напряженном среднем слое становится выгодным «отстроиться» от периода решетки окружающего материала. Такое «отстроение» происходит путем об-

разования многочисленных дефектов кристаллической структуры (дислокаций несоответствия), что ведет к резкому ухудшению качества структуры. Надо отметить, что гетеропара GaAs/AlGaAs чаще всего используется в исследованиях свойств низкоразмерных полупроводниковых структур.

К настоящему времени процессы самоорганизации квантовых точек неплохо изучены для целого ряда полупроводниковых гетеропар с большим (вплоть до 7 %) рассогласованием параметров решеток, включая InAs/GaAs, (Ga, In, Al)Sb/GaAs, InAs/InP и InP/InGaP. Общей особенностью всех перечисленных гетероструктур является то, что тонкий слой узкозонного полупроводника, помещенный в матрицу относительно широкозонного материала с меньшим параметром решетки, испытывает сжимающие напряжения. Длина волны генерации лазеров на основе таких материалов не может превышать длину волны, соответствующую краю поглощения широкозонной матрицы, (GaAs или InGaP) и во всех случаях оказывается менее 1,55 мкм. Таким образом, важной задачей является расширение диапазона длин волн излучения лазерных гетероструктур в область 2 мкм и более. Есть сообщения о получении решеточно-рассогласованных гетероструктур GaAs/GaSb, характеризующихся интенсивной фотолюминесценцией в спектральном диапазоне 1,7–2,3 мкм. Образцы представляли собой ультратонкие слои GaAs, выращенные в матрице GaSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Толщина слоев GaAs варьировалась от 1 до 3 монослоев, т. е. находилась в диапазоне толщин, типичных для формирования самоорганизующихся квантовых точек (КТ) за счет 7%-ного рассогласования параметров решеток GaAs и GaSb. В отличие от ранее изученных систем с квантовыми точками, в данном случае слой более широкозонного полупроводника (GaAs, постоянная решетки $a = 5,6532 \text{ \AA}$, ширина запрещенной зоны $E_g = 1,52 \text{ эВ}$), вставленный в матрицу из узкозонного материала (GaSb, $a = 6,0959 \text{ \AA}$, $E_g = 0,81 \text{ эВ}$), оказывается подверженным растягивающим напряжениям. Таким образом, предложенные структуры могут быть использованы в качестве модельных структур для экспериментального исследования процессов роста тонкого слоя с деформациями растяжения в методе МЛЭ, тем более что формирование самоорганизующихся квантовых точек в обращенной системе (тонкий слой GaSb в матрице GaAs) достаточно хорошо изучено.

На [рис. 2.6](#) приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) для структур с одиночными слоями GaAs разной толщины, измеренные при температуре 80 К и относительно низком уровне возбуждения ($\sim 1 \text{ Вт/см}^2$). На всех спектрах наблюдаются два относительно узких коротковолновых пика, представляющих собой ФЛ из буферного слоя GaSb. Один из них, с энергией фотона $\sim 0,8 \text{ эВ}$, обусловлен межзонными излучательными переходами, в то время как пик с энергией фотона 0,775 эВ соответствует переходам между донором и глубоким собственным акцептором в GaSb. В спектрах присутствует еще один пик, положение максимума которого коррелирует с толщиной GaAs-вставки.

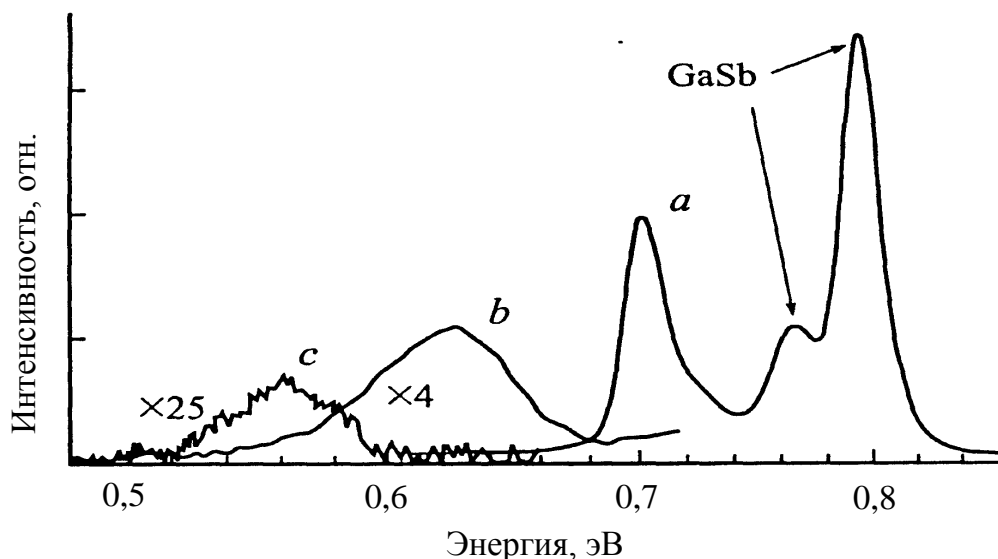


Рис. 2.6. Спектры фотолюминесценции при температуре 80 К и низком уровне возбуждения для структур, содержащих отдельные слои GaAs с номинальной толщиной: *a* – 1,2 мкм; *b* – 1,8 мкм; *c* – 3 мкм

Возможные оптические переходы в исследуемой структуре представлены на [рис. 2.7](#). Сильные растягивающие напряжения, вызванные 7%-ным рассогласованием решеток GaAs и GaSb, приводят к сжатию запрещенной зоны GaAs до величины $\sim 0,4$ эВ, заметно меньшей значения запрещенной зоны окружающего GaSb.

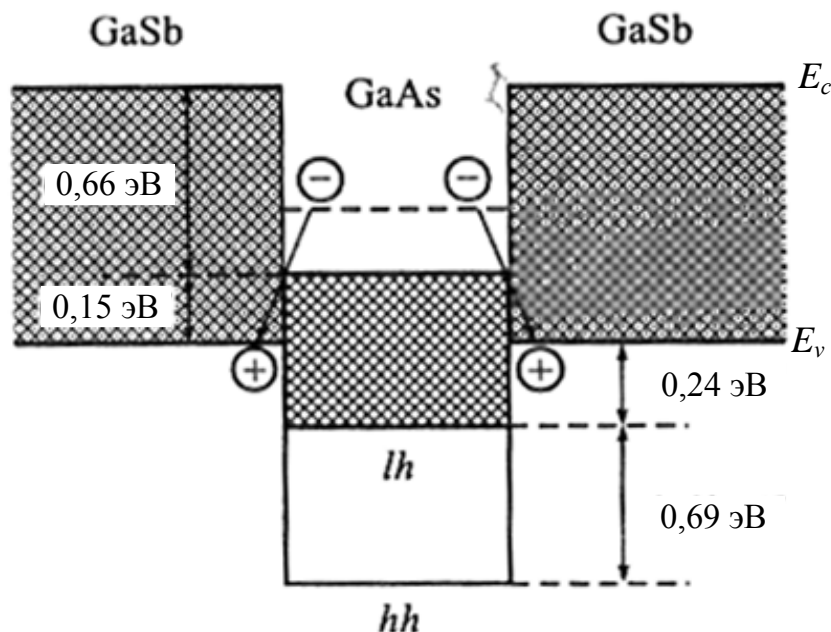


Рис. 2.7. Схематическое изображение зонной диаграммы структуры с КЯ GaAs/GaSb и возможных оптических переходов в ней: *lh* – легкие дырки, *hh* – тяжелые дырки

Ультратонкие напряжённые слои GaAs в матрице GaSb – это перспективные наноструктуры для оптоэлектроники среднего инфракрасного диапазона. Дальнейший прогресс в области гетероструктур с квантовыми точками (КТ) связан с расширением их области применения в различных приборах микро- и оптоэлектроники и получение все более однородных КТ, что позволит качественно улучшить рабочие характеристики большинства современных приборов.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы принципиальные ограничения для традиционного подхода к управлению свойствами полупроводникового материала?
2. Что понимают под атомным кластером?
3. Что является движущей силой в образовании кластера?
4. Каковы современные методы получения структур с атомными кластерами?
5. Каковы методы исследования нанокластеров?
6. Что понимают под межфазными границами?
7. Что представляет собой полупроводниковая сверхрешетка?
8. Каковы возможности эпитаксии в формировании структур с минимальным рассогласованием по параметрам решетки?
9. Какая полупроводниковая структура называется напряженной?
10. Каковы реальные применения напряженных гетероструктур?

ЛЕКЦИЯ 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ ЭПИТАКСИИ

План лекции

- 3.1. Достижения молекулярно-лучевой эпитаксии.
- 3.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.

Литература: [[14](#), [17](#), [22](#)].

3.1. Достижения молекулярно-лучевой эпитаксии

Молекулярно-лучевая эпитаксия, по существу, является развитием до совершенства технологии вакуумного напыления тонких пленок. Ее отличие от классической технологии вакуумного напыления связано с более высоким уровнем контроля технологического процесса. В методе МЛЭ тонкие монокристаллические слои формируются на нагретой монокристаллической подложке за счет реакций между молекулярными или атомными пучками и поверхностью подложки. Высокая температура подложки способствует миграции атомов по поверхности, в результате которой атомы занимают строго определенные положения. Этим определяется ориентированный рост кристалла формируемой пленки на монокристаллической подложке. Успех процесса эпитаксии зависит от соотношения между параметрами решетки пленки и подложки, правильно выбранных соотношений между интенсивностями падающих пучков и температуры подложки. Когда монокристаллическая пленка растет на подложке, отличающейся от материала пленки, и не вступает с ним в химическое взаимодействие, то такой процесс называется *гетероэпитаксией*. Когда подложка и пленка по химическому составу не отличаются или незначительно отличаются друг от друга, то процесс называется *гомоэпитаксией*, или *автоэпитаксией*. Ориентированное наращивание слоев пленки, которая вступает в химическое взаимодействие с веществом подложки, называют *хемоэпитаксией*. Граница раздела между пленкой и подложкой имеет ту же кристаллическую структуру, что и подложка, но отличается по составу как от материала пленки, так и материала подложки.

По сравнению с другими технологиями, используемыми для выращивания тонких пленок и многослойных структур, МЛЭ характеризуется прежде всего малой скоростью роста и относительно низкой температурой роста. К преимуществам этого метода следует отнести возможность резкого прерывания и последующего возобновления поступления на поверхность подложки молекулярных пучков различных материалов, что наиболее важно для фор-

мирования многослойных структур с резкими границами между слоями. Получению совершенных эпитаксиальных структур способствует и возможность анализа структуры, состава и морфологии растущих слоев в процессе их формирования методом дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) и электронной оже-спектроскопии (ЭОС).

Вопросы, связанные с механизмами роста, становятся чрезвычайно важными при создании гетероструктур и многослойных структур, от которых требуется высшая степень однородности состава при толщине менее 100 Å.

Наиболее важные индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост следующие:

- адсорбция составляющих атомов или молекул на поверхности подложки;
- поверхностная миграция атомов и диссоциация адсорбированных молекул;
- присоединение атомов к кристаллической решетке подложки или эпитаксиальным слоям, выращенным ранее;
- термическая десорбция атомов или молекул, не внедренных в кристаллическую решетку.

Эти процессы схематически изображены на [рис. 3.1](#). Здесь поверхности подложки и растущего эпитаксиального слоя разделены на «кристаллические участки», с которыми взаимодействуют поступающие на поверхность из молекулярных источников компоненты. Каждый участок поверхности представляет собой небольшой фрагмент поверхности кристалла и характеризуется индивидуальной химической активностью.

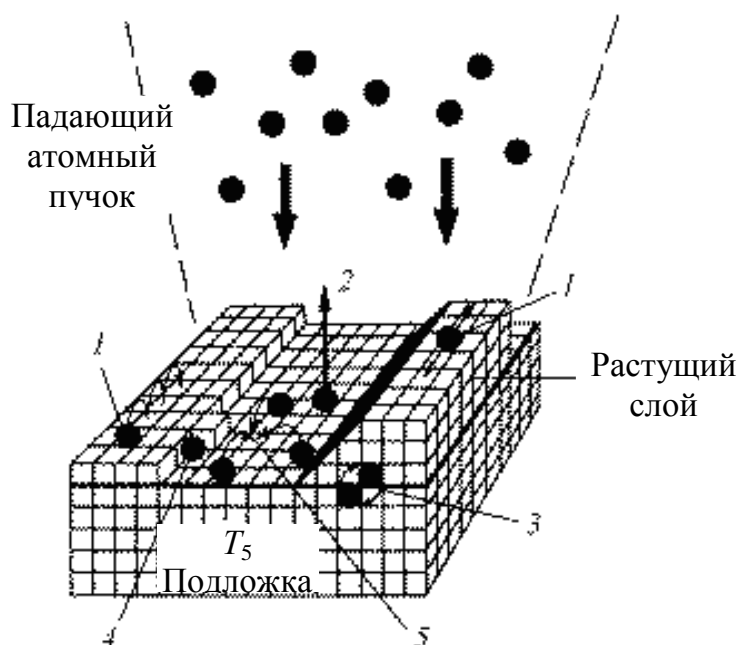


Рис. 3.1. Схематическое изображение поверхностных процессов, происходящих при выращивании тонкой пленки методом МЛЭ: 1 – поверхностная диффузия; 2 – десорбция; 3 – взаимодиффузия; 4 – встраивание в решетку; 5 – поверхностная агрегация (зародышеобразование)

Конденсация на подложку нового материала из газовой фазы определяется скоростью столкновения атомов или молекул с подложкой (число частиц, поступающих за единицу времени на единицу площади):

$$r = \frac{p}{\sqrt{2\pi MkT}}.$$

Здесь p – давление паров; M – молекулярный вес частиц; k – постоянная Больцмана и T – температура источника. Частица, конденсированная из газовой фазы, может сразу же покинуть поверхность подложки или диффундировать по поверхности. Процесс поверхностной диффузии может привести к адсорбции частицы на поверхности подложки или растущей пленки или к процессу поверхностной агрегации, сопровождающимся образованием на поверхности зародышей новой кристаллической фазы конденсируемого материала. Адсорбция отдельных атомов, как правило, происходит на ступеньках роста или при других дефектах. Атомный процесс взаимодиффузии, при котором атомы пленки и подложки обмениваются местами, играют важную роль в процессе эпитаксиального роста. В результате этого процесса граница между подложкой и растущей пленкой становится более гладкой.

Процессы на поверхности, сопровождающие эпитаксиальный рост при МЛЭ, могут быть описаны количественно. Каждый из индивидуальных атомных процессов, рассмотренных выше, характеризуется собственной энергией активации и может быть в первом приближении представлен экспоненциальным законом. Скорость десорбции, например,

$$v \propto \exp\left(\frac{E_d}{kT_s}\right),$$

где E_d – энергия активации процесса десорбции; T_s – температура подложки.

На феноменологическом уровне различают три основных типа роста тонких эпитаксиальных пленок:

1. Послойный рост (*layer-by-layer growth*). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного завершения роста предыдущего слоя. Этот механизм роста называют также ростом Франка ван дер Мерве (*Frank van der Merve, FM*). Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов значительно больше, чем между ближайшими атомами в слое. Схематическое представление послойного роста пленки для различной степени покрытия θ (в долях монослоев ML) показано на [рис. 3.2, а](#).

2. Островковый рост, или рост Вольмера – Вебера (*island growth, Vollmer – Weber, VW*). Этот механизм является полной противоположностью послойному росту.

Условием его реализации является преобладание взаимодействия между ближайшими атомами над взаимодействием этих атомов с подложкой.

При островковом механизме роста вещество с самого начала оседает на поверхности в виде многослойных конгломератов атомов.

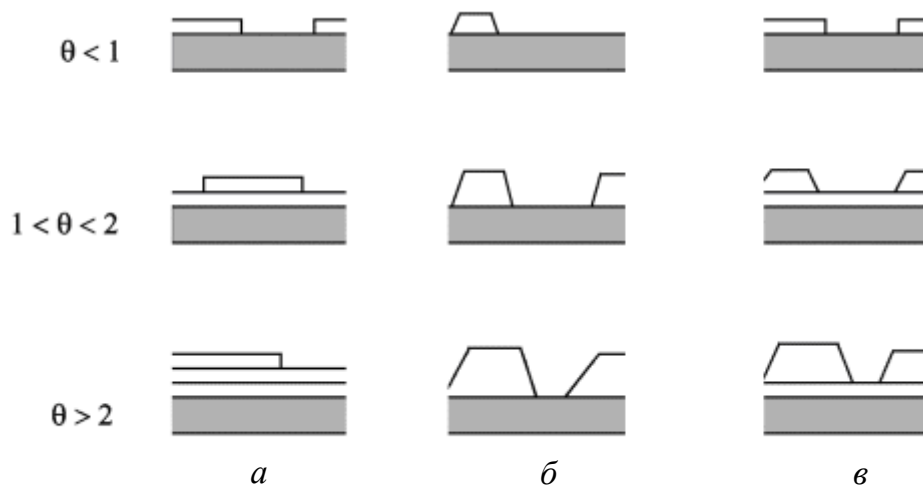


Рис. 3.2. Схематическое представление трех важнейших механизмов роста: *а* – послойный рост; *б* – островковый рост; *в* – рост слоя с островками

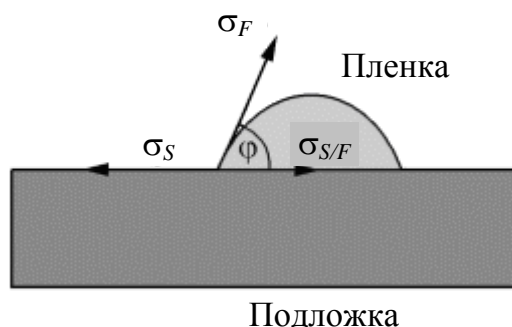


Рис. 3.3. Трехмерный островок пленки на подложке

3. Промежуточным между этими двумя механизмами является рост Странски – Крастанова (Stransky – Krastanov, SK, layer-plus-islandgrows), при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки. К этому механизму могут привести многие факторы, в частности, достаточно большое несоответствие между параметрами кристаллических решеток пленки и подложки.

Схематические иллюстрации островкового механизма роста и роста Странски – Крастанова приведены на [рис. 3.2, б, в](#) соответственно.

Условие, разграничивающее реализацию того или иного механизма роста, можно получить из анализа соотношений между коэффициентами поверхностного натяжения между подложкой и вакуумом σ_S , между пленкой и вакуумом σ_F и между подложкой и пленкой $\sigma_{S/F}$ ([рис. 3.3](#)).

Коэффициент поверхностного натяжения поверхности равен свободной энергии единицы поверхности. Соответственно эти коэффициенты определяют силы поверхностного натяжения, действующие на единицу элемента

длины границы раздела. Согласно этому определению сила dF , действующая на бесконечно малый элемент dl границы раздела двух сред

$$dF = \sigma dl.$$

Из условия равновесия для любого элемента длины линии соприкосновения подложки трехмерного островка пленки и вакуума получим:

$$\sigma_S = \sigma_{S/F} + \sigma_F \cos \varphi,$$

где φ – краевой угол, т. е. угол, образованный касательной к поверхности островка пленки и поверхностью подложки.

Если краевой угол равен нулю, то островок «растекается» тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует послойному механизму роста. Это условие приводит к следующему соотношению между коэффициентами поверхностного натяжения:

$$\sigma_S \geq \sigma_F + \sigma_{S/F} \quad - \quad \text{послойный рост.}$$

Если $\varphi > 0$, реализуется механизм роста островков, условие которого

$$\sigma_S < \sigma_F + \sigma_{S/F} \quad - \quad \text{рост островков.}$$

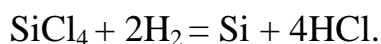
Для более полного вывода условий, при которых реализуется тот или иной механизм роста, необходимо учесть влияние на условие равновесия между формируемой пленкой и подложкой газовой фазы в области роста пленки.

Часто в литературе рассматривают еще один механизм роста – статистическое осаждение. При этом механизме роста пленки атомы осаждаемого вещества располагаются на поверхности согласно распределению Пуассона так, как если бы их бросали случайно и они просто прилипали бы на месте падения.

3.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

Методы газофазной эпитаксии, отличающиеся простотой и воспроизводимостью химических процессов осаждения тонких пленок, достаточно интенсивно используются для получения пленок полупроводниковых материалов, но могут также применяться для производства пленок металлов и диэлектриков. В основе этих методов лежат процессы переноса осаждаемых материалов в виде летучих соединений к поверхности подложки, на которой происходит разложение этих соединений с выделением необходимо продук-

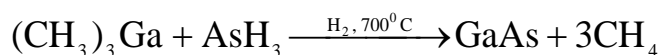
та. Из методов газофазной эпитаксии в производстве промышленного кремния широкое применение получил метод восстановления кремния в атмосфере водорода из его тетрахлорида (SiCl_4):



В этом же реакторе производят легирование эпитаксиальных слоев кремния, используя источники жидких или газообразных веществ, содержащих легирующие примеси. Например, для получения эпитаксиального слоя *n*-типа используют вещества, содержащие фосфор: PCl_3 , PBr_3 , PH_3 и др. Слой *p*-типа получают легированием кремния бором из его соединений, например, VBr_3 , B_2H_2 и др.

В последнее десятилетие двадцатого столетия, когда возник интерес к массовому производству приборов с субмикронными слоями (полевых транзисторов, лазеров, фотоприемников, солнечных элементов и др.) из методов газофазной эпитаксии наиболее интенсивно развивается метод роста из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (РГФ МОС). Этот метод находит все более широкое применение в технологии полупроводниковых структур, в том числе и полупроводниковых сверхрешеток. В различных источниках для описания этой технологии используются разные названия: «металлоорганическая газофазная эпитаксия», «органометаллическая газофазная эпитаксия», «металлалкильная газофазная эпитаксия». Название «рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений» является наиболее общим, так как подчеркивает возможность роста неэпитаксиальных (поликристаллических или аморфных) пленок. В этом методе рост эпитаксиального, поликристаллического или аморфного слоя осуществляется при термическом разложении (пиролизе) газообразных металлоорганических соединений и последующей химической реакции между возникающими компонентами на нагретой подложке. Термин «металлоорганика» обозначает вещества, содержащие металлуглеродные или металлкислородуглеродные связи, а также соединения металлов с органическими молекулами. Впервые в 1968 г. методом РГФ МОС были получены пленки арсенида галлия.

Химическая реакция, с помощью которой были получены пленки GaAs, может быть записана в виде



Разложение газовой смеси триметилгаллия $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ и гидрида мышьяка (арсина) AsH_3 происходит при температуре 700°C в атмосфере водорода H_2 .

С помощью РГФ МОС выращивают большинство полупроводниковых соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ и $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$, а также многие важные тройные и четверные соединения $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$. Например, соединение $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ обычно выращивают, используя следующий процесс:



Реакции типа приведенных проводят в специальных реакторах для РГФ МОС. Схема одного из подобных реакторов дана на [рис. 3.4](#).

Подложка 3, на которой происходит кристаллизация требуемого соединения, помещена на графитовый держатель 4 внутри кварцевого реактора 1. Реакция происходит при атмосферном или при пониженном (приблизительно до 10 тор) давлении. Температура пиролиза 600–800 °С обеспечивается радиочастотным нагревом с частотой несколько сотен килогерц (высокочастотный нагреватель 2).

Такая система нагрева создает высокую температуру вблизи поверхности подложки, так как нагревается только графитовый держатель, в то время как стенки реакционной камеры остаются холодными. В этом случае полупроводниковая пленка образуется только на поверхности подложки, а реакция на стенках реактора не наступает.

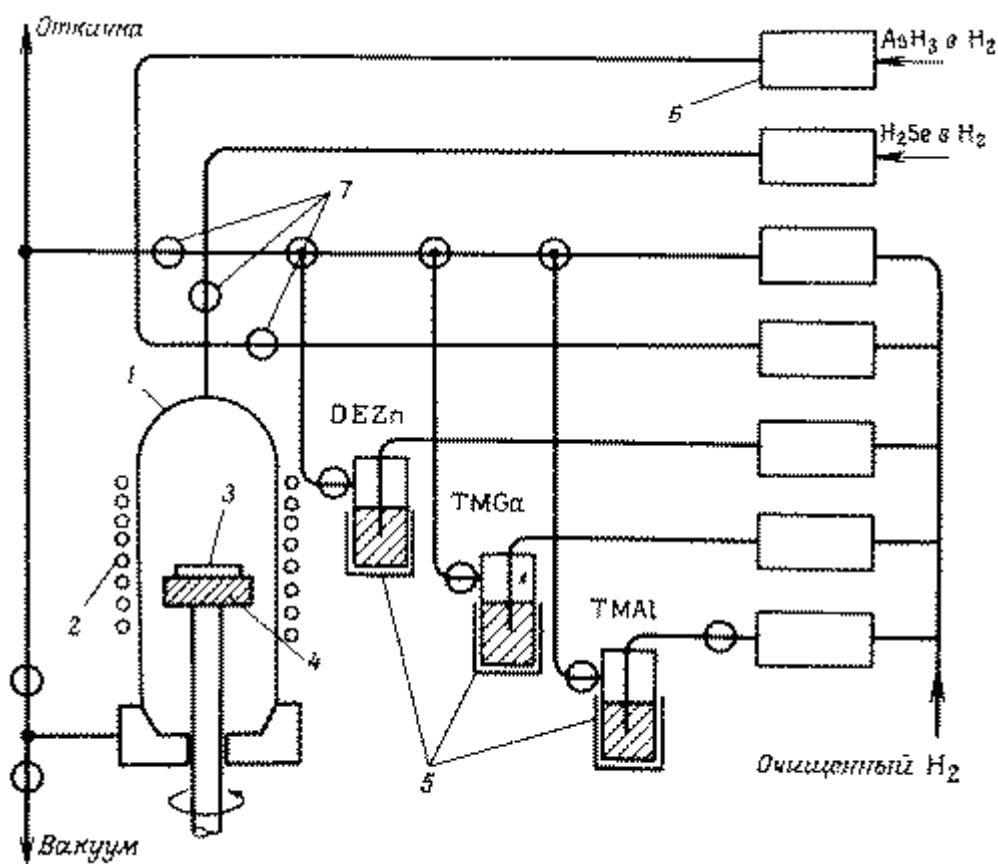


Рис. 3.4. Схематическое изображение реактора для РГФ МОС: 1 – кварцевый реактор; 2 – высокочастотный нагреватель; 3 – подложка; 4 – графитовый держатель; 5 – источники металлоорганических соединений; 6 – датчики потока; 7 – вентили

Металлоорганические соединения (на [рис. 3.4](#) – диэтилцинк DEZn , триметил галлий TMGa , триметил алюминий TMAI) доставляются в зону реакции с помощью газа-носителя H_2 .

Многослойные многокомпонентные структуры методом РГФ МОС могут быть выращены в едином ростовом цикле. Для этой цели в реакторах предусмотрена возможность подключения нескольких металлоорганических и гидридных источников. Использование автоматизированного управления процессом роста в методе РГФ МОС позволяет создавать полупроводниковые сверхрешетки с толщиной отдельных слоев до 1,5 нм, причем изменение состава на гетеропереходе происходит практически на толщине одного атомного слоя.

К преимуществам метода РГФ МОС следует отнести возможность создания однородных эпитаксиальных структур большой площади на установках, аналогичных тем, которые используются в производстве промышленного эпитаксиального кремния.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под эпитаксией?
2. Какие поверхностные процессы происходят при выращивании тонкой пленки методом МЛЭ?
3. Чем определяется конденсация на подложку нового материала из газовой фазы?
4. Каковы преимущества метода МЛЭ?
5. Каков механизм послойного роста?
6. Каков механизм роста Вольмера – Вебера?
7. Каков механизм роста Странски – Крастанова?
8. Что представляет собой механизм роста «статистическое осаждение»?
9. Что общего между методами МЛЭ и РГФ МОС?
10. Каковы различия между методами МЛЭ и РГФ МОС?

ЛЕКЦИЯ 4

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДАМИ ЛИТОГРАФИИ

План лекции

- 4.1. Традиционная фотолитография и ее проблемы.
- 4.2. Электронно-лучевая литография.
- 4.3. Рентгеновская литография.

Литература: [9, 22, 25].

4.1. Традиционная фотолитография и ее проблемы

Оптическая литография объединяет в себе такие области науки, как оптика, механика и фотохимия. При любом типе печати ухудшается резкость края ([рис. 4.1](#)). Проецирование двумерного рисунка схемы ведет к уменьшению крутизны края, поэтому нужен специальный резист, в котором под воздействием синусоидально модулированной интенсивности пучка будет формироваться прямоугольная маска для последующего переноса изображения травлением или взрывной литографией.

Если две щели размещены на некотором расстоянии друг от друга, то неэкспонируемый участок частично экспонируется по следующим причинам:

- 1) дифракция;
- 2) глубина фокуса объектива;
- 3) низкоконтрастный резист;
- 4) стоячие волны (отражение от подложки);
- 5) преломление света в резисте.

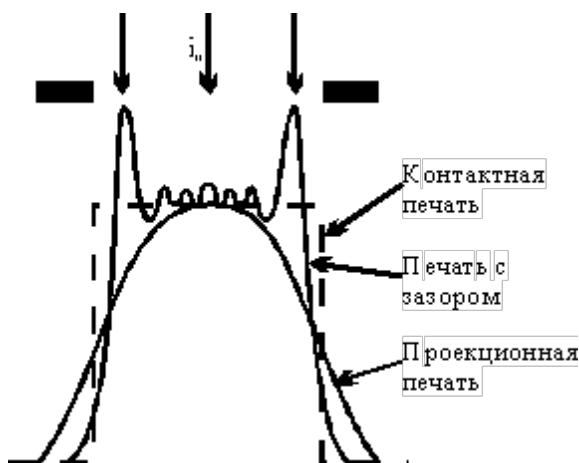


Рис. 4.1. Профили распределения интенсивности в изображениях для случаев контактной печати, печати с зазором и проекционной литографии

Изображение неточечного источника в фокальной плоскости идеального объектива никогда не бывает истинной точкой, а распределяется в дифракционную картину диска Эйри. Таким образом, неэкспонируемый промежуток частично экспонируется дифрагировавшим и отраженным от подложки излучением. Из-за ограниченной селективности последующего процесса сухого травления резиста и подложки требуется получение рисунка с круглым профилем в относительно толстой пленке. Вследствие внутреннего эффекта близости (дифракционные потери) изолированные экспонируемые линии облучаются недостаточно и должны экспонироваться с большей дозой (что ведет к искажению изображений линий размером более 3 мкм или неэкспонируемых промежутков размером менее 3 мкм) или проявляться с потерей толщины резиста в неэкспонируемых промежутках.

Таким образом, задача фотолитографии заключается в том, чтобы обеспечить совмещение и воспроизвести в резисте двумерный рисунок фототаблона с точностью в пределах $\pm 15\%$ от номинального размера его элементов и с 5% -ным допуском на требуемый наклон краев. Послойное совмещение приборных структур должно осуществляться с точностью не хуже $\pm 2,5\%$ от размера минимального элемента.

Оценка влияния проекционной оптики и системы совмещения определяется суммой среднеквадратичных ошибок переноса изображения и совмещения. Ширина минимально воспроизводимых линий при этом считается равной 4-кратной точности совмещения.

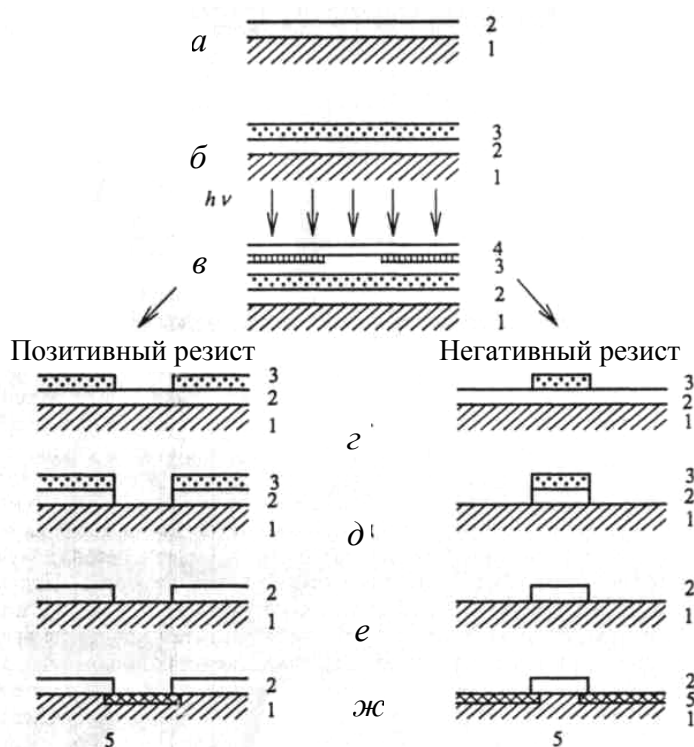


Рис. 4.2. Основные этапы литографического процесса с использованием позитивного (слева) и негативного (справа) фоторезистов: *а* – окисление и образование поверхностного слоя SiO_2 ; *б* – нанесение слоя резиста; *в* – экспонирование; *г* – удаление экспонированного позитивного и неэкспонированного негативного резистов; *д* – протравливание слоя SiO_2 ; *е* – полное удаление резиста; *жс* – легирование кремниевой подложки; 1 – подложка из Si; 2 – поверхностный слой SiO_2 ; 3 – слой резиста; 4 – фототаблон (маска); 5 – область легирования

Стремительное развитие электроники подчиняется закону Мура (экспоненциальное со временем увеличение числа транзисторов на кристалле). Это приводило к уменьшению стоимости на функцию электронной цепи. Например, стоимость памяти на бит уменьшалась вдвое каждые два года. Уменьшалось также время переключения на функцию. С 1959 г. быстродействие интегральных схем улучшилось на 4 порядка. Число транзисторов на чип увеличилось в 10^8 раз.

Критическими размерами в интегральных схемах (ИС) являются минимальный размер (MP), воспроизводящийся в фоторезисте методом фотолитографии, и длина канала L_k МДП-транзистора. На [рис. 4.3](#) изображены зависимости изменения этих размеров по годам в соответствии с ITRS 2005 (International Technology Roadmap for Semiconductor – ежегодно обновляемый ведущими экспертами международный прогноз развития техники ИС).

Видно, что MP, равный 22 нм, будет достигнут в производстве к 2013 г., при этом L_k составит 12 нм. Если L_k равно 12 нм, то на кристалле можно разместить 10^{12} транзисторов. Долгосрочный прогноз предсказывает возможность создания гигантских интегральных схем на транзисторах с длиной канала до 6 нм.

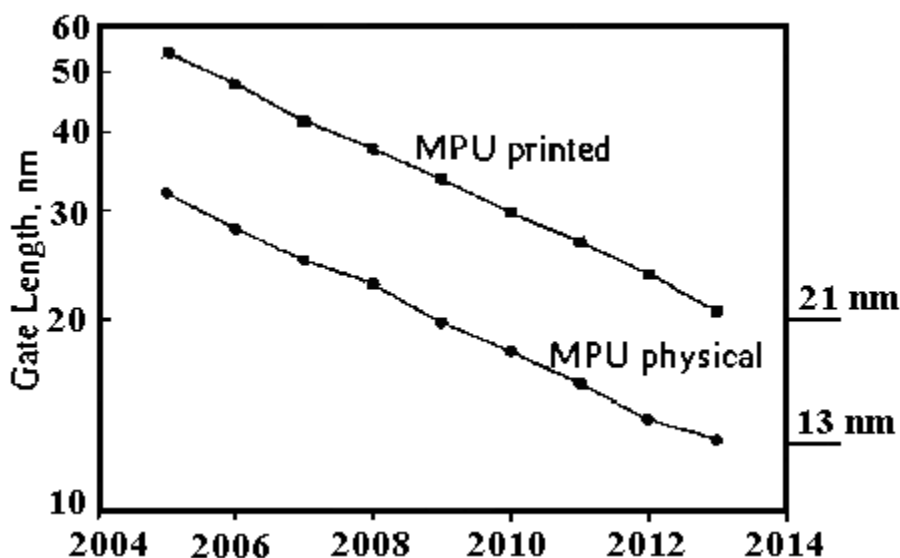


Рис. 4.3. Прогноз уменьшения длины затвора МДП-транзистора (ITRS 2005)

В настоящее время передовыми компаниями уже освоено производство с MP 65 нм, при этом L_k равна 35 нм. Столь малые MP достигаются методом оптической литографии. Хотя стоимость оптических литографических машин с 1965 г. увеличилась от 10 тыс. долл. до 35 млн долл., а стоимость высокопроизводительного производства возросла до 2–3 млрд долл. США к 2008 г., стоимость транзистора за это же время уменьшилась на 7 порядков величины. Таким образом, главным стимулом микроэлектроники является экономика.

Разрешение процесса литографии (достижимый МР) определяется из известной формулы Релея:

$$R = k_1 \cdot \lambda / NA,$$

в которой k_1 – коэффициент Релея; λ – длина волны; NA – числовая апертура объектива.

Коэффициент Релея ограничивается несовершенством систем изображения, в том числе дифракционными эффектами, и несовершенством регистрирующей среды. Постоянное совершенствование объективов, чувствительности и контрастности фоторезистов, процесса экспонирования и проявления позволило в современных степперах достичь $k_1 = 0,35–0,25$, $NA = 0,85–0,95$. Для предельного расчета $\lambda = 193$ нм получим $R = 50$ нм, т. е. почти в 4 раза меньше длины волны. Постоянное улучшение разрешения достигается оптимальной коррекцией шаблонов, применением фазовых шаблонов, оптимальным выбором резистов (многослойных, с высокими коэффициентами преломления n , с химическим усилением и т. д.), применением неосевых источников освещения, линз из материалов с высокими значениями n (линзы из кварца с $n = 1,56$ могут быть заменены объективами из алюмолютециевого граната (LuAG) с $n = 2,1$) и, наконец, использованием поляризованного света.

Радикальное увеличение NA дает применение иммерсии. В зазор между объективом и пластиной постоянно подается и отбирается жидкость. Поскольку числовая апертура пропорциональна коэффициенту преломления среды n между объективом и пластиной, NA увеличивается в n раз. При использовании воды ($n = 1,436$ на длине волны 193 нм) $NA = 1,2–1,35$. Возможно применение жидкостей с $n = 1,6; 1,8$ (жидкие полимеры, добавки наночастиц, солей, кислот к воде и т. д.). В этих случаях возможно достижение так называемых гипер NA , равных 1,4–1,75, и разрешения 32 нм, а это означает шестикратное улучшение разрешения по отношению к длине волны. Нужно помнить при этом, что при увеличении NA резко уменьшается доступная глубина фокуса:

$$DOF = k_2 \cdot \lambda / NA^2.$$

Так, для разрешения $R = 45$ нм доступная глубина фокуса составляет 150 нм, а для $R = 32$ нм – всего лишь 100 нм.

В современных производствах доминируют высокопроизводительные (100 пластин/ч) проекционные (с уменьшением 4 : 1) степперы-сканеры (пошаговое экспонирование на чип со сканированием светового пятна в пределах одного чипа) с эксимерными лазерами в области глубокого ультрафиолета в качестве источников света. Это в настоящее время лазеры на KrF

(248 нм) и ArF (193 нм).

Эксимерный лазер – разновидность ультрафиолетового химического лазера, широко применяемая в глазной хирургии и полупроводниковом производстве.

Термин «эксимер» (англ. excited dimer) обозначает возбуждённый димер и обозначает тип материала, используемого в качестве рабочего тела лазера.

Первый эксимерный лазер был представлен в 1971 г. Н. Басовым, В. А. Даниличевым и Ю. М. Поповым в Физическом институте им. П. Н. Лебедева в г. Москве. Лазер использовал димер ксенона (Xe_2), возбуждаемый пучком электронов для получения вынужденного излучения с длиной волны 172 нм. В дальнейшем стали использовать смеси благородных газов с галогенами (например, XeBr), что было запатентовано в 1975 г. Джорджем Хартом и Стюартом Сирлесом из исследовательской лаборатории ВМС США.

Лазерное излучение эксимерной молекулы происходит вследствие того, что она имеет «притягивающее» (ассоциативное) возбуждённое состояние и «отталкивающее» (неассоциативное) основное. Это объясняется тем, что благородные газы, такие как ксенон или криптон, высокоинертны и обычно не образуют химических соединений. Конечно, в возбуждённом состоянии (вызванном электрическим разрядом) они могут образовывать временные молекулы друг с другом (димеры) или с галогенами, такими как фтор или хлор. Такое соединение, находящееся в возбуждённом состоянии, может отдать свою энергию в виде спонтанного или вынужденного излучения, в результате чего молекула перейдет в основное состояние, а затем очень быстро (в течение пикосекунд) распадется на составляющие атомы. Такой процесс образует инверсию населённости между двумя энергетическими уровнями.

Несмотря на то, что термин «димер» относится только к соединению одинаковых атомов, а в большинстве эксимерных лазеров используются смеси благородных газов с галогенами, название прижилось и используется для всех лазеров аналогичной конструкции.

Длина волны эксимерного лазера зависит от состава используемого газа и обычно лежит в ультрафиолетовой области:

Эксимер	Длина волны
F_2	157 нм
ArF	193 нм
KrF	248 нм
XeBr	282 нм
XeCl	308 нм
XeF	351 нм

Эксимерные лазеры обычно работают в импульсном режиме с частотой 100 Гц и длиной импульса около 10 нс, иногда эти значения могут достигать 200 Гц и 30 нс. Мощное ультрафиолетовое излучение таких лазеров позволяет широко применять их в хирургии (особенно глазной), процессах литографии в полупроводниковом производстве, а также в дерматологии. Сегодня эти устройства довольно громоздки, что является недостатком для широкого медицинского применения, однако их размеры постоянно уменьшаются вследствие современных разработок.

Определенные надежды возлагались на применение эксимерных лазеров на F_2 в качестве источников света на длине волны 157 нм. На этой длине волны кварц является непрозрачным, и в качестве материалов линз необходимо применение CaF_2 . На фоне интенсивного развития иммерсионной литографии на 193 нм литография-157 проигрывает из-за низкого качества фторида кальция (достижение высокой оптической однородности) и сложности выбора резиста. Применение иммерсии в литографах на такой длине волны остается проблематичным. Хотя в развитие литографии-157 вложены большие средства, будущее ее применения не определено и, возможно, является бесперспективным.

Компания «Интел», которая славится тем, что развивает свои производства в соответствии с законом Мура для сложнейших изделий микроэлектроники – микропроцессоров, намерена продлить жизнь иммерсионной литографии-193 в производстве вплоть до 16 нм. Можно утверждать, что на производствах ИС с МР 32 нм будут использоваться иммерсионные литографы на 193 нм. Это подтверждается и работами по технологии литографии фирмы IBM.

Дальнейшее уменьшение МР возможно за счет применения оптической литографии на длине волны 13,5 нм (мягкий рентген или экстремальный ультрафиолет – ЭУФ). На этой длине волны света невозможно использовать преломляющую оптику из-за интенсивного поглощения такого света всеми материалами. Поэтому в таких системах используют отражающую оптику на рентгеновских зеркалах. При использовании современных методов нанесения многослойных покрытий с чередующимися слоями Mo-Si удастся получить коэффициент отражения до 70 %, что позволяет строить объективы с 4–6 зеркалами. Шаблоны также становятся отражающими. Потери излучения требуют создания источника излучения на длине волны 13,5 нм с оптической мощностью свыше 115 Вт.

Главными аргументами развития ЭУФ-литографии (ЭУФЛ) являются следующие. Во-первых, ЭУФЛ является проекционной оптической и использует стеклянные заготовки для шаблонов. В отличие от ионной, электронной (в том числе многолучевой) или импринт ЭУФЛ не требует создания новой инфраструктуры и обеспечивает высокую производительность. Эксперты

фирмы «Интел» называют импринт-литографию «разрушающей» из-за необходимости в случае ее применения резкого изменения инфраструктуры производства шаблонов и всей технологии литографии. Главная цель – продвинуть оптическую литографию как можно дальше, не используя более дорогие альтернативы без абсолютной необходимости. Во-вторых, ЭУФЛ может быть использована для нескольких поколений ИС (для $k = 0,4$ и $NA = 0,25$, $R = 22$ нм, а для предельного расчета с $NA = 0,45$ достижимо $R = 10–12$ нм), в частности, для диапазона минимальных размеров 32–12 нм. И, в-третьих, работоспособность ЭУФЛ уже продемонстрирована на прототипах литографов. Внедрению ЭУФЛ будут предшествовать работы по достижению нужной оптической мощности источника (необходимо 115 Вт, пока достигнуто 20–30 Вт), разработка ультраплоских подложек для масок с очень низкой плотностью дефектов, транспортной системы масок, резистов, отвечающих требованиям по разрешению, чувствительности и ширине шероховатости края. Проблематичным кажется возможность применения фазовых шаблонов, так как ошибка в изменении рельефа шаблона на величину 0,11 нм дает сдвиг фазы на 6 градусов. Эта оценка дает представление о необходимой точности воспроизведения рельефа фазового шаблона. Промышленный ЭУФ-литограф планируется создать в 2007–2009 гг. (ASML). Его стоимость не сильно превысит стоимость иммерсионного литографа и составит 25–30 млн долл. Следует отметить, что и в России сделаны крупные научно-практические заделы по ЭУФЛ в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и др.

С момента появления литографии в основном ее совершенствование продвигалось по пути уменьшения длины волны экспонирующего излучения. В современной ситуации это невозможно, поэтому прибегают к другим методам совершенствования процесса фотолитографии. При дальнейшем уменьшении размеров элементов мы сталкиваемся с целым рядом проблем, которые свидетельствуют о наступлении предела возможностей современной фотолитографии. Актуальные проблемы фотолитографии:

1. Увеличение сопротивления областей транзистора, уменьшить которое легированием уже не представляется возможным.
2. Увеличение паразитных емкостей и токов утечки при приближении элементов друг к другу.
3. Ярко выраженные эффекты дифракции и аберрации на зеркалах установок, несмотря на то, что они обработаны со средними квадратичными отклонениями не более 0,1–0,3 нм, и совершенством поверхности не хуже, чем $\lambda/20$, что соответствует 0,5 нм.
4. Проблемы создания источников излучения. До сих пор не удалось создать источника излучения с длиной волны 157 нм на эксимерных лазерах. Коротковолновое излучение с длиной волны менее 13 нм уже неперспектив-

но из-за активной генерации рентгеновских фотоэлектронов. Для генерации излучения с длиной волны 13,5 нм сегодня используются двухкомпонентные лазер-плазменные источники, состоящие из мощного YAG лазера (0,1–1 ТВт, 1 000 нм, 100 Гц) и мишени. Такой источник излучения должен обеспечить необходимые мощность, критерий отдачи, коэффициент «мусорообразования» (debris production DP) и длину волны (13,5 нм), которая является оптимальной для работы с размерами менее 100 нм. Металлические мишени характеризуются высоким коэффициентом отдачи, но и высоким коэффициентом «мусорообразования»: при воздействии лазера на мишени происходит локальное разрушение мишени с образованием кратера, который развивается со скоростью порядка 150 м/с, в результате чего частицы мишени попадают на первое зеркало, загрязняя его.

Сверхзвуковые струи инертных газов характеризуются практически нулевым DP-коэффициентом, но обладают очень малым коэффициентом отдачи, что существенно сокращает область их возможного применения.

5. Излучение с длиной волны порядка 13 нм активно поглощается практически всеми материалами и атмосферой в частности, следовательно, возникает проблема создания зеркал для проекционной фотолитографии.

6. Вследствие активного поглощения атмосферой необходима организация вакуумированных технологических циклов, что сопряжено с массой трудностей при реализации. Демпфирование и амортизация вибраций, создаваемых вакуумными насосами и приводами предметных столов, является очередной конструкторской задачей при требуемых точностных параметрах совмещения фотошаблона (ФШ) и пластин.

7. Существенно возрастает сложность технологической коррекции, учета эффектов «близости», рельефа подстилающей поверхности и неоднородного отражения от нее вследствие оптических явлений и неоднородных коэффициентов отражения.

8. Экспоненциально растет информационная емкость технологических файлов, их объем достигает сотен Гб.

С момента появления литографии существовали параллельные технологии получения травостойкого покрытия на подложке кремния. Несмотря на столь высокие успехи, достигнутые в оптической литографии, она не является единственным развиваемым в настоящее время направлением. С целью получения экстремально малых размеров ведутся активные исследования в области использования других видов излучения и методов экспонирования.

Хотя за последние 20 лет XX столетия неоднократно высказывались сомнения в возможности дальнейшего использования оптической проекционной литографии, развитие технологии позволило расширить предсказанные ранее пределы по разрешению. Там не менее, экстенсивный путь развития, связанный в основном с уменьшением длины волны используемого ис-

точника излучения, при достижении сегодняшнего значения 193 нм, становится трудно выполнимой задачей. Это заставляет искать принципиально иные методы получения топологического рисунка с размерами элементов менее 100 нм. Такими методами могут стать: рентгенолитография, электронно-лучевая литография, SCALPEL, ионно-лучевая литография.

4.2. Электронно-лучевая литография

В традиционной фотолитографии резисты экспонируются незаряженными фотонами ультрафиолетового диапазона. Из теории дифракции и практической микроскопии известно, что разрешение ограничено длиной волны применяемого излучения. При использовании некоторых видов излучения высокой энергии шаблоны могут не применяться, что ведет, с одной стороны, к снятию ограничения по разрешению, с другой – к снижению производительности процесса экспонирования и росту производственных затрат.

Длина волны экспонирующего излучения высокой энергии измеряется сейчас не нанометрами, а ангстремами. Резистом может служить любой полимер либо неорганический пленкообразующий слой. Возможна даже безрезистивная литография, поскольку неорганические пленки могут быть подвергнуты травлению, испарению или превращены в полупроводники посредством ионной имплантации. Энергии достаточно как для возбуждения атомов, так и для перестройки любых химических связей. *Литографические процессы, применяющие излучения в диапазоне длин волн короче 100 нм, называются радиолитографией.* Цена, за которую приходится платить за все преимущества радиолитографии, – низкая производительность и соответственно высокая стоимость экспонирования. Радиационное экспонирование применяется в том случае, если характеристики систем оптической литографии не удовлетворяют требованиям по точности совмещения и глубины фокуса.

Пространственное разрешение процесса экспонирования ограничивается длиной волны падающего или обратно рассеянного излучения ([рис. 4.4](#)), поэтому излучение высокой энергии с длиной волны порядка атомных размеров способно обеспечить разрешение до 5 нм. Однако на практике предел разрешения составляет около 50 нм. Если ослабить или совсем устранить обратное рассеяние, используя кремниевые мембраны вместо толстых пластин, то можно будет изготовить приборы нанометровых размеров.

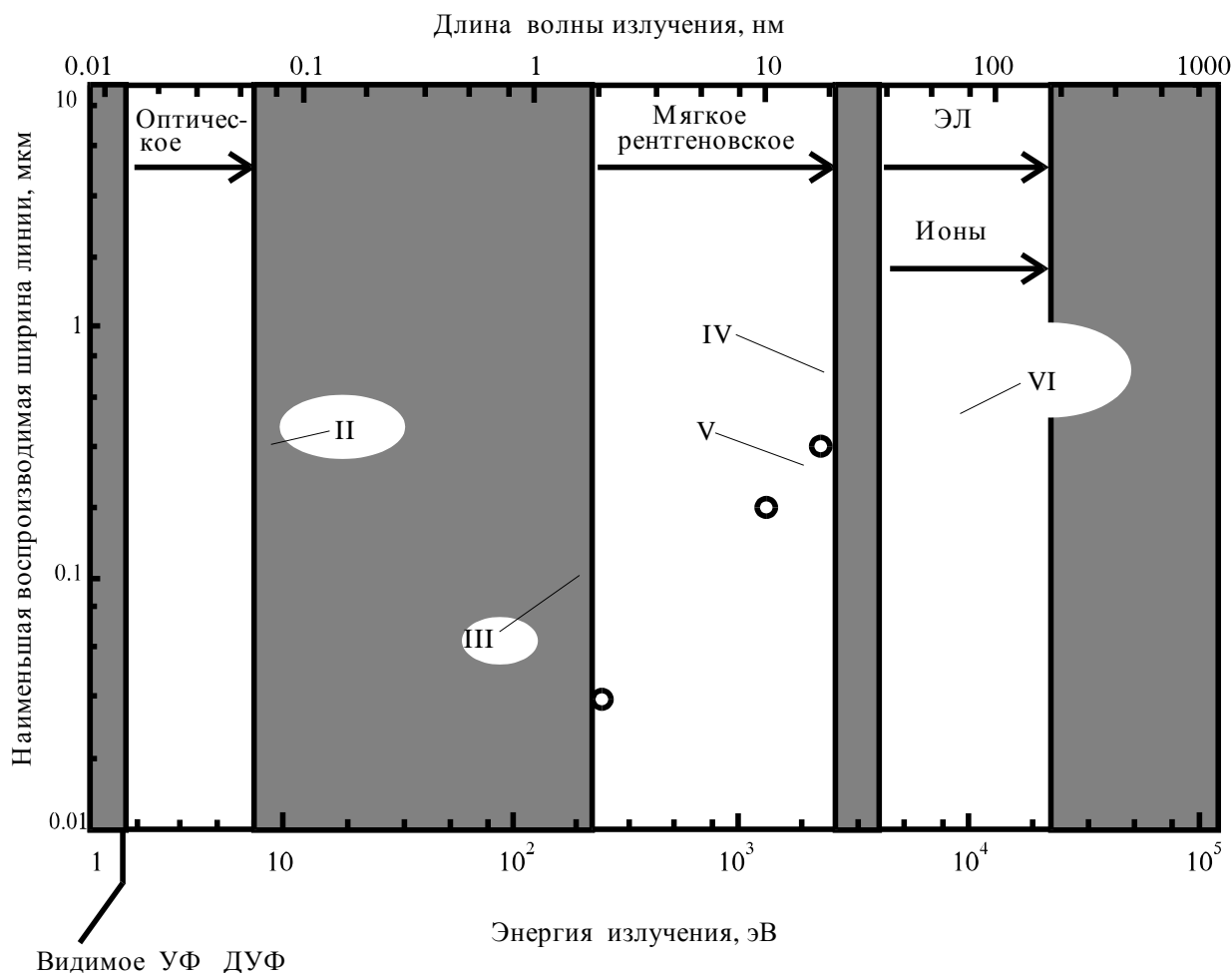


Рис. 4.4. Наименьшая воспроизводимая ширина линии: I – дифракционный предел (зазор 10 мкм); II – дифракционный предел (NA объектива равна 0,4); III – дифракционный предел (зазор 1 мкм); IV и V – предел рассеяния фотоэлектронов, теоретические значения и данные эксперимента соответственно; VI – предел, определяемый обратным рассеянием электронов

Литография высоких энергий делится на следующие виды:

- 1) проекционная (рентгеновская, ионная, электронная);
- 2) сканирующая (электронная, ионная).

При экспонировании через шаблон излучение высокой энергии проецируется в большинстве случаев на поле размером в один кристалл. Несколько кристаллов можно экспонировать рентгеновским излучением или электронным пучком некоторых фотокатодных устройств, но только при размере элемента больше 2 мкм.

Шаблоны изготавливаются из тяжелых металлов на полупрозрачных органических или неорганических мембранах. Кроме того, сам шаблон может служить источником энергии, например, фотокатод из TiO_2 , который при возбуждении УФ-излучением испускает электроны с энергией 10 кэВ.

С помощью ЭЛ-литографии создаются шаблоны для всех остальных видов литографии (с УФ, рентгеновским и ионным экспонированием). Непосредственное ЭЛ-экспонирование пластин будет дополнять оптическую литографию и в будущем станет доминирующим в субмикронной технологии.

В настоящее время существует здоровое соперничество систем пошаговой проекционной и контактной УФ-печати (рис. 4.1), но, возможно, в ближайшем будущем на рынке появятся установки электронно-лучевого и рентгеновского экспонирования. Минимальный размер элементов изображения зависит от формы сечения входного пучка, его энергии и области простирания обратнорассеянного излучения.

Таблица.4.1

Стимулы развития литографических установок экспонирования разных типов

Фотолитография	Высокоэнергетичная литография
Хорошо изученные принципы	Гибкость настройки
Простые шаблоны	Нанометровое разрешение
Берет начало от фотографии	Автоматизированный контроль
Умеренная стоимость	Нанометровая точность совмещения
Стойкие резисты	Более широкий выбор резистов
Отсутствие радиационных повреждений	Незаменима при изготовлении фотошаблонов
Хорошая производительность	

Разрешение должно превышать толщину резиста, а точность совмещения должна быть лучше $1/5$ разрешения. Для электронных пучков было достигнуто совмещение $\pm 0,1$ мкм. В диапазоне энергий экспонирования 10–30 кэВ основным фактором, ограничивающим разрешение, является обратное рассеяние электронов от подложки. Использование гауссовых пучков или недостаточное перекрывание пятен может быть причиной появления неровностей на краю и размытости рисунка. С другой стороны, отсутствие обратного рассеяния от соседних экспонируемых элементов приводит к недоэкспонированию субмикронных изолированных линий. Узкие (< 1 мкм) линии плохо экспонируются обратнорассеянными электронами по сравнению с широкими, поэтому для их качественного экспонирования требуется 2–3-кратное увеличение дозы или большее время проявления.

Близко расположенные элементы получают избыточную дозу из-за обратного рассеяния от соседних элементов (взаимный эффект близости), что вызывает сужение неэкспонированных участков. Если берется более тонкая кремниевая пластина для ослабления обратного рассеяния, то взаимный эффект близости практически не наблюдается. Перечислим основные методы ослабления взаимного эффекта близости:

- а) коррекция дозы и размера пятна или применение мембран, протравленных с обратной стороны;
- б) использование многослойного резиста с барьерным слоем из металла и толщиной чувствительного слоя 0,1–0,2 мкм;
- в) использование электронных пучков с энергией 50–100 кэВ;
- г) обработка верхнего слоя резиста (толщиной 100 нм), в котором

сформировано изображение, кремний- или металлодержущим мономером и последующее сухое проявление;

д) использование высококонтрастных резистов.

Для сравнения разрешающей способности фото- и электронно-лучевого экспонирования Стикел и Лангер предложили вместо МПФ (модуляционная передаточная функция) использовать $C_{\text{КС}}$ – контраст краевого спада. В общем случае МПФ определяется как отношение разности максимальной и минимальной интенсивностей к их сумме; 60 %-ное значение МПФ принято считать приемлемым для литографического процесса.

$$C_{\text{КС}} = (2/\pi) \arctg(W/E) \text{МПФ},$$

где W/E – наклон спада (рис. 4.5) от уровня 90 до 10 %.

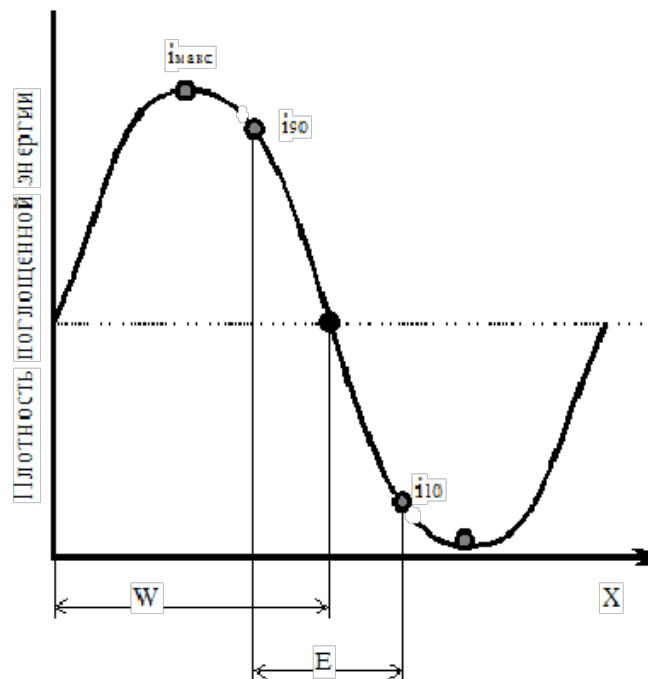


Рис. 4.5. Распределение плотности поглощенной в резисте энергии и величины, используемые в определении контраста для ЭЛ-экспонирования

Для сравнения на рис. 4.6 показаны зависимости краевого контраста от ширины линии в случаях экспонирования электронным лучем и УФ-излучением (254 и 400 нм). Для того чтобы ширину краевого спада интенсивности, а следовательно, и точность совмещения поддерживать на уровне четверти минимальной ширины линии, краевой контраст должен быть выше 70 % для электронно-лучевого и 83 % для оптического экспонирования.

