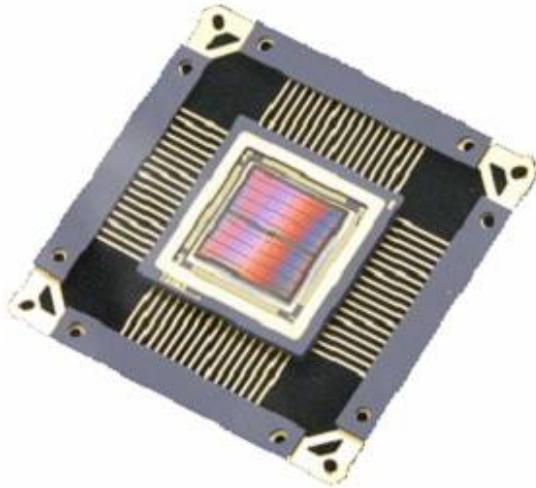


С.И. Рембеза Е.С. Рембеза

**ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ
И НАНОЭЛЕКТРОНИКУ**

Учебное пособие



Воронеж 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

С.И. Рембеза Е.С. Рембеза

ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ
И НАНОЭЛЕКТРОНИКУ

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2017

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я7

Р 371

Рембеза С.И. Введение в микроэлектронику и наноэлектронику: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,2 Мб) / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM диск-вод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии рассмотрены основные термины и определения микроэлектроники, дана классификация полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, рассмотрены вопросы технологии их изготовления.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (направленность «Микроэлектроника и твердотельная электроника»), дисциплине «Введение в наноэлектронику».

Табл. 2. Ил. 69. Библиогр.: 25 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. М.И. Горлов

Рецензенты: кафедра физики полупроводников
и микроэлектроники Воронежского
государственного университета
(зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук,
проф. Е.Н. Бормонтов);
д-р техн. наук, проф. А.В. Строгонов

© Рембеза С.И., Рембеза Е.С., 2017

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2017

«Микросхема стала – подобно паровому двигателю, электричеству и сборочному конвейеру – такой новинкой, которая стимулировала появление новой экономики.»

Times 29.12.1997 (к 50-летию транзистора)

ВВЕДЕНИЕ

Мы живем в эпоху бурного развития некоторых отраслей техники (автомобилестроение, авиастроение, информационные технологии, микроэлектроника и др.). Однако за последние четверть века ни одно техническое направление не оказало такого сильного влияния на качество жизни людей, как микроэлектроника. Развитие мобильной связи, цифровой техники, интернета, информационных технологий и вычислительной техники было бы невозможно без достижений микроэлектроники.

Особое место в нашей жизни занимают вопросы безопасности и обороны страны. Без микроэлектроники невозможно функционирование систем управления войсками и их связи, управление пусками ракет и их наведения, применение высокоточного оружия, баллистических ракет и систем ПРО.

Поэтому профессия специалиста в области проектирования и изготовления изделий микроэлектроники является одной из важнейших в XXI веке.

Цель пособия – ознакомление студентов с основами будущей профессии, то есть дать представление об объекте работы специалистов, о технологических процессах изготовления изделий микроэлектроники, об ответственности проектировщика и технолога за качество готового изделия, о технических и научных проблемах современной микроэлектроники, о перспективах развития микроэлектроники в XXI веке.

В первой главе учебного пособия дан исторический обзор развития электроники и сформулированы основные поня-

тия микроэлектроники. Эта глава также содержит необходимые для понимания дисциплины сведения о полупроводниковых материалах. Во второй главе приведены сведения о технологии получения полупроводниковых слитков и пластин и основные операции изготовления сплавных диодов и транзисторов. Третья глава посвящена планарной технологии и производству интегральных микросхем (ИМС). Полупроводниковая твердотельная интегральная схема в настоящее время является высочайшим достижением человеческой мысли, воплощенном в реальном изделии. В четвертой главе содержатся краткие сведения о нанотехнологиях и наноэлектронике. Описаны новые физические эффекты в полупроводниках, возникающие в результате уменьшения размеров приборных структур до десятков нанометров. Дается информация о перспективах и новых направлениях развития микроэлектроники и наноэлектроники.

Данное учебное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Введение в наноэлектронику», читаемого студентам первого курса Воронежского государственного технического университета, и полностью соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (направленность «Микроэлектроника и твердотельная электроника»).

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. Исторический обзор

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая и применяющая на практике процессы, обусловленные движением электронов в вакууме и в твердом теле. В основном это устройства и изделия радиотехники, системы преобразования энергии (световой, тепловой), различные приборы и устройства военного назначения. Радиолампа – пример радиотехнического электронного устройства.

Электронные схемы и системы лежат в основе инструментальной базы автоматизи, информатики, вычислительной техники, телемеханики и др.

Электроника прошла три этапа развития:

- ламповая;
- полупроводниковая;
- интегральная полупроводниковая (микроэлектроника).

Наноэлектроника – это современный четвертый этап развития электроники.

В 1895 г. А.С. Попов открыл способ приема и передачи сигналов без проводов, т.е. радио. Промышленное освоение радио началось после изобретения радиоламп: диода, а затем триода.

В основе первого этапа развития электроники лежит эффект эмиссии электронов из нагретого катода и управление потоком этих электронов в вакууме с помощью электрического поля. На основе этого эффекта был создан активный схемный элемент – радиолампа, позволяющая выпрямлять и усиливать электрический сигнал, а также генерировать электромагнитные колебания.

В радиолампе электроны испускаются нитью накала катода (–) и движутся к аноду (+) в электрическом поле вакуума. Радиолампа потребляет много энергии, сильно нагревается и

имеет большие размеры. Кроме диодов, есть триоды, тетроды, пентоды и др. Ламповый радиоприемник, радиола, телевизор, магнитофон были предметами мебели и имели большой вес из-за наличия трансформаторов в них.

Двухэлектродная лампа, содержащая катод и анод, служит выпрямителем переменного тока.

В трехэлектродной лампе (триоде) есть еще один электрод – сетка, подавая напряжение на который можно управлять анодным током. Поэтому диод и триод называют *активными* схемными элементами. Резисторы (электрические сопротивления), конденсаторы (емкости) и катушки индуктивности относят к *пассивным* элементам.

Электронные схемы первого поколения состояли из дискретных активных и пассивных элементов. Ламповая электроника использовалась для создания не очень сложных электронных схем.

Электронные схемы получались путем соединения дискретных элементов, например, пайкой. Межсоединения были самой ненадежной частью схем, их невозможно было полностью автоматизировать. В сложных схемах было так много межсоединений, что в электронике возникла ситуация, названная «тиранией межсоединений». Первая ламповая ЭВМ (1948 г.) содержала 20 000 радиоламп и еще большее число межсоединений, непрерывно работать она могла только несколько часов. ЭВМ имела площадь 200 м² и потребляла 200 кВт электроэнергии.

В середине прошлого века перед электроникой встали проблемы:

- повысить надежность электронных схем;
- снизить их габариты, вес и энергопотребление;
- уменьшить себестоимость производства;
- увеличить быстродействие.

Ламповая электроника не могла решить эти проблемы.

Дискретные элементы изготовлялись из различных материалов по несовместимым технологиям. Снизить их себестои-

мость и увеличить производительность было невозможно.

В 1947 г. почти через 50 лет после открытия радио был запатентован полупроводниковый прибор – транзистор (аналог лампового триода). В транзисторе электроны движутся в полупроводниковом кристалле на малых расстояниях (порядка 1 мкм), приборы имеют малые размеры и потребляют малую мощность (от батарейки карманного фонаря). Полупроводниковые транзисторы и диоды быстро потеснили радиолампы. Появились транзисторные радиоприемники на батарейках, наш спутник в 1957 г. подавал сигналы из космоса с помощью транзисторного радиопередатчика. Главное достижение – ЭВМ на транзисторах уменьшились до размеров 2 – 3 шкафов (вместо 20 – 30) и основное место занимали системы оперативной памяти – бобины магнитной записи.

Если граница разделяет слои полупроводника с электронным и дырочным типами проводимости, то она называется р-п переходом и так же, как и диод, обладает односторонней проводимостью.

Термин «биполярный транзистор» связан с тем, что в нем используются носители заряда двух видов: электроны и дырки. Слово «транзистор» (от английского transformer of resistor) означает преобразователь сопротивлений. В 1956 г. Шокли, Бардин и Браттейн получили Нобелевскую премию по физике за создание биполярного транзистора.

Ламповые диод и триод были заменены кристаллическими диодом и транзистором. Возникла электроника, основанная на использовании дискретных полупроводниковых приборов. Надежность электронных схем значительно увеличилась, уменьшились их габариты, вес и энергопотребление, но «тирания межсоединений» сохранилась. Себестоимость изделий электроники оставалась высокой.

Электроника, основанная на дискретных полупроводниковых приборах, существовала недолго, так как в 60-е годы ее сменила интегральная полупроводниковая электроника (*микрорэлектроника*). Начался третий этап развития электроники.

Основными элементами электронных систем стали интегральные микросхемы (ИМС).

ИМС – это микроминиатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором активные, пассивные и соединительные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле на поверхности и в объеме материала и имеют общую оболочку.

Изготовление всех элементов ИМС в едином технологическом цикле и на одном материале позволяет использовать вместо последовательной технологии (индивидуальной для каждого элемента) параллельную (интегральную) технологию. Себестоимость производства сложных электронных схем в расчете на один схемный элемент резко уменьшилась.

Возможность перехода на интегральную технологию связана с тем, что полупроводниковая структура обладает практически всеми необходимыми схемными свойствами: отдельный р-п переход может использоваться как резистор, конденсатор, диод, переключатель сигнала, стабилизатор напряжения, фоточувствительный элемент, светодиод, полупроводниковый лазер, а в сочетании с другими р-п переходами и как транзистор, тиристор и т.п. Следовательно, формируя в полупроводниковом кристалле в одном технологическом цикле множество р-п переходов, можно создать сложную ИМС.

Развитие твердотельной интегральной электроники шло по пути уменьшения габаритов, увеличения быстродействия, объема памяти и надежности схем. На этом пути были разработаны методы миниатюризации элементов ИМС, открывшие возможности перехода к нанoeлектронике.

Возникновение и развитие полупроводниковой микро- и нанoeлектроники стало возможным благодаря развитию современной квантовой теории твердого тела. Чтобы разобраться в принципе действия полупроводниковых приборов, ИМС и нанoeлектронных устройств, необходимо изучить основы квантовой механики.

Отметим хронологию наиболее важных открытий и изо-

бретений в области полупроводниковых приборов и ИМС.

1947 г. – создание точечного транзистора.

1950 г. – получение монокристаллического германия.

1951 г. – промышленный выпуск биполярных транзисторов. Изобретение полевого транзистора с управляющим р-п переходом.

1952 г. – получение монокристаллического кремния.

1955 г. – промышленный выпуск кремниевых биполярных транзисторов.

1956 г. – изобретение диффузионного транзистора и интегральной схемы (ИС).

1958 г. – изобретение планарного транзистора и фотолитографии.

1959 г. – промышленный выпуск интегральных схем (ИС).

1960 г. – создание эпитаксиальных транзисторов, МДП-транзисторов, диодов Шоттки. Выпуск ИС малой степени интеграции (число элементов на одном кристалле не более 100).

1962 г. – разработка цифровых ИС по технологии МОП.

1966 г. – выпуск ИС средней степени интеграции (с числом элементов на кристалле до 1000).

1969 г. – выпуск ИС большой степени интеграции (с числом элементов до 10 000 на кристалле) или больших ИС (БИС). Изобретение приборов с зарядовой связью (ПЗС).

1971 г. – разработка микропроцессоров.

1975 г. – разработка ИС сверхбольшой степени интеграции (с числом элементов на кристалле более 10 000) – СБИС.

1981 г. – создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ), возможность оперирования отдельными атомами.

1985 г. – разработка ССБИС с числом элементов 100 000 на кристалле.

1986 г. – вручение Нобелевской премии за СТМ.

1990 г. – внедрение рентгеновской фотолитографии.

1995 г. – изготовление ИС с 10^6 элементов на 1 см^2 .

С созданием СТМ получила интенсивное развитие нано-

технология. *Нанотехнология* - это совокупность методов изготовления и обработки материалов, устройств и систем, размеры которых составляют 1 – 100 нм (хотя бы в одном измерении), $1 \text{ нм} = 10^{-3} \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-9} \text{ м}$.

В полупроводниковом диоде выпрямление тока происходит в р-п переходе. Малые размеры активных областей привело к открытию в 1956 г. интегральной схемы (ИС), в которой на одном кристалле находятся несколько диодов и транзисторов, представляющих радиосхему, например, калькулятор. Микроскопические детали ИС дали название этому направлению науки и техники – *микроэлектроника*.

Мы готовим специалистов для микроэлектроники в области проектирования с помощью ЭВМ и промышленного изготовления полупроводниковых приборов и ИС. Для этого надо хорошо знать физику, математику, химию и вычислительную технику.

Проектирование и моделирование ИС и других приборов микроэлектроники осуществляется с помощью спецпрограмм САПР (систем автоматизированного проектирования), и у нас вы научитесь ими пользоваться.

Для изготовления ИС и всех изделий микроэлектроники используется современная вакуумная и термическая техника, фотолитография и плазменные технологии, спектрометрия и лазерная техника.

За время учебы состоится три вида практик на производстве, лабораторные работы будут выполняться в цехах на действующем промышленном оборудовании. На 3 – 4 курсах есть возможность получить рабочие профессии и совмещать учебу с работой на производстве.

После бакалавриата есть возможность поступления в магистратуру (2 года) для выполнения конкретной научной работы на кафедре или на производстве. После магистратуры можно поступить в аспирантуру (4 года), где под руководством одного из пяти профессоров кафедры можно написать кандидатскую диссертацию.

1.2. Основные элементы ламповой радиотехники и микроэлектроники

Микроэлектроника – это отрасль науки и техники, занимающаяся проектированием, изготовлением и применением интегральных схем с размерами элементов порядка 1 микрона. Наноинженеры проектируют и создают изделия наноэлектроники. В наноэлектронике размеры объектов составляют нанометры. При таких размерах проявляются физические явления квантовой механики.

Краткая история развития радиоэлектроники.

7 мая 1895 г. – демонстрация А.С. Поповым приемника электромагнитных колебаний на расстоянии (грозоотметчик).

Март 1896 г. – передача и прием сигналов между двумя зданиями (250 м).

Июнь 1897 г. – беспроводный телеграф на Русском флоте, спасательные операции, замечен эффект радиолокации.

Июль 1897 г. – Патент Г. Маркони (Великобритания).

1904 г. – изобретение вакуумного диода (Флеминг, Англия).

1906 г. – изобретение вакуумного триода (Форест, США).

1933 г. – купроксный выпрямитель (Cu-CuO₂).

1947 г. – Патент на транзистор (Бардин, Браттейн, Шокли).

1950 г. – сплавные диоды и транзисторы (плотность упаковки элементов 1 см⁻²).

1956 г. – Интегральная схема (Килби) два транзистора и четыре диода.

1960 г. – фотолитография, планарная технология, (10 см⁻²), диаметр пластин кремния 40 мм.

1970 г. – БИС (10² см⁻²), диаметр пластин Si 60 мм, 75 мм.

1980 г. – СБИС (10⁴ см⁻²), диаметр пластин 100 мм, 150 мм

1990 г. – ССБИС (10⁶ см⁻²), диаметр пластин 200 мм, 300 мм

2000 г. – микро и наноэлектроника, диаметр пластин Si равен 300 мм

2010 г. – микро и наноэлектроника, диаметр пластин Si равен 450 мм

Практическое применение микроэлектроники.

1950 – 1960 – выход в Космос и по настоящее время (ИС в аппаратуре Спутников, солнечные батареи и др.).

1960 – 1970 – первые ЭВМ на транзисторах и ИС, транзисторные радиоприемники, кассетные магнитофоны.

1970 – 1980 – бортовые компьютеры в самолетах, системы наведения ракет, TV на ИС, видеоманитофоны начало замены радиоламп на ИС.

1980 – 1990 – распознавание объектов со спутников, высокоточное оружие, Internet, плейеры, персональные компьютеры.

1990 – 2000 – мобильная связь, Internet для всех, Note – book, плазменные экраны.

2000 – 2010 – I – phone, I – pad, планшет, Internet в телефоне, OLED – экран.

2010 – 2020 – гибкая электроника, светодиодные экраны, прозрачная электроника.

2020 – и т.д. – нанотехнологии и наноэлектроника.

Чтобы понять значение технической революции в радиотехнике, совершенной микроэлектроникой, необходимо рассмотреть элементную базу начала века радиотехники. Начальный этап развития радиотехники связан с применением радиоламп – вакуумных электронных приборов, работающих при малом напряжении катода (6,3 В) и высоком напряжении (40 – 100 В) анода.

Уже через 10 лет после открытия А.С. Поповым были изобретены вакуумные диод и триод, которые на долгие годы определили развитие радиотехники. Физические основы радиотехники излагаются в спецкурсе с таким же названием.

1.2.1. Устройство и работа диодной радиолампы

Диод – это двухэлектродная вакуумная лампа, основным свойством которой является односторонняя проводимость тока. Диод – электронная лампа, содержащая лишь два электрода: катод и анод. Термоэлектронный катод служит для испускания электронов; анод является коллектором, т.е. электродом, который собирает электроны. Анод в соответствии с формой катода выполняется либо в виде цилиндра, либо в виде короба. Оба электрода помещаются в стеклянный, металлический или металлокерамический баллон. Схематическое изображение диода приведено на рис. 1.1.

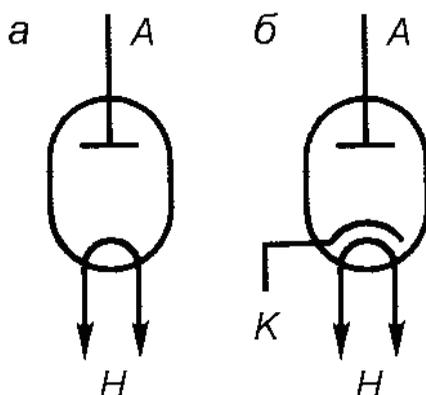


Рис 1.1. Схематическое изображение диода прямого накала (а) и косвенного накала (б): А – анод; К – катод; Н – накал

Принцип действия электровакуумного диода основывается на законе движения электрона в электрическом поле, которое образуется между анодом и катодом. Для создания этого электрического поля в анодную цепь электровакуумного диода включается источник напряжения U_a (рис. 1.2).

Потенциал катода диода принимается равным нулю. От этого значения отсчитываются потенциалы в междуэлектродном пространстве и потенциал анода лампы. При нагревании

катода током накала его свободные электроны приобретают энергию, достаточную для совершения работы выхода, и покидают катод.

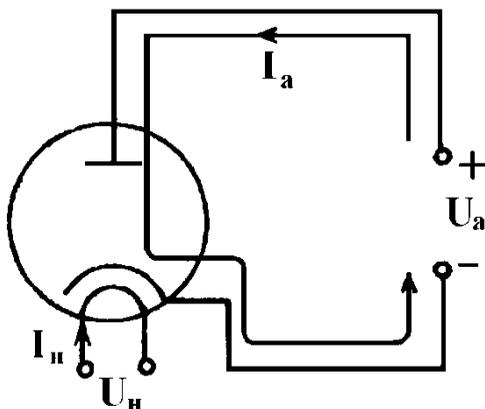


Рис. 1.2. Схема включения диода

Если напряжение анода положительно, испускаемые катодом электроны движутся к аноду, замыкая электрическую цепь анодного питания, и обуславливают прохождение анодного тока I_a .

При подключении к аноду электривакуумного диода отрицательного полюса источника U_a электрическое поле между анодом и катодом оказывает на электроны тормозящее действие и возвращает их на катод. В этом случае в цепи анода ток не проходит.

Основной характеристикой диода является анодная характеристика, т.е. зависимость анодного тока I_a от приложенного напряжения при постоянном напряжении накала $I_a = f(U_a)_{U_n=const}$.

Анодная характеристика диода (рис. 1.3) состоит из трех участков, соответствующих трем режимам работы диода.

Участок 1 – отрицательное напряжение на аноде $U_a < 0$. Теоретически анодный ток должен быть равен нулю, так как

лампа обладает односторонней проводимостью. На самом деле в этом режиме может наблюдаться небольшой ток за счет начальной скорости, с которой электроны покидают катод. Эта начальная скорость позволяет части электронов преодолевать прикатодный потенциальный барьер и достигать анода. Поэтому при $U_a = 0$ проходит начальный анодный ток $I_{a \text{ нач}} \approx 10 \text{ мкА}$. Для его прекращения необходимо подать анодное напряжение $U_{a \text{ нач}}$, называемое пороговым (запирающим) потенциалом $U_{a \text{ нач}} \approx -(1 - 2) \text{ В}$.

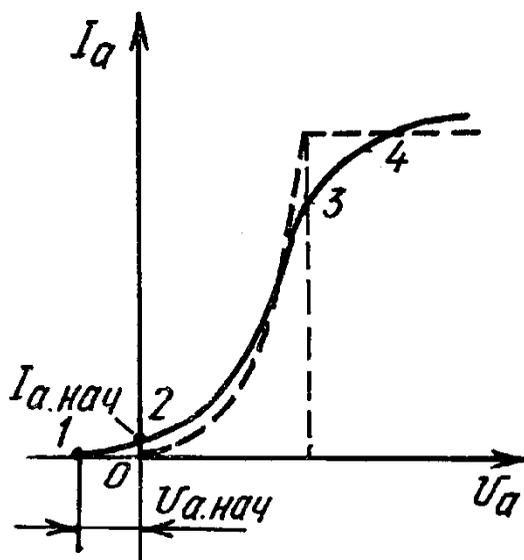


Рис. 1.3. Теоретическая (штриховая кривая) и реальная (сплошная кривая) статические анодные характеристики диода

Участок 2 — умеренное положительное анодное напряжение $0 < U_a < U_{a \text{ нас}}$, анодный ток меньше тока эмиссии катода из-за наличия у катода потенциального барьера — это режим пространственного заряда. Электронное облако у катода создает поле, противодействующее полю анодного напряжения.

Участок 3 – соответствующий режиму насыщения $U_a > U_{a\text{нас}}$, наступает при достаточно больших положительных напряжениях, все эмиттированные электроны доходят до анода.

Анодное напряжение, при котором анодный ток достигает насыщения, называется напряжением насыщения, а ток в этом режиме – ток насыщения $I_{a\text{нас}}$ равен току эмиссии катода. Анодный ток у реальных ламп в режиме насыщения не остается строго постоянным, а увеличивается с ростом напряжения U_a .

1.2.2. Устройство и работа вакуумного триода

Триод – трехэлектродная электронно-управляемая лампа, содержащая анод, катод и сетку. Сетка – это электрод, который обычно имеет вид проволочной спирали и располагается в непосредственной близости от поверхности катода. Основное назначение сетки – воздействовать на объемный заряд у катода и управлять электронным потоком, поэтому она называется управляющей. В одном баллоне могут размещаться один или два триода. Условное графическое обозначение триодов приведено на рис. 1.4.

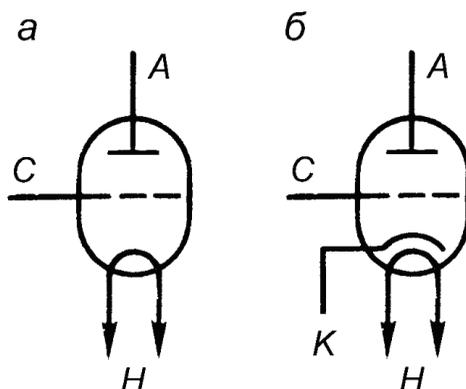


Рис. 1.4. Схематическое изображение триода с катодом прямого накала (а) и с катодом косвенного накала (б): С – сетка

Напряжение анода всегда положительно $U_a > 0$, а напряжение сетки может быть как положительным, так и отрицательным. Все напряжения подаются относительно катода, потенциал которого равен нулю. В качестве общего (заземленного) электрода, относительно которого отсчитывается потенциал, в триоде может выступать катод, сетка или анод. В соответствии с этим триод можно включить по схеме с общим катодом, с общим анодом, с общей сеткой.

Принцип действия триода основан на возможности управления величиной анодного тока изменением напряжения сетки.

Поданные на анод и сетку напряжения относительно катода создают в триоде внешнее электрическое поле, на которое накладывается поле внутреннего объемного заряда.

Если на сетку лампы подать отрицательный потенциал ($U_c < 0$), то на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, будет накладываться тормозящее поле между сеткой и катодом, уменьшая при этом анодный ток лампы. При некотором отрицательном напряжении сетки, называемом запирающим U_z , результирующее поле между сеткой и анодом становится тормозящим, анодный ток при этом становится равным нулю, т.е. лампа запирается (рис. 1.5, а).

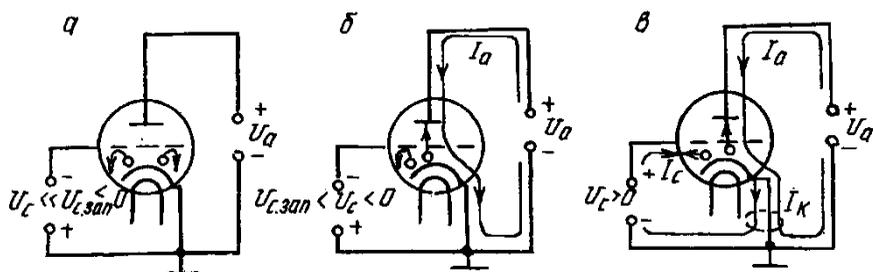


Рис. 1.5. Схемы, поясняющие прохождение токов в триоде

Наименьшее (по модулю) значение отрицательного потенциала сетки, при котором $I_a = 0$, называют напряжением

запираания $U_{c\text{ зан}}$ для заданного напряжения анода.

Если напряжение на сетке по модулю меньше напряжения запираания $|U_c| > |U_{c\text{ зан}}|$ или $U_{c\text{ зан}} < U_c < 0$, то между витками сетки электрическое поле становится ускоряющим, часть электронов, эмиттированных катодом, устремляется к аноду, и возникает анодный ток. Чем менее отрицателен потенциал сетки, тем сильнее возрастает анодный ток. При $U_c = 0$ ток лампы определяется напряжением на аноде (рис. 1.5, б).

При положительных потенциалах на сетке $U_c > 0$ часть электронов, перемещающихся в непосредственной близости от витков, притягивается сеткой и образует сеточный ток I_c , а основная доля электронного потока попадает на анод, создавая анодный ток.

Электрическое поле будет ускорять электроны, эмиттированные катодом, что вызывает увеличение анодного тока при том же U_a . Таким образом, катодный ток разветвляется на два тока – ток сетки и ток анода, т.е. $I_k = I_a + I_c$. Обычно $I_c < I_a$, так как поверхность сетки много меньше поверхности катода (рис. 1.5, в). При нормальной работе триода сеточный ток должен быть ничтожно мал, порядка 0,001 – 0,1 нА.

Токи I_a , I_k , I_c зависят от напряжения сетки и анода триода. Небольшие изменения напряжения сетки вызывают значительные изменения потенциального барьера, в то время как влияние анодного напряжения ослаблено экранирующим действием сетки.

Для триода наибольший интерес представляют зависимости $I_a = f(U_c) \Big|_{U_a = \text{const}}$ – статическая анодно-сеточная характеристика (рис. 1.6) и $I_a = f(U_a) \Big|_{U_c = \text{const}}$ – статическая анодная характеристика (рис. 1.7).

