

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Оренбургский государственный
университет»**

**Кафедра промышленной электроники и информационно-
измерительной техники**

А.Т. РАИМОВА, С.С. ЯКУПОВ

ЭЛЕКТРОНИКА И ОСНОВЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Рекомендовано Ученым советом Оренбургского государственного
университета в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по
программам высшего профессионального образования по специальности
«Электроника и основы микропроцессорной техники»**

Оренбург 2003

ББК 32.85 я7
Р-18
УДК 621.38+681.325.5(075.8)

Рецензенты

кандидат технических наук, доцент П.Н. Ганский
кандидат технических наук, доцент А.В. Хлуденев

Раимова А.Т., Якупов С.С.

**Р - 18 Электроника и основы микропроцессорной техники:
Учебное пособие.- Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 145 с.**

ISBN

Пособие предназначено для студентов очной и заочной формы обучения специальностей 180100, 180400, 100400, 220100, 220400, изучающих одноименный курс, а также курсы «Электроника», «Основы микропроцессорной техники», «Схемотехника».

Р 2402010000

ББК 32.85 я7

ISBN

© Раимова А.Т., Якупов С.С., 2003
© ГОУ ОГУ, 2003

Введение

Одной из характернейших особенностей развития науки и техники является развитие электроники. Без электронных устройств ныне не может существовать ни одна отрасль промышленности, транспорта, связи. Усиленное развитие и применение электроники влияет не только на экономическое развитие нашего общества, но и на социальные процессы, распределение рабочей силы, образование, электронные устройства все шире применяются в быту.

Что же такое электроника? Это отрасль науки и техники, занимающаяся изучением физических основ функционирования, исследованием, разработкой и применением приборов, работа которых основана на протекании электрического тока в твердом теле, вакууме и газе. Такими приборами являются полупроводниковые приборы (протекание тока в твердом теле), электронные приборы (протекание тока в вакууме) и ионные (протекание тока в газе). Главное место среди них в настоящее время занимают полупроводниковые приборы. Общим свойством всех названных приборов является то, что все они являются существенно нелинейными элементами, нелинейность их вольт-амперных характеристик, как правило является признаком, определяющим важнейшие их свойства.

Электронная техника непрерывно развивается, каждую задачу можно решить на основе различных схемных вариантов: можно построить схему на дискретных компонентах, можно выполнить ее на интегральных микросхемах, применить микропроцессорный комплект, провести обработку информации в цифровом или аналоговом виде. Какое решение выбрать? В конечном счете, все решает экономический анализ, и принятие неверного решения может не помешать решению локальной технической задачи, но в итоге окажется убыточным для народного хозяйства. Поэтому каждый инженер на своем месте должен воздействовать на техническую политику в своей области и выступать не только как специалист, но и как гражданин.

Органической частью электронных измерительных приборов, применяемых для измерения многочисленных и разнообразных параметров электрических сигналов, а также характеристик неэлектрических физических величин стали микропроцессорные системы.

Микропроцессор стал основной частью собственно прибора, что привело к изменению конструкции и схемных решений, компоновки, управления, включению обработки данных в измерительную процедуру (выполняемую без участия экспериментатора). Внедрение микропроцессоров открыло возможность построения многофункциональных приборов с гибкими программами работы, сделало приборы более экономичными, облегчило решение задачи выхода на стандартную интерфейсную шину [канал общего пользования (КОП)] и управления интерфейсом. Все это упростило эксплуата-

цию приборов, резко повысило производительность труда их пользователей.

Настоящее учебное пособие посвящено изложению основ полупроводниковой электроники и микропроцессорной техники. Предполагается, что читатель знаком с теоретическими основами электротехники. Книга в основном, предназначена для студентов, изучающих одноименный курс.

Учебное пособие состоит из восьми глав.

В первой, второй и третьей главах рассматриваются вопросы, связанные с полупроводниковыми приборами. Приводятся основные определения, классификация, схемы включения, режимы работы, статические и динамические характеристики приборов.

Четвертая глава содержит сведения об усилителях электрических сигналов. Здесь приводятся основные определения, показатели, характеристики, режимы работы усилителей. Кроме того, в данном разделе рассматриваются принцип работы усилителя и приводятся его разновидности.

В пятой главе представлены основные сведения об источниках вторичного питания. Рассматриваются схемы выпрямления, фильтрации и стабилизации электрических сигналов.

Шестая и седьмая главы содержат материал об основах микроэлектроники и микропроцессорной техники. Приводятся интегральные микросхемы. Рассматривается назначение основных узлов микропроцессорной техники. Изучается структура микропроцессора, его характеристики.

В восьмую главу включен блок контроля, который позволит студентам закрепить изученный материал и оценить уровень усвоения приведенного в учебном пособии материала.

1 Полупроводники и их свойства

К полупроводникам относят многие химические элементы. Такие, как кремний, германий, индий, фосфор, большинство оксидов, сульфидов, селенидов, некоторые сплавы, ряд минералов. Полупроводники бывают кристаллические, аморфные и жидкие. В полупроводниковой технике обычно используют только кристаллические полупроводники. Обычно к полупроводникам относят вещества, по удельной электрической проводимости занимающие промежуточное положение между металлами и диэлектриками (отсюда происхождение их названия). При комнатной температуре удельная электрическая проводимость их составляет от 10^{-8} до 10^5 - См/м (для металлов – 10^6 – 10^8 См/м, для диэлектриков – 10^{-8} – 10^{-13} См/м) /1, 2/. Основной особенностью полупроводников является возрастание удельной электрической проводимости с повышением температуры (для металлов она падает). Электропроводность полупроводников значительно зависит от внешних воздействий: нагревания, облучения, электрического и магнитного полей, давления, ускорения, а также от содержания даже незначительного количества примесей. Свойства полупроводников хорошо поясняются с помощью **зонной теории твердого тела**.

Атомы всех веществ состоят из ядра и электронов, движущихся по замкнутой орбите вокруг ядра. Электроны в атоме группируются в оболочке. У основных полупроводников, используемых для создания полупроводниковых приборов - кремния и германия, кристаллическая решетка тетраэдрическая (рисунок 1.1).

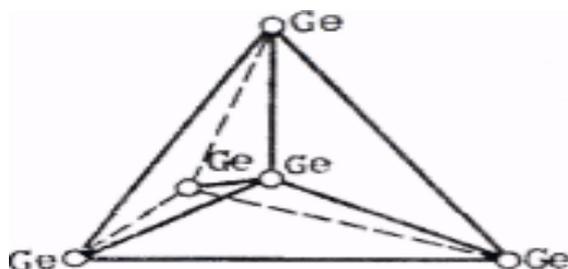


Рисунок 1.1

Каждый валентный электрон, т. е. электрон, находящийся на внешней, незаполненной оболочке атома, в кристалле принадлежит не только своему, но и ядру соседнего атома. Все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии друг от друга и связаны ковалентными связями

(ковалентной называется связь между парой валентных электронов двух атомов, на рисунке 1.2 она показана двумя линиями). Эти связи являются прочными. Чтобы их разорвать, нужно извне приложить энергию.

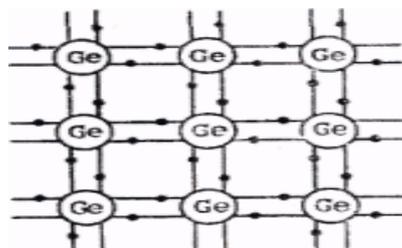


Рисунок 1.2

Энергия электрона дискретна, или квантована, поэтому электрон может двигаться только по той орбите, которая соответствует его энергии. Возможные значения энергии электрона можно представить на диаграмме энергетическими уровнями (рисунок 1.3). Чем более удалена орбита от ядра, тем больше энергия электрона и тем более высок его энергетический уровень. Энергетические уровни разделены зонами W , соответствующими запрещенной энергии для электронов (запрещенные зоны). Так как в твердом теле соседние атомы находятся очень близко друг от друга, это вызывает смещение и расщепление энергетических уровней, в результате чего образуются энергетические зоны, называемые разрешенными (I, III, IV на рисунке 1.3). Ширина разрешенных зон обычно равна нескольким электрон-вольт. В энергетической зоне число разрешенных уровней равно числу атомов в кристалле. Каждая разрешенная зона занимает определенную область энергии и характеризуется минимальным и максимальным уровнями энергии, которые называются соответственно **дном** и **потолком зоны**.

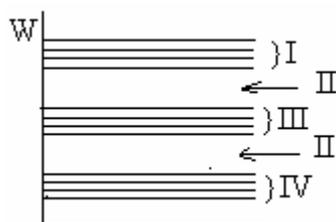


Рисунок 1.3

Разрешенные зоны, в которых электроны отсутствуют, называются **свободными** (I). Свободная зона, в которой при температуре 0 К электроны отсутствуют, а при более высокой температуре они могут в ней находиться, называется **зоной проводимости**. Она находится выше **валентной зоны** (III) -

верхней из заполненных зон, в которых все энергетические уровни заняты электронами при температуре 0 К.

В зонной теории подразделение твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики основано на ширине запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости и степени заполнения разрешенных энергетических зон (рисунок 1.4). Ширина запрещенной зоны ΔW_a называется **энергией активации собственной электропроводности**. Для металла $\Delta W_a = 0$ (рисунок 1.4 а). Условно при $\Delta W_a < 3$ эВ кристалл является полупроводником (рисунок 1.4 б), при $\Delta W_a > 3$ эВ - диэлектриком (рисунок 1.4 в). Так как у полупроводников значение ΔW_a сравнительно невелико, то достаточно сообщить электрону энергию, сравнимую с энергией теплового движения, чтобы он перешел из валентной зоны в зону проводимости. Этим объясняется особенность полупроводников - увеличение электропроводности при повышении температуры.

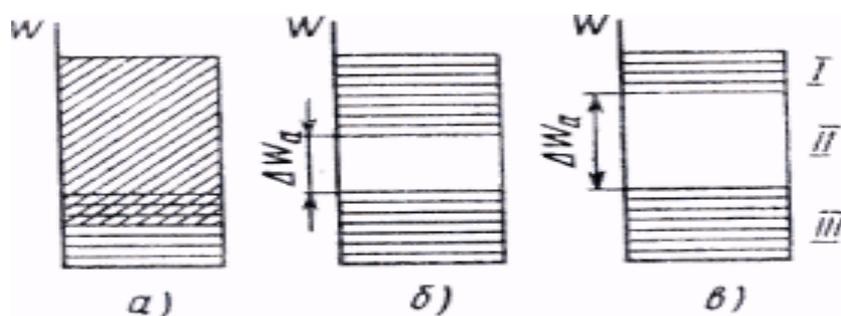


Рисунок 1.4

Рассмотрим электропроводность полупроводников, которая может быть собственной и примесной.

1.1 Собственная электропроводность полупроводников

Для того чтобы вещество обладало электропроводностью, оно должно содержать **свободные носители заряда**. Такими носителями заряда в металлах являются электроны. В полупроводниках – электроны и дырки.

Рассмотрим электропроводность собственных полупроводников, т.е. таких веществ, в которых не содержатся примеси и нет структурных дефектов кристаллической решетки (пустых узлов, сдвигов решетки и др.). При температуре 0 К в таком полупроводнике свободных носителей заряда нет. Однако с повышением температуры (или при другом энергетическом

воздействии, например, освещении) часть ковалентных связей может быть разорвана и валентные электроны, став свободными, могут уйти от своего атома (рисунок 1.5). Потеря электрона превращает атом в положительный ион. В связях на том месте, где раньше был электрон, появляется свободное («вакантное») место – дырка. Заряд дырки положительный и по абсолютному значению равен заряду электрона.

Свободное место – дырку – может заполнить валентный электрон соседнего атома, на месте которого в ковалентной связи образуется новая дырка, и т.д. Таким образом, одновременно с перемещением валентных электронов будут перемещаться и дырки.

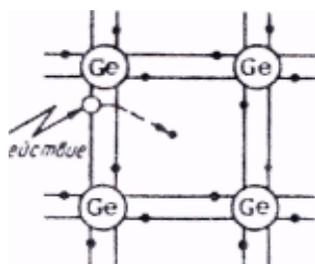


Рисунок 1.5

Если электрическое поле отсутствует, электроны совершают хаотическое тепловое движение. Если полупроводник поместить во внешнее электрическое поле, то электроны и дырки, продолжая участвовать в хаотическом тепловом движении, начнут перемещаться (дрейфовать) под действием поля, что и создаст электрический ток. При этом электроны перемещаются против направления электрического поля, а дырки, как положительные заряды, по направлению поля. Электропроводность собственного полупроводника, возникающая за счет нарушения ковалентных связей, называется **собственной электропроводностью**.

Электропроводность полупроводников может быть объяснена и с помощью зонной теории. В соответствии с ней все энергетические уровни валентной зоны при температуре 0 К заняты электронами. Если электронам сообщить извне энергию, превышающую энергию активации ΔW_a , то часть валентных электронов перейдет в зону проводимости, где они станут свободными, или электронами проводимости. Вследствие ухода электронов из валентной зоны в ней образуются дырки, число которых, естественно равно числу ушедших электронов. Дырки могут быть заняты электронами, энергия которых соответствует энергии уровней валентной зоны. Следовательно, в валентной зоне перемещение электронов вызывает перемещение в противоположном направлении дырок. Хотя в валентной зоне перемещаются электроны, обычно удобнее рассматривать движение дырок.

Процесс образования пары «электрон – дырка» называется генерацией пары носителей заряда. Образовавшиеся электронно-дырочные пары могут исчезнуть, если дырка заполняется электроном: электрон станет несвободным и потеряет возможность перемещения, а избыточный положительный заряд иона атома окажется нейтрализованным. При этом одновременно исчезают и дырка, и электрон. Процесс воссоединения электрона и дырки называется **рекомбинацией**. Рекомбинацию в соответствии с зонной теорией можно рассматривать как переход электронов из зоны проводимости на свободные места в валентную зону. Среднее время существования пары носителей заряда называется **временем жизни носителей заряда**. Среднее расстояние, которое проходит носитель заряда за время жизни, называется **диффузионной длиной носителя заряда** (L_p - для дырок, L_n - для электронов).

Для собственного полупроводника концентрация электронов n_i , равна концентрации дырок p_i , ($n_i = p_i$).

1.2 Примесная электропроводность полупроводников

Если в полупроводник внести примеси он будет обладать помимо собственной электропроводности еще и **примесной**. Примесная электропроводность может быть **электронной** или **дырочной**. Атом примеси связывается в кристаллической решетке полупроводника ковалентными связями. В связи участвуют не все валентные электроны, т.е. появляются «лишние» электроны, которые менее сильно связаны с атомом примеси. Для того, чтобы этот электрон оторвать от атома, нужно значительно меньше энергии, поэтому уже при комнатной температуре он может стать электроном проводимости, не оставляя при этом в ковалентной связи дырки. Таким образом, в узле кристаллической решетки появляется положительно заряженный ион примеси, а в кристалле - свободный электрон. Примеси, атомы которых отдают свободные электроны, называются **донорными (донорами)**.