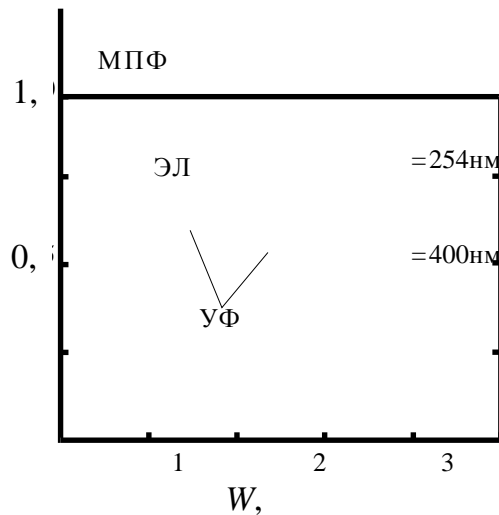


Рис. 4.6. Краевой контраст для случаев УФ- и ЭЛ-экспонирования 0,5 мкм резиста на кремниевой пластине

Для негативных резистов, слабо зависящих от скорости (длительности) проявления, важен только краевой контраст поглощенной энергии; зависимость скорости проявления R от глубины Z , определяющая в конечном итоге профиль изображения, для позитивного резиста имеет вид

$$dR/dZ = (dR/dE)(dE/dZ).$$

Первый сомножитель правой части данного выражения отражает взаимосвязь скорости растворения и поглощенной энергии E , а второй — влияние краевого распределения E . Лишь при больших дозах, соответствующих максимальным значениям МПФ, влияние проявителя, зависящее от контраста и нелинейности резиста, мало. При умеренных же и малых дозах, проявитель существенно определяет форму профиля проявленного изображения. В случае тонкого резиста распределение поглощенной энергии можно считать однородным по глубине, но для резистных пленок толщиной более 1,5 мкм такое допущение неправомерно. В этом случае необходимо учитывать влияние процесса проявления, поскольку распределение поглощенной энергии вблизи подложки определяет размеры проявленного элемента изображения. Сочетание низкоконтрастного резиста ($\gamma = 1-3$) и электронного пучка с крутым краевым спадом интенсивности способно при умеренных дозах обеспечить такой же профиль изображения, как и высококонтрастный резист, при условии, что осуществляется очень жесткий контроль процесса.

Устранение подложки (рис. 4.7) позволит избавиться от обратнорассеянных электронов, поскольку именно они снижают краевой контраст. С другой стороны, использование тонких резистных слоев, подобных тем, которые применяются в многослойных резистах, повышает МПФ и увеличивает разрешение ЭЛ-систем. Применение многослойных резистов наиболее приемлемый способ ослабления эффектов близости и повышения разрешения.

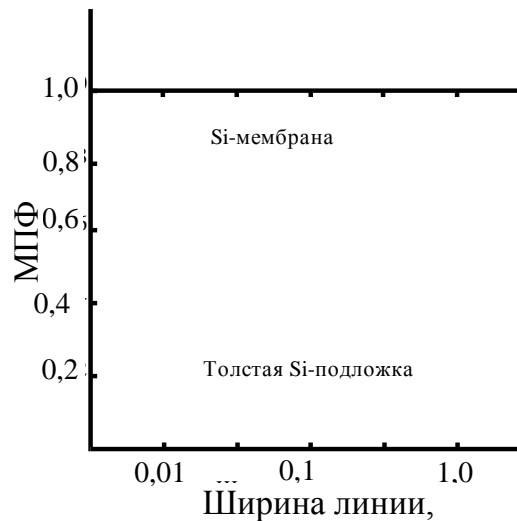


Рис. 4.7. МПФ для ЭЛ-экспонирования на тонкой и толстой подложках

Другие технологические параметры ЭЛ-экспонирования, такие, как энергия экспонирования (кэВ), толщина резиста, температура сушки и тип проявителя, могут влиять на разрешающую способность и чувствительность позитивного резиста. В зависимости от дозы профиль стенок формируемого изображения может быть пологим или крутым. При больших дозах форма профиля изображения определяется пространственным распределением поглощенной дозы, тогда как при малых дозах формируется более пологий профиль, что обусловлено степенью активности проявителя в экспонированных и неэкспонированных областях.

К любой литографической системе предъявляются следующие принципиальные требования:

- 1) контроль критического размера;
- 2) точность совмещения;
- 3) эффективность затрат;
- 4) технологическая гибкость;
- 5) совместимость с другими экспонирующими системами.

Существует несколько вариантов построения сканирующих установок ЭЛ-экспонирования:

1. Гауссов пучок либо пучок переменной формы.
2. Пошаговое либо непрерывное перемещение столика.
3. Источник электронов: вольфрамовая нить, эмиттер из гексаборида лантана, полевой эмиссионный катод (острие), простой либо составной источник.
4. Коррекция эффектов близости варьированием дозы, размеров экспонируемых областей либо и того, и другого.
5. Ускоряющее напряжение (5–10 кэВ).

Главные элементы экспонирующей ЭЛ-системы – источник электронов, системы фокусировки и бланкирования луча, устройство контроля совмещения и отклонения, электромеханический стол и компьютерный интерфейс.



Рис. 4.8. Формирование отдельной линии при перекрытии гауссовых лучей

В растровой схеме топологический рисунок обычно делится на подобласти, каждая из которых сканируется растром, подобно телевизионному. Вдоль своего серпантинообразного пути электронный луч периодически бланкируется. Круглый гауссов луч, диаметр которого составляет примерно четверть минимального размера элементов изображения, сканирует с перекрытием ([рис. 4.8](#)). При этом наблюдается некоторая волнистость контура элементов, обусловленная внутренним эффектом близости.

Другой тип установок с гауссовым лучом работает в режиме векторного сканирования. Электронный луч адресуется только в области, подлежащие экспонированию ([рис. 4.9](#)). При формировании топологических рисунков с низкой плотностью элементов, к примеру, контактных окон, этот метод существенно ускоряет процесс экспонирования.



Рис. 4.9. Путь луча при растровом (слева) и векторном (справа) ЭЛ-экспонировании

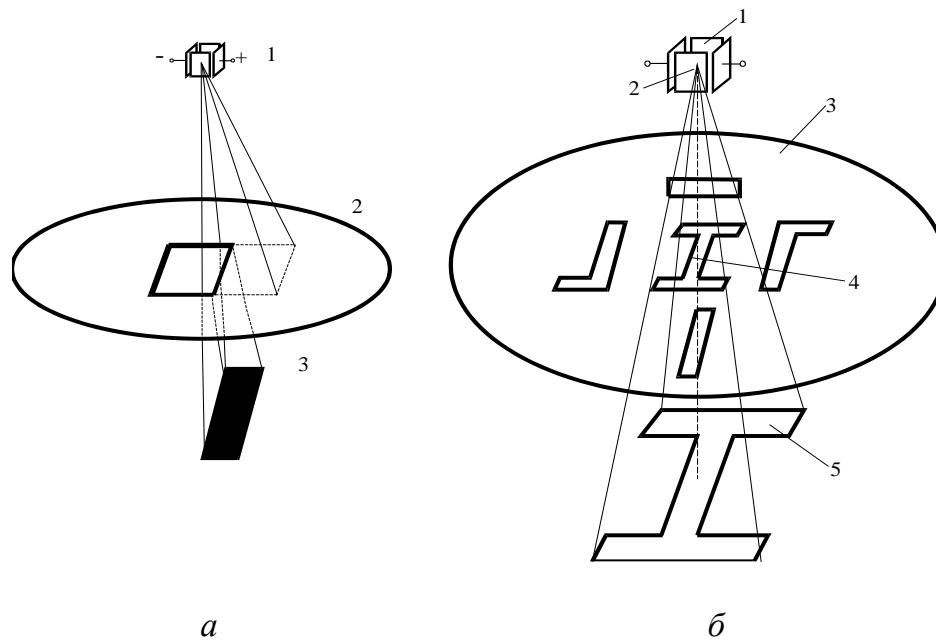


Рис. 4.10. Экспонирующая ЭЛ-система с прямоугольным лучом переменной формы (а): 1 – пластины, управляющие формой луча; 2 – вторая квадратная диафрагма; 3 – полученное пятно. Символьная проекционная ЭЛ-печать (б): 1 – отклоняющие пластины; 2 – фокус; 3 – символичные апертурные отверстия; 4 – символическая диафрагма; 5 – полученное изображение (сечение луча)

Гауссовы лучи недостаточно интенсивны и требуют перекрытия 4–5 малых пятен для формирования квадрата. Использование луча с сечением фиксированной либо переменной прямоугольной формы повышает производительность ([рис. 4.10, а](#)).

Еще большая производительность может быть достигнута проецированием целых фигур в комбинированном растрово-векторном режиме ([рис. 4.10, б](#)).

Сокращение времени обработки в случае проекции фигур переменной формы показано на [рис. 4.11](#), где сравнивается экспонирование гауссовым лучом, лучами постоянной и переменной форм и проецированием фигур. Чем больше одновременно проецируемая область, тем выше производительность. Время переноса изображения в системах с лучом переменной формы в 16–100 раз короче, чем в системах, использующих гауссов луч.

Для топологического рисунка малой плотности с изреженными окнами обычно используют позитивный ЭЛ-резист, негативный же предпочтительнее, если доминируют области, подлежащие вскрытию.

Литографический прием, позволяющий избежать влияния фактора плотности элементов, состоит в контурном экспонировании фигур рисунка с последующим осаждением металла, излишки которого удаляются посредством электролиза. Эта технология образно названа «каньонной» литографией в связи с очерчиванием некоторых областей рисунка и истреблением промежутков между ними.

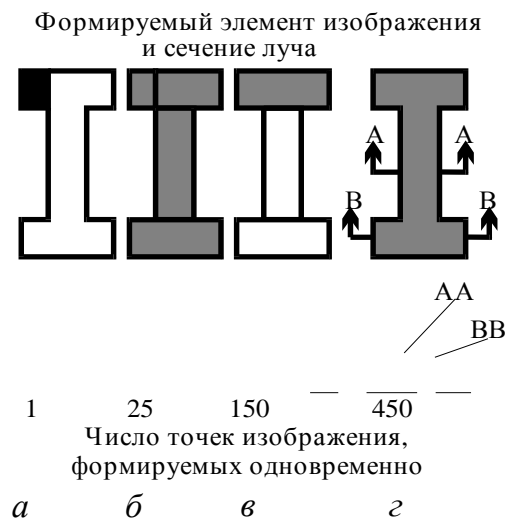


Рис. 4.11. Число точек изображения, формируемых круглым гауссовым лучом (а), лучом фиксированной квадратной формы (б), лучом переменной формы (в) и проецированием фигур (г)

Производительность ЭЛ-установок складывается из производительности процессов экспонирования, совмещения, перемещения и подготовки топологической информации.

Время прорисовки изображения электронным лучом T равно сумме времени экспонирования t_e и ожидания t_w :

$$T = t_e + t_w.$$

Время t_w включает в себя время численных преобразований, передвижения столика, регулировки позиционирования и т. д. Рассмотрим t_e . Если луч с плотностью тока j за время t засвечивает одновременно площадь a , то время, необходимое для экспонирования области площадью A ,

$$t_e = k(S/j)(A/a),$$

где k – отношение фактически сканируемой области к A ; S – чувствительность резиста.

Величина k определяется характером топологии и схемой сканирования ($k = 1$ в растровой и $k = 0,2–0,4$ в векторной). Таким образом, для сокращения времени экспонирования необходимо увеличить плотность тока луча j либо общий ток ja . Время ожидания состоит из времени обработки данных и времени установки подобласти экспонирования и столика.

При использовании луча переменной формы основными проблемами являются формирование элементов прямоугольной формы и коррекция эффектов близости посредством разбиения фигур на области равной дозы. Такой способ коррекции связан с проблемами управления большими объемами данных и потерей производительности.

Резистный материал может взаимодействовать с компонентами ЭЛ-

систем, порождая такие проблемы, как загрязнение, накопление заряда, плохое совмещение и низкий срок службы оборудования, приводящий к росту затрат времени на ремонт.

При изготовлении малых партий (большой номенклатуры) заказных логических схем из базового кристалла прямое рисование электронным лучом экономичнее, чем фотопечать через шаблон. Благодаря высокой разрешающей способности ЭЛ-литография будет и дальше использоваться при изготовлении шаблонов для световых, рентгеновских и ионных пучков. Кроме того, точность совмещения на каждом кристалле при ЭЛ-экспонировании составляет $\pm 0,1$ мкм, что является решающим преимуществом перед всеми остальными видами экспонирования.

4.3. Рентгеновская литография

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой длина волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0,4–5 нм. Несмотря на то, что при рентгеновской литографии используется бесконтактная экспонирующая система, проявление дифракционных эффектов уменьшено за счет малой длины волны рентгеновского излучения.

Основная причина разработки метода рентгеновской литографии заключалась в возможности получения высокого разрешения и в то же время высокой производительности оборудования. Кроме того, за счет малой величины энергии мягкого рентгеновского излучения уменьшается проявление эффектов рассеяния в резистах и подложке, следовательно, нет необходимости в коррекции эффектов близости.

Поскольку рентгеновские лучи практически не поглощаются загрязнениями, состоящими из компонентов с малым атомным номером, то наличие загрязнений на шаблоне не приводит к возникновению дефектов рисунка на резисте. Кроме того, вследствие низкого поглощения рентгеновского излучения рентгеновский резист большой толщины может быть однородно экспонирован на всю толщину, в результате чего в его объеме у окон формируются вертикальные стенки, точно повторяющие рисунок шаблона.

Так как изготовление рентгеновских оптических элементов связано с определенными трудностями, применение рентгеновской литографии ограничено теневой печатью. Разрешение, получаемое при использовании метода рентгеновской литографии, ограничено геометрическими эффектами.

Рентгеновские лучи с длиной волны в диапазоне 0,1–5 нм (энергия фотонов в диапазоне 10–0,25 кэВ) испытывают незначительное рассеяние при прохождении через материал резиста. Рентгеновский луч движется по прямой траектории до тех пор, пока не захватится атомом, который испускает при этом фотоэлектрон. Энергия фотоэлектрона равна энергии фотона рент-

геновского излучения за вычетом энергии связи в несколько электрон-вольт, необходимой для удаления электрона из электронной оболочки атома. Наиболее вероятным направлением движения электрона является направление, перпендикулярное движению фотона рентгеновского луча, т. е. в плоскости резиста.

Возбужденный атом возвращается в свое основное состояние, испуская флуоресцентное рентгеновское излучение или электроны. Флуоресцентное рентгеновское излучение поглощается другим атомом, и процесс повторяется. Поскольку все процессы заканчиваются эмиссией электронов, поглощение рентгеновского излучения материалом резиста может быть представлено как испускание потока вторичных электронов. Эти электроны экспонируют резист, разрывая молекулярные цепи полимера или образуя между ними поперечные связи в зависимости от типа резиста. Все электронные резисты являются также и рентгеновскими.

Одним из путей повышения чувствительности является увеличение поглощения резистом рентгеновского излучения. Поглощение рентгеновских лучей описывается уравнением

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot t),$$

где t – толщина слоя резиста; α – линейный коэффициент поглощения; I_0 и I – интенсивность излучения до и после поглощения соответственно.

Поглощение может повышаться при увеличении коэффициента поглощения, который связан с атомным поперечным сечением захвата рентгеновского излучения компонентами резиста. Поперечное сечение захвата рентгеновского излучения электронами в данной электронной оболочке атома изменяется с длиной волны излучения и резко увеличивается при определенных критических величинах длин волн. Критические величины длин волн соответствуют энергиям рентгеновского излучения, достаточным для удаления электронов из электронных оболочек атомов K , L_1 и т. п. Например, рентгеновское излучение с длиной волны немного более l_k не может захватываться электронами K -оболочек, следовательно, в этой точке происходит резкое падение поперечного сечения захвата.

Чувствительность рентгеновских резистов повышается при включении в их состав компонент, у которых край поглощения лежит вблизи резонанса с длиной волны экспонирующего облучения. Например, хлор имеет длину волны характеристического K -излучения 0,44 нм и, следовательно, сильно поглощает излучение $PdLa$ с длиной волны 0,437 нм. Негативные рентгеновские резисты с чувствительностью выше 10 мДж/см² получены введением Cl в полимер резиста.

Несмотря на высокую чувствительность и возможность обеспечения большой производительности установок экспонирования, негативные резисты имеют ограниченную разрешающую способность из-за его разбухания

и уплотнения во время процесса проявления. Сухое проявление путем плазменной обработки позволяет избежать разбухания. В последнее время было разработано несколько типов негативных резистов, проявляемых в плазме.

Эти резисты состоят из поглощающего основного полимерного материала и полимеризуемой мономерной добавки, вводимой в структуру основного материала под воздействием рентгеновского излучения. Негативные рентгеновские резисты получают введением кремнийсодержащих металлоорганических мономеров в хлорированное полимерное поглощающее вещество. Они могут быть полностью экспонированы в течение 1 минуты и проявлены в кислородной плазме. Разрешающая способность резиста составляет величину $< 0,5$ мкм.

Резист состоит из основного полимерного вещества и металлоорганического мономера. Излучение, падающее на резист, полимеризует мономер и основной полимер, включая в состав основного вещества металлоорганическую компоненту. После экспозиции пленка резиста высушивается в вакууме для удаления неполимеризованного мономера.

Изображение на резисте проявляется при использовании кислородной плазмы. Основным предполагаемым механизмом проявления является механизм, основанный на превращении металлоорганического мономера в окисел металла, который предохраняет остающийся резист от воздействия кислородной плазмы. Этот защитный слой далее увеличивает разницу в скорости удаления в плазме экспонированного и неэкспонированного резиста, и таким образом происходит проявление изображения.

Рентгеновские шаблоны состоят из поглощающих рентгеновское излучение металлических пленок с нанесенным на них рисунком и тонкой мембраны, пропускающей рентгеновские лучи. Толщина поглощающего материала определяется длиной волны рентгеновского излучения, коэффициентом поглощения материала и величиной контраста, необходимой для формирования изображения на резисте. Наиболее широко применяемым в настоящее время поглощающим материалом является золото.

Рисунок на шаблоне обычно формируют с использованием электронно-лучевой литографии в сочетании с методами сухого травления. Для сохранения высокого разрешения и точного управления размерами элементов рисунок, сформированный в золотой пленке, должен иметь вертикальные стенки окон. Это требование легче всего выполняется при формировании рисунка в тонкой пленке золота, которая используется при большой длине волны экспонирующего облучения.

Мембрана, служащая подложкой для шаблона, должна обладать высокой прозрачностью для рентгеновских лучей, чтобы свести время экспонирования к минимуму. Она должна иметь стабильные размеры и достаточную прочность для многократного использования в технологическом процессе и быть прозрачной для видимого света, если применяется методика оптической

го совмещения. Для изготовления мембран используют такие материалы, как полиимид, Si, SiC, Si₃N₄, Al₂O₃ и многослойные структуры Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄.

Рентгеновский шаблон, который успешно используют при изготовлении ИС, представляет собой многослойную структуру из нитрида бора и полиимида с пленкой золота толщиной 0,6 мкм, поглощающей рентгеновское излучение, в которой сформирован топологический рисунок схемы. Экспонирующим излучением при использовании этого шаблона служит характеристическое излучение PdLa с длиной волны 0,437 нм.

Изготовление шаблона начинают осаждением пленки нитрида бора толщиной 6 мкм на кремниевую подложку. После осаждения центрифугированием наносят пленку полиимида толщиной 6 мкм на пленку нитрида бора для дополнительного упрочнения структуры. Затем на мембрану осаждают пленку тантала, пленку золота толщиной 0,6 мкм и еще одну тонкую пленку тантала. Вся структура покрывается пленкой электронного резиста, в которой методом электронно-лучевой литографии создают топологический рисунок схемы.

Изображение, сформированное на резисте, переносят на пленку тантала, которая впоследствии действует в качестве маскирующего слоя при травлении золота. После формирования рисунка в слое золота пленки тантала удаляют и наносят другое защитное полиамидное покрытие. Пластину с рисунком присоединяют к кольцу из пирекса и с обратной стороны травливают кремний, что приводит к образованию структуры мембраны, показанной на [рис. 4.12](#).

Технология изготовления рентгеновского шаблона разработана не окончательно. Еще предстоит решить ряд проблем: улучшение долгосрочной стабильности рисунка шаблона, исключение нерезкости краев элементов рисунка, ухудшающей разрешающую способность шаблона, и уменьшение плотности дефектов шаблона. От решения этих проблем зависит развитие субмикронной рентгеновской литографии.

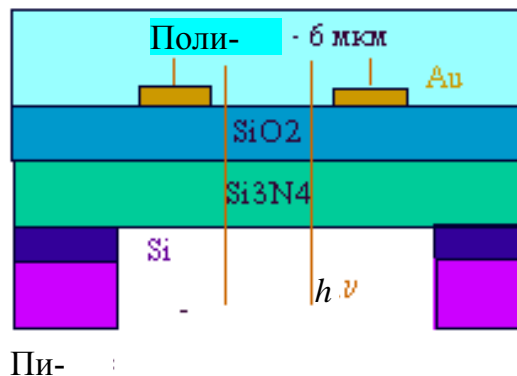


Рис. 4.12. Структура мембраны

Рентгеновская литография обеспечивает наилучшие условия для достижения субмикронного разрешения при высокой производительности обработки пластин. При использовании существующих резистов и рентгеновских источников пластины полностью могут быть экспонированы за 1 минуту с разрешением $< 0,5$ мкм.

В будущем возможно осуществление экспонирования резистов методом мультиплицирования с помощью коллимированного рентгеновского излучения синхротрона. Однако прежде чем рентгеновская литография найдет широкое промышленное применение, должны быть усовершенствованы методы автоматического совмещения и изготовления рентгеновских шаблонов.

Вопросы для самопроверки

1. Какова задача фотолитографии?
2. Что понимают под законом Мура?
3. Каков прогноз уменьшения длины затвора МДП-транзисторов?
4. Каковы минимальный размер и длина канала L_K , достигаемые в настоящее время?
5. Каковы длины волн эксимерных лазеров и от чего они зависят?
6. Каковы принципиально иные, по сравнению с фотолитографией, методы получения рисунка с размерами элементов менее 100 нм?
7. Каковы виды литографии высоких энергий?
8. Какова разрешающая способность электронно-лучевого экспонирования по сравнению с фотоэкспонированием?
9. Какова основная причина разработки метода рентгеновской литографии?
10. Каковы главные преимущества рентгеновской литографии?

ЛЕКЦИЯ 5

ЛИТОГРАФИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

План лекции

- 5.1. Методы безмасочной технологии:
 - 5.1.1. Перьевая нанолитография.
 - 5.1.2. Нанопечатная литография.
- 5.2. Электронный и ионный луч как инструмент современной технологии:
 - 5.2.1. Электронно-лучевая технология.
 - 5.2.2. Ионно-лучевая технология.

Литература: [[7](#), [9](#), [22](#), [25](#)].

5.1. Методы безмасочной технологии

5.1.1. Перьевая нанолитография

Очень удобный способ нанесения наноструктур на поверхности предложила компания NanoInk, выпускающая самые маленькие авторучки на Земле. Точки, линии и буквы, выходящие из-под их «пера», примерно в десять тысяч раз меньше тех, что создаются с помощью обычной шариковой ручки. Однако в отличие от макроскопических «коллег», данная ручка представляет собой зонд АСМ с наконечником из нитрида кремния ([рис. 5.1](#)).

Когда АСМ используется по прямому назначению, возникает проблема: на наконечнике конденсируется влага из окружающего воздуха, что ухудшает качество измерений. Оказалось, что частицы воды в образующейся капельке постоянно движутся от наконечника к поверхности и наоборот. Это свойство решили использовать для перемещения вместе с водой молекул «чернил». Меняя уровень влажности в приборе, задают размер капельки и ширину линии. Ширина линий составила всего несколько десятков молекул, а толщина – одну молекулу. Эту технологию называли «перьевой нанолитографией» (dip-pen nanolithography).

Перьевая нанолитография имеет много преимуществ: в качестве «чернил» можно использовать все, что угодно, а писать можно на любой поверхности. «Атомная ручка» найдет применение в нанoeлектронике: с ее помощью на площади в один квадратный дюйм можно прочертить до 1 млн линий. Эксперты отмечают также относительную дешевизну устройства.

Авторучка – хорошо, а принтер – лучше. Установки, содержащие матрицы управляемых зондов-авторучек (как в «многоножке») вполне могут пригодиться в серийном производстве нанoeлектронных устройств.

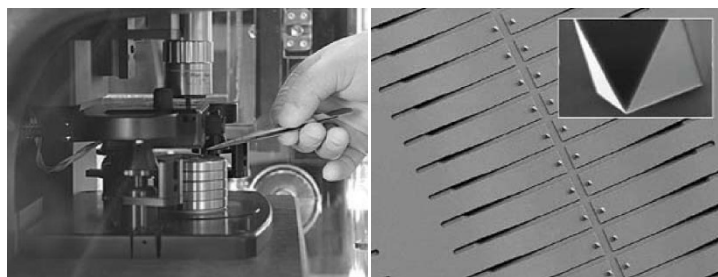


Рис. 5.1. Система кантилеверов – «авторучек» и внешний вид установки DPN

В отличие от обычной литографии здесь не нужно трудоемкое изготовление фотошаблона, а значит, станки-«нанохудожники» смогут переключаться на производство все новых и новых наночипов, сразу как только инженеры будут их разрабатывать. Таким образом, одна и та же фабрика сможет производить множество разных типов микросхем.

5.1.2. Нанопечатная литография

Нанопечатная литография (Nanoimprint lithography) является отличной технологией изготовления интегральных микросхем, однако до этого момента главным ее недостатком была слишком высокая стоимость производства трафаретов, по которым осуществляется «печать» чипов. Теперь же, благодаря исследованиям и разработкам инженера Стивена Чоу (Stephen Chou) из Принстонского университета (Princeton University), процесс изготовления шаблонов можно не только значительно удешевить, но и заметно ускорить. На современном этапе развития нанопечатной литографии широко используются медленные методы изготовления трафаретов при помощи электронного или ионного пучков.

Стивен Чоу предлагает следующий метод – использовать полимер для формирования необходимого «рисунка» на пластине. Полимер в ходе процесса помещается между двумя пластинами, и после сжатия на поверхности пластин остаются углубления, точно соответствующие толщине полимера (рис. 5.2).

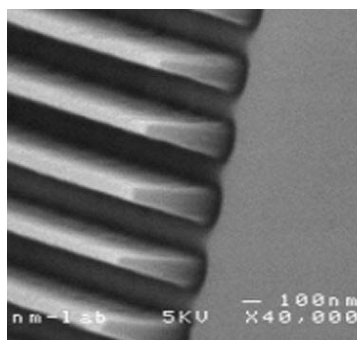


Рис. 5.2. Структура, созданная с помощью нанопечатного метода

Однако не только быстрота и невысокая стоимость являются главными преимуществами метода: при помощи представленной техники можно наносить «рисунок» на поверхности большей площади. Так, если сегодня исследователи оперируют с пластинами площадью всего несколько квадратных миллиметров, то «полимерный» метод позволяет формировать необходимую структуру на площади в несколько квадратных сантиметров. При этом разработчики получают возможность легко контролировать толщину углублений, значительно повышая точность инструментов для создания новых микросхем.

Исследователи уже подали заявку на приобретение патента, и планируют в ближайшем будущем начать коммерческое использование технологии, продавая лицензии производителям микроэлектронных устройств.

5.2. Электронный и ионный луч как инструмент современной технологии

5.2.1. Электронно-лучевая технология

Принципы действия телевизора, электронного микроскопа и электронного сварочного аппарата одинаковы. Разница заключается в том, что для телевизора или микроскопа нужны пучки электронов малой мощности, а для машиностроения – большой. Главные части электронно-лучевых установок – электронная пушка (источник, генератор электронов) и устройства (пластины, катушки и т. д.), создающие электромагнитное поле высокого напряжения, которое ускоряет, фокусирует и направляет пучки электронов. Электронно-оптические элементы динамической фокусировки позволяют быстро изменять фокусное расстояние всей системы по команде от управляющего устройства или ЭВМ. Чтобы электроны не растрачивали энергию на столкновение с молекулами воздуха и чтобы не окислялась заготовка при разных технологических операциях, ее вместе с «пушкой» помещают в глубокий вакуум, где давление примерно в миллиард раз меньше атмосферного. Электронный луч способен сваривать любые тугоплавкие металлы, камни и керамику. При электронно-лучевой сварке расходуется в 20 раз меньше электроэнергии, чем при дуговой, так как не приходится впустую разогревать большие объемы металла. Луч легко перемещать, отклоняя поток электронов магнитным полем и оставляя само изделие неподвижным. Достигается ювелирная точность сварки и отпадает надобность в громоздких приспособлениях для перемещения изделий. Для сварки корпусов ракет, деталей подводных кораблей, тепловыделяющих элементов атомных станций созданы сварочные камеры диаметром более 10 м. Вес обрабатываемых в них заготовок достига-

ет 25 т. Электронно-лучевые установки применяют и в полевых условиях при прокладке трубопроводов. При электронно-лучевом испарении металла его поверхность бомбардируют электронами. При этом испаряется только сам металл, не загрязняясь никакими посторонними примесями. Испарению (и осаждению) таким методом поддаются и тугоплавкие соединения – оксид алюминия, оксид кремния, стекло, карбиды металлов. Вакуумное осаждение тончайших пленок незаменимо для получения интегральных схем микроэлектроники. Электроннолучевые установки применяют для стерилизации различных продуктов, семян, медикаментов. Электронное оборудование абсолютно безвредно, чего не скажешь про химические способы уничтожения вредных микроорганизмов. При воздействии электронных пучков на вещество в нем идут процессы полимеризации, образование длинных молекулярных цепочек. Термостойкость полимеров при этом увеличивается, улучшается прочность и водостойкость, несминаемость, огнестойкость. Аппараты электронно-лучевой технологии легко поддаются полной автоматизации и мгновенно переходят с одного режима работы на другой. Все процессы идут в замкнутом объеме, нет выбросов газа, пыли, излишков тепла. Электронно-лучевая технология – экологически чистая технология, у нее большое будущее.

В современной технике приходится иметь дело с очень твердыми, труднообрабатываемыми материалами. В электронной технике, например, применяются пластинки из чистого вольфрама, в которых необходимо просверлить сотни микроскопических отверстий диаметром в несколько десятков микрон. Искусственные волокна изготавливают с помощью фильер, которые имеют отверстия сложного профиля и столь малые, что волокна, протягиваемые через них, получаются значительно тоньше человеческого волоса. Электронной промышленности нужны керамические пластинки толщиной 0,25 мм. На них должны быть сделаны прорезы шириной 0,13 мм, при расстоянии между их осями 0,25 мм.

Чрезвычайно ценно также, что действие электронного луча не сопровождается ударными нагрузками на изделие. Особенно это важно при обработке хрупких материалов, таких, как стекло, кварц. Скорость обработки на электроннолучевых установках микроотверстий и очень узких щелей существенно выше, чем на обычных станках.

Установки для обработки электронным лучом – это сложные устройства, основанные на достижениях современной электроники, электротехники и автоматики. Основная их часть – электронная пушка ([рис. 5.3](#)), генерирующая пучок электронов.

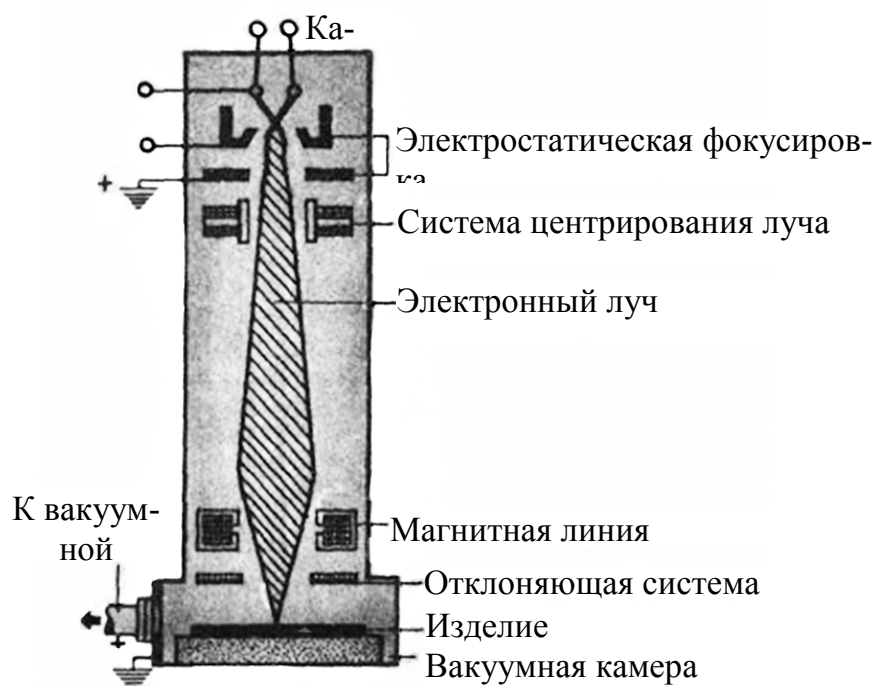


Рис. 5.3. Схема электронной пушки

Электроны, вылетающие с подогретого катода, остро фокусируются и ускоряются специальными электростатическими и магнитными устройствами. Благодаря им электронный луч может быть сфокусирован на площадке диаметром менее 1 мкм. Точная фокусировка позволяет достигать и огромной концентрации энергии электронов, благодаря чему можно получить поверхностную плотность излучения порядка 15 МВт/мм^2 .

Интересна обработка материалов электронным лучом с помощью так называемых масок. В установке на подвижном столике располагают маску. Тень от нее в уменьшенном масштабе проектируется формирующей линзой на деталь, и электронный луч обрабатывает поверхность, ограниченную контурами маски.

Контролируют ход электронной обработки обычно с помощью оптического микроскопа. Он позволяет точно установить луч до начала обработки, например, резания по заданному контуру, и наблюдать за процессом. Электронно-лучевые установки часто оснащаются программирующим устройством, которое автоматически задает темп и последовательность операций.

Электронный луч также применяется при сварке деталей из алюминиевых, жаропрочных сплавов, нержавеющей сталей и ряда других материалов, используемых в авиастроении, ракетостроении и других областях.

5.2.2. Ионно-лучевая технология

Литографическое применение ионных пучков возможно в установках пошаговой печати и в системах, использующих сфокусированные пучки протонов, ионов кремния, бора, фосфора.

Главным преимуществом ионных пучков по сравнению с электронными является малое обратное рассеяние и, следовательно, минимальный эффект близости.

В ионно-лучевой литографии используют шаблоны типа «металл – на-кремнии» или трафаретные. В случае применения последних, произвольный рисунок можно воспроизвести, используя взаимодополняющие трафаретные шаблоны.

Для того чтобы ионная литография могла конкурировать с рентгеновской литографией, необходимо создать компактный источник ионов. Здесь пригодны схемы совмещения, разработанные для установок рентгеновской литографии. Из-за эффектов полутени и коробления пластины следует избегать экспонирования больших областей.

Фокусированные ионные пучки можно использовать для экспонирования резистов, исправления дефектов фотошаблонов, а также в безрезистной литографии и непосредственного травления оксида кремния.

Сущность ионной литографии состоит в экспонировании пластины широким пучком ионов H^+ , He^{2+} или Ar^+ через шаблон из золота на кремниевой мембране или поточечного экспонирования сканирующим пучком из жидкометаллического галлиевого источника. Зазор между шаблоном и пластиной составляет около 20 мкм, но для субмикронных процессов требуется контакт, так как изолированные элементы изображения не могут быть экспонированы через сквозной шаблон, а составные шаблоны разделяются на две взаимодополняющие части.

Поскольку ионы поглощаются в 10–100 раз эффективнее, чем электроны, то и требуется их в 10–100 раз меньше (10^{10} – 10^{12} ионов/см² или 0,01–1 мкКл/см²). Так как источник протонов может давать пучок с плотностью мощности более 100 мВт/см², то малое время экспонирования (в микросекундах на кристалл или секундах на пластину) обеспечивает стабильность шаблона и субмикронное совмещение. Изображения с вертикальным профилем края (искажение края профиля < 0,1 мкм, обусловленное отклонениями при изготовлении шаблона) могут быть сформированы как в негативных, так и в позитивных резистах. Даже десятикратное переэкспонирование не вызывает изменения ширины линий. Взаимный эффект близости, ярко выраженный при ЭЛ-экспонировании, не наблюдается из-за малости обратного рассеяния протонов.

Сфокусированные ионные пучки для прямого (без шаблона) экспонирования резистов имеют ограниченное применение, так как размер поля экспонирования не превышает 1 мм². При сканировании ионного пучка его отклонение происходит медленнее по сравнению с электронным пучком, а разрешающая способность объектива оказывается не лучше 1 мкм в кристалле 5 × 5 мм. В настоящее время ионные пучки используются в основном для ретуширования фотошаблонов. Другая область применения металлических

ионных источников (таких, как Si или Ga) – имплантация в поверхностный слой резиста ПММА толщиной всего 100 нм.

Дополнительная область применения ионно-лучевого экспонирования – отверждение резистов ДХН и ПММА для реактивного ионного травления или других применений в качестве маски. При ионной имплантации В, Р или As резист со скрытым изображением работает как барьерный слой.

Ионно-лучевое экспонирование является идеальным в том смысле, что для него прямое и обратное рассеяния пренебрежимо малы, а радиационные повреждения в кремниевой подложке практически отсутствуют, так как ионы в основном не проходят сквозь слой резиста. Поскольку ионы очень эффективно передают в резист энергию, то чувствительность резиста не является решающим фактором для производительности, которую в данном случае обеспечивают подбором подходящего высокоинтенсивного источника ионов, термостабильного шаблона и высокой точностью совмещения ($\pm 0,1$ мкм).

Вопросы для самопроверки

1. Каковы преимущества перьевой нанолитографии?
2. Каковы преимущества нанопечатной литографии?
3. Каковы возможности электронного луча как инструмента прецизионной технологии?
4. Каковы принципы электронно-лучевой обработки?
5. Почему обработка электронным лучом ведется в высоком вакууме?
6. Какова поверхностная плотность излучения электронной пушки?
7. Каково место электронно-лучевой обработки в технологии микросхем?
8. Каковы условия конкуренции ионной и рентгеновской литографии?
9. В чем состоит сущность ионной литографии?
10. Какова разрешающая способность позитивных резистов в случае ионно-лучевого экспонирования?

ЛЕКЦИЯ 6

КВАНТОВЫЕ ОСНОВЫ НАНОИНЖЕНЕРИИ

План лекции

- 6.1. Эффект размерного квантования.
- 6.2. Квантовое ограничение.
- 6.3. Интерференционные эффекты.
- 6.4. Туннелирование.
- 6.5. Устройства на основе квантовых эффектов.

Литература: [[7](#), [8](#), [14](#), [29](#)].

6.1. Эффект размерного квантования

До недавнего времени инженеры-разработчики электронных приборов в своих расчетах использовали только законы классической физики. И это было вполне оправданно, поскольку, например, в обычном кинескопе телевизора электроны движутся так же, как классические материальные точки – бильярдные шары или мячи. В сложнейшем микропроцессоре компьютера движение микроскопических электронов подобно движению классических тел. Однако ситуация меняется. Логика развития современной полупроводниковой электроники такова, что интегральные схемы становятся все более сложными и объединяют все большее число элементов. До сих пор изготовителям интегральных схем удавалось увеличивать плотность размещения транзисторов, диодов и других элементов за счет уменьшения их размеров. Вероятно, что в недалеком будущем эти размеры станут порядка нескольких долей микрона. В тот момент, когда это произойдет, описание на языке классической физики потеряет всякий смысл и создатели электронных приборов будут вынуждены обратиться к квантовой механике.

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

Необходимо отметить главную особенность квантово-механического описания. Если в некоторый момент времени частица находилась в ограниченной области пространства, то в будущем невозможно достоверно предсказать ее местоположение. Можно рассуждать о распределении частицы в пространстве и о вероятности этого распределения. Величина, описывающая это распределение, получила название Ψ -функции, или волновой функ-

ции. Она не описывает усредненное поведение большого числа электронов или одного электрона, заряд которого «размазан» по всему пространству, она дает вероятностное, статистическое описание отдельного электрона. Интенсивность этой функции, а точнее, ее квадрат $|\Psi|^2$, определяет вероятность обнаружить частицу в той или иной области – вероятность в интервале Δx равна $|\Psi|^2 \Delta x$. Волновая функция – это основная характеристика квантовой системы. Она содержит полную информацию об электронах или других частицах в атоме, молекуле, кристалле.

Рассмотрим одно из проявлений чисто квантовой природы электрона. Известно, что волны различной физической природы, возбуждаемые в ограниченном объеме, имеют строго определенную длину волны и частоту. В том случае, когда движение электрона происходит в ограниченной области, его энергия имеет строго определенные, дискретные значения. Говорят, что спектр энергий квантован. Если электрон заперт в атоме, молекуле или любой потенциальной яме, то волновая функция Ψ представляет стоячую волну. Если речь идет о прямоугольной потенциальной яме, которая изображена на [рис. 6.1](#), то по своей форме волна будет такой же, как и в случае натянутой струны. Однако, во-первых, природа волны здесь иная, а во-вторых, дискретным в этом случае будет не спектр частот, а спектр энергий.

Стоячие волны, описывающие электронные состояния в яме, – это синусоиды, обращающиеся в точках $x = 0$ и $x = a$ в нуль. $\Psi_n(x) = (\sqrt{2/a}) \sin(\pi n x / a)$, где n – номер квантового состояния; a – размер ямы. На данном рисунке изображены три такие функции, соответствующие $n = 1, 2, 3$. Видно, что электронная плотность в яме распределяется неравномерно, есть максимумы и минимумы плотности вероятности. Также следует, что длины волн Ψ -функций, описывающих электронные состояния с различными n , удовлетворяют условиям $\lambda n / 2 = a / n$, т. е. в яме укладывается целое число полуволен.

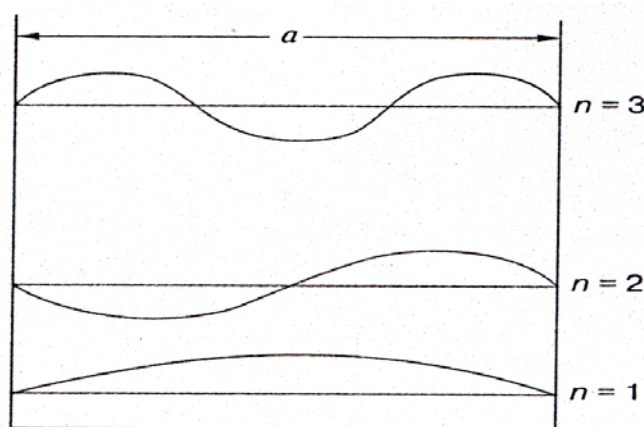


Рис. 6.1. Прямоугольная потенциальная яма

Для наблюдения квантовых размерных эффектов расстояние между энергетическими уровнями должно быть достаточно велико. В первую очередь оно должно значительно превосходить тепловую энергию носителей: $E_{n+1} - E_n \gg kT$, иначе наблюдение эффектов будет невозможным. Если электронный газ вырожден и характеризуется энергией Ферми E_F , то желательно также выполнение условия $E_{n+1} - E_n \geq E_F$, при этом первое условие выполняется автоматически, так как $kT \ll E_F$; иначе квантовые эффекты имеют весьма малую относительную величину. Существуют и другие условия, связанные с рассеянием носителей на примесях, фононах и др.

Примером структуры с двумерным электронным газом являются тонкие пленки. В такой структуре одно из направлений (z) очень мало, следовательно, энергетический спектр в этом направлении можно описать формулой $E_n = (h_n/a)^2/8m$, где m – эффективная масса электрона; a – толщина пленки, так как в данном направлении образуется потенциальная яма. В оставшихся двух направлениях электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно, E_n должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к толщине пленки порядка нанометров, что соответствует нескольким межатомным расстояниям. Полная энергия носителей в квантово-размерной пленке носит смешанный дискретно-непрерывный спектр: $E = E_n + (p_x^2 + p_y^2)/2m$, где p_x и p_y – компоненты импульса в плоскости слоя. Производство таких тонких пленок в явном виде весьма проблематично, поэтому наблюдения в основном проводят на МДП-структурах, где в качестве тонкой пленки выступает диэлектрик. Однако в настоящее время эффекты наблюдают на гетероструктурах (контакты между полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны). На таком контакте края энергетических зон испытывают скачки, ограничивающие движение носителей и играющие роль стенок квантовой ямы.

В структуре с одномерным электронным газом два направления (y и z) очень малы, следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой $E_n = (h_n/a)^2/8m$, где a – толщина пленки в данном направлении, так как в этом направлении образуется потенциальная яма. В оставшемся направлении (x) электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно, E_n должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к толщине нити порядка нанометров. Полная энергия носителей в квантоворазмерной нити, аналогично тонким пленкам, носит смешанный дискретно-непрерывный спектр: $E = E_n + p_x^2/2m$, где p_x – компонента импульса в направлении нити (x).

В структуре с нульмерным электронным газом все направления (x , y и z) очень малы, следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой $E_n = (h_n/a)^2/8m$, где a – толщина пленки в данном направлении, так как в этом направлении образуется потенциальная яма. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно, E_n должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к размеру точки порядка нанометров. Полная энер-

гия носителей квантовой точки также носит смешанный дискретно-непрерывный спектр: $E = E_{nml}$. Такие структуры особенно интересны тем, что их свойства аналогичны свойствам дискретного атома, поэтому их иногда называют искусственными атомами.

С появлением сканирующего микроскопа началось широкое развитие нанотехнологий – способов обработки частиц, размеры которых находятся в пределах от одного до ста нанометров ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Чтобы лучше представить данный порядок величин, достаточно вообразить Земной шар и футбольный мяч – именно так соотносится в размерах последний и наночастицы.

Эффект размерного квантования (ЭРК) – явление, связанное с квантованием энергии носителей заряда, движение которых ограничено в одном, двух или трех направлениях. При ограничении бесконечного кристалла потенциальными барьерами или при создании границ возникают дискретные уровни квантования. В принципе, дискретный спектр возникает в любом ограниченном потенциальными стенками объёме, но практически наблюдается только при достаточно малом размере тела.

Для наблюдения квантовых размерных эффектов расстояние между энергетическими уровнями должно быть достаточно велико. В первую очередь оно должно значительно превосходить тепловую энергию носителей: $E_{n+1} - E_n \gg kT$, иначе наблюдение эффектов будет невозможным. Если электронный газ вырожден и характеризуется энергией Ферми E_F , то желательно также выполнение условия $E_{n+1} - E_n \geq E_F$, при этом первое условие выполняется автоматически, так как $kT \ll E_F$. Существуют и другие условия, связанные с рассеянием носителей на примесях, фононах и др.

Типичным примером ЭРК может служить двойная гетероструктура AlGaAs/GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом, где электроны, находящиеся в слое GaAs, ограничены высокими потенциальными барьерами AlGaAs, т. е. для электронов формируется потенциальная яма, описываемая дном зон проводимости двух материалов, малого размера (обычно порядка 10 нм) и возникают дискретные уровни, которые соответствуют движению электронов поперёк слоя GaAs, хотя продольное движение остаётся свободным. Эти уровни эффективно сдвигают зону проводимости вверх по энергии. В результате изменяется ширина запрещённой зоны GaAs и соответственно происходит сдвиг в синюю область края межзонного поглощения. Аналогично, но с большим изменением запрещённой зоны ЭРК наблюдается в квантовых точках, где электрон ограничен по всем трём координатам.

6.2. Квантовое ограничение

В 1918 г. Бор сформулировал важный для новой атомной теории принцип соответствия, показывающий, когда именно существенны квантовые ограничения. С позиций квантовой механики электрон может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. Распространение этой волны в наноразмерных твердотельных структурах контролируется эффектами, связанными с квантовым ограничением.

Волна, соответствующая свободному электрону в твердом теле, может беспрепятственно распространяться в любом направлении. Ситуация кардинально меняется, когда электрон попадает в твердотельную структуру, размер которой L , по крайней мере в одном направлении, ограничен и по своей величине сравним с длиной электронной волны. Классическим аналогом такой структуры является струна с жестко закрепленными концами. Колебания струны могут происходить только в режиме стоячих волн с длиной волны $\lambda_n = 2L/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$.

Аналогичные закономерности поведения характерны и для свободного электрона, находящегося в твердотельной структуре ограниченного размера или области твердого тела, ограниченной непроницаемыми потенциальными барьерами. На [рис. 6.2](#) такая ситуация проиллюстрирована на примере квантового шнура, у которого ограничены размеры сечения a и b . В этих направлениях возможно распространение только волн с длиной, кратной геометрическим размерам структуры.

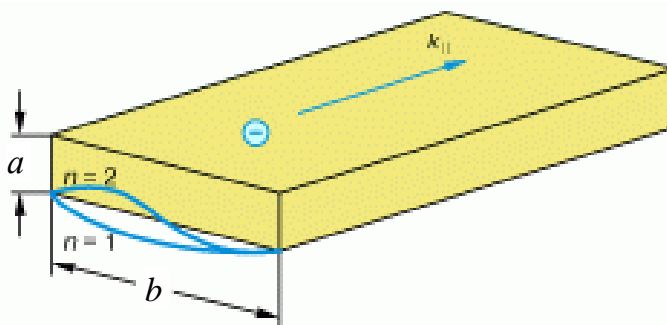


Рис. 6.2. Возможности для движения электронов в квантовоограниченной наноразмерной структуре

Разрешенные значения волнового вектора для одного направления задаются соотношением $k = 2\pi/\lambda_n = n\pi/L$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где L в соответствии с [рис. 6.2](#) может принимать значения, равные a или b . Для соответствующих им электронов это означает, что они могут иметь только определенные фиксированные значения энергии, т. е. имеет место дополнительное квантование энергетических уровней. Это явление получило название квантового ограничения. Вдоль шнура могут двигаться электроны с любой энергией.

Запирание электрона с эффективной массой m^* , по крайней мере, в одном из направлений, в соответствии с принципом неопределенности, приводит к увеличению его импульса на величину \hbar/L . Соответственно увеличивается и кинетическая энергия электрона на величину $\Delta E = \hbar^2 k^2 / 2m^* = (\hbar^2 / 2m^*) (\pi^2 / L^2)$. Таким образом, квантовое ограничение сопровождается как увеличением минимальной энергии запертого электрона, так и дополнительным квантованием энергетических уровней, соответствующих его возбужденному состоянию. Это приводит к тому, что электронные свойства наноразмерных структур отличаются от известных объемных свойств материала, из которого они сделаны.

6.3. Интерференционные эффекты

Взаимодействие электронных волн в наноразмерных структурах как между собой, так и с неоднородностями в них может сопровождаться интерференцией, аналогичной той, которая наблюдается для световых волн. Отличительная особенность такой интерференции состоит в том, что благодаря наличию у электронов заряда имеется возможность управлять ими с помощью локального электростатического или электромагнитного поля и таким образом влиять на распространение электронных волн.

В 1959 г. Я. Аарон и Д. Бом обратили внимание на то, что электромагнитный вектор-потенциал должен сдвигать фазу волновой функции электрона.

На [рис. 6.3](#) показана схема эксперимента по наблюдению магнитного эффекта Аронова – Бома. Пучок электронов, испускаемый из источника, в плоскости «а» расщепляется таким образом, чтобы он огибает магнитный поток с двух сторон. В плоскости «б» парциальные электронные пучки сливаются и электронные волны интерферируют друг с другом. Относительная фаза электронов в двух пучках определяется магнитным потоком, проходящим между двумя путями движения электронов. При изменении потока будет меняться интерференционная картина, а следовательно, проводимость структуры. Впервые эффект Аронова – Бома наблюдался в цепи, состоящей из тонкого металлического золотого кольца с двумя токоподводами.

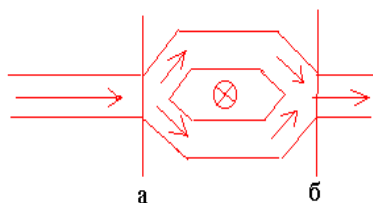


Рис. 6.3. Пучок электронов, испускаемый из источника

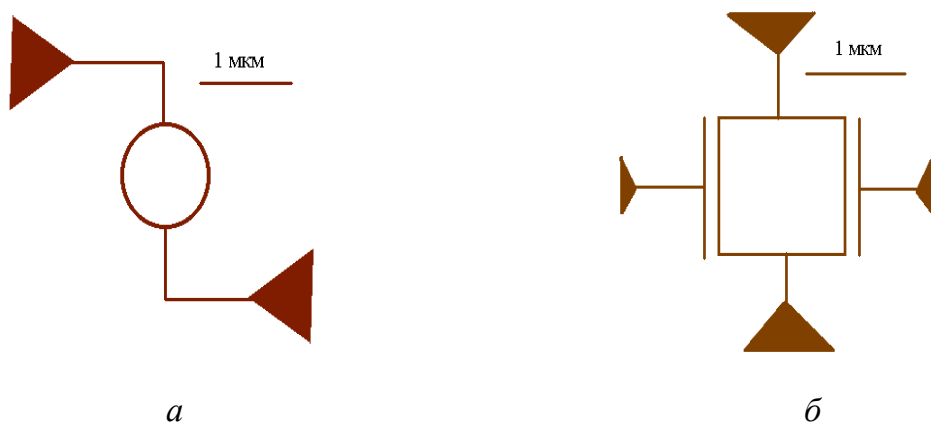


Рис. 6.4. Схемы электростатического управления интерференционной картиной

Возможно также электростатическое управление интерференционной картиной. Подобный эффект наблюдался в структурах, изображенных на рис. 6.4. Изменение напряжения на конденсаторных электродах приводило к смещению осцилляций обусловленных изменением магнитного поля.

6.4. Туннелирование

70 лет назад наш соотечественник Г. А. Гамов впервые получил решения уравнения Шредингера, описывающие возможность преодоления частицей энергетического барьера даже в случае, когда энергия частицы меньше высоты барьера. Новое явление, называемое туннелированием, позволило объяснить многие экспериментально наблюдавшиеся процессы. Найденное решение позволило понять большой круг явлений и было применено для описания процессов, происходящих при вылете частицы из ядра – основы атомной науки и техники.

Развитие электроники подошло к использованию процессов туннелирования лишь почти 30 лет спустя: появились туннельные диоды, открытые японским ученым Л. Есаки, удостоенным за это открытие Нобелевской премии. Еще через 5 лет Ю. С. Тиходеев, руководивший сектором физико-теоретических исследований в Московском НИИ «Пульсар», предложил первые расчеты параметров и варианты использования приборов на основе многослойных туннельных структур, позволяющих достичь рекордных по быстродействию результатов. Спустя 20 лет они были успешно реализованы. В настоящее время процессы туннелирования легли в основу технологий, позволяющих оперировать со сверхмалыми величинами порядка нанометров.

В 1922 г. было открыто явление холодной электронной эмиссии из металлов под действием сильного внешнего электрического поля.

Отрицательные значения координаты x (рис. 6.5) – это область металла, в котором электроны могут двигаться почти свободно. Здесь потенциальную энергию можно считать постоянной.

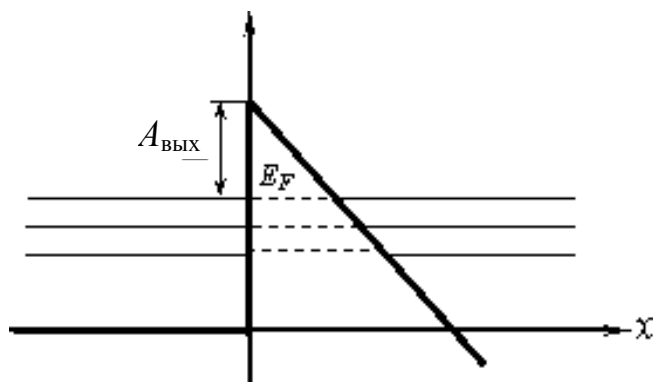


Рис. 6.5. График потенциальной энергии электрона

На границе металла возникает потенциальная стена, не позволяющая электрону покинуть металл. Он может это сделать, лишь приобретя добавочную энергию, равную работе выхода $A_{\text{вых}}$. При низкой температуре такую энергию может получить только ничтожная доля электронов.

Если сделать метал отрицательной пластиной конденсатора, приложив к нему достаточно мощное электрическое поле, то потенциальная энергия электрона из-за его отрицательного заряда вне металла начнет уменьшаться. Классическая частица не проникнет через такой потенциальный барьер.

Сразу после появления квантовой механики Фаулер и Нордгейм объяснили явление холодной эмиссии с помощью туннельного эффекта для электронов. Электроны внутри металла имеют самые разные энергии даже при температуре абсолютного нуля, так как согласно принципу Паули в каждом квантовом состоянии может быть не больше одного электрона (с учетом спина). Поэтому число заполненных состояний равно числу электронов, а энергия самого верхнего заполненного состояния E_F – энергия Ферми – в обычных металлах составляет величину порядка нескольких электронвольт так же, как и работа выхода.

Легче всего будут туннелировать электроны с энергией E_F , с уменьшением энергии вероятность туннелирования резко падает. Все экспериментальные особенности, а также полная величина эффекта описываются формулой Фаулера – Нордгейма. Холодная электронная эмиссия – первое явление, успешно объясненное туннелированием частиц.

Квантовое ограничение, проявляясь в наноразмерных структурах, накладывает специфический отпечаток и на туннелирование. Так, квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, периодически расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер, т. е. туннельно просочиться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией ([рис. 6.6](#)).

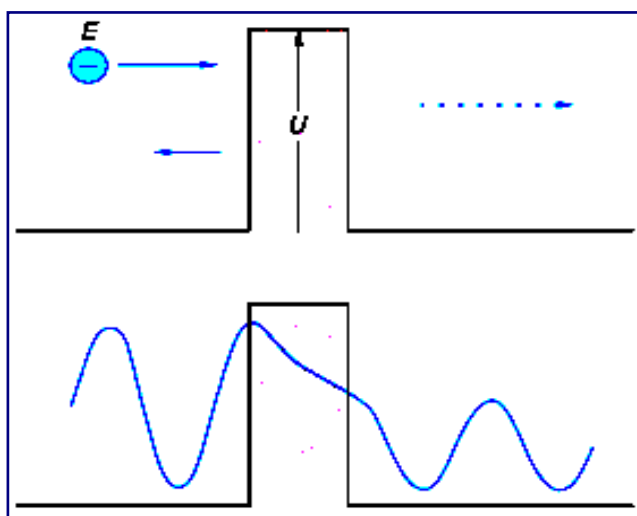


Рис. 6.6. Туннелирование электронов

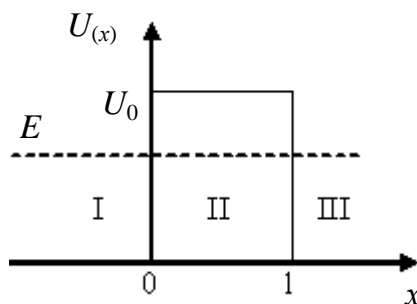


Рис. 6.7. Прохождение частицы через потенциальный барьер

Рассмотрим поведение частицы при прохождении через потенциальный барьер. Пусть частица, движущаяся слева направо, встречает на своём пути потенциальный барьер высоты U_0 и ширины l (рис. 6.7).

По классическим представлениям движение частицы будет таким:

- если энергия частицы больше высоты барьера ($E > U_0$), то частица беспрепятственно проходит над барьером;
- если же энергия частицы будет меньше высоты барьера ($E < U_0$), то частица отражается и летит в обратную сторону.

Совершенно иным является поведение частицы по законам квантовой механики. Во-первых, даже при $E > U_0$ имеется отличная от нуля вероятность того, что частица отразится от потенциального барьера и полетит обратно. Во-вторых, при $E < U_0$ имеется вероятность того, что частица проникнет «сквозь» барьер и окажется в области III. Такое поведение частицы описывается уравнением Шредингера:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0.$$

Здесь ψ – волновая функция микрочастицы. Уравнение Шредингера для области I и III будет одинаковым. Поэтому ограничимся рассмотрением областей I и II. Итак, уравнение Шредингера для области I примет вид

$$\nabla^2 \psi_1 + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi_1 = 0.$$

Введя обозначение $k_1 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE}$, окончательно получим

$$\nabla^2 \psi_1 + k_1^2 \psi_1 = 0.$$

Аналогично для области II

$$\nabla^2 \psi_2 + k_2^2 \psi_2 = 0,$$

где $k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - U)}$. Таким образом, мы получили характеристические уравнения, общие решения которых имеют вид:

$$\psi_1 = A_1 e^{ik_1 x} + B_1 e^{-ik_1 x} \quad \text{при } x < 0,$$

$$\psi_2 = A_2 e^{ik_2 x} + B_2 e^{-ik_2 x} \quad \text{при } x > 0.$$

Слагаемое $A_1 e^{ik_1 x}$ соответствует волне, распространяющейся в области I в направлении оси x , A_1 – амплитуда этой волны. Слагаемое $B_1 e^{-ik_1 x}$ соответствует волне, распространяющейся в области I в направлении, противоположном x . Это волна, отражённая от барьера, B_1 – амплитуда этой волны. Так как вероятность нахождения микрочастицы в том или ином месте пространства пропорциональна квадрату амплитуды волны де Бройля, то отношение $R = \frac{|B_1|^2}{|A_1|^2}$ представляет собой коэффициент отражения микрочастицы от барьера.

Слагаемое $A_2 e^{ik_2 x}$ соответствует волне, распространяющейся в области II в направлении x . Квадрат амплитуды этой волны отражает вероятность проникновения микрочастицы в область II. Отношение $D = \frac{|A_2|^2}{|A_1|^2}$ представляет собой коэффициент прозрачности барьера.

Слагаемое $B_2 e^{-ik_2 x}$ должно соответствовать отражённой волне, распространяющейся в области II. Так как такой волны нет, то B_2 следует положить равным нулю.

Для барьера, высота которого $U > E$, волновой вектор k_2 является мнимым. Положим его равным ik , где $k = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - U)}$ является действительным числом. Тогда волновые функции ψ_1 и ψ_2 приобретут следующий вид:

$$\psi_1 = A_1 e^{ik_1 x} + B_1 e^{-ik_1 x}$$

$$\psi_2 = A_2 e^{-kx}.$$

Так как $A_2 \neq 0$, имеется вероятность проникновения микрочастицы на некоторую глубину во вторую область. Эта вероятность пропорциональна квадрату модуля волновой функции ψ_2 :

$$\omega = |\psi_2|^2 = A^2 e^{\frac{2x}{\hbar} \sqrt{2m(E-U)}}.$$

Наличие этой вероятности делает возможным прохождение микрочастиц сквозь потенциальный барьер конечной толщины l (рис. 6.7). Такое просачивание получило название туннельного эффекта. Отсюда коэффициент прозрачности такого барьера

$$D = D_0 e^{\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(E-U)}},$$

где D_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы барьера.