Рассмотрим анодно-сеточную характеристику $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$: при нулевом потенциале на сетке и заданном анодном напряжении в анодной цепи течет анодный ток. С увеличением отрицательного потенциала сетки по модулю анодный ток при неизменном анодном напряжении уменьшается. $U_{c\text{ зан } 1,2,3}$ – запирающие напряжения на сетке, когда ток

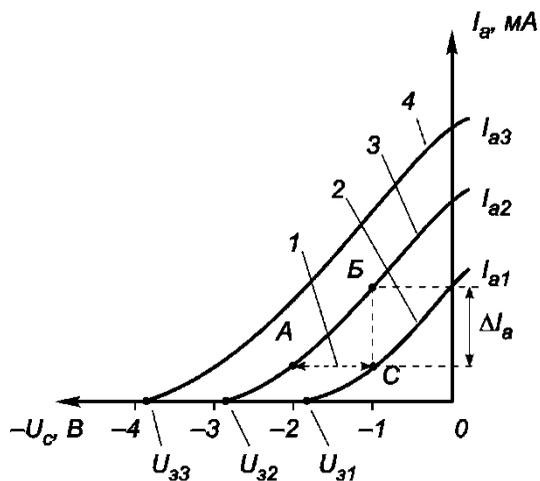


Рис. 1.6. Семейство анодно-сеточных характеристик триода:

1 – ΔU_c ; 2 – U_{a1} ; 3 – U_{a2} ; 4 – $U_{a3} > U_{a2}$

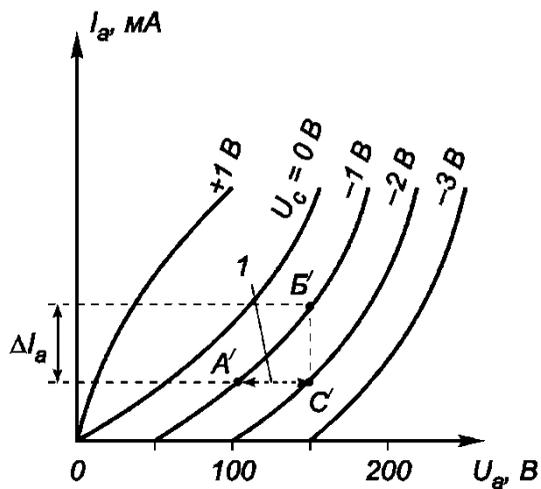


Рис. 1.7. Семейство анодных характеристик триода: 1 – ΔU_a

равен нулю, для различных анодных напряжений. Увеличение анодного напряжения сдвигает характеристику влево относительно первоначальной. Анодный ток даже при значительных положительных напряжениях на аноде возникает, если $|U_c| < |U_{c\text{зан}}|$, при $|U_c| > |U_{c\text{зан}}|$ анодный ток в лампе равен нулю и лампа заперта. Зависимость $I_a = f(U_c)$ нелинейна. Начиная с напряжения запирания анодный ток возрастает сначала медленно (нижний криволинейный участок), затем быстрее, и характеристика становится почти прямолинейной. В области положительных значений U_c вследствие появления сеточного тока кривая постепенно становится положе, т.е. рост анодного тока замедляется.

Семейство анодных характеристик $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ состоит из ряда монотонно возрастающих кривых (рис. 1.7). При $U_c = 0$ характеристика триода подобна характеристике диода. При увеличении отрицательного напряжения на сетке характеристики сдвигаются вправо. При $c < 0$ сеточный ток равен нулю и анодный ток равен катодному току. Анодный ток возникает при некотором положительном напряжении на аноде U_{a0} . При увеличении отрицательного напряжения на сетке U_{a0} увеличивается, т.е. характеристика смещается вправо. При $U_c > 0$ анодные характеристики выходят из начала координат и имеют характерный излом. Начальный более крутой участок соответствует режиму возврата электронов к сетке $U_a \leq U_c$. В этом режиме в пространстве сетка – анод образуется объемный заряд электронов, возвращающихся к сетке. Анодное поле влияет на движение этих электронов непосредственно, не будучи экранировано сеткой. Поэтому наблюдается резкий рост анодного тока при незначительном изменении напряжения U_a . При дальнейшем увеличении U_a ($U_a > U_c$) наступает режим прямого перехвата электронов сеткой, в котором увеличение тока I_a объясняется влиянием анодного напряжения на объемный заряд у катода. Это влияние ослаблено экранирующим действием сетки, и рост анодного тока замедляется. Вид зависимости $I_a(U_a)$ становится аналогичным зависимости $I_a(U_a)$ при $U_c < 0$.

С помощью диодов и триодов можно

- выпрямлять и детектировать переменные сигналы;
- усиливать слабые сигналы, подаваемые на сетку;
- генерировать электрические сигналы и переводить их.

Недостатки ламповой радиотехники:

- большие габариты приборов;
- большая потребляемая мощность;
- большой вес аппаратуры из-за трансформаторов или сухих источников питания (батарей);
- нагрев аппаратуры при работе.

Физические основы работы твердотельных полупроводниковых приборов (диод и транзистор) будут излагаться в курсах «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников», «Физические основы электроники».

1.3. Основные сведения о полупроводниковых материалах

Собственный полупроводник. Рассмотрим механизм проводимости полупроводниковых материалов на примере элементарных полупроводников. В кристалле кремния (он находится в четвертой группе таблицы Менделеева) четыре валентных электрона каждого атома образуют четыре ковалентные связи. Каждая связь образована двумя электронами, принадлежащими соседним атомам, рис. 1.8. В узле решетки находится ион кремния с зарядом +4, ему принадлежат четыре валентных электрона (электроны изображены черными точками). В идеальном полупроводнике, изображенном на рис. 1.8,а, все электроны связаны. Если такой полупроводник поместить в электрическое поле, то ток через него не потечет, так как нет свободных носителей заряда. Если под внешним энергетическом воздействием (например, тепловом) произойдет разрыв валентной связи, то электрон станет свободным и сможет двигаться в электрическом поле. Такой процесс называется *генерацией*. На месте электрона остается незанятая связь, имеющая избыточный положительный заряд, так как он не скомпенсирован зарядом электрона. Вакантное место в ковалентной свя-

зи называется *дыркой*. В целом кристалл остается электронейтральным. На рис. 1.8,б свободные электроны и дырки изображены темными и светлыми кружками. Если свободный электрон вернется к своему атому в ковалентную связь, то он будет связанным. Такой процесс называется *рекомбинацией*.

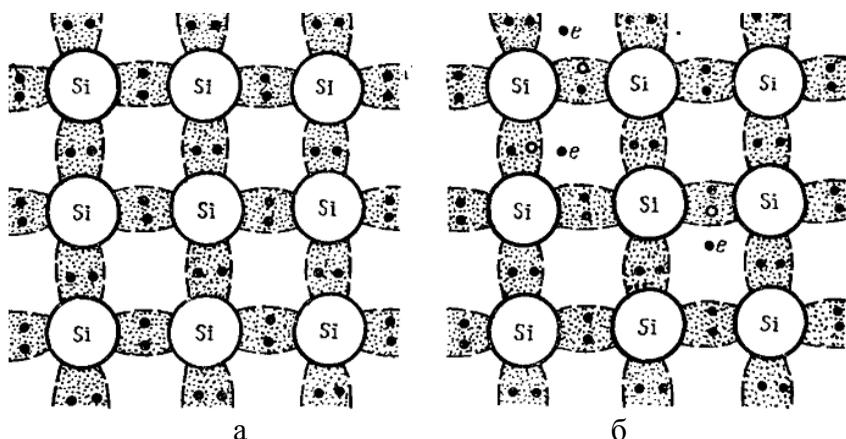


Рис. 1.8. Ковалентные связи в собственном полупроводнике (кремнии)

Вакантное место в ковалентной связи – дырка будет перемещаться во внешнем электрическом поле, что равносильно перемещению по полю положительного заряда, а отрицательно заряженный электрон движется против поля. Механизм проводимости, обусловленный движением связанных электронов по вакантным связям, называется *дырочной проводимостью*.

Полупроводник, в котором в результате разрыва ковалентных связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется *собственным*. Энергия, необходимая для разрыва ковалентной связи, называется *шириной запрещенной зоны полупроводника* – E_g .

Ширина запрещенной зоны является важнейшей характеристикой полупроводника, например, для кремния она равна $E_g = 1,1$ эВ, для германия – $0,66$ эВ, для арсенида галлия – $1,43$ эВ. Единица измерения 1 эВ соответствует энергии элек-

трона, ускоренного разностью потенциалов в 1 В, поэтому $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

При комнатной температуре концентрация свободных электронов и дырок в германии равна 10^{13} см^{-3} , в кремнии – 10^{10} см^{-3} . С ростом температуры увеличивается число разорванных связей, и концентрация свободных электронов и дырок растет по экспоненте. При приложении электрического поля свободные электроны и дырки (носители заряда) двигаются под воздействием поля, их направленное движение называется *дрейфом*.

Важной характеристикой полупроводникового материала является *подвижность носителей заряда* μ . Она численно равна скорости дрейфа v носителей заряда в электрическом поле единичной напряженности

$$\mu = \frac{v}{E}, \quad (1.1)$$

где E – напряженность электрического поля.

Подвижность электронов μ_n и дырок μ_p разные: $\mu_n > \mu_p$ практически во всех полупроводниках. Чем выше подвижность носителей заряда в полупроводнике, тем более быстродействующие приборы можно изготовить на его основе, тем лучше будет его электропроводность.

В чистом полупроводнике, не содержащем примесей, осуществляется электронная и дырочная проводимость. Электрический ток в собственном полупроводнике складывается из двух составляющих – электронного и дырочного токов, текущих в одном направлении.

Прохождение тока в веществе подчиняется закону Ома $I = U/R$, где U – разность потенциалов на концах проводника, а R – его сопротивление. В дифференциальной форме закон Ома связывает плотность тока j с электропроводностью σ и напряженностью электрического поля E :

$$j = \sigma \cdot E. \quad (1.2)$$

Электропроводность σ является обратной величиной удельному сопротивлению ρ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.3)$$

Электропроводность (или проводимость) зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Поскольку ток в собственном полупроводнике переносится электронами и дырками, то и электропроводность собственного полупроводника σ_i имеет два слагаемых:

$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot \mu_n + e \cdot p_i \cdot \mu_p \quad (1.4)$$

где e – заряд электрона;

n_i и p_i – концентрация электронов и дырок.

Индекс i показывает, что параметры относятся к собственному полупроводнику (*intrinsic* английское слово – собственный). В собственном полупроводнике $n_i = p_i$

$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \quad (1.5)$$

Электропроводность σ_i зависит от ширины запрещенной зоны E_g и температуры T :

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp [- E_g / (2kT)] \quad (1.6)$$

где σ_0 – предэкспоненциальный множитель, слабо зависящий от температуры;

k – постоянная Больцмана.

Примесный полупроводник. Рассмотрим электропроводность элементарного полупроводника, в котором один из атомов замещен элементом пятой группы, например, мышьяк в кремнии. Полупроводник, имеющий примеси, называется *примесным*, а проводимость, созданная примесью, называется *примесной*.

У мышьяка пять валентных электронов. В решетке кремния четыре валентных электрона мышьяка участвуют в образовании ковалентной связи – рис. 1.9,а. Пятый электрон в ковалентную связь не вступает, он электрически связан с атомом мышьяка (уравновешивает его заряд), но эта связь намного слабее ковалентной. При низких температурах пятый электрон локализован около атома мышьяка, но при повышении температуры он отрывается от атома примеси и может свободно двигаться по кристаллу, а атом мышьяка превращается в положительный ион.

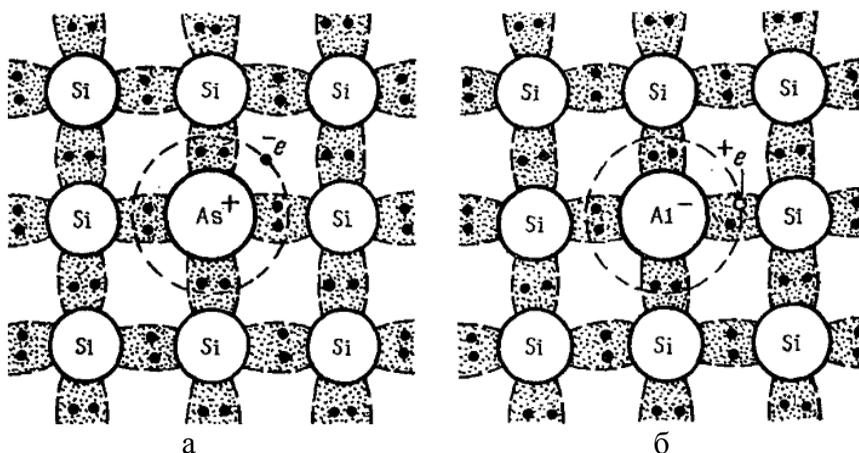


Рис. 1.9. Кристаллическая решетка донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

Энергия отрыва пятого электрона от атома примеси $\Delta E_{пр}$ намного меньше энергии отрыва электрона из ковалентной связи $\Delta E_{пр} \ll E_g$. $\Delta E_{пр}$ называется *энергией активации примеси*. $\Delta E_{пр}$ в кремнии и германии составляет сотые доли электронвольта. Например, $\Delta E_{пр}$ для мышьяка в кремнии составляет 0,05 эВ.

Вместе с ионизацией примеси может происходить и ионизация основного вещества. Но при не очень высоких температурах количество электронов, оторванных от примеси, будет

на порядки больше количества свободных электронов и дырок, образовавшихся за счет разрыва ковалентных связей. Поэтому в таком полупроводнике количество электронов n будет намного больше количества дырок p , такой полупроводник называется *электронным или n -типа*, а примесь, отдающая электроны, называется *донорной*.

Донорными примесями в германии и кремнии являются элементы пятой группы таблицы Менделеева: сурьма, фосфор, мышьяк.

Электроны в полупроводнике n -типа называются *основными носителями заряда*, а дырки – *неосновными*.

При комнатной температуре в кремнии и германии вся примесь ионизирована, каждый атом примеси отдал один электрон, поэтому концентрация свободных электронов n равны концентрации примеси $N_{\text{пр}}$: $n = N_{\text{пр}}$, а формулу (1.4) можно записать в виде

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p \quad (1.7)$$

учитывая, что $p \ll n$,

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n = \sigma = e \cdot N_{\text{пр}} \cdot \mu_n \quad (1.8)$$

Если в качестве примеси в кристаллическую решетку полупроводника с ковалентной связью ввести атомы элементов третьей группы таблицы Менделеева, например, алюминий в решетку кремния, то одна ковалентная связь не будет полностью заполнена – рис. 1.9,б. В незаполненную связь около атома алюминия может перейти электрон от атома кремния, при этом образуется отрицательный ион алюминия и свободная дырка, которая перемещается по связям кремния и принимает участие в проводимости полупроводника.

Примесь, захватывающая электроны, называется *акцепторной*. В этом случае для образования свободной дырки требуется значительно меньшая энергия (энергия активации примеси) $\Delta E_{\text{пр}}$, чем для разрыва ковалентных связей кремния: $\Delta E_{\text{пр}}$

$\ll E_g$. Поэтому количество дырок p будет значительно больше количества свободных электронов n и электропроводность кристалла будет *дырочной*. В таком полупроводнике основными носителями будут дырки, а электроны – неосновными носителями. Полупроводник с акцепторной примесью называется *дырочным или p-типа*.

Типичными акцепторами в кремнии и германии являются элементы третьей группы таблицы Менделеева: бор, алюминий, галлий. $\Delta E_{пр}$ акцепторов в кремнии и германии имеет такой же порядок величины, как и $\Delta E_{пр}$ доноров, и составляет сотые доли электронвольта. Для алюминия в кремнии она составляет $\Delta E_{пр} = 0,06$ эВ.

Для электропроводности такого полупроводника, учитывая $p \gg n$, формула (1.7) примет вид

$$\sigma = e \cdot p \cdot \mu_p = \sigma = e \cdot N_{пр} \cdot \mu_p \quad (1.9)$$

При низких температурах, когда тепловой энергии kT недостаточно для полной ионизации примеси ($kT \ll \Delta E_{пр}$) проводимость примесного полупроводника с ростом температуры будет экспоненциально расти

$$\sigma_{пр} = \sigma_0 \cdot \exp [- \Delta E_{пр} / (2kT)] \quad (1.10)$$

Последняя формула одинакова для электронных и дырочных полупроводников.

На этом температурном участке происходит активация примеси, концентрация основных носителей в примесном полупроводнике с ростом температуры растет по экспоненте; этот участок называется *участком примесной проводимости*.

Температурный участок, на котором примесь полностью ионизирована (концентрация основных носителей равна $N_{пр}$), а собственная проводимость $\sigma_i \ll \sigma_{пр}$, называется *участком истощения примесной проводимости*. Для этого участка можно считать, что с ростом температуры проводимость практически

не изменяется $\sigma_{\text{пр}} = e \cdot \mu_{\text{пр}} \cdot N_{\text{пр}} \approx \text{const}$, так как $\mu_{\text{пр}}$ слабо зависит от температуры.

При дальнейшем повышении температуры, когда концентрация собственных носителей заряда n_i становится сравнимой с $N_{\text{пр}}$, начинается *участок собственной проводимости*, для которого справедлива формула (1.6). Таким образом, при высоких температурах все примесные полупроводники становятся собственными (при этом исчезают различия между полупроводниками n- и p-типа).

Температура перехода к собственной проводимости зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и от концентрации примеси. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем при более высоких температурах наблюдается собственная проводимость.

1.4. Контакт электронного и дырочного полупроводников (p-n переход)

1.4.1. Полупроводниковый диод с p-n переходом

P-n переход – это контакт двух областей полупроводника: n – типа (электроны) и p – типа (дырки). Между которыми образуется потенциальный барьер. Высота потенциального барьера зависит от внешнего поля. При прямом включении барьер уменьшается и течет ток, при обратном включении барьер увеличивается, и тока почти нет. Обратный ток обусловлен малым количеством электронов из p- области. Таким образом, p-n переход работает почти как вакуумный диод.

Для создания контакта электронного и дырочного полупроводников в одну часть кристалла вводится акцепторная примесь, а в другую часть – донорная. Граница раздела между областями кристалла с разного типа проводимостью называется *электронно-дырочным или p-n переходом*.

В области контакта существует большой градиент концентраций электронов и дырок. Это вызывает диффузию электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в

n-область. Возникновение диффузионных потоков приводит к разделению зарядов: в n-области у границы перехода появится положительный объемный заряд, а в p-области у границы перехода – отрицательный – рис. 1.10. Объемные заряды в области контакта создают сильное электрическое поле, направленное от n-области к p-области, которое препятствует дальнейшему движению электронов и дырок.

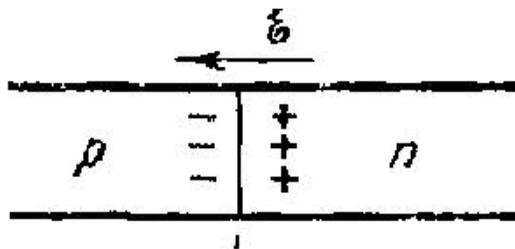


Рис. 1.10. Возникновение электрического поля в p-n переходе

Приложим внешнее напряжение к p-n переходу: минус – к электронному полупроводнику, плюс – к дырочному. Такое напряжение соответствует включению перехода в прямом направлении. Внешнее электрическое поле направлено против внутреннего поля перехода, снижая последнее. Это позволит основным носителям заряда пересекать область перехода, при этом они становятся неосновными носителями, создавая заметный ток.

При включении внешнего напряжения в обратном направлении внешнее поле совпадает по направлению с внутренним, что увеличивает потенциальный барьер и препятствует движению основных носителей заряда.

На рис. 1.11 изображена *вольтамперная характеристика p-n перехода*: обратный ток настолько мал, что p-n переход, включенный в обратном направлении, широко используется для изоляции соседних элементов ИМС друг от друга.

При увеличении обратного напряжения на переходе обратный ток стремится к насыщению – j_s на рис. 1.11. При

больших обратных напряжениях происходит резкий рост обратного тока. Это явление называется *пробоем*.

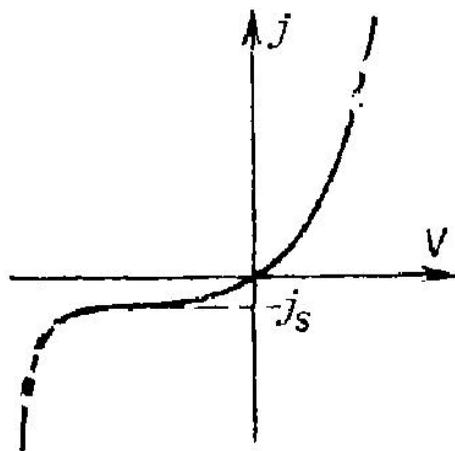


Рис. 1.11. Вольтамперная характеристика p-n перехода

В основе полупроводниковых транзисторов лежит работа p-n переходов. Например, в структуру биполярного транзистора входят два p-n перехода: эмиттер – база и база – коллектор.

1.4.2. Полупроводниковый транзистор n-p-n

Транзистор (от английского *transfer*— переносить и латинского *resistor*— сопротивляюсь) — электронный прибор на основе полупроводникового кристалла, имеющий три электрода и предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний.

Биполярные транзисторы — это полупроводниковые приборы с двумя встречно-направленными p-n-переходами, созданными в одном кристалле, и тремя внешними выводами.

В *биполярных* транзисторах физические процессы обусловлены переносом носителей заряда обоих знаков. В основе работы биполярных транзисторов лежат процессы инжекции неосновных носителей, диффузии и дрейфа основных и неос-

новых носителей тока. В качестве полупроводниковых материалов для изготовления биполярных транзисторов используются преимущественно кремний, германий и арсенид галлия (GaAs).

Биполярный транзистор (БТ) состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: *эмиттера*, *базы* и *коллектора* (рис. 1.12, а, б).

Переход, который образуется на границе эмиттер – база, называется эмиттерным, а на границе база – коллектор – коллекторным. В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n*.

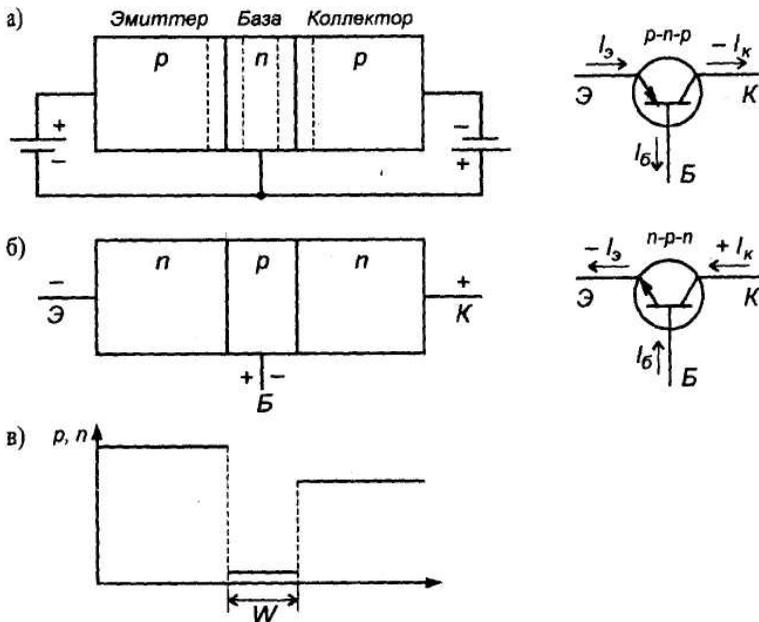


Рис. 1.12. Схематическое изображение биполярного плоскостного транзистора и его условное изображение: а – *p-n-p*-типа; б – *n-p-n*-типа; в – распределение концентраций основных носителей заряда вдоль структуры транзистора в равновесном состоянии; W – толщина базы

Область транзистора, расположенная между переходами, называется *базой* (Б). Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую – так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а соответствующий переход – эмиттерным.

Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы, называют коллектором (К), а переход – коллекторным.

Принцип работы транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*-типов одинаков, но в транзисторе со структурой типа *p-n-p* основной ток, текущий через базу, создается дырками, инжектируемыми из эмиттера, а в транзисторах со структурой *n-p-n*-типа – электронами.

На условных обозначениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода (то есть от «плюса» к «минусу»).

Если бы эмиттерный и коллекторный переходы находились на большом расстоянии друг от друга, то есть толщина базы W была бы значительно больше диффузионной длины неосновных носителей в базе, то носители, инжектируемые эмиттером, не доходили бы до коллектора, так как рекомбинировали бы в базе. В этом случае каждый из переходов можно рассматривать в отдельности, не учитывая их взаимодействия, причем вольт-амперная характеристика эмиттерного перехода представляла бы прямую ветвь характеристики диода, а коллекторного перехода – обратную ветвь.

Основная особенность биполярного транзистора заключается во взаимном влиянии переходов друг на друга. В биполярных плоскостных транзисторах для эффективного влияния эмиттерного перехода на коллекторный необходимо выполнение следующих требований:

– толщина базы транзистора W должна быть много меньше диффузионной длины инжектируемых в нее носителей L_6 , то есть $W = 1,5 - 25 \text{ мкм} < L_6$;

– концентрация основных носителей в базе должна быть много меньше концентрации основных носителей в области эмиттера;

– концентрация основных носителей в области коллектора должна быть несколько меньшей, чем в области эмиттера;

– Площадь коллекторного перехода должна быть в несколько раз больше площади эмиттерного перехода.

Все положения, рассмотренные ранее для одного $p-n$ -перехода, справедливы для каждого из $p-n$ -переходов транзистора. В отсутствие внешнего напряжения наблюдается динамическое равновесие между потоками дырок и электронов, протекающими через $p-n$ -переходы, и общие токи равны нулю.

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

– режим *отсечки* – оба $p-n$ -перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток;

– режим *насыщения* – оба $p-n$ -перехода открыты;

– *активный* режим – один из $p-n$ -переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором невозможно. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном переходе – обратное, то включение транзистора считают *нормальным*, при противоположной полярности – *инверсным*.

По характеру движения носителей тока в базе различают диффузионные и дрейфовые биполярные транзисторы.

Основные характеристики транзистора определяются в первую очередь процессами, происходящими в базе. В зависимости от распределения примесей в базе может присутство-

вать или отсутствовать электрическое поле. Если при отсутствии токов в базе существует электрическое поле, которое способствует движению неосновных носителей заряда от эмиттера к коллектору, то транзистор называют *дрейфовым*, если же поле в базе отсутствует – бездрейфовым (*диффузионным*).

Транзистор *p-n-p*-типа в активном режиме включения показан на рис. 1.12,а. Эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. При этом через эмиттерный переход должен протекать большой прямой ток $I_{\text{э}}$, а через коллекторный переход – малый обратный ток коллектора.

Основные носители заряда в эмиттере – дырки – диффундируют из-за разности концентрации в базу, становясь там неосновными носителями. Процесс перехода носителей зарядов из эмиттера в базу называют инжекцией. По той же причине электроны из области базы диффундируют в область эмиттера, поэтому ток диффузии эмиттера имеет две составляющие – дырочную $I_{\text{эп}}$ и электронную $I_{\text{нп}}$: $I_{\text{э}} = I_{\text{эп}} + I_{\text{нп}}$. Так как концентрация дырок в базе значительно меньше концентрации дырок в эмиттере, то дырочный ток $I_{\text{эп}}$ преобладает над электронным током из базы $I_{\text{нп}}$, т.е. $I_{\text{эп}} \gg I_{\text{нп}}$, поэтому можно принять, что ток базы для *p-n-p*-транзисторов $I_{\text{б}} \approx I_{\text{эп}}$.

Различают три схемы включения транзистора в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов (рис. 1.13): с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Первый закон Кирхгофа применительно к транзистору дает равенство

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}, \quad (1.11)$$

то есть ток эмиттера в транзисторе распределяется между базой и коллектором.

В этих схемах источники постоянного напряжения и резисторы нагрузки обеспечивают режимы работы транзисторов по постоянному току.

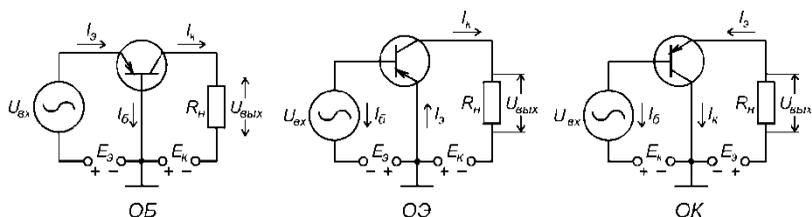


Рис. 1.13. Основные схемы включения транзисторов

Транзистор содержит два р-п перехода, один из которых включен в прямом направлении (эмиттер – база), а второй – в запиорном направлении (коллектор – база). Так как входное сопротивление намного меньше выходного сопротивления, то падение напряжения на входе будет меньше напряжения на выходе, а ток на выходе почти равен току на входе. Таким образом, в схеме с общей базой транзистор будет усиливать мощность $\mu = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = (IU)_{\text{вых}}/(IU)_{\text{вх}} \gg 1$.

Для усиления тока используется схема с общим эмиттером, похожая на схему включения вакуумного триода. При этом база транзистора играет роль сетки триода и малые электрические сигналы на входе транзистора усиливаются в тысячи раз на выходе.

Главные отличия полупроводниковых приборов от вакуумных приборов:

- в полупроводниках два типа носителей зарядов, которые перемещаются не в вакууме, а в твердом теле на расстоянии несколько микронов;

- малая потребляемая мощность (милливатты вместо ваттов), требуемая для работы полупроводникового прибора – достаточно питание от батарейки, а не через трансформаторы от сети переменного тока.

- малые размеры и вес (порядка 1 см^3 вместо 10 см^3 , миллиграммы вместо граммов), устойчивость к ударам, вибрации и др. механическим воздействиям;

- отсутствие вакуума, простота и массовость технологии;

- микронные размеры элементов определяют название отрасли промышленности – микроэлектроника.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

2.1. Основные этапы технологии ИМС

Основными этапами изготовления ИМС являются:

- получение чистого полупроводникового материала;
- выращивание из него монокристаллических слитков с заданными электрофизическими свойствами;
- изготовление из слитков полупроводниковых пластин;
- получение на основе пластин базовых полупроводниковых структур (обычно используются эпитаксиальные структуры);
- формирование элементов ИМС в эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры;
- изготовление ИМС в виде отдельных законченных изделий.