Внесение в полупроводник донорной примеси существенно увеличивает концентрацию свободных электронов, а концентрация дырок остается такой же, какой она была в собственном полупроводнике. В таком примесном полупроводнике электропроводность обусловлена в основном электронами, поэтому такую проводимость называют **электронной**, а полупроводники – полупроводниками *n*-типа. Электроны в полупроводниках *n*-типа являются **основными носителями заряда** (их концентрация высока), а дырки – **неосновными**.

Если в полупроводнике ввод примеси сопровождается появлением незаполненной связи, то при незначительном повышении температуры в незаполненную валентную связь может перейти электрон соседнего атома

полупроводника, оставив на своем месте дырку, которая может быть также заполнена электроном и т.д. Таким образом, дырка как бы перемещается в полупроводнике. Примесный атом превращается в отрицательный ион. Примеси, атомы которых способны при возбуждении принять валентные электроны соседних атомов, создав в них дырку, называют **акцепторными** или **акцепторами**.

Внесение в полупроводник акцепторной примеси существенно увеличивает концентрацию дырок, а концентрация электронов остается такой же, какой она была в собственном полупроводнике. В этом примесном полупроводнике электропроводность обусловлена в основном дырками, поэтому ее называют **дырочной**, а полупроводники - полупроводниками *p*-типа. Дырки для полупроводника *p*-типа - **основные носители заряда**, а электроны – **неосновные**.

В примесных полупроводниках наряду с примесной электропроводностью существует и собственная, обусловленная наличием неосновных носителей.

Удельная электрическая проводимость примесного полупроводника определяется концентрацией основных носителей и тем выше, чем больше их концентрация.

1.3 Закон распределения носителей заряда в зонах полупроводника

В собственном полупроводнике при температуре 0 К все электроны находятся в валентной зоне. При повышении температуры часть электронов из валентной зоны переходит в зону проводимости. Определить вероятность нахождения электрона (или дырки) на том или ином энергетическом уровне при заданной температуре можно с помощью распределения Ферми – Дирака:

$$F_n(W) = 1 / e^{-(W-W_F)/(kT)}, \quad (1.1)$$

где W - энергия данного уровня, Дж;

k - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура;

W_F - энергия, соответствующая энергетическому уровню, вероятность заполнения которого при $T \neq 0$ К равна 1/2, и называемой **уровнем Ферми**.

При температуре 0 К $F_n(W)$ изменяется скачкообразно. Для всех энергетических уровней, лежащих ниже уровня Ферми ($W < W_F$), функция $F_n(W) = 1$, т.е. вероятность заполнения электронами валентной зоны (II), равна 1 (или 100 %); для всех уровней, лежащих выше уровня Ферми ($W > W_F$), функция $F_n(W) = 0$, т.е. вероятность заполнения электронами зоны

проводимости (I) равна нулю (электроны в зоне проводимости отсутствуют). Так как на энергетических уровнях в запрещенной зоне электроны располагаться не могут, распределение Ферми-Дирака там несправедливо. При $T \neq 0$ К кривая вероятности имеет плавный вид, симметрична относительно уровня Ферми. Уровень Ферми в собственном полупроводнике при $T=0$ К проходит почти посередине запрещенной зоны [5, 8].

Распределение Ферми-Дирака справедливо и для примесных полупроводников. Уровень Ферми в полупроводниках n -типа от середины смещается в сторону дна зоны проводимости и находится тем ближе к дну зоны проводимости, чем выше концентрация донорной примеси. В полупроводнике p -типа уровень Ферми смещается от середины запрещенной зоны в сторону валентной зоны и находится тем ближе к валентной зоне, чем выше концентрация акцепторной примеси. На положение уровня Ферми влияет также температура полупроводника: в полупроводнике n -типа чем ниже температура, тем выше лежит уровень Ферми. В полупроводнике p -типа чем ниже температура, тем ниже лежит уровень Ферми (ближе к потолку валентной зоны).

2. Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный переход (p - n - переход) – это контакт двух проводников с различным типом проводимости. Изготавливается он обычно из одного кристалла полупроводника, в котором формируются области с повышенной концентрацией акцепторной примеси (p - область) и донорной (n - область). В зависимости от технологии изготовления переход может быть резким или плавным. В резком переходе область изменения концентрации примеси значительно меньше толщины области пространственного заряда, который образуется за счет диффузии электронов и дырок, а в плавном переходе - обратная ситуация.

Однако и в резком, и в плавном переходах физические процессы, приводящие к униполярной проводимости p - n перехода, одинаковы. Если переход находится в равновесии (внешнее поле равно 0), то его состояние определяется двумя конкурирующими процессами: диффузия основных носителей - дырок из p - области в n - область и диффузия электронов в обратном направлении. Легко сообразить, что процессы диффузии основных носителей приводят к образованию вблизи границы раздела областей двойного объемного слоя пространственного заряда, который называют p - n переходом, как показано на рисунке 2.1.

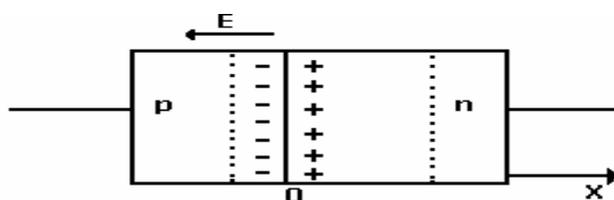


Рисунок 2.1

Этот слой обеднен основными носителями заряда в обеих частях, поэтому часто его называют запирающим. Диаграмма несимметричного p - n – перехода, где концентрация донорной примеси в n - области (N_D) меньше концентрации акцепторной примеси в p - области (N_A) приведена на рисунке 2.2.

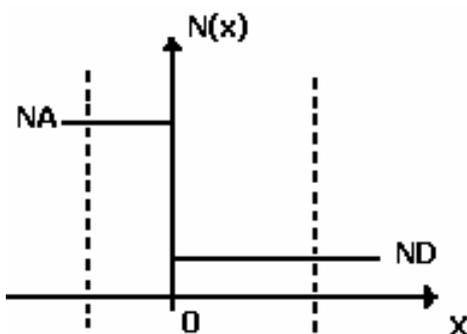


Рисунок 2.2

Изменения величин поля $E(x)$ и потенциала $\varphi(x)$ в области перехода показаны на рисунках 2.3 а и 2.3 б. Величина φ_K носит название **контактной разности потенциала**.

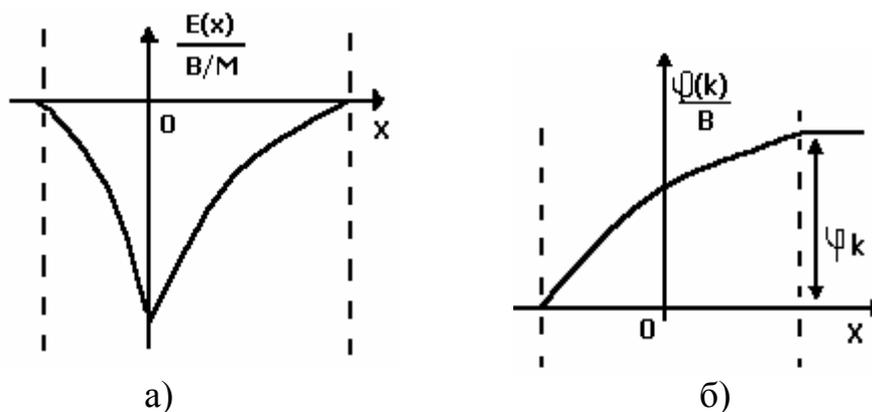


Рисунок 2.3

В условиях равновесия полный ток через переход (дрейфовый и диффузионный) носителей каждого знака равен нулю. Действительно, в p -области концентрация дырок велика, но пройти через переход слева направо может лишь небольшая их часть, у которой энергия достаточна для преодоления потенциального барьера величиной φ_K (это - диффузионная составляющая дырочного тока). Справа налево дырки из n -области в p -область переносятся полем перехода (это - дрейфовая составляющая дырочного тока через переход). Но концентрация дырок в n -области невелика (они там являются *неосновными* носителями). Те же рассуждения можно провести и для электрических составляющих диффузионного и дрейфового токов. Таким образом, принцип детального равновесия позволяет установить, что полный ток через переход в состоянии равновесия равен нулю. На высоту потенциального барьера влияет концентрация примесей. Если увеличить концентрацию, уровень Ферми в области n -типа приблизится к дну зоны проводимости, в области p -типа – к потолку валентной зоны. В этом случае энергия ΔW , а следовательно, и потенциальный барьер, увеличатся (в предельном случае ΔW будет приблизительно равна ширине запрещенной зоны).

Если концентрацию примесей уменьшить, уровень Ферми сместится к середине запрещенной зоны, энергия ΔW , а, следовательно, и высота потенциального барьера уменьшатся. Потенциальный барьер p - n переходов образованных в германии принимает значение от 0.3 В до 0.4 В, в кремнии – от 0.7 В до 0.8 В.

2.1 Токи в p - n переходе

Итак, перемещение основных носителей заряда через p - n -переход в смежные области происходит за счет диффузии против поля p - n -перехода. Этот поток носителей является **диффузионным током**:

$$I_{\text{диф}} = I_{p_p} + I_{n_n}, \quad (2.1)$$

где I_{p_p} - ток, образованный дырками области p ;

I_{n_n} - ток, образованный электронами области n .

Одновременно с перемещением основных носителей заряда через p - n -переход начинается перемещение неосновных носителей в направлении поля p - n -перехода, которое для них является ускоряющим. Поток неосновных носителей является дрейфовым током (током проводимости).

$$I_{\text{др}} = I_{p_n} + I_{n_p}, \quad (2.2)$$

где I_{p_n} - ток, образованные дырками области p ;

I_{n_p} - ток, образованные электронами области n .

В отсутствие внешнего поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей заряда и токи, диффузионный и дрейфовый, оказываются равными по абсолютному значению:

$$I_{\text{диф}} = I_{\text{др}}, \text{ или } I_{0д} = I_0, \quad (2.3)$$

где для условия равновесия обозначено $I_{\text{диф}} = I_{\text{др}}$ и $I_{0д} = I_0$.

Тогда с учетом формул (2.1) и (2.2) можно записать:

$$I_{p_p} + I_{p_n} = I_{p_n} + I_{n_p} \quad (2.4)$$

Но так как диффузионный и дрейфовый токи направлены в противоположные стороны, то результирующий ток через p - n -переход будет равен нулю.

2.2 Прямое и обратное включение p - n -перехода

Если источник напряжения подключить знаком плюс к области p -типа, а знаком минус к области n -типа, то получим включение, которое называют **прямым**. Противоположное включение называют **обратным**. При прямом

включении электрическое поле источника напряжения напряженностью E_{II} направлено навстречу контактному полю напряженностью E поэтому напряженность результирующего электрического поля $E_1 = E - E_{II}$. Уменьшение напряженности электрического поля в p - n -переходе вызовет снижение высоты потенциального барьера на значение прямого напряжения источника.

Уменьшение высоты потенциального барьера приводит к тому, что увеличивается число основных носителей заряда через p - n -переход, т.е. усиливается диффузионный ток. Изменение диффузионного тока с изменением напряжения происходит по экспоненциальному закону:

$$I_{диф} = I_{0д} e^{qU/(kT)}. \quad (2.5)$$

Согласно формуле (2.3) удобнее записать:

$$I_{диф} = I_0 e^{qU/(kT)} \quad (2.6)$$

Здесь и в дальнейшем прямое напряжение $U_{пр}$ будем записывать со знаком плюс, обратное напряжение $U_{об}$ - со знаком минус.

На дрейфовый ток изменение высоты потенциального барьера не влияет, так как этот ток определяется только количеством неосновных носителей заряда, переносимых через p - n -переход в единицу времени в результате их хаотического теплового движения. Диффузионный и дрейфовый токи направлены в противоположные стороны, поэтому результирующий (прямой) ток через p - n -переход с учетом формулы (2.6)

$$I_{пр} = I_{диф} - I_0 = I_0 (e^{qU/(kT)} - 1) \quad (2.7)$$

Прямой ток, как видно из выражения (2.7), зависит от приложенного напряжения. Даже небольшое напряжение, приложенное к p - n -переходу, вызывает большой ток, так как потенциальный барьер невелик (0,35 В в германиевом и 0,6 В в кремниевом p - n -переходах). В результате действия внешнего поля в прямом направлении в области p - n -перехода происходит перераспределение концентрации носителей заряда. Дырки p -области и электроны n -области диффундируют вглубь p - n -перехода и рекомбинируют там. Ширина перехода уменьшается, вследствие чего снижается сопротивление запирающего слоя [5, 8].

В этом случае электрическое поле источника напряжения напряженностью E направлено в ту же сторону, что и контактное поле перехода напряженностью E , поэтому напряженность результирующего поля в переходе увеличивается. Увеличение напряженности электрического поля в p - n -переходе повышает потенциальный барьер на значение обратного напряжения источника:

$$\Delta\varphi_{K2} = \Delta\varphi_K + U. \quad (2.8)$$

Это, в свою очередь, приводит к уменьшению числа основных носителей заряда, способных преодолеть потенциальный барьер, т.е. к снижению диффузионного тока. Изменение диффузионного тока происходит по экспоненциальному закону:

$$I_{\text{диф}} = I_{0\text{д}} e^{-qU/(kT)} = I_0 e^{-qU/(kT)} \quad (2.9)$$

Поскольку дрейфовый ток не зависит от высоты потенциального барьера, он равен току I_0 , а результирующий ток через p - n -переход определится:

$$I_{\text{обр}} = I_0 e^{-qU/(kT)} = I_0 (e^{-qU/(kT)} - 1) \quad (2.10)$$

Ток при обратном включении p - n -перехода называют **обратным током**. При некотором значении обратного напряжения диффузионный ток станет равным нулю. Для неосновных носителей заряда поле p - n -перехода является ускоряющим, поэтому дырки области n из прилегающих к p - n -переходу слоев дрейфуют в область p -типа, а электроны области p - в область n -типа. Через p - n -переход протекает только дрейфовый ток. Он мал, поскольку мала концентрация неосновных носителей заряда в обеих областях и высоко сопротивление p - n -перехода. Так как концентрация неосновных носителей заряда определяется тепловой генерацией, ток, образованный ими, называют **тепловым**. Его значение при данной температуре определяется скоростью тепловой генерации носителей заряда. Так как при обратном включении p - n -перехода увеличивается потенциальный барьер, то ширина p - n -перехода также увеличивается. Это вызывает повышение сопротивления запирающего слоя. Прямое и обратное включение p - n -перехода иногда называют **прямым** и **обратным смещением**.