Особенностью туннельного эффекта является то, что при туннельном просачивании сквозь потенциальный барьер энергия микрочастиц не меняется – они покидают барьер с той же энергией, с какой в него входят.

Туннельный эффект играет большую роль в электронных приборах. Он обуславливает протекание таких явлений, как эмиссия электронов под действием сильного поля, прохождение тока через диэлектрические плёнки, пробой p – n -перехода; на его основе созданы туннельные диоды, разрабатываются активные плёночные элементы.

6.5. Устройства на основе квантовых эффектов

Физики всегда думают о том, как использовать новые идеи и явления в технике. Научившись создавать совершенные полупроводниковые структуры – квантовые ямы и барьеры, в которых движение электронов подчиняется законам квантовой механики, – они сразу же приступили к разработке новых электронных приборов. И хотя эти квантовые приборы еще не заменили обычные диоды, транзисторы и прочее, их потенциальные возможности оцениваются очень высоко.

Простейшая квантовая структура, в которой движение электрона ограничено в одном направлении, – это тонкая пленка или просто достаточно тонкий слой полупроводника. Именно на тонких пленках полуметалла висмута и полупроводника InSb впервые наблюдались эффекты размерного квантования. В конце XX – начале XXI столетия наблюдается интенсивное развитие физики полупроводников, размеры частиц в которых порядка нанометров. Полупроводниковые наноразмерные частицы находятся в области перехода между молекулярной структурой и твердым телом.

Оптические, электронные и каталитические свойства полупроводникового нанокристалла существенно отличаются от таковых для макрокристаллического вещества и зависят от размера частицы (эффект размерного квантования). Такие полупроводники дают возможность управлять их оптиче-

скими, электрическими и структурными свойствами, изменяя размеры частиц. Особенно сильное изменение оптических свойств наблюдается в случае, когда размер нанокристалла меньше, чем диаметр основного экситона.

С тех пор, как эффект размерного квантования был впервые обнаружен, научные исследования этого явления стали стремительно развиваться. Некоторые группы ученых уже показали возможные сферы применения таких материалов: солнечные элементы, светодиоды, точечные транзисторы, светофильтры, полосу поглощения которых можно изменять только изменением размеров частиц. В случае точечных транзисторов использование основано на дискретности электронных уровней полупроводника в сильно-квантованном режиме. Качество образцов значительно улучшается, теперь существует возможность изготовить нанокристалл любого диаметра в пределах от 2–5 нм до 50 нм с погрешностью не менее 5 %. В связи с таким бурным развитием данного направления физики полупроводников возникает необходимость изучения свойств полупроводниковых нанокристаллов. Особо актуальным является вопрос о стабильности оптических и люминесцентных характеристик нанокристаллов в процессе их хранения.

Самым распространенным типом полупроводникового лазера является лазер на двойной гетероструктуре, где активная область представляет собой тонкий слой узкозонного полупроводника между двумя широкозонными. Двойные гетероструктуры предложены в 1963 г. Ж. И. Алфёровым. В 2000 г. «за развитие полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной электронике и оптоэлектронике», Ж. И. Алфёров (Россия) и Г. Крёмер (США) награждены Нобелевской премией. При достаточно малой толщине активной области гетероструктура начинает вести себя как квантовая яма и квантование энергетического спектра в ней существенно меняет свойства лазеров.

Основное влияние на свойства лазеров оказывает изменение плотности состояний, происходящее под влиянием размерного квантования. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны эта величина мала, то в квантоворазмерной системе она не убывает вблизи края, оставаясь равной $m/\pi\hbar^{-2}$. Вследствие этого факта условия создания инверсной населенности в двумерных системах оказываются более благоприятными, чем в трехмерных. Это привело к конкретным практическим результатам. Создание лазеров с квантоворазмерной активной областью позволило получить непрерывную генерацию при комнатной температуре и в дальнейшем снизить пороговый ток инжекционного лазера до рекордно низких значений, составляющих величину порядка 50 А/см².

Изменение энергетической зависимости плотности состояний меняет не только величину порогового тока, но и его температурную зависимость. Она становится более слабой, в силу чего непрерывную генерацию удастся получить не только при комнатной температуре, но и при температурах на много десятков градусов выше.

Другой важной особенностью лазеров на квантовых ямах является возможность их частотной перестройки. Путем изменения ширины квантовой ямы можно осуществлять перестройку частоты генерации, сдвигая ее в коротковолновую сторону по сравнению с лазерами с широкой (классической) активной областью.

Возможность изготовления методом МЛЭ сверхтонких ($\leq 200 \text{ \AA}$) слоев GaAs и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в которых не наблюдается образования кластеров, привела к созданию очень совершенных лазерных гетероструктур с набором квантовых ям (НКЯ).

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

По своему действию такой приемник напоминает примесный фоторезистор, где в роли центров выступают квантовые ямы.

Для самой распространенной гетеросистемы $\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,2-0,25$ условие резонанса выполняется для ям с толщиной, кратной $40-45 \text{ \AA}$. Если $a = 40-45 \text{ \AA}$, то диапазон фоточувствительности структуры лежит в области длин волн порядка 8 мкм , соответствующей одному из окон атмосферной прозрачности и потому очень важной для практических применений. Приемники на основе квантовых ям могут составить конкуренцию фоточувствительным структурам на основе твердых растворов CdHgTe – важнейшему типу приемников для данного спектрального диапазона. Основным преимуществом структур на квантовых ямах является большая стабильность и меньший разброс параметров, что особенно важно для матричных фоточувствительных структур.

Путем сравнительно небольших изменений состава широкозонных слоев и ширины ямы можно менять положение максимума и ширину полосы фоточувствительности.

Резонансно-туннельный диод (рис. 6.8) представляет собой двухбарьерную структуру с квантовой ямой. Его крайние слои высоко легированы, к ним примыкают омические контакты. Характерная ширина барьеров $20-50 \text{ \AA}$, ширина ямы составляет $30-100 \text{ \AA}$.

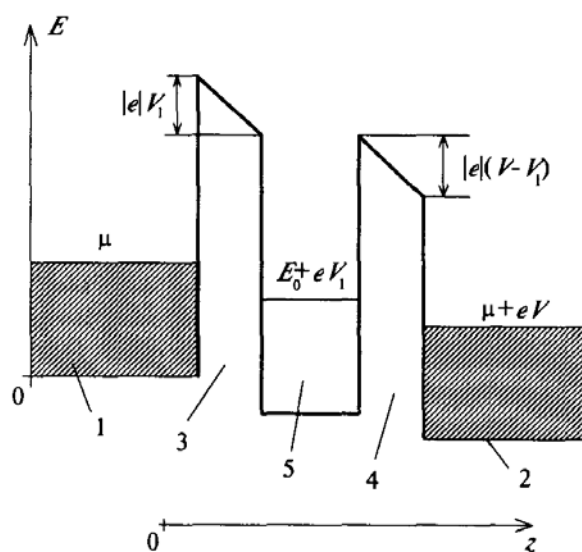


Рис. 6.8. Энергетическая диаграмма идеализированного резонансно-туннельного диода: 1, 2 – эмиттер и коллектор из n^+ GaAs; 3, 4 – барьеры из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; 5 – потенциальная яма из GaAs одним квазистационарным состоянием. Положительное напряжение V подано на коллектор. Считается, что оно падает лишь на барьерах

Эффект резонансного туннелирования в двухбарьерной квантовой структуре используется не только в диодах, но и в транзисторах. Существует несколько типов транзисторов с двухбарьерной квантовой структурой. Рассмотрим лишь один из них – биполярный резонансно-туннельный транзистор с согласованным эмиттером (рис. 6.9).

Основу этого транзистора составляет гетероструктура типа $n-p-n$. Эмиттер изготовлен из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n -типа, база – из GaAs p -типа, в базу включена нелегированная двухбарьерная квантовая структура $\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{AlAs}$.

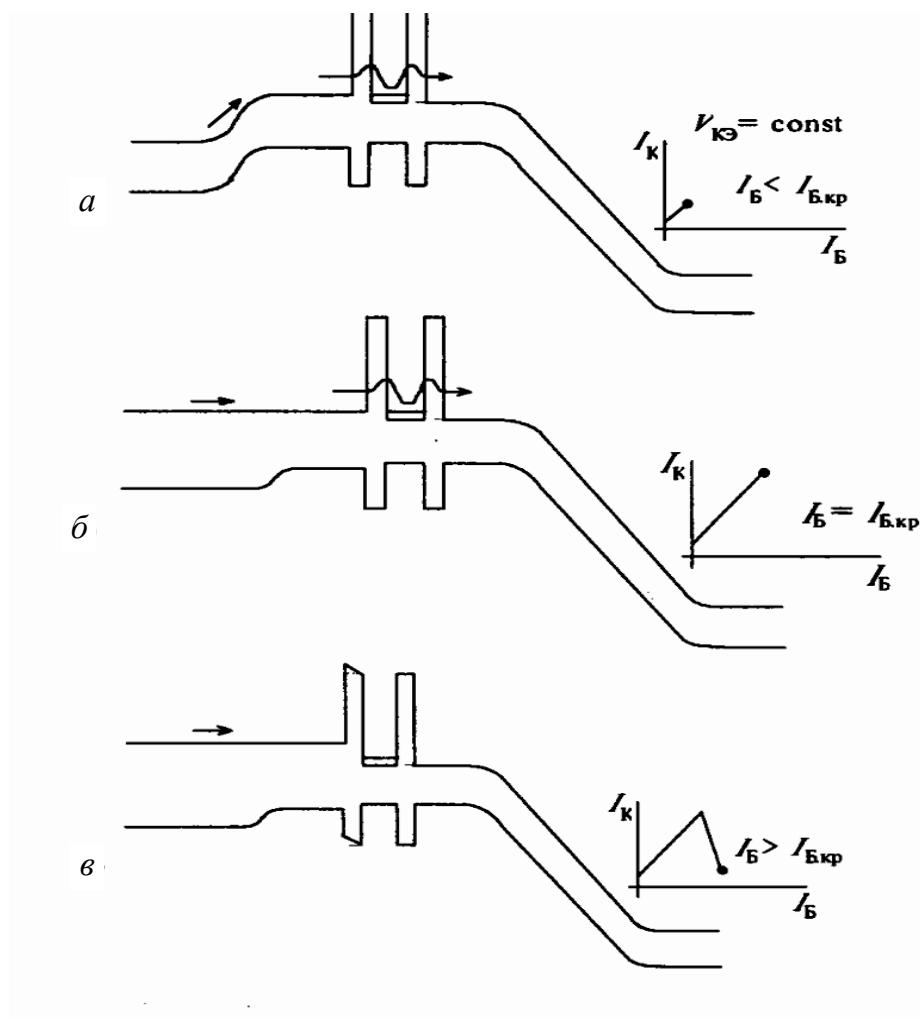


Рис. 6.9. Зонная диаграмма биполярного резонансно-туннельного транзистора с согласованным эмиттером при $I_B < I_{Бкр}$ (а), $I_B = I_{Бкр}$ (б), $I_B > I_{Бкр}$ (в). На вставках – соответствующие зависимости коллекторного тока от тока базы при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером

Чтобы обеспечить перенос электронов через базу в условиях, близких к равновесным, в слой базы толщиной 53 нм, прилегающий к эмиттеру, включена небольшая доля алюминия ($x = 0,07$), а содержание алюминия в эмиттере линейно возрастает от $x = 0,07$ на границе с базой до $x = 0,25$ на

расстоянии 53 нм от границы. Поэтому дно зоны проводимости на входе в двухбарьерную квантовую структуру практически совпадает с ее первым резонансным уровнем, вследствие чего возможно резонансное туннелирование электронов, находящихся в тепловом равновесии с решеткой.

Вопросы для самопроверки

1. Почему широкое развитие нанотехнологий связывают с появлением сканирующего микроскопа?
2. Что представляет собой эффект размерного квантования?
3. Какая гетероструктура является типичным примером эффекта размерного квантования?
4. Почему тонкие плёнки являются примером структуры с двумерным электронным газом?
5. В чём состоит важный для атомной теории принцип соответствия?
6. В чём состоит эксперимент по наблюдению магнитного эффекта Ааронова – Бома?
7. Каковы практические применения процесса туннелирования электрона?
8. Что представляет собой холодная эмиссия электронов из металлов?
9. Что понимают под нанотехнологиями?
10. Каково применение эффекта резонансного туннелирования в двухбарьерной квантовой структуре?

ЛЕКЦИЯ 7

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ СРЕДЫ

План лекции

- 7.1. Актуальность использования низкоразмерного кремния в производстве изделий микро- и нанoeлектроники.
- 7.2. Формирование низкоразмерного кремния.
- 7.3. Структурные модификации пористого кремния.
- 7.4. Применения низкоразмерного кремния.

Литература: [2, 4, 10, 13, 15, 16].

7.1. Актуальность использования низкоразмерного кремния в производстве изделий микро- и нанoeлектроники

Ведущее положение кремния связано с широким набором положительных свойств, которых нет у других полупроводниковых материалов. Кремний технологичен, инертен в обычных условиях, выдерживает высокие температуры, сопровождающие процесс изготовления приборов и интегральных схем. Для создания диэлектрических слоев нет необходимости специально искать диэлектрические материалы – собственный окисел SiO_2 , формируемый на кремнии, выполняет изолирующие и маскирующие функции. В кристаллической решетке атомы кремния занимают только 25 % объема, в результате чего материал имеет малую плотность ($2,32 \text{ г/см}^3$, для германия – $5,35 \text{ г/см}^3$) и допускает сильное легирование элементами III и V групп. Каждый введенный в кристалл кремния атом III или V группы добавляет один носитель заряда с положительным знаком (дырку) или один электрон соответственно. Концентрация носителей заряда в результате этого может изменяться в широких пределах – от 10^{10} до 10^{21} см^{-3} . Высокие значения коэффициентов диффузии легирующих элементов в кремнии позволяют формировать локальные области микронных и субмикронных размеров с дырочным ($p\text{-Si}$) или электронным ($n\text{-Si}$) типом проводимости, совокупность которых и составляет основу любой интегральной схемы или полупроводникового прибора. Производство кремниевых монокристаллов превышает 3000 тонн в год.

Однако монокристаллический кремний имеет и недостатки. Один из них связан с относительно невысокой подвижностью носителей заряда (для электронов – $1\,500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, дырок – $600 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), что ограничивает быстродействие приборов. Для этих целей применяют другой полупроводник – арсенид галлия (GaAs), у которого подвижность электронов при комнатной температуре составляет $8\,500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а при температуре кипения жидкого

азота (77 K) – $250\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Результатом этого стало появление нового технологического направления, получившего название арсенид-галлиевой микроэлектроники. Другой недостаток монокристаллического кремния заключается в том, что его нельзя использовать для создания светоизлучающих приборов. Светоизлучающие структуры широкого спектрального диапазона изготавливают на основе других полупроводников (GaAs, GaP, GaN, ZnS, ZnSe и др.), однако решение этой задачи в перспективе все же возможно в рамках кремниевой технологии. Кроме того, существуют два подхода в решении данной проблемы. Один из них состоит в легировании кремния редкоземельными элементами (Ег, Eu, Gd), в результате чего такой модифицированный кремний обладает излучающими свойствами в инфракрасном диапазоне. Другой подход заключается в формировании на поверхности или в объеме диэлектрических материалов (например, SiO_2) кремниевых кристаллов нанометровых размеров ($1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$). Среди подобных технологических приемов наиболее доступным и дешевым является создание нанокристаллов посредством вытравливания в монокристаллах кремния мельчайших пустот, в результате чего оставшиеся области кремния могут иметь размеры в несколько нанометров. Монокристаллический кремний, пронизанный сетью пор (пустот), получил название пористого кремния (ПК). Пористый кремний является низкоразмерным. В пористом кремнии в ходе электрохимического травления можно получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с пористостью $\Pi > 50\%$ следует рассматривать как один из материалов нанoeлектроники. Более того, перспективным может оказаться заполнение пор другими химическими соединениями, что даст возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния.

Характерной особенностью пористого кремния является большая суммарная площадь его внутренней поверхности. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до $100\text{ м}^2/\text{см}^3$, для мезопористого – от 100 до $300\text{ м}^2/\text{см}^3$ и для микропористого – от 300 до $800\text{ м}^2/\text{см}^3$.

Низкоразмерный кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления 10^{-2} – $10^{11}\text{ Ом}\cdot\text{см}$. С электрической точки зрения материал с пористостью более 50% полностью обеднен носителями заряда. Убедительное объяснение такой трансформации полупроводника практически в диэлектрик в литературе отсутствует. Выдвигаются различные гипотезы, в том числе о селективном вымывании легирующих примесей при электрохимическом процессе или о проявлении квантоворазмерного эффекта в увеличении энергии ионизации примесных центров.

Теплопроводность высокопористого кремния более чем на порядок ниже, чем монокристаллического. Это необходимо учитывать в экспериментах с использованием высокоэнергетичного воздействия, например, мощных лазерных или электронных пучков. Возникающий при этом сильный нагрев образца может существенно повлиять на его свойства.

Оптические свойства низкоразмерного кремния также существенно отличаются от таковых для объемного материала. В частности, край спектра поглощения пористого слоя, отделенного от подложки, в зависимости от пористости смещен в сторону больших $h\nu$ относительно E_{g0} на 100–500 мэВ.

Наиболее удивительным свойством пористого кремния является его способность эффективно люминесцировать в видимой области спектра.

Уже в первых опытах выяснилось, что эффективно люминесцируют образцы пористого кремния, в которых пористость превышает 50 %. Эффективность фотолюминесценции может достигать десятков процентов. Длиной волны излучения можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев. Существуют данные электронной микроскопии и комбинационного рассеяния, свидетельствующие о наличии корреляции между голубым сдвигом спектра фотолюминесценции и уменьшением сечения наноструктур пористого кремния.

Параметры ФЛ пористого слоя оказались весьма чувствительными к термовакуумным обработкам и изменению свойств среды, в которой находится образец. Так, интенсивность ФЛ падает более чем на порядок, если свежевывращенный образец прогревается в вакууме при 400 °С. При этом данные ИК-спектроскопии свидетельствуют об уходе атомов водорода с поверхности пористого кремния, а методом электронного парамагнитного резонанса регистрируется появление в пористом кремнии большого числа дефектов, представляющих оборванные связи кремния на поверхности наноструктур.

К заметному (5–10 раз) гашению ФЛ приводит также заполнение пор жидкостями с высоким значением статической диэлектрической проницаемости ϵ (этанол, метанол и др.).

Предполагается, что излучение в свежеприготовленных образцах пористого кремния формируется в наноструктурах (нитях и кластерах) кремния, электронный спектр которых модифицирован за счет квантово-размерного эффекта.

Электролюминесценция в пористом кремнии изучена в меньшей степени, чем фотолюминесценция. В то же время именно с электролюминесценцией связаны наиболее заманчивые перспективы практического использования пористого кремния как материала для создания светоизлучающих устройств (светодиодов, плоских цветных дисплеев). Предполагается, что светодиоды из пористого кремния будут значительно дешевле, чем производимые сейчас на базе полупроводниковых соединений. Электролюминесцентный излучатель из пористого кремния может быть доведен до микронных размеров и совмещен с другими полупроводниковыми элементами на одном кремниевом кристалле. Это позволит осуществлять быстродействующую оптическую обработку информации, т. е. сделать следующий шаг в развитии информационных и компьютерных технологий. Однако существует ряд трудностей при практическом использовании этого свойства. К ним относятся невысокая эффективность электролюминесценции и быстрая деградация структур.

Эффективность первых электролюминесцентных приборов была невелика ($10^{-5} \%$), однако удалось выяснить причины старения светоизлучающего пористого кремния и наметить пути создания стабильных во времени структур. Явление фотолюминесценции эффективно поддерживается при введении в объем атомов углерода или железа, а современные электролюминесцентные приборы имеют срок службы несколько лет при квантовой эффективности порядка $10^{-1} \%$.

7.2. Формирование низкоразмерного кремния

Низкоразмерный кремний, как указывалось выше, представляет собой монокристаллический кремний, пронизанный сетью каналов с размерами от единиц микрометров до единиц нанометров. Формирование таких каналов в кремнии осуществляют анодной обработкой пластины монокристаллического кремния в электролитах на основе плавиковой кислоты. На [рис. 7.1](#) представлена упрощенная схема процесса анодизации.

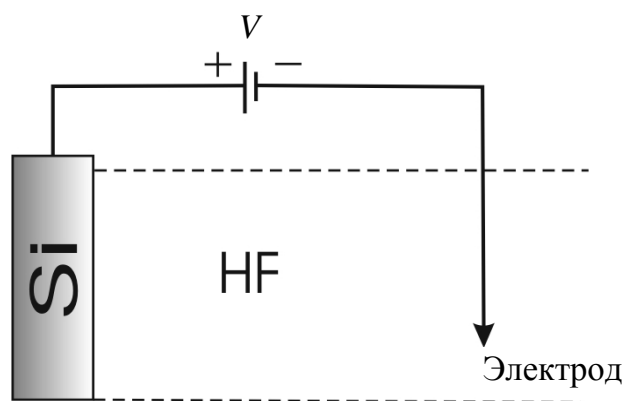


Рис. 7.1. Упрощенная схема процесса анодизации

В кремнии, легированном донорными примесями, дырки являются не основными носителями и их концентрация мала, поэтому для протекания анодной электрохимической реакции необходимы не только ионы фтора, но и внешний фактор, стимулирующий генерацию дырок.

На [рис. 7.2](#) показано распределение зарядов на кремниевом аноде *n*-типа проводимости, помещённом в электролит, содержащий плавиковую кислоту. В приповерхностном слое кремния образуется обедненная область с положительным объёмным зарядом, а в электролите на границе раздела – тонкий слой из отрицательно заряженных ионов. Толщина обедненного слоя в полупроводнике и соответствующий потенциальный барьер определяются степенью легирования кремния. Без дополнительной генерации или инжекции дырок анодная реакция происходить не будет. Концентрацию дырок в

приповерхностном слое кремния с электронным типом проводимости можно увеличить несколькими способами:

- нагреванием;
- воздействием электромагнитного излучения;
- ударной ионизацией при электрическом пробое приповерхностной области пространственного заряда в кремнии.

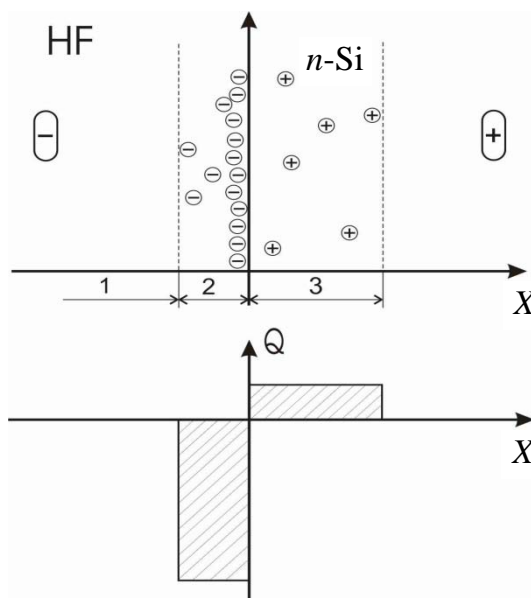


Рис. 7.2. Распределение зарядов на границе монокристалла кремния и электролита:
1 – электролит; 2 – слой Гуи – Гельмгольца; 3 – кремний *n*-типа проводимости

При увеличении степени легирования кремния донорными примесями облегчаются условия для осуществления анодной реакции.

Необходимо отметить, что в реальных условиях на процесс анодной обработки кремния *n*-типа проводимости заметное стимулирующее действие оказывают структурные дефекты.

В кремнии, легированном акцепторными примесями, дырки являются основными носителями, и их концентрация в практически важных случаях оказывается достаточной для протекания реакции. Поэтому для кремния *p*-типа проводимости основное влияние на протекание анодных реакций будет оказывать процесс доставки ионов фтора.

Процесс формирования каналов в кремнии *p*-типа может идти и без внешних воздействий (нагревание, воздействие электромагнитного излучения, ударная ионизация при электрическом пробое приповерхностной области пространственного заряда).

В кремнии указанного типа проводимости достаточно собственных носителей заряда (так как процесс идет с участием дырок) для осуществления процесса анодизации кремния, поэтому дополнительной их генерации не требуется.

7.3. Структурные модификации пористого кремния

Изменяя условия анодирования, можно получать пористый кремний с различной морфологией (геометрией) пор или, иными словами, пористый кремний различных структурных модификаций. На поперечный размер R пор влияют плотность тока анодирования, время процесса, дополнительное освещение образца в электрохимической ячейке, состав электролита, уровень и вид легирования кремния и т. д. В результате этот размер может изменяться от 10 мкм до 1 нм. По существующей в литературных источниках классификации пористый кремний подразделяется на микропористый ($R < 2$ нм), мезопористый ($2 \text{ нм} < R < 50$ нм) и макропористый ($R > 50$ нм).

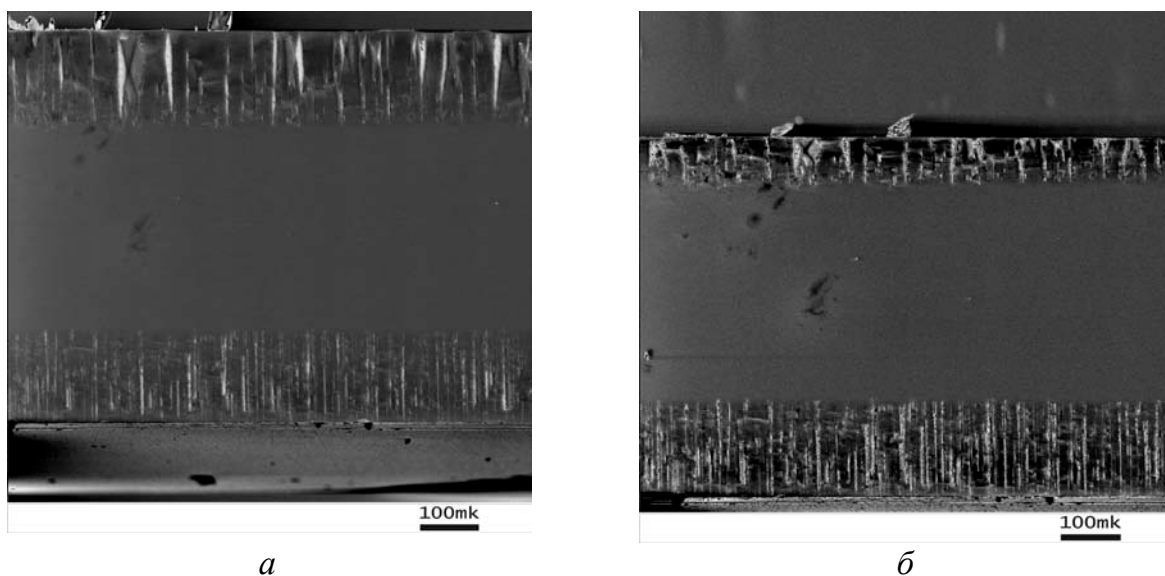


Рис. 7. 3. Микрофотографии сколов образцов с низкоразмерным кремнием, полученные с помощью электронного микроскопа: *а* – при меньшей плотности тока; *б* – при большей плотности тока

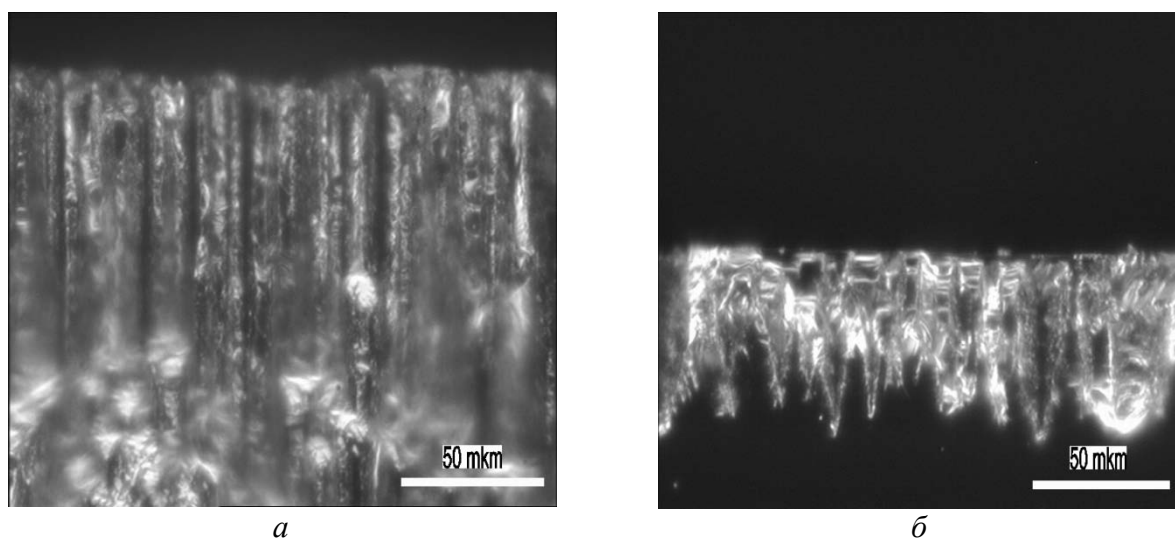


Рис. 7.4. Микрофотографии сколов образцов с низкоразмерным кремнием, полученные с помощью оптического микроскопа: *а* – при гальваностатическом режиме; *б* – при потенциостатическом режиме

На [рис. 7.3](#), [рис. 7.4](#) в качестве примера представлены микрофотографии низкоразмерного кремния, полученного в различных технологических режимах на образцах монокристаллического кремния (100) *n*-типа электропроводности.

Более развернутую информацию по технологическим режимам формирования низкоразмерного кремния можно получить, обратившись к учебным пособиям [3, 5] и методическим указаниям к самостоятельной работе [4].

Основным параметром любого пористого материала является показатель пористости P . Этот показатель определяет долю объема материала, занятую пора́ми. Для пористого кремния значения пористости могут находиться в необычайно широком интервале – от 5 до 95 %. Когда объем, занимаемый пора́ми, невелик (5 %), свойства такого материала близки к свойствам кристаллического кремния. При высоких показателях пористости картина существенно меняется и такой пористый кремний проявляет новые свойства, многие из которых являются уникальными.

Как уже сообщалось, суммарная площадь внутренней поверхности низкоразмерного кремния велика. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять для макропористого кремния от 10 до 100 м²/см³, для мезопористого – от 100 до 300 м²/см³ и для микропористого – от 300 до 800 м²/см³. Для сравнения следует отметить, что удельная поверхность монокристаллического кремния составляет всего 0,1–0,3 м²/см³.

Электрические свойства пористого кремния также зависят от его структуры. Дополнительные сведения о структурных и электрических свойствах низкоразмерного кремния, его реальном применении в технологии интегральных схем приведены в источниках [17, 23, 24].

7.4. Применение низкоразмерного кремния

В пористом кремнии в ходе электрохимического травления возможно формирование кремниевых элементов нанометровых размеров. Для нанокристаллов с размерами менее 4 нм в пористом кремнии наблюдаются те же явления, что и в других наноструктурированных материалах: квантование энергетического спектра, увеличение ширины запрещенной зоны с 1,1 до 1,8–2,9 эВ, уменьшение диэлектрической проницаемости. Возможности технологии анодного травления позволяют получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с $P > 50$ % следует рассматривать как один из материалов наноэлектроники. Необычайный интерес исследователей к пористому кремнию вызвало обнаруженное в 1990 г. Л. Кэнхэмом (L. Canham) излучение света пористым материалом ($P > 50$ %) при комнатной температуре в видимой области спектра при облучении лазером. Как уже было сказано о том, что монокристаллический кремний не может быть использован для создания светоизлучающих устройств, так как его излучательная способность ничтожно мала (менее

0,001 %). Открытие Кэнхэмом интенсивной фотолюминесценции с эффективностью 5 % дало возможность приступить к разработке кремниевых приборов, испускающих свет в широком спектральном диапазоне. Исследования показали, что длиной волны λ , определяющей цвет излучения, можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев. Вслед за этим открытием в начале 1990-х годов были созданы первые электролюминесцентные ячейки на основе пористого кремния, которые излучали свет в многослойной структуре «прозрачный электрод – пористый кремний – монокристаллический кремний – металл» при протекании тока.

Эффективность первых электролюминесцентных приборов была невелика (10–5 %), фотолюминесцентные и электролюминесцентные структуры быстро деградировали. В настоящее время удалось выяснить причины старения светоизлучающего пористого кремния и наметить пути создания стабильных во времени структур. Явление фотолюминесценции эффективно поддерживается при введении в объем атомов углерода или железа, а современные электролюминесцентные приборы имеют срок службы несколько лет при квантовой эффективности порядка 1–10 %. Пористый кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин удельного сопротивления (10^{-2} – 10^{11} Ом·см), диэлектрической проницаемости (1,75–12) и показателя преломления (1,2–3,5). Это означает, что пористый кремний может быть использован как в качестве полупроводниковых, так и диэлектрических слоев в приборах и интегральных схемах. Оказалось, что в рамках одного процесса травления варьированием режимов (плотностью тока анодирования, освещенностью) можно получать многослойные структуры, когда каждый слой обладает заданной пористостью и геометрией пор. Такая технология содержит в себе большие потенциальные возможности для разработки различных устройств оптоэлектроники.

Оптоэлектроника является одним из наиболее динамично развивающихся научно-технических направлений в связи с резким расширением круга областей применения и способностью решать возникающие задачи нетрадиционными методами. Ключевое место оптоэлектроники в информационных системах обусловлено тем, что более 90 % информации, которую получает человек, составляет видеoinформация. В связи с широким кругом применений в системах получения информации, ее обработки, хранения, передачи и отображения, а также разнообразием используемых материалов правомочной является постановка вопроса о целой серии оптоэлектронных технологий, включая индикаторные системы, формирователи сигналов изображения, волоконно-оптические линии передачи информации, преобразователи солнечной энергии, оптическую вычислительную технику.

Наглядным примером использования многослойных пористых структур является создание световодных элементов. Назначение световодов заключается в передаче светового луча без потерь энергии, в том числе и по криволинейным трассам.

Для целей интегральной оптики применяются планарные световоды, представляющие собой пленочную структуру, в которой свет распространяется в слое с высоким показателем преломления, ограниченном с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления.

Для пористого кремния этот показатель зависит от пористости (чем больше пористость, тем меньше показатель преломления), поэтому формирование многослойных структур с разной пористостью позволяет получать на их основе волноводные элементы с низким уровнем потерь. Потери на поглощение можно дополнительно уменьшить окислением слоев пористого кремния.

Другим примером использования многослойных пористых структур является их применение в качестве интерференционных фильтров в оптике для инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра.

Интерференционный фильтр Фабри – Перо на основе пористого кремния представляет собой семислойную структуру, в которой между толщиной слоев пористого кремния и их коэффициентами преломления существует определенная взаимосвязь. Применение таких фильтров позволяет при прохождении света выделить из него узкий интервал длин волн $\Delta\lambda = 10$ нм. Кроме этого, пористый кремний обладает низкой теплопроводностью (на два–четыре порядка меньше, чем у монокремния), что дает возможность использовать его в качестве теплоизоляционного слоя в устройствах кремниевой электроники.

Большие перспективы пористый кремний имеет для создания датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров. Принцип действия таких датчиков основан на влиянии внешних молекул на электронное состояние поверхности. В случае пористого кремния за счет высокой удельной поверхности это влияние становится более эффективным, поэтому сенсоры имеют высокую чувствительность. Обычно такие датчики фиксируют изменение емкостных, проводящих, люминесцентных свойств пористого кремния при наличии в контролируемой среде заданных молекул и химических соединений. Интересным представляется применение пористого кремния в качестве рабочего элемента биохимических и биологических сенсоров.

Новым этапом в исследовании и применении пористого кремния стало создание регулярных пористых матриц – кремниевых кристаллов, в которых в определенном порядке сформированы глубокие (до 500 мкм) поры с поперечным размером до 20 мкм ([рис. 7.5](#)). Как формируются такие структуры? На первом этапе на поверхности кремниевой пластины *n*-типа создается пленка SiO₂, в которой методом фотолитографии формируется сетка правильных отверстий (окон). Далее в окнах создаются ямки травления в виде перевернутых пирамид. После этого проводится уже знакомое нам электрохимическое травление при дополнительной подсветке с тыльной стороны.

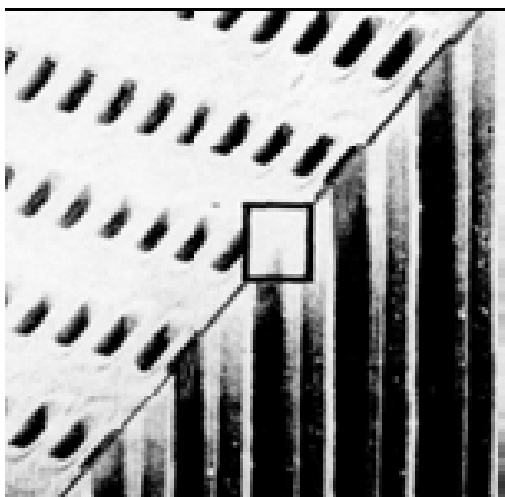
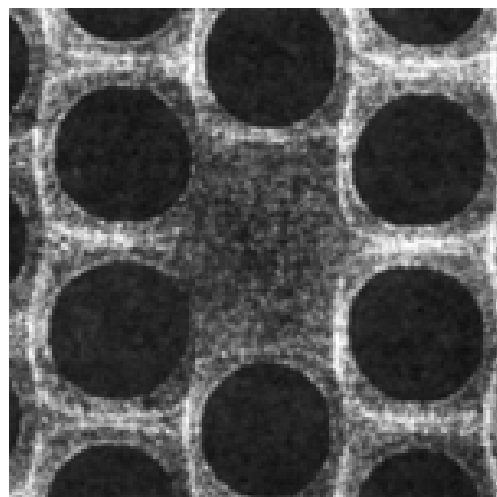
*а**б*

Рис. 7.5. Кремниевые структуры: *а* – регулярная макропористая структура, используемая для создания интегральных конденсаторов; *б* – элемент макропористой матрицы фотонного кристалла

Такие структуры можно использовать в различных областях, в частности для создания интегральных конденсаторов и фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы, разрабатываемые для применения в системах телекоммуникации и лазерных технологиях, представляют собой двумерные структуры с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью.

Эти структуры имеют частотную щель, позволяющую с высокой точностью контролировать частоту распространяющейся электромагнитной волны в зависимости от направления волнового вектора. Пространственно модулированная макропористая структура подпадает под приведенное определение фотонного кристалла. В настоящее время на основе макропористых периодических структур созданы фотонные кристаллы для ближней инфракрасной области спектра с $\lambda = 4,9$ мкм.

Рассмотрев [рис. 7.5](#), можно представить возможности материала. Достаточно, например, заметить, что на базе пористого кремния могут быть созданы светоизлучающие диоды, фотоприемники и световоды, которые в одной твердотельной схеме могут быть объединены в единый комплекс «излучатель – оптическая среда передачи информации – приемник».

Устройства, изготовленные на основе низкоразмерного кремния:

- фотодетекторы;
- световоды;
- антиотражающие покрытия солнечных элементов;
- светоизлучающие структуры;
- геттер нежелательных примесей из кремния;
- фотоприемники;
- солнечные батареи;
- элементы кремниевой микромеханики;
- толстые диэлектрические слои;

теплозащитные пленки;
сверхчувствительные сенсоры;
интегральные конденсаторы;
буферные слои для металлизации;
буферные слои для эпитаксии;
биологические имплантаты;
интерференционные фильтры;
катоды вакуумной микроэлектроники;
фотонные кристаллы.

Легкость управления свойствами низкоразмерного материала, совместимость с технологическими операциями кремниевой микроэлектроники позволяют надеяться на разработку и других электронных и оптических приборов на основе слоев с низкой, средней, высокой пористостью и макропористых регулярных структур. О перспективах кремния как материала нанoeлектроники подробно изложено в [10].

Вопросы для самопроверки

1. Почему кремний является основным материалом современной микроэлектроники?
2. Какие причины сдерживают использование монокристаллического кремния в оптоэлектронике?
3. Сравните электрические сопротивления монокристаллического и пористого кремния.
4. Сравните теплопроводности монокристаллического и пористого кремния.
5. Какие составы электролитов используются при формировании низкоразмерного кремния?
6. Присутствие носителей заряда какого знака необходимо для получения низкоразмерного кремния при анодировании?
7. Как классифицируется пористый кремний по размеру пор?
8. Что понимают под пористостью низкоразмерного кремния?
9. При каких значениях пористости низкоразмерный кремний генерирует видимый свет?
10. Каковы перспективы применения пористого кремния в нанoeлектронике?

ЛЕКЦИЯ 8

ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

План лекции

- 8.1. Введение.
- 8.2. Механизмы эпитаксиального роста тонких плёнок.
- 8.3. Жидкофазная эпитаксия.
- 8.4. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.
- 8.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
- 8.6. Установка МЛЭ.

Литература: [7, 14, 22].

8.1. Введение

Классическим методом получения чистых поверхностей многих материалов является испарение и конденсация в сверхвысоком вакууме. Тонкие пленки металлов или элементарных полупроводников, получаемые вакуумным испарением, обычно поликристаллические или аморфные, т. е. в них невозможна определенная кристаллографическая ориентация поверхности.

Технология многослойных структур должна обеспечивать высокое качество роста материалов слоистых структур и совершенство границ раздела между этими материалами. Только в этом случае могут быть реализованы потенциальные возможности, заложенные в полупроводниковых сверхрешетках и многослойных магнитных структурах.

Для получения высококачественных тонких пленок и многослойных структур используют чаще всего механизмы эпитаксиального роста материала пленки на соответствующей монокристаллической подложке. Наибольшее распространение получил метод МЛЭ, позволяющий формировать совершенные монокристаллические слои различных материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод успешно применяется для выращивания тонких пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, магнитных материалов, высокотемпературных сверхпроводников и многих других веществ. К началу XXI столетия уже накоплен достаточно большой объем как теоретических исследований, так и практических работ в этой области, поэтому технология МЛЭ является самым распространенным методом получения полупроводниковых сверхрешеток и многослойных магнитных структур.

Все большее распространение для выращивания полупроводниковых сверхрешеток приобретает технология роста из газовой фазы с использованием



металлоорганических соединений. В этом методе используется процесс эпитаксиального роста материалов на нагретой подложке при термическом разложении металлоорганических соединений. Механизмы роста в методе РГФ МОС изучены не так глубоко, как в МЛЭ, однако этим методом успешно получают большинство полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{IV}$ и $A^{IV}B^{VI}$.

Из методов эпитаксиального роста для получения полупроводниковых сверхрешеток может быть использована и жидкофазная эпитаксия, в которой монокристаллические слои получают из контактирующих с подложкой пере-сыщенных растворов. При понижении температуры избыточное количество полупроводника осаждается из раствора на подложку, что связано с уменьшением растворимости полупроводникового материала. Наилучшие результаты дает жидкофазная эпитаксия для полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и их твердых растворов. Многослойные полупроводниковые структуры получают в многокамерных реакторах для жидкофазной эпитаксии последовательным созданием контакта с разными расплавами.

Тонкие магнитные пленки и многослойные магнитные структуры могут быть получены различными методами напыления, включая высокочастотное и магнетронное распыление. Эти методы позволяют получать слои практически любого состава. Некоторые исследователи считают, что наилучшие возможности для технологии магнитных многослойных структур дают различные методы электролитического осаждения.

8.2. Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок

С видами механизмов эпитаксиального роста тонких пленок мы ознакомились в лекции 3, однако в связи с важностью этих вопросов вернемся к ним еще раз. Здесь уместно будет сказать, что практически во всех литературных источниках по нанoeлектронике можно встретить описание процессов эпитаксиального роста, сопровождающих тематику создания субмикронных слоев.

Вопросы, связанные с механизмами роста, становятся чрезвычайно важными при создании гетероструктур и многослойных структур, от которых требуется высшая степень однородности состава при толщине менее 100 Å.

Наиболее важные индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост, следующие:

- адсорбция составляющих атомов или молекул на поверхности подложки;
- поверхностная миграция атомов и диссоциация адсорбированных молекул;
- присоединение атомов к кристаллической решетке подложки или эпитаксиальным слоям, выращенным ранее;
- термическая десорбция атомов или молекул, не внедренных в кристаллическую решетку.

Эти процессы схематически изображены на [рис. 8.1](#). На этом рисунке поверхности подложки и растущего эпитаксиального слоя разделены на «кристаллические участки», с которыми взаимодействуют поступающие на поверхность из молекулярных источников компоненты. Каждый участок поверхности представляет собой небольшой участок поверхности кристалла и характеризуется индивидуальной химической активностью.

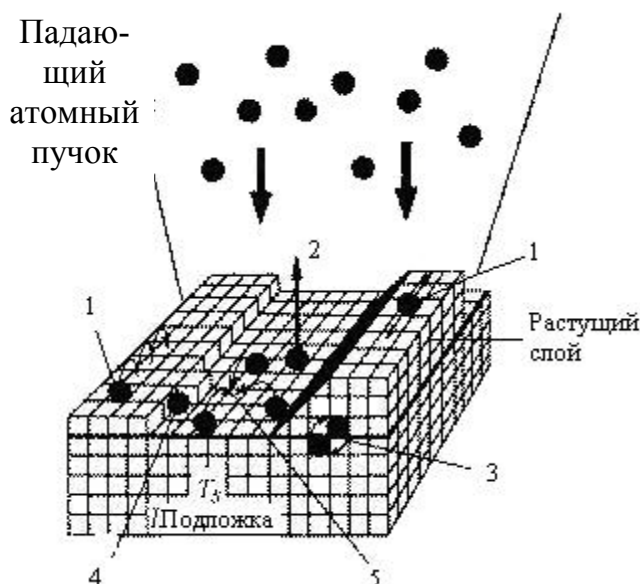


Рис. 8.1. Схематическое изображение поверхностных процессов: 1 – поверхностная диффузия; 2 – десорбция; 3 – взаимодиффузия; 4 – встраивание в решетку; 5 – поверхностная агрегация (зародышеобразование)

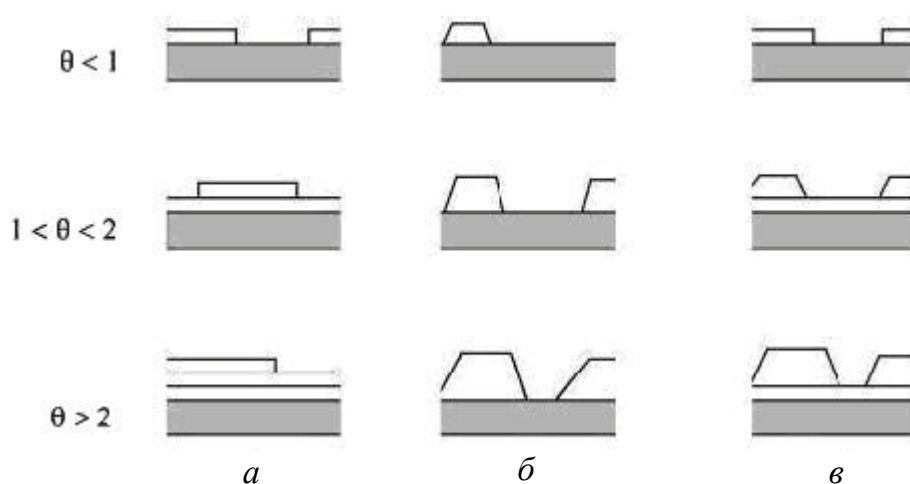


Рис. 8.2. Схематическое представление механизмов роста: а – послойный рост; б – островковый рост; в – рост слоя с островками

На [рис. 8.2](#) показано схематическое представление трех важнейших механизмов роста: послойный рост, островковый рост, рост слоя с островками.

1. Послойный рост (layer-by-layer growth). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного завершения роста предыдущего слоя. Этот механизм роста называют также ростом Франка ван дер Мерве (Frank van der Merve, FM). Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов значительно больше, чем между ближайшими атомами в слое. Схематическое представление послойного роста пленки для различной степени покрытия (в долях монослоев ML) показано на [рис. 8.2, а](#).

2. Островковый рост, или рост Вольмера – Вебера (island growth, Vollmer-Weber, VW). Этот механизм является полной противоположностью послойному росту. Условием его реализации является преобладание взаимодействия между ближайшими атомами над взаимодействием этих атомов с подложкой. При островковом механизме роста вещество с самого начала оседает на поверхности в виде многослойных конгломератов атомов.

3. Промежуточным между этими двумя механизмами является **рост Странски – Крастанова (Stransky – Krastanov, SK, layer-plus-island grows)**, при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки. К этому механизму могут приводить многие факторы, в частности, достаточно большое несоответствие между параметрами кристаллических решеток пленки и подложки.

8.3. Жидкофазная эпитаксия

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) наряду с методом газофазной эпитаксии (ГФЭ) нашел в прошлом широкое применение для получения различных структур, в первую очередь, гетероструктур. Этим методом был получен ряд твердых растворов, которые не могли быть получены другим методом. Методу ЖФЭ стало уделяться меньше внимания в связи с широким применением молекулярно-лучевой эпитаксии, особенно для получения квантоворазмерных структур, на основе которых были получены, например, высокоэффективные излучательные структуры. Однако метод жидкофазной эпитаксии вследствие своей простоты не потерял актуальности и в настоящее время, в частности, в решении проблемы получения квантоворазмерных структур также. Имеются сообщения в литературных источниках о возможности получения квантоворазмерных структур методом жидкофазной эпитаксии с применением «сверхбыстрого охлаждения». Рассмотрим технологию получения различных гетеросистем с наноразмерными структурами. Применение систем со связанными наноразмерными структурами из различных материалов в матрице GaAs дает дальнейшую перспективу повышения эффективности солнечных элементов с наноразмерными структурами. В свя-

зи с этим представляет интерес анализ различных вариантов проведения технологических процессов методом жидкофазной эпитаксии с целью их систематизации на основе рассмотрения модели диффузии, компонент раствора-расплава, распределения их концентрации по толщине раствора-расплава и твердого слоя, а также поиска новых способов получения многослойных структур (в том числе и квантово-размерных), перспективных для применения в различных приборах (в частности, излучательных и фоточувствительных).

Основные методы получения полупроводниковых слоев (структур) жидкофазной эпитаксией по модели диффузии (распределения концентрации) компонент в растворе-расплаве можно разделить на две группы:

первая – получение слоев из неограниченных объемов растворов-расплавов («бесконечный источник»); основным критерием неограниченных объемов – является сохранение в процессе роста эпитаксиальных слоев постоянными концентрации растворенных компонентов в основной области раствора-расплава (практически это имеет место при достаточно больших объемах-толщинах раствора-расплава);

вторая – получение слоев из ограниченных объемов растворов-расплавов («конечный источник»); основным критерием ограниченных – «тонких» объемов является изменение в процессе роста эпитаксиальных слоев концентрации растворенных компонентов во всей области раствора-расплава, но при этом распределение по толщине остается однородным (практически это имеет место при достаточно малых объемах-толщинах раствора-расплава и небольших скоростях роста эпитаксиальных слоев).

При получении слоев из неограниченных («бесконечный источник») объемов растворов-расплавов концентрация кристаллизующегося компонента изменяется в области жидкой фазы, приграничной к поверхности кристаллизующегося слоя, а вдали от нее остается постоянной (или меняется незначительно). [Рис. 8.3, а](#) качественно иллюстрирует распределение концентрации кристаллизующегося компонента (коэффициент сегрегации которого $K > 1$) в жидкой фазе в процессе роста эпитаксиального слоя.

Как видно из рисунка, при росте эпитаксиальных слоев в приграничной области появляется градиент концентрации компонент, который постепенно увеличивается в процессе роста слоя, однако из-за достаточно большой толщины раствора-расплава имеет место только в приграничной области расплава.

При получении слоев из ограниченных объемов растворов-расплавов («конечный источник») можно считать с определенной степенью идеализации, что концентрация кристаллизующегося компонента изменяется практически равномерно по всему объему жидкой фазы (если скорость диффузии превосходит скорость роста и исходный расплав однороден по составу).

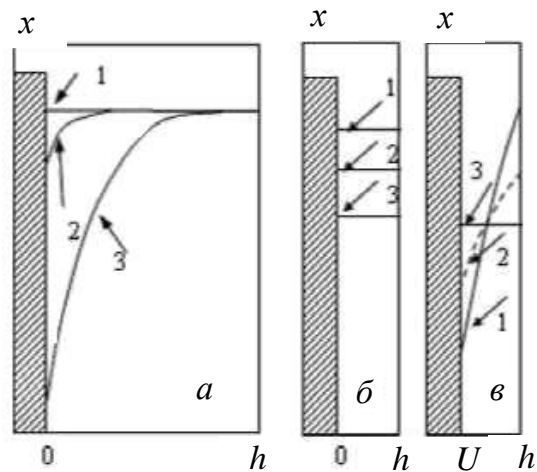


Рис. 8.3. Изменение во времени распределения концентрации вещества

Таким образом, при достаточно малых скоростях роста (меньших, чем скорость диффузии кристаллизующегося компонента от верхней границы расплава к фронту кристаллизации) концентрация кристаллизующегося компонента по толщине жидкой фазы будет практически однородной ([рис. 8.3, б](#)).

На [рис. 8.4, а](#) показан фрагмент контейнера пенально-сдвигового типа для структур с использованием модели роста из неограниченных («бесконечный источник», *а*) и из ограниченных («конечный источник», *б*) объемов не смешиваемых растворов-расплавов (с соответствующими примерными температурно-временными графиками роста слоев).

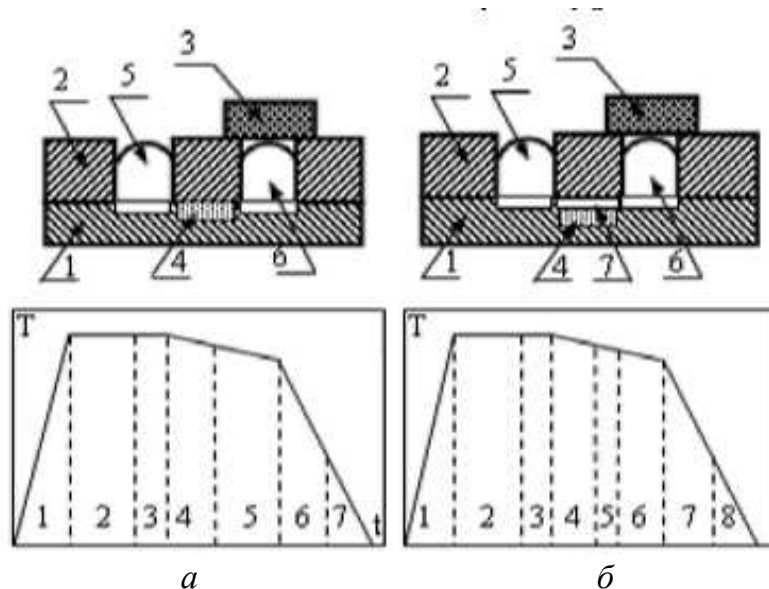


Рис. 8.4. Фрагмент контейнера пенально-сдвигового типа: 1 – корпус контейнера; 2 – подвижная часть контейнера (слайдер); 3 – крышка; 4 – паз для подложки; 5, 6 – «окна» для растворов-расплавов для выращивания *n*- и *p*-слоев соответственно; 7 – щель для ограничения расплава

8.4. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

В лекции 3 мы уже ознакомились с возможностями этого вида эпитаксии и ее месте в технологии микро- и нанoeлектроники. Магистрантам, которые хотели бы более основательно разобраться в физической сущности процессов эпитаксиального роста, целесообразно обратиться к источникам [7, 22].

8.5. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Вопросы эпитаксиального роста полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии были объектом нашего внимания на лекции 3, теперь остановимся на описании установки для этого вида эпитаксии.

Упрощенная схема ростовой камеры МЛЭ («Катунь-С») показана на [рис. 8.5](#). Испарение материалов, осаждаемых в сверхвысоком вакууме на подложку, закрепленную на манипуляторе с нагревательным устройством, осуществляется с помощью эффузионных ячеек (эффузия – медленное истечение газов через малые отверстия). Схема эффузионной ячейки приведена на [рис. 8.6](#). Эффузионная ячейка представляет цилиндрический стакан, выполненный из пиролитического нитрида бора или высокочистого графита. Поверх тигля располагаются нагревательная спираль из танталовой проволоки и тепловой экран, изготовленный обычно из танталовой фольги.

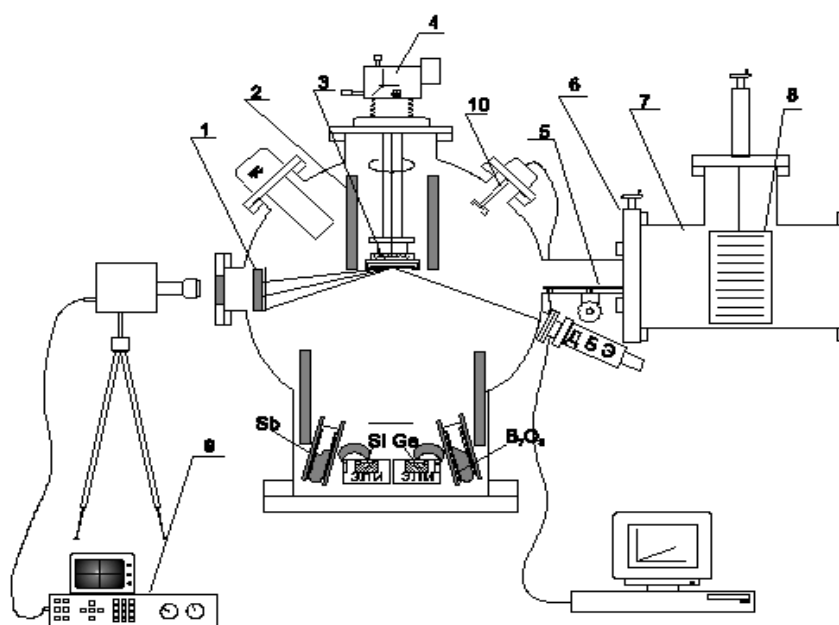


Рис. 8.5. Схематическое изображение установки для МЛЭ: 1 – люминесцентный экран; 2 – криопанель; 3 – нагреватель; 4 – манипулятор; 5 – рейка для транспортировки подложек; 6 – шибер; 7 – камера МЗВ; 8 – манипулятор с кассетами; 9 – система регистрации ДБЭ «Фотон-микро»; 10 – кварцевый измеритель толщины

Эффузионные ячейки могут работать в области температур до $1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживать кратковременный нагрев до $1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для испарения тугоплавких материалов, которые используются в технологии магнитных тонких пленок и многослойных структур, нагревание испаряемого материала осуществляется электронной бомбардировкой. Температура испаряемого вещества контролируется вольфраморениевой термопарой, прижатой к тиглю. Испаритель крепится на отдельном фланце, на котором имеются электрические выводы для питания нагревателя и термопары. Как правило, в одной ростовой камере располагается несколько испарителей, в каждом из которых размещены основные компоненты пленок и материалы легирующих примесей.

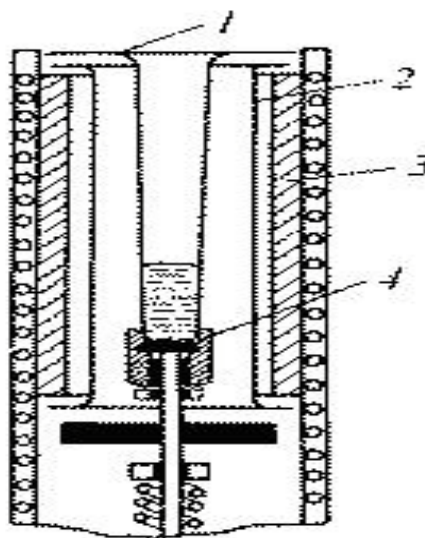


Рис. 8.6. Схема эффузионной ячейки: 1 – тигель; 2 – нагреватель; 3 – радиационный экран; 4 – термопара

Ростовые камеры современных технологических комплексов МЛЭ оборудованы, как правило, квадрупольным масс-спектрометром для анализа остаточной атмосферы в камере и контроля элементного состава на всем технологическом процессе. Для контроля структуры и морфологии формируемых эпитаксиальных структур в камере роста располагается также дифрактометр отраженных быстрых электронов. Дифрактометр состоит из электронной пушки, которая формирует хорошо сфокусированный электронный пучок с энергий $10\text{--}40\text{ кэВ}$. Электронный луч падает на подложку под очень небольшим углом к ее плоскости, рассеянные электронные волны дают дифракционную картину на люминесцентном экране. Часто в многокамерных комплексах МЛЭ в камере для подготовки и анализа подложек и эпитаксиальных структур располагаются электронная пушка с энергоанализатором вторичных электронов и ионная пушка для очистки подложек ионным травлением и послойного анализа состава эпитаксиальных структур.

Наиболее важная для технологического процесса область ростовой камеры находится между эффузионными ячейками и подложкой. Эту область

можно разделить на три зоны: 1 – зона генерации молекулярных пучков, в этой зоне молекулярные пучки, формируемые каждой из эффузионных ячеек, не пересекаются и не влияют друг на друга; 2 – зона смешения испаряемых элементов, где молекулярные пучки пересекаются и происходит перемешивание различных компонент. О физических процессах, происходящих в этой зоне, пока известно очень мало. В непосредственной близости от поверхности подложки располагается зона кристаллизации. В этой зоне происходит эпитаксиальный рост в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии.