2.2. Выбор полупроводникового материала

Технология ИМС предъявляет к полупроводниковому материалу жесткие требования.

Для массового производства приборов и ИМС полупроводниковый материал должен:

- иметь высокую химическую стойкость и стабильность свойств в широком температурном диапазоне;
- обладать хорошей обрабатываемостью механическими, химическими и другими методами;
- давать возможность получать на их основе совершенные и чистые монокристаллические слитки и слои;
- давать возможность получения локальных областей электронного и дырочного типа;
- иметь необходимую ширину запрещенной зоны и высокую подвижность носителей заряда;

– опираться на достаточно емкую сырьевую базу, иметь приемлемую стоимость.

В настоящее время основным полупроводниковым материалом является кремний. Сырье для его получения практически неисчерпаемо: содержание в земной коре составляет около 30 %. Высокие механические, химические, тепловые, оптические и электрофизические свойства кремния обеспечили ему лидирующее место в производстве как дискретных полупроводниковых приборов, так и в производстве ИМС на протяжении 50 лет. Другие полупроводники примеряются намного реже; например, германий до сих пор используется для изготовления дискретных приборов – диодов, транзисторов и др.; арсенид галлия используется для изготовления перспективных ИМС. Кремний остается перспективным материалом и для нанoeлектроники.

В области полупроводниковой оптоэлектроники на первое место вышли химические соединения элементов третьей и пятой групп таблицы Менделеева – A_3B_5 . Это соединения элементов третьей группы: Al, Ga, In и пятой – P, As, Sb. Используются как двухкомпонентные соединения GaAs, InP, GaP и др., а также многокомпонентные твердые растворы на их основе – AlGaAs, InGaAsP.

2.3. Получение полупроводникового материала

Материалами, используемыми для изготовления ИМС, являются кремний и арсенид галлия. Однако ИМС делают в основном на кремнии, так как технология ИМС на арсениде галлия более сложная и не столь хорошо отработанная, как на кремнии. Поэтому кремний является базовым полупроводниковым материалом для ИМС. Для этого он должен быть хорошо очищен и иметь монокристаллическую структуру.

В массовом производстве кремний получают восстановлением из песка (SiO_2) в смеси с коксом (C) при высоких температурах. Полученный кремний называется техническим. Его

чистота (98 %) и структура поликристалла не позволяют использовать такой кремний для изготовления ИМС.

Далее производится его глубокая очистка, для чего кремний переводится в легколетучее соединение, которое может быть легко очищено различными физическими, химическими, физико-химическими методами. После очистки кремний восстанавливается, его чистота называется «полупроводниковой», содержание примесей не превышает 10^{-8} %. Для получения кремния самой высокой чистоты используется *метод зонной плавки*, основанный на том, что примеси хорошо растворяются в жидкой фазе (расплаве) и гораздо хуже в твердой фазе. Создавая расплавленную узкую зону в слитке и проходя этой зоной вдоль слитка, расплавленная зона собирает в себя примеси. Проводя зонную плавку многократно, можно получить максимально возможную чистоту материала. Для кремния проводится вертикальная бестигельная зонная плавка, так как примеси тигля могут загрязнять кремний, рис. 2.1.

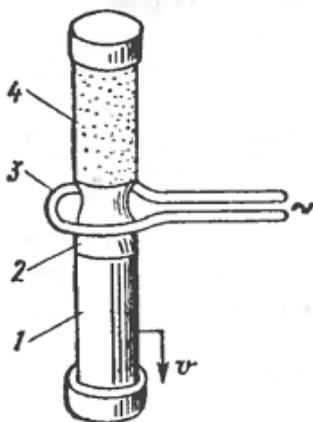


Рис. 2.1. Схема зонной плавки кремния:

- 1 – монокристалл; 2 – расплавленная зона; 3 – индуктор;
- 4 – поликристалл

Выращивание монокристаллов обычно проводится *методом Чохральского* – рис. 2.2.

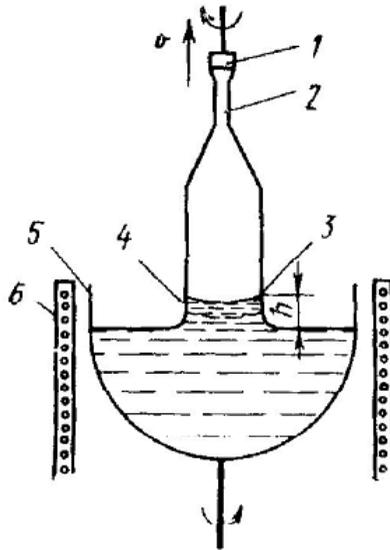


Рис. 2.2. Метод Чохральского: 1 – затравка, 2 – шейка монокристалла, 3 – фронт кристаллизации, 4 – переохлажденная зона, 5 – тигель, 6 – нагреватель

Это метод вытягивания монокристалла из расплава на затравку. Затравкой является небольшой монокристалл кремния, он и задает ориентацию будущего слитка. Одновременно в расплав вводится дозированное количество легирующей примеси (доноров или акцепторов). Поэтому монокристаллические слитки имеют заданный тип проводимости, удельное сопротивление ρ монокристаллов определяется концентрацией введенной примеси $N_{пр}$:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e\mu N_{пр}}, \quad (2.1)$$

где μ – подвижность носителей заряда;
 σ – электропроводность кремния.

Слабелегированные монокристаллы выращивают методом зонной плавки.

Монокристаллические слитки кремния имеют цилиндрическую форму. Метод Чохральского позволяет регулировать диаметр монокристаллов в широких пределах, в настоящее время максимальный диаметр слитков составляет 450 мм.

2.4. Получение полупроводниковых пластин

Полупроводниковые слитки режутся на пластины тонкими стальными дисками с алмазной режущей кромкой, рис. 2.3.

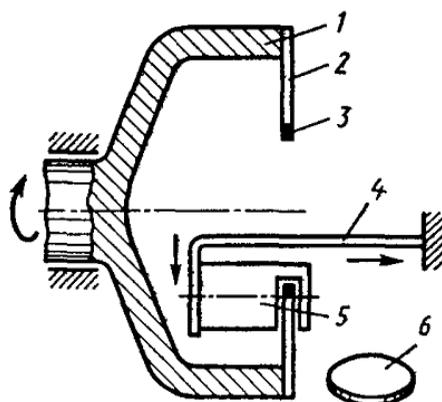


Рис. 2.3. Резка полупроводникового слитка диском с внутренней алмазной режущей кромкой:
1 – шпиндель; 2 – основа диска; 3 – режущая кромка;
4 – держатель слитка; 5 и 6 – полупроводниковые слиток и пластина

Диаметр и площадь пластин определяются диаметром слитка. Чем больше площадь пластины, тем на большее число кристаллов ее можно разделить, тем больше ИМС можно изготовить на одной пластине. На пластине диаметром 450 мм можно разместить более 2000 кристаллов, в каждом из которых можно сформировать до 109 схемных элементов.

Пластина, вырезанная из слитка, содержит геометрические и структурные дефекты. Их устраняют шлифовкой и полировкой (сначала механической, потом химической) до 14 класса чистоты. Высота микронеровностей поверхности составляет не более 50 нм.

2.5. Шлифовка, полировка и травление пластин

После проведения процесса резки слитков на пластины обязательной технологической операцией является шлифовка, необходимая для получения плоскопараллельности сторон пластин, точного соответствия заданным размерам и уменьшения глубины нарушенного слоя.

Для получения хороших результатов шлифовки необходимо выполнять следующие требования:

- шлифовку нужно проводить в чистых, свободных от пыли помещениях и под защитными кожухами с избыточным давлением очищенного воздуха;

- все установки для шлифовки должны быть разделены по виду обработки и типу используемого абразива;

- все материалы (шлифовальные круги, абразивные порошки) должны быть тщательно рассортированы и храниться в отдельных герметичных скафандрах.

Процесс шлифовки. При вращении шлифовального круга и сепаратора-кассеты с пластинами зерна абразивной суспензии вдавливаются одними своими гранями в стекло (чугун), а другими – в полупроводниковую пластину. В местах соприкосновения с зернами абразива на поверхности полупроводниковой пластины возникают микротрещины, максимальная глубина которых зависит от природы и величины выбранных абразивных зерен. Когда в результате многократных воздействий зерен весь поверхностный слой покрывается трещинами, последующие перемещение зерен по тем же местам будут способствовать извлечению осколков полупроводника. Благодаря этим воздействиям образуются так называемые выколки, характеризующие собой начало процесса шлифовки. Множество расположенных рядом выколок образуют шероховатую поверхность, характерную для шлифованной поверхности полупроводниковых кристаллов. Глубина выколок в зависимости от применяемого абразивного порошка составляет 3 – 30 мкм.

Практически первоначально шлифовку кристаллов полупроводникового материала осуществляют грубодисперсными порошками карбида бора, а затем – доводят до необходимых

размеров и требуемой чистоты поверхности порошками электрокорунда или карбида кремния с зернистостью М14, М10, М5.

При шлифовке микротвердость применяемого абразива должна быть в два – три раза выше микротвердости шлифуемого материала. Этому требованию удовлетворяют электрокорунд, карбид кремния зеленый, карбид бора, алмаз.

Порошок с зернистостью М14 применяют при шлифовке в основном для выравнивания пластин по толщине и выведения клина, полученного при резке слитка на пластины. Шлифовку при этом производят без приклейки пластин к шлифовальным головкам. Окончательное шлифование проводят с использованием порошков с зернистостью М10 и М5 с обязательной приклейкой к шлифовальным головкам.

Для того, чтобы уменьшить повреждения поверхности, оставшиеся после шлифовки, пластины полупроводника подвергают полировке.

Механическую полировку полупроводниковых материалов проводят оптическим или металлографическим методом.

При оптической полировке абразивы – окись хрома, окись церия или смеси окисей других редкоземельных металлов – применяют в виде водных суспензий, которые распыляют на полированную плоскость станка для полировки оптических стекол.

Металлографическую полировку производят на дисках, обтянутых шелком, нейлоном, батистом, фланелью, замшей, фетром или велюром, с применением в качестве абразива порошков алмаза, окиси алюминия и окиси хрома.

Процесс полировки состоит из трех основных этапов.

Первый этап полировки заключается в следующем. На стеклянный диск натягивается мягкий материал (батист) с помощью металлических пялец. Поверхность батиста смачивается маслом МВП. На вспомогательный стеклянный диск диаметром 150 мм наносят алмазный порошок АСМЗ в количестве одного карата. На этот же диск наносят несколько капель масла и растирают алмазный порошок по всей поверхности стеклянного диска другим таким же диском до полного распреде-

ления порошка по всей поверхности дисков. После этого поочередно каждый диск переносят на батиновый полировальник и втирают алмазный порошок по всей его поверхности. Втирание производят до тех пор, пока весь алмазный порошок не перейдет на поверхность полировальника.

На приготовленный таким образом полировальник помещают полировальные головки с приклеенными на них полупроводниковыми пластинами. Нагрузка на полупроводниковые пластины устанавливается равной $5,5 \cdot 10^3$ н/м², а скорость вращения полировальника 30 об/мин.

Второй этап полировки – это смена материала полировальника. Для этого на стеклянный полировальник натягивают велюр, смоченный горячей водой. На поверхность велюра наносят тем же способом слой масла МБП и алмазный порошок АСМ1. Полировальные головки с полупроводниковыми пластинами, прошедшими первый этап полировки, помещают на велюровой полировальник, и процесс полировки продолжается. Режим полировки: нагрузка на пластины $9,8 \cdot 10^3$ н/м², скорость 30 об/мин.

Третий этап полировки заключается в том, что на вновь приготовленный полировальник из велюра наносят мягкой кисточкой окись хрома. Полировальные головки с полупроводниковыми пластинами, прошедшими второй этап полирования, обрабатывают также окисью хрома.

Для полировки используют окись хрома двух сортов: грубую с размером зерна 0,6 – 0,8 мкм, полученную путем восстановления бихромата калия серой, и тонкую с размером зерна 0,2-0,4 мкм, полученную в результате термического разложения бихромата аммония. Грубую окись применяют на начальном этапе полировки, а тонкую – на окончательном этапе.

Последний этап полировки имеет большое значение – он дает возможность удалить так называемый алмазный фон с поверхности пластин и значительно уменьшить величину нарушенного слоя.

Для обработки указанным методом 1000 пластин необходимо затратить 50 карат алмазного порошка АСМ3 и 16 карат АСМ1.

Широкое применение нашли также полировальные пасты на основе синтетических алмазов АПЗН, АП2Н, АП1Н. Применение алмазных паст по сравнению с алмазными порошками повышает производительность процесса в 10 раз. В качестве смачивающих жидкостей для алмазных паст используют спирт, скипидар или часовое масло МБП – 12.

Травление пластин кремния производят для удаления механически нарушенного приповерхностного слоя монокристалла. В качестве основного травителя используется смесь азотной (HNO_3) и плавиковой (HF) кислот, иногда для замедления скорости процесса добавляется уксусная кислота.

Процесс травления кремния идет в две стадии: сначала азотная кислота способствует окислению кремния, а затем окисел SiO_2 растворяется плавиковой кислотой. Глубина травления составляет несколько микрон, а поверхность кремния приобретает зеркальное качество, что соответствует 14 классу чистоты поверхности.

После травления пластины кремния многократно отмываются от следов кислоты в денонизованной воде, пока электросопротивление воды после отмывки не сравняется с электросопротивлением исходной денонизованной воды (обычно это сопротивление равно нескольким мегаомам).

2.6. Получение эпитаксиальных структур

До 1965 г. выход годных ИМС на биполярных транзисторах не превышал 5 %. Использование в структуре ИМС эпитаксиального слоя позволило увеличить процент выхода годных ИМС до 50 – 70 %.

Современные ИМС на биполярных транзисторах получают на эпитаксиальных структурах. Поэтому они называются базовыми полупроводниковыми структурами.

Эпитаксия – это наращивание монокристаллических слоев на монокристаллическую подложку. Если материал пленки и подложки одинаковый, то такой вид эпитаксии называется *гомоэпитаксией*. Если пленка и подложка имеют разную природу, то это *гетероэпитаксия*.

При изготовлении ИМС обычно используется гомоэпитаксия (кремний на кремнии), в структурах КНС (кремний на сапфире) реализуется гетероэпитаксия. Гетероэпитаксия используется для получения гетероструктур оптоэлектронного назначения, например, на подложке из арсенида галлия GaAs наращивают слой трехкомпонентного твердого раствора Al-GaAs.

При любом способе эпитаксии имеются: источники атомов ростового вещества, среда, в которой эти атомы переносятся к подложке, и подложка.

Если средой переноса является вакуум, то это вакуумная эпитаксия. В вакууме атомы обычно переносятся молекулярными пучками. Поэтому такой вид эпитаксии называется *молекулярно-лучевой (МЛЭ)*.

Если средой переноса служит газ или пар, то эпитаксия называется *газофазной* или *парофазной*.

Если атомы поступают из жидкой фазы, то это *жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ)*.

2.7. Методы формирования элементов ИМС

Основным элементом полупроводниковых ИМС является р-п переход. Для его образования в полупроводник заданного типа проводимости вводятся атомы примеси, создающей противоположного типа.

Введение примеси в полупроводник с целью изменения его электрофизических свойств называется *легированием*.

В технологии ИМС широко используются два метода легирования: термическая диффузия примесей и ионная имплантация.

Диффузия примесей – это процесс переноса примесных атомов из среды, где их концентрация велика, в область с меньшей концентрацией за счет теплового хаотического движения частиц вещества. Движущей силой диффузии является градиент концентрации вещества.

Поток диффундирующих примесей направлен в сторону, противоположную градиенту концентрации, и пропорционален его величине. Коэффициент пропорциональности (D) называется *коэффициентом диффузии*.

Коэффициент диффузии в твердом теле экспоненциально зависит от температуры T :

$$D = D_0 \cdot [\exp (- U_a / (kT))] \quad (2.2)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель;

U_a - энергия активации процесса диффузии;

k – постоянная Больцмана.

Примесные атомы за счет тепловой энергии переходят из одного устойчивого положения в кристалле в другое, преодолевая потенциальный барьер U_a .

С ростом температуры частота диффузионных перескоков возрастает и коэффициент диффузии увеличивается.

Достаточная скорость диффузии примесей в кремнии достигается при температурах 1000 – 1250 °С. При таких высоких температурах в кремний диффундируют и посторонние примеси (фоновые), что может приводить к браку. В этом один из недостатков диффузионного легирования.

Ионная имплантация (ионное легирование) – это введение легирующей примеси в кристалл путем его бомбардировки ионами примесных атомов с энергиями более 104 эВ. Глубина проникновения ионов невелика и составляет менее 1 мкм.

Бомбардировка кристалла ионами нарушает его структуру, для восстановления которой проводится отжиг при температурах более низких (600 – 800 °С), чем температуры диффузионного легирования. В этом одно из преимуществ ионной имплантации.

Другим преимуществом является абсолютная чистота процесса легирования, которая достигается использованием магнитных сепараторов, разделяющих ионы разной массы за счет их движения по различным траекториям в магнитном поле.

Элементы ИМС соединяются между собой токопроводящими тонкопленочными дорожками. Изоляция отдельных элементов от кремния осуществляется тонким слоем диэлектрика, или обратносмещенным р-п переходом. Поэтому кроме получения полупроводниковых слоев в составе микросхемы создаются изолирующие и проводящие слои.

Для получения диэлектрического слоя на кремнии он термически окисляется в кислородосодержащей газовой среде с образованием диоксида кремния SiO_2 .

Простейшим методом получения металлических слоев является термическое вакуумное напыление.

2.8. Общая характеристика технологического процесса производства ИМС

Общее количество операций технологического процесса может достигать 200 в зависимости от структуры ИМС и конструкции корпуса. Все операции могут быть разделены на три группы, рис. 2.4.

Первая группа включает *заготовительные процессы*: получение монокристаллических слитков определенного типа проводимости и заданного удельного сопротивления, резку слитков на пластины, обработку их поверхности, изготовление отдельных деталей и узлов корпуса ИМС.

Вторая группа процессов – *обрабатывающая* – объединяет все операции, необходимые для формирования структур ИМС в групповых пластинах и их контроль на функционирование. Это окисление, диффузия примесей, эпитаксия, ионная имплантация, вакуумное напыление, фотолитография, теххимическая обработка.

К третьей группе – сборочно-контрольной – относятся разделение групповой пластины на кристаллы, монтаж кристаллов в корпус, разварка выводов, герметизация, контроль и классификация, механические и климатические испытания, маркировка и упаковка.

Группа процессов (операций)



Рис. 2.4. Классификация частных технологических процессов

Первая группа процессов близка к приборостроительному производству. Эта группа процессов не зависит от конкретной структуры ИМС; она может осуществляться на отдельных специализированных предприятиях.

Третья группа процессов также характеризуется специфическими методами обработки и оборудованием, но имеет более тесную связь с процессами второй группы. Для этой группы процессов целесообразно создание специализированных цехов или участков (в зависимости от масштабов производства) в пределах одного предприятия.

Наиболее полно особенности интегральной технологии отражены во второй группе процессов. Существует ряд причин, требующих проведения этих процессов на различных участках одного производства, а именно:

- взаимосвязь производственных участков, обусловленная цикличностью технологического процесса (групповые пластины многократно возвращаются на участки для формирования очередного слоя);

- ограниченное время межоперационного хранения групповых пластин;

- высокие требования к производственной гигиене.

Характер и последовательность операций второй группы процессов определяется типом структуры ИМС. Режимы обработки на отдельных операциях зависят от толщины и электрических свойств слоев и областей структуры.

2.9. Типы структур ИМС

Рассмотрим структуры биполярных ИМС.

Диффузионно-планарная структура. Функции изоляции элементов в ней выполняют р-п переходы, ограничивающие области отдельных элементов и смещенные в обратном направлении. В качестве подложки используется пластина монокристаллического кремния, равномерно легированного акцепторной примесью. После окисления пластины методом фотолитографии в двуокиси кремния избирательно вытравливают участки прямоугольной формы, через образовавшиеся окна проводят диффузию атомов донорной примеси – рис. 2.5.

Процесс диффузии совмещают с термическим окислением кремния, в результате которого на поверхности вновь обра-

зается сплошной слой окисла. Так одновременно создаются коллекторные области всех транзисторов и изолирующие области всех диодов и резисторов для всех кристаллов групповой пластины.

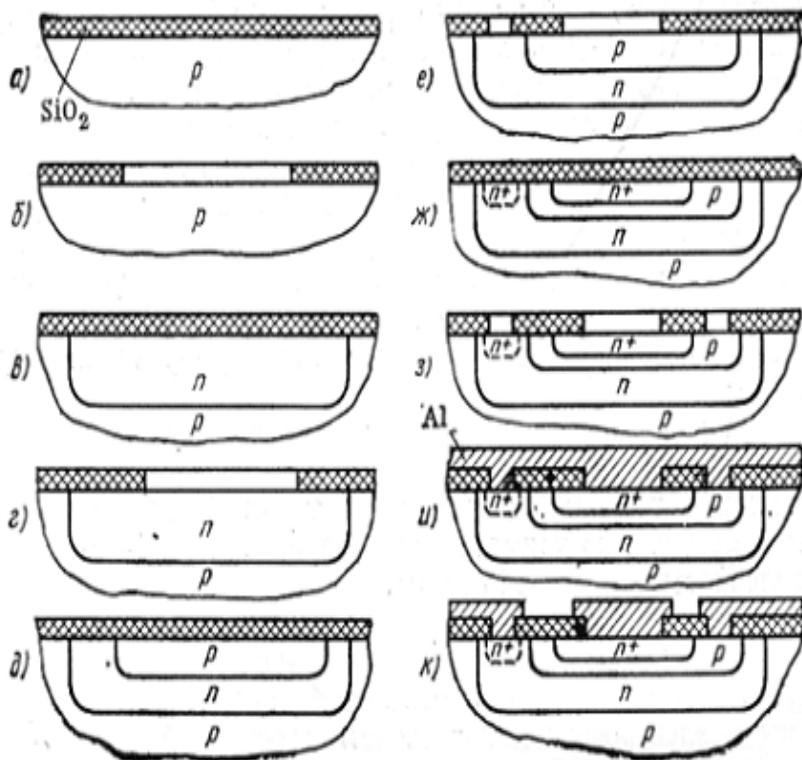


Рис. 2.5. Последовательность формирования диффузионно-планарной структуры:

а – исходная пластина; б, г, е – вскрытие окон в окисле перед диффузией примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области; в, д, ж – диффузия примеси в коллекторные, базовые и эмиттерные области и окисление поверхности; з – вскрытие окон под контакты к диффузионным областям; и – металлизация поверхности; к – избирательное травление металлической пленки и образование межсоединений

Вторичным вскрытием окон меньших размеров в окисле и последующей диффузией акцепторной примеси формируют р-области, выполняющие роль базовых областей транзисторов, анодов диодов и резисторов.

В результате третьего цикла фотолитографии, диффузии и окисления получают области эмиттеров, катоды диодов, а также высоколегированные области под омические контакты к высокоомным коллекторным областям (n⁺-область – сильно-легированный полупроводник).

Для создания межэлементных связей в слое окисла вновь вскрывают окна и плоскость пластины покрывают сплошной металлической пленкой (обычно алюминиевой). В местах, свободных от окисла, образуется контакт с соответствующими областями кремния. Заключительный цикл фотолитографии по металлу создает систему межсоединений, а также контакты по периферии кристаллов. Они используются для коммутации кристаллов с внешними выводами корпуса.

В диффузионном коллекторе активная примесь распределена по глубине неравномерно: на поверхности ее концентрация максимальна, а на дне коллектора равна нулю. Поэтому слой коллектора под базой имеет высокое сопротивление, это увеличивает напряжение насыщения и время переключения транзистора. Равномерное распределение примеси по толщине коллектора получается в эпитаксиальном слое.

Эпитаксиально-планарная структура. В качестве исходной подложки используется равномерно легированная пластина р- кремния. Для проведения эпитаксии одну сторону пластины освобождают от окисла и тщательно очищают, рис. 2.6. Далее проводится эпитаксия кремния n-типа, поверхность эпислея окисляют, методом фотолитографии вскрывают окна в виде узких замкнутых дорожек по будущему контуру коллекторных и изолирующих областей ИМС. Через окна проводится диффузия акцепторной примеси до смыкания ее с р-областью подложки.

Таким образом получают изолированные друг от друга островки равномерно легированного эпитаксиального n-крем-

ния. Такой процесс диффузии называется *изолирующей* или *разделительной диффузией*. В дальнейшем в пластине формируют диффузионные базовые и эмиттерные области, а также контакты и межсоединения, так же, как в диффузионно-планарной структуре. Концентрацию примеси в эпитаксиальном слое можно изменять в широких пределах. Но повышение концентрации примеси в эпитаксиальном коллекторе снижает пробивное напряжение перехода база – коллектор. Поэтому коллектор легируют умеренно, а малую величину его сопротивления получают параллельным включением сильнолегированного скрытого n^+ слоя. Название «скрытый» слой указывает на то, что он не имеет выхода на поверхность пластины. Знак (+) в обозначении n - или p -области указывает на их сильное легирование.

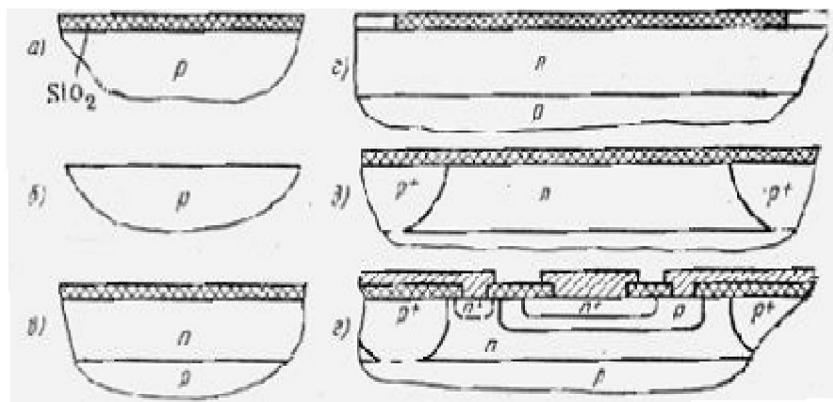


Рис. 2.6. Последовательность формирования:
эпитаксиально-планарной структуры:

- а – исходная пластина; б – стравливание окисла, подготовка поверхности к эпитаксии; в – эпитаксия n -слоя и окисление поверхности; г – вскрытие окон в окисле под разделительную диффузию примеси; д – диффузия акцепторной примеси, окисление поверхности; е – готовая структура после формирования диффузионных базовых и эмиттерных областей и получения межсоединений

Эпитаксиально-планарная структура со скрытым слоем. Начальные стадии технологического процесса получения такой структуры приведены на рис. 2.7. В окисле подложки р-типа вскрываются окна, через которые проводят диффузию примеси высокой концентрации. Далее поверхность освобождают от окисла и проводят эпитаксию n-кремния. После окисления поверхности процесс обработки проводится так же, как и в структуре без скрытого слоя.

Изоляция элементов обратносмещенным р-n переходом имеет ряд существенных недостатков: при больших обратных напряжениях происходит пробой; переход имеет большие токи утечки и емкости; расстояние между элементами схемы приходится делать большими; это уменьшает быстродействие схем. Наилучшую электрическую развязку элементов дает диэлектрическая изоляция.

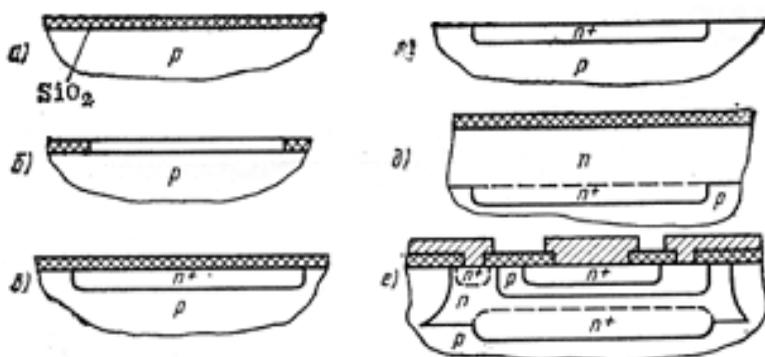


Рис. 2.7. Последовательность формирования эпитаксиально-планарной структуры со скрытым слоем: а – исходная пластина; б – вскрытие окон под диффузию скрытого слоя; в – диффузия n^+ -примеси и окисление поверхности; г – травление окисла и подготовка поверхности к эпитаксии; д – эпитаксия n-слоя и окисление поверхности; е – готовая структура после разделительной диффузии, формирования базовых и эмиттерных областей и межсоединений

Структура с диэлектрической изоляцией. В этой структуре каждый элемент схемы размещен в «кармане» – области монокристаллического кремния, ограниченную со всех сторон слоем двуоксида кремния. В этом случае расстояние между элементами может быть уменьшено до 8 – 10 мкм. На рис. 2.8 показана структура с диэлектрической изоляцией.