2.3 Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

Зависимость тока через p - n -переход от приложенного к нему напряжения $I=f(U)$ называют **вольт-амперной характеристикой p - n -перехода**. На основании выражений (2.7) и (2.10) она описывается уравнением:

$$I = I_0 (e^{\pm qU/(kT)} - 1) \quad (2.11)$$

Если p - n -переход включен в прямом направлении, напряжение U берут со знаком плюс, а если в обратном – со знаком минус. При комнатной температуре

тепловой потенциал равен $0,025$ ЭВ ($\varphi_T = K \cdot T/q$). Согласно уравнению (2.11), при прямом напряжении прямой ток растет с повышением напряжения экспоненциально. При обратном напряжении обратный ток равен тепловому току, который от напряжения не зависит, поэтому рост тока при значительном повышении напряжения (до определенного предела) почти прекращается, наступает как бы его насыщение. Отсюда тепловой ток I_0 называют также **током насыщения**.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода показана на рисунке 2.4. Обратный ток, обычно, на несколько порядков меньше прямого. Поэтому p - n -переход обладает вентильным свойством, т.е. односторонней проводимостью. При повышении температуры прямой ток через p - n -переход увеличивается.

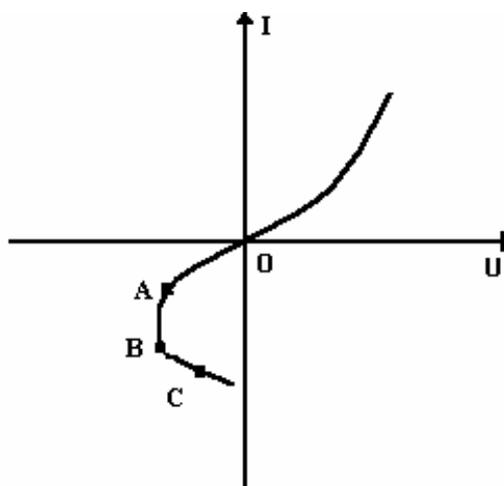


Рисунок 2.4

Дадим определение некоторым понятиям, используемым при описании полупроводниковых приборов. При прямом смещении потенциальный барьер понижается и через него перемещаются основные носители заряда в смежную область, где они являются неосновными. Это явление называется **инжекцией** (впрыскивание). Область, из которой инжектируются носители заряда, называется **эмиттером**, а область, в которую они инжектируются и где они являются неосновными — **базой**.

Под действием поля p - n -перехода неосновные для данной области носители заряда перемещаются через p - n -переход в соседнюю область. Процесс выведения неосновных носителей заряда через переход под воздействием поля этого перехода при подключении p - n -перехода к источнику внешнего напряжения называется **экстракцией** (извлечением).

Резкое возрастание обратного тока, наступающее при незначительном увеличении обратного напряжения сверх определенного значения, называют пробоем перехода. Природа пробоя может быть различной он может быть **электрическим** (участок АВ на рисунке 2.4), при котором p - n -переход не разрушается и сохраняет работоспособность, и **тепловым** (участок ВС на

рисунке 2.4), при котором разрушается кристаллическая структура полупроводника. **Тепловой пробой p - n -перехода** - пробой p - n -перехода, сопровождаемый разрушением кристаллической структуры полупроводника, возникает, когда мощность, выделяемая в p - n -переходе при протекании через него обратного тока, превышает мощность, которую способен рассеять p - n -переход. Электрический пробой связан со значительным увеличением напряженности электрического поля в p - n -переходе (более 10^5 В/см). Наблюдаются два типа электрического пробоя. В полупроводниках с узким p - n -переходом (что обеспечивается высокой концентрацией примесей) возникает **туннельный пробой**, связанный с туннельным эффектом, когда под воздействием очень сильного поля носители заряда могут переходить из одной области в другую без затраты энергии («туннелировать» через p - n -переход). Туннельный пробой наблюдается при обратном напряжении порядка нескольких вольт (до 10 В).

В полупроводниках с широким p - n -переходом может произойти лавинный пробой. Его механизм состоит в том, что в сильном электрическом поле может возникнуть ударная ионизация атомов p - n -перехода носители заряда на длине свободного пробега приобретают кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении с атомом кристаллической решетки полупроводника выбить из ковалентных связей электроны. Образовавшаяся при этом пара свободных носителей заряда «электрон – дырка» тоже примет участие в ударной ионизации. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к значительному возрастанию обратного тока. Пробивное напряжение лавинного пробоя составляет десятки и сотни вольт.

Тепловой пробой возникает тогда, когда мощность, выделяемая в p - n -переходе при прохождении через него обратного тока, превышает мощность, которую способен рассеять p - n -переход. Происходит значительный перегрев перехода, и обратный ток, который является тепловым, резко возрастает, а перегрев увеличивается. Это приводит к лавинообразному увеличению тока, в результате чего и возникает тепловой пробой p - n -перехода.

2.4 Емкости p - n -перехода

По обе стороны от границы p - n -перехода находятся ионизированные атомы донорной и акцепторной примесей, образующие отрицательные и положительные пространственные заряды. При изменении напряжения, приложенного к переходу, изменяется его ширина, а следовательно, и пространственный заряд. Поэтому плоскостной p - n -переход можно рассматривать как две пластины конденсатора с равными по значению, но противоположными по знаку зарядами ($Q_p = -Q_n$), т.е. p - n -переход обладает емкостью. Емкость, обусловленная перераспределением зарядов в переходе, называется барьерной. Заряд Q зависит от напряжения, но не пропорционален

ему, и емкость определяется как отношение приращения пространственных зарядов в p - n -переходе к вызвавшему это приращение изменению напряжения:

$$C_{\phi} = dQ / dU . \quad (2.12)$$

Заряд (положительный или отрицательный) можно найти из выражения:

$$Q = qNSl , \quad (2.13)$$

где N – концентрация донорной или акцепторной примеси;

S – площадь p - n -перехода;

l – ширина p - n -перехода, причем для несимметричного p - n -перехода при его прямом и обратном включении:

$$l = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0(\Delta\varphi_k - U)/(qN)} = l_0\sqrt{(\Delta\varphi_k - U)/\Delta\varphi_k} . \quad (2.14)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 - электрическая постоянная;

$N = N_d$, если $N_d \gg N_a$ и $N = N_a$, если $N_a \gg N_d$;

U -напряжение, приложенное к переходу (при прямом включении $U > 0$, при обратном $-U < 0$);

$l_0 = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0/(qN)\Delta\varphi}$ - ширина p - n -перехода в равновесном состоянии.

Подставив в модель (2.13) соотношение (2.14) и продифференцировав полученное выражение по напряжению, получим:

$$C_{\phi} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{l} \sqrt{\frac{\Delta\varphi_k}{\Delta\varphi_k + U}} . \quad (2.15)$$

Первый множитель в модели (2.15) определяет емкость обычного плоского конденсатора, второй – характеризует зависимость барьерной емкости от приложенного напряжения.

При подключении к p - n -переходу прямого напряжения из каждой области полупроводника в смежную инжектируются неосновные для нее носители заряда (вследствие диффузии при понизившемся потенциальном барьере). В тонких слоях около границы p - n -перехода возникает избыточная концентрация неосновных носителей. Для нейтрализации этого избыточного заряда из прилегающих слоев отсасываются основные носители, число которых пополняется за счет источника. Таким образом, в каждой области у границы p - n -перехода возникают равные по значению, но противоположные по знаку заряды $Q_{диф}$. При изменении напряжения изменяется число инжектированных носителей, а следовательно, и заряд. Изменение заряда на границе перехода

подобно изменению зарядов на обкладках конденсатора при изменении приложенного к нему напряжения. Емкость, связанную с изменением инжектированных носителей при изменении напряжения, называют **диффузионной** и определяют как отношение приращения инжектированного заряда в базе к вызвавшему его приращению напряжения:

$$C_{\text{диф}} = dQ_{\text{инж}} / dU . \quad (2.16)$$

Диффузионная емкость увеличивается с увеличением прямого тока. Кроме того, она тем больше, чем больше время жизни неосновных инжектированных носителей заряда, так как при этом меньше рекомбинация и больше носителей накапливается у границы *p-n*-перехода.

При подключении к *p-n*-переходу обратного напряжения перераспределение зарядов вследствие экстракции незначительно, поэтому диффузионная емкость мала. При прямом напряжении диффузионная емкость значительно больше барьерной, а при обратном напряжении наоборот. Поэтому при прямом напряжении учитывают $C_{\text{диф}}$, а при обратном – $C_{\text{б}}$.

3 Полупроводниковые приборы

Полупроводниковые приборы, обладающие рядом свойств, которые делают их применение предпочтительным перед вакуумными приборами, все более широко используются в электронной технике. В последние годы, характеризующиеся прогрессом в полупроводниковой электронике, разрабатываются приборы на новых физических принципах.

3.1 Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод - это полупроводниковый прибор с одним *p-n-переходом* и двумя омическими контактами (омическим называют контакт металла с полупроводником, не обладающий выпрямляющим свойством), к которым присоединяются два вывода.

Электрический переход чаще всего образуется между двумя полупроводниками с разным типом примесной электропроводности (*p*- или *n*-типа), одна из областей (низкоомная) является **эмиттером**, другая (высокоомная) – **базой**. Структура диода и условное обозначение в схемах выпрямительного диода показаны на рисунках 3.1 а, б.

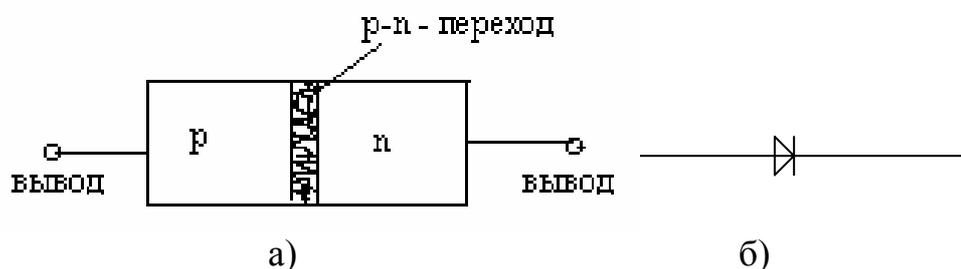


Рисунок 3.1

Иногда электрический переход образуется между полупроводником *p*- или *n*-типа и металлом, такой переход называют **контактом металл-полупроводник**.

Классифицируют диоды по различным признакам:

- полупроводниковому материалу: кремниевые, германиевые, из арсенида галлия;
- по физической природе процессов, обуславливающих их работу: туннельные, фотодиоды, светодиоды и др.;
- по назначению: выпрямительные, импульсные, и др.;
- по технологии изготовления электрического перехода: сплавные диффузионные и др.;
- по типу электрического перехода: точечные и плоскостные.

Основной является классификация по назначению диода.

3.1.1 Точечный диод

Точечные диоды имеют очень малую площадь электрического перехода (рисунок 3.2 а). Линейные размеры, определяющие ее, меньше ширины $p-n$ -перехода. Точечный электрический переход можно создать в месте контакта небольшой пластинки полупроводника 3 и острия металлической проволоочки-пружинки 4 даже при простом их соприкосновении. Более надежный точечный электрический переход образуется формовкой контакта, для чего через собранный диод пропускают короткие импульсы тока (порядка нескольких ампер). В результате формовки острие пружинки надежно приваривается к пластинке полупроводника. При этом из-за сильного местного нагрева материал острия пружинки расплавляется и диффундирует в пластинку полупроводника, образуя слой иного типа, чем полупроводник. Между этим слоем и пластинкой образуется $p-n$ -переход полусферической формы. Площадь $p-n$ -перехода составляет примерно $10^2 - 10^3 \text{ мкм}^2$. Точечные диоды в основном изготавливают из германия n -типа, металлическую пружинку из тонкой проволоочки (диаметром от 0.05 мм до 0.1 мм), материал которой для германия p -типа должен быть акцептором (например, бериллий). Корпус точечных диодов герметичный. Он представляет собой керамический или стеклянный баллон 2, покрытый черной светонепроницаемой краской (во избежание проникновения света, так как кванты света могут вызвать генерацию носителей заряда вблизи $p-n$ -перехода, а следовательно, увеличить обратный ток диода). На рисунке 3.2 а выводы обозначены 1.

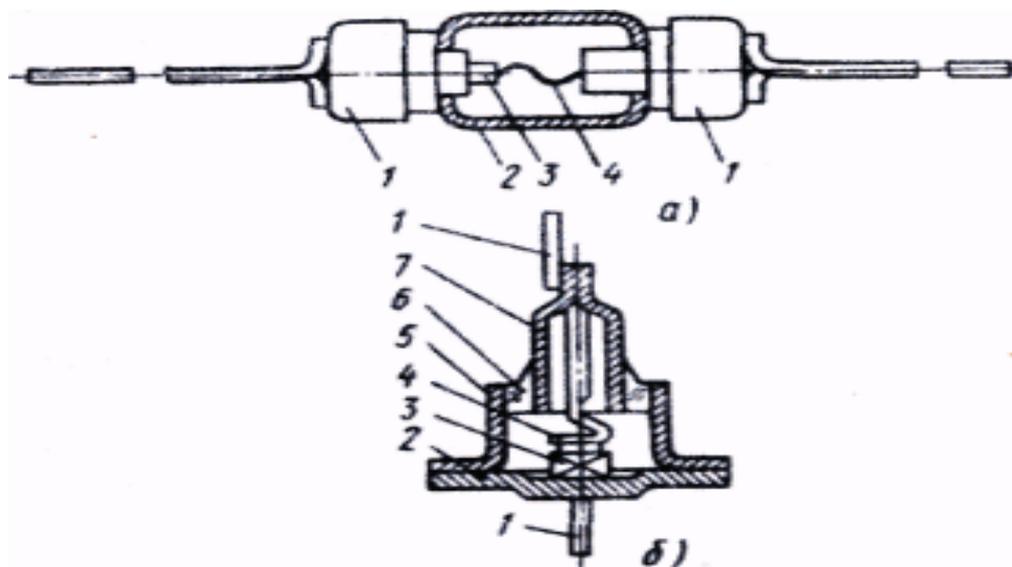


Рисунок 3.2

Благодаря малой площади p - n -перехода емкость точечных диодов очень незначительна и составляет десятые доли пкФ. Поэтому точечные диоды используют на высоких (порядка сотен МГц) и сверхвысоких частотах. Их применяют в основном для выпрямления переменного тока высокой частоты (выпрямительные диоды высокочастотные) и в импульсных схемах (импульсные диоды) /3/.

Так как площадь p - n -перехода точечного диода мала, то прямой ток через переход должен быть небольшим (от 10 мА до 20 мА) из-за малой мощности (около 20 мВт), рассеиваемой переходом. Поэтому точечные диоды можно использовать для выпрямления только малых переменных токов.

3.1.2 Плоскостный диод

Плоскостные диоды имеют плоский электрический переход, линейные размеры которого, определяющие его площадь, значительно больше ширины p - n -перехода. Площадь может составлять от сотых долей квадратных миллиметров (микроплоскостные диоды) до нескольких десятков квадратных сантиметров (силовые диоды). Переход выполняют в основном методами сплавления или диффузии. Плоскостные диоды используются для работы на частотах до 10 кГц. Ограничение по частоте связано с большой барьерной емкостью p - n -перехода (до десятков пкФ).