В промышленности, научно-исследовательских лабораториях широкое распространение получили автоматизированные многомодульные комплексы для молекулярно-лучевой эпитаксии. Модуль – это часть установки, выделенная по функциональным и конструктивным признакам. Модули подразделяются на технологические и вспомогательные. Каждый технологический модуль предназначен для проведения определенного технологического процесса (очистка подложек и анализ состояния их поверхности, эпитаксия полупроводниковых пленок, осаждение металлов и диэлектриков и т. д.). Вспомогательными модулями являются, например, модуль загрузки-выгрузки подложек, модуль предварительной откачки и обезгаживания вакуумных камер и др. Комплекс для МЛЭ в зависимости от технологических задач может быть укомплектован различным количеством специализированных модулей, соединенных между собой шлюзовыми устройствами и системой перемещения подложек и образцов из одного модуля в другой без нарушения вакуума.

Тенденции развития разработок в направлении создания установок для МЛЭ связаны с все более широким применением встроенного аналитического оборудования и автоматизацией технологического процесса, что позволяет улучшить воспроизводимость свойств выращиваемых эпитаксиальных структур и создавать сложные многослойные структуры.

Рассмотрим конкретный пример реализации модульного принципа построения комплекса МЛЭ, разработанного в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск). На [рис. 8.7](#) представлена упрощенная схема вакуумно-механической системы этого комплекса. Комплекс состоит из трех технологических модулей – модуль анализа и подготовки подложек (ПАП), эпитаксии полупроводниковых соединений (ЭПС) и эпитаксии элементарных полупроводников, металлов и диэлектриков (ЭПМ). Вакуумно-механическая система комплекса включает также модуль загрузки и выгрузки подложек (ЗВП), систему транспорта подложек, систему предварительной откачки и получения сверхвысокого вакуума.

Аналитическое оборудование комплекса представлено в модуле ПАП встроенным оже-спектрометром и ионной пушкой для очистки подложек и оже-профилирования. Каждый из блоков ЭПС и ЭПМ содержит масс-спектрометр для контроля остаточных газов и молекулярных пучков и дифрактометр отраженных быстрых электронов для контроля структуры и морфологии эпитаксиальных слоев в процессе роста. Помимо вакуумно-механической системы в комплекс входит автоматизированная система управления технологическим процессом, позволяющая независимо и одновременно управлять технологическими процессами как под контролем оператора, так и в автоматическом режиме.

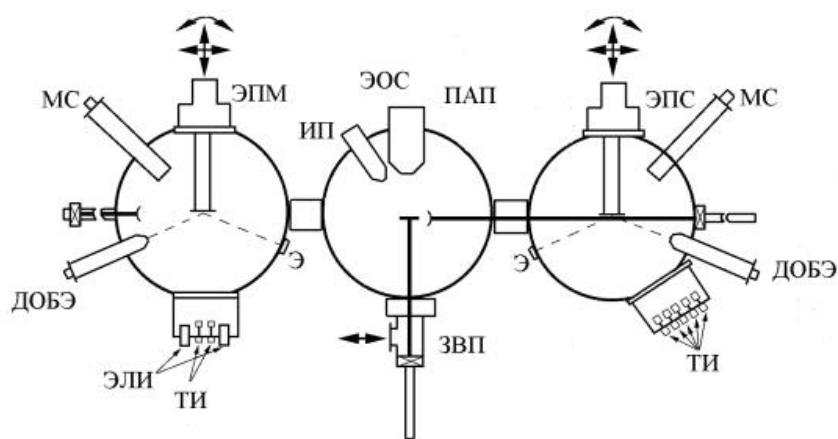


Рис. 8.7. Схема многомодульной установки для МЛЭ

Многомодульная установка для МЛЭ состоит из следующих устройств: ПАП – модуль подготовки и анализа подложек, ЭПМ – модуль эпитаксии элементарных полупроводников, металлов и диэлектриков, ЭПС – модуль загрузки и выгрузки подложек, МС – масс-спектрометры, ЭОС – электронный оже-спектрометр, ДБОЭ – дифрактометры отраженных быстрых электронов, Э – люминесцентные экраны, ИП – ионная пушка, ТИ – тигельные испарители, ЭЛИ – электронно-лучевые испарители.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы возможности метода молекулярно-лучевой эпитаксии?
2. Что общего и в чём разница методов молекулярно-лучевой эпитаксии и роста из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений?
3. Каковы наиболее важные индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост?
4. Что представляет собой послойный рост, каков его механизм?
5. Что представляет собой островковый рост, каков его механизм?
6. Что представляет собой рост Странски – Крастанова, каков его механизм?
7. Каковы принципы жидкостной эпитаксии, каково её место в технологии микро- и нанoeлектроники?
8. Каков смысл терминов «гетероэпитаксия», «гомoeпитаксия», «хемоэпитаксия»?
9. Поясните упрощённую схему ростовой камеры в установке молекулярно-лучевой эпитаксии.
10. Каковы возможности контроля структуры и элементного состава плёнок в методе молекулярно-лучевой эпитаксии?

ЛЕКЦИЯ 9

КВАНТОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

План лекции

- 9.1. Введение.
- 9.2. Размерное квантование. Квантовые точки.
- 9.3. Изготовление гетероструктур с квантовыми точками.
- 9.4. Методы определения СКТ.
- 9.5. Лазеры на самоорганизованных квантовых точках.
- 9.6. Сверхрешетки.

Литература: [8, 14, 29].

9.1. Введение

В декабре 2000 г. исполнилось 100 лет квантовой физике. Ее днем рождения считается 14 декабря 1900 г., когда на заседании Немецкого физического общества Макс Планк сообщил об идее квантования энергии электромагнитного излучения и введении в физику новой мировой константы h , определившей величину кванта энергии и получившей название постоянной Планка. Квантовая физика и инженерия дали миру огромное количество научно-технических открытий, среди которых два крупнейших открытия XX столетия – изобретение транзистора и лазера, породившие глобальный информационный взрыв.

В начале нового квантового столетия мы являемся свидетелями выдающихся достижений квантовой инженерии в электронике твердого тела, которая, подобно генной инженерии в биологии, создает искусственные атомы – квантовые точки и приборы на их основе, а также квантовые объекты, аналогов которым нет в природе, разрабатывает методы управления движением единичных электронов и делает многое другое, еще недавно казавшееся невозможным.

В начале 1960-х годов физики, работающие в области полупроводников, стали осознавать, что объектом их исследований и применения в электронике могут быть не только природные квантовые электронные структуры (атомы, молекулы, кристаллы), но и подобные структуры с так называемым размерным квантованием, созданные искусственно в твердом теле. Появились первые теоретические, а затем и экспериментальные исследования размерного квантования в тонких слоях полуметаллов (Bi) и полупроводников (InSb).

В 1980-х годах технологи научились контролируемо выращивать на поверхности кристаллов одних полупроводников совершенные монокристалличе-



ские слои других полупроводников толщиной всего в несколько слоев атомов, т. е. порядка нанометра, и создавать неоднородные структуры (гетероструктуры) с такими слоями. Главным объектом исследований стали гетеронаноструктуры с квантовыми ямами и квантовыми сверхрешетками из таких ям на основе арсенида галлия (GaAs) и его твердых растворов ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) разного состава ($x = 0,1-1$). Эти материалы имеют подходящую для применения во многих электронных и, особенно оптоэлектронных, приборах структуру энергетических зон и относительно малую эффективную массу электронов, что облегчает создание условий для размерного квантования.

С начала 1990-х годов интерес исследователей все больше перемещается на гетероструктуры с квантовыми точками (КТ), особенно после того, как была выяснена возможность самоорганизованного роста массивов бездефектных включений (кластеров) InAs в матрице GaAs, проявляющих свойства квантовых точек.

9.2. Размерное квантование. Квантовые точки

Эффект размерного квантования состоит в том, что ограничение движения частицы в пространстве в каком-либо направлении стенками потенциальной ямы приводит к квантованию соответствующей компоненты ее кинетической энергии: она перестает изменяться непрерывно, как в классической механике, а принимает только строго определенные дискретные значения.

Согласно квантовой механике, не только волны проявляют свойства частиц, как впервые предположил М. Планк, но и микрочастицы проявляют волновые свойства, которые характеризуются длиной волны $\lambda = h/(2m^*E)^{1/2}$, где h – постоянная Планка; m^* – эффективная масса частицы; E – ее кинетическая энергия. Дальше под частицами будем понимать свободные носители заряда – электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне полупроводникового кристалла с эффективными массами m_e и m_h соответственно, которые могут быть значительно меньше массы электрона в вакууме m_0 . В GaAs $m_e = 0,07 m_0$ и $m_h = 0,5 m_0$. Кинетическая энергия теплового движения электронов и дырок $E \sim 0,025$ эВ и, следовательно, $\lambda \sim 8$ нм для электронов и 3 нм для дырок. Нанометровый масштаб определяет характерный размер структур, в которых проявляется размерное квантование. От него произошло название электроники таких структур – наноэлектроника.

Если движение электронов ограничено только по одному направлению (например, по оси z), то в плоскости XOY они движутся свободно и соответствующие компоненты их энергии не квантуются. Об ансамбле таких электронов говорят как о двумерном электронном газе, а гетероструктуры с такими областями называют гетероструктурами с квантовыми ямами.

Рассмотрим несколько более детально эффект размерного квантования на примере гетероструктуры с квантовой ямой, образованной путем встраивания тонкой (шириной $L \sim 1-10$ нм) прослойки твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

в относительно более толстый (~ 1 мкм) слой GaAs. Ширина запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – $E_g(x)$ меньше ширины запрещенной зоны GaAs 1,43 эВ и линейно уменьшается с ростом x до значения 0,36 эВ в InAs. На границе этих материалов возникает гетеропереход (рис. 9.1, а), при котором разрывы зоны проводимости $\lambda E_c(x)$ и валентной зоны $\lambda E_v(x)$ образуют пространственно совмещенные потенциальные ямы соответственно для электронов и дырок.

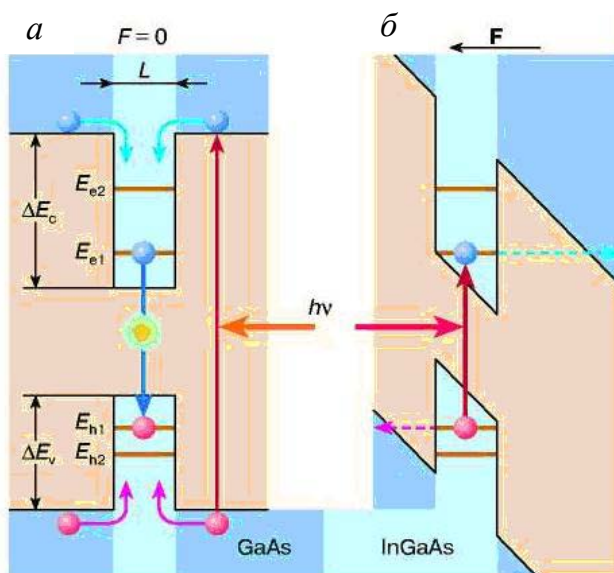


Рис. 9.1. Схематическое изображение энергетических диаграмм квантовой ямы

На рис. 9.1 показаны диаграммы квантовой ямы (точки) без поля (а) и в электрическом поле (б), направление которого показывает стрелка F . Рисунок иллюстрирует также механизмы фотолюминесценции (а) и фотоэлектрической чувствительности (б) гетероструктур с самоорганизованными квантовыми точками (СКТ).

Дискретный энергетический спектр электронов и дырок $E_c(h)$ в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме имеет наиболее простой вид:

$$E_{C(h)n} = \frac{\eta^2 \pi^2}{2m_{C(h)} L_Z^2} n^2,$$

где $\eta = h/(2\pi)$; n – квантовое число, принимающее целочисленные значения 1, 2, 3, Это выражение определяет квантованные положения дна подзон с непрерывным для движения в плоскости XOY энергетическим спектром. Хотя подобная модель потенциальной ямы не обеспечивает необходимой точности расчета энергетического спектра реальных квантовых объектов, она правильно передает его основные качественные особенности.

В таком же приближении квантовую точку можно рассматривать как

куб со сторонами $L_x = L_y = L_z$ и бесконечно высокими потенциальными стенками. Принципиальное отличие энергетического спектра квантовой точки от спектра квантовой ямы состоит в том, что он полностью дискретный, как в атомах. Квантовую точку с полным основанием можно рассматривать как искусственный сверхатом, так как она обычно состоит из десятков и даже сотен тысяч обычных атомов. Их роль заключается в формировании потенциальной ямы с дискретным энергетическим спектром для одного электрона или дырки.

При расчете спектра размерного квантования реальных квантовых ям и точек $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ необходимо учитывать конечную глубину потенциальной ямы, которая определяется разрывами зон на гетерогранице и не превышает 0,7 эВ, и упругие напряжения, возникающие из-за различия постоянных решеток $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и GaAs и вызывающие существенные изменения энергетического спектра электронов и дырок. На энергетический спектр СКТ, естественно, влияют размеры и форма потенциальной ямы, которые определяются размерами и формой кластеров и распределением химического состава внутри них, а также некоторые другие факторы. В реальных квантовых ямах и точках обычно имеется небольшое число уровней квантования.

Одно время считалось, что при различии постоянных решеток более чем на $\sim 0,1\%$ невозможно получить совершенный гетеропереход из-за образования в месте сопряжения решеток дефектов в виде обрывов атомных плоскостей, называемых дислокациями несоответствия. Позднее выяснилось, что и при относительно большем несоответствии решеток можно выращивать бездислокационные гетерослои и гетерокластеры, если их размеры не превышают некоторых критических значений, которые зависят от степени несоответствия. В кристаллической решетке достаточно тонких слоев и не слишком больших кластеров. Здесь возникают механические напряжения, вызывающие ее упругую деформацию, которая обеспечивает бездефектное (когерентное) сопряжение двух решеток. Постоянная решетки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на 7 % больше постоянной решетки GaAs . Именно благодаря различию постоянных решеток этих материалов становится возможным образование СКТ.

Если размеры кластеров превышают критические значения, то в них образуются дислокации несоответствия. Они снимают внутренние упругие напряжения, но сильно ухудшают электронные характеристики СКТ, делая их непригодными для применения.

Существуют предельные размеры кластеров, при которых они проявляют квантовые свойства. Их минимальный размер определяется условием, чтобы в СКТ существовал хотя бы один уровень. Максимальный размер определяется условием: чтобы расстояние между первым и вторым уровнями в КТ было больше энергии теплового движения носителей заряда. Кроме того, на максимальный размер кластеров накладывает ограничения и требование отсутствия дислокаций. Согласно экспериментальным данным, СКТ InAs/GaAs пирамидальной формы могут достигать 50 нм в основании и 10 нм по высоте.

9.3. Изготовление гетероструктур с квантовыми точками

В 1984 г. были предложены способы получения квантовых точек, не имевших развития в силу разных причин. Активные исследования в этой области начались, когда выяснилось, что существует природный процесс самоорганизации твердотельных наноструктур, позволяющий решить эту задачу, по-видимому, наилучшим образом. Под самоорганизацией понимается самопроизвольное возникновение упорядоченных макроскопических структур из менее упорядоченной среды. В основе процесса самоорганизации лежит свойство неравновесных физических систем при приближении к термодинамическому равновесию переходить в состояние, в котором свободная энергии системы, т. е. та часть внутренней энергии, которая может быть превращена в работу, минимальна.

Представим себе, что на поверхности монокристалла из материала А осажден тонкий однородный слой материала В. Если температура и время выдержки системы обеспечивают установление термодинамического равновесия, то в слое В возникнет атомная структура и он примет форму, при которых свободная энергия системы будет минимальна. Важнейшими факторами, определяющими направление и конечный результат процесса самоорганизации, являются рассогласование постоянных решеток А и В, создающее упругие напряжения в системе и повышающие ее внутреннюю энергию, толщина слоя, свободные энергии поверхности подложки, границы раздела и осаждаемого слоя, граней и ребер кристаллических кластеров, которые могут образоваться, и некоторые другие. Как показывают теоретические расчеты, при определенных значениях параметров, характеризующих эти факторы, может образоваться однородный по структуре и толщине слой материала В, повторяющий структуру подложки (эпитаксиальный слой). При других значениях параметров может оказаться энергетически более выгодным, чтобы материал В образовал массив напряженных трехмерных кластеров определенных размеров и формы или собрался в один большой кластер.

Экспериментально уже давно было установлено, что при осаждении из паровой фазы наблюдаются три типа начальной стадии роста слоя на подложке ([рис. 9.2, а–в](#)): *а* – послойный (двумерный) рост слоя. Он происходит, если материал В смачивает подложку, т. е. обладает большим сцеплением с ней, и его постоянная решетки мало отличается от постоянной решетки материала А; *б* – островковый (трехмерный) рост слоя. Он имеет место при плохом смачивании; *в* – промежуточный механизм роста (механизм Странски и Крастанова), когда сначала происходит послойный рост слоя В, который при некоторой толщине смачивающего слоя сменяется островковым ростом. Этот механизм наблюдается при наличии смачивания и значительном рассогласовании решеток А и В (несколько процентов).

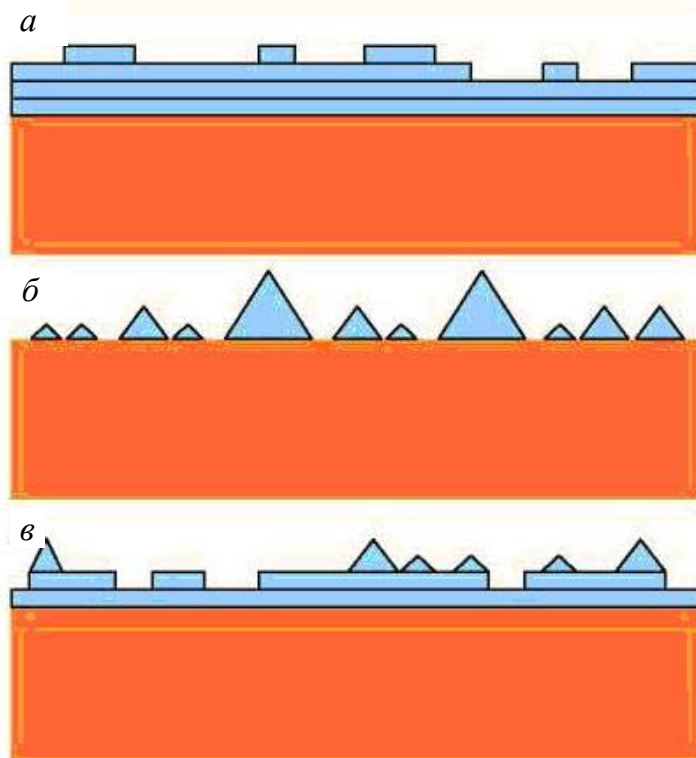


Рис. 9.2. Схематическое представление механизмов роста тонких слоев: *а* – двумерный (послойный); *б* – трехмерный (островковый); *в* – промежуточный механизм роста (механизм Странски и Крастанова)

Последний механизм используется для получения СКТ в системе InGaAs/GaAs. Хотя сам механизм был открыт еще в 1938 г., его детальное изучение, стимулированное проблемой СКТ, началось только в последние годы XX в. Самый важный результат этого изучения заключается в доказательстве возможности получения этим методом массива довольно однородных по размерам, бездефектных, напряженных нанокластеров InGaAs в матрице GaAs, обладающих свойствами квантовых точек.

Для получения гетероструктур с СКТ используются два основных метода: метод молекулярно-лучевой эпитаксии и метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. В методе молекулярно-лучевой эпитаксии структуры получают направленным испарением в сверхвысоком вакууме компонентов структуры (Ga, In, As и др.), которые конденсируются на подложке, нагретой до температуры $\sim 500^\circ\text{C}$. Весь процесс изготовления структуры полностью автоматизирован и управляется компьютером. Важным достоинством этого метода является возможность очень точной регулировки состава материалов на подложке, контроля толщины слоев, начиная с одного монослоя, а также, что очень важно при получении СКТ, контроля перехода от двумерного к трехмерному росту. Контроль осуществляется посредством непрерывного наблюдения дифракции электронов от поверхности структуры в процессе ее роста.

В методе газофазной эпитаксии осаждение структуры происходит в

химическом реакторе путем термического разложения металлоорганических соединений Ga, In и арсина AsH_3 на поверхности подложки, нагретой до температуры – 500–650 °С. Процесс ведется в потоке водорода в качестве газаносителя паров соединений. Наличие плотной, горячей и химически активной атмосферы в реакторе практически исключает возможность прямого контроля за процессом осаждения и формирования структуры, что, конечно, является существенным недостатком данного метода. Однако его относительная простота и экономические преимущества, особенно ценные при массовом производстве структур, способствуют развитию и этого метода.

В начале XXI века главное направление технического применения СКТ видится в разработках инжекционных полупроводниковых лазеров для волоконно-оптических линий связи. В связи с этим усилия исследователей направлены на решение трех важных для создания таких лазеров задач: выращивание СКТ, излучающих на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм, на которых оптическое волокно имеет минимальные оптические потери, и повышение их однородности и поверхностной концентрации.

9.4. Методы исследования СКТ

Увидеть СКТ в обычный оптический микроскоп, очевидно, невозможно, так как их размеры значительно меньше длины волны видимого света. Однако ближнепольная оптическая микроскопия преодолела дифракционный предел разрешения оптических приборов и этот метод начинает все шире применяться для исследования СКТ.

Наблюдать СКТ можно в электронных лучах на электронном микроскопе. Электроны с энергией 100 кэВ обладают не только достаточно малой длиной волны, но и необходимой для просвечивания тонких слоев с СКТ проникающей способностью.

Наиболее наглядную информацию о размерах, форме и поверхностной концентрации СКТ позволяет получить интенсивно развивающаяся в последние годы сканирующая зондовая микроскопия, в частности, ее метод атомно-силовой микроскопии. Метод основан на буквальном ощупывании неровностей нанорельефа поверхности образца с помощью специального заостренного зонда, перемещениями которого по поверхности (сканированием поверхности) управляет компьютер. Огибание зондом в режиме касания, например, кластера СКТ, преобразуется компьютером в видимый на мониторе рельеф поверхности. В зависимости от способа и условий выращивания СКТ могут иметь пирамидальную, линзообразную и другую форму. На [рис. 9.3](#) приведено зафиксированное на атомно-силовом микроскопе изображение слоя СКТ, полученного газофазной эпитаксией. Его анализ показывает, что СКТ имеют размер в основании 40 нм, высоту 6 нм и поверхностную плотность $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

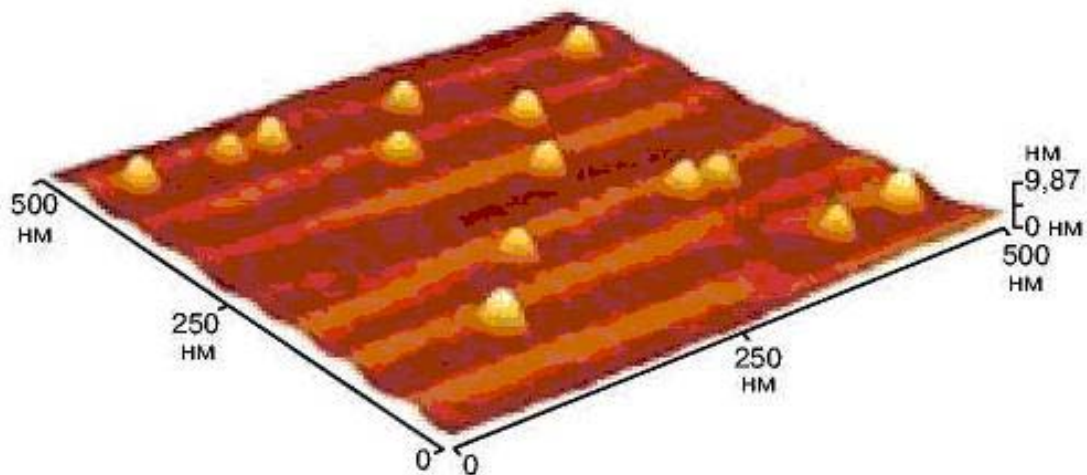


Рис. 9.3. Изображение поверхности слоя СКТ InAs/GsAs

Волнообразная поверхность – это ступени на поверхности кристалла GaAs, образовавшиеся из-за того, что его срез специально сделан под углом 3° к грани куба. Кластеры InAs (СКТ) вырастают на углах ступеней. Следует обратить внимание на различие примерно в пять раз масштабов (указаны в нанометрах) на вертикальной и горизонтальной линейках.

Энергетический спектр СКТ обычно определяют с помощью методов фотолюминесцентной или фотоэлектрической спектроскопии.

Для возбуждения свечения СКТ (фотолюминесценции) образец освещается излучением лазера с энергией фотонов $h\nu$, превышающей ширину запрещенной зоны GaAs. Возникающие при поглощении излучения свободные электроны и дырки захватываются СКТ и рекомбинируют с испусканием. Излучение пропускается через монохроматор, и его спектр анализируется с помощью фотодетектора.

Если бы СКТ имели одинаковые размеры, форму и химический состав, их спектры излучения состояли бы из одной или нескольких узких линий шириной меньше 0,1 мэВ, подобных линиям излучения в спектрах атомов. Однако из-за различия этих параметров у разных точек спектр фотолюминесценции от большого числа точек представляет собой довольно широкий пик (50 мэВ на половине высоты). С помощью специальных приемов удалось получить спектры от небольшого числа точек и даже одиночных точек. Они действительно оказались состоящими из очень узких линий.

Фотоэлектрические спектры (фотопроводимости или фотопотенциала поверхности гетероструктур) получают при освещении образца монохроматическим излучением в спектральной области поглощения СКТ. Для возникновения фотоэффекта слой СКТ должен быть встроен в область сильного электрического поля поверхностного барьера или p - n -перехода. При этом работа выхода электронов и дырок из потенциальной ямы СКТ уменьшается. В достаточно сильном поле электрон и дырка могут пройти сквозь тонкий тре-

угольный потенциальный барьер посредством туннельного эффекта вообще без сообщения им какой-либо дополнительной энергии. Вне ямы электроны и дырки направляются электрическим полем барьера в разные стороны, что приводит к появлению фотосигнала в измерительной цепи, спектральная зависимость которого отражает энергетический спектр гетероструктуры.

На [рис. 9.4](#) приведены экспериментальные спектры фотолюминесценции и фотопроводимости гетероструктуры с СКТ InAs/GaAs при комнатной температуре. На них хорошо видна дискретная природа энергетического спектра СКТ. Энергия основного перехода $E_n = 0,91$ эВ (длина волны 1,3 мкм). Ширина пика около 30 мэВ, что является неплохим показателем однородности ансамбля СКТ. На спектрах видны также два перехода в возбужденные состояния СКТ и полочка при $E \sim 1,35$ эВ, принадлежащая смачивающему слою.

Интенсивность излучения от СКТ более чем в 1000 раз превышает интенсивность излучения от слоя GaAs (при энергии фотонов 1,4 эВ увеличено в 100 раз.)

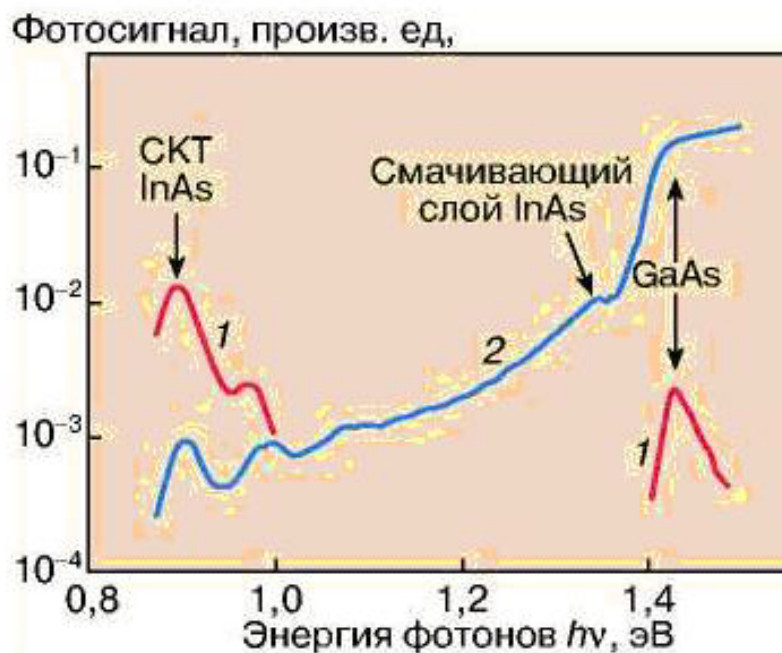


Рис. 9.4. Спектры фотолюминесценции (1) и фотозлектрической чувствительности (2) гетероструктуры с СКТ InAs/GaAs

На фотозлектрическом спектре, отражающем спектр оптического поглощения структуры, наблюдается обратное соотношение между значениями фоточувствительности от СКТ и GaAs.

9.5. Лазеры на самоорганизованных квантовых точках

Преимущества полупроводниковых лазеров на СКТ связаны с полной дискретностью энергетического спектра и высокой пространственной локализацией электронов и дырок в СКТ. Ожидается, что это должно привести к снижению плотности порогового тока, при котором начинается генерация излучения, к повышению его температурной стабильности, увеличению усиления и мощности. Эти ожидания уже подтверждены экспериментально.

На [рис. 9.5](#) показана схема лазера на СКТ, излучающего в плоскости этого слоя. Активная область лазера с СКТ InAs/GaAs встроена в p - n -переход в GaAs и ограничена с обеих сторон слоями InGaP или AlGaAs, имеющих меньший, чем у GaAs, показатель преломления. Эти слои создают оптический волновод для излучения, которое распространяется в плоскости СКТ. Торцевые грани лазера, полученные раскалыванием кристалла по плоскостям спайности и покрытые с одной стороны непрозрачным, а с другой – полупрозрачным зеркалом, образуют резонатор Фабри – Перо длиной около 1 мм.

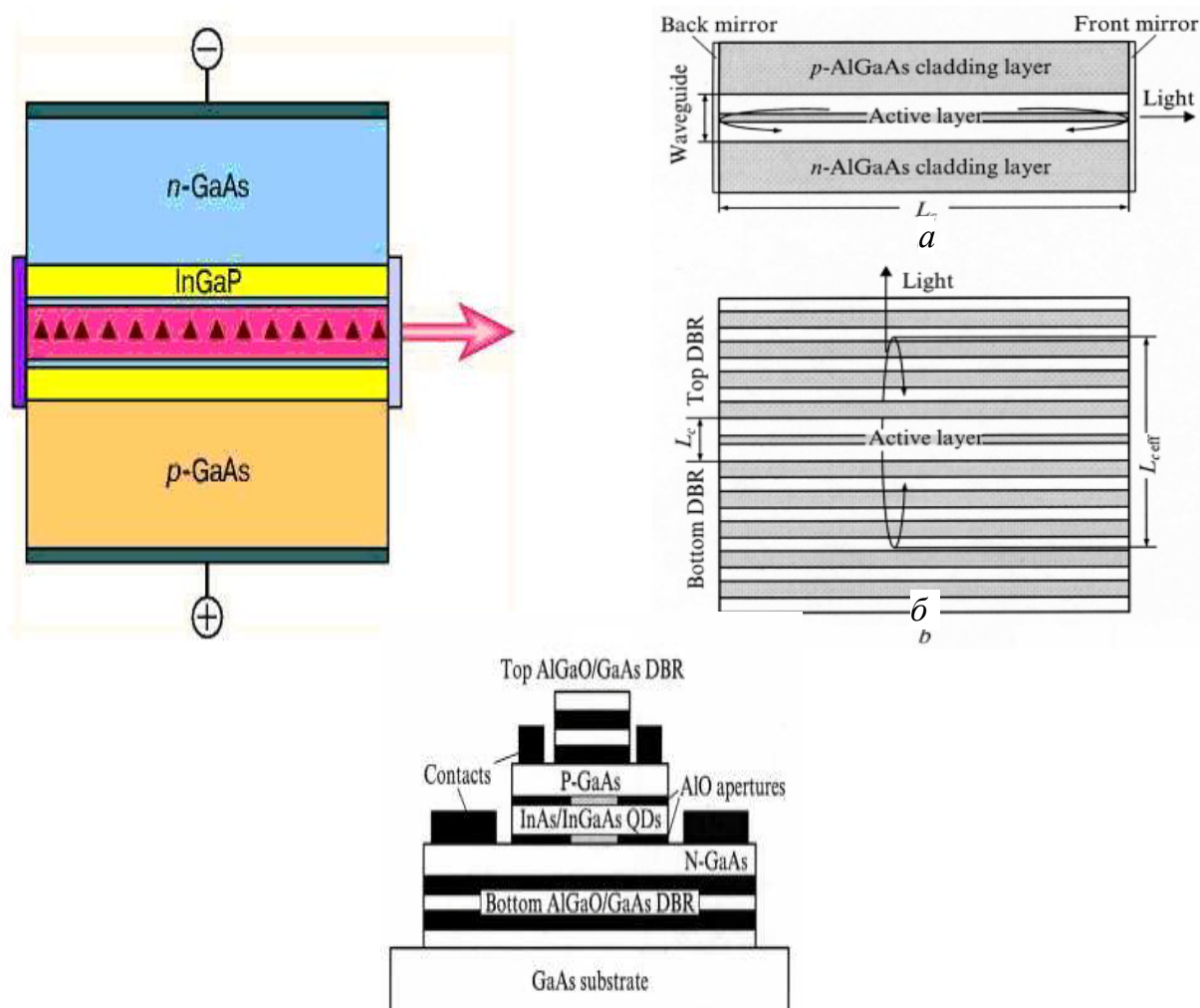


Рис. 9.5. Схемы инжекционного полупроводникового лазера на СКТ

Через p - n -переход пропускается ток в прямом направлении, что приводит к заполнению уровней СКТ электронами и дырками и возникновению при достаточно большой плотности тока инверсной населенности уровней и генерации излучения. Переход от спонтанной электролюминесценции в режим лазерной генерации проявляется в резком сужении линии излучения и увеличении ее интенсивности.

Со времени разработки первых лазеров на СКТ прошло немного времени. За это время были достигнуты рекордные для полупроводниковых лазеров характеристики при комнатной температуре: пороговая плотность тока – 60 А/см^2 и выходная мощность излучения в режиме непрерывной генерации – 1 Вт . Такую мощность излучает кристалл объемом около 1 мм^3 , а объем активной части лазера (резонатора), где сконцентрировано излучение, еще в тысячу раз меньше.

В проблеме СКТ тесно переплетены фундаментальная физика, квантовая инженерия и высокая технология. За несколько лет их взаимодействие дало огромные научные и практические результаты. Разработки лазеров на СКТ уже выходят из стадии лабораторных исследований и приобретают коммерческое значение. В связи с этим следует отметить, что объем продаж полупроводниковых лазеров оценивался в 1998 г. в 2 млрд долл., а в 2007 г. – уже в 2,5 млрд. долл.

Эта область находится в начале своего развития. Продолжается поиск путей повышения однородности и поверхностной плотности СКТ, создания трехмерной решетки СКТ, смещения линии излучения в более длинноволновую область (сейчас достигнута длина волны генерации $1,3 \text{ мкм}$).

9.6. Сверхрешетки

Идея создания искусственных периодических структур или сверхрешеток с периодом в несколько нанометров зародилась при изучении резонансного туннелирования через двойные и более сложные потенциальные барьеры и при поиске новых объектов, обладающих отрицательным дифференциальным сопротивлением, т. е. таких объектов, в которых на некотором участке вольтамперной характеристики величина тока уменьшается с ростом напряжения. Они пригодны для создания генератора сверхвысокочастотных колебаний. Эта идея впервые была высказана Л. В. Келдышем еще в 1962 г.

Если характерные размеры (периоды сверхрешетки) будут достаточно малыми, меньшими, чем длина свободного пробега электронов, то при наличии почти идеальных границ вся электронная система перейдет в квантовый режим с особыми характеристиками. Для реализации требуемой искусственной периодичности были предложены два типа сверхрешеток: сверхрешетки с переменным легированием, в которых периодичность параметров создается введением небольшого количества примеси в узкие, строго ограниченные части кристаллической структуры, и сверхрешетки с переменным составом, в которых чередуются тонкие слои материалов различного состава. Последнюю называют композиционной сверхрешеткой. Схематическое изображение и зонные структуры двух этих видов показаны на [рис. 9.6](#).

Сверхрешетки с переменным легированием или *ni-pi*-структуры представляют собой новый тип искусственных периодических полупроводниковых структур с управляемой концентрацией носителей и управляемой шириной запрещенной зоны.

Одна из первых и типичных структур такого типа была получена из периодической последовательности тонких (5–100 нм) слоев полупроводникового материала арсенида галлия GaAs (обозначается как слой *i*), легированных Si (слой *n*-проводимости) и Be (слой *p*-проводимости). Поле объемного заряда ионизированных примесей, меняющееся в направлении чередования этих слоев, создает параллельную периодическую модуляцию энергетических зон, приводящую к необычным электрическим и оптическим свойствам материала. Периодический потенциал расщепляет зону проводимости и валентную зону на подзоны.

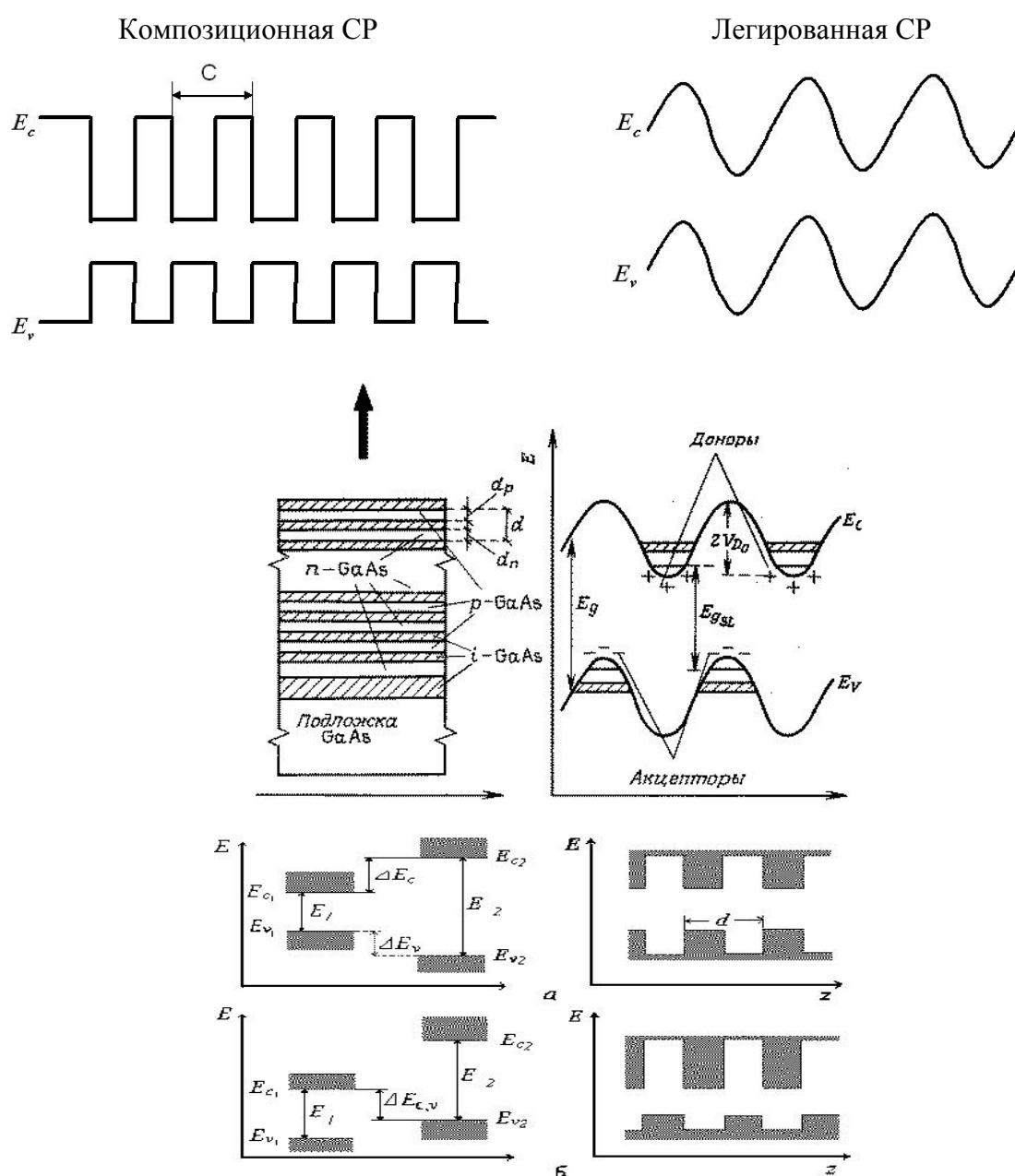


Рис. 9.6. Схематическое представление структур и зонных диаграмм сверхрешеток

Сверхрешетки *ni-pi* на основе GaAs имеют непрямую в реальном пространстве запрещенную зону с электронами и дырками, разнесенными на половину периода сверхрешетки. Эффективная ширина запрещенной зоны и концентрация носителей не являются фиксированными, а зависят от толщины слоев, составляющих решетку, концентрации легирующей примеси и могут быть управляемы извне внешним напряжением или оптическим возбуждением.

В композиционных сверхрешетках с контактом двух и более различных материалов за счет разницы кристаллографических параметров на границах возникает неизбежное, хотя иногда и очень малое рассогласование кристаллических решеток. Чтобы избежать дефектов и напряжений на этих границах, подбирают пары с достаточно хорошим согласованием параметров. Однако если слои являются достаточно тонкими, то различие в их постоянных решетки может компенсироваться однородными механическими напряжениями. Наиболее удачной для выращивания таких структур оказалась пара GaAs и твердый раствор $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, в котором часть атомов галлия замещена атомами алюминия ($0,15 < x < 0,55$). Ширина запрещенной зоны одного и другого полупроводников имеет разную величину, и широкозонный материал ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) ограничивает движение электронов в узкозонном, создавая для них потенциальную яму. Такие наноструктуры называют структурами с квантовыми ямами.

Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит эффект размерного квантования?
2. В чём состоит отличие микрочастиц от макрочастиц?
3. Что понимают под квантовой ямой, квантовой нитью, квантовой точкой?
4. Что понимают под дислокациями несоответствия, каковы условия их возникновения?
5. Что понимают под самоорганизацией, каков природный процесс самоорганизации твердотельных наноструктур?
6. Каковы методы исследования самоорганизованных квантовых точек?
7. В чём состоят преимущества лазеров на самоорганизованных квантовых точках по сравнению с лазерами на квантовых ямах?
8. Что представляют собой искусственные периодические структуры и почему их называют сверхрешётками?
9. Что понимают под композиционной сверхрешёткой?
10. Что понимают под легированной сверхрешёткой?

ЛЕКЦИЯ 10

МНОГОСЛОЙНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ

План лекции

- 10.1. Многослойное осаждение посредством магнетронного распыления.
- 10.2. Электролитическое осаждение.
- 10.3. Поверхностные наноструктуры.
- 10.4. Получение поверхностных структур методом МЛЭ..
- 10.5. Получение поверхностных структур методом газофазной эпитаксии.
- 10.6. Химическая сборка поверхностных наноструктур.
- 10.7. Низкоразмерные структуры на основе пористого кремния.
- 10.8. Углеродные нанотрубки.

Литература: [[1](#), [2](#), [5](#), [7](#), [10](#)].

10.1. Многослойное осаждение посредством магнетронного распыления

По сравнению с термическими способами осаждения (например, испарением из тигля, нагреваемом пропусканием тока (резистивный), электронно-лучевым и СВ-лазерным испарением) магнетронное распыление имеет ряд преимуществ.

Например, средняя кинетическая энергия частиц, падающих на подложку, существенно больше, чем у перечисленных термических способов. Это оказывает влияние на прочность, адгезию при относительно высокой плотности слоев. Осажденные слои имеют очень маленькую собственную шероховатость поверхности. В магнетронном источнике плазма сосредоточена в области антикатода и не достигает подложки, поэтому поверхность подложки слабо подвергается воздействию источника.

На свойства выращиваемых слоев в первую очередь оказывают влияние подложка и условия в камере осаждения. С помощью соответствующих материалов подложки, регулирования вакуума, подачи газа высокой чистоты и точного регулирования плазмы, благодаря использованию генератора, управление процессом осаждения идет с хорошей воспроизводимостью, в результате чего образуются функциональные слои высокого качества.

Многослойность может быть получена за счет параллельного режима работы двух источников с разными материалами антикатодов. Подложка, которая должна быть покрыта слоями, соответствующим образом перемещается через поток, а нежелательное смешение материалов предотвращается заслонками, которые отделяют друг от друга области осаждения источников.

Способ отличается также тем, что позволяет наносить однородные слои. Прогресс, достигнутый в области тонкопленочной технологии дает возможность экспериментальной реализации многослойных систем для VUV (вакуумного ультрафиолета) и рентгеновской области.

Многослойные системы используются в рентгеновской оптике, рентгеновской микроскопии, рентгеновской астрономии, а также в рентгеновской литографии. В области синхротронного излучения многослойность применяется для улучшения VUV зеркал и в качестве дисперсионных элементов.

Длины волн в VUV и области рентгеновского излучения обуславливают то, что толщина отдельных слоев, необходимая для многослойных структур, составляет меньше нанометра. Так как оптические свойства (в основном комплексный показатель преломления) многих материалов в этой спектральной области отличаются друг от друга лишь в малой степени, для достижения желаемых свойств необходимо большое число отдельных слоев. Таким образом, воспроизводимость управления процессом осаждения многослойных систем становится одним из важнейших вопросов.

Для осаждения слоя пригодны все способы, которые позволяют регулировать толщину осаждаемого слоя на уровне нанометров.

Способы распыления основываются на распылении материала антикатада посредством бомбардировки ионами инертного газа. Распыленные нейтральные частички достигают подложки с высокой энергией, так что могут быть осаждены плотные слоистые структуры. В частности, для осаждения применяются магнетроны, которые отличаются высокой степенью ионизации и лучшими показателями нанесения слоев, а также отделением плазмы от подложки. Качество граничных поверхностей (шероховатость) в многослойной системе сильно зависит от давления газа в процессе распыления. Чем ниже парциальное давление рабочего газа (Ar), тем более гладкими являются наблюдаемые граничные поверхности внутри многослойных структур.

При распылении ионным пучком возможно точное, независимое регулирование его параметров, так что слои осаждаются с высокой скоростью, причем скорость роста слоев меньше, чем в случае магнетронного распыления.

В случае импульсного испарения лазером для осаждения слоев речь идет не о термическом испарении. Из-за попадания фокусированного лазерного луча частички взрывоопасно распределяются на антикатоде с более высокой энергией. Однако пучок частиц имеет очень острую характеристику направленности, что приводит к проблемам при покрытии больших поверхностей. Кроме того, при импульсном испарении лазером, как правило, необходимы большие затраты для растривания антикатада лазерным лучом и для устранения возникновения капелек (как правило, с диаметром порядка 1 нм) на подложке. Преимущества импульсного испарения лазером проявляются там, где нужно иметь слои из комплексных соединений (высокотемпературные сверхпроводники) с возможностью корректировки стехиометрии. Для осаждения отдельных слоев и многослойных структур из

молибдена и кремния для VUV и рентгенооптической спектральной области на [рис. 10.1](#) представлена схема установки для осаждения слоев систем.

Камера откачивается с помощью турбомолекулярного насоса, причем остаточное давление составляет $5 \cdot 10^{-7}$ Мбар. Во время осаждения слоев рабочий газ (аргон) проходит через регулятор потока газа в камеру. Парциальное давление аргона измеряется баратроном, который соединен с PID-регулятором (пропорционально-интегрально-дифференциальным), который управляет дроссельным клапаном. Посредством реализованного таким образом регулирования парциальное давление аргона во время осаждения слоев регулируется с точностью ± 1 % от установленного значения.

Внутри вакуумной камеры находятся два магнетронных источника для распыления, каждый из которых имеет диаметр антиматрицы, равный 4 дюймам. Питание источников распыления осуществляется от генераторов с выходной мощностью до 1500 В и 600 В. Во время осаждения подведенная мощность для обоих источников соответственно регулируется до достижения заранее установленного значения.

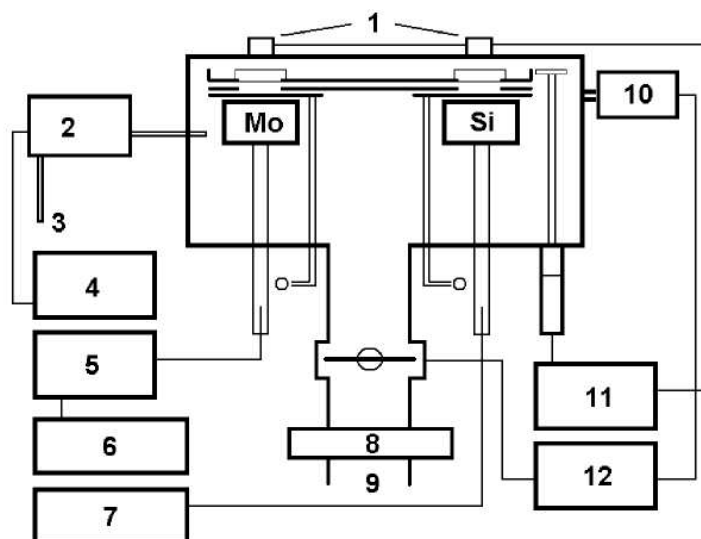


Рис. 10.1. Схематическое изображение установки для осаждения слоев систем: 1 – реле для управления вращением; 2 – регулятор потока газа; 3 – напуск аргона; 4 – управление регулятором; 5 – согласующий блок; 6, 7 – генераторы; 8 – блокирующий клапан; 9 – к турбонасосу; 10 – баратрон; 11 – система регулирования шагового двигателя; 12 – система дроссельного управления

Подложки, на которые следует наносить слои, находятся на вращающемся держателе на уровне 6,5 см над источниками распыления. На высоте примерно 55 мм выше источников расположено отверстие (диаметром 60 мм), которое задает область осаждения.

Шаговый электродвигатель с программным управлением позволяет осуществлять контролируемое движение подложки над источниками распыления. Вращение в области осаждения происходит с заранее выбранной скоростью, которая устанавливает время экспозиции вместе с диаметром диа-

фрагмы и подложки для каждого слоя. Примененный шаговый электродвигатель вместе с установленным редуктором позволяет развивать скорость вращения 0,1–9,9 об/мин.

При скорости вращения 0,1 об/мин для центра подложки время осаждения составляет 46,3 с. Так как круглая подложка перемещается над таким же отверстием диафрагмы по кольцевой траектории, для внешнего и внутреннего края диафрагмы время осаждения, зависящее от диаметра подложки, сократится. Для 2-го слоя самое короткое время осаждения 22,5 с (при 0,1 об/мин).

Толщина отдельных слоев подобных систем варьируется в диапазоне 2–5 нм.

10.2. Электролитическое осаждение

Метод электролитического осаждения – наиболее старый метод получения тонкопленочных структур металлов. В технологии производства изделий электронной техники этот метод применяется для осаждения серебра, золота, меди и никеля, хрома, свинца, платины, олова, цинка и ряда других металлов. Достаточно давно этот метод применяется для получения тонких пленок ферромагнитных металлов и их сплавов. Технологический процесс происходит в электролитической ванне, упрощенная схема которой представлена на [рис. 10.2](#). В качестве электролита такой ванны используются водные растворы солей осаждаемого металла. Например, для осаждения пленок никеля электролит содержит растворы сульфата никеля и хлористого аммония. Катионы, которые нужно осадить, могут присутствовать в электролите

в виде свободных ионов или комплексов. Анод электролитической ванны соединен с положительным полюсом источника постоянного тока; катод, являющийся подложкой осаждаемой пленки – с отрицательным полюсом.

При пропускании через электролитическую ванну электрического тока, величина которого контролируется амперметром, катионы, в числе которых и катионы осаждаемого металла, движутся к катоду (в нашем примере Ni^{2+} и NH_4^+), анионы (SO_4^{2-} и Cl^-) – в противоположном направлении.

Согласно законам электролиза Фарадея, скорость осаждения металла на катоде определяется плотностью электрического тока j , прошедшего через электролитическую ванну:

$$V = \eta j \frac{E}{\rho F},$$

где η – выход по току; ρ – плотность осажденного металла; E – напряженность электрического поля; F – число Фарадея.

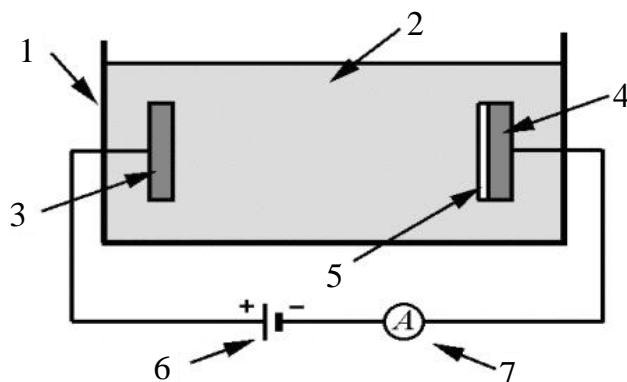


Рис. 10.2. Схема электролитической ванны: 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – анод; 4 – катод; 5 – пленка; 6 – источник питания; 7 – амперметр

На процесс электролитического осаждения металлической пленки существенное влияние оказывают состав электролита, кислотность электролитической ванны, плотность электрического тока, температура подложки и т. д. Технологические режимы, как правило, подбираются опытным путем из условия наилучшего протекания процесса электролитического осаждения. Для улучшения этого процесса в электролит добавляют различные присадки, которые не влияют на состав осаждаемой пленки, а улучшают сам процесс электролитического осаждения. Например, невосстанавливающиеся катионы калия и кальция в электролите увеличивают его электропроводность. Добавки различных неорганических соединений уменьшают зависимость процесса от кислотности электролита.

Наиболее простой способ получения многослойных структур металлов возможен при многократном переносе подложки из одного электролита в другой, в каждом из которых осаждается пленка соответствующего металла. Таким способом еще в 1921 г. были получены пленки из чередующихся слоев меди и никеля. В современных методах электролитического осаждения многослойных структур металлов используется тот факт, что у многих металлов существенно отличаются их равновесные потенциалы восстановления. Так, немагнитные металлы Cu, Ag, Au могут осаждаться при очень малых (иногда даже положительных) потенциалах катода, магнитные элементы группы железа эффективно осаждаются при достаточно высоких отрицательных потенциалах катода. Разница между ними может составлять 600 мВ и более. Это обстоятельство позволяет при использовании импульсного напряжения на катоде получать многослойные структуры из одного и того же электролита.

Для получения многослойных структур необходимо на катод электролитической ванны периодически подавать импульсы напряжения разной амплитуды и длительности, в течение которых на катоде будет осаждаться соответствующий металл. В зависимости от режимов подачи импульсов различают потенциостатическое и гальваностатическое импульсное электролитическое осаждение. При гальваностатическом осаждении на катоде поддерживается постоянной в течение каждого импульса плотность тока. Так, при

получении медно-никелевых многослойных структур плотность тока при осаждении слоя меди составляла $1,5 \text{ мА/см}^2$, в то время как при осаждении слоя никеля плотность тока поддерживалась равной 100 мА/см^2 . В потенциостатическом режиме постоянными на катоде поддерживались напряжения: 400 мВ – для меди и 1 000 мВ – для никеля. При длительности импульсов 5,5 с и 0,2 с при осаждении Cu и Ni соответственно формировались слои этих металлов одинаковой толщины по 100 \AA .

Потенциостатический режим осаждения в большинстве случаев позволяет получать более резкую границу между слоями в магнитных многослойных структурах. При оптимальном выборе режимов электролитического осаждения содержание магнитного элемента в немагнитном и наоборот может не превышать 0,5–0,1 %.

10.3. Поверхностные наноструктуры

Основной тенденцией в развитии современной техники является использование функциональных объектов малых размеров. Примером может служить электронная техника, в которой микроминиатюризация приборов уже сейчас требует применения элементов, размеры которых составляют несколько микрон. Уникальность свойств таких объектов (наноструктур) во многом определяется атомными и электронными процессами, протекающими как в объеме, так и на их границах, и имеющими уже квантовый характер. Понять и научиться управлять этими процессами не всегда удастся в рамках традиционных представлений физики и химии, развитых для достаточно протяженных объектов. Проблема осложняется еще и тем, что наноструктуры из-за очень малых размеров являются достаточно неравновесными системами, однако протекающие в них процессы часто анализируют на основе традиционных подходов, свойственных равновесным объектам. В связи с этим в настоящее время происходят как интенсивное развитие теории явлений в малых объектах, так называемых низкоразмерных системах, так и разработка новых методов их получения, а также физических и химических методов исследования.

Поверхностные наноструктуры с их особыми свойствами играют значительную роль в таких объектах, как высокодисперсные системы – адсорбенты и катализаторы, наполнители композиционных материалов, пленочные и мембранные системы. Интерес к наноструктурам значительно возрос в связи с перспективами их широкого использования в микро-, опто- и акустоэлектронике. Выделилось новое направление электроники – наноэлектроника, использующая в работе приборов низкоразмерные структуры с квантовыми эффектами.

В низкоразмерных системах, каковыми и являются наноструктуры, количества вещества на поверхности и в объеме становятся соизмеримыми, по-

этому роль поверхности как более активной составляющей существенно возрастает.

Под терминами «поверхность» или «межфазная граница» обычно понимают слой вещества конечной толщины, разделяющий различные объемные фазы. Его толщина определяется теми конкретными свойствами, которые изучаются и составляет, как правило, несколько атомных слоев вещества. Несмотря на то, что при анализе поверхностных явлений обычно используют модель однородной поверхности, даже в случае наиболее совершенных кристаллов, поверхность оказывается сильно неоднородной по структурным, электрическим и химическим свойствам. Современные методы исследования позволили установить, что на межфазных границах даже наиболее качественных кремниевых структур помимо точечных дефектов наблюдаются структурные макродефекты в виде кластеров – небольших скоплений атомов Si и молекул SiO₂, других адсорбированных молекул, химических группировок с локальными концентрациями, значительно превосходящими средние величины по всей поверхности. Указанные неоднородности заметно влияют на электрофизические характеристики тонкопленочных структур.

При переходе к нанообъектам или системам, включающим наноструктуры в качестве составных частей, ситуация становится еще более сложной. Если все размеры системы уменьшаются, то число атомов в приповерхностном слое (так называемой *S*-фазе) становится соизмеримо с количеством атомов в остальном объеме (*V*-фазе) и известные характерные свойства *V*-фазы существенно изменяются. Эти изменения обычно называют размерными эффектами. Они могут иметь различную природу. Структурные эффекты проявляются в виде изменения межатомных расстояний, перестройки кристаллической структуры вплоть до перехода в аморфное состояние, при химических эффектах изменяется стехиометрический состав вещества. Наиболее ярко наблюдаются некоторые физические размерные эффекты: изменение температуры плавления, резкое изменение электрофизических свойств. В качестве примера можно привести обнаруженный в 1959 г. эффект понижения температуры плавления льда в субмикронных порах SiO₂ и существование жидкой, точнее, квазжидкой подвижной пленки воды на поверхности льда при температурах значительно ниже температур плавления объемной фазы. Толщина незамерзающего слоя воды уменьшалась с понижением температуры, оставаясь на уровне нескольких нанометров и при очень низких температурах. Аналогичные эффекты были обнаружены для аммиака и некоторых металлов. Объясняются они нарушением или даже разрушением связей между атомами или молекулами на поверхности и их повышенной подвижностью. По сути дела, это вторичное проявление структурных эффектов, когда высокая дефектность кристаллической фазы облегчает фазовый переход «кристалл – жидкость». В порах диоксида кремния поверхностная дефектность кристаллической фазы вследствие влияния матрицы выражена меньше, что и объясняет разный ход зависимости для льда и пор SiO₂. Влияние поверхности на объем возрастает при уменьшении размеров частиц.

В поверхностных структурах с нанометрическими размерами напряженности локальных электрических полей приближаются к внутриатомным полям ($E \sim 10^8\text{--}10^9$ В/см), когда начинают проявляться эффекты изменения электронно-зонной структуры и электронно-колебательных состояний. Это приводит к существенному изменению некоторых важных электрофизических свойств, например электрической восприимчивости, механической деформации объема твердотельной матрицы – так называемый обратный пьезоэффект, обнаруженный на поверхности ZnO и CdS. В некоторых пленках, например, VO₂, наблюдается даже фазовый переход «полупроводник – металл». Наноструктуры обладают и другими специфическими свойствами, которые могут проявляться при их возбуждении электрическими, магнитными и радиационными полями.

Ученые интенсивно исследуют поверхностные полупроводниковые наноструктуры, поскольку с их применением можно создавать новые электронные приборы, принципы работы которых основаны на квантовых эффектах. Наиболее интересными оказались сверхструктуры или сверхрешетки – периодические пленочные системы с толщинами слоев от 1 до 100 нм, синтезируемые на поверхности монокристаллической матрицы.