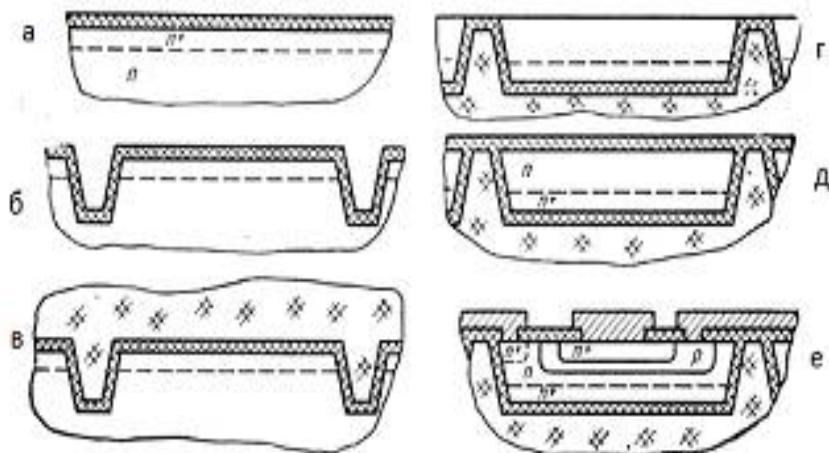


Рис. 2.8. Последовательность формирования изолированных областей в структуре с диэлектрической изоляцией:

- а – исходная подложка; б – избирательное травление оксида, глубокое травление кремния, окисление поверхности;
- в – осаждение поликристаллического кремния; шлифование и полирование обратной стороны пластины;
- д – окисление поверхности;
- е – готовая структура после базовой и эмиттерной диффузии и получения межсоединений

В исходной пластине кремния n-типа методом фотолитографии вытравливают участки окиси кремния, а затем и кремния по контуру будущих элементов. В результате образуются канавки по заданному контуру. Затем поверхность окисляется,

и на нее осаждается толстый слой поликристаллического кремния, который служит конструкционной основой будущей ИМС. Обратную сторону шлифуют, удаляя монокристаллический слой до вскрытия окиси кремния по границам областей, и производят доводку (для удаления нарушенного слоя). После протравливания и отмывки поверхности ее окисляют. В изолированных областях монокристаллического кремния n-типа диффузионным методом формируют элементы (базовые области, резисторы, эмиттеры, области под контакты). Затем создают межсоединения по поверхности пластины. Если исходная подложка содержит эпитаксиальный n^+ – слой, то транзисторы получают со скрытым слоем.

Из-за необходимости шлифования и полирования подложек такие структуры (с диэлектрической изоляцией) очень трудоемки. Наличие толстого поликремния вызывает внутренние механические напряжения, которые приводят к короблению пластины после снятия монокристаллического слоя, что затрудняет фотолитографию. Это обусловило разработку комбинированных методов изоляции элементов ИМС.

Изопланарная структура. В этой структуре (рис. 2.9) донная часть 2 коллектора изолирована от монокристаллической пластины р-n переходом, а боковая 1 – толстым слоем окисла, полученным сквозным локальным окислением эпитаксиального слоя. Эта структура аналогична эпитаксиально-планарной, в которой разделительная диффузия заменена сквозным окислением.

Вначале на поверхность пластины, содержащей эпитаксиальные n^+ - и n-слои осаждают из газовой фазы нитрид кремния Si_3N_4 . Методом фотолитографии в этом слое создают защитную маску с окнами по контуру коллекторных областей. Через окна проводится глубокое окисление кремния. Затем маску стравливают и всю поверхность окисляют. Далее проводится диффузия для формирования базы и эмиттера, формируются окна под контакты и создаются межсоединения.

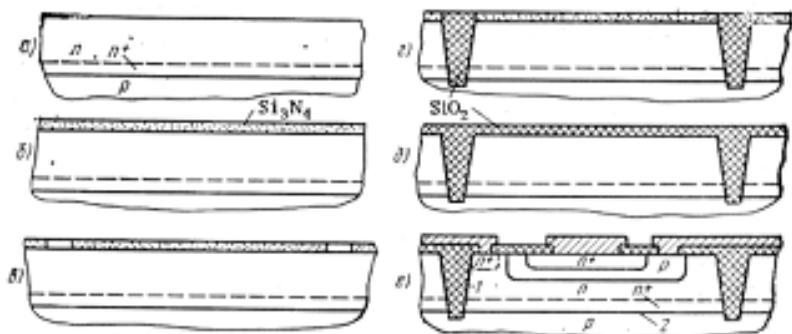


Рис. 2.9. Последовательность формирования изолированных областей в изопланарной структуре:
 а - подложка с эпитаксиальным и скрытым слоями;
 б – нанесение слоя нитрида кремния; в – избирательное травление нитрида кремния по контуру будущих элементов;
 г – глубокое окисление кремния; д – стравливание нитрида кремния и окисление поверхности; е – готовая структура после формирования базовых и эмиттерных областей формирования межсоединений

Необходимость длительного окисления для образования диэлектрической изоляции в изопланарной структуре является недостатком, так как проводится при высокой температуре и может вызвать нежелательное перераспределение примеси из скрытого слоя в эпитаксиальный коллектор.

Для сокращения времени окисления уменьшают толщину эпитаксиального слоя и, соответственно, базы и эмиттера (толщина эпитаксиального слоя в изопланарном процессе не более 3 – 4 мкм).

Полипланарная структура. Усовершенствованным вариантом предыдущей структуры является структура с изолирующими V-канавками, рис. 2.10.

В этой структуре вместо сквозного окисления проводится сквозное травление эпитаксиального слоя с последующим окислением полученных канавок и заполнением их поликристаллическим кремнием.

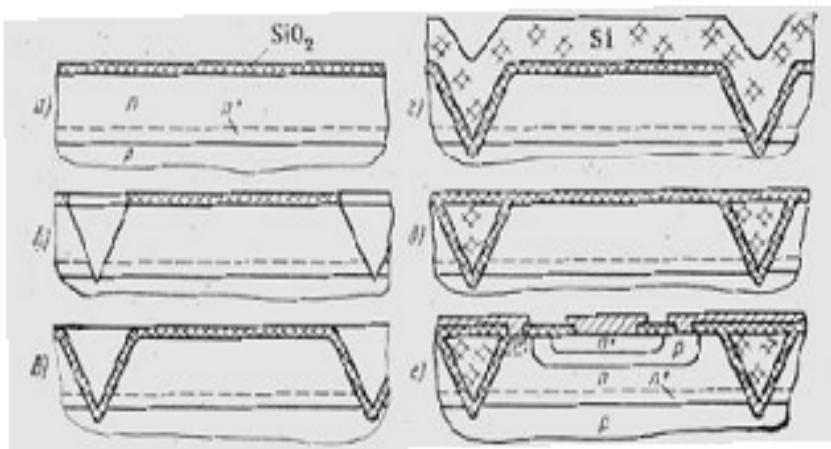


Рис. 2.10. Последовательность формирования изолированных областей в полипланарной структуре:

а – подложка с эпитаксиальным и скрытым слоями, покрытая окисью кремния; б – избирательное травление окиси кремния и анизотропное травление кремния; в – стравливание окиси и окисление всей поверхности; г – осаждение поликремния; д – шлифование, полирование и окисление поверхности; е – готовая структура после формирования базовых и эмиттерных областей, а также межсоединений

Вначале подложку с сформированными n+- и n-эпитаксиальными слоями окисляют. Затем методом фотолитографии в окисле вскрывают окна, замкнутые по контуру будущих элементов. Далее методом *анизотропного травления кремния* получают канавки V-образной формы.

Ширина канавки l и ее глубина d связаны соотношением $l/d = 1,41$. Глубина канавки должна быть больше толщины эпитаксиального слоя. Бокового подтравливания практически не происходит. Затем поверхность окисляют и на ней осаждают поликремний. Минимальная толщина слоя поликремния должна быть достаточной для полного зарастивания всех канавок. Шлифованием и полированием снимают излишки поли-

кремния до вскрытия окисной пленки. После окисления поверхности формируют структуру транзисторов и других элементов ИМС.

Для анизотропного травления пригодны лишь подложки с ориентацией $\{100\}$; к недостаткам структуры относятся трудоемкие операции шлифования и полирования.

Для изготовления структур с диэлектрической и комбинированной изоляцией можно применять пластины-заготовки с заранее сформированными сплошным эпитаксиальным и скрытым слоями, серийно выпускаемые специализированными предприятиями; например, пластины p-Si диаметром 60 и 75 мм толщиной 300 – 550 мкм ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) с эпитаксиальным n-слоем толщиной 2,5 – 20 мкм ($\rho = 0,15 - 7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и скрытым p+-слоем толщиной 3 – 15 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 10 – 50 Ом.

Существенным уменьшением площади транзисторов с прощением технологии характеризуются структуры МДП (металл – диэлектрик – полупроводник).

МДП-структуры. Основным элементом этих структур является МДП-транзистор с индуцированным каналом n- или p-типа, рис. 2.11.

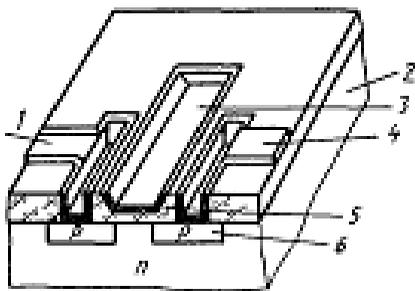


Рис. 2.11. МДП-транзистор с каналом p-типа:

- 1, 4 – омические контакты к областям истока и стока;
- 2 – подложка n-типа; 3 – металлический электрод затвора;
- 5 – подзатворный диэлектрик; 6 – области истока и стока

МДП-транзистор имеет симметричную структуру: области истока и стока и изолированный затвор, с помощью которого можно индуцировать канал и управлять его проводимостью. Так как переходы, ограничивающие области истоков и стоков, всегда смещены в обратном направлении и перенос основных носителей заряда происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника между истоком и стоком каждого транзистора, то мер для взаимной изоляции приборов с одноименным типом проводимости канала не требуется.

На рис. 2.12 показана последовательность создания р-канального МДП-транзистора с металлическим затвором.

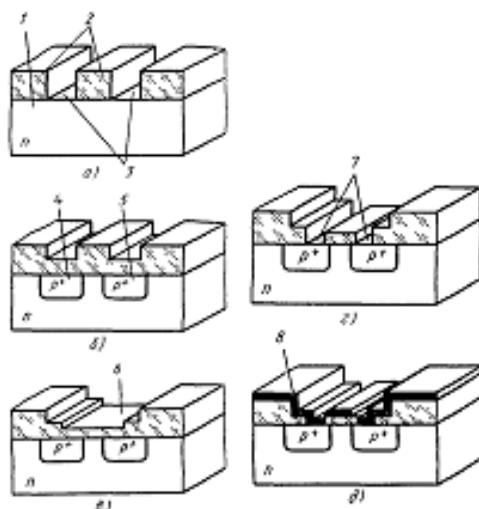


Рис. 2.12. Последовательность формирования р-канального МДП-транзистора ИМС с металлическим затвором:

а, б – формирование окон и создание областей истока и стока; в – нанесение тонкого подзатворного слоя двуокиси кремния; г, д – вскрытие окон под контакты к истоку и стоку и напыление алюминия; 1 – исходная подложка; 2 – слой двуокиси кремния; 3, 7 – окна в слое двуокиси кремния; 4, 5 – области истока и стока; 6 – слой подзатворного диэлектрика; 8 – слой алюминия

Комплементарные МДП-структуры (КМДП). Структура, содержащая МДП-транзисторы обоих типов проводимости, позволяет на 2 – 3 порядка по сравнению с n- или p-МДП-структурами снизить мощность, потребляемую при работе в статическом режиме. Такие структуры получили название структур на дополняющих МДП-транзисторах или комплементарных МДП-структур (КМДП-структур). Последовательность формирования КМДП структуры изображена на рис. 2.13. Методом диффузии формируют p-область, далее p+-области истоков и стоков p-канальных приборов, а также охранные области, а затем в p-области – n+-области истоков и стоков n-канальных приборов. Для формирования областей затворов методом фотолитографии вытравливают участки двуокиси кремния, затем методом термического окисления кремния получают тонкие слои двуокиси кремния расчетной толщины (подзатворный диэлектрик). Далее вскрывают в окисле окна под контакты и формируют межсоединения, включая затворы.

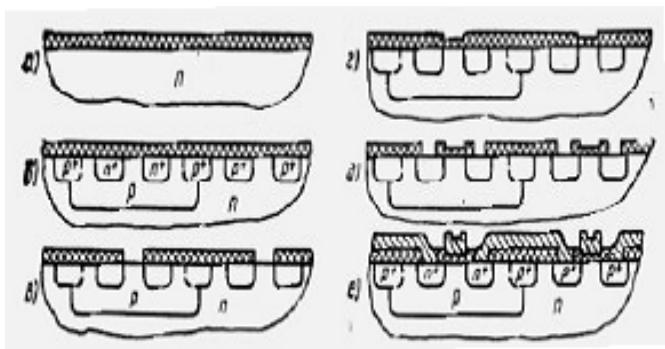


Рис. 2.13. Последовательность формирования КМДП-структуры:

- а – исходная пластина;
- б – последовательное получение p -, p+- и n+-областей методом диффузии;
- в – избирательное травление двуокиси кремния;
- г – термическое окисление кремния (получение подзатворного диэлектрика);
- д – избирательное травление двуокиси кремния под контакты к истокам и стокам;
- е – готовая структура после получения межсоединений

Структуры «кремний на сапфире» – КНС. Полную изоляцию МДП-транзисторов можно обеспечить при их формировании в виде островков на монокристаллической изолирующей подложке. В качестве последней обычно используется монокристаллический синтетический сапфир, имеющий хорошее кристаллографическое сопряжение с кремнием, что важно для гетероэпитаксии. Широкое применение получили МДП-КНС-структуры, особенно КМДП-КНС-структуры. Такие структуры устойчивы к температурным и радиационным воздействиям.

2.10. Требования к кремниевым пластинам

Групповая кремниевая подложка представляет собой круглую плоскопараллельную пластину диаметром обычно до 300 мм и толщиной (в зависимости от диаметра) в интервале от 0,2 – 0,3 мм до 1 мм. Последующие термическая и фотолитографическая обработки требуют выполнения следующих условий:

– подложки должны иметь совершенную кристаллическую структуру в объеме и на поверхности, так как нарушения поверхности вследствие механической обработки могут породить дефекты в эпитаксиальном слое или исказить фронт диффузии. Плотность дислокаций должна быть не более 10 см^{-2} ;

– шероховатость поверхности пластины должна быть не ниже 14б – 14в классов. Высота микронеровностей – в несколько раз меньше толщины пленки фоторезиста, наносимого во время фотолитографии, это уменьшает вероятность появления локальных дефектов рисунка;

– прогиб пластин должен быть не более 8 – 10 мкм. Прогиб обычно обусловлен разностью остаточных напряжений на сторонах пластины и проявляется после резки слитка на пластины. Зазор между пластиной и фотошаблоном при контактной фотолитографии искажает рисунок фотомаски. При эпитаксиальном наращивании неплотный контакт подложки с нагревателем приведет к ее неравномерному нагреву и неодинаковым свойствам эпислоя в пределах пластины;

– неплоскостность и неплоскопараллельность (клиновидность) пластин должна быть в пределах ± 10 мкм, влияние этих параметров аналогичны прогибу;

– разориентация поверхности относительно заданной кристаллографической плоскости в пределах $\pm 1^\circ$. Откристаллографической ориентации зависит скорость протекания различных процессов: эпитаксии, диффузии, травления, окисления и др. и воспроизводимость результатов этих процессов;

– разнотолщинность пластин в пределах партии не должна превышать $\pm (5 - 8)$ мкм, а отклонение по диаметру $\pm 0,5$ мм. Это способствует воспроизводимости результатов в пределах партии;

– пластины должны иметь технологические элементы: базовый срез (рис. 3.14) и фаску. Базовый срез указывает направление наилучшего расположения кристаллов с точки зрения качества разделения на пластины, получения канавок нужного профиля при анизотропном травлении. При проведении фотолитографии он правильно ориентирует пластину. Базовый срез образуется в результате снятия лыски с цилиндрического слитка и последующей резки его на пластины. Фаска по контуру подложки повышает качество выполнения некоторых операций.

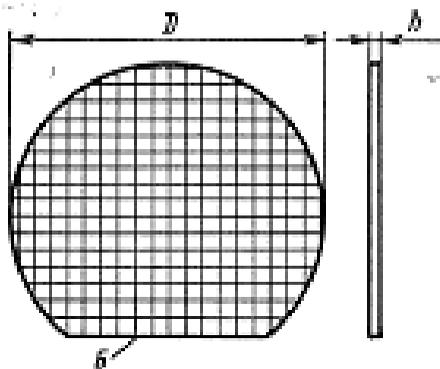


Рис. 3.14. Кремниевая групповая пластина-заготовка:

D – диаметр пластины;

h – толщина пластины (200 – 300 мкм);

Б – базовый срез

2.11. Схема технологического процесса

На рис. 2.15 представлена схема технологического процесса производства ИМС эпитаксиально-планарной структуры со скрытым слоем (с транзисторами n-p-n типа). Отдельные этапы технологического процесса (фотолитография, диффузия, контроль и испытания и др.) включают от 3 до 10 операций. Например, каждый этап диффузии, указанный на схеме, состоит из загонки примеси (ее внедрения в поверхностный слой), снятия окисла, измерения поверхностного сопротивления и глубины диффузионного слоя на контрольной пластине, разгонки примеси (перераспределения ее вглубь пластины), окисления, контроля вольтамперных характеристик перехода (на контрольной пластине). Поэтому общее число операций изготовления ИМС (без учета заготовительного этапа) достигает 150, а продолжительность полного цикла обработки составляет около 100 ч.

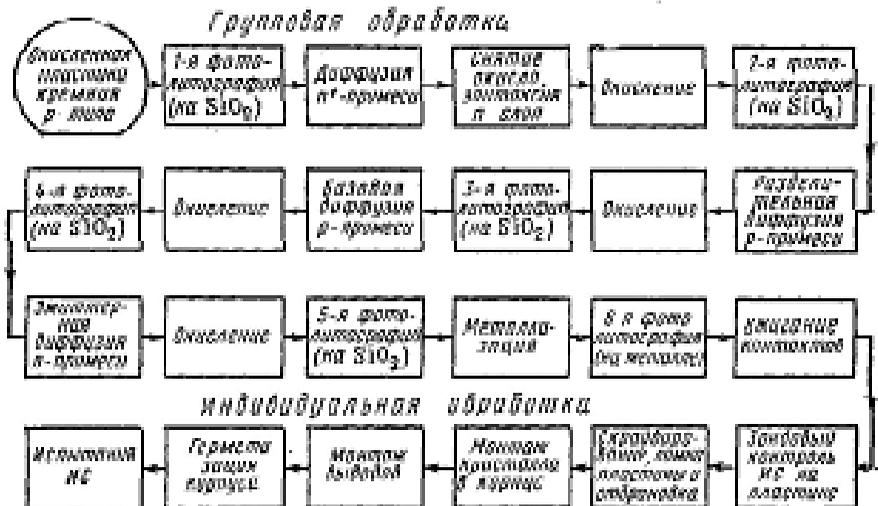


Рис. 2.15. Схема технологического процесса изготовления ИМС эпитаксиально-планарной структуры со скрытым слоем

Основная часть технологического процесса связана с получением структур в групповой пластине. Цикл групповых процессов обработки ИМС заканчивается получением межсоединений на поверхности групповой пластины.

Принцип интегральной технологии исключает возможность обнаружения дефектов на ранних стадиях создания структур. Лишь после формирования межсоединений и периферийных контактов становится возможным контроль ИМС на правильность функционирования.

Зондовый контроль проводится на автоматических установках путем перемещения групповой пластины под головкой, несущей контактные зонды, с шагом, соответствующим размерам кристалла, и последовательного контактирования зондов с периферийными контактами каждого кристалла. При наличии годного кристалла вырабатывается сигнал на очередное перемещение на шаг, в противоположном случае – сигнал на маркирующее устройство, наносящее метку на дефектный кристалл.

В дальнейшем на групповой пластине наносятся риски по границам кристаллов (эта операция называется *скрайбированием*), рис. 2.16, пластина разламывается на отдельные кристаллы, дефектные кристаллы, несущие метки, отбраковываются.

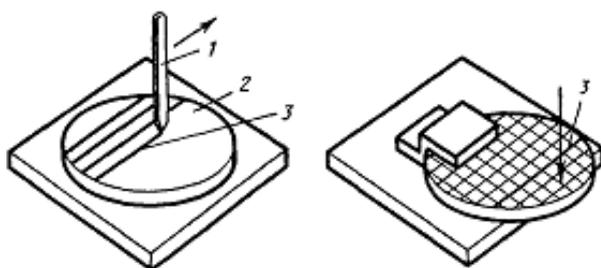


Рис. 2.16. Скрайбирование пластины (а) и разламывание ее на кристаллы (б):

1 – резец; 2 – полупроводниковая пластина; 3 – риски

Монтаж кристаллов в полых корпусах сводится к установке и фиксации с помощью приклеивания или пайки на основании корпуса, а в сплошных (полимерных) корпусах – на промежуточном носителе. Затем периферийные контакты кристалла соединяют с внешними выводами корпуса. Способ монтажа выводов, как и способ герметизации ИМС (пайка, сварка, заливка и др.) зависят от конструкции корпуса.

На рис. 2.17 показана разварка проволочных выводов к контактному площадкам корпуса и кристалла. На завершающем этапе производится электрический контроль ИМС по статическим и динамическим параметрам, проводятся выборочные механические и климатические испытания.

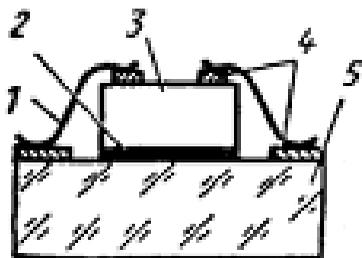


Рис. 2.17. Монтаж проволочных выводов:
1 – вывод; 2 – клей; 3 – ИМС;
4 – контактные площадки; 5 – корпус

2.12. Микроклимат и производственная гигиена

Для повышения выхода годных ИМС и воспроизводимости их параметров важно поддерживать стабильные климатические условия, высокую чистоту воздушной среды, технологических газов и жидкостей.

Температура и влажность относятся к *климатическим параметрам* производственных помещений и определяют понятие *микроклимата*.

Определенная и стабильная температура требуется для фотолитографических процессов, где важна стабильность линейных размеров. Постоянная температура помещения требуется при измерении электрических характеристик. Рабочая температура некоторых процессов (диффузии, эпитаксии, окисления др.) составляет 800 – 1200 °С и должна поддерживаться с точностью до десятых долей градуса. Изменение температуры помещения может внести погрешность в значение стабилизированной температуры процесса за счет изменения условий теплообмена с окружающей средой.

При высокой влажности воздуха производственных помещений пары воды адсорбируются на пластинах, кристаллах, технологических установках, что при нагреве может привести к образованию окислов. Наличие влаги может понизить точность измерений электрических параметров. Поэтому влажность должна быть минимальной, но не ниже 30 %. При низкой влажности усиливается проявление статического электричества, которое может привести к пробою созданных структур.

По температурно-влажностным параметрам установлены три класса производственных помещений – табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры воздушной среды производственных помещений

Характеристика воздушной среды		Класс помещения						
		1	2	3	4	5		
Температура, °С	летом	22±0,5	20±1	20±2	По ГОСТ 12.1.005-76			
	зимой	22±0,5	23±1	23±2				
Относительная влажность, %		45±5	50±5	50±10				
Максимальное число частиц размером более 0,5 мкм в 1 л воздуха		4	35	350			1000	3500

Производственная гигиена – это комплекс технологических и организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение чистоты воздушной среды производственных помещений и чистоты технологических сред с целью повышения качества выпускаемых изделий.

Воздушная среда характеризуется *запыленностью*, которая оценивается количеством частиц размером не менее 0,5 мкм в единице объема воздуха (в 1 л или в м³ воздуха).

Аэрозоли (механические частицы в воздухе) являются причиной появления проколов в окисле, приводящей к выходу из строя элементов и ИМС в целом. Частицы пыли на поверхности готовых структур приводят к пробоям и коротким замыканиям при электрических испытаниях ИМС и ее эксплуатации. По степени запыленности производственные помещения и ограниченные рабочие объемы делятся на пять классов (табл. 2.1).

Помещения 1 – 3 классов называются *чистыми комнатами или гермозонами*. Перед подачей в помещения воздух проходит фильтрацию, давление воздуха внутри помещения немного превышает атмосферное для уменьшения проникновения наружного воздуха. Чистая комната содержит рабочее помещение, гардеробное помещение, переходные и обдувочные шлюзы, помещение для обработки приточного воздуха.

Рекомендуемые для различных операций классы микроклимата и запыленности приведены в табл. 2.2. Достичь высокой степени обеспыленности легче в ограниченных локальных рабочих объемах – боксах или скафандрах.

Определенные требования предъявляют к технологическим средам: технологическим газам и воде.

Технологические газы используются в различных целях. *Защитные газы* (азот, аргон, гелий) применяют для исключения окисления и коррозии на высокотемпературных операциях: пайке, сварке, герметизации, продувки реакторов эпитаксиальных и диффузионно-окислительных установок, транспортировке газов-реагентов и др.

Таблица 2.2

Классы производственных помещений и рабочих объемов для различных операций

Наименование технологических операций	Класс помещения		Класс рабочего объема по запыленности
	по микроклимату	по запыленности	
Фотолитография	1	3	1
Вакуумное напыление	3	2	2
Химобработка, окисление, диффузия	3	3	2
Контроль электрических параметров на пластине	3	3	3
Скрайбирование, монтаж кристалло, разварка выводов	3	5	5
Герметизация	3	5	-

Газы-реагенты используются как диффузаны, окислители, травители, восстановители. Аргон, азот, кислород применяются как плазмообразующие газы при ионно-плазменном распылении, вакуумно-плазменном травлении, плазмохимической обработке. Промышленно выпускаемые газы не имеют достаточной чистоты для полупроводникового производства, поэтому их тщательно очищают и осушают.

Вода, используемая в производстве, не должна содержать гидрозоль (механических частиц), растворенных солей, газов, примесей металлов и органики. Такая вода называется *деионизованной*.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В соответствии с последовательностью операций изготовления ИМС (рис. 2.4) пластины кремния проходят ряд работ, включающих окисление, фотолитографию и вскрытие окон.

3.1. Термическое окисление. Свойства пленки двуокиси кремния

В планарной технологии р-п переходы формируются в результате высокотемпературной диффузии в кремний газообразных примесей P, As, Sb (доноры) B, Al, Ga, In (акцепторы). В качестве газообразных примесей используются гидриды и хлориды фосфора, мышьяка и других примесей. Для изготовления любого прибора необходимо чтобы примесь диффундировала только в определенное место пластины Si, а другая поверхность кремния была бы защищена от диффузии. Такую защиту обеспечивает пленка двуокиси кремния SiO₂.

Двуокись кремния широко используется в технологии ИМС: для создания масок, используемых при проведении локальных технологических процессов, формирования подзатворного диэлектрика в МДП-структурах, создания изолирующих слоев и др.

Применение пленки SiO₂ в качестве маски при диффузии примесей основано на том, что коэффициент диффузии ряда примесей (P, B, As, Sb и др.) в ней значительно меньше, чем в кремнии. При ионном легировании маскирующие свойства пленки SiO₂ основано на том, что длина пробега ионов в пленке меньше ее толщины.

Пленка SiO₂ прозрачна, имеет блестящую стеклянную поверхность и при толщине в десятые доли микрометра окрашена вследствие интерференции света, отраженного от ее поверхности и поверхности кремния.

Двуокись кремния и кремний имеют близкие значения *температурного коэффициента расширения* (ТКР), благодаря

этому при изменениях температуры не происходит механических повреждений пленки.

Диэлектрическая проницаемость двуокиси кремния SiO_2 составляет 0,3 пФ/см, а электрическая прочность – 600 В/мкм.

Термическое окисление проводится в эпитаксиальных или диффузионных установках: над поверхностью пластин пропускают газ-окислитель: кислород, водяной пар или их смесь (влажный кислород) при температуре 1000 – 1300 °С.

Скорость роста пленки в зависимости от температуры и содержания водяного пара в смеси может изменяться в пределах 0,05 – 1 мкм/ч. Толщина d пленки SiO_2 увеличивается пропорционально \sqrt{t} , где t – время окисления: $d \sim \sqrt{Dt}$, D – коэффициент диффузии кислорода в кремний. Окисление в сухом кислороде характеризуется минимальной скоростью роста, однако такая пленка имеет высокое качество. На порядок более высокую скорость окисления можно получить в водяном паре: при температуре 1000 °С пленка толщиной в 1 мкм вырастает за 10 мин. Недостатком такой пленки является пористость и дефектность. Компромиссное решение дает комбинированный процесс – окисление во влажном кислороде, изменяя соотношение между кислородом и водяным паром, можно в широких пределах регулировать скорость окисления.