Одна из конструкций плоскостного диода показана на рисунке 3.2 б. Пластинку кристалла полупроводника 3 припаивают к кристаллодержателю 2 так, чтобы образовался контакт. От этого контакта и электрода 4 сделаны выводы 1, причем верхний проходит через стеклянный проходной изолятор 6 в корпусе 5 и коваровую трубку 7. Стеклянный изолятор покрыт светонепроницаемым лаком. Корпус служит для защиты диода от внешних воздействий.

Плоскостные диоды, как и точечные, могут быть выполнены с контактом металл – полупроводник. Емкость электрического перехода таких диодов небольшая, время перезарядки емкости, следовательно, мало, поэтому их используют для работы в импульсных режимах (сверхскоростные импульсные диоды). Плоскостные диоды бывают малой мощности (до 1 Вт), средней мощности (на токи до 1 А, напряжение до 600 В) и мощные (на токи до 2000 А).

3.1.3 Выпрямительный диод

Выпрямительные диоды. В выпрямительных диодах используется свойство односторонней проводимости p - n -перехода. Их применяют в качестве вентилях, которые пропускают переменный ток только в одном направлении. Вентильные свойства диода зависят от того, насколько мал обратный ток. Для

уменьшения обратного тока необходимо снижать концентрацию неосновных носителей, что может быть обеспечено за счет высокой степени очистки исходного полупроводника. Обычно применяют полупроводники, в которых на $10^9 - 10^{10}$ атомов основного элемента приходится один атом примеси.

Характеристики реальных диодов несколько отличны от вольт-амперных характеристик *p-n*-перехода. Их вид зависит от рода основного полупроводникового материала, площади *p-n*-перехода, температуры. Особенно сильно влияние температуры сказывается на обратной ветви характеристики, так как с ростом температуры возрастает тепловой ток. В германиевых диодах увеличение температуры на десять градусов вызывает увеличение обратного тока в два раза, в кремниевых диодах в два с половиной раза. С ростом обратного тока увеличивается нагрев *p-n*-перехода, что может привести к тепловому пробую. Верхний предел рабочих температур для германиевых диодов составляет (от 85 до 100) °С, для кремниевых – до 200 °С.

Простейшая схема однополупериодного выпрямителя с полупроводниковыми диодами показана на рисунке 3.3. К диоду в общем случае может быть приложено как постоянное (для определения рабочей точки на характеристике), так и переменное напряжение, поэтому для описания работы диода в первом случае используют статические характеристики и параметры, во втором случае – динамические. **Статические параметры** - это прямой выпрямленный ток наибольшее допустимое напряжение, обратное сопротивление, максимально допустимая мощность и др. **Динамические параметры** - дифференциальное сопротивление $r_d = dU/dI$, общая емкость диода C , емкость между выводами диода при заданных напряжении и частоте, которая включает емкости $C_с, C_{диф}$ и емкость корпуса диода; граничная частота $f_{гр}$, на которой выпрямленный ток уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

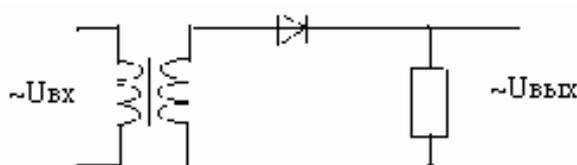


Рисунок 3.3

3.1.4 Импульсный диод

Импульсные диоды предназначены для работы в импульсных режимах. Такие диоды используют, например, в вычислительных устройствах (в ключевых, логических схемах и др.). В импульсных режимах через промежутки времени, равные единицам - долям микросекунды, диоды переключаются с прямого напряжения на обратное. При этом каждое новое состояние диода не

может устанавливаться мгновенно, поэтому существенное значение здесь приобретают так называемые переходные процессы.

Рассмотрим работу диода (условное обозначение приведено на рисунке 3.4), у которого область p -типа является базой, а область n -типа - эмиттером, при воздействии на диод прямоугольного импульса (рисунок 3.5 а) /4/.

При прямом напряжении потенциальный барьер снижается и происходит инжекция электронов из эмиттера в базу (дырки базы тоже диффундируют в эмиттер, но их концентрация мала, поэтому их потоком можно пренебречь). Пришедшие в базу электроны не могут сразу рекомбинировать с дырками базы или дойти до омического контакта базы (где они тоже могли бы рекомбинировать), поэтому происходит накопление электронов в базе. Чем больше прямой ток, тем больше электронов накапливается в базе. Число электронов зависит также от времени жизни носителей заряда: чем оно больше, тем меньше электронов рекомбинирует.

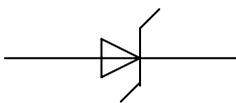


Рисунок 3.4

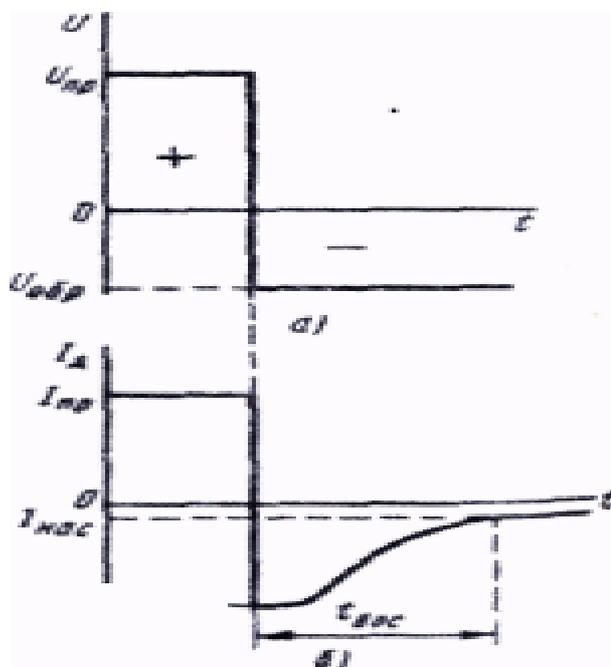


Рисунок 3.5

При прямом напряжении сопротивление p - n -перехода хотя и нелинейно, но очень мало, поэтому оно не влияет на ток, и импульс тока искажается очень незначительно (рисунок 3.5 б).

Как только напряжение изменится на обратное, обратный ток в первый момент будет значительным, а обратное сопротивление резко уменьшится. Это объясняется тем, что накопленные в базе носители заряда (электроны) начнут перемещаться в сторону p - n -перехода и образуют импульс обратного тока. Этот импульс будет тем больше, чем больше носителей зарядов накопилось в базе. Заряды, накопленные в базе, втягиваясь полем p - n -перехода, переходят в эмиттер, часть их рекомбинирует в базе с дырками (т.е. число их уменьшается и

в течение определенного времени обратный ток достигает установившегося значения), и обратное сопротивление восстановится до нормального значения. Процесс уменьшения заряда в базе называется рассасыванием.

К току рассасывания добавляется зарядный ток барьерной емкости C_6 , p - n -перехода, возникающий под действием обратного напряжения, увеличивая тем самым импульс обратного тока.

Для улучшения свойств импульсных диодов при их проектировании исходный материал выбирают с малым временем жизни носителей заряда (тогда интенсивнее рекомбинация) и p - n -переход делают с малой площадью, чтобы снизить емкость C_6 .

Импульсные диоды могут быть точечными и плоскостными. Конструкция и технология изготовления импульсных диодов практически аналогичны конструкции и технологии изготовления точечных высокочастотных диодов и плоскостных (с малой площадью – p - n -перехода) выпрямительных диодов.

Точечные импульсные диоды слаботочные, их широко применяют в ЭВМ в качестве быстродействующих переключающих элементов. Плоскостные диоды работают при средних и больших импульсных токах.

Основными параметрами импульсных диодов являются время восстановления $t_{ВОС}$ и барьерная емкость C_6 , а также обратный ток $I_{ОБР}$ при определенном обратном напряжении $U_{ОБР}$, постоянное прямое напряжение $U_{ПР}$ при постоянном прямом токе $I_{ПР}$, максимально допустимый импульсный прямой ток $I_{ПР.МАХ}$, максимально допустимое обратное напряжение $U_{ПР.МАХ}$.

3.1.5 Туннельный диод

Туннельным диодом называют полупроводниковый прибор, который сконструирован на основе вырожденного полупроводника (т.е. полупроводника с большим содержанием примеси), в котором при обратном и небольшом прямом напряжении возникает туннельный эффект и вольт-амперная характеристика имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Устройство туннельных диодов в принципе почти не отличается от устройства других диодов, но для их изготовления применяют полупроводниковые материалы с большим содержанием примесей (до 10^{20} см^{-3}). Вследствие этого удельные сопротивления областей p - и n - типов очень малы, а ширина p - n -перехода составляет примерно 0,02 мкм, что в сто раз меньше, чем в других полупроводниковых диодах. Напряженность электрического поля в таких p - n -переходах достигает огромной величины - до 10^6 В/см .

Вольт-амперная характеристика туннельного диода и его условное обозначение в схемах показаны соответственно на рисунке 3.6. Рассмотрим с помощью зонной теории вид вольт-амперной характеристики. В равновесном

состоянии системы уровень Ферми постоянен для обеих областей полупроводникового диода. Поэтому другие энергетические уровни искривляются настолько сильно, что нижняя граница дна свободной зоны области *n*-типа оказывается ниже верхней границы потолка валентной зоны области *p*-типа, и так как переход очень узкий, то носители заряда могут переходить из одной области в другую без затраты энергии, просачиваться сквозь потенциальный барьер (туннелировать).

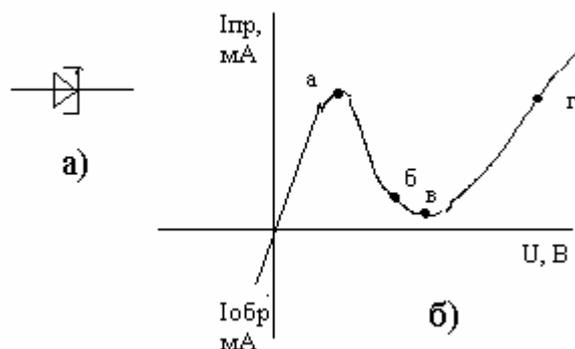


Рисунок 3.6

При подключении к диоду прямого напряжения потенциальный барьер с ростом напряжения уменьшится. При подаче на туннельный диод обратного напряжения обратный туннельный ток будет резко возрастать. Обратный ток у туннельных диодов во много раз больше, чем у других диодов, поэтому они не обладают вентильным свойством.

Основными параметрами туннельных диодов являются: максимальные I_{\max} и минимальные I_{\min} значения токов на вольтамперной характеристике и соответствующие им напряжения (U_a и U_b); значение напряжения U_g , соответствующее максимальному току в точке *a*, а также дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}} = -dU/dI$, которое определяется примерно на середине участка с отрицательным сопротивлением; общая емкость диода и максимальная частота.

Туннельные диоды обладают усилительными свойствами и могут работать в схемах как активные элементы. Они находят широкое применение в сверхбыстродействующих ЭВМ в качестве быстродействующих импульсных переключающих устройств (скорость переключения составляет доли наносекунды) и в генераторах высокочастотных колебаний. На туннельных диодах создают схемы мультивибраторов, триггеров, которые служат основой для построения логических схем, запоминающих устройств, регистров и т.д. Высокая скорость переключения объясняется тем, что туннельные диоды обычно работают на участке вольтамперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением, где механизм переноса зарядов связан с их туннельным смещением (через *p-n*-переход), скорость которого огромна.

Туннельные диоды могут работать в широком диапазоне температур от 4 до 640 К. Они просты по конструкции, малогабаритны. Туннельные диоды изготавливают на основе сильнолегированного германия или арсенида галлия, *p-n*-переход получают методом сплавления примесей.

3.1.6 Стабилитрон

Стабилитроны - полупроводниковые диоды, работающие в режиме электрического пробоя. Это полупроводниковые диоды, принцип работы которых основан на том, что при обратном напряжении на *p-n*-переходе в области электрического пробоя напряжение на нем изменяется незначительно при значительном изменении тока. Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжений и используются в параметрических стабилизаторах напряжения, в качестве источников опорных напряжений, в схемах ограничения импульсов и др. Напряжение стабилизации (пробивное напряжение) является рабочим. Оно зависит от свойств полупроводника, из которого изготавливают диод, а также технологии изготовления прибора.

Вольтамперная характеристика стабилитрона для разных температур, условное обозначение в схемах и простейшая схема стабилизации постоянного напряжения с помощью стабилитрона показаны на рисунках 3.7 а, б соответственно.

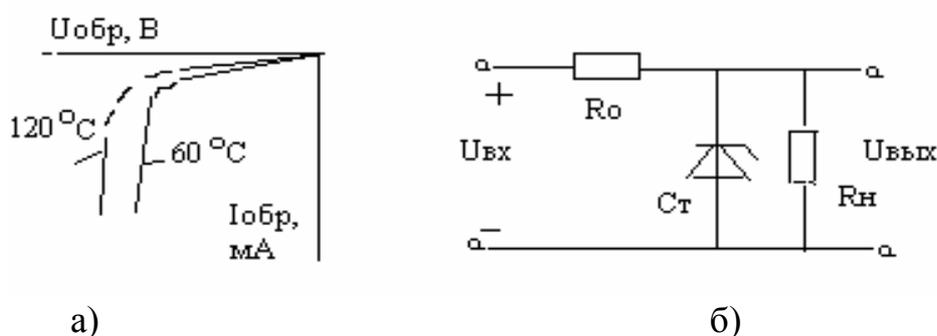


Рисунок 3.7

Если напряжение источника питания $U_{вх}$ возрастает, в отсутствие стабилитрона должны возрасти ток в общей цепи и в резисторе нагрузки R_n , а следовательно, и напряжение на резисторе. Этого не произойдет, если в схему включить стабилитрон. Сопротивление стабилитрона при повышении $U_{вх}$ резко уменьшается, избыточный ток замыкается через него, но при увеличении тока через стабилитрон напряжение на нем останется неизменным, поэтому

неизменным будет и напряжение на резисторе R_n а следовательно, и $U_{\text{вых}}$. Избыточное напряжение гасится на ограничивающем резисторе R_o .

Основными параметрами стабилитронов являются напряжение стабилизации - значение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации (от 3 до 400 В при максимальном токе в несколько десятков и сотен миллиампер), допустимая мощность, рассеиваемая в стабилитроне (от сотен милливатт до единиц ватт), а также дифференциальное сопротивление $r_{\text{СТ}} = \Delta U_{\text{СТ}} / \Delta I_{\text{СТ}}$

3.1.7 Варикап

Варикапы - это полупроводниковые диоды, в которых использовано свойство p - n -перехода изменять барьерную емкость при изменении обратного напряжения. Таким образом, варикап можно рассматривать как конденсатор с электрически управляемой емкостью /4/.

Основными параметрами этих приборов являются емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении, коэффициент перекрытия по емкости - отношение емкости варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений, а также добротность - отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения.

3.2 Транзисторы

3.2.1 Биполярный транзистор

Транзисторы подразделяются на биполярные и полевые.

Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор (рисунок 3.8), который содержит два взаимодействующих p - n перехода и предназначен для генерации, усиления и преобразования сигналов электромагнитной природы. Термин «биполярный» означает, что физические процессы в приборе обусловлены движением носителей заряда обоих знаков (электронов и дырок).

Конструктивно транзистор представляет собой монокристалл полупроводника, в котором сформулированы чередующиеся области с разным типом проводимости. Соответственно различают транзисторы: p - n - p и n - p - n типа. Средняя область, которая делается достаточно тонкой (что принципиально важно для работы транзистора), называется **базой**, для нее характерна наименьшая концентрация примесей. Две другие - **эмиттер** и **коллектор**. База отделена от эмиттера и коллектора эмиттерным и коллекторным p - n переходами. Очевидно, что назначение эмиттера –

инжектировать (впрыскивать) носители заряда в базу, коллектор используется для экстракции (втягивания) носителей из области базы. Исходя из обеспечения лучшей работы транзистора, область коллектора делается большей по размерам, чем область эмиттера. Из тех же соображений активная толщина базы делается небольшой (меньше диффузионной длины неосновных носителей).

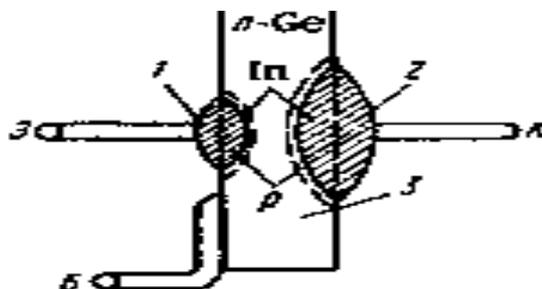


Рисунок 3.8

На рисунке 3.9 показаны условные графические изображения и структурные схемы транзисторов $p-n-p$ типа (а,в) и $n-p-n$ типа (б,г).

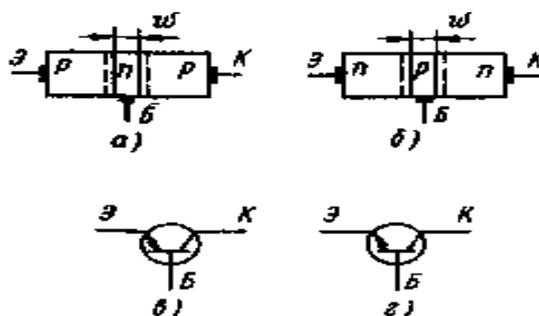


Рисунок 3.9

Здесь мы рассмотрим лишь транзисторы, в которых основной механизм переноса заряда – диффузия. Существуют также *дрейфовые транзисторы*, в которых перенос носителей осуществляется за счет дрейфа в электрическом поле, создаваемом на базе. Дрейфовые транзисторы могут иметь рабочие частоты выше 100 МГц, что является пределом для бездрейфовых транзисторов.

По максимальной рабочей частоте транзисторы подразделяются на низкочастотные (до 30 МГц), среднечастотные (от 30 МГц до 300 МГц), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц). По технологии изготовления переходов транзисторы делятся на сплавные, диффузионные, конверсионные, сплавно-диффузионные, мезатранзисторы, эпитаксимальные, планарные и т.д. Биполярные транзисторы изготавливаются в дискретном исполнении и в качестве компонентов интегральных микросхем

(ИС) Современные сверхбольшие интегральные схемы содержат десятки и сотни тысяч транзисторов, сформированных на площади в несколько квадратных миллиметров.

Схемы включения биполярного транзистора и режимы его работы.

При включении транзистора в схему один из его выводов делают общим для входной и выходной цепей. В соответствии с этим бывают три схемы включения транзистора: с **общей базой** (ОБ) (рисунок 3.10 а); с **общим эмиттером** (ОЭ) (рисунок 3.10 б); с **общим коллектором** (ОК) (рисунок 3.10 в).

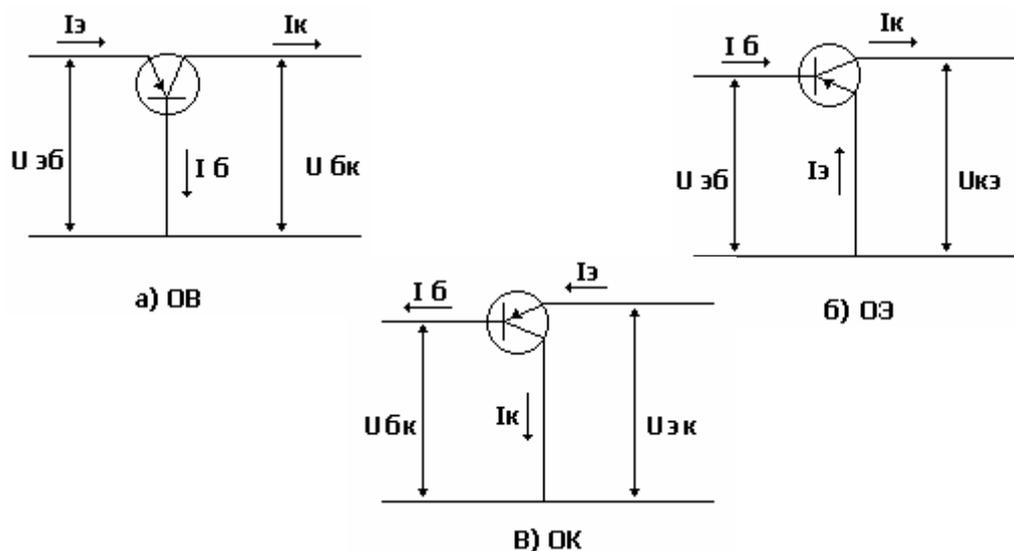


Рисунок 3.10

Существует четыре режима работы биполярных транзистора: *нормальный активный, двойной инжекции (насыщения), отсечки и инверсный активному*. В активном режиме: эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. В режиме насыщения: оба перехода включены в прямом направлении. В режиме отсечки: оба перехода включены в обратном направлении. В режиме инверсного активному: коллекторный переход включен в прямом направлении, а эмиттерный - в обратном.

Конкретная схема включения транзистора и выбор режима определяются задачей, которую должен выполнять этот прибор. Однако, прежде всего, необходимо представить себе физический механизм процессов, определяющих работу транзистора.

Работа биполярного транзистора в активном режиме.

Физические процессы в транзисторе удобнее рассматривать на примере схемы с общей базой (ОБ), которая приведена на рисунке 3.11.

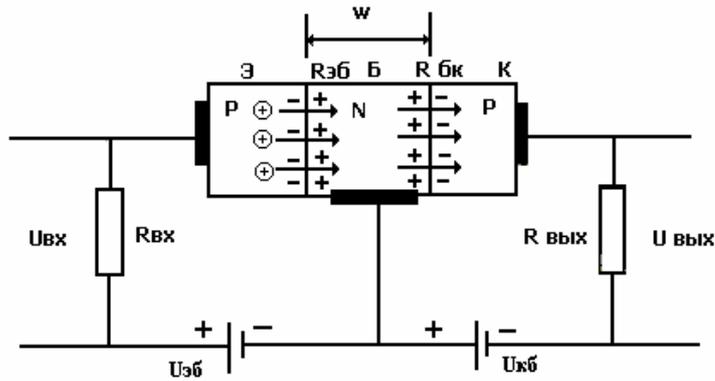


Рисунок 3.11

Рассмотрим работу на постоянном токе биполярного диффузионного сплавного транзистора $p-n-p$ структуры, включенного по схеме с ОБ в активном режиме. При создании транзисторов обязательно выполнение следующих условий:

- концентрация основных носителей базы должна быть много меньше концентрации основных носителей эмиттера;
- ширина базы не должна превышать диффузионную длину заряженных частиц ($w \leq L_p$).

В активном режиме эмиттерный переход (ЭП) включен в прямом направлении за счет включения постоянного источника питания $U_{эб}$, величина которого имеет небольшое значение (близкое к высоте потенциального барьера, т.е. доли вольт), а коллекторный переход (КП) – в обратном за счет включения источника $U_{кб}$, величина которого на порядок превышает $U_{эб}$ и ограничивается напряжением пробоя коллекторного перехода. Следовательно, выполняется соотношение: $R_{эб} \ll R_{бк}$, что позволяет включить в коллекторную цепь значительно большее сопротивление, чем в эмиттерную, т.е. $R_{вых} \gg R_{вх}$.

Дырки из эмиттера инжектируются в базу и диффундируют к коллекторному переходу. В базе созданы условия для минимальной рекомбинации инжектированных дырок с электронами базы, поскольку ширина базы значительно меньше диффузионной длины основных носителей. Кроме того, уровень легирования базы значительно ниже уровней легирования эмиттера и коллектора, т.е. концентрация электронов в базе меньше в концентрации дырок в эмиттере и коллекторе. По этим причинам, практически, все инжектированные в базу дырки доходят до коллектора, и поле коллекторного перехода втягивает (экстрагирует) их в коллектор.

Наряду с основными носителями заряда через эмиттерный и коллекторный переходы движутся и неосновные для каждой из областей транзистора носители. Движение неосновных носителей существенно влияет на работу транзистора и зависит от материала полупроводника и температуры (тепловая генерация).

Токи биполярного транзистора.

Таким образом, в эмиттере дырки создают ток $I_{Эр}$, а в коллекторе они представляют собой дырочную составляющую тока коллектора $I_{Кр}$, которая меньше тока $I_{Эр}$ на ток, вызванный рекомбинацией дырок в базе и называемый базовым током рекомбинации. Этот ток является нежелательным, поскольку он ухудшает усилительные свойства транзистора, его уменьшение достигается уменьшением толщины базы. Потерю дырочного тока эмиттера на рекомбинацию в базе характеризует коэффициент переноса дырок:

$$\beta = I_{Кр} / I_{Ээ} \quad (3.1)$$

приближенное значение которого определяют из соотношения:

$$\beta \approx 1 - 0.5 w^2 / L_p^2. \text{ В реальных транзисторах } \beta = 0.980 - 0.995.$$

Через эмиттер помимо дырочного протекает и электронный ток $I_{Эн}$, обусловленный переходом в область эмиттера электронов базы, а также обратный ток эмиттерного перехода $I_{Эо}$, образованный неосновными носителями областей базы (дырками) и эмиттера (электронами). Этот ток называется термогенерацией. Вследствие того, что ток $I_{Эо}$ мал и не влияет на ток коллектора, им можно пренебречь. Таким образом, ток эмиттера определяется:

$$I_{Э} = I_{Эр} + I_{Эн}. \quad (3.2)$$

Составляющая тока эмиттера $I_{Эн}$ является вредной, т.к. вызывает дополнительный нагрев транзистора.

Долю дырочного тока в эмиттере $I_{Эр}$ определяют коэффициентом инжекции:

$$\gamma = I_{Эр} / I_{Э}, \quad (3.3)$$

характеризующим эффективность работы эмиттера. Для уменьшения электронной составляющей эмиттерного тока базу насыщают примесью незначительно. При этом удается обеспечить $\gamma = 0.990 \div 0.995$. В коллекторе и базе следует также учитывать обратный ток коллекторного перехода $I_{Ко}$, образованный неосновными носителями областей базы и коллектора:

$$I_{К} = I_{Кр} + I_{Ко}. \quad (3.4)$$

Поскольку концентрация неосновных носителей значительно больше в базе, чем в коллекторе, обратный ток коллекторного перехода состоит в основном из дырок базы. Величина $I_{Ко}$ является параметром транзистора, характеризующим его качество (чем меньше $I_{Ко}$, тем транзистор лучше). Ток $I_{Ко}$

определяют при разомкнутой цепи эмиттера при определенном значении обратного напряжения на коллекторе. Ток I_{K0} вызывается термогенерацией и с повышением температуры растет по экспоненциальному закону.

В базе протекают ток $I_{Эн}$, образованный электронами, инжектированными в эмиттер, ток рекомбинации $I_{Брек}$ и обратный ток коллекторного перехода I_{K0} :

$$I_B = I_{Эн} + I_{Брек} - I_{K0} . \quad (3.5)$$

Ток I_{K0} направлен навстречу токам $I_{Эн}$ и $I_{Брек}$. Из моделей (3.2) и (3.4) видно:

$$I_B = I_Э - I_K , \quad (3.6)$$

что соответствует первому правилу Кирхгофа. Поскольку транзистор изготавливают так, чтобы обеспечить возможно меньшее значение тока базы, ток коллектора незначительно отличается от тока эмиттера: $I_K = I_Э$.

Итак, через транзистор течет сквозной ток от эмиттера через базу к коллектору.

Током коллектора можно управлять. Для этого следует изменить напряжение источника питания цепи эмиттера. С увеличением $U_{эб}$ снижается потенциальный барьер эмиттерного перехода и увеличивается ток эмиттера, а следовательно, и ток коллектора (при прочих равных условиях). Таким образом, ток эмиттера является управляющим, а ток коллектора - управляемым. Поэтому транзистор часто называют прибором, управляемым током. Отметим, что изменение обратного напряжения источника питания цепи коллектора практически не вызывает увеличения тока коллектора, так как поле коллекторного перехода является ускоряющим и не может изменять числа дырок, которые пересекают коллекторный переход.

Коэффициент передачи тока биполярного транзистора

1. Схема с общей базой

Итак, для улучшения работы транзистора необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициенты γ и β_n были близки к единице. Однако их нельзя измерить, а можно только рассчитать теоретически. Поэтому для расчетов вводят коэффициент передачи тока эмиттера (статический):

$$\alpha_{ст} = (I_K - I_{K0}) / I_Э = I_{Kp} / I_Э , \quad (3.7)$$

где I_{Kp} - дырочный ток коллектора;

$I_Э$ - ток эмиттера.

Этот коэффициент можно измерить, а его значение равно:

$$\alpha_{ст} = \gamma \beta_m \quad (3.8)$$

С учетом выражения (3.6):

$$I_K = \alpha_{CT} I_{\text{Э}} + I_{KO} \quad (3.9)$$

$$I_B = (1 - \alpha_{CT}) I_{\text{Э}} - I_{KO}. \quad (3.10)$$

Из модели (3.9) видно, что, изменяя ток эмиттера, можно управлять током коллектора.

2. Схема с общим эмиттером

В схеме с ОЭ входным является ток базы I_B , а выходным - ток коллектора I_K . Определить коэффициент передачи тока базы можно из соотношения:

$$I_K = \alpha_{CT} I_{\text{Э}} + I_{KO}, \quad (3.11)$$

С учетом выражения (3.6):

$$I_K = \alpha_{CT} (I_B + I_K) + I_{KO}. \quad (3.12)$$

Откуда

$$I_K = \frac{\alpha_{CT}}{1 - \alpha_{CT}} I_B + \frac{I_{KO}}{1 - \alpha_{CT}} \quad \text{или} \quad I_K = \beta_{CT} I_B + I_{KO(\text{Э})}. \quad (3.13)$$

Здесь статический коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ, выраженный через статический коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с ОБ:

$$\beta_{CT} = \alpha_{CT} / (1 - \alpha_{CT}). \quad (3.14)$$

Обратный ток коллекторного перехода в схеме с ОЭ:

$$I_{KO(\text{Э})} = \frac{I_{KO}}{1 - \alpha_{CT}} = (1 + \beta_{CT}) I_{KO}. \quad (3.15)$$

Значение β_{CT} можно получить из моделей (3.13) и (3.15):

$$\beta_{CT} = (I_K - I_{KO}) / (I_B + I_{KO}). \quad (3.16)$$

Из уравнения (3.13) следует, что схема с ОЭ обеспечивает большое усиление по току. Так, если $\alpha = 0,985$, то $\beta = 66$; при $\alpha = 0,99$ $\beta = 99$.