10.4. Получение поверхностных структур методом МЛЭ

Момент, когда реализация новых идей, казалось, начинает ограничиваться предельными возможностями технологии, был успешно преодолен с появлением метода молекулярно-лучевой эпитаксии, который представляет собой результат фантастического усовершенствования старого, широко применявшегося для получения металлических пленок способа – испарения вещества в вакууме. Использование чистых источников испаряемых материалов, сверхвысокий вакуум, точный контроль температуры подложки, различные методы диагностики растущей пленки в сочетании с компьютерной системой управления параметрами процесса – все это, вместе взятое, привело к созданию качественно новой технологии, способной решать задачи, ранее казавшиеся невыполнимыми.

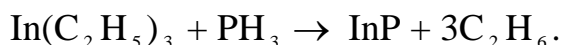
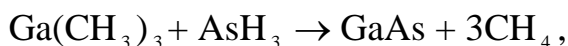
Процесс МЛЭ – это процесс испарения и конденсации вещества в сверхвысоком вакууме ($P < 10^{-9}$ мм рт. ст.). Наличие вакуумного шлюза позволяет менять подложки, сохраняя высокий вакуум. Для уменьшения давления остаточных газов вся свободная площадь камеры ограждается экранами, охлаждаемыми жидким азотом. Эффузионные (эффузия – медленное истечение газа через малое отверстие) испарительные ячейки выполняются из тугоплавкого материала, например, нитрида бора.

После того как камера МЛЭ откачана, экран охлажден жидким азотом, а испарители выведены на требуемую температуру, нагревается подложка. Для арсенида галлия ее температура должна составлять около 600 °С, для

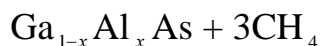
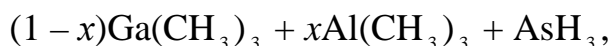
кремния – не ниже 850 °С. Процесс роста слоев начинается при открытии основной заслонки и заслонок соответствующих испарителей. Сверхвысокий вакуум и малая скорость поступления атомов на растущую поверхность (примерно 10^{14} – 10^{15} атомов в секунду) приводят к эпитаксиальному росту пленок посредством практически монослойного заполнения растущей поверхности, обеспечивая исключительно точное управление профилями химического состава и легирования. В процессе МЛЭ возможен непосредственный контроль как состава газовой фазы (масс-спектрометрия), так и параметров слоев: кристаллической структуры (методами дифракции быстрых или медленных электронов), химического состава (оже-спектроскопия), толщины (эллипсометрия), датчики которых могут быть помещены в высоковакуумную камеру установки. Использование масок в ходе роста и «рисование» молекулярными пучками позволяют создавать на поверхности подложки трехмерные, монократно интегрированные структуры. Обладая неоспоримыми преимуществами, метод МЛЭ имеет единственный, но весьма существенный недостаток – высокую стоимость, что вызвало поиск альтернативных методов.

10.5. Получение поверхностных структур методом газовой фазной эпитаксии

Одним из методов, альтернативных МЛЭ, считается метод газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) или так называемая МОС-гидридная технология (особенно ее модификация при пониженных давлениях). В этом случае исходные газообразные реагенты пиролизуются (под действием высокой температуры) разлагаются у поверхности подложки, выделяя пленкообразующие компоненты, причем подложка является более нагретым телом, чем окружающая среда. При выращивании тонких слоев методом ГФЭ МОС контроль за параметрами пленок непосредственно в процессе синтеза применять нельзя, так как обычно используют достаточно агрессивные газовые среды. Процесс проводят в проточном вакуумном реакторе при давлении паров компонентов 0,1–10 мм рт. ст. Снижение давления и увеличение скорости газового потока позволяет получать более однородные слои с контролем толщины до нескольких ангстрем. Исходными компонентами обычно служат метильные, этильные и изобутильные соединения металлов, а также гидриды некоторых элементов. Это, например, химические реакции, протекающие у поверхности при получении тонких слоев полупроводников $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$:



Смешивая исходные компоненты в газовой фазе в определенных пропорциях, синтезируют эпитаксиальные пленки твердых растворов:



Добавляя в газовую фазу небольшие количества легколетучей примеси, получают легированные эпитаксиальные слои.

МОС-гидридная технология, успешно конкурируя с МЛЭ за счет своей простоты и производительности, обладает несколько худшей воспроизводимостью и дает более расплывчатые профили изменения состава и легирования. Это обусловлено использованием как сравнительно высоких температур подложки, так и длительным временем синтеза.

10.6. Химическая сборка поверхностных наноструктур

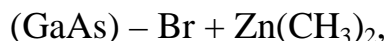
Метод химической сборки (ХС) и его разновидности – метод молекулярного наслаивания (МН) и атомно-слоевая эпитаксия (АСЭ) – стали результатом поиска принципиально новых методов синтеза ультратонких слоев. Они основаны на образовании поверхностных химических соединений при хемосорбции компонентов из газовой фазы и являются новыми так называемыми циклично-дискретными процессами. Так как есть возможность реализовать практически монослойную хемосорбцию компонентов, формирование кристаллических структур происходит по слоевому механизму, т. е. без образования трехмерных зародышей. Это позволяет получать сплошные пленки при толщинах в несколько монослоев вещества (менее 1 нм). Используют этот метод в основном для синтеза наноструктур бинарных соединений.

В методе МН предусмотрено наличие на поверхности матрицы определенных функциональных групп, которые способны реагировать с низкомолекулярным реагентом, образуя устойчивые соединения. Последнее также должно обладать активными группами, способными к дальнейшим взаимодействиям. Таким образом, благодаря серии последовательных химических реакций осуществляется наращивание слоев структурных единиц заданного состава. Главная особенность ХС заключается в том, что процесс формирования слоя контролируется не термодинамикой фазовых переходов, а термодинамикой макрореагентов химических реакций, и проведение реакций в неравновесных условиях приводит к устойчивости синтезируемой структуры. Неравновесность процесса легко достигается значительным избытком реагента и быстротой удаления газообразных продуктов реакции. Данный метод позволяет синтезировать нано- и микроstructures на поверхности твердых веществ путем многократного чередования химических реакций по

заданной программе. Толщина образующегося слоя определяется не временем синтеза или интенсивностью потока вещества, а количеством повторяющихся реакционных циклов. Вследствие малой энергии активации поверхностных реакций ХС обычно проводят при достаточно низких температурах (25–400 °С), что значительно снижает влияние диффузионных процессов и позволяет получать многослойные структуры с резкими границами. Для предотвращения физической конденсации исходных реагентов А и В температура подложки TS должна удовлетворять соотношению $T_A, T_B < T_S < T_{AB}$, в котором T_A, T_B, T_{AB} – критические температуры конденсации компонентов А, В и соединения АВ соответственно.

Для осуществления процесса ХС по методу МН необходимо активировать поверхность функциональными группами, компоненты которых являются составляющими синтезируемого слоя. Так, группировки –ОН используются для получения оксидных слоев, –SH-сульфидных, –NH-нитридных и т. д. Они получаютсся обработкой поверхности соответствующими реагентами – парами H_2O, H_2S, NH_3 . Полупроводниковые матрицы соединений $A^{III}B^V$ предварительно обрабатывают парами галогенводорода, что позволяет удалить оксидный слой и активировать поверхность галогенидными группировками. Процесс МН проводят либо в проточном реакторе при атмосферном давлении, либо в системе с пониженным давлением.

Рассмотрим реакцию для синтеза сульфида цинка на бромированной поверхности арсенида галлия с использованием диметилцинка:



В этом случае рост слоя сульфида цинка осуществляется уже при комнатной температуре чередованием реакций. Аналогично могут быть получены пленочные структуры GaAs попеременной обработкой поверхности твердотельной матрицы парами $Ga(CH_3)_3$ и AsH_3 .

Следует отметить, что возможности химической сборки по методу молекулярного наслаивания за счет поверхностных реакций конденсации ограничены достаточно узким кругом веществ и низкой скоростью процесса, так как лимитирующей стадией является стадия удаления продуктов реакции после каждого акта обработки.

Дальнейшим развитием этого метода стал метод атомно-слоевой эпитаксии, в котором ХС осуществляют за счет реакций присоединения на координационно-ненасыщенных атомах поверхности. В этом случае синтез пленок осуществляют послойной хемосорбцией компонентов соединения из

атомно-молекулярных пучков. Процесс проводят в вакууме, причем для синтеза слоев соединения АВ подложка попеременно экспонируется в молекулярных потоках компонентов А и В при испарении соответствующих элементов. Аппаратурное оформление АСЭ – упрощенный вариант МЛЭ, так как не требуется сверхвысокого вакуума. Цикличность процесса обеспечивается поочередным открытием заслонок испарительных ячеек. Толщина слоя, как и при МН, определяется только количеством циклов обработки подложки потоками компонентов и может задаваться и контролироваться с предельной точностью – до размеров одного монослоя вещества в направлении роста.

Следует отметить, что химическая сборка во всех ее видах – достаточно низкотемпературный процесс, что позволяет синтезировать наноструктуры с резкими границами по составу и легированию. Смена реагента на любой стадии процесса в любой последовательности дает возможность без особых усилий получать многослойные композиционные наноструктуры с контролем толщины до одного монослоя вещества. Недостатками ХС в настоящее время являются ограниченный круг реакционноспособных легколетучих реагентов и сложность создания достаточно однородно-активированной поверхности для реализации монослойного механизма роста структур.

Рассмотрим несколько примеров, служащих иллюстрацией того, как использование уникальных свойств наноструктур позволило создать новые типы приборов, работа которых основана на новых физических эффектах. Характеристики этих приборов намного превосходят возможности аналогов на обычных полупроводниковых структурах. Это гетеролазеры для систем оптической связи на двойной гетероструктуре с двойными барьерами на $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, работающие в диапазоне 0,70–0,88 и 1,78 мкм, на гетероструктуре $\text{GaSb-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$, лазеры на сверхрешетке с квантовыми ямами $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. В последнем случае сверхрешетка должна иметь не менее десяти периодов с толщиной слоев 10–15 нм. Инжекционные лазеры на сверхрешетках с квантовыми ямами имеют КПД до 60 %, обладают низким пороговым током и узкой диаграммой направленности. Для этих же целей перспективна сверхрешетка с более сложным составом $\text{GaAs-(Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_y\text{In}_{1-y}\text{P}$.

В 1982 г. был создан первый лавинный фотодиод на сверхрешетке $\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ($x = 0,55$), обладающий эффектом фотоумножителя, а позднее и полевой транзистор с модулированным легированием, который имел время переключения всего несколько пикосекунд. Это открывает реальные возможности его использования в сверхбыстродействующих высокочастотных интегральных схемах.

Недавно, благодаря уникальным возможностям нанотехнологии, был создан микрополостный лазер. Излучающие элементы этого крохотного устройства – молекулы флуоресцентного вещества – заключены в микроскопическую полость в специально выращенном кристалле – цеолите на основе фосфата алюминия. Особая форма полости (поры), обеспечивающая полное внутреннее отражение света, позволяет сфокусировать и направить испускаемый молекулами свет. Новая технология создания микроскопических ла-

зеров может оказаться настолько эффективной, что именно на их основе создадут миниатюрные устройства для CD-плееров и компьютеров будущего.

Следует отметить и такие традиционные области применения поверхностных наноструктур, как высокодисперсные сорбенты, катализаторы и наполнители, в которых использование химической сборки для модифицирования поверхности и выращивания поверхностных структур заданного состава и строения позволило существенно улучшить их свойства и получить новые, например, высокоселективные, сорбенты, негорючие полимерные материалы. Химическая сборка является одним из основных методов бурно развивающейся нанотехнологии, в частности, химической нанотехнологии.

10.7. Низкоразмерные структуры на основе пористого кремния

Низкоразмерные кремниевые среды были рассмотрены в лекции 7. Кроме того, программа дисциплины [1] и учебное пособие [3] ориентируют магистрантов на учебный процесс с определенной долей самостоятельной работы, в том числе по данной проблеме, поэтому в этом разделе остановимся на тех моментах, которые остались вне рассмотрения на других занятиях.

Из [рис. 10.3](#) видим, что кремний существует в нескольких структурных модификациях. Все эти материалы имеют различные физические свойства, разные области применения, хорошо совместимы и, взаимно дополняя друг друга, обеспечивают широкие возможности кремниевой технологии.

Рассмотрим еще раз кремний с пористой структурой. Пористый кремний получают при анодной электрохимической обработке монокристаллического кремния в растворах на основе плавиковой кислоты. Кремниевая пластина в таких экспериментах ([рис. 10.4](#)) является анодом, а катодом служит платиновый электрод. Впервые пористый кремний был получен в середине 1950-х годов в ходе исследований процесса электрохимической полировки поверхности кремния в водных растворах HF. Такая операция необходима для придания рабочей поверхности идеально гладкого, зеркального состояния.

В процессе травления было обнаружено, что при определенных режимах (низкой плотности анодного тока и высокой концентрации HF в электролите) вместо процесса электрополировки наблюдалось образование окрашенных пленок на поверхности кремния.

Было установлено, что цветные слои имеют в своем объеме сеть мельчайших пор. Формирование пор начинается на поверхности пластины; течением времени анодной обработки концы пор все дальше продвигаются в глубь кристалла. В результате этого толщина пленок пористого кремния в зависимости от времени травления может изменяться от нескольких микрометров ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$) до сотен микрон.



Рис. 10.3. Семейство кремния и области применения материалов

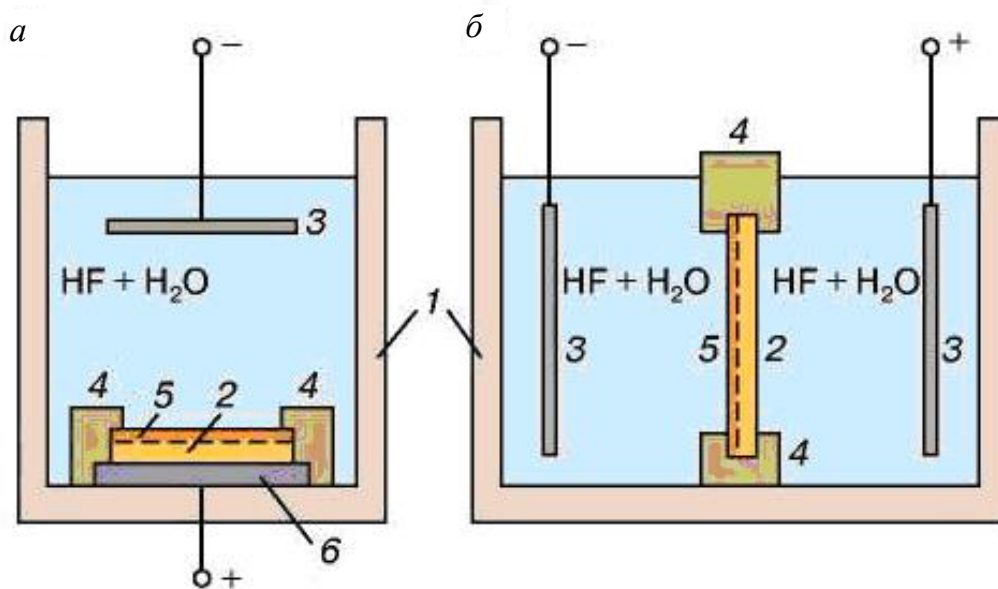


Рис. 10.4. Электролитические ячейки для формирования слоев пористого кремния: *а* – ячейка вертикального типа, *б* – двухкамерная ячейка

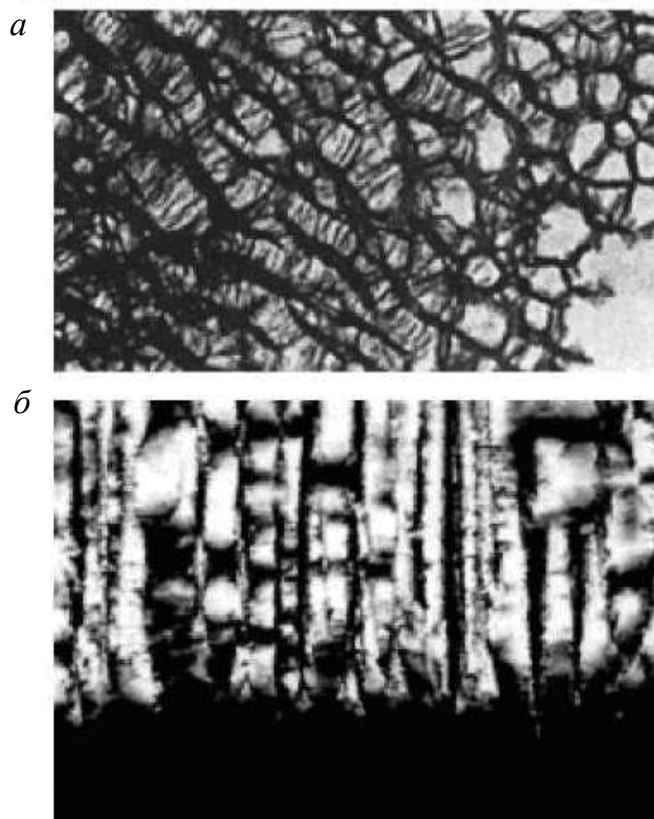


Рис. 10.5. Изображение структуры пористого кремния на p -Si, полученное на просвечивающем электронном микроскопе (а), электронно-микроскопический снимок структуры микропористого кремния на n -Si (б)

В кремнии n - и p -типа количество дырок различно и поэтому процессы порообразования в n -Si и p -Si имеют свои особенности. В p -Si дырки являются основными носителями заряда и их концентрация составляет $10^{14}–10^{18} \text{ см}^{-3}$. В этом случае, как правило, формируются поры нанометровых размеров. Тонкая высокопористая структура типа губки показана на [рис.10.5, а](#). В n -Si, где основными носителями заряда являются электроны, концентрация дырок крайне мала ($10^2–10^6 \text{ см}^{-3}$).

Необходимое минимальное количество дырок можно получить за счет фотогенерации (при подсветке Si-электрода) или за счет лавинной генерации (при анодировании в области высоких напряжений). Полученная структура пор существенно отличается от предыдущей и характеризуется наличием пор достаточно большого диаметра ([рис. 10.5, б](#)).

На [рис. 10.5](#) представлены два предельных случая в ряду получаемых пористых структур. Изменяя условия анодирования, можно получать пористый кремний с различной морфологией (геометрией) пор.

О возможностях пористого кремния для создания интегральных устройств магистранты имеют возможность получить информацию из учебного пособия [[17](#)].

10.8. Углеродные нанотрубки

Углеродные нанотрубки – своеобразные цилиндрические молекулы диаметром примерно от половины нанометра и длиной до нескольких микрометров. На основе углеродных нанотрубок создаются электронные устройства нанометрового (молекулярного) размера. Ожидается, что в обозримом будущем они заменят элементы аналогичного назначения в электронных схемах различных приборов, в том числе современных компьютеров. В результате будет достигнут теоретический предел плотности записи информации (порядка одного бита на молекулу) и вычислительные машины обретут практически неограниченную память и быстродействие, лимитируемое только временем прохождения сигнала через прибор.

Не содержащая дефектов одностенная углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в виде цилиндра ленту с упаковкой атомов по типу графита ([рис. 10.6](#)).

Для создания электронных устройств и их объединения в сложные приборы требуются полупроводники и материалы с высокой электропроводностью. Нанотрубки – это полимеры разного строения, а потому они должны обладать разными электрическими свойствами. Зависимости электрических свойств нанотрубок от геометрических параметров были предсказаны на основе квантовохимических расчетов их зонной структуры. Было отмечено, что все атомы углерода в нанотрубках имеют тройную координацию, а значит, нанотрубки – сопряженные ароматические системы, в которых три из четырех валентных электронов каждого углерода образуют локализованные σ -связи, а четвертый участвует в образовании делокализованной π -системы (как, например, в бензоле). Эти π -электроны слабо связаны со своими атомами, поэтому именно они могут участвовать в переносе заряда в системе.

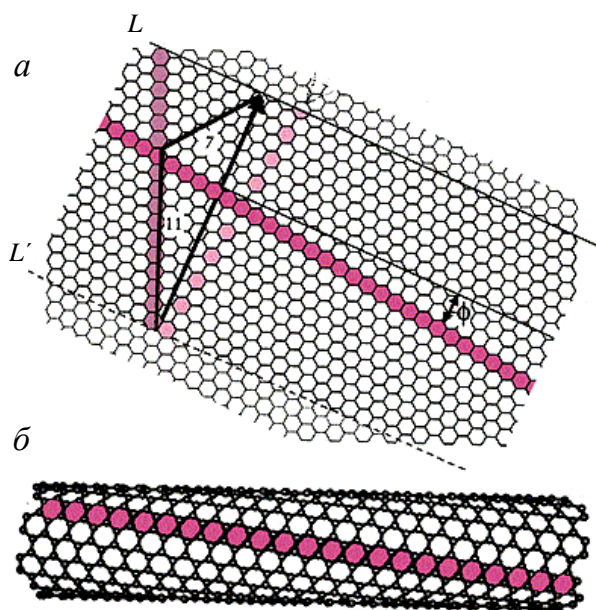


Рис. 10.6. Построение модели нанотрубки: *a* – графитовый слой и лента; *б* – нанотрубка

Расчеты показали, что металлическим типом зонной структуры обладают треть нанотрубок. Остальные нанотрубки должны быть полупроводниками с шириной запрещенной зоны от нескольких десятых до примерно 2 эВ, возрастающей при уменьшении диаметра нанотрубки. Методами сканирующей туннельной микроскопии для индивидуальных нанотрубок – фактически для объектов молекулярного размера – удалось определить атомную структуру (геометрию) по топографическим изображениям и электропроводность (по зависимости тока I через нанотрубку от напряжения смещения V).

Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если углеродный шестиугольник заменить, например, на пятиугольник, семиугольник или на два таких дефекта, как показано на [рис. 10.7](#), нанотрубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников оказывается различной. Но при изменении ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняется ее электронный спектр, положение уровня Ферми, ширина оптической щели и т. п. В частности, для приведенного на [рис. 10.8](#) случая, слева относительно изгиба нанотрубка должна быть металлической, а справа – полупроводниковой. Таким образом, эта изогнутая нанотрубка должна представлять собой молекулярный гетеропереход «металл – полупроводник».

Если рассматривать данные куски нанотрубки изолированно, с разных сторон относительно изгиба, видим, что электроны на уровне Ферми обладают разной энергией. В единой системе выигрыш в энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера.

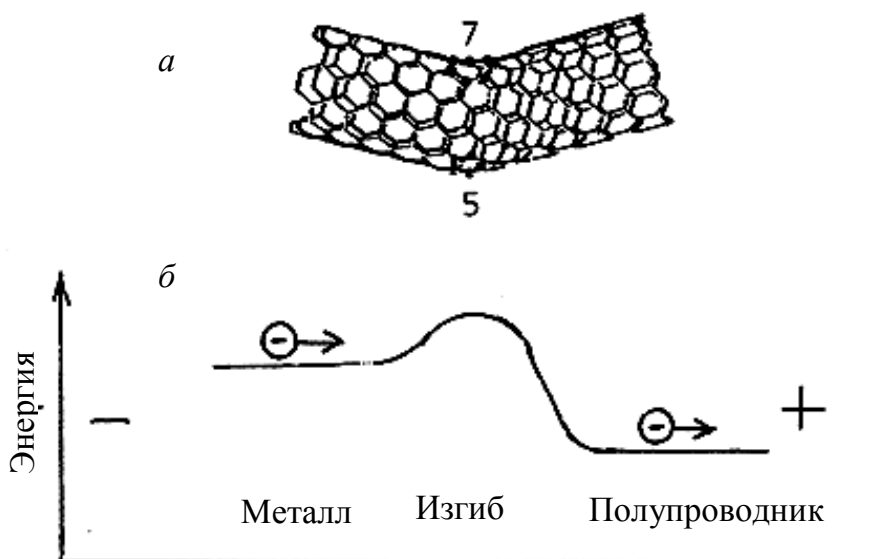


Рис. 10.7. Влияние дефекта семиугольник-пятиугольник на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б)

Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области нанотрубки с большей энергией Ферми в область с меньшей. Иначе говоря, ток может течь только в одном направлении. «Одностороннее» прохождение тока через нанотрубку с изгибом используется для создания выпрямляющего диода – одного из основных элементов электронных схем ([рис. 10.8](#)).

Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами; вольтамперная характеристика для такой системы показана ([рис. 10.7, а](#)); вольтамперная характеристика для такой системы показана на [рис.10.8, б](#).

На основе полупроводниковой или металлической нанотрубки удалось сделать полевые транзисторы, работающие при комнатной или сверхнизкой температуре.

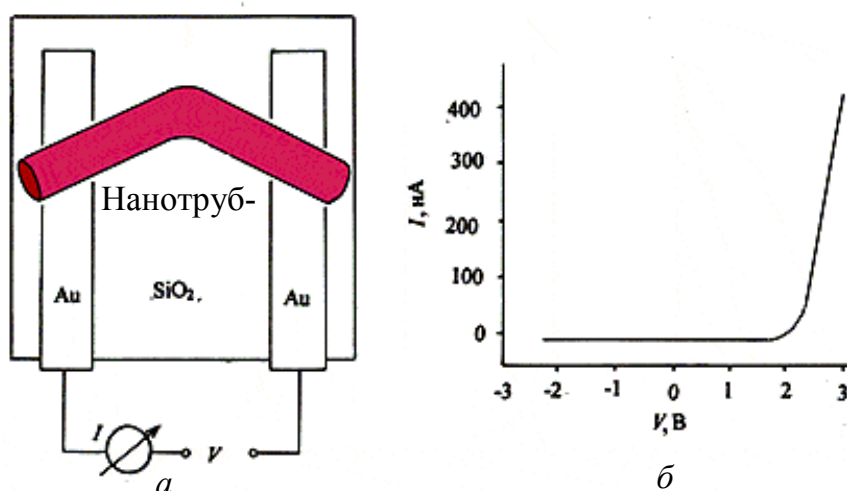


Рис. 10.8. Выпрямляющий диод на изогнутой нанотрубке

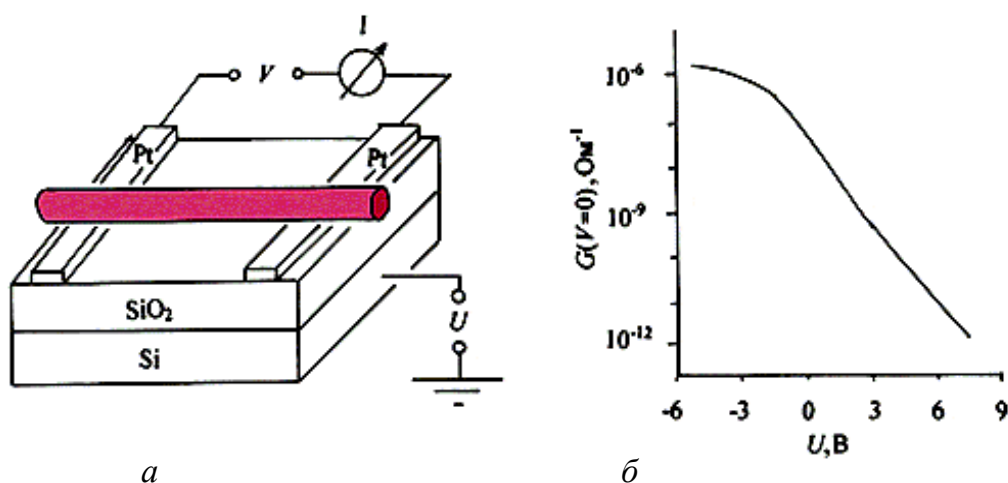


Рис. 10.9. Полевой транзистор на полупроводниковой нанотрубке

Полевые транзисторы (триоды) – электронные устройства, на перенос заряда через которые оказывает сильное влияние внешнее (управляющее) электрическое поле, что используется в усилителях электрического сигнала, переключателях и т. п. ([рис. 10.9](#)). Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами; в качестве третьего электрода (затвора) используется кремниевый слой (*а*); зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора см. (*б*).

В транзисторе на полупроводниковой нанотрубке электрическое поле управляет концентрацией носителей в зонах делокализованных состояний. В полупроводниковой нанотрубке состояния валентной зоны отделены от состояний зоны проводимости энергетической щелью – запрещенной зоной. Из-за наличия этой щели при обычных условиях концентрация носителей в зонах мала и нанотрубка обладает высоким сопротивлением. При подаче на третий электрод (затвор) электрического потенциала U в области нанотрубки возникает электрическое поле и изгиб энергетических зон изменяется. При этом концентрация дырок в валентной зоне (и соответственно электропроводность) возрастает по экспоненциальному закону со смещением края зоны относительно уровня Ферми. При потенциале затвора около минус 6 В концентрация дырок достигает максимального значения, сопротивление – минимального, а нанотрубка становится металлической.

Углеродные нанотрубки могут быть полезны также и для создания дисплеев нового поколения.

Рассмотрим углеродную нанотрубку, закрепленную на катоде и ориентированную в направлении анода ([рис. 10.10](#)). Если на электроды подать напряжение соответствующей полярности, нанотрубка заряжается отрицательно, линии электрического поля вблизи заряженной нанотрубки искривляются и в окрестности острия нанотрубки напряженность поля становится огромной, причем тем больше, чем тоньше нанотрубка. Такое локальное поле может вырывать электроны из нанотрубки. Под действием внешнего поля летящие электроны формируются в пучок. Этот эффект, называемый автоэлектронной эмиссией, используется для создания выпрямителей в дисплеях для формирования изображения и др.

В обоих случаях берут два плоских электрода, один из которых покрывают слоем из углеродных нанотрубок, ориентированных перпендикулярно ко второму. Если на электроды подается такое напряжение, что нанотрубка заряжается отрицательно, из нанотрубки на второй электрод излучается пучок электронов: ток в системе идет. При другой полярности нанотрубка заряжается положительно, электронная эмиссия из нее невозможна и ток в системе не идет.

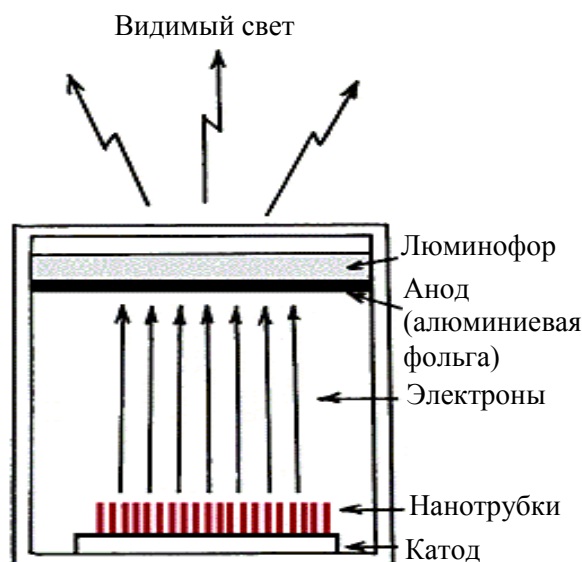


Рис. 10.10. Схема дисплея, в котором используется автоэлектронная эмиссия из нанотрубок

Чтобы с помощью автоэлектронной эмиссии получить изображение, на аноде закрепляют люминофор. Электронный удар возбуждает молекулы люминофора, которые затем переходят в основное состояние, излучая фотоны.

Например, при использовании в качестве люминофора сульфида цинка с добавками меди и алюминия наблюдается зеленое свечение, а при добавлении серебра – синее. Красный цвет получают с помощью легированного европием оксида иттрия.

Возможности использования нанотрубок в молекулярной электронике неизмеримо возрастают при переходе от чисто углеродных к химически модифицированным нанотрубкам. Например, наличие цилиндрической полости внутри углеродных нанотрубок позволяет внедрить различные элементы, включая тяжелые металлы. Возможно добавление аддендов (например, атомов фтора) на внешнюю поверхность трубки. Кроме углеродных, сейчас умеют получать и бор-азотные нанотрубки. Во всех этих случаях должны получаться материалы с новыми и пока еще экспериментально не изученными свойствами.

Как показали расчеты, внедрение переходных металлов в углеродные нанотрубки должно приводить к резкому возрастанию проводимости как полупроводниковых нанотрубок (за счет появления в запрещенной зоне электронных состояний металла), так и металлических (за счет повышения плотности состояний вблизи уровня Ферми). Все бор-азотные нанотрубки, в отличие от углеродных, независимо от их геометрии исходно должны быть широкозонными полупроводниками. Внедрение же в них переходных металлов должно приводить к формированию металлической зонной структуры в системе. Исходная однотипность электронных свойств бор-азотных нанотрубок может быть полезна в технологическом плане, так как облегчает изготовление нанопроводов с более воспроизводимыми характеристиками. Если

одну половину полупроводниковой нанотрубки заполнить металлом, а вторую оставить нетронутой, опять получим молекулярный гетеропереход «металл – полупроводник». В случае бор-азотной нанотрубки это будет гетеропереход «широкозонный полупроводник – металл», на основе которого можно конструировать нанодиоды и другие элементы, способные функционировать при высоких температурах.

Так, путем химической модификации различных участков одной нанотрубки, можно создавать сложные многофункциональные электронные устройства, подобные интегральным схемам современных компьютеров. Можно сказать, что здесь обрела вторую жизнь идея легирования полупроводниковых материалов, породившая современную электронику. Располагая таким перспективным объектом, как нанотрубки, есть все основания ожидать новых открытий и усовершенствований в этой сфере.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы преимущества магнетронного распыления по сравнению с термическими способами осаждения?
2. Каковы возможности экспериментальной реализации многослойных систем для вакуумного ультрафиолета?
3. Каков наиболее простой способ получения многослойных структур металлов?
4. Что общего и в чём разница между потенциостатическим и гальваностатическим электролитическим осаждением?
5. Каковы особые свойства поверхностных наноструктур, определяющие перспективы их применения?
6. Каковы возможности получения поверхностных структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии?
7. Что представляет собой химическая сборка поверхностных наноструктур?
8. Каковы перспективы низкоразмерных структур на основе пористого кремния?
9. Что представляют собой структуры кремний-на-изоляторе (КНИ)?
10. Что представляют собой углеродные нанотрубки и каковы идеи создания на их основе электронных устройств?

ЛЕКЦИЯ 11

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

План лекции

- 11.1. Понятие сверхпроводимости.
- 11.2. Сверхпроводники первого и второго рода.
- 11.3. Теория Бардина – Купера – Шриффера.
- 11.4. Эффект Джозефсона.
- 11.5. Эффект Мейснера.

Литература: [[11](#), [26](#), [31](#)].

11.1. Понятие сверхпроводимости

Сверхпроводимость – способность вещества пропускать электрический ток, не оказывая ему ни малейшего сопротивления. Это явление тесно связано со сверхнизкими температурами, близкими к абсолютному нулю. Само понятие абсолютного нуля вошло в физику из газового закона, а потом распространилось на все состояния вещества и приобрело фундаментальное значение для всей физики.

Абсолютному нулю соответствует температура $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Никакое вещество нельзя охладить ниже этой температуры, т. е. при абсолютном нуле молекулы вещества обладают наименьшей энергией, которая уже не может быть отнята у тела ни при каком охлаждении.

Путь к абсолютному нулю оказался непростым. Он начался с опытов по сжижению газов. Долгое время не могли получить в жидком виде такие газы как кислород, азот, водород, гелий, поэтому их называли постоянными газами. Но оказалось, что они просто имели очень низкую температуру кипения, соответственно $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Последней ступенью к абсолютному нулю стало сжижение гелия. Первым его получил голландский физик Камерлинг-Оннес при рекордно низкой температуре $4,2\text{ K}$.

После этого опыта началась активная работа по изучению свойств веществ при гелиевых температурах.

Большая часть учёных придерживалась мнения: при абсолютном нуле электрическое сопротивление должно исчезать – см. [рис. 11.1](#), кривая 1.

Объяснялось это тем, что при понижении температуры амплитуда колебаний атомов уменьшается, следовательно, столкновения с ними свободных электронов становятся реже и ток встречает меньшее сопротивление.

При абсолютном нуле, когда решётка уже неподвижна, сопротивление проводника становится равным нулю. Эта модель была самой распространённой, хотя теоретически были возможны и другие варианты.

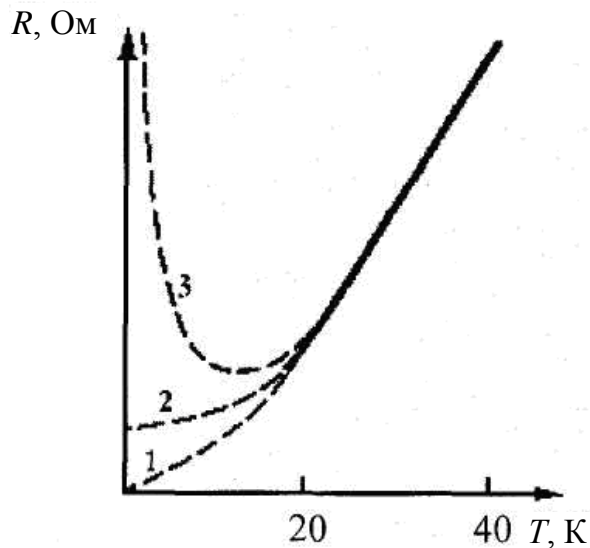


Рис. 11.1. Зависимость сопротивления материала от температуры

Например, небольшое сопротивление току могло сохраниться и при абсолютном нуле, поскольку и тогда некоторые электроны продолжали сталкиваться с атомами кристаллической решётки. Кроме того, кристаллические решётки, как правило, не являются идеальными: в них всегда есть дефекты и примеси посторонних атомов. Этому предположению соответствует кривая 2 на [рис. 11.1](#). Была также выдвинута гипотеза, по которой электроны проводимости при низких температурах объединяются с атомами, что приводит к бесконечно большому сопротивлению при температуре, стремящейся к 0 К. Это показано кривой 3 на [рис. 11.1](#).

В 1908 г. Оннес получил жидкий гелий, в 1911 – открыл новое состояние вещества, а в 1913 г. ему была присуждена Нобелевская премия. Далее последовали активные поиски новых сверхпроводников, исследование их свойств и способов применения в физике и промышленности.

11.2. Сверхпроводники первого и второго рода

Для технических применений сверхпроводников важны величины токов, которые не разрушают сверхпроводимость. Здесь большое значение имеет принадлежность к сверхпроводникам I или II рода. Сверхпроводникам I рода для создания границы между нормальной и сверхпроводящей областями необходимо затратить энергию, поэтому их поверхностная энергия положительна. К сверхпроводникам I рода относятся в основном чистые металлы. Сплавы же, как правило, относятся к сверхпроводникам II рода, у кото-

рых поверхностная энергия отрицательна, т. е. при образовании границ между нормальными и сверхпроводящими областями выделяется энергия. Таким сверхпроводникам энергетически выгодно пропустить в свой объем часть внешнего магнитного потока.

Проанализируем протекание тока по проволоке круглого сечения, находящейся в сверхпроводящем состоянии. В отличие от экранирующего тока, возникающего при наложении магнитного поля, ток от внешнего источника будем называть транспортным. Если бы этот ток протекал внутри сверхпроводника, он создавал бы в его объеме магнитное поле, что противоречит эффекту Мейснера. Следовательно, ток, протекающий по сверхпроводнику, должен быть ограничен тонким слоем около поверхности, в который проникает магнитное поле. Толщина этого поверхностного слоя равна глубине проникновения λ . В [табл. 11.1](#) приведены критические температуры перехода некоторых сверхпроводников первого рода в сверхпроводящее состояние.

Протекающий по сверхпроводнику транспортный ток будет создавать магнитное поле. Между плотностью тока и магнитным полем существует строгая связь, которая означает, что критическому полю соответствует определенная критическая плотность тока (правило Сильсби). Причем совершенно безразлично, о каком токе идет речь – транспортном или экранирующем. Для проволоки круглого сечения магнитное поле на поверхности B_0 и суммарный ток I связаны отношением

$$B_0 = \mu_0(I / 2\pi R),$$

где R – радиус проволоки. Из данного уравнения следует, что критический ток имеет такую же зависимость от температуры, как и критическое магнитное поле. Расчет показывает, что, например, для оловянной проволоки радиусом 0,5 мм критическая сила тока при $T = 0$ К составляет 75 А.

С помощью правила Сильсби можно определить также критические токи для сверхпроводников во внешнем магнитном поле. Для этого необходимо сложить внешнее магнитное поле с полем транспортного тока на поверхности. Плотность тока достигает результирующего значения, когда результирующее поле становится критическим. Для проволоки радиусом R в магнитном поле B_a , перпендикулярном ее оси, зависимость критического тока от внешнего поля можно определить из уравнения

$$I_C = (2\pi R) / \mu_0 (B_c - 2B_a).$$

Процесс нарушения сверхпроводимости в массивных образцах при достижении критической силы тока происходит с образованием промежуточного состояния. При включении внешнего магнитного поля наблюдается его наложение на круговое поле тока, в результате чего геометрия междофазных границ между сверхпроводящими и нормальными областями значительно усложняется.

Таблица 11.1

Критические температуры для сверхпроводников I рода

Критические температуры и поля		
Материал	Критическая температура, К	Критическое поле (при 0 К), Гс
Сверхпроводники I рода:		
Родий	0,000325	0,049
Титан	0,39	60
Кадмий	0,52	28
Цинк	0,85	55
Галлий	1,08	59
Таллий	2,37	180
Индий	3,41	280
Олово	3,72	305
Ртуть	4,15	411
Свинец	7,19	803

Таблица 11.2

Критические температуры для сверхпроводников II-го рода

Критические температуры и поля			
Материал	Критическая температура, К	Критическое поле (при 0 К), Гс	
Сверхпроводники II рода:		H_{c1}	H_{c2}
Ниобий	9,25	1735	4 040
Nb_3Sn	18,1	—	220 000
Nb_3Ge	23,2	—	400 000
$Pb_1Mo_{5,1}S_6$	14,4	—	600 000
$Yb_{a_2}Cu_3O_7$	90–100	1000*	1 000 000*

* Экстраполировано к абсолютному нулю.

Принципиальное отличие сверхпроводника II рода от сверхпроводника I рода начинает проявляться в тот момент, когда магнитное поле на поверхности достигает значения B_C . При этом сверхпроводник переходит в смешанное состояние. Проникновение магнитного поля в объем сверхпроводника приводит к тому, что в этих условиях транспортный ток распределяется равномерно по всему сечению, не занятому вихревыми нитями. Таким образом, в отличие от сверхпроводников I рода, в которых ток протекает по тонкому поверхностному слою, в сверхпроводники II рода транспортный ток проникает во всем объеме. В [табл. 11.2](#) приведены критические температуры перехода некоторых сверхпроводников II рода в сверхпроводящее состояние.

Известно, что между током и магнитным полем всегда существует сила взаимодействия, которую называют силой Лоренца. Применительно к сме-

шанному состоянию сверхпроводника эта сила будет действовать между абрикосовскими вихрями и транспортным током. Возможности транспортного перераспределения тока ограничены конечными размерами проводника, и, следовательно, под действием силы Лоренца вихревые нити должны перемещаться.

Для описания особенностей поведения сверхпроводников в магнитном поле проанализируем термодинамику образования поверхностей раздела между сверхпроводящей и нормальной фазами. В нормальной области $B \geq B_c$, в сверхпроводящей спадает до нуля на глубине порядка λ (рис. 11.2). В нормальном состоянии плотность сверхпроводящих электронов равна нулю, в то время как в сверхпроводнике она имеет определенную величину $n_s(T)$. На некотором расстоянии от границы плотность сверхпроводящих электронов по порядку величины достигает значения, равного $n_s(T)$. Характеристический параметр ξ называют длиной когерентности, зависимость ее от температуры определяется формулой

$$\xi(T) = \xi_0 (T_c (T_c - T))^{-\frac{1}{2}},$$

где ξ_0 зависит от свойств сверхпроводника.

Сверхпроводники II рода обладают своеобразными электромагнитными свойствами. В частности, любопытна картина проникновения внешнего магнитного поля в толщу образца. Экспериментально было обнаружено, что магнитное поле проникает в проводник, который частично все еще остается сверхпроводящим. Значение поля, при котором начинается проникновение, называется нижним или первым критическим магнитным полем с индукцией B_k , а значение, при котором сверхпроводимость исчезает полностью, – вторым, или верхним, критическим полем. В промежутке между этими значениями полей сверхпроводник находится в особом смешанном состоянии.

Важно отличать смешанное состояние сверхпроводников II рода от промежуточного состояния сверхпроводников I рода. Промежуточное состояние сверхпроводников I рода зависит от формы образца, его расположения во внешнем магнитном поле и возникает далеко не всегда. Смешанное же состояние сверхпроводников II рода является внутренним свойством и возникает в образцах любой формы, как только магнитное поле достигает критического значения.

Существование смешанного состояния было предсказано в 1952 г. А. А. Абрикосовым, а в 1957 им была разработана теория смешанного состояния. Эта теория говорила о том, что при частичном проникновении магнитного поля в толщу



Рис. 11.2. Распределение магнитного потока и плотности сверхпроводящих электронов вблизи фазовой границы

сверхпроводящего образца электроны под действием силы Лоренца начинают двигаться по окружностям, образуя своеобразные вихри, которые стали называть абрикосовскими вихрями. При увеличении внешнего поля электроны приближаются к оси вихря, а их скорость увеличивается. На некотором расстоянии от этой оси происходит «срыв» сверхпроводимости. Но хотя внутри каждого вихря сверхпроводимость разрушена, в пространстве между ними она сохраняется.

В результате сверхпроводящий образец оказывается пронизанным вихревыми нитями, представляющими собой тонкие несверхпроводящие области цилиндрической формы, ориентированные в направлении силовых линий магнитного поля (рис. 11.3).

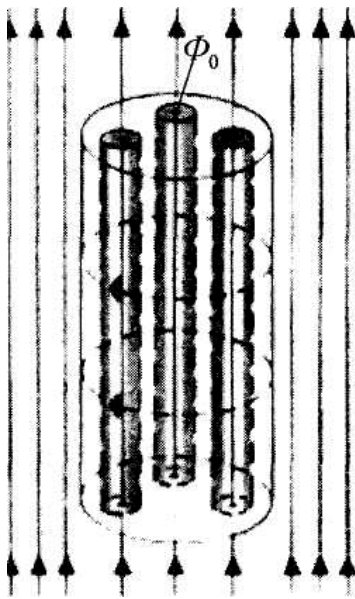


Рис. 11.3. Образец пронизан вихревыми нитями

По этим нитям магнитное поле проникает в сверхпроводник. Оказалось также, что величина магнитного потока в каждом цилиндрике не произвольна, а равна определенному значению. Это значение минимальной порции магнитного потока $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб, называемой квантом магнитного потока.

Чем больше внешнее магнитное поле, тем больше таких нитей-цилиндриков, а следовательно, больше квантов магнитного поля проникает в сверхпроводник. Поэтому магнитный поток в сверхпроводнике меняется дискретно. При увеличении внешнего поля вихревые нити сближаются, плотность их возрастает, и при некотором значении поля, когда расстояние между нитями становится примерно 10^{-6} м, сверхпроводимость разрушается и образец переходит в нормальное состояние.

11.3. Теория Бардина – Купера – Шриффера

Выясним, что представляет собой феномен сверхпроводимости и какие физические процессы его обуславливают. Правильный путь был указан достаточно скромным экспериментальным фактом. Речь идет об открытии в 1950 г. изотопического эффекта. Изучая сверхпроводимость у различных изотопов ртути и олова, физики обратили внимание на то обстоятельство, что критическая температура T_k перехода в сверхпроводящее состояние и масса изотопа M связаны соотношением $T_k M^{1/2} = \text{const}$.

Этот результат свидетельствует о том, что масса изотопа является характеристикой кристаллической решетки и может влиять на ее свойства. От массы, например, зависит частота колебаний атомов в решетке, она, как и критическая температура, обратно пропорциональна корню массы изотопа.

Значит, если массу устремить к бесконечности, то температура перехода будет стремиться к нулю.

Таким образом, изотопический эффект указывал на то, что колебания решетки участвуют в создании сверхпроводимости. Сверхпроводимость является свойством электронной системы металла и, как выяснилось, связана с состоянием кристаллической решетки. Следовательно, возникновение эффекта сверхпроводимости обусловлено взаимодействием электронов с решеткой кристалла.

В 1950 г. физики Гинзбург и Ландау предложили феноменологическую теорию сверхпроводимости, позволившую рассчитать ряд свойств сверхпроводников и описать их поведение во внешнем поле. Следующий шаг был сделан почти одновременно тогда еще советским физиком Боголюбовым и американскими физиками Бардиным, Купером и Шриффером. Американским ученым удалось несколько раньше поставить последнюю точку. Теория сверхпроводимости, разработанная в 1957 г., получила название теории БКШ, а в 1972 г. авторы получили Нобелевскую премию. Теория не только установила причины возникновения сверхпроводимости, но и впервые привела к установлению связи между критической температурой T_k и параметрами образца.

Эта теория основывается на том, что электроны в сверхпроводнике объединяются в пары, взаимодействуя через кристаллическую решетку. Они тесно связаны между собой, так что разорвать пару и разобщить электроны чрезвычайно трудно. Такие мощные связи позволяют электронам двигаться без всякого сопротивления сквозь решетку кристалла, помогая друг другу.

Теперь рассмотрим механизм притяжения электронов. Как известно, одноименные заряды отталкиваются. Но если они находятся в какой-либо среде, то она оказывает влияние на взаимодействие зарядов и даже может изменять его знак. По закону Кулона сила взаимодействия

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon \cdot r^2}.$$

Значит, если среда такова, что ее диэлектрическая проницаемость отрицательна, одноименные заряды будут притягиваться. В сверхпроводнике роль такой среды играет кристаллическая решетка. Когда «первый» электрон пролетает мимо положительно заряженных ионов, он вызывает своеобразную деформацию решетки. Электрон притягивает к себе окружающие положительные ионы, т. е. поляризует кристаллическую решетку. Поляризация означает скопление положительного заряда вблизи поляризующего электрона. «Второй» электрон, естественно, притягивается к области с избытком положительных ионов, а следовательно, и к «первому» электрону. «Первый» электрон как бы окутывается облаком положительного заряда, и к этому облаку притягивается «второй» электрон ([рис. 11.4](#)).

Таким образом, как утверждает теория, электрон может возбудить колебания кристаллической решетки проводника, которая в свою очередь воздействует на этот электрон и на любой другой. Такое взаимодействие может привести к парному согласованию движения электронов, т. е. вопреки кулоновскому отталкиванию электроны могут оказаться связанными друг с другом. Такие пары называются куперовскими парами по имени Леона Купера, впервые показавшего, что сверхпроводимость в металлах связана с образованием электронных пар.

Следует отметить, что притяжение относится лишь к той части электронов, которые ответственны за электропроводность, т. е. свободным электронам. Оказалось также, что не всякие два электрона способны притягиваться. Одним из основных у Купера было утверждение, что пару могут создавать только те электроны, у которых импульсы равны по величине и противоположны по направлению, т. е. полный импульс пары равен нулю.

Спаренные электроны не образуют единое целое. Размер пары относительно большой – порядка 10^{-6} м. В этом объеме размещается огромное число связанных пар, так что понятие изолированной пары теряет смысл. При очень низких температурах это в высшей степени координированное состояние электронов осуществляется самопроизвольно, потому что выигрыш в энергии превышает потери (потери связаны с тем, что свободные электроны могут утрачивать свою свободу). Именно поэтому сверхпроводящее состояние устойчиво и для его разрушения необходимо приложить немалую энергию (тепловую, магнитную, электрическую).

До сих пор мы рассматривали только одну куперовскую пару, тогда как в действительности в 1 см^3 вещества находится примерно 10^{20} куперовских пар. Легко представить себе, что искажение решетки, создаваемое одной куперовской парой, могло бы нарушить притяжение в других парах.

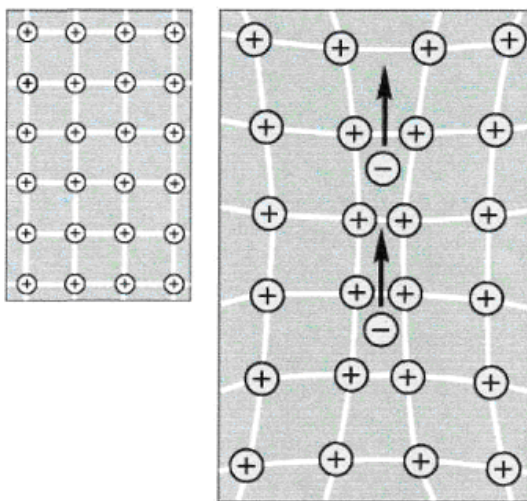


Рис. 11.4. Куперовская пара электронов (–) движется сквозь решетку из положительных атомов (+). Первый электрон искажает решетку, создавая область повышенного положительного заряда, в которую втягивается второй электрон



Авторы наиболее популярной модели сверхпроводимости (БКШ) – Джон Бардин, Леон Купер, Джон Шриффер (1957)

Теория БКШ объясняет многие из свойств сверхпроводников. Электроны в сверхпроводнике переходят в коллективное состояние таким образом, что их потенциальная энергия становится минимальной. Двигаясь совместно, электроны притягиваются друг к другу посредством механизма электрон-фононного взаимодействия, и потенциальная энергия системы оказывается меньшей, чем в случае двух электронов, не притягивающих друг друга.

Сверхпроводник в таком коллективном состоянии способен противодействовать повышающему энергию действию тока или магнитного поля; отсюда следует температурная зависимость критического тока и поля. Выше температуры перехода электроны имеют слишком много тепловой энергии и «возбуждаются», т. е. переходят из сверхпроводящего состояния с более низкой энергией в нормальное, более высокоэнергетическое состояние.

11.4. Эффект Джозефсона

В 1962 г. Б. Джозефсон, аспирант Кембриджского университета, размышляя над тем, что будет, если сблизить два сверхпроводника на расстояние нескольких ангстрем, высказал предположение, что куперовские пары должны за счет «туннельного» эффекта переходить из одного сверхпроводника в другой при нулевом напряжении.

Были предсказаны два замечательных эффекта. Во-первых, через туннельный сверхпроводящий контакт (переход, представляющий собой два сверхпроводника, разделенные слоем диэлектрика) возможно протекание сверхпроводящего тока. Критическое значение этого тока зависит от внешнего магнитного поля. Во-вторых, если ток через контакт превосходит критический ток перехода, то контакт становится источником высокочастотного электромагнитного излучения. Первый из этих эффектов называют стационарным эффектом Джозефсона, второй – нестационарным. Оба эффекта подтверждены экспериментально. В частности, наблюдали осцилляции максимального сверхпроводящего тока через переход при увеличении магнитного поля. Если ток, задаваемый внешним источником, превысит критическое значение, то на переходе появляется напряжение U , периодически зависящее от времени. Частота колебаний напряжения зависит от того, насколько ток через контакт превышает его критическое значение.

Конечно, сблизить два сверхпроводника на расстояние нескольких ангстрем невозможно. Поэтому в экспериментах на подложку напылялся тонкий слой сверхпроводящего материала, такого, как алюминий, затем он окислялся с поверхности на глубину нескольких ангстрем, а сверху напылялся еще один слой алюминия. Напомним, что оксид алюминия – диэлектрик. Такой «сэндвич» эквивалентен двум сверхпроводникам, расположенным на расстоянии нескольких ангстрем друг от друга. На [рис. 11.5](#) продемонстрировано применение эффекта Джозефсона.

Эффект Джозефсона обусловлен фазовыми соотношениями между электронами в сверхпроводящем состоянии. Выше говорилось, что суть сверхпроводящего состояния заключается в когерентном движении куперовских пар через атомную решетку. Когерентность куперовских пар сверхпроводника определяется тем, что пары электронов движутся в фазе. Куперовские же пары двух разных сверхпроводников движутся не в фазе. Если два сверхпроводника тесно приблизить друг к другу, то куперовские пары могут туннелировать через зазор между ними. При туннелировании фаза куперовской пары изменяется.

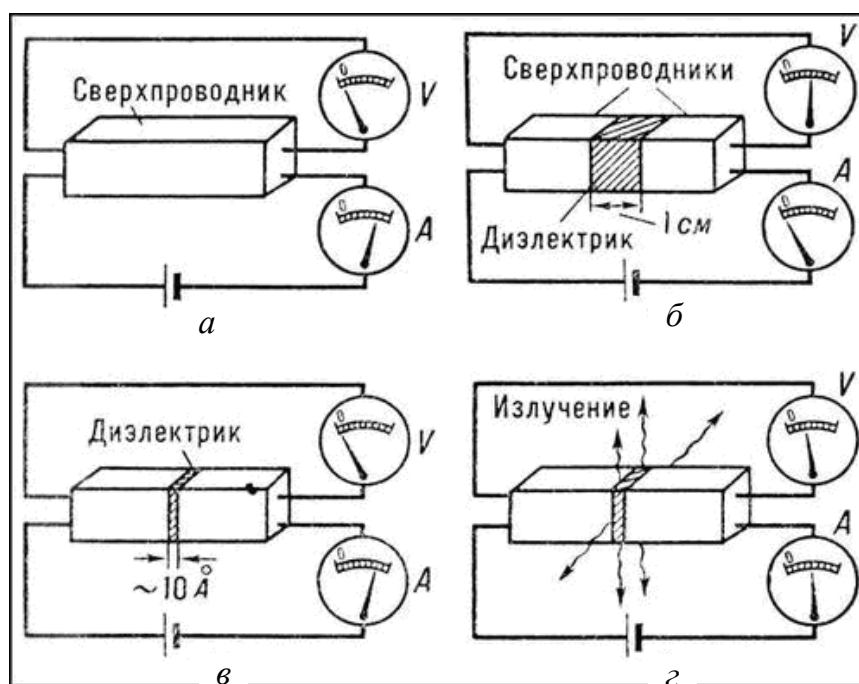


Рис. 11.5. Применение эффекта Джозефсона

Если изменение таково, что куперовская пара начинает быть в фазе с парами во втором сверхпроводнике, то туннелирование возможно. Это и происходит в стационарном эффекте Джозефсона. Величиной магнитного поля определяется сдвиг фазы, который приобретают туннелирующие пары.

Нестационарный эффект Джозефсона возникает, когда ток через переход превышает критическое значение для стационарного эффекта Джозефсона. Между двумя сверхпроводниками возникает напряжение, которое вынуж-

дает фазы в двух сверхпроводниках изменяться во времени. Это, в свою очередь, приводит к колебаниям туннельного тока (с изменением его направления) в соответствии с изменениями разности фаз в двух сверхпроводниках.

11.5. Эффект Мейснера

Когда сверхпроводник охлаждается в слабом магнитном поле, то при температуре перехода на его поверхности возникает незатухающий ток, циркуляция которого обращает внутренний магнитный поток в нуль. Это явление, заключающееся в том, что внутри сверхпроводника плотность магнитного потока всегда, даже во внешнем магнитном поле, равна нулю, называется эффектом Мейснера ([рис. 11.6](#)).

Если увеличивать напряженность внешнего поля, то при критическом его значении сверхпроводимость разрушится. Чем ближе к точке критической температуры, тем меньше должна быть напряженность внешнего магнитного поля для разрушения эффекта сверхпроводимости и, наоборот, при температуре, равной температуре абсолютного нуля, напряженность должна быть максимальной по отношению к другим случаям для достижения такого же эффекта. Данная взаимосвязь иллюстрируется следующим графиком ([рис. 11.7](#)).

Эффект выталкивания магнитного поля из сверхпроводника можно пояснить на основе представлений о намагниченности. Если экранирующие токи, полностью компенсирующие внешнее магнитное поле, сообщают образцу магнитный момент m , то намагниченность M выражается соотношением $M = m/V$, где V –

объем образца. Можно говорить о том, что экранирующие токи приводят к появлению намагниченности, соответствующей намагниченности идеального ферромагнетика с магнитной восприимчивостью, равной минус единице.

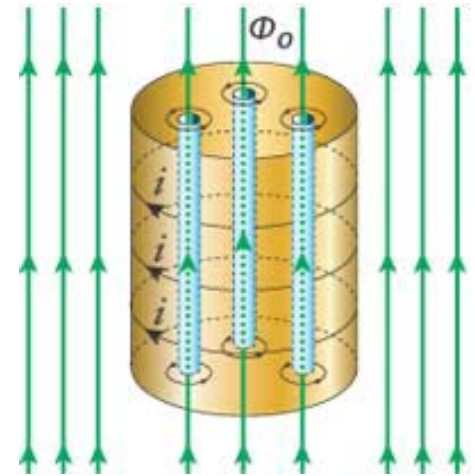


Рис.11.6. Поведение магнитного поля в образце при эффекте Мейснера



Рис. 11.7. Взаимосвязь между напряженностью внешнего поля и критической температурой

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под сверхпроводимостью?
2. Что означает термин «гелиевые температуры»?
3. Почему при абсолютном нуле электрическое сопротивление должно исчезать?
4. В каком году было открыто сверхпроводящее состояние вещества?
5. Что понимают под сверхпроводниками I рода?
6. Что понимают под сверхпроводниками II рода?
7. Кем и когда была предложена теория сверхпроводимости?
8. Каково происхождение термина «куперовская пара»?
9. Какое количество куперовских пар находится в 1 см^3 вещества?
10. Кто авторы наиболее популярной модели сверхпроводимости?

ЛЕКЦИЯ 12

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

План лекции

- 12.1. История открытия высокотемпературной сверхпроводимости.
- 12.2. Методы получения ВТСП пленок:
 - 12.2.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
 - 12.2.2. Керамический метод.
 - 12.2.3. Золь-гель метод.
- 12.3. Применение высокотемпературной сверхпроводимости.

Литература: [[11](#), [18](#), [26](#), [31](#)].

12.1. История открытия высокотемпературной сверхпроводимости

В основе теоретической модели высокотемпературной сверхпроводимости, разработанной академиком В. Л. Гинзбургом, лежит так называемый экситонный механизм взаимодействия электронов.