Обычно окисление проводится по схеме «сухой – влажный – сухой» кислород.

Во многих схемах пленки SiO_2 выращивают локально. Для этого используется маска из нитрида кремния Si_3N_4 , рис. 3.1. Двуокись кремния растет вверх, вниз и в боковых направлениях (под маску) с одинаковой скоростью – рис. 3.1,б.

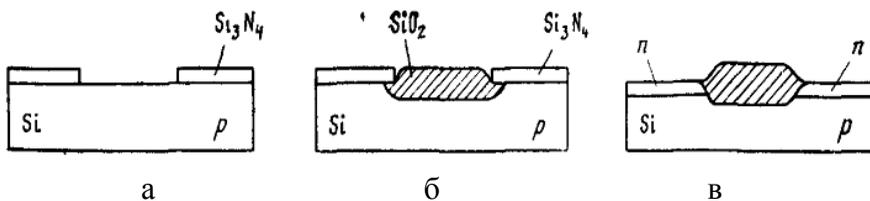


Рис. 3.1. Локальное окисление кремния

Проращение SiO_2 вглубь кристалла дает возможность использовать его для изоляции соседних слоев. Например, если после окисления p-Si удалить маску из нитрида кремния и провести неглубокое легирование донорами, то получатся изолированные друг от друга слои n-типа – рис. 3.1,в. Рост двуокиси в боковом направлении обуславливает характерную заостренную форму на краях, препятствующую получению малых расстояний между соседними изолированными областями, а рост вверх приводит к неровностям поверхности. Для получения ровной поверхности перед окислением вытравливают в кремнии канавки глубиной в половину толщины двуокиси кремния, используя ту же маску Si_3N_4 .

3.2. Травление

Травление – это удаление поверхностного слоя не механическим, а чаще всего химическим путем. Травление используют для получения максимально ровной бездефектной поверхности пластин, не достижимой механической обработкой; удаления двуокиси кремния и других слоев с поверхности. Локальное травление применяют для получения необходимого рельефа поверхности, формирования рисунка тонкопленочных слоев, а также масок.

Жидкостное травление. В основе его лежит химическая реакция жидкого травителя и твердого тела, в результате которой образуется растворимое соединение. Подбором химического состава, концентрации и температуры травителя можно обеспечить заданную скорость травления 0,1 – 10 мкм/мин и толщину удаляемого слоя.

Локальное травление осуществляется через маску.

Травление может быть изотропным и анизотропным.

Изотропное травление идет с одинаковой скоростью во всех направлениях – как вглубь, так и под маску. Пример такого травления – травление двуокиси кремния через маску фоторезиста 1 (рис. 3.2).

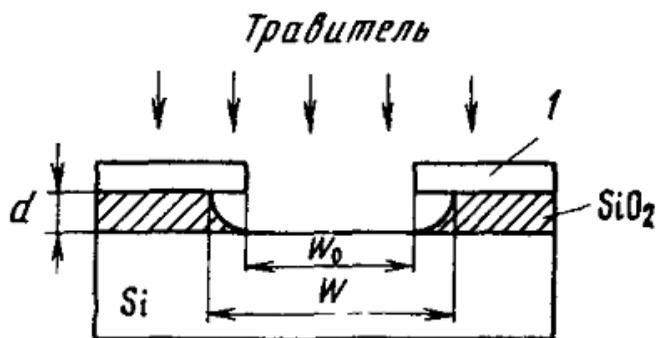


Рис. 3.2. Изотропное травление двуокиси кремния через маску фоторезиста

Основным компонентом травителя является плавиковая кислота HF. Размер W вытравленной области больше размера отверстия W_0 в маске на величину, превышающую удвоенную толщину d слоя двуокиси кремния:

$$W > W_0 + 2d. \quad (3.1)$$

В связи с этим жидкостное изотропное травление не позволяет получать в двуокиси кремния отверстия малых размеров. Так как этот слой является маской при легировании, то использование такой маски не позволит получить элементы ИМС малых размеров.

Жидкостное травление обладает высокой избирательностью, которая оценивается отношением скоростей травления требуемого слоя (например, SiO_2) и других слоев (например, кремния, фоторезиста).

Скорость химической реакции травителей зависит от кристаллографического направления в монокристалле. В приложении рассмотрена система обозначений направлений и плоскостей в кристалле, называемых индексами Миллера.

В кремнии скорость травления минимальна в направлении $[111]$, так как в перпендикулярной ему плоскости (111) максимальна плотность атомов (количество атомов на единицу

площади поверхности). Плоскость (100) имеет значительно меньшую плотность атомов, поэтому скорость травления в направлении [100] в 10 – 15 раз больше, чем [111]. На этом основано *жидкостное анизотропное травление кремния*.

Анизотропию травления количественно оценивают отношением скоростей травления в различных направлениях.

Если пластина имеет ориентацию (100) и используется маска двуокиси кремния с прямоугольными отверстиями, стороны которых ориентированы по направлениям [110], параллельным плоскостям (111), то после травления образуется канавка, боковые стенки которой имеют ориентацию (111), то есть перпендикулярны направлению, соответствующему наименьшей скорости травления. При малом времени травления канавка имеет плоское дно – рис. 3.3,а, со временем она углубляется и становится V-образной – рис. 3.3,б. После этого травление резко замедляется (практически останавливается), так как дальше оно идет в направлении [111], соответствующем минимальной скорости травления.

Угол α между стенками составляет около 70° . Глубина канавки d определяется размерами отверстия в маске W_0 :

$$d \approx 0,7 W_0. \quad (3.2)$$

Если ориентация поверхности (110), то стенки канавок получаются вертикальными, так как они соответствуют ориентации (111) – рис. 3.3,в. Так можно сформировать канавки шириной менее 1 мкм и глубиной около 10 мкм.

Сухое анизотропное травление. Травление производится в вакуумной установке в плазме газового разряда. Различают ионное травление, плазмохимическое травление и реактивное ионное.

Ионное травление основано на физическом распылении материала при бомбардировке его ионами инертных газов.

Плазмохимическое травление основано на химическом взаимодействии активных частиц плазмы (ионов, атомов, молекул) с материалом, подвергающимся травлению.

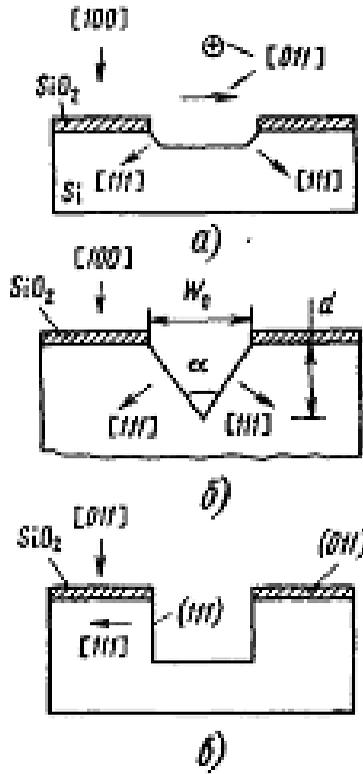


Рис. 3.3. Анизотропное травление кремния

Реактивное ионное травление представляет комбинацию первых двух методов.

Важнейшее достоинство сухого травления – его анизотропия: травление идет преимущественно в вертикальном направлении, в котором движутся частицы плазмы.

Размер вытравленной области точно соответствует размеру отверстия в маске. На рис. 3.4 показано травление двуокиси кремния через маску фоторезиста 1. Такой процесс позволяет получать отверстия в SiO_2 меньших размеров, чем при жидкостном травлении. Количественно анизотропия оценивается отношением скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях.

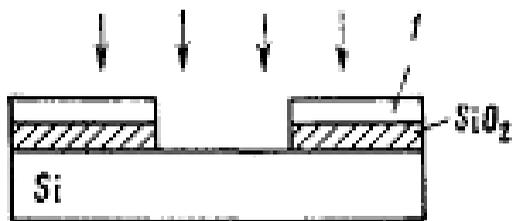


Рис. 3.4. Сухое анизотропное травление двуокиси кремния через маску фоторезиста

Ионное травление не обладает избирательностью. Поэтому несмотря на максимальную анизотропию использовать его для локального травления невозможно. Ионное травление применяют для очистки поверхности от загрязнений.

Плазмохимическое травление производится при давлении около 500 Па в плазме высокочастотного газового разряда. На поверхность пластины попадают ионы с малыми энергиями (100 эВ) и нейтральные химически активные атомы и молекулы. Анизотропия в этом случае мала – от 2 до 5, но обеспечивается высокая избирательность – до 50 при скорости травления 2 – 10 нм/с.

Максимальные преимущества сухого травления присущи реактивному ионному травлению. Оно производится при меньших давлениях (около 1 Па) и больших энергиях ионов (до 500 эВ). Скорость химических реакций нейтральных атомов и молекул с материалом возрастает вследствие бомбардировки его ионами. При низких энергиях длина свободного пробега молекул намного больше глубины травления, а скорость взаимодействия газа с горизонтальной поверхностью пластины больше, чем с боковыми стенками углублений. С другой стороны, химические реакции, ослабляя связи атомов на поверхности, способствуют физическому распылению материала ионами. Это обуславливает высокую анизотропию процесса (до 100) при хорошей избирательности (до 30) и достаточно высокой скорости 0,3 – 3 нм/с.

Для травления двуокиси кремния применяют газообразный четырехфтористый углерод CF_4 , который в плазме распадается на CF_2 и F . Последний взаимодействует с SiO_2 с образованием SiF_4 . Добавление H_2 обеспечивает избирательность травления SiO_2 по сравнению с кремнием, равную 35, и 10 – по сравнению с фоторезистами. Для травления кремния применяют CF_4 с добавлением O_2 .

3.3. Термическая диффузия примесей

Диффузия проводится с целью внедрения атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника для образования области с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости. Диффузионная область оказывается ограниченной p-n переходом. Количество введенной примеси должно быть достаточным для компенсации влияния примеси в исходном материале и для создания избытка примеси, обеспечивающего проводимость противоположного типа. Величина проводимости диффузионной области определяется концентрацией избыточной (нескомпенсированной) примеси.

При высокой температуре (около $1000\text{ }^\circ\text{C}$) примесные атомы поступают через поверхность и распространяются вглубь вследствие теплового движения.

Основной механизм проникновения примесного атома в кристаллическую решетку состоит в последовательном перемещении по вакансиям (пустым узлам) решетки. Менее вероятны перемещения по междоузлиям и обмен местами с соседними атомами. Атом примеси электрически активен, т.е. выполняет функции донора или акцептора, в том случае, если занимает место в узле. Поэтому для получения сильнолегированных областей и (или) сокращения времени диффузии необходима высокая концентрация вакансий в поверхностном слое подложки. При невысокой температуре она очень мала – 10^7 см^{-3} , а при температурах диффузии порядка $1000\text{ }^\circ\text{C}$ достигает 10^{21} см^{-3} за счет поверхностного испарения атомов, диф-

фузии атомов полупроводника из глубины пластины к поверхности (что эквивалентно диффузии вакансий от поверхности вглубь), а также смещения атомов в междоузлия вследствие тепловых колебаний атомов.

Легирование ведется через маску двуокиси кремния SiO_2 или нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,5 – 1 мкм (рис. 3.5).

Концентрация введенной примеси – доноров $N_D(x)$ на рис. 3.6 – максимальна у поверхности и спадает по направлению вглубь пластины. Расстояние x_0 , на котором она равна концентрации исходной примеси акцепторов N_A , называют толщиной диффузионного слоя.

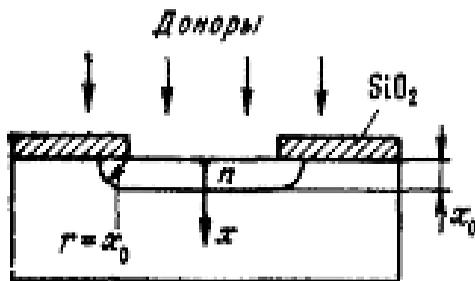


Рис. 3.5. Локальная диффузия примеси через маску из двуокиси кремния

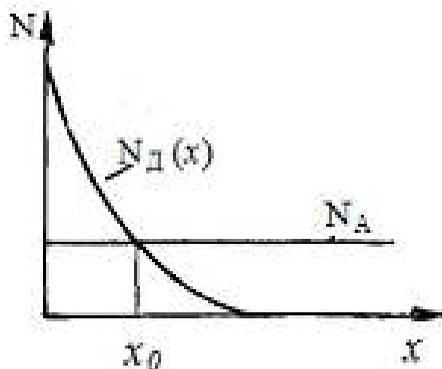


Рис. 3.6. Зависимость концентрации введенной примеси N_D от расстояния x от поверхности пластины

Если вводится примесь противоположного подложке типа, то x_0 соответствует металлургической границе образующегося р-п перехода.

Так как примесь диффундирует не только вглубь, но и под маску, то есть травление изотропно (скорость его не зависит от направления), р-п переход на краях имеет форму, близкую к цилиндрической или сферической с радиусом кривизны $r = x_0$, а ширина диффузионного слоя в горизонтальном направлении у поверхности больше ширины окна в маске на величину $2r$.

Примеси характеризуются коэффициентом диффузии D , определяющим плотность потока Π диффундирующих атомов (атомов, проходящих в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению диффузии):

$$\Pi = -D \text{ grad } N. \quad (3.3)$$

Чем больше D , тем быстрее идет диффузия, тем меньше время требуется для получения слоя заданной толщины x_0 .

Теоретические расчеты показывают, что $x_0 \sim \sqrt{Dt}$, где t – время диффузии, тогда $t \sim x_0^2/D$. Для бора или фосфора при $x_0 = (2 - 3)$ мкм и температуре $T = 1100$ °С оно составляет около одного часа, а для мышьяка и сурьмы (доноров) на порядок больше из-за меньшего D . Формирование слоев большой толщины (около 10 мкм) – длительный процесс, который редко используется.

Коэффициент диффузии сильно зависит от температуры – формула (2.2). На каждые 100 °С он увеличивается на порядок. Отсюда следует необходимость поддержки температуры диффузии с точностью до $\pm (0,1 - 0,2)$ °С.

Другой параметр примеси – предельная растворимость – максимальная концентрация примеси $N_{\text{пред}}$ – незначительно увеличивается с ростом температуры : в два – три раза на каждые 300 °С при температурах ниже 1300 °С. Предельная растворимость составляет $10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при $T = 1100$ °С.

Использовать для легирования чистые вещества затруднительно, так как бор тугоплавок, мышьяк токсичен, фосфор легко воспламеняется. Поэтому в качестве источников примесей применяют их соединения в твердом (B_2O_3 , P_2O_5), в жидком (BBr_3 , $POCl_3$) или газообразном (B_2H_6 , PH_3) состоянии, называемые диффузантами.

На рис. 3.7 изображена схема однозонной диффузионной печи.

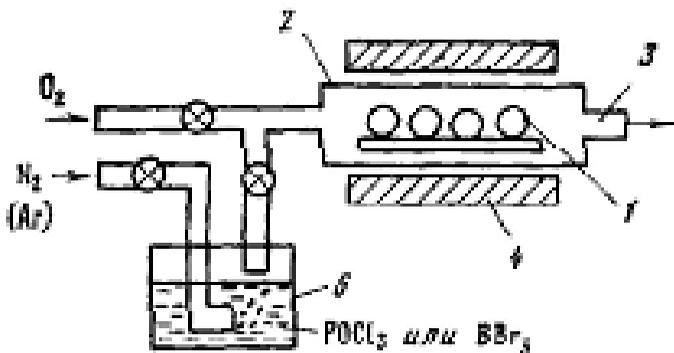
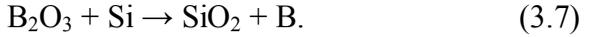
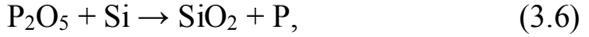


Рис. 3.7. Схема однозонной диффузионной печи

Пластины 1 помещают в кварцевую трубу 2 с открытым выходным концом 3, в которой с помощью нагревателя 4 поддерживается необходимая температура. Нейтральный газ-носитель (N_2 или Ar), проходя через сосуд с диффузантом 5, захватывает его пары и переносит их к поверхности пластин. Одновременно в трубу поступает небольшое количество кислорода. В результате реакции кислорода с диффузантом образуется ангидрид легирующего элемента (B_2O_3 или P_2O_5):



при взаимодействии которого с кремнием выделяются атомы примеси – В или Р:



Если над пластиной присутствует избыток диффузанта, то у поверхности быстро устанавливается максимальная концентрация примеси, близкая к предельной растворимости, которая далее не изменяется. Такой режим диффузии называется загонкой примесей. Распределение концентрации примеси по толщине пластины при загонке изображено на рис. 3.8,а при разных температурах и времени процесса.

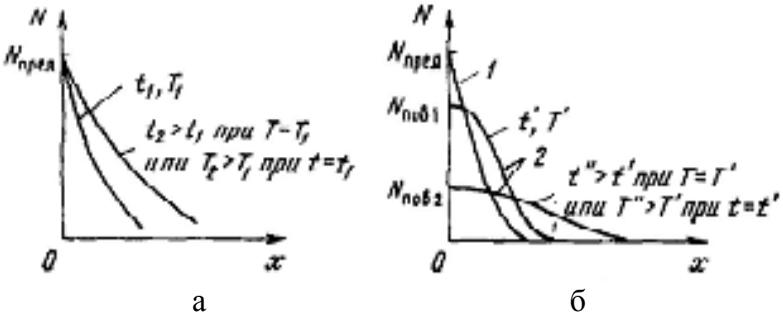


Рис. 3.8. Распределение диффундирующей примеси по глубине пластины:

- а – при неограниченном источнике примеси (загонке);
- б – при ограниченном источнике (разгонке)

В этом случае атомы примеси сосредоточены в узком поверхностном слое. Назначение загонки – введение определенной дозы легирования – числа атомов, поступающих через единицу поверхности, $N_{л} = \int N(x)dx = N_{пр}\sqrt{Dt}$.

Для окончательного формирования диффузионного слоя введенную примесь подвергают перераспределению на втором этапе диффузии – разгонке примесей. Подачу диффузанта прекращают, примесь распределяется вглубь при $N_{л} = \text{const}$, поверхностная концентрация $N_{пов}$ уменьшается, а толщина слоя

возрастает. На рис. 3.8,б приведены зависимости $N(x)$ после загонки 1 и разгонки 2.

Для создания нескольких слоев с разными типами проводимости диффузия проводится многократно. Например, при первой диффузии в кремнии n-типа можно сформировать p-слой, а затем при второй диффузии ввести в него доноры на меньшую глубину, получив структуру типа n-p-n. При многократной диффузии концентрация каждой новой вводимой примеси должна превышать концентрацию предыдущей, чтобы тип проводимости изменился и образовался p-n переход. Максимальная концентрация ограничена предельной растворимостью, поэтому число последовательных диффузий обычно не превышает трех. Последующие диффузии из-за высокой температуры вызывают нежелательную разгонку примесей, введенных на предыдущих этапах. Поэтому температуру и (или) время последующих диффузий выбирают меньшими, а коэффициент диффузии и предельную растворимость большими, чем для предыдущих.

3.4. Ионное легирование

Ионное легирование – это технологическая операция введения примесей в поверхностный слой пластины или эпитаксиальной пленки путем бомбардировки ионами примесей.

Получение ионов, их ускорение и фокусировку производят в специальных вакуумных установках.

Пар легирующих элементов поступают в ионизационную камеру, где возбуждается высокочастотный или дуговой электрический разряд. Образовавшиеся ионы (P^+ , As^+ , B^+ и др.) вытягиваются из камеры с помощью экстрагирующего электрода, на который подается высокий отрицательный потенциал 10 – 20 кВ, и поступают в магнитный масс-сепаратор. Принцип действия масс-сепаратора основан на зависимости траектории движения иона в постоянном поперечном магнитном поле от его массы. Поэтому на выход попадают только нужные ионы. Ионы ускоряются в электрическом поле (с напряжением до

300 кВ) и фокусируются в пучок с плотностью тока до 100 А/м^2 и площадью сечения $1 - 2 \text{ мм}^2$. Пучок сканируют по пластине, облучая всю ее поверхность.

Локальное легирование производится через маску SiO_2 или Si_3N_4 толщиной около $0,5 \text{ мкм}$, превышающей длину пробега ионов в этих материалах.

Ввиду того, что пучок перпендикулярен поверхности и боковое рассеяние ионов мало, горизонтальные размеры легированной области точно соответствуют отверстию в маске, рис. 3.9.

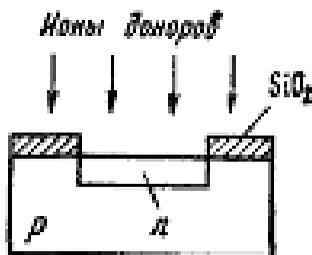


Рис. 3.9. Образование p-n перехода при ионном легировании

В этом преимущества метода по сравнению с легированием путем термической диффузии, так как позволяет получать окна меньших размеров (для этого нужно сравнить рис. 3.5 и 3.9). Возможно локальное легирование без маски путем сканирования остросфокусированным ионным пучком, который может включаться и выключаться по заданной программе.

На рис. 3.10 изображено распределение концентраций бора $N_a(x)$ для одинаковой дозы легирования $N_{л.а.}$, но разных энергий ионов.

Длина пробега ионов – случайная величина, распределенная по нормальному закону (закон Гаусса), она характеризуется средним значением и среднеквадратичным отклонением σ . Обе величины \bar{l} и σ увеличиваются с ростом энергии ионов.

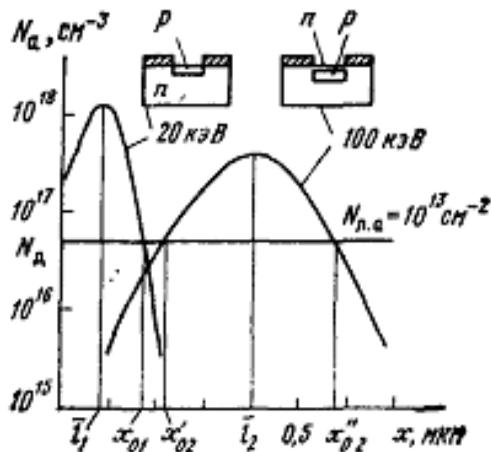


Рис. 3.10. Распределение примеси по глубине пластины при ионном легировании

Положение максимума распределения $N_a(x)$ соответствует \bar{l} , толщина легированного слоя, то есть «ширина» распределения $N_a(x)$, пропорциональна δ , а максимальная концентрация примеси определяется дозой легирования:

$$N_{max} = N(\bar{l}) = N_{л.а.} \sqrt{2\pi\sigma}. \quad (3.8)$$

При малой энергии ионов слой р-типа проводимости образуется у поверхности, а его толщина определяется из условия $N_a(x_{01}) = N_d$, где N_d – исходная концентрация доноров в пластине п-типа ($N_d = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). На расстоянии x_{01} от поверхности образуется р-п переход. При большой энергии ионов слой р-типа располагается на расстоянии x''_{02} от поверхности и имеет толщину $\Delta x = (x''_{02} - x'_{02}) \sim \sigma_2$. Точки x''_{02} и x'_{02} соответствуют металлургическим границам р-п переходов.

С ростом энергии ионов увеличивается число радиационных дефектов в кристалле (смещений атомов), поэтому энергию ограничивают 200 кэВ. Значения \bar{l} не превышают 0,5 – 0,7 мкм.

Доза легирования регулируется током ионного пучка и временем легирования (несколько минут). При большой дозе можно получить более высокую концентрацию, чем при диффузии, но это приведет к повышению дефектности кристалла вплоть до разрушения его поверхности и превращения в аморфный кремний. Поэтому дозу ограничивают значениями $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Высокая воспроизводимость параметров легированных слоев достигается постоянством ускоряющего напряжения и тока пучка.

Для снижения числа радиационных дефектов и активации примеси производится отжиг пластин при температурах 600 – 900 °С. При отжиге смещенные атомы полупроводника возвращаются к положениям равновесия в узлах кристаллической решетки, а примесные атомы перемещаются в позиции атомов замещения, то есть происходит активация, только в этом случае примесные атомы будут вести себя как доноры или акцепторы.

В связи с тем, что глубина легирования при ионной имплантации небольшая, его можно использовать как загонку примеси (первый этап диффузии), а затем провести второй этап легирования – разгонку при высокой температуре (900 – 1000 °С), совместив ее с отжигом. Такой способ дает возможность получить легированные слои большой толщины при обеспечении более точного дозирования вводимой примеси по сравнению с диффузией.

Ионное легирование широко используется при создании БИС и СБИС. Оно позволяет создавать слои с субмикронными горизонтальными размерами с толщинами порядка 0,1 мкм при высокой воспроизводимости параметров.

Процесс ионного легирования имеет высокую производительность, занимает меньше времени, проводится при более низких температурах в сравнении с диффузией, в связи с чем мало изменяет распределение примеси, полученное на предыдущих этапах.

Этим методом можно внедрять примеси любых элементов, при этом обеспечивается высокая степень чистоты, так как процесс производится в вакууме и используется магнитное сепарирование ионов. Ионное легирование хорошо совместимо с другими вакуумными процессами.

Недостатками ионного легирования являются малая глубина залегания слоев, образование дефектов, не полностью устраняемых отжигом, а также сложность технологического оборудования.

В электронной промышленности ионная имплантация производится на установках типа «Везувий».

3.5. Эпитаксия

Термин эпитаксия происходит от греческого $\epsilon\rho\iota$ – на, над и $\tau\alpha\chi\iota\varsigma$ – расположение.

Эпитаксия – процесс наращивания на пластину (подложку) монокристаллического слоя (эпитаксиальной пленки), повторяющего структуру подложки и ее кристаллографическую ориентацию.

Эпитаксиальная пленка создается на всей поверхности подложки, одновременно в нее вводятся примеси, распределяющиеся равномерно по объему пленки. На границе раздела пленки с подложкой можно сформировать p-n, n⁺-n, p⁺-p переходы. Проведя несколько последовательных эпитаксий, можно создавать многослойные структуры.

Рассмотрим газофазную эпитаксию кремния. Она проводится в эпитаксиальном реакторе, рис. 3.11.

Пластины 1 на графитовом держателе 2 помещаются в кварцевую трубу 3 с высокочастотным нагревателем 4. Через трубу пропускается поток водорода с небольшим (доли процента) содержанием тетрахлорида кремния SiCl_4 , а также газообразных соединений доноров – PH_3 , PCl_3 или акцепторов – BBr_3 , B_2H_6 .

При высокой температуре (1200 ± 3 °C) на поверхности пластин происходит реакция

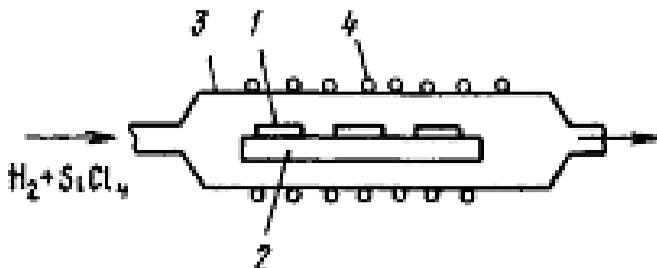


Рис. 4.11. Схема установки для эпитаксиального наращивания кремния



Образующиеся атомы кремния перемещаются по поверхности, занимая положения в узлах кристаллической решетки, вследствие чего растущая пленка продолжает кристаллическую решетку подложки. Атомы доноров (Р) или акцепторов (В) образуются также в результате химических реакции восстановления водородом или разложения (пиролиза).

Скорость роста пленки 0,1 – 1 мкм/мин зависит от температуры, содержания тетрахлорида кремния, скорости потока газа, кристаллографической ориентации поверхности. Вследствие высокой температуры примеси диффундируют из пленки в подложку и обратно. Это затрудняет создание резких переходов и тонких эпитаксиальных пленок (менее 0,5 мкм). Толщина пленок обычно составляет 1 – 15 мкм.

Более низкую температуру эпитаксии (1000 °С) имеет реакция разложения силана SiH_4 :



но и в этом случае получить эпитаксиальные пленки тоньше 0,1 – 0,2 мкм невозможно.

Для получения очень тонких пленок (в несколько нанометров) и резких переходов используют молекулярно-лучевую эпитаксию (МЛЭ). Она основана на взаимодействии молекулярных пучков с подложкой, имеющей не очень высокую температуру (600 – 800 °С), в условиях сверхвысокого вакуума ($10^{-7} - 10^{-5}$ Па).

На рис. 3.12 показана эпитаксия пленки твердого раствора арсенида галлия-алюминия $Al_xGa_{1-x}As$ на подложке арсенида галлия.