Усилительные свойства биполярного транзистора.

Биполярный транзистор обладает свойством усиливать электрический входной сигнал, благодаря чему его можно использовать в качестве активного элемента. Под усилением сигнала обычно подразумевается усиление мощности полезного сигнала, которое можно наблюдать при изменении или тока, или

напряжения, или того и другого. В зависимости от схемы включения (ОБ, ОЭ, ОК) транзистор усиливает либо ток, либо напряжение, либо то и другое /3, 4, 7/.

Схема с ОБ. В такой схеме значение тока коллектора близко к значению тока эмиттера, т. е. усиления по току не происходит. Однако в этом случае имеется усиление по напряжению и, следовательно, по мощности. Поскольку сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов, а также нагрузки включены последовательно и ток через них почти одинаков, небольшое изменение тока эмиттера вызовет небольшое изменение напряжения в эмиттерной цепи, тогда как в коллекторной цепи это изменение будет весьма значительным, если R_k велико. В этом случае напряжение, а следовательно, и мощность возрастут во много раз.

При работе транзистора в усилительном режиме на его вход подается переменный сигнал, который нужно усилить. Напряжение источника питания постоянно, но переменное напряжение, подаваемое на коллектор (даже малое), приводит к большим изменениям (колебаниям) переменного напряжения сигнала на резисторе R_k , т.е. в схеме происходит усиление малого переменного входного сигнала.

Схема с ОЭ. Здесь происходит усиление и по току, и по напряжению. Входным током является ток базы, значительно меньший тока эмиттера. Изменяя входное напряжение, меняем высоту потенциального барьера и число основных носителей заряда эмиттера через базу и соответственно через коллектор. Т.к. в базу от источника поступает меньше носителей, чем инжектируется из эмиттера в базу и коллектор, то незначительное увеличение тока во входной цепи вызывает сильное изменение тока в выходной цепи.

Таким образом, транзистор, включенный по схеме с ОЭ, характеризуется большим усилением по току. При этом имеется и усиление по напряжению: так как выходное сопротивление велико, в цепь коллектора можно включить резистор R_k с большим сопротивлением, напряжение на котором будет больше, чем входное. Соответственно происходит и усиление по мощности.

В схеме с ОК происходит усиление по току и по мощности, усиления по напряжению нет.

Статические характеристики биполярного транзистора:

а) входные и выходные характеристики транзистора в схеме с ОБ

В этом случае семейство входных статических характеристик представляет собой зависимости $I_{Э} = f(U_{ЭБ})$ при $U_{кБ} = \text{const}$. По виду эти характеристики напоминают прямые ветви вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов. При небольших напряжениях ток изменяется по экспоненциальному закону, с ростом напряжения характер зависимостей становится прямолинейным. При $U_{кБ} = 0$ характеристики совпадают с характеристикой $p-n$ -перехода, включенного в прямом направлении.

При увеличении абсолютного значения напряжения на коллекторе кривые незначительно смещаются влево и вверх и располагаются достаточно

плотно, так как влияние $U_{кб}$ на ток $I_э$ мало. Оно проявляется только в том, что при повышении $|U_{кб}|$ увеличивается смещение коллекторного перехода, т.е. уменьшается толщина базы. Следует обратить внимание на то, что при $U_{эб} = 0$ и $U_{кб} \neq 0$ ток эмиттера не равен нулю. В этом случае транзистор работает в режиме отсечки ($U_{кб} < 0$) или насыщения ($U_{кб} > 0$).

Входное сопротивление транзистора в схеме с ОБ незначительно и составляет единицы или десятки Ом, так как небольшое изменение напряжения эмиттера значительно влияет на высоту потенциального барьера эмиттерного перехода, включенного в прямом направлении, и, следовательно, на ток эмиттера.

Семейство выходных статических характеристик представляет собой зависимость $I_к=f(U_{кб})$ при $I_э=const$. При увеличении тока эмиттера ток коллектора увеличивается при заданном напряжении на коллекторе. При $I_э = 0$ через коллектор проходит обратный ток коллекторного перехода $I_к$ который практически не зависит от напряжения на коллекторе. При напряжении на коллекторе, равном нулю, $I_к \neq 0$, так как ток эмиттера в этом случае не равен нулю. При прямом напряжении на коллекторном переходе ток с изменением напряжения резко меняется - транзистор работает в режиме насыщения.

Выходное сопротивление в схеме с ОБ очень велико, достигает единиц мегаом, так как изменение напряжения па коллекторе почти не влияет на ток коллектора значение которого определяется током эмиттера и обратным током коллекторного перехода $I_к$. На значение $I_{к0}$, напряжение коллектора влияния не оказывает.

б) входные и выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

Рассмотрим теперь входные (рисунок 3.12 а) и выходные (рисунок 3.12 б) статические характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. В этом случае так же, как и в схеме ОБ, входным напряжением транзистора будет напряжение между базой и эмиттером ($U_{эб}$).

Семейство характеристик $I_б=f(U_{эб})$ по внешнему виду сходно с семейством $I_э=f(U_{эб})$. Однако имеется ряд отличий. Во-первых, ток базы значительно меньше тока эмиттера. Во-вторых, при закрытом эмиттерном переходе ($U_{эб}>0$) в цепи базы будет протекать ток $I_{к0}$ - обратный ток коллекторного перехода. В-третьих, с увеличением отрицательного напряжения $U_{кэ}$, кривые $I_б = f(U_{эб})$ сдвигаются вправо, а сами кривые более линейны, чем входные характеристики того же транзистора, включенного по схеме ОБ. В-четвертых, при $U_{кэ} = 0$ входная характеристика соответствует прямой ветви ВАХ двух *p-n*-переходов (эмиттерного и коллекторного), включенных параллельно, и проходит через начало координат.

Входные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ отличаются от входных характеристик того же транзистора, включенного по схеме ОБ. Различия обусловлены тем, что выходное напряжение $U_{кэ}$ приложено одновременно к обоим переходам транзистора и в зависимости от соотношений между $|U_{кэ}|$ и $|U_{эб}|$ режим транзистора меняется. При $|U_{кэ}| < |U_{эб}|$ и

одинаковой полярности этих напряжений («минус» на коллекторе и на базе) транзистор будет находиться в режиме насыщения. Т.к. и на эмиттерном, и на коллекторном переходах будет приложено прямое напряжение.

При увеличении $|U_{кэ}|$ напряжение коллекторном переходе при $|U_{кэ}| > |U_{эб}|$ окажется обратным. При этом транзистор переходит в активный режим. В режиме насыщения ток $I_к$ сильно зависит от $|U_{кэ}|$ (участок ОА на рисунке 3.12 б). В активном режиме на семействе характеристик транзистора (см. рисунок 3.12 б) будет наблюдаться пологий участок. В отличие от семейства характеристик для схемы с ОБ, пологие участки семейства характеристик $I_к = f(U_{кэ})$ при $I_б = \text{const}$ имеют большой наклон. Тогда при расчете выходного сопротивления в схеме ОЭ, его величина будет намного меньше входного сопротивления по схеме с ОБ.

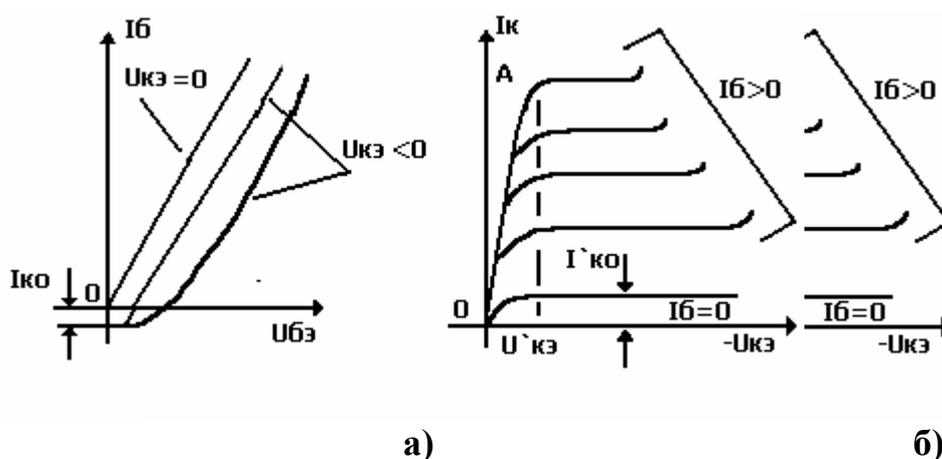


Рисунок 3.12

Особенности выходных характеристик в схеме ОЭ следующие:

1) При увеличении $|U_{кэ}|$ от нуля до некоторого значения $U'_{кэ}$ ток коллектора резко возрастает (на рисунке 3.12 б участок ОА).

2) При дальнейшем увеличении $|U_{кэ}|$ происходит переход работы транзистора из режима насыщения в активный режим. Характеристики идут с небольшим подъемом.

3) Чем больше ток $I_б$, тем больше наклон. Кроме того, характеристики заметно сгущаются при больших значениях тока базы. И чем больше $I_б$, тем быстрее при меньших значениях $|U_{кэ}|$ наступает электрический пробой.

4) При значениях тока базы $I_б = 0$ выходной ток транзистора $I_к \gg I_{к0}$ (см. рисунки 3.12 а и 3.12 б).

Влияние температуры на характеристики транзистора.

Температура окружающей среды существенно влияет как на входные, так и выходные характеристики транзистора (рисунок 3.13 а, б соответственно). Это объясняется тем, что при увеличении температуры увеличивается энергия электронов, вследствие чего увеличивается концентрация свободных носителей заряда во всех областях транзистора, их подвижность и др. Особенно сильно

возрастание температуры сказывается на обратном токе коллекторного перехода I_{K0} , который часто называют тепловым током.

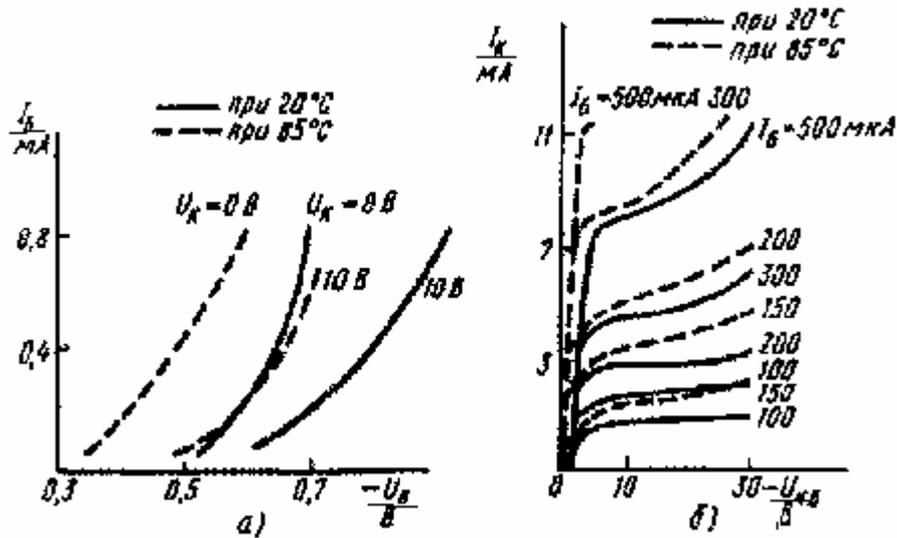


Рисунок 3.13

Температурная нестабильность характеристик транзистора является их существенным недостатком.

Параметры биполярных транзисторов:

1. Малосигнальные параметры транзистора используются в усилительных устройствах для малых переменных токов. Транзистор можно рассматривать как активный четырехполюсник (рисунок 3.14).

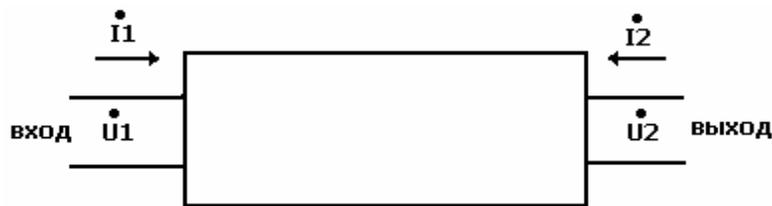


Рисунок 3.14

Используя теорию четырехполюсника, установим связь между входными и выходными токами и напряжениями транзистора через Н-параметры, которые описывают зависимости $u_1 = f(i_1, u_2)$ и $i_2 = f(i_1, u_2)$. В общем случае транзистор является нелинейным элементом. Для бесконечно малых приращений токов и напряжений можно записать:

$$du_1 = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_1}{\partial u_2} du_2$$

$$di_2 = \frac{\partial i_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial i_2}{\partial u_2} du_2 \quad , \quad (3.17)$$

Если в модели (1.34) коэффициенты в виде частных производных обозначить буквами Н, получим систему Н-параметров:

$$\begin{aligned} du_1 &= H_{11} di_1 + H_{12} du_2; \\ di_2 &= H_{21} di_1 + H_{22} du_2. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Если на статических характеристиках рассматривать небольшую область, то связь между постоянным током и напряжением с некоторым приближением можно считать линейной, а транзистор – линейным четырехполюсником. Тогда дифференциалы в выражении (3.18) можно заменить абсолютными значениями малых приращений токов и напряжений:

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= H_{11} \Delta i_1 + H_{12} \Delta u_2; \\ \Delta i_2 &= H_{21} \Delta i_1 + H_{22} \Delta u_2. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Н-параметры являются дифференциальными и характеризуют свойства транзистора в статическом режиме (при работе без нагрузки) в рабочей точке, положение которой на статических характеристиках определяется значениями постоянных напряжений (и соответственно токов) на входных и выходных зажимах транзистора. Определить Н-параметры можно опытным путем, осуществляя режимы короткого замыкания и холостого хода по переменному току. Для схемы с ОЭ $U_1=U_{БЭ}$, $U_2=U_{КЭ}$, $I_1=I_Б$, $I_2=I_К$ и уравнения четырехполюсника имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{БЭ} &= H_{11} I_Б + H_{12} U_{КЭ}; \\ I_К &= H_{21} I_Б + H_{22} U_{КЭ}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Откуда значения параметров:

$$H_{11Э} = \left. \frac{U_{БЭ}}{I_Б} \right|_{U_{КЭ} = 0} \quad - \text{ входное сопротивление при коротком замыкании}$$

выходной цепи;

$$H_{12Э} = \left. \frac{U_{БЭ}}{U_{КЭ}} \right|_{I_Б = 0} \quad - \text{ коэффициент обратной связи по напряжению при}$$

холостом ходе со стороны входной цепи;

$$H_{21Э} = \left. \frac{I_К}{I_Б} \right|_{U_{КЭ} = 0} \quad - \text{ коэффициент передачи тока (усиления) при}$$

коротком замыкании выходной цепи;

$$H_{22\Omega} = \left. \frac{I_K}{U_{K\Omega}} \right|_{I_B = 0} - \text{выходная проводимость при холостом ходе во}$$

входной цепи.