Дело в том, что в электронной системе существуют особые волны – экситоны. Подобно фононам они являются квазичастицами, перемещающимися по кристаллу и не связанными с переносом электрического заряда и массы. Модельный образец такого сверхпроводника представляет собой металлическую пленку в слоях диэлектрика или полупроводника. Электроны проводимости, движущиеся в металле, отталкивают электроны диэлектрика, т. е. окружают себя облаком избыточного положительного заряда, который и приводит к образованию электронной пары. Такой механизм корреляции электронов предсказывает весьма высокие значения критической температуры ($T_c = 200$ К).

Идея высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в органических соединениях была выдвинута в 1950 г. Ф. Лондоном и лишь 14 лет спустя появился отклик на эту идею в работах американского физика В. Литтла, вызвавший критические отзывы, отрицающие возможность ВТСП в неметаллических системах. Таким образом, хотя идея ВТСП родилась в работе Ф. Лондона в 1950 г., годом рождения проблемы следует считать время появления первых, пока, правда, малочисленных потоков информации по ВТСП – 1964 г. Если рассмотреть эволюцию температуры сверхпроводящего перехода, то станет ясно, что рост температуры сверхпроводящего перехода приводил к возможности использования хладагентов со все более высокой температурой кипения (жидкий гелий, водород, неон, азот). Хотя до азотных температур перехода, открытых в металлокерамиках, практически использо-

вался для охлаждения жидкий гелий, однако скачки в росте температуры перехода дают право положить их в основу периодизации ВТСП в гелиевом, водородном, неоновом и, наконец, азотном периодах ВТСП. Так, Nb_3Sn сменился Nb-Al-Ge , затем наибольшая температура была обнаружена в 1973–81 гг. у Nb_3Ge (23,9 К), которая оставалась рекордной вплоть до сверхпроводимости металлокерамики La-Sr-Cu-O при 30 К в 1986 г., вырастая до 100 К на материале I-Ba-Cu-O .

Ключевым для проблемы ВТСП является вопрос критической температуры от характеристики вещества. С открытием в 1986 г. нового класса сверхпроводящих материалов с более высокими, чем ранее, критическими температурами во всем мире развернулись работы по изучению свойств ВТСП с целью определения возможности их применения в различных областях науки и техники. Интерес к ВТСП объясняется в первую очередь тем, что повышение рабочей температуры до азотной позволит существенно упростить и удешевить системы криогенного обеспечения, повысить их надежность.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников, критическая температура которых с запасом превышает температуру кипения жидкого азота, принципиально меняет экономические показатели сверхпроводниковых устройств, поскольку стоимость хладагента и затраты на поддержание необходимой температуры снижаются в 50–100 раз. Кроме того, открытие ВТСП сняло теоретический запрет на дальнейшее повышение критической температуры с 30 К вплоть до комнатной. Так, со времени открытия этого явления критическая температура повышена с 30 до 130 К.

Традиционные сверхпроводники второго рода (сплавы Nb-Ti , соединения Nb_3Sn) применяются в сверхпроводящих магнитных системах в виде композитов с матрицей из нормального металла с высокой тепло- и электропроводностью. Наличие пластичной матрицы (чаще всего медной) значительно облегчает изготовление тонких длинномерных проводников волочением или прокаткой, так как сверхпроводящие материалы отличаются хрупкостью. Стабильность сверхпроводимости – состояние относительно скачков магнитного потока – достигается путем изготовления проводников с весьма малым диаметром отдельных сверхпроводящих или же лент с малой толщиной сверхпроводящего слоя. По этим же причинам ВТСП проводники в большинстве случаев изготавливаются в форме композитов, имеющих малую толщину или диаметр. Дополнительная причина применения нормального металла связана с необходимостью защиты ВТСП материала от влажности и других факторов окружающей среды, вызывающих деградацию оксидного сверхпроводника. Наилучшие результаты получены при использовании серебряной матрицы или обмотки сверхпроводника. Кроме того, что серебро лишь в минимальной степени реагирует с ВТСП или его исходной продукцией даже при высокой температуре синтеза, оно отличается высокой диффузионной проницаемостью для кислорода, что необходимо при синтезе и обжиге ВТСП.

В настоящее время все усилия в области ВТСП наряду с совершенствованием их свойств и способов получения направлены на создание изделий на

основе ВТСП, пригодных для применения в радиоэлектронных системах для детектирования, аналоговой и цифровой обработки сигнал-шум.

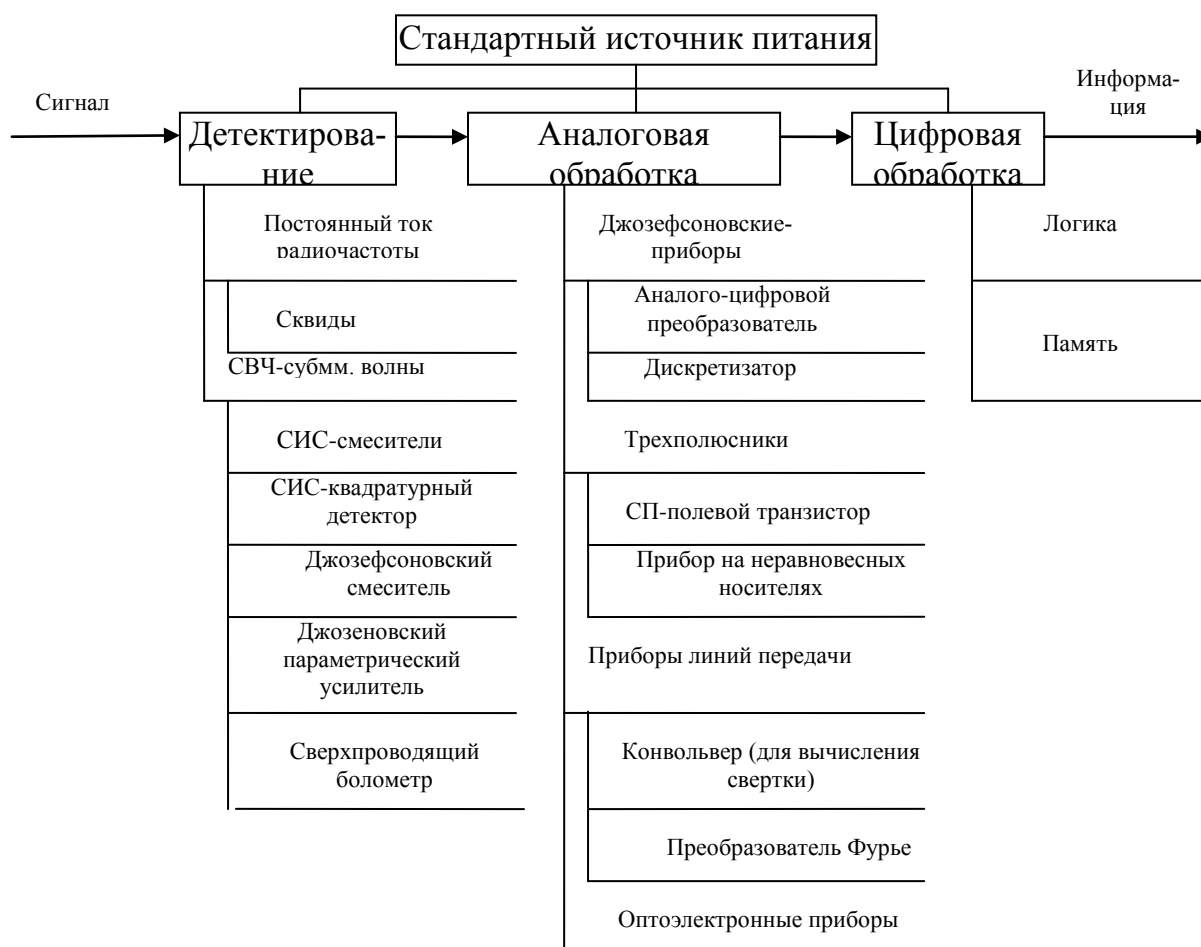


Рис. 12.1. Области применения материалов с ВТСП

Основными преимуществами ВТСП являются отсутствие потерь на постоянном и сравнительно небольшие потери на переменном токах, возможность экранирования магнитных и электромагнитных полей, передачи сигналов с крайне малыми искажениями.

Параметром, непосредственно определяющим высокочастотные свойства ВТСП материалов, является их поверхностное сопротивление. В обычных металлах поверхностное сопротивление увеличивается пропорционально квадратному корню из частоты, а в ВТСП – пропорционально ее квадрату. Однако потому, что начальное значение поверхностного сопротивления (на постоянном токе) у ВТСП на несколько порядков ниже, чем у металлов, высококачественные ВТСП сохраняют преимущества по сравнению с металлами при частоте до нескольких сотен гигагерц.

Интерес к вопросу практического использования сверхпроводников появился в 50-х гг., когда были открыты сверхпроводники второго рода

с высокими критическими параметрами как по значению плотности тока, так и по величине магнитной индукции. В настоящее время использование явления сверхпроводимости приобретает все больше практическое значение (рис. 12.1).

Наибольшее распространение из сверхпроводящих материалов в электротехнике получили сплав ниобий-титан и интерметаллид ниобий-олово. Технологические процессы изготовления исключительно тонких ниобий-титановых нитей и их стабилизации достигли весьма высокого уровня развития. При создании многожильных проводников на основе ниобий-олова широкое применение находит так называемая бронзовая технология.

12.2. Методы получения ВТСП пленок

Методы осаждения получили широкое распространение для синтеза разнообразных видов керамики, поэтому неудивительно, что они были одними из первых химических методов, посредством которых стали синтезировать ВТСП порошки. При правильной постановке эксперимента в ряде случаев удастся воспроизводимо получать однородную дисперсную смесь солей с заданным соотношением катионов; в идеале же оптимальными являются такие условия, когда катионы из раствора осаждаются одновременно и с одинаковой скоростью

Из различных вариантов золь-гель методов особое распространение получил цитратный метод. Близок к нему метод полимерных комплексов. Возможность контролируемого воздействия на вязкость получаемого геля (за счет варьирования соотношения компонентов, длительности и температуры полимеризации) позволяет использовать золь-гель метод для получения не только порошков, но и толстых пленок, волокон, плоских керамических форм.

Одними из наиболее повсеместно распространенных в настоящее время химических методов получения ВТСП порошков являются распылительная сушка и пиролиз аэрозолей. Суть последнего из них состоит в том, что смесь растворов солей, переведенная посредством ультразвукового распылителя в состояние аэрозоля (тумана) с размером частиц 0,5–0,8 мкм, переносится газом-носителем в горячую камеру, где происходит мгновенное (полное или частичное) разложение, а образующийся оксидно-солевой продукт собирается на фильтре при выходе потока из зоны разложения. Смешение компонентов (чаще всего растворов нитратов) на молекулярном уровне, практически мгновенное обезвоживание и разложение микрокапель аэрозоля позволяют получить однородный продукт, избежав характерные керамическому методу процессы повторного помола и обжига, загрязняющие продукт и приводящие к неконтролируемому росту зерен. Вместе с тем, получаемые порошки могут загрязняться материалом, из которого сделана камера для распыления (высокие температуры, присутствие свободной кислоты); помимо этого для того,

чтобы избежать образования карбоната бария, приходится тщательно очищать большие объемы газа-носителя (кислорода) от примесей CO_2 .

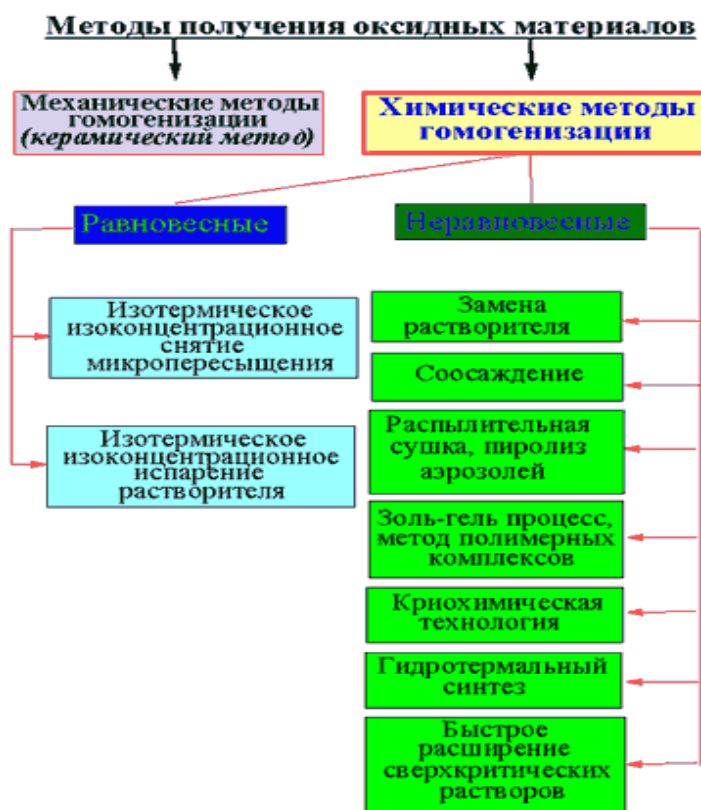


Рис. 12.2. Наиболее распространенные методы получения оксидных порошков

Существует достаточно большое число технологий получения тонких пленок, которые условно могут быть разделены на физические и химические. К первым из них относятся наиболее распространенные импульсное лазерное и магнетронное напыление пленок, когда вещество мишени переносится микрокластерами, выбитыми высокоэнергетическим пучком из плотной и химически однородной мишени, на подложку. Эти методы позволяют получать тонкие пленки высокого качества с рекордными физическими характеристиками, а также проводить послойный синтез новых структур (структурный дизайн), «собирая» пленку буквально на уровне атомных плоскостей.

В то же время дорогостоящие физические методы практически неприменимы для получения масштабных образцов, и основную роль в этом направлении исследований играют химические методы ([рис.12.2](#)). Среди освоенных к настоящему времени методов получения тонких пленок ВТСП особый интерес вызывает метод, заключающийся в осаждении на монокристаллических подложках продуктов термического разложения высоколетучих металлоорганических прекурсоров (MOCVD – Metal-Organic

Chemical Vapor Deposition Technique). Мировой опыт широкомасштабного применения метода CVD (в настоящее время разработка CVD-технологии ВТСП ведется более чем в 40 лабораториях мира, включая лаборатории крупнейших электронных фирм) для нанесения эпитаксиальных пленок полупроводников и оксидных покрытий различного функционального назначения дает основание для утверждения, что и в технологии пленок ВТСП этот метод со временем станет одним из основных.

12.2.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Классическим методом получения чистых поверхностей многих материалов является испарение и конденсация в сверхвысоком вакууме. Тонкие пленки металлов или элементарных полупроводников, получаемые вакуумным испарением, – обычно поликристаллические или аморфные, т. е. в них невозможна определенная кристаллографическая ориентация поверхности.

Технология многослойных структур должна обеспечивать высокое качество роста материалов слоистых структур и совершенство границ раздела между этими материалами. Только в этом случае могут быть реализованы те потенциальные возможности, заложенные в полупроводниковых сверхрешетках и многослойных магнитных структурах.

Для получения высококачественных тонких пленок и многослойных структур используют чаще всего механизмы эпитаксиального роста материала пленки на соответствующей монокристаллической подложке. Наибольшее распространение получил метод МЛЭ, позволяющий формировать совершенные монокристаллические слои различных материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод успешно применяется для выращивания тонких пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, магнитных материалов, высокотемпературных сверхпроводников и многих других веществ. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем как теоретических исследований, так и практических работ в этой области, поэтому технология МЛЭ является самым распространенным методом получения полупроводниковых сверхрешеток, многослойных магнитных структур и пленок ВТСП.

По сравнению с другими технологиями, используемыми для выращивания тонких пленок и многослойных структур, МЛЭ характеризуется прежде всего малой скоростью роста и относительно низкой температурой роста. К преимуществам этого метода следует отнести возможность резкого прерывания и последующего возобновления поступления на поверхность подложки молекулярных пучков различных материалов и возможность анализа структуры, состава и морфологии растущих слоев в процессе их формирования методом дифракции отраженных быстрых электронов и электронной спектроскопии.

В промышленности, научно-исследовательских лабораториях широкое распространение в настоящее время получили автоматизированные многомодульные комплексы для молекулярно-лучевой эпитаксии. В предыдущих

лекция мы неоднократно рассматривали метод МЛЭ, поэтому в этой лекции вопрос изложен столь кратко. Пытливые магистранты могут узнать для себя много интересной информации, обратившись к источникам [11, 18, 26, 31].

12.2.2. Керамический метод

Керамические образцы синтезируют из стехиометрических смесей оксидов CuO , Sc_2O_3 , V_2O_5 , и карбонатов BaCO_3 и SrCO_3 . Синтез и спекание образцов (с промежуточным перетиранием) проводят на воздухе при стандартных режимах термообработки: $T_1 = 900^\circ\text{C}$ ($t = 26$ ч), $T_2 = 930\text{--}950^\circ\text{C}$ ($t = 45\text{--}70$ ч), с последующим медленным охлаждением со скоростью $\approx 10^\circ\text{C}/\text{мин}$ и дополнительной выдержкой при 400°C ($t = 10\text{--}20$ ч). На [рис. 12.3](#), [рис. 12.4](#) представлена реальная структура керамики и приведена общая схема процесса получения материалов ВТСП керамическим методом.

12.2.3. Золь-гель метод

Получение ВТСП материалов с заданными характеристиками является важнейшей целью, сформулированной практически сразу же после открытия этого класса сложных купратов. Несмотря на все разнообразие форм и типов ВТСП материалов, лишь некоторые их виды смогут в обозримом будущем выиграть конкурентную борьбу с уже существующим устройствами в энергетике, электронике и медицине, в частности, высокоомогенные порошки. Диаграмма перехода при получении материалов с ВТСП золь-гель методом представлена на [рис. 12.5](#).

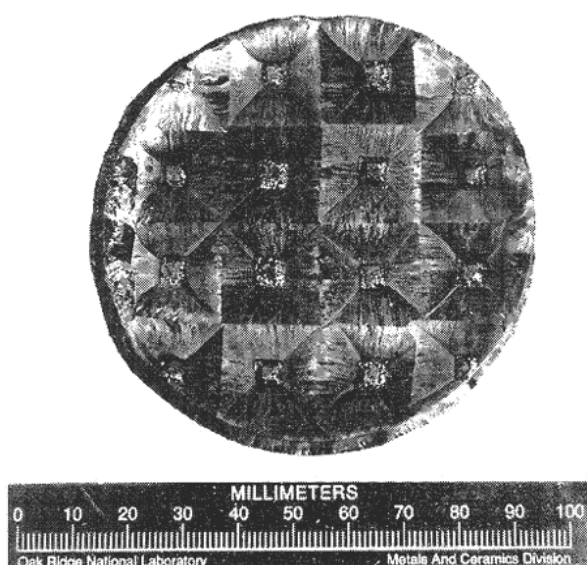


Рис. 12.3. Реальная структура $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

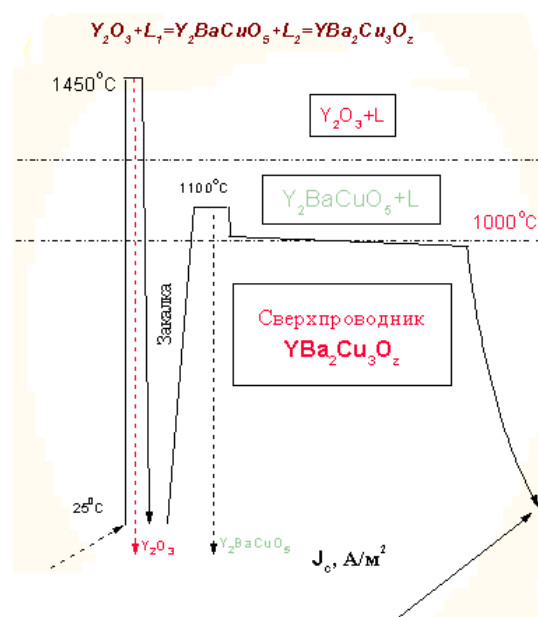


Рис. 12.4. Общая схема процесса



Рис. 12.5. Диаграмма перехода материалов в ВТСП состояние при золь-гель методе

Метод позволяет получать тонкие пленки и пленочные гетероструктуры, крупнокристаллическую керамику, монокристаллы, длинномерные композитные материалы.

12.3. Применение ВТСП материалов

Возможности практического использования ВТСП материалов остаются многообещающими для микроэлектроники, медицины, эффективных систем производства, накопления и передачи энергии.

Одно из важнейших достижений физики низких температур – использование сверхпроводников для получения сверхсильных постоянных магнитов. Сверхпроводящий соленоид, в отличие от обычного, не нуждается во внешнем источнике питания, поскольку однажды возбуждённый в нём ток не затухает. Нужно только поддерживать соленоид при низкой температуре, а для этого требуются гораздо меньшие мощности.

Решается проблема теплоотвода, так как мощность такого магнита равна нулю. Правда, остаётся проблема прочности (на обмотку действует сила Ампера, прямо пропорциональная магнитной индукции), поэтому рекордных полей сверхпроводящие соленоиды не создают. Но зато они легче и меньше по размерам, чем обычные водоохлаждаемые. Так, при индукции магнитного поля 30–40 Тл сверхпроводящий магнит весит всего несколько десятков килограммов, со всем относящимся к нему оборудованием занимает площадь 4–6 м² и расходует примерно 10 л жидкого гелия в сутки. И это вместо нескольких десятков тонн и тысяч киловатт электроэнергии.

Одной из наиболее острых и важных проблем является проблема осуществления управляемой термоядерной реакции. Её успешное решение обещает человечеству неисчерпаемые источники энергии. Так, при синтезе ядер

гелия из ядер дейтерия, содержащегося в одном литре воды, можно получить такую же энергию, как при сгорании 350 л бензина.

Чтобы осуществить управляемый термоядерный синтез, нужно разогнать ядра лёгких атомов до таких скоростей, чтобы при соударении они не разлетались. Это возможно только при температурах порядка 10^6 – 10^7 °С. При такой температуре любое вещество пребывает в так называемом плазменном состоянии. Атомы теряют свои электронные оболочки и вещество превращается в бурлящую смесь заряженных ядер и электронов. Такую горячую плазму нельзя удержать ни в одном сосуде.

Но поскольку речь идёт о заряженных частицах, то на их траектории можно воздействовать магнитными полями. Тогда при достаточно сильных магнитных полях и их соответствующей геометрии можно, несмотря на высокие скорости частиц, удержать их в некотором реакционном пространстве (камере). Необходимые для этого магнитные поля столь велики, что их создание экономически будет оправданно только при использовании сверхпроводящих магнитов.

При возрастании потребляемых мощностей всё острее становится проблема передачи энергии. Воздушные линии передач хоть и самые дешёвые, но в них бьют молнии, они мешают строительству, транспорту, радиосвязи, портят ландшафт, вредят фауне и человеку. Можно, конечно, передавать энергию по подземному кабелю, но и здесь возникает немало сложностей. И в воздушной, и в кабельной линии приблизительно десятая часть энергии безвозвратно теряется при нагреве токоведущих жил.

Конечно же очень заманчиво для решения этой проблемы использовать явление сверхпроводимости. Сам по себе сверхпроводящий материал намного дороже меди, но токонесущая жила оказывается дешевле, так как по проводу площадью сечением 1 мм² можно пропускать не 1–2 А, а 10 кА. Сэкономленную на таковой жиле денежную сумму можно потратить на криогенное охлаждение. Основная трудность, которая возникает при прокладке сверхпроводящего кабеля, – тепловая защита сверхпроводника. Предохранить кабель от большого притока тепла извне можно с помощью вакуумной изоляции. Кабель имеет вид многослойной трубы и, в сущности, представляет собой длинный криостат ([рис. 12.6](#)).

Внутренняя труба, покрытая слоем сверхпроводящего материала, заполнена жидким гелием, который гонят по ней насосы. Между первой и второй трубами вакуумная изоляция, между второй и третьей течёт жидкий азот, между третьей и четвёртой (наружной) опять вакуумная изоляция.

Несмотря на простоту конструкции, монтаж такой линии сопряжён со значительными трудностями. Надо обеспечить герметичность кабеля, научиться собирать его из отдельных коротких отрезков; разработать рефрижераторы, концевые устройства и другое оборудование, необходимое для стабильного функционирования таких линий передач.

Ещё одна проблема, удачно решённая с помощью уникального свойства сверхпроводников – диамагнетизма, – увеличение скоростей железнодорожного транспорта. Этого достигли, заменив колёса так называемой «магнитной подушкой» ([рис. 12.7](#)). Этим же удалось добиться и плавности хода, и отсутствия шума, и устранения вибрации при движении.

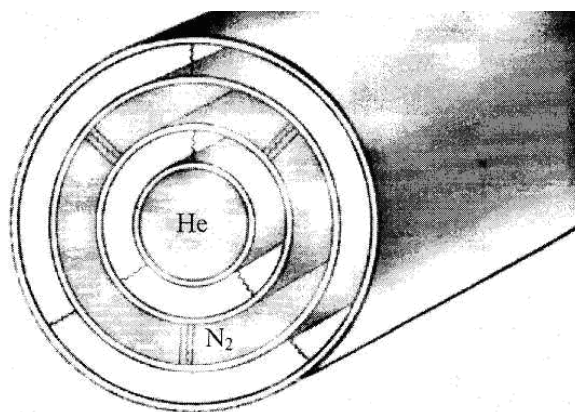


Рис. 12.6. Сверхпроводящий кабель в разрезе



Рис.12.7. Схема вагона на электромагните

Поездной электромагнит 1 делают сверхпроводящим. Он охлаждается жидким и газообразным гелием. При движении поезда в алюминиевых полосах – рельсах 2 наводятся вихревые токи, которые по правилу Ленца создают магнитное поле, направленное навстречу вызвавшему их магнитному полю, в нашем случае полю магнитов, расположенных в поезде. Это поле и создаёт силу отталкивания. Поезд-вагон приподнимается над эстакадой электромагнитными силами. Горизонтальная часть полосы – рельса 3 создаёт при этом подъёмную силу, а вертикальная обеспечивает устойчивость поезда. Между шинами-полосами проложен третий рельс – линейный двигатель, который и приводит поезд в движение.

Линейный двигатель – это тот же самый электродвигатель, только здесь роль статора играет дорога, а роль ротора – поезд. Для обеспечения работы такого двигателя на дорогу укладывается множество проводящих стержней, в которые по специальной программе подаётся ток. Сверхпроводящая катушка на борту вагона может подтягиваться токами дороги. Токи смещаются – поезд движется вслед за ними. При этом просвет между вагоном и дорогой можно увеличивать до определённого значения – это решает проблему безаварийного движения.

Подобные технологии активно внедряются в жизнь, а в Японии между Токио и Осакой уже действует скоростная сверхпроводниковая магистраль. В днище вагона поезда размещаются сверхпроводящая обмотка возбуждения, криогенное хозяйство, металлические экраны для защиты пассажиров от

мощных магнитных полей. Разгон и торможение производятся с помощью резиновых колёс, которые убираются и опускаются. Этот поезд развивает скорость 500 км/ч.

С каждым годом в науке и технике требуются всё более точные измерения. И здесь на помощь приходит явление сверхпроводимости. Изменение свойств сверхпроводников при переходе в сверхпроводящее состояние используется для создания высокочувствительных измерителей и датчиков. Самая простая функция таких приборов связана с определением температур, магнитных полей и токов, которые непосредственно сравниваются с критическими параметрами сверхпроводника, находящегося при температуре перехода. Такие приборы – болометры – обладают существенными преимуществами. В связи с тем, что они работают при низких температурах, в них очень слабы так называемые флуктуационные (тепловые) шумы. Сверхпроводники плохо проводят и запасают тепло, так что полученная доза излучения не расплывается по чувствительному элементу – датчику, а действует всей своей величиной в определённом месте. Датчик представляет собой фольгу или плёнку, напылённую на слюдяную подложку. Его свободно подвешивают в некотором объёме, охлаждаемом жидким гелием. Для пропуска излучения корпус приёмника должен иметь окно, прозрачное в требуемой области длин волн.

Сверхпроводящие приёмники используются также и для регистрации частиц высокой энергии. При попадании частицы в сверхпроводящую плёнку происходит локальный разогрев, в результате чего какой-то участок плёнки на пути частицы на короткое время переходит в нормальное состояние.

В измерительной схеме, присоединённой к приёмнику, появляется импульс напряжения. Преимуществом таких детекторов является их быстрое действие: за 1 с сверхпроводниковый счётчик способен регистрировать около 10 млн частиц.

Вопросы для самопроверки

1. Каково происхождение термина «высокотемпературная сверхпроводимость»?
2. Что лежит в основе теоретической модели высокотемпературной сверхпроводимости, разработанной академиком В. Л. Гинзбургом?
3. Какова эволюция температуры перехода в сверхпроводящее состояние?
4. Чем объясняется интерес к высокотемпературной сверхпроводимости?
5. Каковы основные преимущества ВТСП?
6. Какой параметр определяет высокочастотные свойства ВТСП материалов?
7. Что понимают под керамическим методом получения ВТСП материалов?
8. Каковы возможности молекулярно-лучевой эпитаксии для получения ВТСП плёнок?
9. Каковы возможности золь-гель метода для получения ВТСП плёнок?
10. Каковы коммерческие применения ВТСП материалов?

ЛЕКЦИЯ 13

МИКРОВОЛНЫ И ИХ ПРИРОДА

План лекции

- 13.1. Открытие теплового воздействия микроволн.
- 13.2. Физическая природа микроволн.
- 13.3. Микроволновая передача и средства связи.
- 13.4. Сверхвысокочастотная терапия.

Литература: [[12](#), [19](#)].

13.1. Открытие теплового воздействия микроволн

Главное назначение любой системы связи – передача информации от одного пункта в другой. Обычно информация передается при помощи высокочастотных колебаний (сигналов несущей частоты), которые модулируются низкочастотными информационными сигналами, распространяются по каналу связи и поступают на приемное устройство, где производится демодуляция и выделение информационного низкочастотного сигнала. В области радиосвязи, кабельной связи и телевидения обычно в качестве несущей используется частота радиодиапазона или СВЧ-диапазона (сверхвысокочастотного диапазона). При этом передача информации осуществляется либо через атмосферу (радиосвязь, телевидение), либо по кабелям (телефония, кабельное телевидение).

В мировой практике микроволновыми называются электронные приборы, работающие в диапазоне длин волн менее 1 м или частот более 300 МГц. В общем спектре частот, применяемых в радиоэлектронике ([табл. 13.1](#)), микроволновый диапазон охватывает дециметровый (10–1 дм), сантиметровый (10–1 см), миллиметровый (10–1 мм) и субмиллиметровый (1–0,1 мм) поддиапазоны. Им соответствуют ультравысокие (300–3 000 МГц), сверхвысокие (3–30 ГГц), крайне высокие (30–300 ГГц) и гипервысокие (300–3 000 ГГц) частоты.

Во второй половине XX века в наш обиход вошли печи, нагрев пищи в которых производится невидимыми лучами – микроволнами.



Частотные диапазоны в современной радиоэлектронике

№ п/п	Название диапазона	Частота	Длина волн
1	Очень низкие частоты (ОНЧ)	< 30 кГц	$> 10^4$ м
2	Низкие частоты (НЧ)	30–300 кГц	10^4 – 10^3 м
3	Средние частоты (СЧ)	300–3000 кГц	10^3 – 10^2 м
4	Высокие частоты (ВЧ)	3–30 МГц	10^2 –10 м
5	Очень высокие частоты (ОВЧ)	30–300 МГц	10–1 м
6	Ультравысокие частоты (УВЧ)	300–3000 МГц	10–1 дм
7	Сверхвысокие частоты (СВЧ)	3–30 ГГц	10–1 см
8	Крайне высокие частоты (КВЧ)	30–300 ГГц	10–1 мм
9	Гипервысокие частоты (ГВЧ)	300–3000 ГГц	1–0,1 мм

Подобно многим другим открытиям, существенно повлиявшим на повседневную жизнь людей, открытие теплового воздействия микроволн произошло случайно. В 1942 г. американский физик Перси Спенсер работал в лаборатории компании «Райтеон» с устройством, излучавшим сверхвысокочастотные волны. Разные источники по-разному описывают события, случившиеся в тот день в лаборатории. По одной версии, Спенсер положил на устройство свой бутерброд, сняв его через несколько минут, обнаружил, что бутерброд прогрелся до середины.

По другой версии, разогрелся и растаял шоколад, который был у Спенсера в кармане, когда он работал возле своей установки. Так или иначе эффект был обнаружен. В 1945 г. Спенсер получил патент на использование микроволн для приготовления пищи, а в 1947-м на кухнях госпиталей и военных столовых, где требования к качеству пищи были не столь высоки, появились первые приборы для приготовления пищи с помощью микроволн. Эти изделия фирмы «Райтеон» высотой в человеческий рост весили 340 кг и стоили 3000 долларов за штуку.

Понадобилось полтора десятилетия, чтобы «довести до ума» печь, в которой пища готовится с помощью невидимых волн. В 1962 г. японская фирма «Шарп» выпустила в продажу первую серийную микроволновую печь, которая, впрочем, поначалу не вызвала потребительского ажиотажа. Этой же фирмой в 1966 г. был разработан вращающийся стол, в 1979-м впервые применена микропроцессорная система управления печью, а в 1999-м разработана первая микроволновая печь с выходом в интернет.

Сегодня десятки фирм выпускают бытовые микроволновки. Только в США в 2000 г. продали 12,6 млн микроволновых печей, не считая комбинированных духовок со встроенным источником микроволн.

Опыт применения миллионов микроволновых печей во многих странах в течение последних десятилетий доказал неоспоримые удобства этого спо-

соба приготовления пищи – быстроту, экономичность, простоту пользования. Сам механизм приготовления пищи с помощью микроволн предопределяет сохранение молекулярной структуры пищи.

На данный момент в мире развитие радиотехнических систем и систем сверхбыстрой обработки информации на сверхвысоких частотах требует создания принципиально новых микроминиатюрных твердотельных приборов и устройств СВЧ-диапазона (в том числе с распределенным взаимодействием), обладающих новыми функциональными возможностями, а также разработки методов их математического моделирования, проектирования и анализа.

Потребности интегральной техники СВЧ стимулируют развитие теоретических и экспериментальных исследований в области распространения и взаимодействия волн различной физической природы в твердотельных слоистых структурах: электромагнитных волн, волн концентрации носителей заряда, плазменных, магнитоплазменных, рекомбинационных волн и поверхностных поляритонов в полупроводниках; дипольно-обменных спиновых волн (СВ) и безобменных магнитостатических волн (МСВ), магнитоупругих и упругих волн в ферромагнитных диэлектриках и полупроводниках; геликонных волн в намагниченных полупроводниках; поверхностных и сдвиговых акустических волн в пьезоэлектриках и пьезополупроводниках.

К началу XXI столетия исследованы спектры собственных медленных волн в тонких пленках и тонкопленочных структурах. Изучены дисперсионные характеристики волн пространственного заряда (ВПЗ) в тонкопленочных полупроводниковых структурах с дрейфовыми потоками носителей заряда, безобменных МСВ и дипольно-обменных СВ в намагниченных монокристаллических ферритовых пленках и слоистых ферритдиэлектрических структурах.

13.2. Физическая природа микроволн

Микроволновое, или, иначе, сверхвысокочастотное, излучение – это электромагнитные волны длиной от одного миллиметра до одного метра. Сфера применения микроволновой техники в настоящее время достаточно широка и по мере развития науки и технологии все больше внедряется в нашу повседневную жизнь. Кроме микроволновых печей, можно отметить такие области применения, как радиолокация, радионавигация, системы спутникового телевидения, телефонная сотовая связь и многое другое. Ведутся интенсивные и небезуспешные исследования по использованию микроволн в медицине и биологии.

Физическая природа микроволнового излучения такая же, как у света или радиоволн. Отличие только в частоте, с которой происходят электромагнитные колебания, или в длине волны, что то же самое, поскольку последняя связана с частотой соотношением

$$\lambda = c/f,$$

где λ – длина волны; c – скорость распространения волны; f – частота.

Частота, с которой происходят колебания электромагнитного поля, в значительной степени влияет на его внешние свойства. Все знают о существовании радиоволн, инфракрасного или теплового и ультрафиолетового излучения, о рентгеновских лучах и видимом свете. Но все это разные проявления одного и того же явления – электромагнитных волн. Различие заключается только в одном – в частоте колебаний (рис. 13.1).

Однако свойства перечисленных явлений могут различаться. Причина заключается в соизмеримости длины волны с различными физическими объектами. Например, свет или рентгеновское излучение легко проходят через кристалл, у которого расстояние между атомами меньше длины волны и, наоборот, длинноволновое излучение не сможет проникнуть, допустим, в металлическую трубу даже очень большого диаметра.

Если в низкочастотной электронике принято оперировать понятиями токов и напряжений, то в микроволновом диапазоне в большинстве случаев используются величины, характеризующие электромагнитное поле. Главные из них – это напряженность электрического поля E и напряженность магнитного поля H .

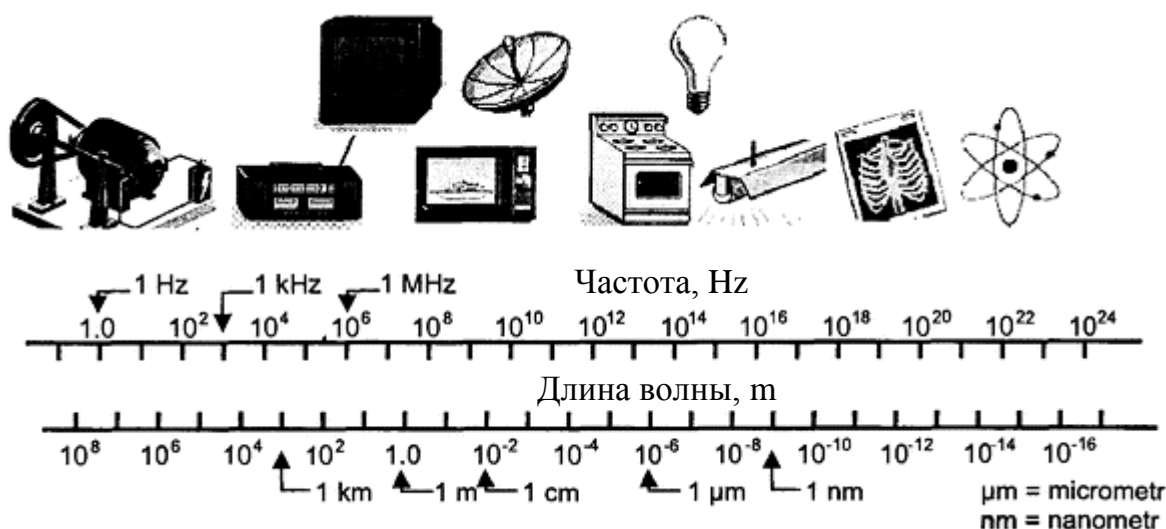


Рис. 13.1. Шкала электромагнитных волн

Для наглядности электрические и магнитные поля принято изображать в виде силовых линий. Силовые линии не являются реально существующими физическими величинами, а лишь помогают графически отобразить то, что не имеет ни формы, ни цвета, ни запаха. Касательная к силовой линии указывает направление силы, действующей на электрический заряд или магнитный диполь, а плотность расположения силовых линий – на величину напряженности поля.

Например, на рис.13.2 показано магнитное поле вокруг проводника с током и электрическое поле, образованное двумя точечными зарядами.

Длина волны микроволнового поля – величина того же порядка, что и компоненты электрических схем, поэтому последние очень сильно влияют на его распределение. Если в СВЧ-цепь включен резистор, то его ориентация в пространстве, размеры и длина выводов имеют такое же значение, как и номинал, а в некоторых случаях и более важное. Такие компоненты, как конденсаторы и индуктивности, вообще выполняются на СВЧ-платах в виде утолщения или сужения токоведущего проводника.

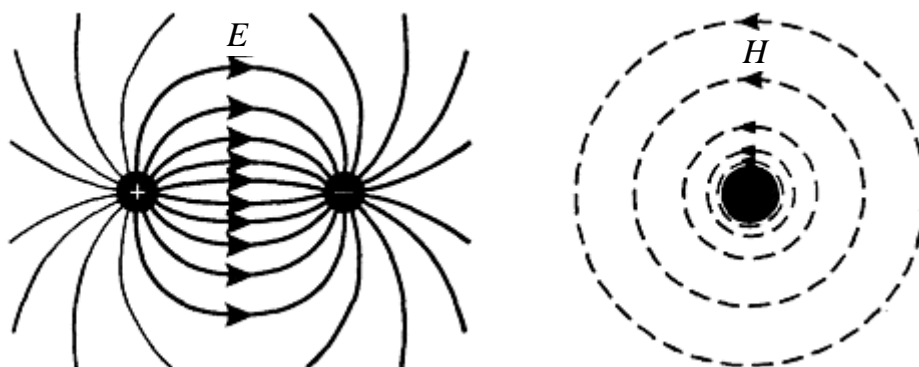


Рис. 13.2. Силовые линии электрического поля E , образованные двумя разноименными точечными зарядами и магнитные силовые линии вокруг проводника с током H

В этом есть некоторое преимущество, поскольку многие пассивные элементы технологически можно выполнить очень легко и с минимальными затратами.

Например, колебательная система магнетрона, используемого в микроволновых печах, представляет собой медную штампованную болванку со специальными отверстиями. Аналогичная конструкция на более низких частотах потребовала бы не одного десятка конденсаторов и индуктивностей. В данном случае некоторая простота в изготовлении перекрывается сложностью на этапе расчета и конструирования. Это одна из причин, которые сдерживают широкое распространение микроволновой техники. Есть и другие, не менее важные.

Большую сложность представляет проведение измерений на сверхвысоких частотах. Например, волновое сопротивление, хотя оно и измеряется в омах, невозможно измерить омметром.

Электрические параметры элементов микроволновой техники носят распределенный характер. Если в радиотехническом колебательном контуре электрическая энергия сосредоточена в конденсаторе, а магнитная в катушке индуктивности, то в СВЧ-резонаторе, выполняющем ту же функцию, электрические и магнитные поля переплетены между собой и отделить емкость от индуктивности, за исключением отдельных специфических случаев, не представляется возможным.

Еще одно препятствие на пути микроволновой техники лежит в области теории. В классической электротехнике существует ряд фундаментальных законов, таких, как закон Ома, законы Кирхгофа и др., с помощью которых можно рассчитать электрическую цепь. Иногда это просто, иногда очень просто, а иногда сверхсложно, но тем не менее можно.

Однако в СВЧ-диапазоне применение этих законов в чистом виде, как правило, невозможно. Ранее отмечалось, что радиоволны и видимый свет имеют одну и ту же физическую природу. Однако никому не придет в голову измерять яркость солнечного света в вольтах или амперах. В свою очередь, законы оптики трудно использовать при конструировании электрического чайника. В ограниченном применении физических законов нет ничего необычного. В природе подобные явления встречаются на каждом шагу. Например, в механике в свое время было обнаружено, что при скоростях, близких к скорости света, не выполняются законы Ньютона, длительное время считавшиеся незыблемыми. И только после появления теории относительности Эйнштейна, дополнившей механику Ньютона, все стало на свои места. Оказалось, что существует более общий закон природы, включающий в себя закон Ньютона как составную часть.

Подобная же ситуация сложилась в электродинамике. Существуют уравнения Максвелла, более полно описывающие процессы, связанные с электромагнитным полем во всем спектре электромагнитных колебаний. Законы классической электротехники, как и законы оптики, можно считать частными случаями уравнений Максвелла.

В свою очередь, и уравнения Максвелла не являются универсальными. При электромагнитных взаимодействиях элементарных частиц вступают в силу законы квантовой механики, дополняющие уравнения Максвелла. Вполне возможно, что через некоторое время и законы квантовой механики также придется рассматривать как частный случай более общей теории.

Уже давно ученые пытаются вывести единую теорию поля, объединяющую все известные виды взаимодействий: гравитационное (описывающее силы притяжения), электромагнитное, сильное и слабое (последние проявляются на уровне атомного ядра). Возникает вопрос, зачем вообще использовать большое количество частных законов, не проще ли пользоваться одним универсальным? Но проблема в том, что чем более общий характер носит тот или иной закон природы, тем сложнее его практическое использование.

Например, в низкочастотной электронике используются намного более простые физические законы, которые можно теоретически вывести из уравнений Максвелла, но большинство из них были экспериментально открыты до того, как Максвелл создал свои уравнения.

Как уже отмечалось, микроволновый диапазон – это та часть электромагнитного спектра, где классическая электротехника уже не работает, а от-

носителем простые законы оптики еще не работают. Поэтому при решении электродинамических проблем в указанном диапазоне приходится либо изощряться, приспособляя законы оптики и классической электротехники к СВЧ, либо пытаться решать уравнения Максвелла, что в некоторых случаях приносит свои плоды. По Максвеллу источником магнитного поля могут служить либо протекающий ток, либо меняющееся во времени электрическое поле. В некотором смысле это сходные вещи, поскольку электрический ток представляет собой движение электрических зарядов, а каждый движущийся заряд меняет окружающее электрическое поле и тем самым создает вокруг себя магнитное поле. Это объясняет существование магнитного поля вокруг проводников на постоянном токе. Оно создано совокупностью всех движущихся по проводнику зарядов.

В низкочастотной электронике принято считать, что источником электрического поля служат электрические заряды. В этом случае силовые линии поля исходят с поверхности заряда или сходятся на нем. Система уравнений Максвелла это не отвергает, однако помимо этого может существовать такая конфигурация электрического поля, когда его силовые линии замкнуты сами на себя, аналогично магнитным силовым линиям. Подобное поле может существовать только в динамике, и чем быстрее происходит изменение магнитного поля, тем благоприятнее условия для возникновения электрического. Именно поэтому на низких частотах полевые эффекты практически не проявляются и ими можно пренебрегать. Наличие кольцевого электрического поля создает возможность для возникновения и распространения радиоволн. Допустим, имеется проводник, по которому протекает высокочастотный ток. Вокруг этого проводника, следовательно, будет существовать быстро изменяющееся магнитное поле. Это, в свою очередь, приведет к возникновению кольцевого электрического поля, меняющегося с той же частотой. Последнее породит магнитное поле, и так до бесконечности. Исходный проводник с током, являющийся антенной, только инициирует процесс, а дальше все происходит само собой. Энергия электрического поля переходит в магнитную энергию и наоборот. Причем весь этот процесс не стоит на месте, а распространяется с максимально допустимой скоростью 300 000 км/с.

13.3. Микроволновая передача и средства связи

Информацию можно отправить, преобразовав ее в электромагнитный сигнал, и этот сигнал будет распространяться по какой-либо среде, например, по витой паре телефонной линии. Чаще всего используются линии на основе витой пары, коаксиальные кабели и кабели из оптоволокна; кроме того, применяют микроволны, распространяющиеся по Земле или в околоземном пространстве (спутниковые каналы). Предельно достижимая скорость передачи

данных, а также скорость, на которой возникают ошибки, зависят от природы сигнала и типа среды.

Передача информации представляет собой нечто большее, чем просто ввод сигнала в среду. Необходимо определить методики преобразования информации в электромагнитные волны. Имеются различные способы выполнения преобразования, их выбор определяется производительностью и надежностью. Более того, успешная передача информации подразумевает высокую степень взаимодействия различных элементов. Требуется согласовать интерфейс между устройством и средой передачи данных. Необходимо использовать средства управления потоком информации и восстановления после потерь или повреждений данных. Последние функции реализуются протоколом управления каналом передачи данных.

13.4. Сверхвысокочастотная терапия

Сверхвысокочастотная терапия (СВЧ-терапия) – метод электролечения, основанный на применении электромагнитных излучений с частотой от 300 МГц до 30 кГц. На практике для СВЧ-терапии используются два вида СВЧ-волн – сантиметровые и дециметровые.

При сантиметрововолновой терапии (СМВ-терапия, микроволновая терапия) применяют микроволны – электромагнитные излучения с частотой 2375 МГц и длиной 12,6 см. При воздействии на поверхность тела (контактным путем или дистанционно) энергия СМВ-излучения в наибольшей степени поглощается тканями с максимальным содержанием воды (кровь, лимфа, мышцы), в связи с чем глубина ее проникновения в тело составляет 5 см. Поглощенная энергия вызывает образование в тканях тепла (главным образом в мышцах, а также в коже и подкожной клетчатке), которое является основным действующим фактором этого лечебного метода.

При дециметрововолновой терапии (ДМВ-терапия) используют волны с частотой 460 МГц и длиной 65 см. Поскольку такая длина волны несоизмерима с толщиной подкожной клетчатки, значительно уменьшается отражение волн от поверхности тела и устраняется зависимость количества отраженной и поглощенной энергии от толщины подкожной клетчатки. Исключается также перегрев тканей, возможный при СМВ-терапии; уменьшается поглощение энергии тканями, а следовательно, увеличивается глубина ее проникновения: для тканей с большим содержанием воды – 3,6 см, для тканей, бедных водой, – 26,2 см; для тканей организма в целом – 9 см. Тепло при ДМВ-терапии более равномерно распределяется в тканях, постепенно ослабевая с глубиной. ДМВ-терапия способствует улучшению кровообращения, микроциркуляции, активизации обменных процессов, нормализации деятельности многих органов и систем; оказывает спазмолитическое, болеутоляющее, ги-

посенсibiliзирующее, противовоспалительное и иммуномодулирующее действие, улучшает функциональное состояние центральной и периферической нервной систем; способствует регенерации тканей.

Вопросы для самопроверки

1. Какие электронные приборы называются микроволновыми?
2. Каковы частоты и длины волн сверхвысокочастотного диапазона?
3. Какие теоретические и экспериментальные исследования в области распространения и взаимодействия волн стимулированы потребностями интегральной оптики СВЧ?
4. Каковы сферы применения микроволновой техники в настоящее время?
5. Какое соотношение связывает длину волны, скорость распространения волны и частоту колебаний электромагнитного поля?
6. Какова природа радиоволн?
7. Сравните скорости движения электрона и распространения электромагнитного поля по телефонному проводу.
8. От каких факторов зависит предельно достижимая скорость передачи данных?
9. Что представляет собой СВЧ-терапия?
10. Каковы параметры волн, используемых в сантиметровой и дециметровой терапии?

ЛЕКЦИЯ 14

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОВОЛНОВЫХ СИСТЕМ

План лекции

- 14.1. История создания лазера.
- 14.2. Полупроводниковые лазеры.
- 14.3. Нанолазеры.
- 14.4. Светоизлучающие диоды.
- 14.5. Оптоволоконные кабели.

Литература: [[12](#), [20](#), [23](#), [29](#)].

14.1. История создания лазера

Слово «лазер» составлено из начальных букв в английском словосочетании Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что в переводе на русский язык означает: *усиление света посредством вынужденного испускания*. Таким образом, в самом термине *лазер* отражена та фундаментальная роль процессов вынужденного испускания, которую они играют в генераторах и усилителях когерентного света. Историю создания лазера следует начинать с 1917 г., когда Эйнштейн впервые ввел представление о вынужденном испускании. Это был первый шаг на пути к лазеру. Следующий шаг сделал советский физик В. А. Фабрикант, указавший в 1939 г. на возможность использования вынужденного испускания для усиления электромагнитного излучения при его прохождении через вещество. Идея, высказанная В. А. Фабрикантом, предполагала использование микросистем с инверсной заселенностью уровней. Позднее, после окончания Великой Отечественной войны, В. А. Фабрикант вернулся к этой идее и на основе своих исследований подал в 1951 г. (вместе с М. М. Вудынским и Ф. А. Бутаевой) заявку на изобретение способа усиления излучения при помощи вынужденного испускания. На эту заявку было выдано свидетельство, в котором под рубрикой «Предмет изобретения» записано: «Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную по сравнению с равновесной концентрацию атомов, других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям».

Первоначально этот способ усиления излучения оказался реализованным в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ-диапазоне). В мае 1952 г. на



Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики (ныне академики) Н. Г. Басов и А. М. Прохоров сделали доклад о принципиальной возможности создания усилителя излучения в СВЧ-диапазоне. Они назвали его «молекулярным генератором» (предполагалось использовать пучок молекул аммиака). Практически одновременно предложение об использовании вынужденного испускания для усиления и генерирования миллиметровых волн было высказано в Колумбийском университете в США американским физиком Таунсом.

В 1954 г. молекулярный генератор, названный вскоре *мазером*, стал реальностью. Он был разработан и создан независимо и одновременно в двух точках земного шара – в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР (группой под руководством Н. Г. Басова и А. М. Прохорова) и в Колумбийском университете в США (группой под руководством Таунса). Впоследствии от термина «мазер» и произошел термин «лазер» в результате замены буквы «М» (начальная буква слова Microwave – микроволновой) буквой «L» (начальная буква слова Light – свет). В основе работы как мазера, так и лазера лежит один и тот же принцип – принцип, сформулированный в 1951 г. В. А. Фабрикантом. Появление мазера означало, что родилось новое направление в науке и технике. Вначале его называли *квантовой радиофизикой*, а позднее стали называть *квантовой электроникой*.

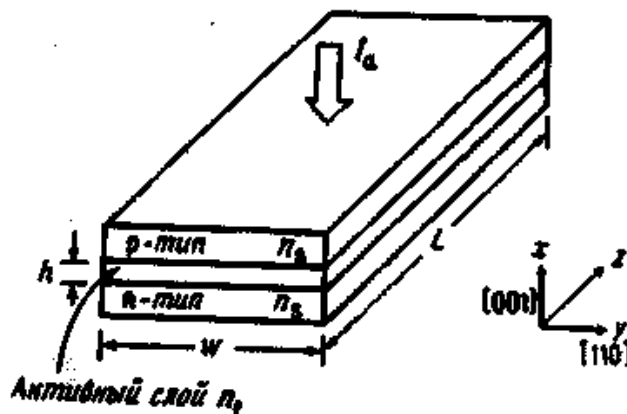
Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования в СССР и США вплотную подвели ученых в самом конце 50-х годов к созданию лазера. Успех выпал на долю американского физика Меймана. В 1960 г. в двух научных журналах появилось его сообщение о том, что ему удалось получить на рубине генерацию излучения в оптическом диапазоне. Так мир узнал о рождении первого «оптического мазера» – лазера на рубине. Первый образец лазера выглядел достаточно скромно: маленький рубиновый кубик (1х1х1 см), две противоположные грани которого имели серебряное покрытие (эти грани играли роль зеркал резонатора), периодически облучался зеленым светом от лампы-вспышки высокой мощности. Генерируемое излучение в виде красных световых импульсов испускалось через небольшое отверстие в одной из посеребренных граней кубика.

В том же 1960 г. американским физикам удалось получить генерацию оптического излучения в электрическом разряде *в смеси гелия и неона*. Так родился первый газовый лазер. Начиная с 1961 г., лазеры разных типов (твердотельные и газовые) занимают прочное место в оптических лабораториях. Осваиваются новые активные среды, разрабатывается и совершенствуется технология изготовления лазеров. В 1962–1963 гг. в СССР и США одновременно создаются первые *полупроводниковые* лазеры. Так начался новый, «лазерный» период оптики.

14.2. Полупроводниковые лазеры

На [рис.14.1](#) представлено схематическое изображение гетероструктурного лазера. Он состоит из активного слоя толщиной h , расположенного между покровными слоями.

Рис. 14.1. Планарный гетероструктурный лазер. Показатель преломления активного слоя обозначен нижним индексом f , а показатель преломления покровных слоев – индексом s .



Гетероструктурный лазер решил проблему создания эффективных источников, которые действуют при низких плотностях тока. В ранних лазерах на гомопереходах, состоящих из легированного p – n -перехода в GaAs, двойное ограничение с помощью двух покровных слоев отсутствовало, и эти устройства могли работать лишь в импульсном режиме при низких температурах.

Лазер с широкой площадью контакта, показанный на [рис. 14.1](#), представляет собой наипростейшую лазерную структуру. Самой простой структурой, которая обеспечивает ограничение оптического поля в поперечном направлении, является лазер с полосковой геометрией, показанной на [рис. 14.2](#).

Такой лазер называют лазером с диссипативным ограничением, у которого поперечная протяженность пучка определяется лишь током инжекции. Лазеры с диссипативным ограничением имеют меньшую эффективность, чем устройства, у которых ток инжекции, оптическая мода и возбужденные носители ограничены в одной и той же узкой области. Кроме того, поперечное ограничение оптического пучка может гарантировать распространение основной поперечной моды (в плоскости перехода и перпендикулярно ему), что важно для эффективной связи лазера с одномодовым волокном.

На [рис. 14.3](#) показано поперечное сечение лазера с V-образной полосковой канавкой в подложке. В отличие от лазеров, описываемых здесь, этот лазер изготавливается на подложке из p -GaAs, несмотря на то, что подложки n -типа предпочтительнее.

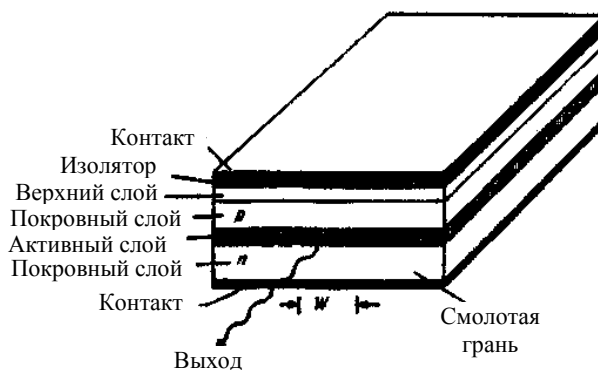


Рис. 14.2. Схема гетероструктурного лазера полосковой геометрии

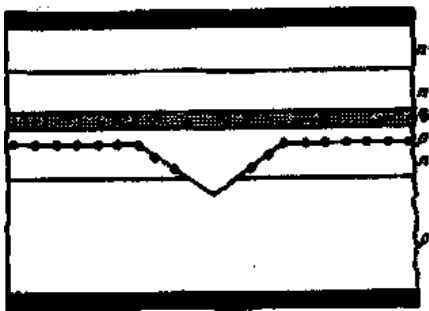


Рис. 14.3. Поперечное сечение лазера с V-образной полосковой канавкой в подложке ($x < y$). Точками показан блокирующий переход

в отличие от лазеров с диссипативным ограничением. Чтобы активная область имела более высокий показатель преломления и меньшую ширину запрещенной зоны, чем окружающие области, методы создания таких структур включают в себя разработку последовательности операций при нанесении слоев, совместимых с методом эпитаксиального роста.

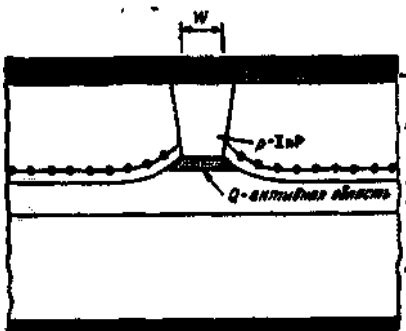


Рис. 14.4. Схематическое представление лазера на основе зарощенной мезополосковой структуры

Считают, что эпитаксиальный рост идет в этом случае лучше и омический контакт плоскости n -типа имеет более низкое сопротивление. Эти лазеры широко используются в оптических проигрывателях на компакт-дисках.

Все три способа ограничения тока, фотонов и носителей в обоих поперечных направлениях, как указано выше, могут быть реализованы с помощью гетероструктур зарощенного типа. Лазеры, которые включают в себя волновод для удержания фотонов в узкой полосе в плоскости p -перехода, называются лазерами с рефрактивным ограничением

Гетероструктурный InGaAsP-лазер на основе зарощенной мезополосковой структуры, показанный на [рис. 14.4](#), может быть изготовлен с помощью жидкофазной эпитаксии. Планарная слоистая структура, состоящая из активного слоя, окруженного p - и n -InP-покровными слоями, протравливается для образования мезополоски (мезы) с шириной активного слоя W .

Жесткость требований к технологическим операциям затрудняет создание таких лазеров с хорошими характеристиками, поэтому лазер на основе зарощенной мезополосковой структуры особо распространения не получил.

14.3. Нанолазеры

Нанолазеры – это полупроводниковые наногетероструктуры. Сама гетероструктура – это монокристалл, для создания которого используются два различных по своему химическому составу материала: в полупроводник вставлен чужеродный слой так, что граница между разными материалами является бездефектной ([рис. 14.5](#)). Именно это долгое время и считалось невозможным. Речь идет о тех самых двойных гетероструктурах, которые были созданы Жоресом Алфоровым в 1963 г.

Дальнейший прогресс в развитии полупроводниковых лазеров был связан с квантоворазмерными эффектами в тонких пленках, поскольку прогресс в снижении ключевого показателя эффективности – порогового тока – фактически остановился. Это обусловлено тем, что область потенциальных носителей заряда в узкозонном слое оставалась достаточно толстой. Однако, если этот слой сделать достаточно тонким, то электрон будет испытывать интерференцию (взаимодействовать с другими пучками электронов) подобно свету на тонкой бензиновой пленке. На практике это приводит к увеличению мощности светового потока гетеролазера, что создает возможность его использования в устройствах хранения данных. Появление новых физических свойств у нанолазера приводит к возможности записи на CD больших объемов информации.