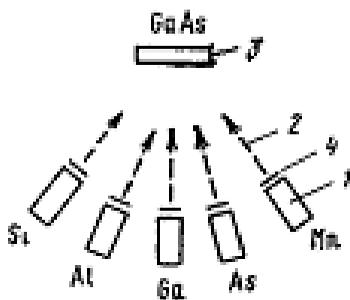


Рис. 3.12. Схема молекулярно-лучевой эпитаксии твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ на подложке GaAs

Несколько тиглей 1 содержат составные элементы пленки (Al, Ga, As) и легирующие примеси (Si – донор, Mn – акцептор). При нагревании эти вещества испаряются, образуя молекулярные пучки 2, и переносятся на подложку 3, конденсируясь на ней.

Подбором температуры источников и подложки получают пленки с нужным химическим составом. Время процесса и толщину пленок регулируют заслонками 4, прерывающими попадание пучков на подложку.

Этим методом выращиваются сверхтонкие (10 – 100 нм) эпитаксиальные пленки полупроводников, диэлектриков и металлов, создаются свехрешетки, осуществляется многослойная застройка решетки, то есть можно управлять составом пленки вплоть до моноатомных слоев. Поэтому это метод нанoeлектронной технологии.

3.6. Нанесение тонких пленок

Тонкие пленки широко используются как в полупроводниковых, так и в гибридных ИМС. Они являются материалом проводников соединений, резисторов, конденсаторов, изоляции. Помимо требуемых электрофизических параметров пленки должны иметь хорошую адгезию (сцепление) к материалу, на который они наносятся, например, к кремнию и двуокиси кремния в полупроводниковых ИМС, к диэлектрической подложке или ранее нанесенной пленке в ГИС. Не все материалы имеют хорошую адгезию с подложками (например, золото с кремнием). Тогда на подложку сначала наносится тонкий подслои с хорошей адгезией, а на него – основной материал, имеющий хорошую адгезию с подслоем.

Важным требованием является близкое значение коэффициентов термического расширения (ТКР) пленок и подложек, что предотвращает повреждение пленок при колебаниях температуры.

Термическое вакуумное испарение (термическое вакуумное напыление). Наносимое вещество вместе с подложкой помещается в вакуумную камеру. В результате нагревания происходит испарение и осаждение вещества на подложке. Скорость испарения и роста пленок сильно зависят от температуры. Осаждение происходит с достаточно высокой скоростью при достижении условной температуры испарения $T_{\text{усл}}$, при которой давление паров вещества равно 1,3 Па. В зависимости от температуры плавления вещества $T_{\text{пл}}$, могут выполняться разные условия: если $T_{\text{усл}} < T_{\text{пл}}$ (Cr, Mo, Si, W), то вещества интенсивно испаряются из твердого состояния; если $T_{\text{усл}} > T_{\text{пл}}$ (Al, Au, Pt), – то из жидкого.

Нагрев испаряемых материалов может быть прямой или косвенный: при прямом нагреве электрический ток пропускается через металлический материал, или используется индукционный нагрев, или нагрев электронной бомбардировкой. Косвенный нагрев происходит за счет теплопередачи от испарителя (тигля, спирали и др.). Осаждение ведется на подогре-

тую подложку, температура которой 200 – 400 °С. При слишком низкой температуре осаждаемые атомы не могут мигрировать по поверхности, при этом могут образовываться островки разной толщины. Слишком высокая температура вызывает обратное испарение осаждаемых атомов с подложки.

Высокий вакуум (10^{-4} – 10^{-5} Па) обеспечивает чистоту пленки. Время осаждения (от нескольких секунд до нескольких минут) регулируется заслонками, преграждающими доступ испаряемого вещества к подложке.

Недостатком этого метода является невысокая воспроизводимость параметров пленки из-за плохого контроля температуры и кратковременности процесса, а также невозможность воспроизведения химического состава испаряемого вещества (сплава или химического соединения) из-за разной скорости испарения входящих в него компонентов. Поэтому метод используется в основном для чистых металлов.

Распыление ионной бомбардировкой. Процесс производится в вакуумной камере, заполненной инертным газом (например, аргон), котором возбуждается газовый разряд. Положительные ионы бомбардируют распыляемый материал (мишень), выбивая из него атомы или молекул, которые осаждаются на подложке. На пути к подложке выбитые атомы рассеиваются на атомах инертного газа. Это уменьшает скорость осаждения, но увеличивает равномерность осаждения пленки на подложке, этому способствует и большая площадь мишени. Скорость и время распыления (от нескольких минут до нескольких часов) регулируются напряжением на электродах и могут поддерживаться с высокой точностью.

По сравнению с термическим вакуумным испарением этот метод позволяет получать пленки тугоплавких металлов, наносить диэлектрические пленки, соединения и сплавы, точно выдерживать их состав; обеспечивать равномерность и точное воспроизведение толщины пленок на подложках большой площади. Распыление ионной бомбардировкой имеет несколько видов: катодное распыление, ионно-плазменное распыление и высокочастотное распыление.

При катодном распылении распыляемый материал (металл) является электродом катода 1 – рис. 3.13. На заземленном аноде 2 располагается подложка 3. Давление газа в камере 4 составляет 1 – 10 Па. На катод подается высокое отрицательное напряжение 2 – 5 кВ. Возникает газовый разряд, при котором образуется электронно-ионная плазма. Положительные ионы образуются из-за ионизации атомов газа электронами. Ионы, ускоряясь в сильном электрическом поле, выбивают из катода электроны, необходимые для поддержания разряда, а также атомы, которые диффундируют через газ, осаждаются на подложке. Если перпендикулярно электрическому полю E между катодом и анодом приложит постоянное магнитное поле B , то оно искривит траекторию электронов, вылетевших из катода.

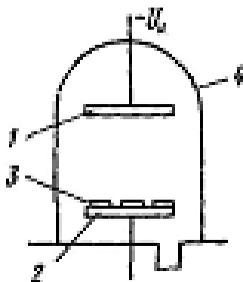


Рис. 3.13. Схема катодного распыления

Электроны, двигаясь к аноду по сложным петлеобразным траекториям, подобным траекториям электронов в магнетронах СВЧ (рис. 3.14) теряют энергию на ионизацию газа.

Увеличение длины пути электрона приводит к образованию большего числа ионов, чем в отсутствии магнитного поля, что способствует повышению скорости распыления или (при той же скорости) позволяет снизить давление газа и загрязнение пленки. В этом случае электроны достигают анода с малой скоростью, это снижает нагревание анода и предотвращает испарение осаждаемой пленки, устраняя возможность ее рекристаллизации и изменения химического состава. Описанная система называется магнетронной распылительной системой.

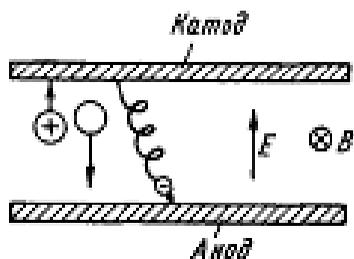


Рис. 3.14. Движение частиц в магнетронной распылительной системе:
 \ominus – электрон, \oplus – ион,
 \odot – атом, выбитый из катода

При реактивном катодном распылении в камеру вводится некоторое количество газа, образующему химические соединения с распыляемым материалом. Например, добавка кислорода при распылении тантала или кремния дает возможность получить диэлектрические пленки Ta_2O_5 , SiO_2 .

Недостатком катодного распыления является загрязненность пленок из-за сравнительно низкого вакуума, а также невозможность напыления через металлический трафарет (маску), так как он искажает электрическое поле у анода.

При ионно-плазменном напылении давление газа в камере $P \approx 10^{-2}$ Па значительно ниже, чем при катодном распылении, это уменьшает загрязнение пленок. Длина свободного пробега выбитых из мишени атомов превышает расстояние мишень – подложка, поэтому отсутствует рассеяние атомов, что повышает скорость осаждения. Получить большую концентрацию ионов в условиях пониженного давления можно, используя накаливаемый катод – источник электронов (рис. 3.15). В нижней части камеры 1 расположен вольфрамовый катод 2, а в верхней – анод 3, на который положительное напряжение составляет около 100 В. На мишень 4 подается высокое отрицательное напряжение 2 – 3 кВ. Напротив расположена подложка 5 с нагревателем 6. Для увеличения концен

трации ионов прикладывается магнитное поле, направленное от анода к катоду. Электроны, вылетающие из катода под небольшими углами к вектору магнитного поля, движутся к аноду по спиральным траекториям вокруг оси разряда, проходя путь, значительно больший расстояния катод – анод, создавая на этом пути гораздо больше ионов.

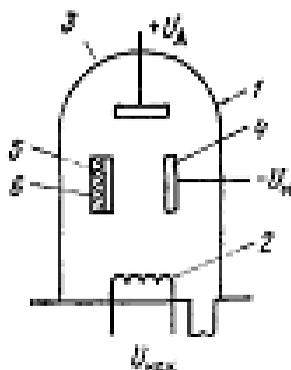


Рис. 3.15. Схема ионно-плазменного напыления

Степень ионизации газа на 1 – 2 порядка выше, чем при катодном распылении. Начало и конец процесса определяются подачей и отключением напряжения на мишени. Перед началом напыления проводится ионная очистка поверхности подложки (ионное травление). Аналогично можно провести очистку мишени. Очистка мишени и подложки способствует повышению чистоты пленок и хорошей адгезии к подложке.

В отличие от катодного распыления подложка не влияет на напряженность электрического поля и скорость распыления, это обеспечивает равномерность толщины пленки и возможность напыления через металлический трафарет, накладываемый на подложку. В ГИС это дает возможность одновременно с напылением формировать рисунок пленки.

Рассмотренные методы распыления на постоянном токе применяют для напыления металлических и полупроводниковых материалов.

На диэлектрической мишени попадающие на нее положительные ионы не могут нейтрализоваться электронами из внешней цепи, в результате потенциал мишени повышается и процесс прекращается.

Для распыления диэлектрических мишеней используется *высокочастотное* распыление, при котором на мишени периодически меняется знак потенциала. На установке, изображенной на рис. 3.15, это достигается тем, что мишень 4 представляет собой диэлектрический слой, нанесенный на металлическую пластину, на которую помимо постоянного подают переменное высокочастотное напряжение большой амплитуды. При отрицательном напряжении мишень бомбардируется положительными ионами и распыляется, при положительном – на мишень поступает поток электронов, нейтрализующих заряд ионов (при этом распыления не происходит вследствие малой массы и энергии электронов).

Химическое осаждение из газовой фазы – в технологии полупроводниковых ИМС используется для получения пленок поликристаллического кремния и диэлектриков SiO_2 , Si_3N_4 . Осаждение происходит в результате химической реакции в газовой фазе при повышенной температуре и осуществляется в эпитаксиальных или диффузионных установках.

Для осаждения поликремния на поверхность SiO_2 используется реакция пиролиза (разложения) силана:



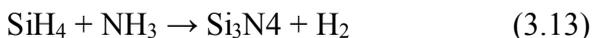
которая протекает при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для осаждения двуокиси кремния используется окисление силана:



протекающее при $T = 200 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Нитрид кремния получают взаимодействием силана с аммиаком:



при $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

К достоинствам осаждения из газовой фазы относятся простота, технологическая совместимость с другими процессами создания полупроводниковых ИМС (эпитаксией, диффузией), невысокая температура, благодаря чему отсутствует нежелательная разгонка примесей.

Скорость осаждения определяется температурой и концентрацией реагирующих газов в потоке нейтрального газаносителя и составляет несколько сотых долей микрометра в минуту.

3.7. Проводники соединений и контакты в полупроводниковых ИМС

Элементы ИМС соединяются между собой тонкопленочными проводниками. Предварительно в двуокиси кремния, покрывающей поверхность пластины, вытравливаются окна под контакты. Далее на всю поверхность наносится проводящая пленка, а затем ее травят через маску и формируют рисунок межсоединений.

Материал пленки должен обеспечивать омический контакт к кремнию; иметь низкое удельное сопротивление; хорошую адгезию к кремнию и двуокиси кремния; ТКР, близкий к ТКР кремния и двуокиси кремния; выдерживать высокую плотность тока. Контакт должен быть механически прочным, не подвергаться коррозии, не образовывать химических соединений с кремнием.

Металла, удовлетворяющего всем этим требованиям, не существует. Наиболее полно им отвечает алюминий, имеющий удельное сопротивление $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Он наносится термическим вакуумным напылением.

После создания рисунка межсоединений производится вжигание контактов при $550 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 – 10 мин. На поверхности двуокиси кремния протекает реакция



улучшающая адгезию пленки к SiO_2 . В местах контактных окон удаляются возможные остатки SiO_2 ; алюминий внедряется в кремний (его поверхностная концентрация составляет около $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Это улучшает контакт и адгезию.

Ввиду того, что алюминий является акцептором, контакт к областям р-типа всегда получается омическим. Для получения омического контакта к n-области концентрация доноров в ней должна быть выше, чем концентрация алюминия. При низкой концентрации доноров в поверхностном слое может произойти перекомпенсация акцепторами, что приведет к инверсии проводимости (изменению типа проводимости с n- на р-тип) и образованию р-n перехода. Поэтому под контакт к алюминию в n-Si создается сильнолегированная n⁺-область с концентрацией доноров около 10^{20} см^{-3} , рис. 3.16.

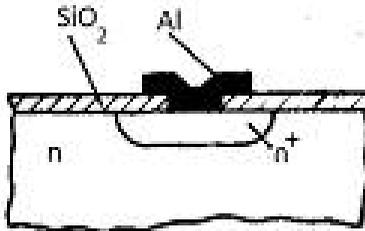


Рис. 3.16. Создание n⁺-области под контакт алюминия к n-кремнию

В БИС и СБИС создаются несколько слоев межсоединений, разделенных слоями диэлектрика (обычно SiO_2), получаемых методом осаждения из газовой фазы. В двуокиси кремния вскрывают окна для контактов между проводниками соседних слоев.

Наиболее сложные схемы (СБИС) могут иметь до 9 – 12 слоев межсоединений, например, на рис. 3.17 показаны 8 слоев медных межсоединений.

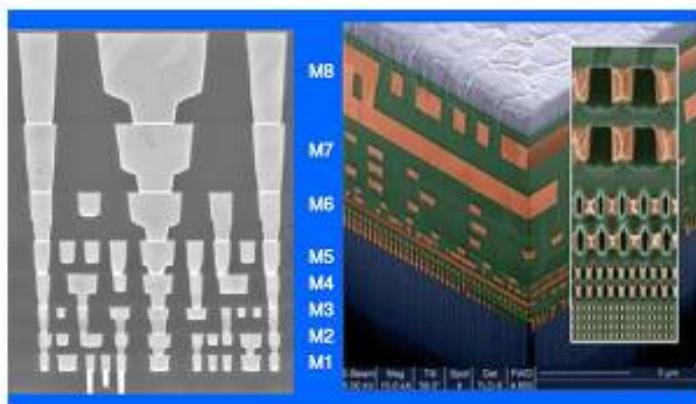


Рис. 3.17. Многослойные медные межсоединения

Как материал первого слоя алюминий имеет ряд недостатков. В неглубоких р-n переходах (0,5 – 1 мкм) диффузия алюминия в кремний при термообработке может привести к замыканию (рис. 3.18).

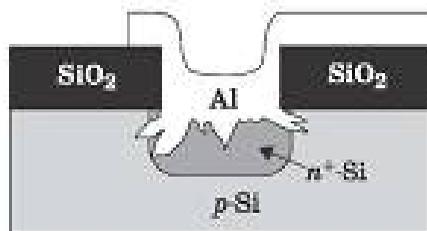


Рис. 3.18. Замыкание р-n перехода после термообработки алюминиевой металлизации

Кроме того, алюминий подвержен электромиграции – при высокой плотности тока и малой толщине пленки перенос атомов алюминия нарушает однородности пленки вплоть до ее разрывов.

Легкая окисляемость пленки Al с образованием Al_2O_3 ухудшает контакты между слоями.

Поэтому в качестве проводников первого слоя используют легированный поликремний. Иногда используют два слоя: поликремний – снизу и металл – сверху. Недостатком поликремниевых проводников является их большое сопротивление. Оно снижается на порядок при использовании силицидов тугоплавких металлов (Ta, W, Mo и др.), дающих хорошие омические контакты к кремнию, имеющих высокую адгезию к кремнию и двуокиси кремния. Однако в СБИС при большой длине межсоединений их сопротивление оказывается слишком значительным.

С повышением степени интеграции роль межсоединений возрастает: они занимают все большую площадь кристалла (60 – 85 %) и начинают влиять на основные параметры схем: площадь кристалла, быстродействие, показатель качества, помехоустойчивость, надежность и др. При ширине проводников около 0,1 мкм внутренние соединения «съедают» до 90 % сигнала по уровню и мощности. Если с уменьшением размеров быстродействие логических элементов возрастает, то быстродействие межсоединений системы металлизации снижается из-за уменьшения поперечного сечения проводников межсоединений и соответствующего увеличения погонного сопротивления, а также из-за уменьшения расстояния между соседними проводниками, заполненного диэлектриком, и соответствующего увеличения электрической емкости. В результате, начиная с некоторого уровня интеграции ИМС, задержки сигналов в межсоединениях могут превышать задержки в самих логических элементах.

С уменьшением поперечного сечения проводников межсоединений появляется и ряд других проблем: снижается электромиграционная стойкость проводников, значительно усложняются технологические приемы травления при создании рисунка проводников и др.

Это обусловило переход на медную металлизацию, так как из всех металлов медь обладает самой лучшей электропроводностью $\rho = 1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см (за исключением серебра).

Медная металлизация выдерживает в пять раз большую плотность тока, чем алюминиевая (за счет лучшей электро- и теплопроводности и более высокой температуры плавления).

Главные преимущества меди как материала межсоединений перед алюминием — более низкое удельное сопротивление, что по оценкам дает 40% выигрыш в быстродействии, более высокая термическая стабильность и существенно меньшая склонность к электромиграции.

3.8. Литография

Литография – это процесс формирования отверстий (окон) в масках, создаваемых на поверхности пластины и предназначенных для проведения локальных технологических процессов (легирования, травления, окисления, напыления и др.).

Фотолитография. В технологии ИМС основную роль играет фотолитография, использующая светочувствительные полимерные материалы – фоторезисты, которые бывают позитивными и негативными.

Негативные фоторезисты под действием света полимеризуются и становятся нерастворимыми в специальных веществах – проявителях. После локальной засветки (экспонирования) растворяются и удаляются незасвеченные участки. Наибольшая чувствительность негативных фоторезистов соответствует длине волны света 0,28 мкм (ультрафиолет), поэтому экспонирование производится с помощью кварцевой лампы.

В позитивных фоторезистах свет разрушает полимерные цепочки: растворяются засвеченные участки. Максимальная чувствительность лежит в видимом диапазоне спектра (до 0,45 мкм). Позитивные фоторезисты обеспечивают более резкие границы проявленных участков, чем негативные, то есть обладают повышенной разрешающей способностью, но имеют меньшую чувствительность и поэтому требуют большего времени экспонирования.

Рисунок будущей маски задается фотошаблоном. Это прозрачная (обычно стеклянная) пластина, на одной из сторон которой нанесена непрозрачная пленка (Cr, CrO₃, Fe₂O₃ и др.) требуемой конфигурации. В связи с групповыми методами создания микросхем на шаблоне создается матрица одинаковых рисунков, соответствующих отдельным микросхемам в масштабе 1 : 1 (рис. 3.19).

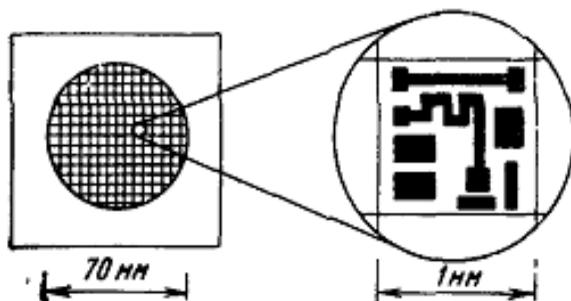


Рис. 3.19. Фотошаблон с матрицей одинаковых рисунков

Схема процесса фотолитографии показана на рис. 3.20.



Рис. 3.20. Схема процесса фотолитографии

Рассмотрим процесс фотолитографии на примере получения маски двуокиси кремния.

На окисленную поверхность кремниевой пластины наносят несколько капель раствора фоторезиста. С помощью центрифуги его распределяют тонким (около 1 мкм) слоем по поверхности пластины, а затем высушивают.

На пластину накладывают фотошаблон (ФШ) рисунком к фоторезисту (ФР) и экспонируют – рис. 3.21,а, затем его снимают. После проявления негативный фоторезист удаляется с незасвеченных участков – рис. 3.21,б, а позитивный – с засвеченных. Получается фоторезистивная маска, через которую далее травят слой двуокиси кремния, после чего фоторезист удаляют – рис. 3.21,в

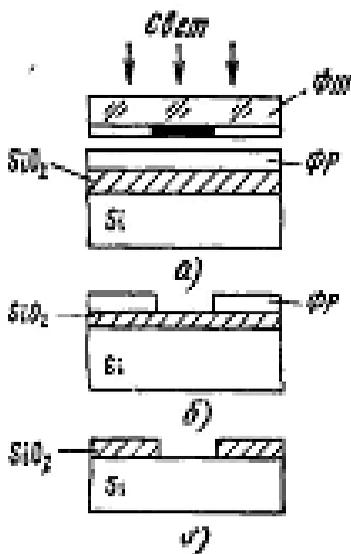


Рис. 3.21. Формирование рельефа с помощью негативного фоторезиста

Совмещение рисунков фотошаблона и пластины выполняют в два этапа. Грубое совмещение производят с помощью контрольных модулей – пустых кристаллов. Фотошаблон 1 (рис. 3.22) ориентируют относительно пластины 2 так, чтобы

границы ячеек модулей 4 были перпендикулярны (или параллельны) базовому срезу 3 пластины. Точное совмещение производят с помощью специальных знаков совмещения (рис. 3.23), предусмотренных в рисунке каждого топологического слоя.

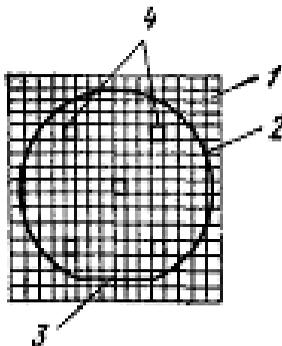


Рис. 3.22. Совмещение фотошаблона с пластиной

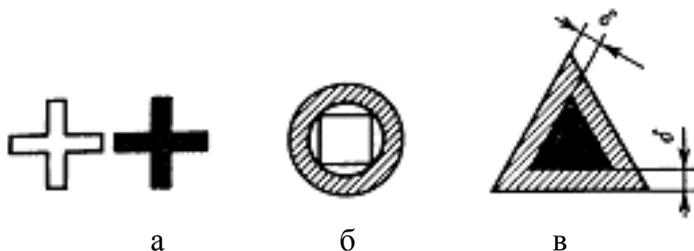


Рис. 3.23. Фигуры совмещения «линия – линия» (а), «точка – линия» (б) и с контролируемым зазором δ (в)

Важнейшим параметром фотолитографии является разрешающая способность. Ее оценивают максимальным числом линий, раздельно воспроизводимых в пределах 1 мм:

$$R = \frac{1000}{2\Delta}, \quad (3.15)$$

где Δ – минимальная ширина линии, мкм.

На практике разрешающую способность характеризуют величиной Δ . Она определяет минимальные размеры областей в кристалле или слоев на его поверхности и расстояния между ними, которые называются топологическими размерами. Физическим фактором, ограничивающим Δ , является дифракция света, не позволяющая получать Δ меньше длины волны света λ (для видимого света $\lambda \approx 0,5$ мкм). Обычно $\Delta > \lambda$ из-за изменений геометрических размеров фоторезиста, рассеяния света при экспонировании, несоответствия размеров в маске фоторезиста и основной маске и др.

Перспективные методы литографии. Литография с разрешающей способностью $\Delta \ll 1$ мкм (субмикронная), необходимая для СБИС, основывается на излучении с меньшей длиной волны.

Рентгеновская литография использует мягкое рентгеновское излучение с $\lambda \approx 1$ нм. Ввиду того, что для рентгеновских лучей нет фокусировки, используется контактная литография. Шаблоном является тонкая мембрана, прозрачная для рентгеновских лучей, на нее нанесен тонкопленочный непрозрачный рисунок, выполненный в масштабе 1 : 1.

Электронно-лучевая литография использует облучение электронорезиста потоком электронов, длина волны которых $\lambda < 0,1$ нм. Она может быть проекционной и сканирующей. Поток электронов хорошо фокусируется, им можно управлять с помощью ЭВМ.

4. ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

4.1. Структура и физические свойства точечных, линейных и двумерных нанобъектов

XX век начался с создания и осмысления нового раздела физики – квантовой механики, а закончился реальным воплощением основных положений квантовой механики в приборных квантово-размерных структурах и их широким практическим использованием.

Одним из фундаментальных понятий квантовой механики является волна де Бройля. Волна де Бройля отражает дуализм (двойственность) поведения квантовых объектов, проявляющих одновременно волновые и корпускулярные свойства. Де Бройль предположил, что движение любой частицы, обладающей импульсом $\vec{p} = m\vec{v}$, можно характеризовать длиной волны.

$$\lambda_D = \frac{2\pi}{\vec{k}} = \frac{2\pi\hbar}{\vec{p}} = \frac{h}{m\vec{v}} \rightarrow \frac{h}{m^* \vec{v}}. \quad (4.1)$$

Например, для свободного электрона, движущегося с тепловой скоростью, соответствующей комнатной температуре ($U \sim 5 \cdot 10^7$ см/с) длина волны де Бройля равна примерно 1,4 нм (т.е. 14 Å). В то же время в GaAs ($m^* = 0,07 m_e$), $\lambda \sim 20$ нм, а в InSb ($m^* = 0,013 m_e$), $\lambda \sim 100$ нм.

Если объект хотя бы по одной из осей координат имеет размеры, сравнимые с длиной волны де Бройля электрона, то в таком объекте электрон будет проявлять себя как квантовая частица. Например, в квантовой яме энергия электрона будет иметь дискретные значения и переход из одного энергетического состояния в другое потребует определенной энергии. Это явление называется квантовым ограничением. Физические свойства квантовых объектов отличаются от свойств тех же частиц в микроскопических масштабах.

Современная технология позволяет изготавливать объекты (слои, линии, точки) размерами несколько нанометров, в которых электроны проявляют квантовые свойства. Для объектов с макроскопическими размерами наличие волны де Бройля не учитывается из-за ее малости.

4.1.1. Фундаментальные явления

В наноразмерных структурах поведение подвижных носителей заряда (электронов и дырок) определяют три группы фундаментальных явлений: квантовое ограничение, баллистический транспорт и туннелирование. Все эти эффекты по своему происхождению представляют собой типичные проявления квантово-механической природы электрона.

Квантовое ограничение возникает, когда свободное движение волны де Бройля электронов в одном из направлений оказывается ограниченным потенциальными барьерами, образующими наноструктуру, в которой эти электроны находятся. Оно изменяет спектр разрешенных энергетических состояний и влияет на перенос носителей заряда через наноструктуры. Транспорт носителей заряда может, в принципе, осуществляться как параллельно, так и перпендикулярно потенциальным барьерам. При этом будет проявляться волновая природа электрона. В случае движения носителей вдоль потенциальных барьеров доминирующими эффектами оказываются баллистический транспорт и квантовая интерференция. Прохождение же носителей заряда через потенциальные барьеры имеет место исключительно посредством их туннелирования, что и обеспечивает перенос носителей из одной области наноэлектронного прибора в другую. В данном разделе рассмотрены физическая природа и основные закономерности проявления перечисленных фундаментальных явлений.

4.1.2. Квантовое ограничение

По законам квантовой механики состояние микрочастицы описывает волновая функция ψ , определить которую можно из уравнения Шредингера.

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0. \quad (4.2)$$

Уравнение Шредингера для стационарных состояний (4.2) позволяет найти волновую функцию и определить вероятность нахождения частицы в различных точках пространства. В это уравнение входит в качестве параметра полная энергия частицы E . В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнение имеет решение не при любых значениях параметра (E), а лишь при некоторых избранных значениях (собственные значения). Решения, соответствующие собственным значениям E , называются собственными функциями.

Найдем собственные значения энергии и соответствующие им собственные функции для частицы, находящийся в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Предположим, что частица может двигаться только вдоль оси x . Пусть движение ограничено непроницаемыми для частицы стенками: $x = 0$ и $x = l$. Потенциальная энергия U (рис. 4.1,а) в этом случае равна нулю при $0 \leq x \leq l$ и обращается в бесконечность при $x < 0$ и $x > l$.