Модули H -параметров можно определить по статическим входным и выходным характеристикам. Рассмотрим в качестве примера схему с ОЭ. Параметры $H_{11\Omega}$ и $H_{12\Omega}$ определяют по входным статическим характеристикам (рисунок 3.15 а). Для этого из выбранной рабочей точки A на линейной части характеристики проводят до пересечения с соседней характеристикой две прямые линии: одну - параллельно оси токов AA' , другую - оси напряжения $A'A''$. В полученном характеристическом треугольнике $AA'A''$ катет AA' - приращение тока базы ΔI_B , а катет $A'A''$ - приращение напряжения базы $\Delta U_{B\Omega}$. Приращение напряжения коллектора $\Delta U_{K\Omega}$ - это разность напряжений, при которых снимались обе характеристики: $\Delta U_{K\Omega} = U_{K\Omega 1} - U_{K\Omega 2}$. Из треугольника $AA'A''$ имеем $H_{11\Omega} = \Delta U_{B\Omega} / \Delta I_B$ и $H_{12\Omega} = \Delta U_{B\Omega} / \Delta U_{K\Omega}$ при $U_{K\Omega} = 0$.

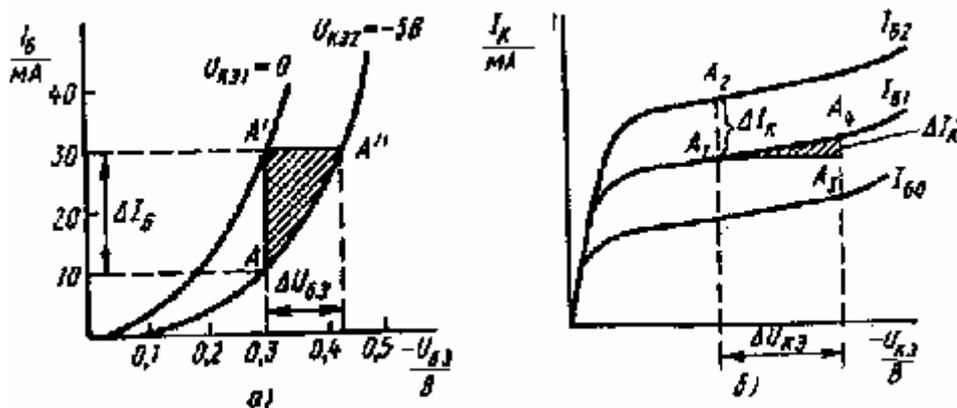


Рисунок 3.15

Параметры $H_{21\Omega}$ и $H_{22\Omega}$ определяют по выходным статическим характеристикам (рисунок 3.15 б). Значения модулей H -параметров обычно приводят в справочниках, где указывают их усредненные значения.

2. *Собственные параметры.* Транзистор можно характеризовать также физическими параметрами, не зависящими от способа его включения. К ним относятся сопротивление эмиттера R_{Ω} , сопротивление базы R_B и сопротивление коллектора R_K .

3. *Частотные параметры.* Так как электрические сигналы могут иметь разную частоту, то важно знать, как изменяются с частотой параметры транзистора и в первую очередь коэффициент передачи тока (эмиттера или базы), а также коэффициент усиления по мощности. Знание таких зависимостей позволяет определять пригодность транзистора для работы в схемах с сигналами заданной частоты. При изменении частоты сигнала меняется время диффузии инжектированных в базу носителей заряда. Так, если транзистор имеет структуру $p-n-p$ типа и если передается сигнал низкой частоты, то период

колебаний усиленного сигнала значительно больше времени диффузии. В этом случае концентрация инжектированных в базу носителей заряда убывает от эмиттерного перехода к коллекторному.

При передаче сигнала высокой частоты период усиленного сигнала становится соизмеримым с временем диффузии и закон изменения концентрации изменяется. В какие-то моменты времени появляются участки с максимальной концентрацией в середине базы, поэтому диффузия носителей происходит и в сторону эмиттерного перехода. Это вызывает усиление рекомбинации носителей заряда в базе, вследствие чего уменьшается эмиттерная составляющая тока, переданного в коллектор ($I_{кр}$), а, следовательно, уменьшится коэффициент передачи тока эмиттера. Инерционность процессов в базе приводит также к фазовому сдвигу между токами $I_{эр}$ и $I_{кр}$, поэтому $H_{21Б}$ становится величиной комплексной.

При высоких частотах сигнала наблюдаются фазовые сдвиги между эмиттерным и коллекторным токами вследствие того, что движение носителей через базу в коллектор будет происходить сравнительно медленно и изменения тока коллектора запаздывают по отношению к изменениям тока эмиттера. За счет сдвига фаз будет возрастать переменный ток базы, что снизит коэффициент передачи тока базы β , и коэффициент $H_{21э}$ при высокой частоте будет также комплексной величиной.

3.2.2 Полевой транзистор

Интенсивное развитие интегральной технологии в полупроводниковом приборостроении привлекают все большее внимание к явлениям, происходящим в приповерхностном слое полупроводника. Особое место среди этих явлений занимает эффект поля – изменение электропроводимости поверхностного слоя под действием электрического поля, направленного перпендикулярно поверхности.

Полевые транзисторы - это полупроводниковые приборы, усилительные свойства которых обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем /4, /.

Полевые транзисторы предназначены для усиления мощности и преобразования электрических колебаний. В полевых транзисторах в образовании выходного тока участвуют носители только одного типа: или дырки, или электроны. Отсюда другое название полевых транзисторов - униполярные. Носители заряда являются основными для активной области полевого транзистора, которую называют каналом. Существует два типа полевых транзисторов: с управляющим *p-n*-переходом и изолированным затвором.

1. Транзисторы с управляющим p - n -переходом

Рассмотрим упрощенную структуру и принцип действия транзистора с управляющим p - n -переходом (рисунок 3.16 а). Транзистор представляет собой пластину полупроводника n - или p -типа, на гранях которой созданы области противоположного типа электропроводности 3 , на границах между вторыми образованы p - n -переходы. На торцевых сторонах пластины и на областях формируют омические контакты. Контакты областей 3 соединены между собой и образуют общий контакт. От всех трех контактов имеются выводы.

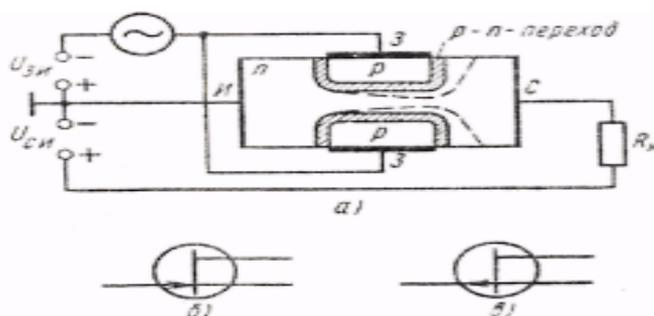


Рисунок 3.16

Часть объема пластины полупроводника, расположенная между p - n -переходами, является активной частью транзистора - **канал** транзистора. Контакт, через который носители заряда входят в канал, называют **истоком** (И); контакт, через который носители заряда вытекают, называют **стоком** (С); общий электрод от контактов областей (3) - **затвором**. В дальнейшем будем рассматривать транзистор на основе пластины полупроводника n -типа (рисунок 3.16 а) с областями на гранях p -типа.

На оба p - n -перехода подается обратное напряжение смещения. Если бы канал был p -типа, а области на гранях n -типа, то полярность была бы обратной. При изменении $U_{зи}$ изменяются ширина p - n -перехода, а следовательно, и сечение канала и его электрическое сопротивление. Таким образом, $U_{зи}$ управляет сопротивлением канала.

Если между истоком и стоком включить источник напряжения $U_{си}$ так, чтобы потенциал стока был положительным относительно истока, то через канал начнется дрейф основных для канала носителей заряда (электронов) от истока к стоку, т.е. через канал будет проходить ток I_C (направление тока от стока к истоку). Включение источника $U_{си}$ влияет и на ширину p - n -перехода, так как напряжение на p - n -переходе оказывается разным около стока и истока. Потенциал канала меняется по его длине: потенциал истока равен нулю, повышаясь в сторону стока, потенциал стока равен $U_{си}$. Напряжение смещения на p - n -переходе вблизи истока равно $|U_{зи}|$, вблизи стока $|U_{зи}| + U_{си}$, т.е. ширина p - n -перехода больше со стороны стока, а сечение канала и, следовательно, сопротивление его наименьшие вблизи стока (пунктирная линия на рисунке

3.16 а). Таким образом, током через канал можно управлять путем изменения напряжений $U_{зи}$ (изменяет сечение канала) и $U_{си}$ (изменяет ток и сечение по длине канала).

Рассмотрим, какие критические значения могут принимать напряжения, при которых изменяется режим работы транзистора.

Обратное напряжение смещения $U_{зи}$, при котором наступает режим отсечки и транзистор оказывается запертым (ток через него не протекает), называют напряжением отсечки $U_{отс}$. При этом значении напряжения $p-n$ -переходы смыкаются и поперечное сечение канала становится равным нулю.

Напряжение на стоке, при котором суммарное напряжение $|U_{зи}| + U_{нас}$ становится равным напряжению отсечки $U_{отс}$ называют напряжением насыщения $U_{нас}$, следовательно:

$$U_{нас} = |U_{отс}| - |U_{зи}| \quad (3.21)$$

Режим, когда $U_{си} > U_{си\text{нас}}$, называют режимом насыщения. В этом режиме почти прекращается рост тока стока, несмотря на увеличение напряжения $U_{си}$. Это объясняется тем, что одновременно увеличивается обратное напряжение на затворе, вследствие чего канал сужается, что уменьшает ток I_c . И в результате ток I_c почти не изменяется.

Сравнивая оба режима, можно заключить, что в режиме отсечки сопротивление канала стремится к бесконечности, и при $R_K = \infty$ ток $I_c = 0$, а в режиме насыщения дифференциальное сопротивление, равное $R_{диф} = dU_{си}/dI_c$, стремится к бесконечности, а ток I_c с ростом $U_{си}$ остается без изменения.

На рисунке 3.16 б, в показано обозначение транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом с каналами n - и p - типа соответственно. Полевые транзисторы, как и биполярные, имеют три схемы включения (рисунок 3.17): с общим истоком (ОИ) (а), общим стоком (ОС) (б) и с общим затвором (ОЗ) с каналом n - типа (в). Основной схемой включения является схема с ОИ (см. рисунок 3.17, а).

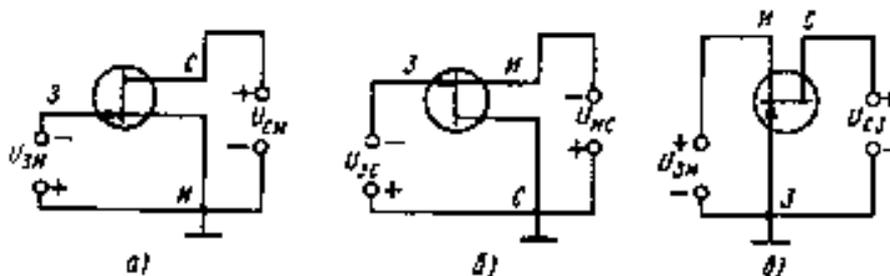


Рисунок 3.17

Основными статическими характеристиками транзистора с управляющим $p-n$ -переходом являются выходные (стоквые) и характеристики прямой передачи (стокзатворные). Стоквые характеристики - это зависимости $I_c =$

$f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ (рисунок 3.18). С повышением $U_{си}$ ток I_c увеличивается почти прямолинейно и при достижении $U_{си} = U_{нас}$ (точки н) рост I_c прекращается. Насыщение наступает при тем меньших значениях $U_{си}$, чем больше $|U_{зи}|$.

На рисунке 3.19 показано семейство характеристик прямой передачи зависимости $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$.

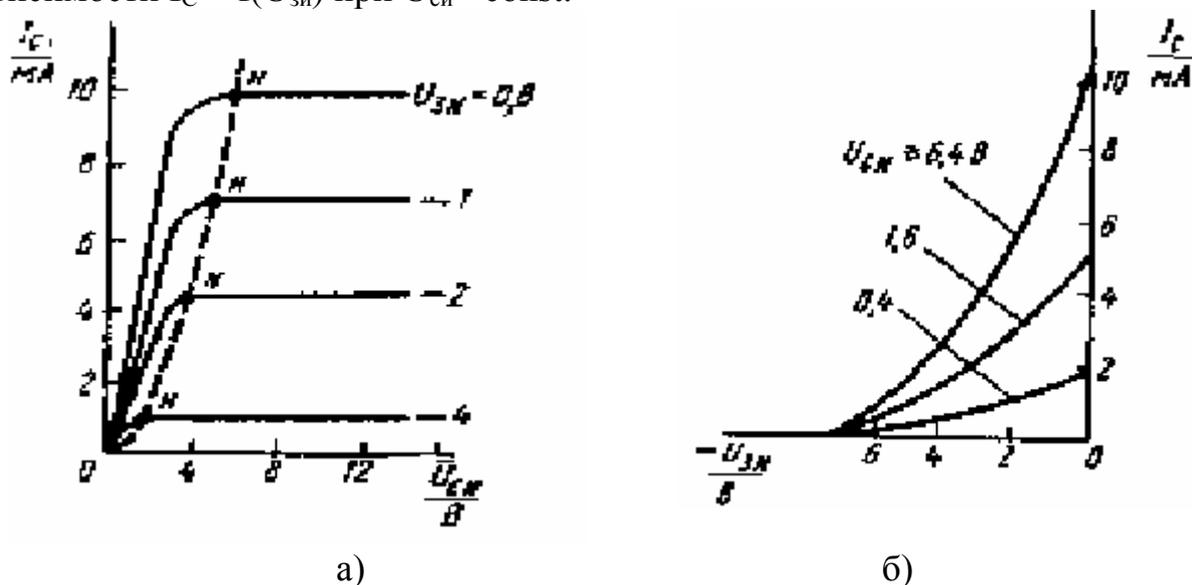


Рисунок 3.19

В динамическом режиме на работу транзистора существенное влияние оказывают зарядные емкости $p-n$ -переходов: входная $C_{зи}$ и проходная $C_{зс}$. Входная емкость - это часть барьерной емкости $p-n$ -перехода между затвором и истоком, а проходная - часть барьерной емкости $p-n$ -перехода между затвором и стоком. Кроме того, учитывают емкость между истоком и стоком $C_{си}$. Эти емкости заряжаются через сопротивления каналов. Заряд-разряд емкостей не происходит мгновенно, что и обуславливает инерционность прибора, а следовательно, влияет на частотные свойства полевых транзисторов. Отметим, что так как (в отличие от биполярных транзисторов) работа полевых транзисторов не связана с инжекцией неосновных носителей заряда и их движением к коллектору, то они свободны от влияния этих факторов на их частотные свойства.