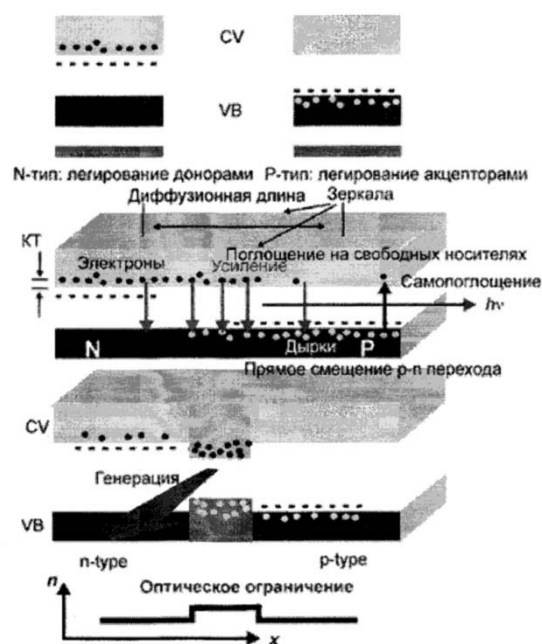


Рис. 14.5. Структура гомо- и гетеролазеров

14.4. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающий диод (СИД) представляет собой полупроводниковый электрически управляемый элемент. Электрические и излучательные свойства СИД зависят от механизма переноса носителей при смещении переходов в прямом и обратном направлениях и законов излучательной и безызлучательной рекомбинации в полупроводниках. В основе принципа действия СИД лежит преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого может находиться в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра.

Светодиодная структура представляет собой электронно-дырочный переход, в котором одна из областей, например *n*-, является эмиттерной, а другая – *p* – базовой. В базовую область дополнительно вводят нейтральную примесь, например кислород или азот. Введение этой примеси не приводит к образованию в полупроводниках дополнительных носителей заряда, но способствует генерации света. При подаче на *p-n*-переход прямого смещения начинается инжекция электронов из эмиттерной области в базовую (рис. 14.6).

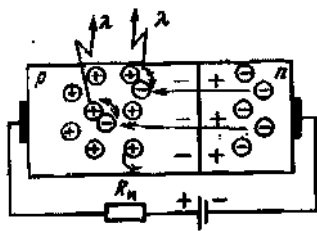


Рис. 14.6. Структура p - n -перехода светоизлучающего диода («+», «-» — знаки объемных зарядов p - n -перехода; (+), (-) — носители заряда: дырки, электрон

Одновременно выполняется процесс инжектирования дырок из базовой области в эмиттерную соответственно, и рекомбинации носителей происходят как в базовой, так и в эмиттерной областях, но базовая область является той частью полупроводниковой структуры, в которой происходит эффективное преобразование энергий инжектированных электронов в энергию излучения. Прямой ток, текущий через переход, складывается из токов электронов и дырок, которые определяют число актов излучательной (p -области) и безызлучательной в (n -области) рекомбинации. Чтобы повысить число излучательных рекомбинаций, эмиттер легируют сильнее, чем базу. Поток электронов из n -области в p -область больше потока дырок в n -область, что приводит к увеличению числа актов излучательной рекомбинации.

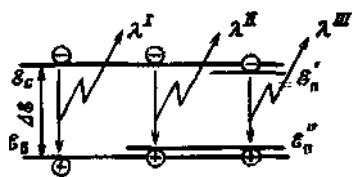


Рис.14.7. Энергетическая диаграмма рекомбинации электронов в базовой области светоизлучающего диода

В соответствии с квантовой теорией возбужденный электрон, инжектированный в базовую область, рекомбинируя с дыркой, испускает квант энергии излучения. При этом максимальная энергия, которая может выделяться при рекомбинации, равна ширине запрещенной зоны данного полупроводника:

$$\Delta\varepsilon = h\nu,$$

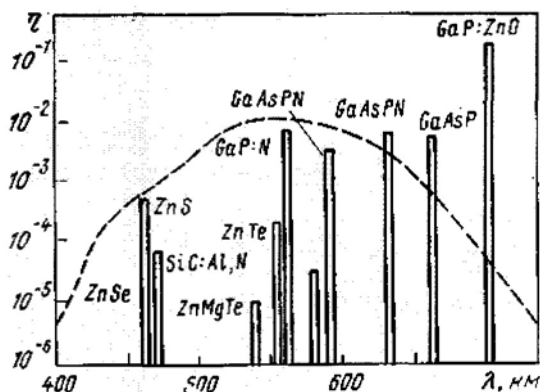


Рис. 14.8. Возможности изготовления светоизлучающих диодов из различных элементов

где h — постоянная Планка; ν — частота колебаний электромагнитной энергии (рис. 14.7).

Изготовить СИД можно из различных элементов. На рис. 14.8 приведена гистограмма, отражающая возможности изготовления СИД, излучающих в видимой части спектра.

Светоизлучающие диоды в зависимости от спектра излучения подразделяются на излучающие в видимой области спектра (0,45–0,68 мкм) и из-

лучающие в инфракрасной области спектра (выше 0,7 мкм).

В последнее время СИД широко применяются в устройствах контроля различных качественных и количественных параметров веществ и материалов. В этих устройствах наиболее часто используются СИД, излучающие в ближней ИК-области спектра. На этот диапазон спектра созданы СИД на основе твердых растворов антимонидов индия – галлия. Такие СИД имеют достаточно высокий КПД, хорошую герметизацию и направленный поток излучения. Однако внешний квантовый выход этих приборов ограничивается большими потерями излучения, связанными с поглощениями внутри кристалла и очень малыми критическими углами. Эти потери могут быть уменьшены, если одной из областей p – n -структуры придать форму сферы Вейерштрасса или использовать покрытия из халькогенидных стекол. Покрытия также выполняются в виде сферы Вейерштрасса или усеченного эллипсоида. Диаметр сферы выбирается в четыре раза больше линейных размеров СИД.

Одним из основных недостатков СИД является температурная зависимость интенсивности излучения. При увеличении температуры интенсивность излучения уменьшается, и максимум спектральной характеристики уходит в сторону длинных волн. В качестве примера на [рис. 14.9](#) приведен температурный разброс спектральных характеристик.

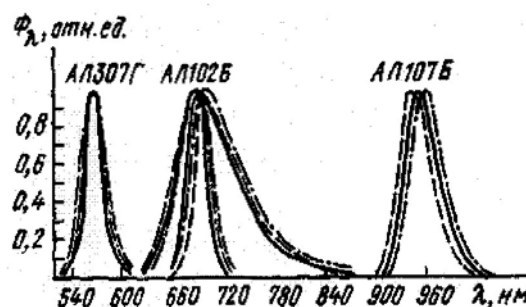


Рис. 14.9. Температурный разброс спектральных характеристик светодиодов

14.5. Оптоволоконные кабели

Информация по оптоволоконному кабелю передается не электрическим сигналом, а световым. Главный его элемент – это прозрачное стекловолокно, по которому свет проходит на огромные расстояния (до десятков километров) с незначительным затуханием. Структура оптоволоконного кабеля очень проста и похожа на структуру коаксиального электрического кабеля, только вместо центрального медного провода здесь используется тонкое (диаметром около 1–10 мкм) стекловолокно, а вместо внутренней изоляции – стеклянная или пластиковая оболочка, не позволяющая свету выходить за пределы стекловолокна. Это происходит благодаря режиму полного внутреннего отражения света от границы двух веществ с разным коэффициентом преломления ([рис. 14.10](#)).

Металлическая оплетка кабеля обычно отсутствует, так как экранирование от внешних электромагнитных помех здесь не требуется, однако в некоторых случаях ее все-таки применяют для механической защиты от окру-

жающей среды (такой кабель иногда называют броневым, он может объединять под одной оболочкой несколько оптоволоконных кабелей).

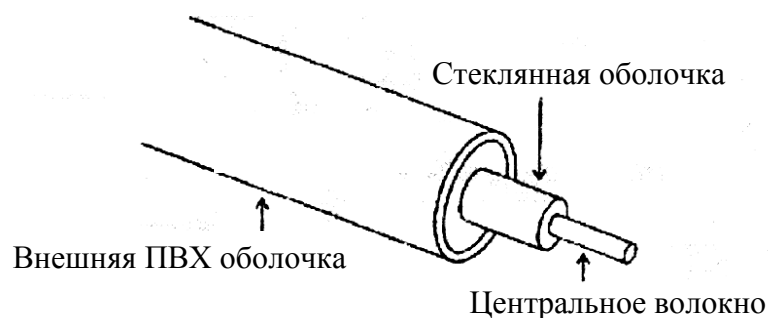


Рис. 14.10. Структура коаксиального электрического и оптоволоконного кабеля

Оптоволоконный кабель обладает исключительными характеристиками по помехозащищенности и секретности передаваемой информации. Никакие внешние электромагнитные помехи в принципе не способны исказить световой сигнал, а сам этот сигнал принципиально не порождает внешних электромагнитных излучений. Подключиться к этому типу кабеля для несанкционированного прослушивания сети практически невозможно, так как это требует нарушения целостности кабеля. Теоретически возможная полоса пропускания такого кабеля достигает величины 10^{12} Гц, что несравнимо выше, чем у любых электрических кабелей. Стоимость оптоволоконного кабеля постоянно снижается и сейчас примерно равна стоимости тонкого коаксиального кабеля. Однако в данном случае необходимо применение специальных оптических приемников и передатчиков, преобразующих световые сигналы в электрические и обратно, что порой существенно увеличивает стоимость сети в целом.

Типичная величина затухания сигнала в оптоволоконных кабелях на частотах, используемых в локальных сетях, составляет около 5 дБ/км, что примерно соответствует показателям электрических кабелей на низких частотах. Однако в случае оптоволоконного кабеля при росте частоты передаваемого сигнала затухание увеличивается очень незначительно, и на больших частотах (особенно свыше 200 МГц) его преимущества перед электрическим кабелем неоспоримы, он просто не имеет конкурентов.

Однако оптоволоконный кабель имеет и некоторые недостатки. Самый главный из них – высокая сложность монтажа (при установке разъемов необходима микронная точность, от точности скола стекловолокна и степени его полировки сильно зависит затухание в разъеме). Для установки разъемов применяют сварку или склеивание с помощью специального геля, имеющего такой же коэффициент преломления света, что и стекловолокно. В любом случае для этого нужна высокая квалификация персонала и специальные инструменты. Поэтому чаще всего оптоволоконный кабель продается в виде заранее нарезанных кусков разной длины, на обоих концах которых уже установлены разъемы нужного типа.

Хотя оптоволоконные кабели и допускают разветвление сигналов (для этого выпускаются специальные разветвители на 2–8 каналов), как правило, их используют для передачи данных только в одном направлении, между одним передатчиком и одним приемником, так как любое разветвление неизбежно сильно ослабляет световой сигнал, и если разветвлений будет много, то свет может просто не дойти до конца сети.

Оптоволоконный кабель менее прочен, чем электрический, и менее гибкий (типичная величина допустимого радиуса изгиба составляет около 10–20 см). Чувствителен он и к ионизирующим излучениям, из-за которых снижается прозрачность стекловолокна, т. е. увеличивается затухание сигнала. Чувствителен он также к резким перепадам температуры, в результате которых стекловолокно может треснуть. Поэтому оптические кабели выпускают из радиационно-стойкого стекла (стоят они, естественно, дороже).

Оптоволоконные кабели чувствительны также к механическим воздействиям (удары, ультразвук) – так называемый микрофонный эффект. Для его уменьшения используют мягкие звукопоглощающие оболочки.

Применяют оптоволоконный кабель только в сетях с топологией «звезда» и «кольцо». Никаких проблем согласования и заземления в данном случае не существует. Кабель обеспечивает идеальную гальваническую развязку компьютеров сети. В будущем этот тип кабеля, вероятно, вытеснит электрические кабели всех типов или, во всяком случае, сильно потеснит их. Запасы меди на планете истощаются, а сырьё для производства стекла более чем достаточно.

Существуют два различных типа оптоволоконных кабелей:

многомодовый, или мультимодовый, кабель, более дешевый, но менее качественный;

одномодовый кабель, более дорогой, но имеющий лучшие характеристики.

Основные различия между этими типами связаны с разным режимом прохождения световых лучей в кабеле.

В одномодовом кабеле практически все лучи проходят один и тот же путь, в результате чего все они достигают приемника одновременно, и форма сигнала практически не искажается. Одномодовый кабель имеет диаметр центрального волокна около 1,3 мкм и передает свет только с такой же длиной волны (1,3 мкм). Дисперсия и потери сигнала при этом очень незначи-

тельны, что позволяет передавать сигналы на значительно большее расстояние, чем в случае применения многомодового кабеля. Для одномодового кабеля применяются лазерные приемопередатчики, использующие свет исключительно с требуемой длиной волны. Такие приемопередатчики пока еще сравнительно дороги и не слишком долговечны. Однако в перспективе одномодовый кабель должен стать основным из-за своих хороших характеристик.

В многомодовом кабеле траектории световых лучей имеют заметный разброс, в результате чего форма сигнала на приемном конце кабеля искажается. Центральное волокно имеет диаметр 62,5 мкм, а диаметр внешней оболочки – 125 мкм (это иногда обозначается как 62,5/125). Для передачи используется обычный (не лазерный) светодиод, что снижает стоимость и увеличивает срок службы приемопередатчиков по сравнению с одномодовым кабелем. Длина волны света в многомодовом кабеле равна 0,85 мкм. Допустимая длина кабеля достигает 2–5 км. Многомодовый кабель считается основным типом оптоволоконного кабеля, так как он дешевле и доступнее.

Задержка распространения сигнала в оптоволоконном кабеле не сильно отличается от задержки в электрических кабелях. Типичная величина задержки для наиболее распространенных кабелей составляет около 4–5 нс/м.

Вопросы для самопроверки

1. Каков смысл термина «лазер»?
2. Каков вклад отечественных ученых в создание первого твердотельного лазера?
3. Когда начался «лазерный» период оптики?
4. Что представляет собой лазер на двойной гетероструктуре (ДГС-лазер)?
5. Что представляет собой нанолазер?
6. Какова роль светоизлучающих диодов в развитии микроволновых систем?
7. Каким сигналом передается информация по оптоволоконному кабелю?
8. Какова структура оптоволоконного кабеля и его недостатки?
9. Каковы характеристики оптоволоконного кабеля по помехозащищенности и секретности передаваемой информации?
10. Каковы принципиальные различия одномодового и многомодового кабеля?

ЛЕКЦИЯ 15

СИСТЕМЫ СВЯЗИ

План лекции

- 15.1. Системы телевизионного вещания.
- 15.2. Спутниковая связь.
- 15.3. Мобильная связь.
- 15.4. Сотовая связь.
- 15.5. Оптоэлектронные системы.

Литература: [[12](#), [19](#), [20](#), [23](#)].

15.1. Системы телевизионного вещания

Для ТВ вещания используются метровый и дециметровый диапазоны волн электромагнитных колебаний, соответствующие очень высоким и ультравысоким частотам, которые для удобства называются ультракороткими волнами, или УКВ.

Сигналы ТВ-программ передаются абонентам (телезрителям) в основном с помощью наземной ТВ-передающей сети, систем кабельного телевидения (СКТВ) и системы непосредственного ТВ-вещания (НТВ), использующей связные искусственные спутники Земли (ИСЗ), находящиеся на геостационарной орбите (ГСО).

Наземная ТВ передающая сеть состоит из телецентров, работающих совместно с радиотелевизионными передающими станциями (РТПС), ТВ ретрансляторов и технических средств передачи ТВ-сигналов на большие расстояния. Телецентры представляют собой комплексы радиотехнической аппаратуры, помещений и служб, необходимых для создания ТВ-программ. С телецентров сформированные ТВ-сигналы непосредственно передаются на РТПС. В России используются 350 РТПС с передатчиками мощностью 1 кВт и более, причем 300 из них являются многопрограммными, и 10 000 РТПС с передатчиками мощностью менее 1 кВт, из которых около 4 000 многопрограммные. Основным назначением ТВ-ретрансляторов является обеспечение более равномерного покрытия густонаселенной территории ТВ-вещанием. ТВ-ретрансляторы требуются, как правило, в двух случаях: во-первых, вне зоны уверенного приема основной мощности РТПС и, во-вторых, внутри зоны в местах, в которых по географическим причинам сигнал основной станции ослаблен и не обеспечивает удовлетворительного качества приема. Около 1 000 ретрансляторов имеют передатчики мощностью более 1 кВт, а 12 000 – передатчики мощностью менее 1 кВт. Около 10 000 ретрансляторов имеют спутниковые приемные антенны.



Распределение сигналов ТВ-программ на большие расстояния по территории России осуществляется с помощью разветвленной сети радиорелейных линий (РРЛ) и спутниковых систем связи «Орбита», «Экран», «Москва», причем наземная распределительная сеть включает в себя свыше 300 тыс. каналокилометров РРЛ.

Принципы построения СКТВ – это системы приема и распределения значительного числа сигналов высококачественных ТВ-программ большому числу абонентов по кабельным линиям связи. В районах с низкой напряженностью электромагнитного поля, в условиях многолучевого распространения радиоволн (в больших городах с разноэтажными зданиями, горных, холмистых районах) использование СКТВ оказывается единственно возможным техническим решением, позволяющим обеспечить высококачественный прием цветных ТВ-программ.

Известны три основные структуры построения СКТВ: древовидная, радиальная, кольцевая. Древовидная схема распределительной сети СКТВ, обеспечивающая экономное расходование кабеля, по своей структуре напоминает крону дерева. При радиальном построении распределительной сети СКТВ от головной станции (ГС) к каждому абоненту прокладывается специальный кабель, по которому организуется передача ТВ-сигналов нескольких программ (схема подключения «основная звезда»). По конфигурации распределительная сеть СКТВ радиального типа аналогична телефонной сети, поэтому появляется возможность их объединения. Это упростит построение и удешевит эксплуатацию таких СКТВ, а в будущем позволит организовать единую универсальную сеть двусторонней широкополосной связи с абонентами. Для организации двустороннего обмена между абонентами может применяться система с кольцевой схемой распределения ТВ-сигналов. В этом случае магистральный кабель прокладывается по кольцевой трассе, т. е. вход и выход кабеля заводятся на ГС. При этом один и тот же магистральный кабель может использоваться для организации двусторонней связи. Основным недостатком СКТВ кольцевого типа заключается в невозможности одновременной передачи по магистральному кабелю достаточно большого количества различных ТВ-сигналов.

Для организации многопрограммного телевизионного вещания целесообразна замена традиционного наземного способа передачи ТВ-сигналов, в том числе и цифровых, микроволновой распределительной ТВ-системой с низким уровнем излучения электромагнитных волн. На практике используются различные варианты микроволновых распределительных ТВ-систем, которые соответственно имеют следующие названия:

MMDS-Multichannel Microwave Distribution System – многоканальная микроволновая система распределения;

LMDS-Local Multipoint Distribution System – локальная многоточечная система распределения;

MVDS-Multipoint Video Distribution System – многоточечная система распределения ТВ программ. Часто подобные системы называются сотовыми системами телевещания (системы Cellular Vision).

Разница в названиях данных систем весьма условна, поскольку рекомендации для них разрабатывались в разных странах, находящихся на различных континентах. Основные преимущества сотовых систем телевидения заключаются в следующем:

- высокое качество сигналов и практически полное отсутствие «мертвых» зон за счет выбора размеров соты (ячейки) в пределах от 1 до 6 км;
- возможность для абонентов выбора большого числа ТВ-программ при наличии в сети множества сот;
- высокое качество сигналов из-за сравнительно низкого уровня помех в выделенных для этих систем диапазонах частот (25–45 ГГц);
- относительно низкая стоимость развертывания сети сотового телевидения в условиях больших городов по сравнению с монтажом и эксплуатацией гибридных оптико-коаксиальных систем кабельного телевидения.

Частным случаем сотовых систем телевидения является система MMDS, которая представляет собой широкополосный передающий комплекс, осуществляющий трансляцию передаваемой на его вход информации в полосе частот шириной 200 МГц. Она аналогична радиорелейной линии, но отличается тем, что предназначена для охвата ТВ-вещанием больших территорий и площадей. В России для систем MMDS выделена полоса частот 2 500–2 700 МГц при условии использования амплитудной модуляции.

В состав передающего комплекса входит один или несколько радиопередатчиков, сумматоры, линии связи между радиопередатчиками и передающей антенной, одна или несколько передающих антенн.

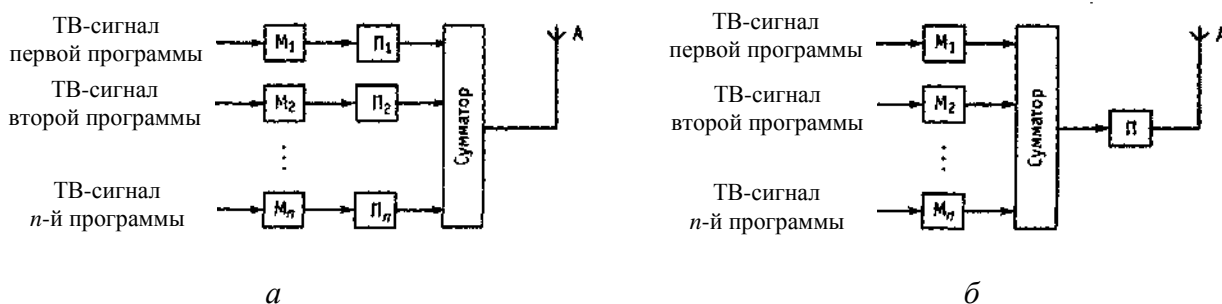


Рис. 15.1. Функциональная схема системы MMDS при использовании
а – одноканальных радиопередатчиков; б – многоканальных радиопередатчиков

В практике проектирования и монтажа систем MMDS используются два варианта построения структурных схем – одноканальный и многоканальный.

В одноканальном варианте для передачи n ТВ-программ применяются n передающих устройств, включающих модулятор и собственно радиопередатчик, а суммирование мощностей разных передатчиков осуществляется непосредственно в антенне.

В многоканальном варианте передаваемые n ТВ-сигналов различных программ сначала поступают на свои модуляторы, далее из них формируется

групповой сигнал, который модулирует широкополосный радиопередатчик, работающий на общую антенну.

Многоканальные, или групповые, передатчики целесообразно использовать в небольших городах и поселках городского типа, где радиус зоны покрытия не превышает 6 км.

Абонентское оборудование сотовых систем телевидения представляют собой традиционный спутниковый тюнер, работающий в диапазоне частот 950–2 050 МГц. Антенна выполняется вместе с СВЧ-приемником, осуществляющим первое преобразование частоты с целью ее понижения в едином блоке, представляющим собой легкое компактное устройство диаметром около 150 (в диапазоне 40 ГГц) или 250 мм (в диапазоне 23 ГГц).

15.2. Спутниковая связь

К концу XX – началу XXI столетия стали особенно актуальными системы глобальной персональной радиосвязи на основе применения спутников Земли. Внедрение этих систем и их интеграцию с наземными сетями подвижной связи обеспечивает досягаемость абонентов в любой точке земного шара путем простого набора телефонного номера.

Спутниковые системы связи предоставляют следующие виды услуг:

- радиотелефонная и факсимильная связь;
- передача больших массивов данных;
- организация персонального радиовызова;
- определение местоположения (координат) абонента;
- международный роуминг.

Наиболее популярными российскими системами спутниковой связи являются «Глобалсат», «Гонец», «Каскон», «Курьер», «Паллада», «Сигнал», «Банкир», «Ямал» №, «Урал» и др.

Помимо развития отечественных спутниковых систем связи, предусматривается дальнейшая эксплуатация международной системы Inmarsat, так как Россия является полноправным ее членом.

Для растущего российского рынка телекоммуникационных услуг важной задачей является активное использование спутниковых систем с целью обеспечения жизнедеятельности в отдаленных районах страны с неразвитой инфраструктурой связи. Передача всех видов информации в спутниковых системах связи ведется с высокой скоростью в цифровом виде при помощи широкополосных сигналов. Выделяются следующие основные этапы развития спутниковой связи:

- середина 1960-х гг. – запуск первых спутников связи; начало коммерческого использования спутников-ретрансляторов для многоканальной связи, передачи телепрограмм и т. п.;
- 1970-е гг. – создание систем подвижной спутниковой связи, спутникового телевидения коллективного пользования;
- 1980-е гг. – зарождение технологии VSAT (Very Small Aperture Terminal) – технологии малых спутниковых терминалов, устанавливаемых пря-

мо у пользователей, а также непосредственного спутникового телевизионного вещания;

- конец 1990-х гг. – начало массовой эксплуатации глобальных спутниковых систем связи;
- начало XXI в. – внедрение малых спутниковых телефонных аппаратов, совместимых со стандартами сотовых сетей (что позволяет охватить бесперебойной связью всю планету).

Спутниковая связь не имеет ограничений по привязке к конкретной местности Земли. Это делает ее потенциально самым перспективным видом связи, который может качественно изменить всю мировую индустрию телекоммуникаций.

В зависимости от вида предоставляемых услуг системы спутниковой связи можно разделить на три основных класса:

- системы пакетной передачи данных (телексных и факсимильных сообщений, компьютерных данных, доставки циркулярных сообщений, автоматизированного сбора данных о состоянии различных объектов, в том числе транспортных средств, и т. д.);
- системы радиотелефонной связи (международные стандарты требуют непрерывности связи в режиме реального времени, осуществляемой в цифровом виде, с условием задержки сигнала не более чем на 0,3 с);
- системы для определения местоположения (координат) потребителей (чаще всего используется во всех видах навигации; одной из лучших спутниковых систем считается ГЛОНАСС/НАВСТАР).

Развитию систем спутниковой связи способствуют следующие достижения науки:

- микроминиатюризация функциональных узлов коммуникационного оборудования;
- создание мощных солнечных батарей небольших размеров (с помощью применения арсенида галлия и фосфида индия); уменьшение массы спутников (благодаря внедрению различных композиционных материалов);
- разработка бортовых компьютеров на специализированных БИС (больших интегральных схемах), что обеспечивает высокоскоростную коммутацию при ретрансляции информационных потоков;
- применение методов многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), который основан на использовании широкополосных сложных сигналов.

Искусственные спутники Земли связного назначения широко используются для передачи различных сообщений, организации ТВ, телефонных, телеграфных и других каналов связи.

Основной принцип создания спутниковых систем связи заключается в размещении ретрансляторов на ИСЗ. Следовательно, спутниковая система связи представляет собой РРЛ с одной промежуточной станцией, размещенной на ИСЗ. При построении спутниковых систем связи используются идеи и принципы, реализуемые в РРЛ.

Движение ИСЗ определяется законом Кеплера, причем для точных расчетов орбиты спутника должно учитываться не только притяжение Земли, но и поля тяготения других небесных тел (Луны, Солнца и других планет).

Особый интерес представляет геостационарная орбита – круговая орбита, находящаяся в экваториальной плоскости ($i = 0$) и удаленная от поверхности Земли на расстояние около 36 000 км. Если запустить ИСЗ на такую орбиту, то период обращения спутника вокруг Земли будет равен 24 ч, т. е. периоду обращения Земли вокруг своей оси. При условии совпадения направления вращения Земли с направлением движения спутника по орбите такой спутник будет казаться неподвижным относительно земного наблюдателя, т. е. стационарным относительно Земли (геостационарным).

В настоящее время на ГСО находятся несколько сотен ИСЗ связи и вещания, что приводит к необходимости международного регулирования и координации использования этой орбиты во избежание взаимных помех между различными системами связи. В нашей стране на ГСО в настоящее время находятся ИСЗ типа «Горизонт», «Экран», «Экспресс», «Галс».

15.3. Мобильная связь

На рубеже XX–XXI вв. человечество вплотную подошло к реализации так называемых предельных задач в области развития телекоммуникаций – глобальных персональных систем связи. Глобальность связи обеспечивается созданием Всемирной сети связи, в которую интегрируются национальные (федеральные) и входящие в них региональные и ведомственные сети связи, что позволит абоненту пользоваться различными услугами связи в любой точке земного шара.

Преимущества систем мобильной связи состоят в следующем:

- освобождает абонента от необходимости присутствовать в строго определенном месте при проведении сеанса связи (по проводным телефонным линиям, с таксофонов и т. п.), что позволяет ему получать услуги связи в любой точке в пределах зон действия наземных или спутниковых сетей;
- предоставляет возможность пользоваться более удобной аппаратурой (портативными, удобными в обращении телефонами, трубками);
- позволяет абоненту быть доступным в любой момент для других абонентов;
- предоставляет абоненту дополнительные информационные услуги (передавать SMS-сообщения и др.).

Сети подвижной связи созданы с целью максимального удовлетворения потребностей их абонентов в услугах связи. Они должны обеспечивать связь на современном мировом уровне с возможностью выхода в телефонную сеть общего пользования. Радиотелефон перестал быть символом престижа и стал рабочим инструментом, позволяющим более эффективно использовать рабочее время, оперативно управлять производством и постоянно контролировать ход технологических, экономических и других процессов.

15.4. Сотовая связь

Современная сотовая связь в своем развитии прошла следующие этапы: система радиотелефонной связи (1930–1940-е гг.), сотовая связь первого поколения (1940–1980-е гг.), сотовая связь второго поколения, основанная на цифровых методах обработки сигнала (1980-е годы – начало XXI в.), сотовая связь третьего поколения (начало XXI века). Радиотелефоны первой системы радиотелефонной связи использовали обычные фиксированные каналы. Если канал связи был занят, абонент вручную переключался на свободный. Аппаратура была громоздкой и неудобной. С развитием техники системы радиотелефонной связи совершенствовались, в частности, уменьшались габариты устройств, осваивались новые частотные диапазоны, улучшалось базовое и коммутационное оборудование, появилась функция автоматического выбора свободного канала – транкинг (trunking).

В середине 1940-х годов американский исследовательский центр Bell Laboratories предложил идею разбиения всей обслуживаемой территории на небольшие участки, которые стали называться сотами (от англ. cell – ячейка, сота). Каждая сота должна была обслуживаться передатчиком с ограниченным радиусом действия и фиксированной частотой. Это позволило без взаимных помех использовать ту же самую частоту повторно в другой соте. Данное научно-техническое открытие легло в основу системы сотовой связи.

Использование новейших технологий и научных открытий в области связи и обработки сигналов позволило к концу 1980-х годов подойти к новому этапу развития систем сотовой связи – созданию систем второго поколения, основанных на цифровых методах обработки сигналов.

С целью разработки единого европейского стандарта цифровой сотовой связи для выделенного в этих целях диапазона 900 МГц в 1982 г. Европейская конференция администраций почт и электросвязи (CEPT) – организация, объединяющая администрации связи 26 стран, создала специальную группу Groups Special Mobile. Аббревиатура GSM дала название новому стандарту (позднее, в связи с широким распространением этого стандарта во всем мире, GSM стали расшифровывать как Global System for Mobile Communications). Результатом работы этой группы стали опубликованные в 1990 г. требования к системе сотовой связи стандарта GSM, в котором используются самые современные разработки ведущих научно-технических центров: временное разделение каналов; шифрование сообщений и защита данных абонента; использование блочного и сверточного кодирования; новый вид модуляции – GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).

Дальнейшее развитие сотовой подвижной связи осуществляется в рамках проектов систем третьего поколения, которые отличаются унифицированной системой радиодоступа, объединяющей существующие сотовые и «бесшнуровые» системы с информационными службами XXI в. Они имеют архитектуру единой сети и предоставляют связь абонентам в различных условиях, включая движущийся транспорт, жилые помещения, офисы и т. д.

В Европе такая концепция, получившая название UMTS (универсальная система подвижной связи), предусматривает объединение функциональных возможностей существующих цифровых систем связи в единую систему третьего поколения FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System).

15.5. Оптоэлектронные системы

Оптоэлектроникой называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические средства и методы.

В оптоэлектронике световой луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях. Оптоэлектронными приборами называют устройства, излучающие и преобразующие излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующие для своей работы электромагнитные излучения, частоты которых находятся в этих областях.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) – устройства и системы, основу которых составляет гибкий волоконно-оптический световод (в виде кабеля), сочлененный с излучателем на одном (передающем) конце и с фотоприемником – на другом (приемнике). Они выполняют функции линий связи и передачи данных: это сверхкороткие линии (до 1 м) для обмена информацией в высоковольтной аппаратуре; короткие бортовые и внутриобъектовые ВОЛС (5–1000 м); линии средней протяженности (1–20 км), составляющие основу межмашинных интегральных сетей передачи данных и разветвленных внутригородских АТС; магистральные ВОЛС длиной в тысячи километров, в том числе меж- и трансконтинентальные, а также подводные.

Волоконный световод (основа ВОЛС) – тонкая гибкая нить, изготовленная из прозрачного материала таким образом, что ее центральная часть оптически более плотная, чем периферийные области. Вследствие этого луч света, направляемый на торец волокна, распространяется вдоль его оси и может пройти с малым затуханием значительное расстояние.

Физическую основу ВОЛС составляют процессы распространения оптических сигналов по волоконному световоду, а также светогенерационные и фотоэлектрические явления в излучателе и приемнике. Для технической реализации используются главным образом сверхчистые кварцевые световоды, полупроводниковые гетеролазеры и светодиоды на соединениях A^3B^5 , фотодиоды на основе кремния и соединений A^3B^5 .

Элементную базу ВОЛС составляют волоконно-оптические кабели, передающие и приемные устройства (модули), оптические соединители, разветвители, коммутаторы.

Преимущества ВОЛС:

1. Малое линейное затухание и искажение сигнала. Волокна уверенно обеспечивают длину межтрансляционного участка в 30–50 км (что на поря-

док превышает тот же показатель для коаксиальных металлических кабелей), в отдельных случаях – до 200 км и в перспективе – свыше 1 000 км. Очень важно, что потери в линии практически не зависят от частоты сигнала.

2. Сверхвысокая пропускная способность. Это объясняется прежде всего широкополосностью всех элементов ВОЛС (излучатель, волоконный тракт, фотоприемник), использованием принципа оптического мультиплексирования и возможность размещения в кабеле большого числа волокон. Представляется достижимой скорость передачи информации 10^{12} – 10 бит/с по одному кабелю.

3. Электрогерметичность. Волоконный световод не чувствителен к внешним электромагнитным воздействиям и сам практически не излучает в окружающее пространство. Этим обеспечивается помехозащищенность ВОЛС и скрытность передачи информации. Тем самым развитие ВОЛС открывает кардинальный путь решения проблемы электромагнитной совместимости.

4. Малые габариты и масса. Во-первых, диаметр типичного волоконного модуля составляет всего 0,3–0,5 мм, а площадь поперечного сечения светоканализируемой области (с учетом необходимых отражающей и защитной оболочек) может быть менее 10^{-5} см². Во-вторых, удельная масса используемых материалов (кварц) в несколько раз меньше, чем у металлов (медь, свинец); во многих случаях волоконный кабель не имеет защитного металлического экрана или этот экран более легкий.

5. Эксплуатационные преимущества. Оптоэлектронные принципы преобразования и передачи информации в ВОЛС, использование кварца в качестве передающей среды обуславливают наличие электрической развязки между входом и выходом линии; однонаправленность потока информации, отсутствие обратной реакции приемника на передатчик; пожаро- и взрывобезопасность (исключение искрения и самосгорания); стойкость волокон к коррозии; простоту прокладки волоконно-оптического кабеля.

6. Низкая стоимость. Очень важен, прежде всего, неограниченный сырьевой ресурс для производства кварцевых волокон, тогда как запасы меди и свинца непрерывно истощаются. Большая длина межретрансляционного пролета и высокая информационная емкость оптических каналов резко сокращает аппаратные расходы по сравнению с проводными связными системами.

По оптической связи могут успешно передаваться фактически все виды сообщений: телефонные, телевизионные, потоки данных ЭВМ, управляющие сигналы систем автоматики и т. п. Характерно, что по одному и тому же каналу могут успешно передаваться как «быстрые», так и «медленные» сигналы в цифровой или аналоговой форме.

Вопросы для самопроверки

1. Какой диапазон волн используется для телевизионного вещания?
2. Каково устройство наземной телевизионной передающей сети?
3. Какие спутниковые системы связи осуществляют распределение сигналов ТВ программ по территории России?
4. Каковы основные структуры построения систем кабельного телевидения?
5. Каковы основные преимущества сотовых систем телевидения?
6. Что представляет собой геостационарная орбита искусственного спутника Земли?
7. Каковы преимущества систем мобильной связи?
8. Какие этапы в своем развитии прошла сотовая связь?
9. Что представляет собой волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)? Каковы их преимущества?
10. Какие устройства составляют элементную базу волоконно-оптических линий связи?

ЛЕКЦИЯ 16

ТЕМПЕРАТУРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

План лекции

- 16.1. Введение.
- 16.2. Температурная стойкость и механизмы теплопередачи.
- 16.3. Способы теплоотвода.
- 16.4. Перспективные жидкие диэлектрики для охлаждения.
- 16.5. Криогенная электроника.
- 16.6. Влияние радиации на параметры электронных устройств.

Литература: [[13](#), [21](#), [27](#), [28](#)].

16.1. Введение

Стандартная электроника не предназначена для экстремальных условий применения. Только использование специальных компонентов и устройств может гарантировать высокую надежность.

Электронные системы, работающие в условиях особо низких или высоких температур, при повышенном уровне радиации или воздействии электрических, магнитных полей и т. п., называют экстремальной электроникой. Технологии, позволяющие создавать данные электронные системы, определяют как критические, например, нанотехнологии, с помощью которых могут быть созданы биологические или твердотельные объекты размером в несколько десятков атомов. Современные развитые страны, стремящиеся к мировому приоритету в экономике и политике, уделяют особое внимание этим технологиям. К примеру, сенат США принял новую национальную программу по критическим и нанотехнологиям с бюджетом более 100 млрд долларов, сравнимую по объему финансирования с программой НАСА. Для российского прорыва в этой области науки в Новосибирском государственном техническом университете создан Центр коллективного пользования материаловедения и нанотехнологии. Он является единственным в России вузовским подразделением, где имеется уникальное технологическое и аналитическое оборудование, позволяющее успешно осваивать все направления развития критических технологий экстремальной электроники.

Повышение надежности характеристик и радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ) является одной из важнейших задач при обеспечении длительных сроков активного функционирования радиоэлектронной аппаратуры атомных электростанций, космической и авиационной техники, специальной технологической, медицинской аппаратуры и других объектов.



16.2. Температурная стойкость и механизмы теплопередачи

Когда закончена проработка функциональных узлов, определен характер связей между функциональными блоками и процесс проектирования переходит к стадии поиска оптимального расположения компонентов на плате, необходимо рассчитать тепловой режим работы любого прибора. Если разрабатываемое устройство состоит из аналоговых и цифровых узлов, прецизионных измерительных схем и (или) силовых каскадов, то проблема тепловой стабилизации становится одной из важнейших, даже если это изделие и не будет работать в экстремальных условиях.

У аналоговых схем, где имеет значение каждый десяток микровольт, а отклонение сигнала от нормы в несколько милливольт – катастрофа, тепловая стабильность элементов крайне важна. В устройствах комбинированного типа погрешности, вызванные тепловыми шумами, накладываясь друг на друга, в конце концов, становятся одной из основных причин, ограничивающих их точность.

Ещё одна проблема – механические напряжения в конструктивных элементах печатной платы, деформация платы, отслаивание и разрыв проводников, микротрещины и ускоренное окисление металлических поверхностей. Поэтому к системе охлаждения полупроводниковых приборов вообще и источников питания в особенности следует относиться серьезно. Надо помнить, что при увеличении температуры на каждые 10 °С время безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) сокращается в среднем в два раза.

Тепловой режим ИС в РЭА определяется электрическим режимом работы, способами крепления изделия и отвода тепла от его корпуса. При этом имеют место три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение. При правильном тепловом конструировании используется по возможности наиболее полно каждый из этих видов передачи тепла.

Теплопроводность – это процесс передачи тепла, происходящий за счет обмена кинетической энергией между молекулами вещества и диффузии электронов в теле, имеющем неодинаковую температуру по объему, либо между двумя соприкасающимися телами с различной температурой. Перенос теплоты вследствие теплопроводности подчиняется закону Фурье. Рассматриваемая форма переноса теплоты в основном присуща твердым телам, в которых теплота распространяется передачей кинетической энергии от одних микрочастиц к другим путем соударений; перемещение самих частиц в твердом теле, естественно, исключено.

Теплопроводность имеет место также в жидкостях и газах (воздухе). В них теплота передается также путем перемещения частиц-носителей тепловой энергии. Такой способ называется *конвективным теплопереносом*. В первом случае теплота передается, а носители теплоты-частицы жидкости остаются на месте, в то время как во втором случае теплота переносится вместе с жидкостью. Таким образом, в жидких и газообразных средах теплопроводность проявляется в чистом виде лишь в том случае, когда наблюдается

прямая стратификация плотности. Конструкции выпускаемых изделий электронной техники обеспечивают, как правило, отвод тепла от p - n -перехода за счет рассеиваемой мощности путем теплопроводности.

Передача тепла конвекцией происходит в результате перемещения частиц теплоносителя и наблюдается только в жидких и газообразных средах. В зависимости от причины, побуждающей частицы жидкости перемещаться, различают свободную и вынужденную конвекции.

Свободной (естественной, плотностной) конвекцией называется движение жидкости (газа), вызываемое неоднородностью плотности частиц жидкости (газа), находящихся в поле тяготения. Поэтому свободно конвективный перенос теплоты обусловлен перемещением частиц жидкости лишь в силу изменения их плотности, что, в свою очередь, обусловлено нагреванием или охлаждением ее или изменением концентрации. Например, если воду в сосуде, находящуюся при температуре выше 4 °С, охлаждать сверху, то в воде возникнет свободная конвекция, т. е. активный перенос частиц воды снизу вверх. Одновременно будет происходить перенос более охлажденных частиц в обратном направлении. В этом случае наблюдается нестационарная свободная конвекция.

Вынужденной конвекцией называется движение жидкости (газа), вызываемое воздействием внешних сил (воздушный поток, насос и т. д.), а также однородного поля массовых сил в жидкости (уклон и т. д.). Таким образом, перенос теплоты вынужденной конвекцией обусловлен турбулентным перемешиванием водных или воздушных масс потока, а также связан с переносом теплоносителя. При вынужденной конвекции осуществляется перенос тепла, связанный, например, с течением водных и воздушных потоков. В отличие от свободной конвекции при вынужденной конвекции происходит полярный перенос водных масс, а не молекулярный, т. е. перенос больших объемов жидкости. Часто имеет место одновременно вынужденная и свободная конвекция.

Третья форма передачи теплоты (*излучение*) обусловлена лучистым (радиационным) теплообменом и совершается путем двойного превращения энергии: сначала из тепловой в электромагнитную в месте излучения, а затем, после того как она прошла весь путь в теплопрозрачной среде, обратно в тепловую в месте поглощения. Таким образом, эта форма передачи теплоты характеризуется тем, что часть энергии тела, определяемая температурой его поверхности, преобразуется в энергию теплового излучения и уже в таком виде передается в окружающее пространство. Встречая на своем пути другое тело, лучистая энергия частично отражается от его поверхности и частично поглощается им, т. е. проникает на некоторую его глубину, зависящую от прозрачности тела.

Скорости передачи теплоты указанными способами различны. Радиационным способом совершается практически мгновенная передача теплоты; так, в воздухе скорость передачи равна 300 000 км/с. При конвективном способе скорость передачи теплоты полностью зависит от скорости движения жидкости и может составлять 1–2 м/с.

16.3. Способы теплоотвода

Все способы и системы охлаждения полупроводниковых приборов по методу действия можно разделить на две основные группы: пассивный и активный методы. Для первого характерен естественный путь отвода тепла при помощи конвекции, теплопроводности и излучения. Для второго – принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, термоэлектроохладителей и омывающих жидкостей. В зависимости от степени нагрева компонентов, наличия места и допустимой рабочей температуры выбирается нужный способ.

Самый простой и потому часто применяющийся способ – пассивный теплоотвод с применением радиаторов. Этот метод основан на явлениях теплопроводности материалов и естественной конвекции. Размеры полупроводникового кристалла слишком малы, чтобы конвекция была достаточной для его системы охлаждения. Ее можно увеличить, если корпус полупроводникового прибора прикрепить к радиатору, многократно увеличивающему площадь поверхности охлаждаемой детали. Вследствие теплопроводности тепло от корпуса микросхемы или транзистора передается массивному металлическому радиатору.

Радиаторы различаются по материалу, способу изготовления и по конструкции. По материалу исполнения предпочтительнее устройства, выполненные из цветных металлов – алюминий, медь, их сплавы (поскольку эти материалы обладают наибольшей теплопроводностью). Лучше их только благородные металлы – серебро и т. п., но они, по понятным причинам, в данном качестве не используются. По конструктивному исполнению различают игольчатые и пластинчатые радиаторы или ребристо-пластинчатые. Игольчатые лучше работают при естественной конвекции. Другие типы предпочтительнее применять при принудительном обдуве воздухом. По способу производства принято различать радиаторы, выполненные методом горячего порошкового экструзирования (прессования), изготовленные фрезерованием из цельного куска металла, «складчатые» (сделанные из тонкой металлической ленты, сложенной в «гармошку»), а также полученные методом холоднойковки и составные (выполненные из элементов, изготовленных по различным технологиям и из различных металлов). По эффективности теплоотвода на первое место следовало бы поставить изделия, полученные фрезерованием, затем составные, если они сделаны с соблюдением технологических требований, складчатые и все остальные. (Примерно в том же порядке меняется и стоимость радиаторов: самые дорогие – точеные, фрезерованные, затем составные и т. д.)

Отвод тепла на массивный радиатор – лишь частичное решение проблемы системы охлаждения полупроводникового прибора. Если сам радиатор остывает за счет естественной конвекции, то при затрудненном обмене воздуха и малой разнице температур между радиатором и окружающей средой возможен перегрев кристалла. Требуется усиленная принудительная конвекция. Обдув радиатора воздушной струей от вентиляторов решает эту

проблему и значительно усиливает теплоотвод. Однако, газы, как известно, обладают крайне низкой теплоемкостью и теплопроводностью. По этим причинам в ряде случаев даже при сочетании обоих видов вентиляции не удастся добиться приемлемой температуры кристаллов.

Намного успешнее с задачей справляются жидкости, теплоемкость которых существенно выше. Система охлаждения при этом выглядит так: миниатюрный резервуар закрепляется на поверхности охлаждаемого чипа. Через шланг, с помощью микропомпы, охлаждающая жидкость перекачивается в герметичный наружный радиатор. Он, в свою очередь, может обдуваться струей воздуха от специального вентилятора. Эффективность такой системы заметно выше, чем у обычных вентиляционных систем.

Особый тип жидкостной системы охлаждения – тепловые трубки. Как отдельный самостоятельный тип он не встречается. Тепловые трубки всегда входят в состав систем иного рода в качестве средства повышения эффективности теплопередачи. Трубка выполняется из материалов с высокой теплопроводностью и внешне не отличается от обычных медных трубок. Внутри она полая, а ее стенки покрыты пористым материалом, по которому жидкий теплоноситель стекает от радиатора к горячему концу. Нагреваясь, жидкость испаряется, обеспечивая тем самым теплоотвод от охлаждаемого полупроводникового прибора. Горячий пар по внутренней полости трубки свободно поднимается вверх, к радиатору, где, остывая, вновь превращается в жидкость, впитывается пористым материалом стенок и стекает к горячему концу. Для того чтобы обеспечить движение жидкости в трубке при любой ее ориентации в пространстве, нужно как-то преодолеть силу тяжести. Покрывая стенки пористым материалом с капиллярной структурой, удастся достичь подъема жидкости даже против действия сил притяжения. Нет никаких насосов и помп. Тепло выносится из проблемного места по герметичной трубке, и при этом нет никакого шума и потребления энергии. Однако малая длина трубок (максимум 30 см) сильно мешает широкому распространению данной технологии. Чаще всего тепловые трубки встраивают в радиаторы кулеров, что позволяет им более эффективно отводить тепло от разогретой поверхности. В результате удастся немного повысить общую эффективность системы охлаждения при сокращении габаритов радиатора.

Еще одна современная технология системы охлаждения – применение термоэлектроохладителей, действие которых основано на эффекте Пельтье. При этом при подаче постоянного тока в цепь, составленную из двух разнородных проводников, в местах контактов, в зависимости от направления тока, будет выделяться или поглощаться тепло. Количество теплоты зависит от свойств материалов и величины тока. Часто оказывается, что для надежной системы охлаждения полупроводниковых приборов вполне достаточно простого модуля. Но иногда для достижения большей эффективности теплоотвода модули каскадируются. В этом случае на горячую поверхность первого модуля устанавливается второй чуть большего размера. Иногда собирается целая пирамида модулей. С ее помощью можно достичь разницы температур в 70–75 °С при температуре окружающей среды 25 °С.

У этого метода охлаждения очень широкие перспективы, так как он лишен многих недостатков, присущих остальным способам. Но, пожалуй, главным преимуществом данной технологии является возможность применения термоэлектромодулей не только для системы охлаждения, но и для стабилизации температуры объекта, так как модуль Пельтье одновременно может служить и системой охлаждения и нагрева. Достаточно лишь переключить полярность источника питания.

Пока самой популярной системой охлаждения радиоэлектронной аппаратуры являются системы на базе различных типов вентиляторов. Причины такой популярности – сравнительно низкая стоимость вентиляционных систем, а также их малая потребляемая мощность при достаточной эффективности и надежности.

16.4. Перспективные жидкие диэлектрики для охлаждения

Возникшая после запрета хлордифенилов проблема поиска подходящего пожаробезопасного жидкого диэлектрика до сих пор не решена. В каждой стране ее решают по своему. В Великобритании пытаются внедрять диэлектрики на основе эфиров пентаэритрита, в Германии – диэлектрики на основе эфиров фталевой кислоты. В России и некоторых других странах наиболее перспективными для применения считаются силиконы (силоксаны) или кремнийорганические жидкости. Это громадный класс жидкостей с различными электро- и теплофизическими характеристиками. Хорошо очищенные жидкости обладают $\varepsilon = 2,5\text{--}3,5$; $\text{tg}\delta < 10^{-3}$; $\rho > 10^{12}$ Ом·м. Обычно у этих соединений повышенная, по сравнению с маслом, температура вспышки. Некоторые жидкости на основе модифицированных полиметилэтилсилоксанов имеют температуру вспышки около 300 °С. К недостаткам силоксанов относится то, что исследованные кремнийорганические жидкости не могут обеспечить пожаробезопасность и, следовательно, не могут полностью заменить хлордифенилы. Кроме того, они в несколько раз дороже трансформаторного масла.

Очень интересен класс фторорганических жидкостей. В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. По сути, это эквивалент обычным органическим жидкостям, только вместо атома водорода везде присутствует атом фтора. Наличие фтора на месте водорода означает, что вещество полностью окислилось, так как фтор является самым сильным окислителем – более сильным, чем кислород. Поэтому фторуглеродные жидкости инертны по отношению к любым воздействиям, в том числе стабильны под действием электрического поля и температуры.

Высокие характеристики фторуглеродных жидкостей важны для применений в технике. Основное препятствие к более широкому использованию – сравнительно высокая цена. В настоящее время имеется задел по разработке новой, более дешевой технологии получения перфторуглеродов.

Рассмотрим численные значения некоторых электрофизических параметров фторуглеродов. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1,8-2$; $\operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$; $\rho > (10^{12}-10^{15})$ Ом·м, электрическая прочность – до 500 кВ/см. Из других свойств следует отметить не только негорючесть, но и термостабильность до температуры более 400 °С. Хотя теплопроводность фторуглеродов в два-три раза ниже, чем у трансформаторного масла, исключительно высокий коэффициент температурного расширения приводит к возникновению мощных конвективных потоков. При этом конвективный теплоотвод оказывается в 3–4 раза выше, чем у трансформаторного масла.

В России эти жидкости не нашли широкого применения. За рубежом они используются для охлаждения мощных выпрямителей и инверторов, преобразующих переменный ток в постоянный ток, для СВЧ-устройств.

16.5. Криогенная электроника

Электроника работает не только при повышенных температурах. Существуют условия, когда электроника работает при низких температурах: такую электронику называют криоэлектроникой.

Криогенная (от греческого «криос» – холод, мороз) электроника, или криоэлектроника, – направление электроники, охватывающее исследование при криогенных температурах (ниже 120 К) специфических эффектов взаимодействия электромагнитного поля с носителями зарядов в твердом теле и создание электронных приборов и устройств, работающих на основе этих эффектов, – криоэлектронных приборов.

Криоэлектроника – одна из основных и весьма перспективных отраслей науки. Её интенсивному развитию способствовали, с одной стороны, широкие исследования явлений, происходящих в твёрдом теле при низких температурах, и практическое применение полученных результатов в различных отраслях радиоэлектроники (в первую очередь, в космической радиоэлектронике), а с другой – определенные достижения криогенной техники, позволившие на основании как новых, так и ранее известных принципов разработать экономичные, малогабаритные и надежные системы охлаждения.

Значительным стимулом к развитию криоэлектроники послужило также и то немаловажное обстоятельство, что при создании современных электронных устройств – высокочувствительной радиоприемной аппаратуры, быстродействующих электронных вычислительных машин и др. – конструкторы подошли буквально к пределу возможностей радиоэлектроники, принципиально достижимому в обычном интервале температур. Использование низких температур позволяет преодолеть это препятствие и открывает новые пути в разработке радиоэлектронных систем.

Криоэлектроника в отличие от полупроводниковой микроэлектроники опирается на новые физические явления, такие как сверхпроводимость, эффекты Джозефсона, явления в узкозонных полупроводниках, полуметаллах,

параэлектриках и др., проявляющиеся только при охлаждении и не реализованные ранее. При этом криоэлектронный микроприбор или интегральная криоэлектронная схема может представлять собой симбиоз охлаждаемой электронной схемы и охладителя (газового, электронного либо радиационного).

Развитие интегральной криоэлектроники, как и развитие всей микроэлектроники, знаменует собой новый этап в электронной технике. Внедрение криоэлектронных приборов в народное хозяйство, в технику связи и телевидение, вычислительную, радиолокационную технику и приборостроение не только позволяет в больших системах уменьшить габариты, массу и стоимость аппаратуры при увеличении ее надежности, но и приведет к коренному улучшению электрических параметров этой аппаратуры. Уровень охлаждения в основном определяет параметры и область применения криоэлектронных приборов. Приборы азотного уровня охлаждения, самые дешевые и легкие, могут все шире применяться в массовой мобильной аппаратуре, а приборы гелиевого уровня охлаждения, энергопотребление которых в 25–70 раз больше, находят применение в стационарных, тяжелых объектах или там, где уже есть жидкий гелий. При этом электрические параметры приборов гелиевого уровня, в которых могут использоваться сверхпроводники, будут значительно лучше параметров приборов других уровней охлаждения, где сверхпроводники применить не удастся. Расширение и углубление научных, конструкторских и технологических работ в области криоэлектроники вообще и, в частности, техники криостатирования позволяет решить ряд важных проблем.

Первая проблема – освоение дальнего и сверхдальнего ИК-диапазонов для приема естественных и лазерных ИК-излучений. Это позволяет расширить спектральные границы систем для изучения природных ресурсов Земли и планет и поставить новые твердотельные охлаждаемые лазеры, эффективно работающие в ИК-диапазонах на службе человеку.

Вторая проблема – создание криоэлектронных индикаторов слабого теплового излучения на базе интегральных приборов с зарядовой связью для тепловидения в промышленности, геологии и в медицине. Есть основание полагать, что криоэлектронные индикаторы дадут возможность осуществить раннюю диагностику ряда раковых заболеваний.

Третья проблема – создание массовых малогабаритных сверхчувствительных приемников, воспринимающих с высокой избирательностью по частоте и помехозащищенностью такие слабые радиосигналы, которые обычные приемники даже не в состоянии обнаружить. Эти приборы находят самое широкое применение в системах оповещения, управления, связи, телевидения, телеметрии, пассивной локации и навигации, космической техники, радиоастрономии, приборостроения и системах наведения. При этом, например, дальность обнаружения пассивной локации, связи, телеметрии возрастает в 2–3 раза, защита от помех в 10–100 раз.

Четвертая проблема – разработка твердотельных перестраиваемых и модулируемых лазеров дальнего ИК-диапазона и создание нового типа твердотельных СВЧ-генераторов, имеющих при высоком КПД стабильность

частоты, присущую квантовым генераторам, в десятки и сотни раз большую выходную мощность во всем СВЧ-диапазоне.

Криоэлектроника позволила создать большие и сверхбольшие интегральные схемы нового типа на основе сверхпроводящих пленочных структур для разработки нового класса электронных вычислительных машин со сверхбольшой памятью, меньших по габаритам и в 10–100 раз более производительных, чем ранее существующие.

Характерной особенностью криоэлектроники является разнообразие материалов, применяемых в электронной технике. Наряду с диэлектриками и широкозонными полупроводниками все большую роль в электронике играют узкозонные полупроводники, материалы с температурой Кюри, лежащей в области криогенных температур, и сверхпроводящие материалы. Если ранее широкому внедрению сверхпроводников в электронику препятствовало то, что сверхпроводимость в них наступала при очень глубоком охлаждении, близком к абсолютному нулю, то теперь положение коренным образом изменилось благодаря высокотемпературной сверхпроводимости.

Одной из основных причин, вынуждающих все шире применять криоэлектронные приборы, является резкое усложнение условий, в которых должны работать электронные приборы. С каждым годом область рабочих температур непрерывно расширяется, и если когда-то температура $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ была пределом для интегральной схемы, то теперь рабочие температуры понижаются до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и даже $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. почти до абсолютного нуля. Космическое пространство с его условиями вакуума, холода, радиации, а также ракетные криогенные жидкости (жидкий кислород, водород, гелий) и отвердевшие замороженные газы – вот примеры сред, в которых должны функционировать современные приборы электроники.

Развитие в мире нового вида энергетики, основанного на промышленном использовании криогенного водородного топлива (газа, жидкой и твердой фазы) вместо минерального топлива и электроэнергии, освоение космоса делают все более обычным внедрение криоэлектронных изделий в народное хозяйство.

Развитие криоэлектроники, конечно, не приводит к замене существующих методов создания электронных приборов, а лишь расширяет возможности электронной техники, особенно там, где не требуется сверхминиатюрность, а высокие электрические параметры интегральных устройств являются определяющим фактором.

16.6. Влияние радиации на параметры электронных устройств

Ионизирующее излучение генерирует электронно-дырочные пары равномерно во всем объеме полупроводника. Носители в области пространственного заряда обратного p - n -перехода ускоряются электрическим полем перехода и собираются p - и n -областями практически сразу после на-

чала облучения. Носители заряда, образованные вне p - n -перехода, приводят к увеличению концентрации неосновных носителей. При этом ток через переход постепенно увеличивается и затем поддерживается за счет носителей, генерируемых в объеме, ограниченном диффузионной длиной.

Переходный процесс в p - n -переходе, смещенном в прямом направлении, протекает аналогично. Генерируемые вне перехода носители уменьшают градиент концентрации инжектируемых переходом неосновных носителей и, следовательно, прямой ток уменьшается.

Следует отметить, что идеализированному диоду наиболее точно соответствуют диоды с плавным p - n -переходом, изготовленные методом выращивания из расплава или диффузией примесей. Полупроводниковые диоды находят широкое применение как выпрямители переменного тока в постоянный, преобразователи электрических импульсов, регулируемые емкости (варикапы), стабилизаторы напряжения (стабилитроны) и т. д.

Исследованиями установлено, что чем меньше величина удельного сопротивления полупроводника, на основе которого изготовлен диод, тем выше его радиационная стойкость. Объясняется это тем, что в низкоомном материале больше введенных при выращивании химических примесей, чем в высокоомном. Химические же примеси располагаются в узлах или междоузлиях основного кристалла, являясь как бы дефектами кристаллической решетки. Поэтому небольшая добавка радиационных дефектов в кристалл, в котором уже и так большое количество дефектов, не вызовет изменения его свойств. Такие же добавки в более совершенный кристалл, содержащий меньше химических примесей, могут сильно ухудшить его свойства. Из сказанного следует, что наиболее чувствительной областью к воздействию радиации будет n -база, содержащая меньше примесей, и область p - n -перехода, которая имеет собственную проводимость.

Во время воздействия на p - n -структуру ядерных излучений (гамма-квантов, электронов, нейтронов и др.) большая часть их энергии размещается на ионизацию атомов, что приводит к значительному увеличению обратного тока в полупроводниковых приборах, особенно в полях ядерных излучений высокой интенсивности, например, при ядерном взрыве. Обычно ток ионизации растет пропорционально интенсивности облучения и площади p - n -перехода. На этом принципе p - n -переходы используются как дозиметры ядерных излучений. Экспериментально было замечено, что при облучении также возрастают токи утечки. Однако этот рост происходит значительно медленнее, если поверхность p - n -перехода надежно защищена специальными окисными пленками или стеклами.

В интегральных микросхемах (ИМС) в качестве p - n -перехода часто используется выпрямляющий контакт «металл – полупроводник» (диод Шоттки). Диоды с барьером Шоттки имеют ряд преимуществ по сравнению с диодами на основе обычных переходов, благодаря чему перспективны как в составе ИМС, так и в дискретном исполнении. Быстродействие диода Шоттки на несколько порядков превосходит быстродействие p - n -перехода. Это связано с тем, что в диодах Шоттки в отличие от p - n -перехода перенос тока

осуществляется только основными носителями заряда. При этом переходные процессы определяются не временем жизни неосновных носителей заряда, а перезарядкой области пространственного заряда полупроводника, длительность которой мала. Кроме того, технология изготовления диода Шоттки включает одну основную операцию – нанесение металлического контакта, что проще соответствующих операций при изготовлении p - n -переходов (диффузия и т. д.). Управление параметрами диодов Шоттки сводится, как правило, к изменению обработки поверхности полупроводника, а также к выбору типа металла или режима его напыления.