Запишем для этого случая уравнение Шредингера. Поскольку волновая функция зависит только от координаты x , уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0. \quad (4.3)$$

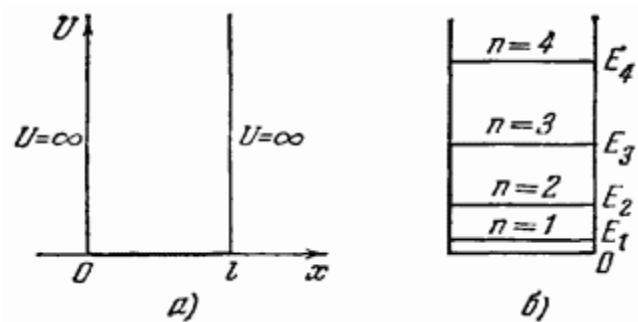


Рис. 4.1. Потенциальная яма (а) и спектр энергии в ней (б)

Учитывая нулевую вероятность нахождения частицы вне ямы с бесконечно высоким потенциальным барьером, получим граничные условия $\psi(0) = \psi(l) = 0$.

В области $0 \leq x \leq l$ уравнение (4.3) имеет вид

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0. \quad (4.4)$$

Решением этого уравнения имеет вид

$$\psi(x) = a \sin(kx + \alpha), \quad (4.5)$$

где $k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E$.

Учитывая граничные условия, получаем

$$\begin{aligned} \psi(0) &= a \sin \alpha = 0, \\ \psi(l) &= a \sin(kl) = 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Граничные условия будут выполнены при $\alpha = 0$ и $kl = \pm n\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) ($n = 0$ отпадает, поскольку при этом получается $\psi \equiv 0$ – частица нигде не находится).

Собственные значения энергии частицы (рис. 4.1 б):

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (4.7)$$

Спектр энергии дискретный. Схема энергетических уровней изображена на рис. 4.2.

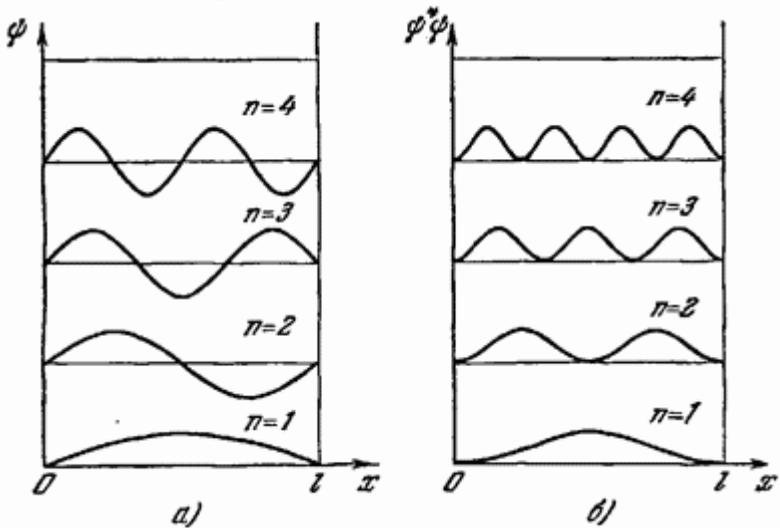


Рис. 4.2. Потенциальная яма и волновые функции электронов в ней

Целое число n является квантовым числом, обозначающим квантовое состояние. Таким образом, электрон, помещенный в ограниченную область пространства, может занимать только дискретные энергетические уровни. Самое низкое состояние имеет энергию

$$E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2}, \quad (4.8)$$

которая всегда больше нуля. Ненулевая минимальная энергия отличает квантово-механическую систему от классической,

для которой энергия частицы, находящейся на дне потенциальной ямы, тождественно равна нулю. Кроме того, разрешенные значения энергии для электрона оказываются квантованными и пропорциональны n .

Ограничение движения электронов (дырок) в низкоразмерной структуре, приводящее (вследствие их квантово-волновой природы) к ненулевому минимальному значению их энергии и к дискретности энергий разрешенных состояний, называют *квантовым ограничением*. В твердых телах квантовое ограничение может быть реализовано в трех пространственных направлениях. Количество направлений, в которых эффект квантового ограничения отсутствует, используется в качестве критерия для классификации элементарных низкоразмерных структур по трем группам: квантовые пленки, квантовые шнуры (нити) и квантовые точки. Схематически они показаны на рис. 4.3.

Квантовые пленки представляют собой двумерные (2D) структуры, в которых квантовое ограничение действует только в одном направлении – перпендикулярно пленке (направление z на рис. 4.3). Носители заряда в таких структурах могут свободно перемещаться в плоскости xy . Их энергия складывается из квантованных значений, определяемых эффектом квантового ограничения в направлении z (в соответствии с толщиной пленки l_z), и непрерывных составляющих в направлениях x и y :

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m l_z^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m}. \quad (4.9)$$

В k -пространстве энергетическая диаграмма квантовой пленки представляет собой семейство параболических зон, которые, перекрываясь, образуют подзоны. Электрон с такой энергией неподвижен в плоскости пленки. Зависимость плотности электронных состояний от энергии в квантовой пленке имеет ступенчатый вид (вместо непрерывной параболической зависимости в трехмерных структурах).

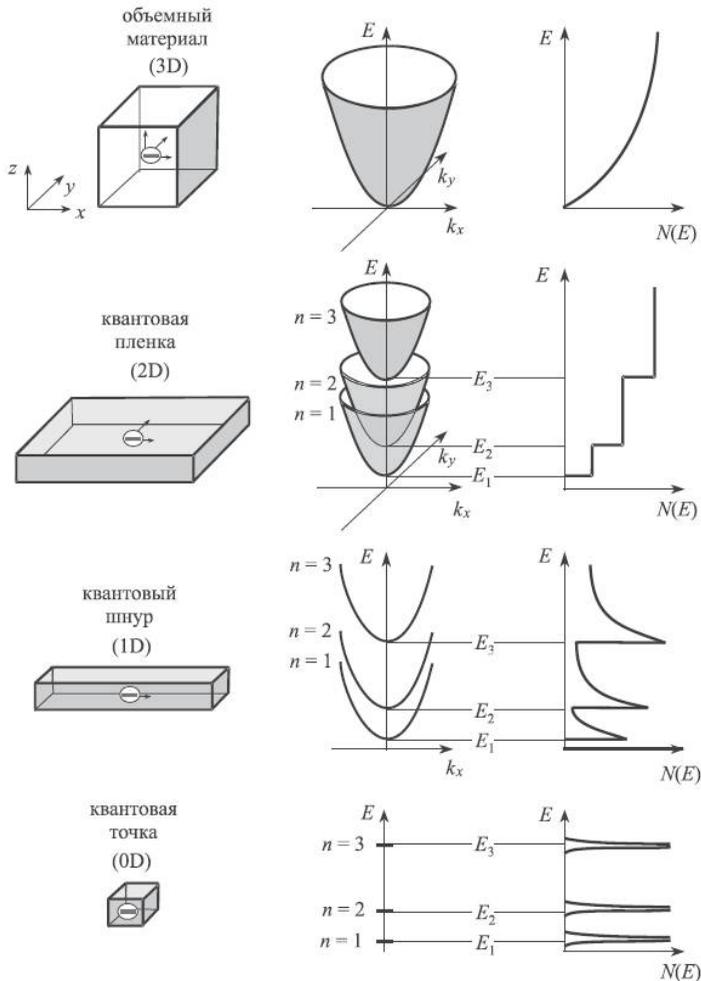


Рис. 4.3. Энергетические диаграммы элементарных низкоразмерных структур и плотности состояний $N(E)$ в сравнении с трехмерной структурой

Электроны в квантовых пленках обычно называют *двумерным электронным газом (2DEG)*.

Квантовые шнуры (нити) – это одномерные (1D) струк-

туры. В отличие от квантовых пленок они имеют не один, а два нанометровых размера, в направлении которых и действует эффект квантового ограничения. Носители заряда могут свободно двигаться только в одном направлении – вдоль оси шнура. Таким образом, вклад в энергию носителя заряда дают кинетическая составляющая вдоль одного направления и квантованные значения в двух других направлениях:

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2 n_1^2}{2ml_y^2} + \frac{\hbar^2 \pi^2 n_2^2}{2ml_z^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m}, n_1 = 1, 2, \dots; n_2 = 1, 2, \dots \quad (4.10)$$

Квантовые точки – это нуль-мерные (0D) структуры, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трех направлениях.

Из-за сходства энергетических характеристик атомов и квантовых точек последние иногда называют «искусственными атомами». Квантовые точки состоят из сравнительно небольшого количества атомов. В этом отношении к ним близки атомные кластеры и нанокристаллиты (кристаллиты нанометровых размеров), где также имеет место эффект квантового ограничения.

Рассмотренные элементарные низкоразмерные структуры в определенном смысле являются идеализированными объектами. Очевидно, что низко-размерные структуры, представляющие практический интерес, должны располагаться на какой-либо подложке и иметь контакт с другими структурами и функциональными элементами. Более того, приборные применения требуют комбинации нескольких элементарных структур. Но, несмотря на появление в сложных комбинированных структурах новых квантово-механических эффектов, определяющую роль в них продолжает играть квантовое ограничение.

Для изготовления низкоразмерных структур используют два принципиальных подхода, которые можно охарактеризовать как «геометрический» и «электронный». Геометрический под-

ход предполагает использование технологий, обеспечивающих формирование объектов с нанометровыми размерами. Для этого используются специальные нанотехнологические приемы, которые будут рассмотрены далее. Электронный подход основан на возможности управления размерами областей с определенным типом и концентрацией носителей заряда в полупроводниках посредством электрического поля. При этом используются как традиционные структуры металл/диэлектрик/полупроводник и металл/полупроводник, так и полупроводниковые гетероструктуры.

4.1.3. Баллистический транспорт носителей заряда

При транспорте носителей заряда в твердых телах происходит их рассеяния из одной области кристалла в другую. Рассеяние может происходить упруго и не упруго. Источником упругого рассеяния являются статические дефекты – примесные атомы, дислокации, границы кристаллических зерен.

Источником неупругого рассеяния являются колебания кристаллической решетки.

Среднее расстояние, которое электрон проходит между двумя последовательными актами рассеяния, называют средней длиной свободного пробега.

В макроскопических системах средняя длина свободного пробега электронов всегда намного меньше размера этих систем. В наноструктурах условия для транспорта носителей заряда существенно отличаются от таковых в макросистемах. В структурах с размером d меньше длины свободного пробега L_p : $d < L_p = \tau_p V_t$, τ_p – время релаксации по импульсу, V_t – дрейфовая скорость электронов, перенос носителей заряда происходит без их рассеяния. Такой перенос называют баллистическим транспортом.

4.1.4. Туннелирование носителей заряда

Термин *туннелирование* означает перенос частицы через область, ограниченную потенциальным барьером, высота которого больше полной энергии данной частицы ($E < U_0$) (или проникновение в эту область) (рис. 4.4).

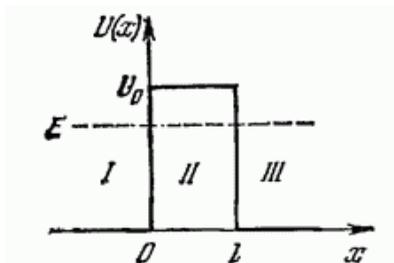


Рис. 4.4. Прохождение частицы с энергией E через потенциальный барьер U_0

По классическим представлениям, если энергия частицы больше высоты барьера ($E > U_0$), частица проходит над барьером. Если $E < U_0$, то частица отражается от барьера.

В квантовой механике поведение частиц, которым, как известно, присущ квантово-волновой дуализм, выглядит иначе.

Рассмотрим случай $E < U_0$, уравнение Шредингера будет иметь вид для областей I и III

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0, \quad (4.11)$$

для области II

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0)\psi = 0. \quad (4.12)$$

Если энергия квантовой частицы больше высоты ступенчатого барьера ($E > U_0$), то в области перед потенциальным барьером, где $U(x) = 0$, решение уравнения Шредингера для частицы с импульсом $k_1 = \frac{1}{\hbar}\sqrt{2mE}$ имеет вид

суперпозиции двух волн:

$$\psi = A' \exp(ik_1x) + B \exp(-ik_1x), \quad (4.13)$$

где A', B – константы;

i – мнимая единица.

Волновую функцию обычно нормируют таким образом, что $A' = 1$.

Первый член в (4.13) соответствует падающей на барьер волне, движущейся вдоль оси x слева направо. Вторым членом описывается отраженная волна, движущаяся вдоль оси x в противоположном направлении.

При $x \rightarrow \infty$ волновая функция прошедшей над потенциальным барьером частицы имеет асимптотический вид:

$$\psi = A \exp(ik_2x), \quad (4.14)$$

где $k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - U_0)}$.

Плотность потока в падающей волне пропорциональна k_1 , в отраженной – $k_1|B|^2$, а в прошедшей – $k_2|A|^2$. Коэффициент прохождения частицы через границу потенциального барьера, определяемый как отношение плотности потока в прошедшей волне к плотности потока в падающей волне, равен:

$$T(E) = \frac{k_2}{k_1} |A|^2. \quad (4.15)$$

Коэффициент отражения частицы от потенциального барьера, определяемый отношением плотности отраженного потока к плотности падающего потока, равен:

$$R(E) = |B|^2 = 1 - \frac{k_2}{k_1} |A|^2. \quad (4.16)$$

Коэффициент прохождения частицы, который определяет вероятность прохождения частицы через барьер, отличен от нуля.

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

4.2. Приборы нанoeлектроники

Успехи микроэлектроники сегодняшнего дня поражают специалистов смелостью новых технических решений, надежным воплощением в кремний и металл идей с помощью филигранной планарной технологии. Но специалисты уже видят физические и технологические барьеры, к которым неизбежно подойдет микроэлектроника, и поэтому ищут пути в наномир. Великий Ричард Фейнман еще в 1960 г. сказал: «Внизу полным полно свободного места: приглашение в новый мир физи-

ки». Он имел в виду мир нанометрового масштаба, в котором стыкуются объекты неживой и живой природы.

Наноэлектронику на сегодняшнем этапе развития можно определить как направление электроники, в котором изучаются законы взаимодействия электронов, других заряженных частиц и квазичастиц с электромагнитными полями в различных средах, а также использование этого взаимодействия для создания электронных приборов методами нанотехнологии.

Нанотехнология – это сумма технологий и сумма методов обработки материалов, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами, биологическими объектами с целью получения новых материалов, приборов и устройств, а также формирование приборных структур с характеристическими размерами порядка 10 – 100 нм. Нанотехнология является междисциплинарной наукой.

Технология наноэлектроники началась со сборки отдельных атомов в определенные формы. Так появились квантовые точки и квантовые проволоки из квантовых точек. Квантовые проволоки были сгруппированы в квантовые транзисторы, а те, в свою очередь, - в нейроноподобные интегральные схемы. Однако это далеко не единственный технологический путь в наноэлектронике.

Наноэлектронные приборы – это приборы уже другого поколения, другого мира, где закон Ома не действует, где гальванические связи заменяются полевыми, где электрон «работает» не частицей, а волной и переносит не заряд, а волновую функцию...

Сегодня очертить границы использования известных технологических процессов в нанотехнологиях очень трудно. О границах завтрашнего дня говорить еще сложнее. На этом этапе будем отталкиваться от технологии и материалов микроэлектроники и придерживаться стратегии «сверху - вниз» (top - down). Это означает, что уменьшение размеров элементов интегральных схем приводит к повышению функциональной сложности, быстродействия и снижению стоимости интегральных схем. При этом физические принципы функциони-

рования интегральных схем не претерпевают существенной коррекции.

Переход к наноразмерам элементов интегральных схем качественно меняет принципы функционирования транзисторных и других элементов схемы. Вступают в силу законы квантового мира. Сложные нанoeлектронные системы можно создавать в соответствии со стратегией «снизу – вверх» (bottom-up). Такая стратегия требует совершенно новых подходов. В этом случае используются атомно-молекулярные блоки, которые формируют нанoeлектронные системы с помощью процессов самосборки, самоорганизации сложных структур.

Сегодня нет завершенных технологических процессов для создания нанoeлектронных систем в соответствии со стратегией «снизу - вверх» в рамках групповой технологии. Но они обязательно появятся в ближайшем будущем. Такие технологии могут стать альтернативными групповым технологиям в микроэлектронике, но эти технологии и соответствующие материалы интенсивно разрабатываются во многих ведущих электронных корпорациях мира.

В живой природе, состоящей, как и неживая материя, из атомов, молекулы протеина и липидов имеют размеры до 10 нм. Диаметр спиральной молекулы ДНК составляет примерно 20 нм, в то время как длина может достигать десяти микрометров. Масштаб рибосом и вирусов лежит в пределах 100 нм. Интересно отметить, что один из продуктов нанотехнологии - нанотрубки, а также элементы сверхбольших интегрированных схем тоже имеют размеры порядка 100 нм. Именно это обстоятельство вселяет надежды на успешное совмещение технологий живых и неживых систем, создание микроминиатюрных комбинированных устройств, лекарств.

Приведем несколько примеров современного уровня достижений микроэлектроники, ставшей основой развития нанoeлектроники. Сотрудники фирмы INTEL оценивают число транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок, в 10^{19} – 10^{20} единиц. Плотность упаковки на чипе транзисторных структур такова, что на булавочной головке можно разместить 200 млн.

транзисторов (порядка 10^8 шт.). Причем расстояние между двумя соседними транзисторами составляет 1/1000 толщины человеческого волоса. Заметим, что толщина человеческого волоса порядка 100 мкм, а характерный топологический размер элемента в современной микроэлектронной технологии составляет 0,1 мкм.

Скорость переключения транзистора составляет около 10^{12} раз/с. Это означает, что, если человек будет включать и выключать обычный выключатель столько раз, сколько это делает транзистор за одну секунду, то ему понадобится 25000 лет. Себестоимость производства транзистора составляет примерно столько, сколько требуется, чтобы напечатать любой типографский знак, например, запятую. Это обусловлено тем, что в технологическом процессе одновременно на одной пластине обрабатывается до 5000 чипов, каждый из которых может содержать миллионы транзисторов. Легко подсчитать, что одновременно изготавливается порядка сотни миллиардов транзисторов.

Вот с такого уровня стартует транзисторостроение в области наноэлектроники. Здравый смысл подсказывает, что на пути дальнейшего уменьшения размеров транзисторов с помощью существующей планарной технологии возникают физический и технологический барьеры.

Физические законы, лежащие в основе работы транзисторов, устанавливают свои фундаментальные пределы на размеры элементов, концентрацию носителей в кремнии. Технология тоже требует новых подходов, разработки принципиально новых технологических процессов. При переходе в нанометровый диапазон остро встает проблема межсоединений. Линии межсоединений субмикронных размеров не справляются с переносом носителей. Более того, возникают проблемы с квантовыми размерными эффектами.

С уменьшением геометрических параметров линий межсоединений возрастают сопротивление, плотность тока. Это приводит к электромиграции, джоулеву разогреву линий межсоединений. Особо опасным является процесс электромигра-

ции. С этим процессом связано перемещение атомов в граничных областях междоусоединений, обусловленных градиентом электрохимического потенциала и перепадом температур. Поток атомов через проводник на границах зерен, - дислокациях испытывает завихрение. Изменяется геометрия проводника. В узких местах токоведущих дорожек, которые имеют место из-за неидеальности технологических процессов, происходит уменьшение площади их поперечного сечения, в более широких - увеличение. Соответственно в узких местах плотность тока еще более возрастает. Где тонко, там и рвется сплошность междоусоединений. При плотности тока 10^5 А/см² и температуре 210 °С токоведущие дорожки могут выйти из строя. С увеличением частоты сигналов линии междоусоединений становятся волноводными линиями, которые можно охарактеризовать активными потерями. Оценки показывают, что начиная с частот $f = 10^{11}$ Гц задержка сигнала τ_c , обусловленная распространением сигнала между элементами схемы становится сравнимой со временем переключения транзисторов (τ_c имеет величину порядка 10^{-11} с).

Все эти проблемы являются составляющими одной глобальной проблемы, называемой «тиранией междоусоединений». С переходом на транзисторные структуры с квантовыми эффектами обычные металлические токоведущие дорожки теряют свое предназначение.

Наряду с транзисторным, схемотехническим направлением развития приборов и устройств наноэлектроники развиваются приборы спинтроники, политроники, квантовые компьютеры.

4.2.1. Нанотранзисторы

Транзисторы – они и в наномире – транзисторы, однако это уже не те транзисторы, которые стали нам привычны в мире микроэлектроники. Все это воскрешает в памяти слова Козьмы Прутков: «Где начало того конца, которым оканчивается начало». Начало невиданного прогресса в информатике

было положено изобретением транзистора, микропроцессора, компьютера. А окончание начала, по-видимому, связано с переходом в мир нанoeлектронных устройств обработки и хранения информации. Некоторые типы нанотранзисторов будут продолжением того же модельного ряда, который известен по разработкам в области микроэлектроники.

Но уже разработаны и будут разрабатываться совершенно новые типы транзисторных структур. Приведем некоторые разработки нанотранзисторных структур.

Гетеротранзистор представляет собой транзистор, содержащий один или несколько гетеропереходов. Зонные диаграммы гетеропереходов имеют разрывы зон, которые можно использовать для ограничения движения носителей заряда в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода. В гетеропереходах носители заряда ведут себя в зависимости от направления движения. Гетеропереходы формируются, как правило, с помощью тонких слоев, поэтому в направлении, перпендикулярном слою, энергетический спектр носителей заряда имеет дискретный характер и имеет место размерное квантование. В двух других направлениях плоскости слоя спектр носит непрерывный характер, и сохраняется зонная структура.

Технология полупроводниковых гетероструктур позволяет создавать системы с пониженной размерностью. Если движение носителей заряда ограничено в одном направлении, то формируется квантовая яма. В ней формируется двумерный электронный газ. Если ограничение движения носителей происходит в двух направлениях, то формируется квантовая нить. Нульмерная квантовая точка формируется в случае ограничения движения носителей по трем направлениям. На рис. 4.5 приведена конструкция гетеротранзистора. Структуры гетеротранзисторов выращиваются методом молекулярно-лучевой эпитаксии по технологии самосовмещения. В 2D-слое имеются подвижные электроны с типичным значением подвижности $6500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 300К и $120000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 77 К.

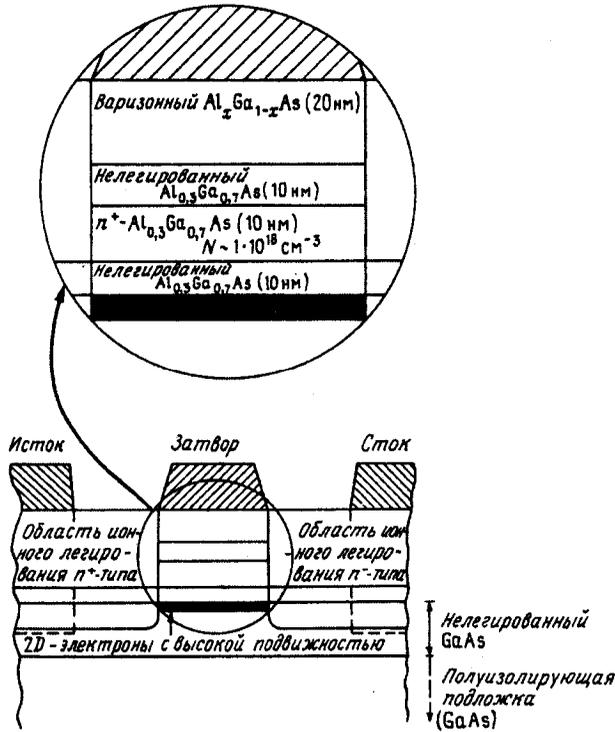


Рис. 4.5. Схема полевого гетеротранзистора на основе AlGaAs-GaAs

Соответствующие значения поверхностной плотности электронов составило $5,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $7,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Понижение размерности повышает роль межэлектронных взаимодействий. В двумерном электронном газе, в частности, наблюдаются целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла.

Транзисторы на квантовых точках представляют по существу новый тип приборов на горячих электронах, весьма перспективный для СВЧ-электроники. На рис. 5.6 представлена структура модулировано-легированного транзистора с

квантовыми точками. Под полупроводниковыми квантовыми точками будем понимать нульмерные квантовые «ящики», состоящие из $10^3 - 10^5$ атомов. Квантовые точки могут формироваться как на основе традиционных полупроводниковых материалов, так и на основе новых материалов, например графена.

Квантовые точки возникают в слое, если его толщина превышает некоторое критическое значение. На рис. 4.6 приведена одна из транзисторных структур на основе квантовых точек.

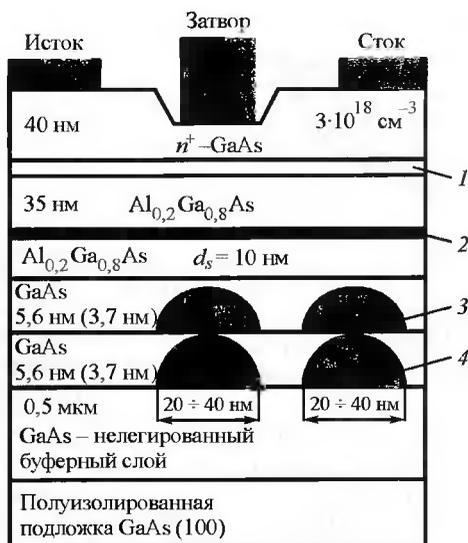


Рис. 4.6. Структура модулированно-легированного транзистора с квантовыми точками

На полуизолирующую подложку GaAs (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии наносится нелегированный буферный слой GaAs (1) толщиной примерно 0,5 мкм. Затем наносятся два тонких слоя InAs (3, 4), которые разделяются нелегированным «спейсер»- слоем GaAs. Толщина слоев InAs составляет от 0,7 до 1,0 нм, а слоя GaAs – от 3,5 до 5,6 нм. При этом формировалось два слоя квантовых точек. Размер квантовых точек и их плотность варьировались в различных структу-

рах. Затем выращивался второй «спейсер»-слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ толщиной 10 нм. Далее выращивались слои: $\delta(\text{Si})$ (2) – легированный и нелегированный слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ толщиной 35 нм.

Формирование такой гетероструктуры завершалось выращиванием нелегированного слоя GaAs толщиной 6 нм и легированного кремнием ($n = 3 \cdot 10^{18} \text{см}^{-2}$) контактного слоя GaAs толщиной 40 нм. После нанесения электродов транзистор был готов к исследованиям. Длина затворов составляла 0,3 – 0,4 мкм. Выяснилось, что подвижность и концентрация электронов в двумерном газе уменьшаются из-за наличия квантовых точек. Это означает, что квантовыми точками захватывается меньшее число электронов.

Транспорт электронов в гетероструктурах с квантовыми точками имеет две компоненты. Одна компонента формируется подвижными электронами из двумерного газа и соответствует насыщению их дрейфовой скорости, другая обусловлена электронами, локализованными в квантовых ямах. Вторая компонента дает вклад в электронный транспорт только в сильных электрических полях.

В транзисторах на квантовых точках концентрация участвующих в транспорте электронов в сильных полях не зависит от напряжения на затворе. Пороговое же напряжение, необходимое для эмиссии электронов из квантовых точек, уменьшается, когда напряжение на затворе становится отрицательным.

Такой тип транзисторов принципиально отличается от всех известных полевых транзисторов. Эти приборы имеют высокую крутизну g_{max} порядка 500 мСм/мм, что позволяет разработчикам надеяться на использование их в СВЧ-приборах.

Квантовую точку удалось сформировать на графеновой пленке, представляющей собой слой атомов углерода толщиной в один атом, соединенных в гексогональную двумерную кристаллическую решетку. Графен обладает высокой подвижностью носителей тока при комнатной температуре. Если создать графеновый островок порядка 100 нм, то проявляется

сильный квантовый размерный эффект. Электроны, попавшие внутрь квантовой точки, могут выбраться только с помощью сильного внешнего электрического поля. Электроны из электродов попасть в квантовую точку не могут. Этот физический эффект наблюдается и при комнатной температуре. Такой прибор ведет себя как одноэлектронный транзистор.

Графеновый транзистор можно рассматривать как одно из решений сегодняшней фундаментальной проблемы микро- и нанoeлектроники – преодоление 30-нм барьера на пути дальнейшей миниатюризации электронных устройств.

Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок используют свойства углеродные нанотрубок, обладающих хорошими эмиссионными способностями. Углеродные нанотрубки по диаметру меньше толщины человеческого волоса в раз. Нанотрубки представляют собой циклические структуры, обод которых составляет порядка десятков атомов углерода.

Транзисторы на нанотрубках выгодно отличаются от всех рассмотренных выше типов меньшими размерами и меньшим энергопотреблением. На рис. 4.7 представлена конструкция нанотранзистора на основе углеродной нанотрубки.