При воздействии радиации, например, быстрых нейтронов на диоды Шоттки под влиянием дефектов изменяются электрические свойства структуры. Рассматривая эффект воздействия радиации на контакт «металл – полупроводник», необходимо учитывать радиационные нарушения в объеме полупроводника, на поверхности и на границе раздела с металлом. Особенности воздействия быстрых нейтронов на полупроводник заключается в том, что наряду с образованием простых радиационных дефектов и их комплексов возникают большие области разупорядочения. Введение дефектов при облучении приводит к уменьшению концентрации носителей заряда в полупроводнике.

Радиационные дефекты, вводимые в кремний облучением, являются центрами рекомбинации, снижая время жизни неосновных носителей заряда, центрами рассеяния носителей заряда, уменьшая их подвижность, и центрами захвата, снижая концентрацию основных носителей. Воздействие радиации может приводить к возникновению на границе раздела новых центров и изменять зарядовое состояние существующих, что ведет к изменению высоты потенциального барьера на границе раздела и в конечном счете к изменению тока, протекающего через контакт.

Что касается биполярного транзистора, то тонкобазовый транзистор будет более радиационно-стойким, чем толстобазовый. Это обусловлено тем, что в тонкобазовых транзисторах диффузионная длина неосновных носителей, зависящая от дозы облучения, может снижаться до значительно меньшей величины, не нарушая режима работы транзистора. Чем тоньше база, тем выше радиационная стойкость транзистора. Однако очень сильное уменьшение толщины базы ограничивается снижением обратного напряжения пробоя и возникновением вторичного пробоя (прокол базы).

Радиация влияет и на параметры интегральных микросхем. Среди аналоговых ИМС наиболее универсальными и многофункциональными являются операционные усилители (ОУ), т. е. линейные преобразователи, при помощи которых можно реализовать математические операции – суммирование, вычитание, логарифмирование, интегрирование и др. В связи с тем, что аналоговые ИМС в составе аппаратуры могут оказаться в полях воздействия радиации, важным параметром для них является уровень радиационной стойкости.

Литературные данные показывают, что линейные ИМС более чувствительны к воздействию радиации, чем цифровые микросхемы. Для ОУ харак-

терно наличие большого числа n - p - n - и p - n - p -структур. Взаимное влияние этих структур приводит к возникновению паразитных эффектов, микроомный режим работы входных каскадов повышает их радиационную чувствительность. С целью повышения радиационной стойкости аналоговых микросхем к импульсному гамма-излучению необходимо снизить до минимальных пределов величины наведенных фототоков, для чего используется диэлектрическая межэлементная изоляция, уменьшаются геометрические размеры элементов ИМС, вводятся в схему обратносмещенные диоды для компенсации фототоков, применяются напыленные резисторы.

Для снижения чувствительности ОУ к нейтронному и гамма-непрерывному излучениям следует использовать составные p - n - p -(горизонтальные) и n - p - n -(вертикальные) транзисторы в промежуточных и выходном каскадах ОУ. Оптимизация технологии эмиттера (уменьшение размеров входных транзисторов, замена легирующей примеси эмиттера Р на As, пассивация поверхности Si_3N_4) позволит повысить радиационную стойкость ОУ.

Вопросы для самопроверки

1. Что означает термин «экстремальная электроника»?
2. Какие механизмы теплопередачи применимы к электронным устройствам?
3. Что понимают под температурной стойкостью изделий электронной техники?
4. Что понимают под пассивным способом теплоотвода?
5. Что понимают под активным способом теплоотвода?
6. Какие жидкие диэлектрики являются перспективными для охлаждения?
7. Что означает термин «криогенная электроника»? Каковы свойства криогенной электроники?
8. Что понимают под радиационной стойкостью изделий электронной техники?
9. Что происходит в электронных устройствах при воздействии радиации?
10. Каковы меры по повышению радиационной стойкости изделий электронной техники?

ЛЕКЦИЯ 17

ПЕРСПЕКТИВЫ КРЕМНИЯ КАК МАТЕРИАЛА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

План лекции

- 17.1. Структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ) и их преимущества.
- 17.2. Технологии изготовления структур КНИ.
- 17.3. Структуры КНС, их преимущества и перспективы применения.
- 17.4. Преимущества и перспективы карбидокремниевой электроники.

Литература: [[13](#), [27](#), [28](#), [29](#)].

17.1. Структуры «кремний-на-изоляторе» и их преимущества

Кремний-на-изоляторе (КНИ – Silicon on insulator, SOI) – технология изготовления полупроводниковых приборов, основанная на использовании трёхслойной подложки со структурой «кремний – диэлектрик – кремний» вместо обычно применяемых монокристаллических кремниевых пластин. Данная технология позволяет добиться существенного повышения быстродействия микросхем при одновременном снижении потребляемой мощности и габаритных размеров ([рис. 17.1](#)).

Структуры «кремний-на-изоляторе» – одно из наиболее динамично развивающихся направлений полупроводникового материаловедения в передовых странах. Использование структур КНИ в технологии полупроводниковых приборов позволяет решить целый ряд проблем: повысить радиационную стойкость схем, увеличить предельную рабочую температуру, повысить быстродействие приборов, а также существенно упростить технологический процесс создания интегральных схем (ИС).

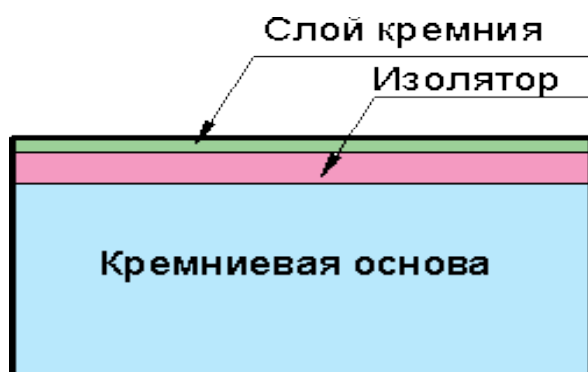


Рис. 17.1. Структура КНИ

Впервые КНИ-технология стала использоваться фирмой IBM, которая с 2001 года продает изготовленные по ней интегральные схемы. Разработанный специалистами IBM метод называли SIMOX (сокращение от separation by implantation of oxygen – разделение путем внедрения кислорода). Он заключается в бомбардировке кремния разогнанными до большой скорости ионами кислоро-

да, которые легко внедряются на относительно большую глубину, где соединяются с атомами подложки и формируют слой двуоксида кремния. Одна из трудностей состоит в том, что прохождение ионов кислорода через кремний создает множество дефектов и после операции поверхность приходится тщательно прогревать, чтобы исправить нарушения кристаллической решетки. Есть и более серьезная проблема: внедрение кислорода происходит медленно и поэтому обходится недешево. Неудивительно, что IBM использует КНИ-технологии только для самых дорогих микросхем.

Основные преимущества структур КНИ перед объемным кремнием заключены в уменьшении влияния паразитных эффектов по периметру границы прибора и надежной изоляции рабочего объема прибора от остальной схемы и подложки.

Анализ развития полупроводниковых технологий показывает, что в перспективе на структурах КНИ удастся получать приборы (микросхемы) с улучшенными характеристиками по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на обычных кремниевых пластинах. Технологические процессы изготовления ИС, адаптированные для таких структур, могут стать наиболее подходящей основой для производства аналоговых и цифровых ИС с наивысшими техническими характеристиками (рис. 17.2).

Приборы с изоляцией p - n -переходом имеют более значительные паразитные элементы. Диэлектрическая изоляция позволяет существенно уменьшить паразитные емкости, что повышает быстродействие. Транзистор в ИС с изоляцией p - n -переходом содержит паразитную тиристорную структуру, которая может привести к защелкиванию при воздействии переходных процессов и высоких уровнях напряжения.

Полная диэлектрическая изоляция исключает подобные нежелательные эффекты, устраняет взаимовлияние между элементами схемы и обеспечивает повышенное пробивное напряжение. Поскольку все проблемы, связанные с паразитными элементами и генерацией зарядов в объеме полупроводника обостряются при повышении температуры или при действии ионизирующего излучения, ИС с полной диэлектрической изоляцией компонентов в общем случае отличаются от обычных схем лучшими параметрами при высоких температурах или воздействии радиации. Диэлектрическая изоляция позволяет увеличить возможности снижения потребляемой мощности и повышения быстродействия при пониженном уровне напряжения питания ИС. Диэлектрическая изоляция компонентов на кри-

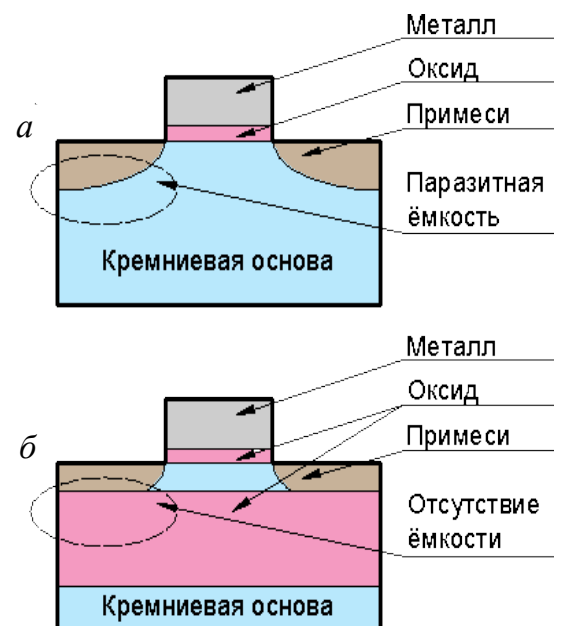


Рис. 17.2. Схемы МОП-транзисторов, выполненных по технологиям: а – классической; б – КНИ

сталле более компактна (по сравнению с изоляцией p - n -переходом) и соответственно на всей площади кремниевой пластины занимает меньше места, что приводит к увеличению интегральной плотности элементов. Надежность диэлектрической изоляции компонентов существенно выше надежности изоляции p - n -переходом. Поэтому использование кремниевых структур, позволяющих изготавливать ИС с полной диэлектрической изоляцией, является не только перспективным, экономически целесообразным, но и, возможно, единственным способом получения приборов с необходимыми рекордными параметрами.

Таким образом, реально существует ряд факторов (перечисленных выше), позволяющих не только производить продукт (ИС) улучшенного качества, но и получать экономическую выгоду от использования структур КНИ вместо кремниевых подложек.

В последнее время интерес специалистов к структурам с диэлектрической изоляцией компонентов постоянно возрастает в связи с увеличением выпуска многими компаниями структур типа «кремний-на-изоляторе» для широкого использования и значительным улучшением кристаллографического совершенства изолирующего кремния, сравнимого с параметрами объемного кремния в подложке. Также значительное увеличение спроса на структуры КНИ связано с возможностью высокой плотности размещения элементов на кристалле и быстродействием ИС, изготовленных по этой технологии.

Особая роль в настоящее время принадлежит технологиям Smart-Cut (газового скалывания в процессе термообработки), основанных на контролируемом использовании следующих основных процессов: создание с помощью ионной имплантации микроскопических объемных дефектов, содержащих водород, трансформация этих созданных дефектов посредством термообработок; скалывание тонкого слоя материала подложки по системам таких дефектов по всей площади пластины. Согласно научным исследованиям, подтверждается перспективность этого направления.

17.2. Технологии изготовления структур КНИ

В настоящее время наиболее распространены КНИ-подложки, где в качестве изолятора выступает диоксид кремния. Такие подложки могут быть получены различными способами. Основными способами являются ионное внедрение, сращивание пластин, управляемый скол и эпитаксия.

1. Технология ионного внедрения также известна, как ионная имплантация, имплантация кислорода, ионный синтез захороненных диэлектрических слоев и SIMOX-процесс (англ. Separation by Implantation of Oxygen). При использовании данной технологии монокристаллическая кремниевая пластина подвергается интенсивному насыщению кислородом путём бомбардировки поверхности пластины его ионами с последующим отжигом при высокой

температуре, в результате чего образуется тонкий поверхностный слой кремния на слое оксида. Глубина проникновения ионов примеси зависит от уровня их энергии, а поскольку технология КНИ подразумевает достаточно большую толщину изолирующего слоя, то при производстве подложек приходится использовать сложные высокоточные ускорители ионов кислорода. Это обуславливает высокую цену подложек, изготовленных по этой технологии, а большая плотность дефектов в рабочих слоях является серьезным препятствием при массовом производстве полупроводниковых приборов.

Магнитный масс-спектрометр предназначен для отделения ненужных ионов от легирующих, электрометр – для измерения величины имплантированного потока ионов. Маски для процесса имплантации могут быть изготовлены из любых материалов, используемых в технологии СБИС (фоторезист, нитриды, окислы, поликремний). Управление дозой затруднено рядом факторов: наличие потока нейтральных частиц, обмен энергии ионов с молекулами газов, вторичная электронная эмиссия из мишени, эффект обратного ионного распыления.

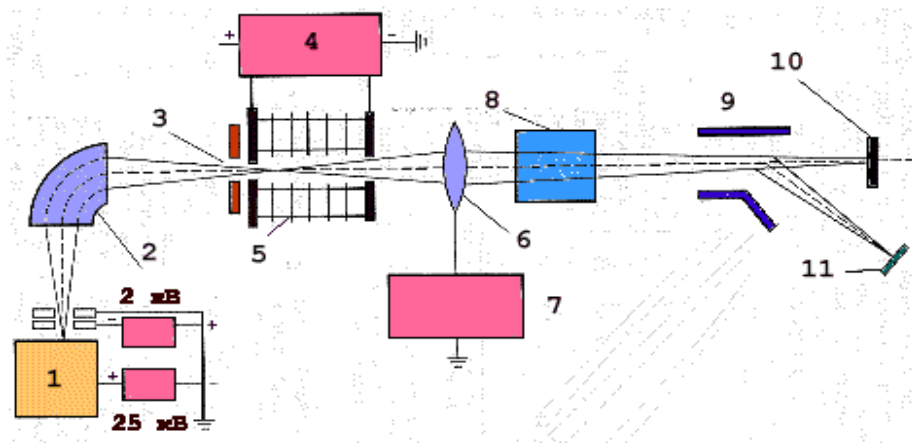


Рис. 17.3. Схема установки для ионной имплантации: 1 – источник ионов, 2 – масс-спектрометр, 3 – диафрагма, 4 – источник высокого напряжения, 5 – ускоряющая трубка, 6 – линзы, 7 – источник питания линз, 8 – система отклонения луча по вертикали и система отклонения луча, 9 – система отклонения луча по горизонтали, 10 – мишень для поглощения нейтральных частиц, 11 – подложка, 12 – электрометр

Для ликвидации последствий действия этих факторов используют следующие технические приемы. Нейтральные молекулы отсеивают с помощью масс-спектрометра (его магнитное поле не отклоняет нейтральные частицы и они не попадают в апертурную диафрагму). Кроме того, в камере поддерживается достаточно высокий вакуум, предотвращающий процесс нейтрализации ионов. Вторичную электронную эмиссию подавляют, располагая около мишени ловушку Фарадея.

От загрязнений поверхности кремния вследствие полимеризации углеводородов ионное внедрение проводят через окисную пленку, которую затем удаляют.

Во многих случаях для получения необходимого профиля распределения легирующей примеси в подложке применяют метод, основанный на предварительной загонке ионов с их последующей термической разгонкой в мишени. При этом имплантация проводится с малой энергией ионов.

2. При использовании технологии сращивания пластин образование поверхностного слоя производится путём прямого сращивания второй кремниевой пластины со слоем диоксида. Для этого гладкие, очищенные и активированные за счёт химической или плазменной обработки пластины подвергают сжатию и отжигу, в результате чего на границе пластин происходят химические реакции, обеспечивающие их соединение. Данная технология практически идеальна для изготовления подложек КНИ с толстым поверхностным слоем, но при его уменьшении начинает нарастать плотность дефектов в рабочем слое; кроме того, усложняется технологический процесс и, как следствие, растёт стоимость готовых изделий. В результате подложки с толщиной поверхностного слоя менее одного микрометра, которые наиболее востребованы при производстве быстродействующих схем с высокой степенью интеграции, имеют тот же набор недостатков, что и подложки, изготовленные по технологии ионного внедрения ([рис. 17.4](#)).

3. Технология управляемого скола, или Smart Cut, разработанная французской компанией Soitec, объединяет в себе свойства технологий ионного внедрения и сращивания пластин. В данном технологическом процессе используются две монокристаллические кремниевые пластины. Первая пластина подвергается термическому окислению, в результате чего на её поверхности образуется слой диоксида, затем верхняя лицевая поверхность подвергается насыщению ионами водорода с использованием технологии ионного внедрения. За счёт этого в пластине создаётся область скола, по границе которой пройдёт отделение оставшейся массы кремния. По завершении процедуры ионного внедрения пластина переворачивается и накладывается лицевой стороной на вторую пластину, после чего происходит их сращивание. На завершающей стадии проводится отделение первой пластины, в результате которого на поверхности второй остаётся слой диоксида и тонкий поверхностный слой кремния. Отделённая часть первой пластины используется в новом производственном цикле.

Производство КНИ-подложек по технологии управляемого скола требует большого количества операций, в его процессе используется только стандартное оборудование. Кроме того, важным преимуществом пластин, полученных по этой технологии, является низкая плотность дефектов в рабочем слое ([рис. 17.5](#)).

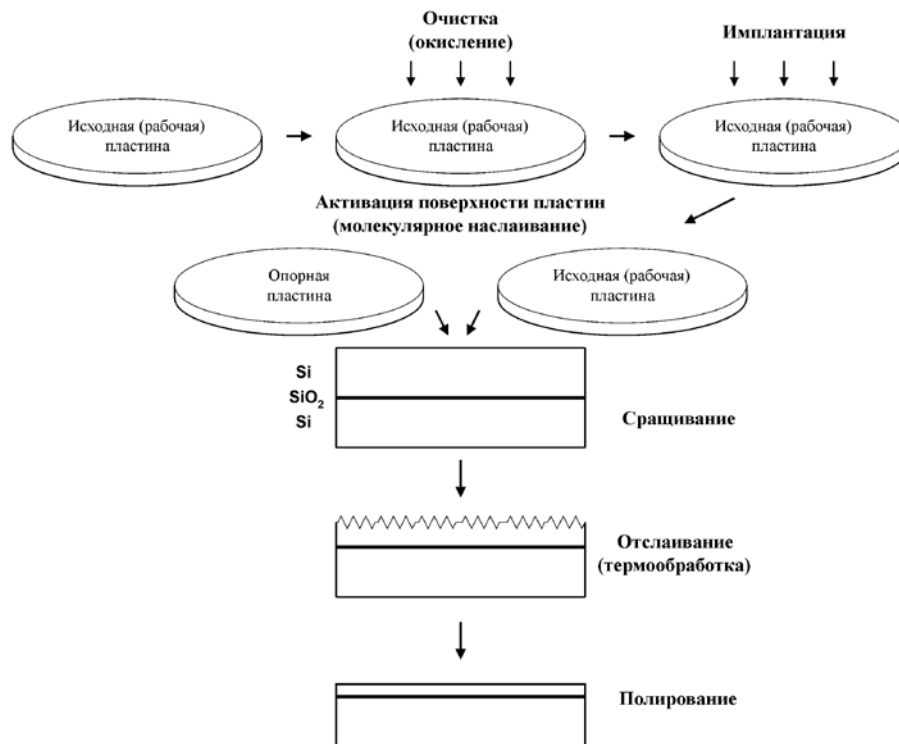


Рис. 17.4. Прямое связывание пластин кремния с использованием метода сращивания во влажных условиях и технологии отслаивания при получении структур КНИ

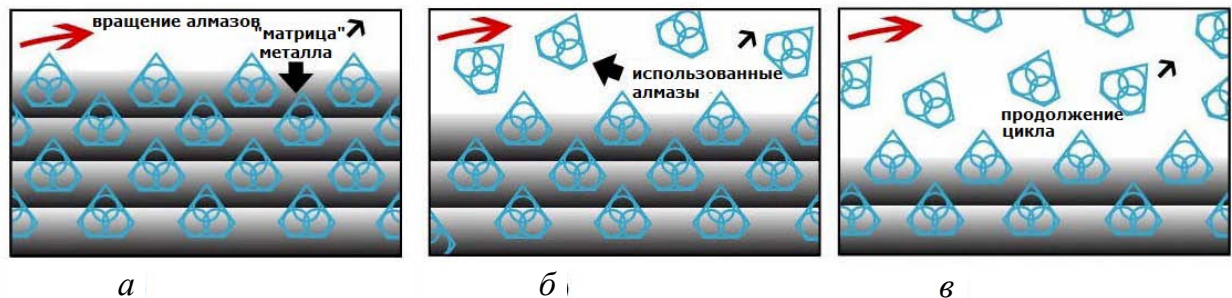


Рис. 17.5. Иллюстрация метода Smart Cut

Острые кристаллы алмаза проникают в материал, измельчают и шлифуют его ([рис. 17.5, а](#)), затем удаляются вместе с обработанным слоем и так далее ([рис. 17.5, б, в](#)).

4. Эпитаксия – это ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Различают гетероэпитаксию, когда вещества подложки и нарастающего кристалла различны, и гомоэпитаксию (автоэпитаксию), когда они одинаковы. Ориентированный рост кристалла внутри объема другого называется эндотаксией. Эпитаксия наблюдается, например, при кристаллизации, коррозии, определяется условиями сопряжения кристаллических решеток нарастающего кристалла и подложки, причем существенно их структурно-геометрическое соответствие. Легче всего сопрягаются вещества, кристаллизующиеся в одинаковых или близких структурных типах, на-

пример, гранецентрированного куба (Ag) и решетки типа NaCl, хотя эпитаксию можно получить и для различающихся структур.

В случае использования эпитаксиальной технологии поверхностный слой образуется за счёт выращивания кремниевой плёнки на поверхности диэлектрика. Активные элементы, полученные на таких подложках, демонстрируют отличные рабочие характеристики, но большое число технологических проблем, связанных с эпитаксиальным процессом, пока ещё не дают возможностей для массового внедрения этой технологии.

17.3. Структуры КНС, их преимущества и перспективы применения

Кремний-на-сапфире (КНС – Silicon on sapphire, SOS) – технология изготовления полупроводниковых приборов, основанная на использовании трёхслойной подложки со структурой «кремний – диэлектрик – кремний» вместо обычно применяемых монокристаллических кремниевых пластин. В качестве диэлектрика используется сапфир.

Первые работы по выращиванию кремния на некремниевых подложках были выполнены ещё в 1963 г. Наибольшее (если не единственное) распространение в качестве подложки-изолятора приобрёл сапфир, поэтому такие структуры получили название «кремний-на-сапфире». В конце 1960-х годов начались исследования по использованию КНС-структур в полупроводниковой электронике. В тот период основное значение придавали снижению паразитных связей в КНС-структурах и обусловленному этим повышенному быстродействию КНС-микросхем. На этом этапе подтвердилось ожидаемое высокое быстродействие элементов, изготовленных на подложках КНС, были освоены основные технологические процессы изготовления этих приборов.

Первые разработки с применением структур КНС начались в СССР в НИИ «Сапфир» в 1969 г. КНС-разработки начального периода, до 1980–1985 гг., хотя и дали отдельные важные и полезные результаты (например, счетчики времени для лазерных дальномеров), но не привели к сколь-нибудь существенному сдвигу ни в вычислительной технике в целом, ни в технологии ИС. Причина этого, возможно, кроется в отсутствии системного подхода к комплексному переводу технологии ИС на новый микроэлектронный базис КНС. Тем не менее, в этот период был накоплен большой технологический и схемотехнический опыт, использованный в дальнейшем.

Именно в это время в КНС-направлении произошла смена акцентов: если прежде основное внимание обращалось на высокое быстродействие, то теперь первостепенную важность приобрела высокая радиационная стойкость КНС-микросхем, экспериментально подтвержденная многочисленными испытаниями.

Интерес к проблеме радиационной стойкости в конце 1970-х – начале 1980-х годов резко усилили два «внешних» фактора – существенное возрас-

тание роли спутниковой связи и спутникового дистанционного зондирования Земли и необходимость работы в условиях ядерного взрыва.

Развитие космических технологий перевело в сугубо практическую плоскость проблему повышения долговечности пребывания космических аппаратов на орбите. Обнаружилось, что долговечность отечественных космических аппаратов порой составляет лишь 3–4 года, а зарубежных – в 1,5–2 раза больше.

Другой аспект радиационной стойкости связан со способностью микросхем обеспечивать бессбойную работу аппаратуры во время и после ядерного взрыва. Сопровождающие его высокоинтенсивные вспышки гамма-сверхжесткого рентгеновского и электромагнитного излучений приводят к полному нарушению межэлементной изоляции традиционных микросхем («заливанию» изолирующих p – n -переходов генерируемыми излучением носителями заряда) и к их временным или постоянным отказам. В системах противоракетной обороны (ПРО) используются противоракеты с ядерными боеголовками. При их подрыве интенсивность потока ионизирующих излучений даже в сотне-другой километров от центра взрыва такова, что электроника атакующих ракет выходит из строя. В подобных условиях работоспособность сохраняют лишь микросхемы, изготавливаемые по КНС-технологии.

Во многих публикациях и выступлениях специалистов отмечается, что технология КНС – уже устаревшая и не выдерживает конкуренции с технологиями КНИ «кремний-на-изоляторе» (изолирующие подложки SiO_2 , рекристаллизованный кремний и др.). В качестве основных проблем при этом называют существенное несовпадение параметров кристаллических решеток сапфира и кремния, что приводит к образованию многочисленных дислокаций в полупроводнике и препятствует повышению степени интеграции БИС. Безусловно, КНИ – наиболее перспективная технология, но реально КНС – единственная промышленная технология производства радиационно-стойких БИС. Это подтверждается и тем фактом, что ведущие зарубежные компании США, Великобритании, Франции, Швеция и другие выпускают по КНС-технологии СВЧ-приборы, быстродействующие микропроцессоры и схемы памяти.

Действительно, несогласованность кристаллических решеток в случае КНИ менее значима, чем у КНС, что теоретически позволяет добиваться более высокой степени интеграции. Однако проблема согласования решеток существует и в КНИ.

Один из аспектов перспективности технологии КНС связан с тем, что на сапфировой подложке можно выращивать не только эпитаксиальные пленки кремния, но и пленки других полупроводников. В частности, нитридов галлия и алюминия. Эти широкозонные полупроводники все чаще используются при создании приборов оптоэлектроники (светодиодов и лазеров с длиной волны излучения от 240 до 620 нм), акустоэлектроники, силовой и высокотемпературной транзисторной электроники, твердотельной СВЧ-электроники.

В сфере оптоэлектроники существенные возможности связаны с прозрачностью сапфира. Это позволяет осуществлять обратную засветку фото-

матриц, что повышает эффективность использования световой энергии. Кроме того, прозрачность подложки можно использовать для вывода излучения. Наконец, через прозрачную сапфировую подложку можно организовывать оптические связи внутри микросхемы, а сочетание на одной подложке кремниевых и нитридных пленок расширит функциональные возможности направления КНС еще значительно.

Справедливо будет отметить, что и существующие КНС-структуры не исчерпали всех своих возможных приборных применений, в частности – в качестве сенсорных элементов, датчиков давления и температуры для экстремальных условий эксплуатации в ракетно-космической технике.

Одно из реальных направлений – это разработка КНС-технологии с толщиной эпитаксиальных пленок 0,3 мкм и менее. Оно не требует революционных изменений, но обеспечит ощутимое повышение степени интеграции.

17.4. Преимущества и перспективы карбидокремниевой электроники

Карбид кремния является перспективным полупроводниковым материалом для высокотемпературной и высокочастотной электроники. За последние пять лет была показана принципиальная возможность создания почти всех классических приборов на основе карбида кремния: диодов Шоттки, мощных биполярных диодов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов.

Этапы развития электроники SiC:

- 1824 г. – открытие карбида кремния (Швеция).
- 1891 г. – метод получения монокристаллов SiC (США).
- 1893 г. – открытие натуральных кристаллов (США).
- 1893 г. – открытие политипизма (США).
- 1907 г. – Твердотельная электролюминесценция (США).
- 1920 г. – 1940 г. – работы О. В. Лосева (СССР).
- 1955 г. – метод промышленного производства (ФРГ).
- 1965 г. – естественная сверхрешетка (США).
- 1978 г. – модифицированный метод Лэли (СССР).
- 1979 г. – сублимационный сэндвич-метод (СССР).
- 1983 г. – рост CVD-пленок SiC на Si подложках (Япония).
- 1994 г. – первая интегральная схема на основе SiC (США).

Карбидокремниевая электроника выделяется рядом преимуществ: высокая термическая, химическая и радиационная стойкость, теплопроводность, износостойкость, стабильность свойств в широком интервале температур, что позволяет ее применять в таких неблагоприятных условиях, как на-

гревательные элементы, авиационные турбины, элементы конструкций и защитных экранов аэрокосмических аппаратов.

Вследствие своих уникальных физических и электронных свойств карбид кремния используют для создания высокоэффективных, высокотемпературных, радиационно-стойких, а также высокочастотных электронных приборов. В [табл. 17.1](#) приводится сравнение основных электронных свойств полупроводников SiC (4H-SiC и 6H-SiC) с кремнием (Si) и арсенидом галлия (GaAs).

Таблица 17.1

Сравнение характеристик полупроводниковых материалов

Наименование	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	Si
Ширина запрещенной энергетической зоны, эВ	3,26	3,03	1,43	1,12
Критическая напряженность электрического поля, МВ/см	2,2	2,4	0,3	0,25
Теплопроводность, Вт/см·К	3,0–3,08	3,0–3,8	0,5	1,5
Скорость объемного заряда электронов, см/с·10 ⁷	2,0	2,0	1,0	1,0

Рассмотрим основные преимущества полупроводниковых материалов SiC в сравнении с Si и GaAs.

Напряженность электрического поля 4H-SiC при возникновении лавинного пробоя более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению удельного сопротивления в открытом состоянии.

Малое удельное сопротивление в открытом состоянии, в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью, позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла.

Электронные свойства приборов на основе SiC очень стабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий.

Карбид кремния чрезвычайно устойчив к жесткой радиации, воздействие которой не приводит к деградации электронных свойств кристалла.

Высокая предельная рабочая температура кристалла (более 600 °C) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений.

Применение диодов Шоттки SiC позволяет снизить потери в источниках электропитания до 30–40 %, в корректорах коэффициента мощности – до 60 %, а также увеличить рабочие частоты преобразователей, снизив габариты и массу готовых изделий.

Основные направления использования приборов на карбиде кремния – это атомная энергетика (из-за радиационной и термостойкости), автомобилестроение (из-за термостойкости); химическая и газовая промышленность (химическая стойкость), а также силовоточная электроника.

На основе карбида кремния создаются следующие устройства:

- Подложки. Самый востребованный на рынке продукт. С каждым годом увеличивается качество и диаметр подложек. Использование подложек SiC для гетероэпитаксии GaN увеличивает срок службы приборов, так как рассогласование решеток в этом случае меньше, чем при использовании подложек из сапфира.

- Силовые приборы. В первую очередь – это диоды Шоттки. Разработка широкого класса силовых приборов сталкивается с проблемой деградации таких приборов из-за дефектов упаковки.

- СВЧ-приборы. Это – диоды Шоттки, рпн-диоды, полевые транзисторы.

- Фотоприемники. На SiC получают солнечно-слепые детекторы УФ.

Размеры подложек SiC выросли более, чем на порядок, число дефектов в них уменьшилось на три порядка. В числе компаний, занимающихся разработкой SiC-приборов, можно назвать таких гигантов, как Cree, Mitsubishi, Philips, Rockwell, Siemens и др. Число компаний постоянно растет.

Активно развивается новая технология в SiC-приборах – гетеропереход между различными политипами карбида кремния. Есть надежда, что параметры транзистора на основе SiC будут выше, чем у транзистора на основе GaN – AlGaN.

Вопросы для самопроверки

1. Какие проблемы в технологии полупроводниковых приборов можно решить с помощью структуры КНИ?
2. Каковы основные преимущества структур КНИ перед обычными кремниевыми подложками?
3. Каковы основные свойства технологии Smart Cut?
4. Что понимают под процессом SIMOX?
5. Каковы основные свойства технологии сращивания пластин?
6. Каково место эпитаксии в создании структур КНИ?
7. Каковы преимущества структур КНС и каковы ограничения в развитии КНС направления?
8. Каковы преимущества карбидокремниевой электроники?
9. Каковы основные направления использования приборов на карбиде кремния?
10. Какие устройства реально создаются на основе карбида кремния?

ЛЕКЦИЯ 18

МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

План лекции

- 18.1. Карбид кремния – материал для экстремальной электроники.
- 18.2. Возможности углерода в решении задач экстремальной электроники.
- 18.3. Структуры и приборы экстремальной электроники.
 - 18.3.1. Запираемые тиристоры.
 - 18.3.2. Биполярные транзисторы.
 - 18.3.3. Полевые транзисторы.

Литература: [[21](#), [22](#), [27](#), [28](#), [29](#)].

18.1. Карбид кремния – материал для экстремальной электроники

Рассмотрению этого вопроса был посвящен один из разделов предыдущей лекции, поэтому в данной лекции информация будет носить более сжатый характер.

Карбид кремния является уникальным материалом электроники с точки зрения свойств. Температура Дебая, которая является показателем устойчивости материала к внешним воздействиям в карбиде кремния, имеет высокое значение, что проявляется в высоких значениях твердости, температуры плавления, химической и радиационной стойкости. Наряду с большим значением ширины запрещенной зоны (от 2,4 до 3,3 эВ) и высокой теплопроводностью это позволяет приборам, созданным на карбиде кремния работать в экстремальных условиях (при температурах до 600 °С, при воздействии радиации). Большая напряженность поля пробоя SiC, высокая насыщенная скорость дрейфа носителей тока и высокая теплопроводность делают карбид кремния уникальным материалом для создания мощных высокочастотных приборов, работающих при высоких температурах и обеспечивающих малые энергетические потери. В отличие от многих полупроводниковых соединений A_3B_5 карбид кремния состоит из широко распространенных в природе дешевых компонентов и не содержит редко встречающихся элементов.

Такое сочетание свойств обеспечивает возможность создания приборов экстремальной электроники, которые могут использоваться в авиационно-космической технике, ядерной энергетике, разведке и добыче полезных ископаемых, в экологическом мониторинге. Такие приборы не могут быть созданы на основе хорошо освоенных промышленностью материалов: кремний,

арсенид и фосфид галлия. Все эти факторы обуславливают все более возрастающий интерес к карбиду кремния.

Отличительной особенностью монокристаллов карбида кремния является существование большого числа политипных модификаций. Благодаря политипизму карбид кремния фактически представляет собой набор полупроводниковых материалов с различными физико-химическими свойствами. Различия в порядке расположения слоев в политипах карбида кремния определяют различия не только в общей симметрии структуры и параметров элементарных ячеек, но и различия в периодах решетки и межслойного расстояния для разных политипов. Изменение размеров элементарной ячейки политипов приводит к изменению ширины запрещенной зоны в карбиде кремния от 2,39 до 3,3.

Основными акцепторными примесями в карбиде кремния являются алюминий и бор, основной донорной примесью – азот. Энергия активации примесей не зависит от политипа и составляет: Al – 0,28 эВ; В – 0,39 эВ; N – 0,1 эВ.

Главным методом получения объемных монокристаллов карбида кремния является рост из паровой фазы. Основная идея данного метода – сублимационный перенос материала из более горячей зоны источника в более холодную (температура горячего источника 2 300–2 400 °С). Первым методом был процесс, предложенный Ачесоном еще в начале XX века. Это очень эффективный метод, не претерпевший никаких принципиальных изменений вплоть до наших дней. Однако карбид кремния, получаемый в данном процессе, используется в основном как абразив и мало пригоден для применения в электронике. Это связано с плохо контролируруемыми условиями роста, что приводит к малым размерам кристаллов и неконтролируемому содержанию в них примесей.

В 1955 г. Лели предложил метод, который в некоторой степени можно считать модификацией метода Ачесона. В его основу было положено введение графитовой втулки в полость роста. Это обеспечило возможность получения монокристаллов, пригодных для применения в электронике, но не сняло проблему их спонтанного зарождения. Множество исследований было посвящено оптимизации данного метода путем улучшения теплового распределения в зоне роста кристаллов, использованию затравочных кристаллов. Однако так и не удалось преодолеть недостатки, присущие данному методу,

а именно: высокая температура процесса (2 500–2 600 °С), малые размеры кристаллов, невозможность управления их формообразованием, неоднородность легирования, невозможность контролируемого получения определенных политипов.

В дальнейшем проведенные исследования показали, что от этих недостатков практически невозможно избавиться.

Следующим этапом можно считать метод, в дальнейшем получивший название «Метод ЛЭТИ». Для роста монокристаллов использовалась затравка, на которую осаждался пересыщенный пар. Кроме того, на начальном эта-

пе роста в камеру вводился инертный газ (чаще всего аргон) для уменьшения скорости роста кристаллов с целью недопущения роста поликристаллов. Затем производилась откачка инертного газа для увеличения скорости роста. Источником служил поликристаллический карбид кремния, синтезированный из кремния и углерода. В качестве кристаллизационной ячейки использовался графитовый блок с отверстиями. В полость отверстий засыпался источник, отверстия закрывались пластинами-затравками.

Коммерческим лидером в производстве кристаллов карбида кремния является фирма Cree Research. Сублимационный процесс роста кристаллов на этой фирме улучшен за счет нескольких специальных приемов: например, в качестве шихты применяется порошок SiC определенного политапа и дисперсности, а во время роста в зону сублимации постоянно подается свежий источник путем его механической транспортировки.

18.2. Возможности углерода в решении задач экстремальной электроники

Транзисторы на базе углерода могут превзойти по быстродействию транзисторы из антимонида индия – самого известного из быстродействующих полупроводниковых материалов. При исследовании графеновых монослоев, слоев из чистого углерода толщиной в один атомный слой, было установлено, что в графеновых транзисторах возможно достижение максимального быстродействия. Подвижность электронов графеновых монослоев составила $15\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ в температурном диапазоне между 50 К и 500 К. Для сравнения, в кремнии подвижность электронов составляет $1\,400\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а в антимониде индия – около $77\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Подвижность электронов в графене при комнатной температуре может достигнуть $200\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что более чем в 100 раз превышает подвижность электронов в кремнии. Подвижность электронов в углеродных нанотрубках составляет $100\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что в два раза меньше, чем в графеновых монослоях. В качестве материала для подложки рассматриваются карбид кремния и алмаз.

Однако пока невозможно производство большого количества графеновых кристаллов, которые изготавливаются с размерами 100 мкм, что слишком мало для промышленного производства. Другой недостаток заключается в плохой стабильности материала при размерах элементов менее 10 нм. Схемы на базе графена появятся не раньше 2025 г., до той поры будут превалировать приборы на кремнии.

Одним из перспективных материалов является алмаз. Как полупроводниковый материал он давно привлекает внимание исследователей за счет своих электрофизических характеристик. При комнатной температуре ширина его запрещенной зоны – 5,47 эВ, подвижность электронов и дырок – $1\,800$ и $1\,200\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ соответственно (может достигать $4\,500$ и $3\,800\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Как показывают расчеты, на основе алмазов можно создавать структуры МДП

с удельной плотностью мощности до 27 Вт/мм^2 , плотностью носителей заряда в тонком слое до 10^{13} см^{-3} , напряжением пробоя порядка 10 МВ/см и рабочими частотами 100 ГГц . Не менее важное свойство алмазов – их высокая теплопроводность, более чем в 30 раз выше, чем у GaAs. Поэтому первые попытки применения алмазов в приборах СВЧ были направлены на создание теплопроводящих подложек, как правило, методом химического осаждения тонких пленок из газовой фазы (CVD-алмазы). Это направление развивается, в том числе и в России.

18.3. Структуры и приборы экстремальной электроники

18.3.1. Запираемые тиристоры

Создание полупроводниковых приборов для силовой электроники началось в 1953 г., когда стало возможным получение кремния высокой чистоты и формирование кремниевых монокристаллов больших размеров. В 1955 г. был впервые создан полупроводниковый управляемый прибор, имеющий четырёхслойную структуру и получивший название «тиристор».

Первые промышленные тиристоры появились в 1960 г. в США. Они получили название Gate Turn Off (GTO). В нашей стране они больше известны как запираемые, или выключаемые, тиристоры.

Запираемый тиристор – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основу которого положена классическая четырёхслойная структура. Включают и выключают его подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления. На [рис. 18.1](#) приведены условное обозначение (*а*) и структурная схема (*б*) запираемого тиристора. Подобно обычному тиристору он имеет катод, анод, управляющий электрод. Различия в структурах приборов заключаются в ином расположении горизонтальных и вертикальных слоёв с *n*- и *p*-проводимостями.

Основное исполнение тириستоров GTO – таблеточное с четырёхслойной кремниевой пластиной, зажатой через термокомпенсирующие молибденовые диски между двумя медными основаниями, обладающими повышенной тепло- и электропроводностью.

С кремниевой пластиной контактирует управляющий электрод, имеющий вывод в керамическом корпусе. Прибор зажимается контактными поверхностями между двумя половинами охладителей, изолированных друг от друга и имеющих конструкцию, определяемую типом системы охлаждения.

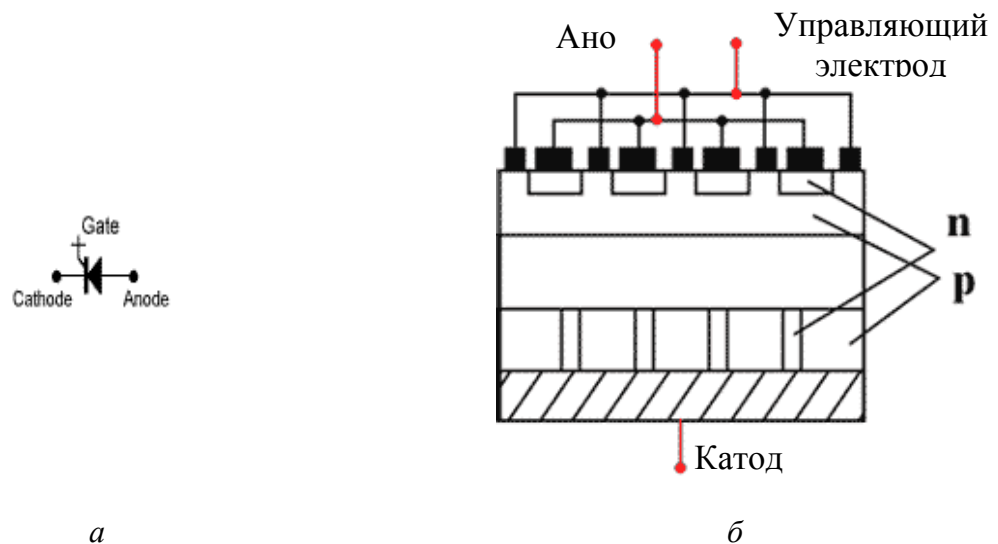


Рис. 18.1. Запираемый тиристор: *а* – условное обозначение; *б* – структурная схема

Сейчас тиристоры GTO производят несколько крупных фирм Японии и Европы: «Toshiba», «Hitachi», «Mitsubishi», «Eupec». Параметры приборов по напряжению: 2 500 В, 4 500 В, 6 000 В; по току (максимальный повторяющийся запираемый ток): 1 000 А, 2 000 А, 2 500 А, 3 000 А, 4 000 А, 6 000 А.

В середине 1990-х годов фирмами «ABB» и «Mitsubishi» в первые был разработан новый вид тириستоров Gate Commutated Thyristor (GCT). Собственно, GCT является дальнейшим усовершенствованием GTO, или его модернизацией.

Основной особенностью тириستоров GCT, по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение, которое достигается как изменением принципа управления, так и совершенствованием конструкции прибора. Быстрое выключение реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запираии прибора, что делает прибор нечувствительным к эффекту du/dt .

Изменение конструкции GCT связано с тем, что динамические процессы, возникающие в приборе при выключении, протекают на один-два порядка быстрее, чем в GTO. Так, если минимальное время выключения и блокирующего состояния для GTO составляет 100 мкс, для GCT эта величина не превышает 10 мкс. Скорость нарастания тока управления при выключении GCT составляет 3 000 А/мкс, GTO – не превышает 40 А/мкс. Приборы рассчитаны на напряжение до 4 500 В и ток до 4 000 А.

Тиристоры GCT и GTO освоены и на российском предприятии ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск). Выпускаются тиристоры с диаметром кремниевой пластины до 125 мм и диапазоном напряжений 1 200–6 000 В и токов 630–4 000 А.

18.3.2. Биполярные транзисторы

Биполярные транзисторы имеют существенно лучшие, чем у запираемых тиристоров, коммутационные и частотные характеристики. Это, пожалуй, самые распространенные приборы силовой электроники в устройствах мощностью до нескольких сотен киловатт.

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого находится трёхслойная структура

Коммерческое использование IGBT началось с 1980-х годов.

I поколение IGBT: предельные коммутируемые напряжения 1 000 В и токи 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении; прямые падения напряжения в открытом состоянии 3,0–3,5 В; частоты коммутации до 5 кГц (время включения/выключения около 1 мкс).

II поколение: коммутируемые напряжения до 1 600 В, токи до 500 А в модульном и 50 А в дискретном исполнении; прямое падение напряжения 2,5–3,0 В; частота коммутации до 20 кГц (время включения/выключения около 0,5 мкс).

III поколение: коммутируемое напряжение до 3 500 В, токи 1 200 А в модульном исполнении. Для приборов с напряжением до 1 800 В и токов до 600 А прямое падение напряжения составляет 1,5–2,2 В; частоты коммутации до 50 кГц (времена около 200 нс).

IV поколение: коммутируемое напряжение до 4 500 В, токи до 1 800 А в модульном исполнении; прямое падение напряжения 1,0–1,5 В; частота коммутации до 50 кГц (времена около 200 нс).

Схематичный разрез структуры IGBT показан на [рис. 18.2, а](#). Биполярный транзистор образован слоями p^+ (эмиттер), n (база), p (коллектор); полевой – слоями n (исток), n^+ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои p^+ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления. На [рис. 18.2, б](#) изображена структура IGBT IV поколения, выполненная по технологии «утопленного» канала (trench-gate technology), позволяющая исключить сопротивление между p -базами и уменьшить размеры прибора в несколько раз.

Процесс включения IGBT можно разделить на два этапа: после подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора (формируется n -канал между истоком и стоком). Движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

Для IGBT с номинальным напряжением в диапазоне 600–1 200 В в полностью включённом состоянии прямое падение напряжения так же, как и для биполярных транзисторов, находится в диапазоне 1,5–3,5 В.

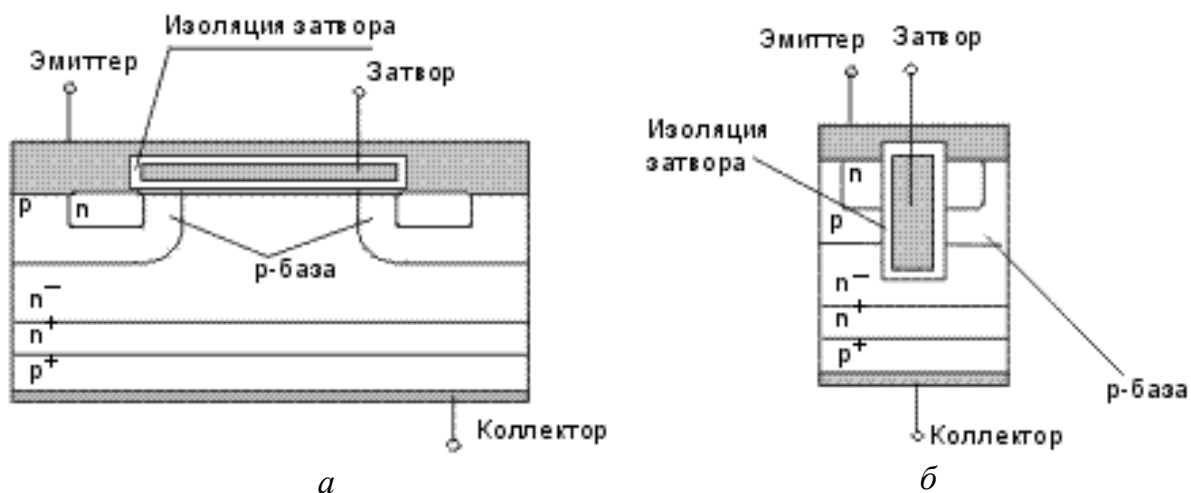
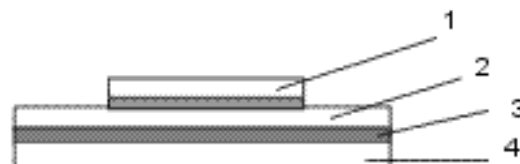


Рис. 18.2. Схематичный разрез структуры IGBT: а – обычного (планарного); б – выполненного по «trench-gate technology»

Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада-ния тока при выключении IGBT находятся в диапазонах 0,2–0,4 и 0,2–1,5 мкс соответственно.

Транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей в прямо-угольных корпусах с односторонним прижимом и охлаждением и табле-точном исполнении с двухсторонним охлаждением. Модули с односторон-ним охлаждением выполняются в прочном пластмассовом корпусе с паяны-ми контактами и изолированным основанием. Все электрические контакты находятся в верхней части корпуса. Отвод тепла осуществляется через осно-вание. Типовая конструкция модуля в прямоугольном корпусе показана на [рис. 18.3](#).

Рис. 18.3. Типовая конструкция IGBT-модуля: 1 – кристалл; 2 – слой керамики; 3 – спайка; 4 – нижнее тепловыводящее ос-нование



На саранском предприятии «Электровыпрямитель» осуществляется выпуск мощных высоковольтных IGBT-модулей на ток до 1 200 А и напря-жение до 3 300 В; проводится разработка мощного IGBT-транзистора табле-точной конструкции с прижимными контактами, что позволит увеличить съем тепла с элемента, ещё более повысить рабочий ток и напряжение тран-зистора.

IGBT-модули зарубежного производства на российском рынке элек-тронных компонентов представлены в основном фирмами «Mitsubishi», «International Rectifier», «Hitachi».

IGBT как класс приборов силовой электроники занимает и будет зани-мать доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц кило-ватт до единиц мегаватт.

18.3.3. Полевые транзисторы

Мощные полевые транзисторы являются очень перспективным и быстро развивающимся направлением полупроводникового приборостроения. Полевые транзисторы со структурой «металл – окись кремния – полупроводник» – это, по сути, силовая интегральная схема, состоящая из нескольких

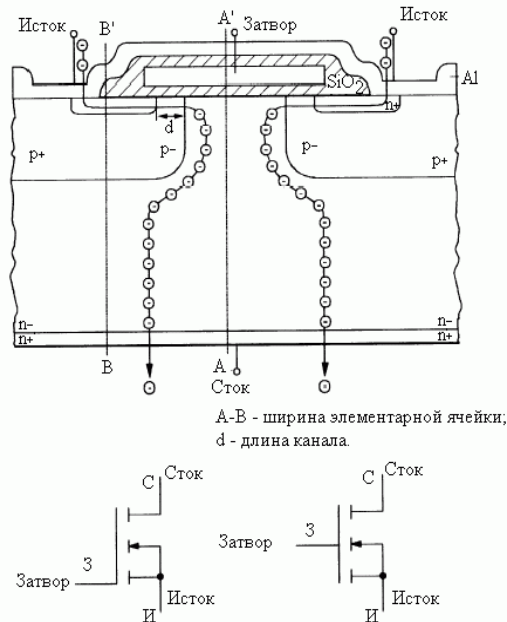


Рис. 18.4. Типичное устройство и функционирование одной ячейки и условные графические изображения

сотен тысяч микротранзисторов с размером 20 мкм.

МОП-транзисторные модули представляют собой корпус с общей базовой пластиной, на которой размещены силовые полупроводниковые кристаллы (транзисторы, диоды и возможные другие компоненты), электрически изолированные от монтажной пластины (теплоотвод). Кристаллы МОП-транзисторов, используемые компанией SEMIKRON, относятся к *n*-канальному улучшенному типу, т. е. они включаются положительным напряжением управления на затворе (положительное по отношению к потенциалу эмиттера или истока). Каждый МОП-кристалл состоит из нескольких тысяч транзисторных ячеек. Для иллюстрации их функционирования также

показано распределение носителя заряда в прямом включении (рис. 18.4).

Вследствие своей структуры МОП-транзисторы проводят в обратном направлении. Но данные «инверсные диоды» (так их называют) обладают плохими динамическими характеристиками, что ограничивает возможность применения МОП-транзисторов в мостовых схемах, особенно при наличии высоких напряжений.

На рис. 18.5 приведена схема МОП-транзистора с пазовой структурой затвора. Такая конструкция позволяет улучшить динамические характеристики и расширить область применения транзистора.

Важным преимуществом МОП-транзисторов являются хорошие частотные характеристики и малые затраты мощности на управление. Вследствие того, что перенос тока осуществляется только основными носителями, быстродействие определяется дрейфовыми (а не диффузионными, как в биполярных) процессами и может быть очень высоким (десятки наносекунд) и область рабочих частот повышается до мегагерц.

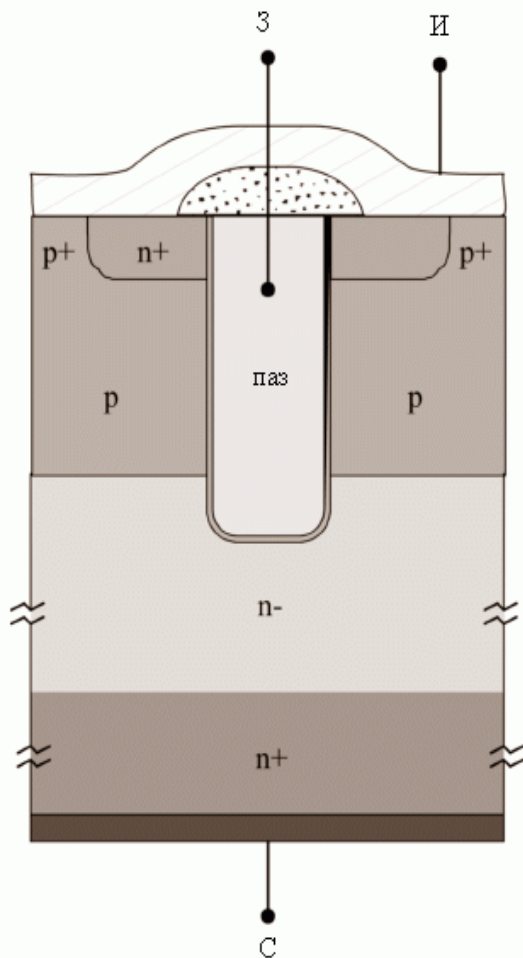


Рис. 18.5. Структура ячейки МОП-транзистора (МОП-транзистор с пазовой структурой затвора – trench)

Вообще говоря, быстродействие мощных МОП-транзисторов ограничивается скоростью перезаряда суммарной емкости в цепи затвора, включающей как паразитные емкости, так и емкость, связанную с формированием токопроводящего n -канала. Мощность в цепи управления МОП-транзисторов несравненно меньше, чем у БТ, и это является весьма существенным преимуществом. Предельный рабочий ток прибора, в принципе, ограничивается предельными размерами чипа, которые определяются допустимым процентом забракованных чипов при существующем уровне техпроцесса. Предельные параметры, достигнутые к настоящему времени – рабочий ток 200 А для прибора с рабочим напряжением 100 В.

Вопросы для самопроверки

1. Какова эволюция метода получения монокристаллов карбида кремния?
2. Каковы преимущества графена как возможного материала для создания транзистора?
3. Каковы перспективы алмаза как материала экстремальной электроники?
4. Что представляет собой тиристор и почему его считают прибором силовой электроники?
5. Почему коммутационные и частотные характеристики биполярных транзисторов лучше, чем у запираемых тириستоров?
6. Сколько поколений насчитывает развитие биполярного транзистора с изолированным затвором?
7. Почему полевые транзисторы лучше защищены от радиации и температуры, чем биполярные транзисторы?
8. Каковы предельные рабочие токи и напряжения для современных МОП-транзистора?
9. Какие приборы силовой электроники наиболее распространены в устройствах мощностью до нескольких сотен киловатт?
10. Каковы основные особенности планарной технологии?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой современной электроники являются достижения в различных областях фундаментальных наук, в первую очередь в области физики твёрдого тела, физики полупроводников, а также твердотельной технологии.

В течение нескольких десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия систем достигалось за счет увеличения плотности размещения и уменьшения размера элементов. Однако настало время, когда элементная база, основанная на использовании разнообразных низкоразмерных структур, является наиболее перспективной для электронной техники новых поколений. Так, при переходе к системам нанометрового масштаба начинают проявляться квантовые эффекты (размерное квантование, туннелирование, интерференция электронных состояний и др.), которые будут играть определяющую роль в функционировании приборов на их основе.

Достижения в разработке и изготовлении наноструктур различного назначения в наибольшей степени зависят от уровня 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 и управление на его основе технологическими процессами. Если открытие атомной энергии, создание транзистора и лазера определили облик XX в., то именно развитие нанотехнологий, по многим прогнозам, определит облик XXI в. С учётом реалий сегодняшнего дня магистр техники и технологии должен иметь чёткое представление о задачах, стоящих перед электроникой и наноэлектроникой, и быть готовым к своему посильному участию в их решении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : учеб. программа дисциплины / сост. : В. А. Юзова, Г. Н. Шелованова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 36 с. – (Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : УМКД № 1524/1092-2008 / рук. творч. коллектива Г. Н. Шелованова).
2. Юзова, В. А. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : лаб. практикум / В. А. Юзова, Г. Н. Шелованова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 124 с. – (Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : УМКД № 1524/1092-2008 / рук. творч. коллектива Г. Н. Шелованова).
3. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : метод. указания к самостоятельной работе / сост. : В. А. Юзова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 38 с. – (Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : УМКД № 1524/1092-2008 / рук. творч. коллектива Г. Н. Шелованова).
4. Юзова, В. А. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : пособие по выполнению курсовой работы / В. А. Юзова, Г. Н. Шелованова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 132 с. – (Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники : УМКД № 1524/1092-2008 / рук. творч. коллектива Г. Н. Шелованова).
5. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам : сб. статей / ред. П. П. Мальцев. – М. : Техносфера, 2005. – 589 с. : ил. – (Мир электроники).
6. Драгунов, В. П. Основы нанoeлектроники : учеб. пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. – 332 с.
7. Чаплыгин, Ю. А. Нанотехнологии в электронике / Ю. А. Чаплыгин. – М. : Техносфера, 2005. – 285 с.
8. Шик, А. Я. Физика низкоразмерных систем / А. Я. Шик, Л. Г. Бакуева, С. Ф. Мусихин. – СПб., 2001. – 346 с.
9. Нанотехнология в ближайшем десятилетии / под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. – М., 2002. – 189 с.
10. Герасименко, Н. Н. Мир материалов и технологий. Кремний – материал нанoeлектроники / Н. Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М. : Техносфера, 2006. – 355 с.
11. Шик, А. Я. Введение в сверхпроводимость : учеб. пособие / А. Я. Шик, С. Н. Лыков. – М., 2001. – 102 с. : ил.
12. Шувалов, В. П. Телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие : в 3-х т. Т. 2 / В. П. Шувалов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 672 с.

13. Шелованова, Г. Н. Современные проблемы электроники: кремниевая электроника : учеб. пособие / Г. Н. Шелованова. – Красноярск : ИПЦ КГТУ. – 2006. – 178 с.
14. Шелованова, Г. Н. Физические основы микроэлектроники. Полупроводниковые гетероструктуры в микро- и нанoeлектронике : учеб. пособие / Г. Н. Шелованова. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 181 с.
15. Зимин, С. П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами / С. П. Зимин // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т.8 (№ 1) – С. 101–107.
16. Зимин, С. П. Электрические свойства пористого кремния / С. П. Зимин // ФТП. – 2000. – Т. 34 (вып. 3). – С. 359–363.
17. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. – М. : Физматлит, 2006. – 552 с.
18. Савченко, М. А. Высокотемпературная сверхпроводимость: учеб. пособие / М. А. Савченко, А. М. Савченко, А. В. Стефанович. – М. : МГТУ им. Баумана, 2002. – 836 с. : ил.
19. Хохлова, Н. М. Информационные технологии / Н. М. Хохлова. – М. : ПриорИздат, 2004. – 192 с.
20. Носов, Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Радио и связь, 2004. – 360 с.
21. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника / В. А. Гуртов. – М. : Техносфера, 2005. – 350 с.
22. Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы / А. А. Барыбин. – М. : Физматлит, 2006. – 293 с.
23. Ерамаков, О. Н. Мир электроники. Прикладная оптоэлектроника. – М. : Техносфера. – 2004. – 372 с.
24. Бехштейн, Ф. Поверхности и границы раздела полупроводников / Ф. Бехштейн, Р. Эндерлайн. – М. : Мир, 1990. – 72 с.
25. Сейсян, Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете / Р. Сейсян. – Санкт-Петербург, 2002. – 417 с.
26. Максимов, Е. Г. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние : учеб. пособие / Е. Г. Максимов. – М., 2000. – 533 с.
27. Мильвидский, М. Г. Полупроводниковый кремний на пороге XXI века / М. Г. Мильвидский // Материалы электронной техники. – 2000. – № 3. – С. 4–14.
28. Асеев, А. Л. Перспективы применения структур «кремний-на-изоляторе» в микро-, нанoeлектронике и микросистемной технике / А. Л. Асеев и др. // Микросистемная техника. – 2002. – № 9. – С. 25–29.
29. Алферов, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 1. – С. 3–18.
30. Перспективные материалы (журнал)
31. [http:// www. superconductors. org/](http://www.superconductors.org/)
32. <http://www.nanometer.ru>
33. <http://www.mikrosystems.ru>