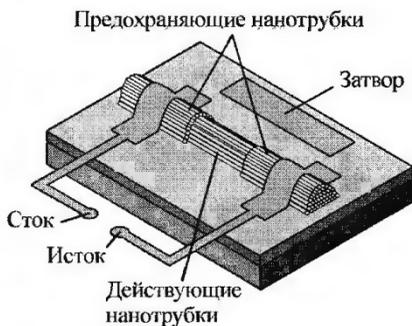


Рис. 4.7. Схема полевого нанотранзистора на углеродной нанотрубке

Транзисторы выполняются на кремневой подложке, покрытой слоем оксида. Исток и сток выполнены в виде тонких

проводников. В исходном состоянии концентрация свободных носителей заряда (электронов и дырок) мала. Нанотрубка по физическим свойствам близка к диэлектрику. При помещении нанотрубки в электрическое поле ширина запрещенной зоны уменьшается, и концентрация свободных носителей заряда увеличивается. Это происходит благодаря действию механизма «баллистического электронного транспорта» нанотрубки. В этом состоянии они характеризуются электропроводностью, например, в 1000 раз большей, чем у меди. Электрическое поле, управляющее проводимостью нанотрубки создается затвором.

Первый такой транзистор был создан в начале века. В настоящее время создано большое число конструкций нанотранзисторов, использующие свойства нанотрубок. Например, Y-образная нанотрубка способна выполнять функции транзистора, в котором «ствол» служит затвором, а ветви нанотрубки соответственно истоком и стоком.

Ожидается, что на основе длинных нанотрубок возможно создание нескольких транзисторов, коммутация которых позволит реализовать целую интегральную схему. Другими словами, на основе интегрированных наноэлектронных чипов возникнет совершенно новая элементная база, которая будет отличаться высокой компактностью, низким энергопотреблением и невиданным ранее быстродействием.

Другое перспективное применение нанотрубок – создание энергонезависимой оперативной памяти NRAM (Nonvolatile Random Access Memory). Не вдаваясь в существо еще не совершенной конструкции, отметим высокую плотность записи информации теоретически достигающая значения 5 млрд бит/см^2 .

На основе пучка из нескольких тысяч нанотрубок удалось создать транзистор на ток в один ампер, что в сотни раз превышает возможности полупроводниковых транзисторов.

Одноэлектронные транзисторные структуры являются перспективными прежде всего с позиций методов обработки

информации. Ведь в предельном случае можно говорить, что один электрон – один бит информации.

Кремниевые одноэлектронные приборы появились в результате конструктивного и технологического прорыва при создании МОП-транзисторных структур. На рис. 4.8 представлен кремниевый одноэлектронный транзистор, сформированный на базе инверсионного слоя МОП-транзистора. Затвор состоит из двух частей верхнего и нижнего, которые электрически развязаны. При подаче на нижний затвор положительного напряжения в подложке p -типа формируется инверсионный n -канал. При подаче на верхний П-образный затвор отрицательного напряжения канал разрывается областями обеднения. Возникают потенциальные барьеры и формируется квантовая точка.

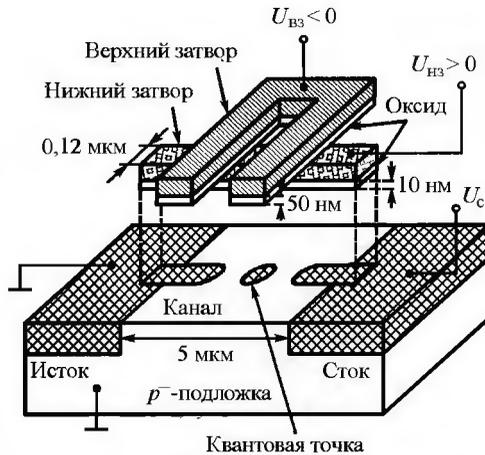


Рис. 4.8. Конструкция кремниевого одноэлектронного транзистора с двумя затворами и одиночной квантовой точкой

Существуют и другие конструкции такого типа транзисторов.

В одноэлектронных транзисторах на основе гетероструктур формируются квантовые точки в области двумерного

электронного газа (ДЭГ). Двумерный электронный газ можно создать в гетероструктуре типа GaAs-AlGaAs. В таких структурах осуществляется ограничение ДЭГ и формирование островков различными методами. По способу такого ограничения можно выделить ряд разновидностей структур.

На рис. 4.9 показан прибор, который представляет собой двойной туннельный переход на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs. В этом приборе ограничение ДЭГ и формирование квантовых точек осуществляется посредством прикладывания напряжения к металлическим расщепленным затворам Шоттки, расположенным на поверхности структуры. Формируется ДЭГ на границе раздела слоев GaAs и AlGaAs, его плотность контролируется напряжением, приложенным к проводящей подложке. При подаче отрицательных напряжений на расщепленные затворы происходит обеднение ДЭГ под ними. В результате в ДЭГ формируется канал с малыми сегментами (островками) между обедненными участками (барьерами). Рабочая температура прибора около 0,5 К

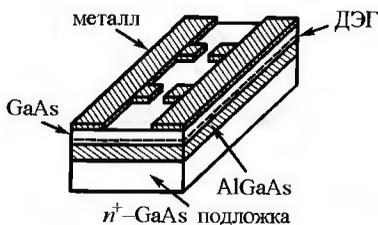


Рис. 4.9. Структура на основе GaAs/AlGaAs с расщепленным затвором Шоттки

Формирование квантовых точек в гетероструктурах GaAs/AlGaAs, а также области затворов, истока, стока и канала можно осуществлять путем электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления канавок в исходной пластине. В результате таких технологических процессов происходит ограничение ДЭГ в этих областях.

В структуре с расщепленным затвором электрическое поле приложено перпендикулярно ДЭГ. При приложении горизонтального электрического поля, вызванное напряжение на планарном затворе Шоттки действует на электроны в направлении, параллельном ДЭГ, вызывая его дополнительное ограничение.

4.2.2. Политроника

Политроника (от *politronics* – *polimer+electronics*) представляет собой новое направление в нанoeлектронике, основанное на использовании электропроводящих полимеров при создании электронных приборов и устройств.

К настоящему времени создано множество полимерных материалов с весьма широким диапазоном электрических и других характеристик. Было предложено считать в полимерных системах аналогом уровней в зонной теории полупроводников энергетические состояния носителей на самом высоком и самом низком уровнях молекулярных орбиталей.

В полупроводниках при их легировании происходит изменение потенциала ионизации и электронного средства и соответствующее смещение уровня Ферми. В полимерных материалах уровни молекулярных орбиталей можно задавать путем соответствующего изменения первичной структуры полимера. Это позволяет изменить ширину запрещенной зоны полимера, если пользоваться терминологией полупроводниковой электроники. Таким образом, появилась возможность получения полимерных квазикристаллических материалов с высокой анизотропией электрических характеристик. Подвижность носителей в них составляла $5000 - 6000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Важно отметить, что в качестве носителей зарядов в полимерах выступают отнюдь не электроны и дырки, как в полупроводниках. Заряженными частицами в полимерах служат солитоны и поляроны, способные свободно перемещаться по полимеру. Прежде всего, они имеют несколько меньшую подвижность, а также у них отсутствует спин.

Органические транзисторы. В системе приборов и устройств политроники важное место занимают тонкопленочные транзисторы. С их помощью в рамках технологии органических материалов удастся создать целостные системы политроники.

На рис. 4.10 приведена конструкция тонкопленочного транзистора, реализованного на органическом полимере пентаcene по топологии Corbino.

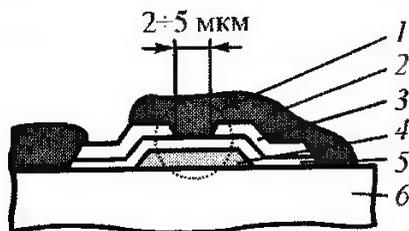


Рис. 4.10. Структура тонкопленочного транзистора

Отличительной особенностью этой топологии является возможность формирования электрода истока в виде замкнутого кольца вокруг активной области транзистора. В центре кольца располагается электрод стока. Такая конструкция позволяет эффективно управлять током от истока к стоку.

Тонкопленочный транзистор реализован на подложке из терефталата полиэтилена (6). Активная область транзистора (1) формируется на основе полупроводникового полимера пентаcene (2) толщиной 25 мкм. Исток (3) и сток (3) формируются на основе пленки палладия толщиной 0,2 – 0,4 мкм. Затвор (4) выполнен из никеля толщиной 0,1 – 0,3 мкм, ширина затвора может составлять от 5 до 500 мкм.

Подзатворный диэлектрик SiO_2 (5) имел толщину 140 нм, что позволяло работать при пороговом напряжении 10 В. Транзистор позволяет обеспечить отношение токов во включенном и выключенном состояниях порядка 10^8 , а также малые токи утечки.

Органические светоизлучающие диоды (СИД или ОСИД) были первыми в ряду электронных приборов на основе полимеров. Принцип их работы состоит в генерации излучения молекулами полимера под воздействием электрического поля за счет рекомбинации. Конструктивно СИД выполняется в соответствии с рис. 4.11 и представляет собой слоистую структуру. Максимально прозрачными делаются прозрачный электрод, слой переноса дырок, электролюминисцентный слой и волновод. Слои переноса электронов, отрицательный электрод выполняются так, чтобы было обеспечено максимальное зеркальное и интерференционное отражение излучения. Отрицательный электрод изготавливается из бинарных сплавов с высокой степенью инжекции электронов, например, из оксидов олова и индия.

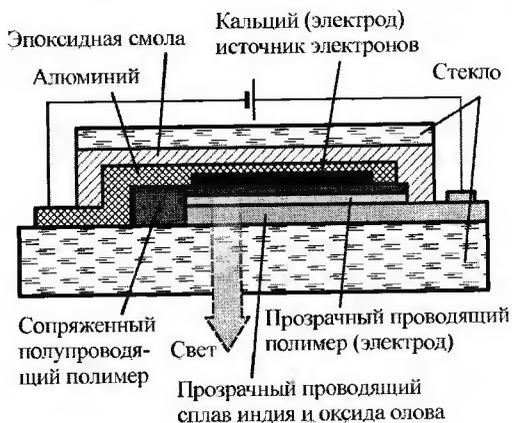


Рис. 4.11. Конструкция полимерного светодиода

Излучение формируется в электролюминисцентном слое, которым может служить низкомолекулярный органический люминофор, например, оксихиноляты алюминия. Эти вещества стабильны на воздухе, обладают интенсивной электролюминисценцией и легко синтезируются. В качестве органических электролюминофоров используются полимерные веществ-

ва, например производные полифениленвинилена (ПФВ). Их использование значительно расширяет цветовую гамму излучения СИД. Для усиления эффекта отражения в слое пластика иногда формируются оптические элементы на основе линз Френеля. Такие светоизлучающие диоды могут излучать во всем видимом диапазоне с эффективностью преобразования до 20 %. Среди эффективных материалов следует отметить полимер на основе тиофена, который хорошо инжектирует дырки. Положительный электрод предпочтительней изготавливать из сплава Mg-In. Такого типа светоизлучающие диоды получили название TOLED (Transparent Organic Light Emitting Diode - прозрачный органический светоизлучающий диод). Светоизлучающие диоды на основе органических соединений широко используются в сотовых телефонах, часах.

В настоящее время разрабатываются перестраиваемые цветные СИД с вертикальной структурой. Светоизлучающие диоды имеют световую эффективность более 60 лм/Вт, яркость светового излучения достигает $50\,000\text{ кд/м}^2$ при ресурсе 10 тыс. ч.

Разработаны RGB-триады, представляющие собой набор светоизлучающих диодов красного, желтого и синего цветов. С их помощью удалось создать полноцветные экраны отображения информации, обладающие высокой контрастностью и хорошей читаемостью при прямом солнечном свете. Технология их изготовления довольно проста, а стоимость изготовления достаточно низкая. При этом срок их службы достигает 20 тыс. ч.

Нанопроводники позволяют осуществлять гальваническую связь между отдельными приборами и устройствами политронных систем. Это проводники наноскопического размера.

Если трансполиацетилен обработать парами йода, то обеспечивается его металлическая проводимость (порядка 10^3 Ом/м). В этом случае говорят о допировании проводника или придании ему свойств проводника. Комбинируя проводящие (допированные) и непроводящие (полупроводники или

изоляторы – недопированные) участки полимеров, можно формировать электрические контуры с заданными свойствами.

Существуют и другие, более сложные способы создания нанопроводов. Удалось создать ДНК-нанопроволоку.

С этой целью молекулу ДНК помещают в раствор, содержащий магнитные наночастицы. Наночастицы представляют собой керамический оксид железа с характерным размером около 4 нм. Молекула ДНК имеет большой отрицательный потенциал, поэтому наночастицы в процессе самосборки присоединяются к поверхности ДНК и металлизуют ее (рис. 4.12). Длина проволоки составляла десятки микрометров при ширине 2 нм. Разработана также технология резки проволоки на участки нужной длины. Возможна металлизация молекулы ДНК медью, золотом либо платиной

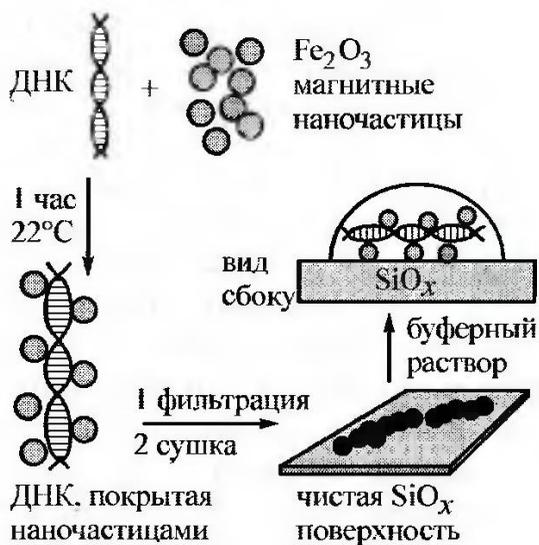


Рис. 4.12. Процесс металлизации молекулы ДНК и создание магнитной нанопроволоки

4.2.3. Нанoeлектроника без транзисторов

Весьма перспективной представляется кроссбар-архитектура, в которой нет транзисторных структур. Было показано, что молекулярные переключатели нанометрового масштаба могут выполнять логические операции. Такие наноразмерные устройства называются триггерами перекрестного исполнения (crossbar latches). Логический элемент представляет собой три тонких проводника в масштабе молекул: два из них параллельны, а третий пересекает их под прямым углом. Толщина проводников не превышает ста атомов. Наборы проводников разделены слоем материала, сопротивлением которого можно управлять с помощью электрических сигналов. Первые два называются управляющими проводниками, третий - затвором. Затвор располагается ниже управляющих проводников (рис. 4.13). В месте пересечения с верхними проводниками спускаются молекулярные цепочки, имеющие функцию кнопок.

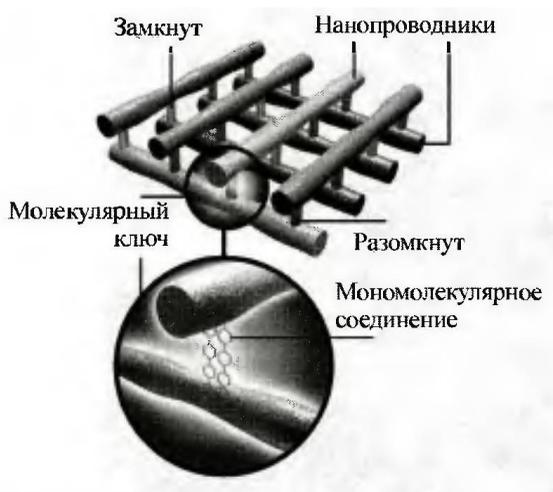


Рис. 4.13. Фрагмент кроссбар-архитектуры

В точках пересечения проводников формируются электронные ключи, имеющие замкнутое или разомкнутое состоя-

ние. При подаче на определенную пару нанопроводников достаточно большого напряжения возникает состояние с малым сопротивлением и формируется молекулярный ключ. Такое разомкнутое состояние сохраняется, пока на эту пару не будет подано напряжение противоположной полярности.

Таким образом, электрические импульсы закрывают или открывают «выключатели» между верхними и нижними проводами. Это переключение всегда в противофазе. Другими словами эти два устойчивых состояния реализуют «0» или «1».

Кроссбар-наноструктура может стать основой для реализации оперативной памяти большой емкости. На ее основе можно будет реализовать и программируемые логические схемы.

Кроссбар-структуры имеют микроэлектронные схемы управления на основе почти стандартных демультимплексоров и специально разработанных программных алгоритмов. Архитектура кроссбара позволяет выявлять и обходить дефектные элементы на основе использования теории кодирования. Исходная избыточность кроссбаров позволяет надеяться на их стойкость к воздействию факторов, приводящих к катастрофическим отказам. Отметим технологичность создания такой архитектуры. Эти структуры могут быть выполнены с использованием процессов струйной печати, которая намного дешевле фотолитографии, а ведь есть еще и другие процессы.

Нанозлектронные запоминающие устройства, в основе которых лежат различные физические принципы, так или иначе не связанные с транзисторами. Схемотехническое направление в нанозлектронике исповедует идеи создания схем одноэлектронной памяти. В этом случае на хранение одного бита информации потребуется два - три электрона. Заметим, что при хранении информации в современных микроэлектронных транзисторных ДОЗУ на один бит информации требуется 10^5 электронов. Эффект хранения информации в ячейке памяти обеспечивается несколькими туннельными переходами, которые определенным образом коммутированы с конденсатором хранения информации. Уже созданы экспериментальные ячей-

ки одноэлектронной памяти, работающие при температуре 4,2 К.

Исследователи, связанные с молекулярной электроникой, создают молекулярные ЗУ. В качестве активных элементов в таких ЗУ используются молекулярные ключи, которые располагаются в перекрестиях двойной ортогональной сетки перекрещивающихся печатных проводников. При приложении напряжения к точкам пересечения печатных проводников сопротивление печатного материала изменяется в несколько раз. Органические молекулы могут работать в качестве диодов, конденсаторов. Особый интерес представляют молекулы ротаксана и катенана.

Ротаксаны представляют собой соединения, молекулы которых состоят из цикла и открытой цепи, продетой сквозь цикл. Разъединить такую композицию без разрыва химических связей нельзя.

Катенаны представляют собой соединения, молекулы которых состоят из нескольких циклов, продетых один сквозь другой. Связь между циклами носит топологический характер, и не может быть нарушена без разрыва химической связи. Катенановые структуры найдены среди нуклеиновых кислот. Молекулы этих веществ характеризуются изменением своего энергетического потенциала при захвате молекулой одного электрона (рис. 4.14). Если такая молекула находится в составе наносистемы, то она может изменить положения в пространстве.

При этом ротоксаны в наносистемах движутся линейно, а катенаны вращаются вокруг оси стержня, на который они наизаны.

В наноэлектронных устройствах памяти важно не только предельно миниатюризировать бит информации, но и сделать его энергонезависимым. Одним из перспективных устройств этого класса является ЗУ типа Millipede (многоножка). Это устройство реализовано на безтранзисторной основе. Идея формирования информационного бита позаимствована из старого патефона. Именно в патефонах считывающая игла сколь-

зила по спиральной борозде и считывала записанную информацию, соответствующую глубине рельефа бороздки. В цифровых системах обработки информации создаются ямки, соответствующие записи 1, а их отсутствие соответствует записи 0.

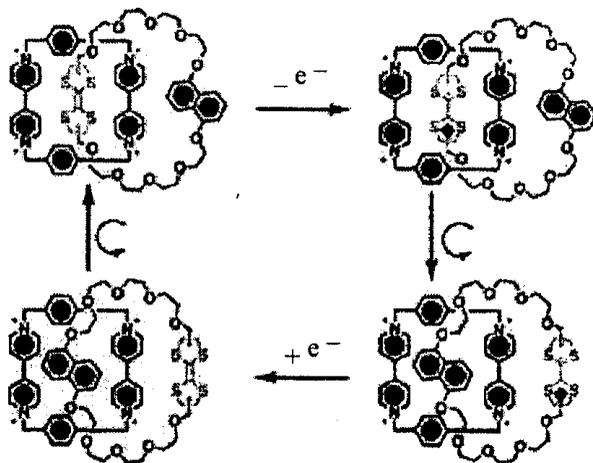


Рис. 4.14. Активация молекул ротаксана и катенана

Запись в полимерный носитель осуществляется щупом высокодопированного кремниевого кантилевера путем локального разогрева. Нагретые иглы выдавливают в полимерном носителе углубление конической формы - пит, имеющий глубину не более 25 нм и ширину порядка 40 нм. Таким образом записана логическая единица, отсутствие углубления в нужном месте - записан логический ноль. Стирание информации происходит путем «залечивания» питов с помощью горячей иглы кантилевера.

Считывание записанных битов осуществляется той же иглой кантилевера, нагретой до 300 °С. Попадая в углубление, игла отдает тепло поверхности пластика и охлаждается. При этом электрическое сопротивление уменьшается на доли процента. Сигнальный процессор эти слабые изменения преобра-

зует в выходной сигнал, состоящий из логических единиц и нулей (рис. 4.15).

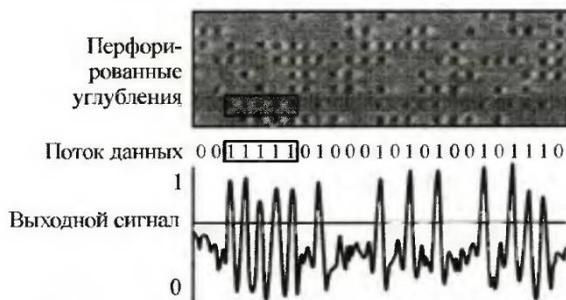


Рис. 4.15. Процесс считывания информации

Информация записывается на тонкой органической пленке полиметилметакрилата. Матрица записи/чтения содержит 4096 кантилеверов общим размером 6,3 x 6,3 мм.

Конструкция «многоножки» представлена на рис. 4.16.



Рис. 4.16. Схема устройства ЗУ типа «многоножка»

В процессе записи/чтения привод кремниевый «стола», на котором размещена пленка с данными, позиционирует ее в

плоскости по заданным координатам x, y . Приводы мультиплекторов позволяют управлять каждым кантилевером, обеспечивая адресацию памяти. Важно отметить, что матрица кантилеверов обеспечивает параллельность процессов записи и считывания информации.

На площади в квадратный дюйм можно записать 1,2 терабит информации. Другими словами, в чип размером в почтовую марку можно записать 25 DVD дисков.

Это уже не микроэлектронное, а наноэлектронное запоминающее устройство. Ожидается появление таких ЗУ емкостью до 100 Гб, которое вполне может заменить чипы Flash-памяти в мобильных телефонах. По скорости обработки информации такое ЗУ не уступает электронному.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1965 г. и по настоящее время полупроводниковая электроника бурно развивается. Ее базовым материалом является кремний. Он прекрасно обрабатывается, обеспечивает получение субмикронных схемных элементов, является химически стабильным, как и формируемые на нем приборные структуры.

Кремниевая технология является основной в современной полупроводниковой технологии. Она уже используется в нанoeлектронике: минимальный топологический размер Δ , достигнутый в 2010 г. – 32 нм, в 2012 г. – 22 нм, в 2014 г. – 14 нм, а в 2018г. прогнозируют получить $\Delta = 10$ нм.

Таким образом, кремниевая технология перспективна до $\Delta = 10$ нм.

Переход к диапазону 1 – 10 нм требует применения новых принципов, методов и материалов для создания нанoeлектронных устройств.

В журнале «В мире науки» приведено такое сравнение. Если темпы развития микроэлектроники (стоимость, быстродействие, экономичность) перенести на авиапромышленность, то самолет стоил бы 500 долларов, совершить облет земного шара можно было за 20 мин, затрачивая на это менее 20 л топлива.

Одной из специфических особенностей микро- и нанoeлектроники является высокая наукоемкость, использующая новейшие достижения физики, химии, биологии и других наук. Проектирование, технология изготовления и функционирование микро- и нанoeлектронных систем основаны на фундаментальных законах природы, управляющих электронными и атомными процессами в материальных объектах.

Специалисту в области микро- и нанотехнологии глубокое изучение законов фундаментальных наук позволит легко осмысливать и осознанно использовать в профессиональной деятельности любые новации современной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аваев, Н. А. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. пособ. Для вузов / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
2. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника [Текст] / В.Е. Борисенко, А.И.Воробьева, Е.А.Уткина. – М.: Бином, 2009. – 187 с.
3. Булычев А.Л. Электронные приборы [Текст] / А.Л. Булычкв, В.А. Прохоренко. – Минск: Вышэйш. Шк., 1987. – 316 с.
4. Гуртов В.А. Твердотельная электроника [Текст]: учеб. пособие / В.А. Гуртов. – Петрозаводск: ПГУ, 2004. – 312 с.
5. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
6. Драгунов, В.П. Основы нанoeлектроники [Текст] / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – М.: Лотос, 2006. – 332 с.
7. Игнатов, А.Н. Микросхемотехника и нанoeлектроника [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Игнатов. – СПб.: Лань, 2011. – 528 с.
8. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию [Текст] / Н. Кобаяси. – М.: Бином, 2005. – 134 с.
9. Коваленко, А. А. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. пособие / А. А. Коваленко, М. Д. Петропавловский. – М.: Академия, 2006. – 240 с.
10. Лозовский В.Н. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность [Текст] / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. – СПб.: Лань, 2008. – 336 с.
11. Мансури Г.А. Принципы нанотехнологии [Текст] / Г.А. Мансури. – М.: Научный мир, 2008. – 320 с.
12. Нанотехнологии в электронике [Текст] / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 446 с.
13. Пасынков В.В. Материалы электронной техники [Текст] / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – СПб.: Лань, 2003 – 368 с.

14. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы [Текст]: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – СПб.: Лань, 2003. – 480 с.
15. Прянишников, В. А. Электроника: полный курс лекций [Текст]: учеб. для вузов / В. А. Прянишников. – СПб.: Корона-Принт, 2004. – 416 с.
16. Пул Ч. Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
17. Рамбиди Н.Г. Нанотехнологии и молекулярные компьютеры [Текст] / Н.Г. Рамбиди. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
18. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника [Текст] / Л. Росадо. – М.: Высш. шк., 1991. – 351 с.
19. Светцов В.И. Физическая электроника и электронные приборы [Текст]: учеб. пособие / В.И. Светцов, И.В. Холодков. – М.: ИГХГУ им. Менделеева, 2008. – 494 с.
20. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. – 488 с.
21. Сушков А.Д. Вакуумная электроника: физико-технические основы [Текст]: учеб. пособие / А.Д. Сушков. – СПб.: Лань, 2004. – 464 с.
22. Физика низкоразмерных систем [Текст] / А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин и др. – СПб.: Наука, 2001. – 160 с.
23. Щука А.А. Электроника [Текст]: учеб. пособие / А.А. Щука; под ред. А.С. Ситова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
24. Щука А.А. Нанoeлектроника [Текст] / А.А. Щука; под ред. Ю.В. Гуляева. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
25. Электронные приборы / под ред. Г.Г. Шишкина. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 496 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Основные понятия и определения микроэлектроники	5
1.1. Исторический обзор	5
1.2. Основные элементы ламповой радиотехники и микроэлектроники	11
1.2.1. Устройство и работа диодной радиолампы	13
1.2.2. Устройство и работа вакуумного триода	16
1.3. Основные сведения о полупроводниковых материалах	21
1.4. Контакт электронного и дырочного полупроводников (р-п переход)	28
1.4.1. Полупроводниковый диод с р-п переходом	28
1.4.2. Полупроводниковый транзистор n-р-п	30
2. Общая характеристика технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов	36
2.1. Основные этапы технологии ИМС	36
2.2. Выбор полупроводникового материала	36
2.3. Получение полупроводникового материала	37
2.4. Получение полупроводниковых пластин	40
2.5. Шлифовка, полировка и травление пластин	41
2.6. Получение эпитаксиальных структур	44
2.7. Методы формирования элементов ИМС	45
2.8. Общая характеристика технологического процесса производства ИМС	47
2.9. Типы структур ИМС	49
2.10. Требования к кремниевым пластинам	61
2.11. Схема технологического процесса	63
2.12. Микроклимат и производственная гигиена	65
3. Основные технологические операции планарной технологии	69

3.1. Термическое окисление. Свойства пленки двуокси кремния	69
3.2. Травление	71
3.3. Термическая диффузия примесей	76
3.4. Ионное легирование	81
3.5. Эпитаксия	85
3.6. Нанесение тонких пленок	88
3.7. Проводники соединений и контакты в полу- проводниковых ИМС	94
3.8. Литография	98
4. Основы нанoeлектроники	103
4.1. Структура и физические свойства точечных, линейных и двумерных нанообъектов	103
4.1.1. Фундаментальные явления	104
4.1.2. Квантовое ограничение	105
4.1.3. Баллистический транспорт носителей заряда	111
4.1.4. Туннелирование носителей заряда	112
4.2. Приборы нанoeлектроники	114
4.2.1. Нанотранзисторы	118
4.2.2. Политроника	127
4.2.3. Нанoeлектроника без транзисторов	132
Заключение	138
Библиографический список	139

Учебное издание

Рембеза Станислав Иванович
Рембеза Екатерина Станиславовна

ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ
И НАНОЭЛЕКТРОНИКУ

В авторской редакции

Компьютерная верстка О.А. Ивановой

Подписано к изданию 28.11.2017.
Объем данных 2,2 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14