Основными параметрами транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом являются:

$$- S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}} \quad \text{— крутизна стокзатворной характеристики (здесь для}$$

схемы с ОИ), представляющая собой отношение изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора. Крутизна характеризует управляющее действие затвора. Ее измеряют при $U_{зи}=0$ и $U_{си}=U_{нас}$ по характеристике прямой передачи. Значения S обычно составляют несколько миллиампер на вольт;

$$- R_{ВХ.ДИФ.} = \left. \frac{dU_{ЗИ}}{dI_3} \right|_{U_{СИ=CONST}} \quad - \text{ входное дифференциальное сопротивление,}$$

где I_3 - ток затвора, вызванный движением неосновных носителей через $p-n$ -переход. Так как концентрация неосновных носителей в канале (p_n) и в p -областях (p_p) невелика, то обратный ток мал и почти не зависит от напряжения $|U_{ЗИ}|$. Поэтому $R_{ВХДИФ}$ очень велико и составляет от 10^6 до 10^{10} Ом;

$$- R_{ВЫХ.ДИФ.} = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ=CONST}} \quad - \text{ выходное дифференциальное сопротивление}$$

(дифференциальное сопротивление цепи стока). Это сопротивление принимает значение от 10^5 до 10^7 Ом;

- $U_{огс}$ – напряжение отсечки – напряжение на затворе при $I_C=0$ и $U_{СИ}=0$;
- $C_{ЗИ}$ – междуэлектродная емкость затвор-исток;
- $C_{ЗС}$ – междуэлектродная емкость затвор-сток;
- $C_{СИ}$ – междуэлектродная емкость сток-исток. Эти емкости измеряют при разомкнутых по переменному току остальных выводах.

2. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Транзисторы этого типа называют также МДП-транзисторами (металл – диэлектрик – полупроводник) или МОП-транзисторами (металл – окисел – полупроводник), если в качестве диэлектрика используют окисел, например, SiO_2 . Металлический электрод, обычно, наносят распылением в вакууме; это – затвор. МДП-транзисторы бывают двух типов: со встроенным каналом и с индуцированным каналом.

МДП-транзистор со встроенным каналом (рисунок 3.20). Его основу составляет слабо насыщенная примесью пластина (подложка) полупроводника с электропроводностью n - или p -типа, в которой созданы две сильно насыщенные примесью области противоположного типа электропроводности. Эти области соединены между собой, т.е. в МДП-транзисторе со встроенным каналом, последний создается технологически.

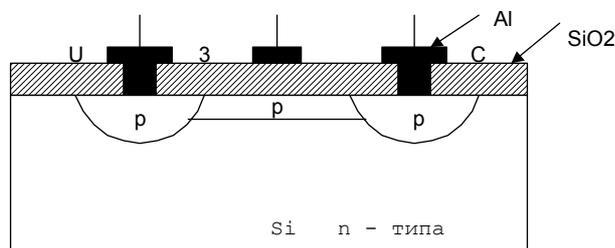


Рисунок 3.20

На рисунках 3.21 а, б, в показаны схемы включения транзистора: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС), с общим затвором (ОЗ).

Принцип работы МДП-транзистора со встроенным каналом рассмотрим на примере схемы с ОИ (рисунок 3.21 а). В полупроводнике у его поверхности

в электрическом поле происходит обеднение или обогащение приповерхностного слоя носителями заряда, что зависит от направления электрического поля в канале транзистора. Это направление электрического поля определяется знаком потенциала на затворе относительно пластины. Если на затвор подан положительный потенциал, электрическое поле будет выталкивать дырки из канала, и канал обеднится основными носителями (дырками), а проводимость канала уменьшится.

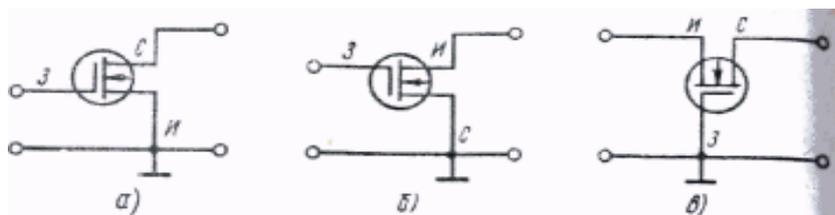


Рисунок 3.21

Если на затвор подан отрицательный потенциал, то дырки начнут втягиваться в канал и обогащать его основными носителями, проводимость канала увеличится. В первом случае транзистор работает в режиме обеднения, во втором случае - в режиме обогащения. Если исток и сток подсоединить к источнику питания $U_{си}$, то начнется дрейф дырок через канал, т.е. через канал пройдет ток стока I_c , значение которого зависит как от $U_{си}$ так и от $U_{зи}$. При прохождении тока в канале создается падение напряжения. Потенциал истока равен нулю, а потенциал стока равен $U_{си}$. На границе пластины n -типа с областями p -типа и каналом p -типа образуется p - n -переход, который смещен в обратном направлении. Так как в МДП-транзисторах затвор изолирован от полупроводника пленкой диэлектрика, то эти транзисторы могут работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении $U_{зи}$.

Статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом p -типа показаны на рисунке 3.22. Выходные (стокосые) - на рисунке 3.22 а; переходные характеристики (стокозатворная) - на рисунке 3.22 б; для режима обеднения - область I, обогащения - область II.

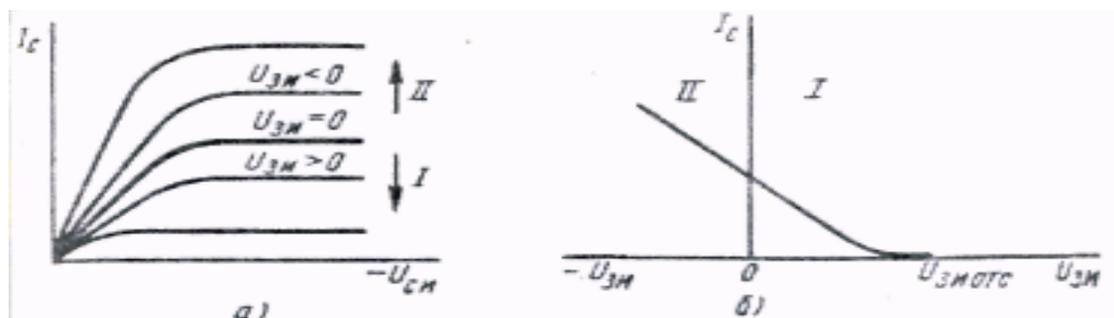


Рисунок 3.22

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом (рисунок 3.23) канал не создается в процессе изготовления, а образуется под воздействием электрического поля.

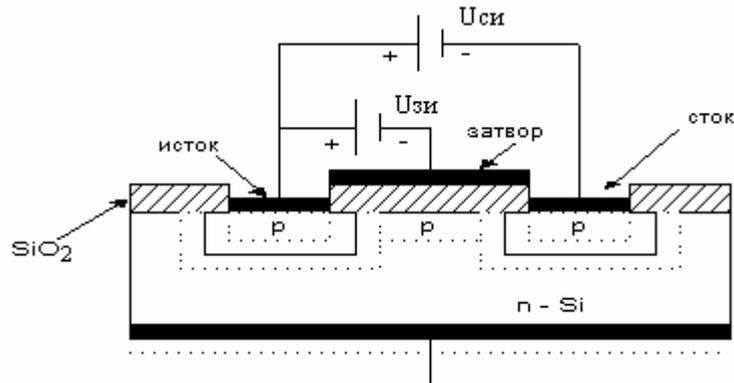


Рисунок 3.23

Если к транзистору с ОИ подключить напряжение $U_{си}$, по цепи стока пойдет обратный ток p - n -перехода, значение которого очень мало. При подключении в цепь затвора напряжения $U_{зи}$ так, чтобы потенциал затвора относительно истока и пластины был обязательно отрицательным (для транзистора на рисунке 3.23), под действием электрического поля под затвором приповерхностный слой пластины полупроводника обеднится. Если $U_{зи}$ достигнет определенного значения, называемого пороговым $U_{пор}$, то слой полупроводника под затвором настолько обеднится, что произойдет его инверсия: образуется канал p -типа, который соединит обе области p -типа. Если $U_{си}$ не равно 0, по каналу потечет ток стока. Изменяя напряжение на затворе, можно менять толщину и поперечное сечение канала и тем самым его сопротивление, а следовательно, и ток стока. На значение I_C влияет также напряжение $U_{си}$. При этом изменяется и форма канала.

Семейство выходных статических характеристик (рисунок 3.24 а) аналогично семейству выходных характеристик транзистора с управляющим p - n -переходом.

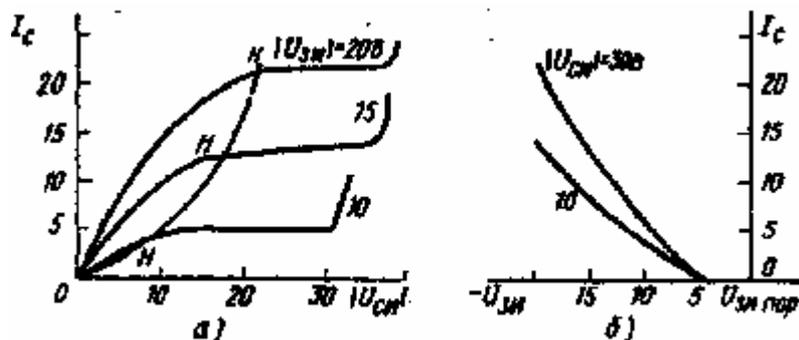


Рисунок 3.24

Однако характеристика для $U_{зи} = 0$ в этом случае отсутствует, так как канал индуцируется при $U_{зи} > U_{пор}$. Переходные характеристики (рисунок 3.24 б) $I_C = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$. Они сдвинуты относительно нуля координат на $U_{пор}$.

Параметры МДП-транзисторов те же, что и у транзисторов с управляющим p - n -переходом. В качестве параметра используют также крутизну характеристики по подложке:

$$S_n = \left. \frac{dI_{C_{НАС}}}{dU_n} \right|_{\substack{U_{зи} = const \\ U_{си} = const}}$$

С помощью S_n учитывается влияние напряжения на пластине на ток стока. Обычно $S_n < S$.

На рисунке 3.25 а, в даны условные обозначения МДП-транзистора с встроенным n - и p -каналом, на рисунке 3.25 б, г – с индуцированным n и p -каналом.

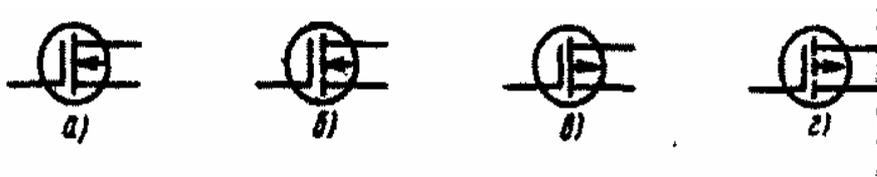


Рисунок 3.25

МДП-транзисторы с индуцированным каналом используют чаще, чем транзисторы с встроенным каналом. Существенно то, что при отсутствии сигнала на входе они находятся в закрытом состоянии и не потребляют мощности от источника питания.

Применение полевых транзисторов

Полевые транзисторы нашли широкое применение в радиоэлектронике. МДП-транзисторы имеют очень высокое входное сопротивление ($R_{ВХ} > 10^{14}$ Ом, иногда до 10^{17} Ом). Транзисторы с управляющим p - n -переходом имеют более низкое входное сопротивление (до 10^{11} Ом при комнатной температуре). Кроме того, параметры МДП-транзисторов меньше зависят от температуры, чем биполярных (так как принцип их работы основан на использовании только основных носителей). Полевые транзисторы могут работать при низких температурах (близко к абсолютному нулю), имеют высокую стабильность параметров во времени при воздействии различных внешних факторов, обладают высокой радиационной устойчивостью (на порядок больше, чем кремниевые биполярные), что важно при использовании транзисторов в космической технике и с низким уровнем шумов в области частот до 10 Гц. Коэффициент шума составляет $\sim 0,1$ дБ при сопротивлении источника сигнала ~ 1 МОм.

Полевые транзисторы просты в изготовлении, поэтому выход годных приборов выше, чем биполярных. При использовании их в интегральных микросхемах удастся получить высокую плотность расположения элементов (на порядок выше, чем в схемах на биполярных транзисторах). В монолитных интегральных схемах на МДП-транзисторах их можно использовать в качестве резисторов (МДП-транзисторы, работающие на ненасыщенных участках статических характеристик). Полевые транзисторы применяют в логических схемах, так как большие матрицы из этих элементов располагаются очень компактно. Их широко используют в цифровых вычислительных машинах.

Однако, несмотря на целый ряд преимуществ полевых транзисторов перед биполярными, они не могут заменить их полностью. Это, в частности, связано с малым коэффициентом усиления полевых транзисторов. Рабочий диапазон частот полевых транзисторов значительно меньше, чем биполярных: их чаще всего используют до частот в несколько мегагерц.

В гибридных микросхемах совместно используются и полевые, и биполярные транзисторы, что позволяет создавать схемы с улучшенными свойствами. Полевые транзисторы применяют в схемах усилителей, генераторов, переключателей.

3.3 Тиристор

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя и более $p-n$ – переходами, имеющий на ВАХ участок с отрицательным сопротивлением S . Тиристор может находиться в двух состояниях – закрытом (когда на приборе падает большое напряжение и через него течет малый ток) и в открытом состоянии (малое напряжение и большой ток). Тиристоры используются, в основном, в схемах переключения /4, 8/.

Рассмотрим двухэлектродный тиристор (динистор), представляющий собой четырехслойную структуру, содержащую три $p-n$ -перехода (рисунок 3.26).

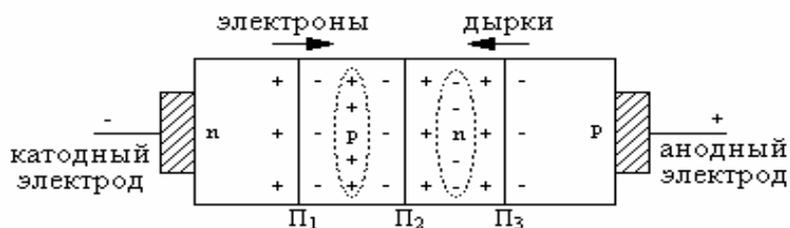


Рисунок 3.26

Переходы П1 и П3 включены в прямом направлении; их называют эмиттерными. Переход П2 коллекторный, он включен в обратном направлении. Таким образом, структура содержит две эмиттерные области (n и p – эмиттеры) и

две базовые (n и p - базы). В такой структуре реализуется внутренняя положительная обратная связь, которая приводит к переключению (рисунок 3.26).

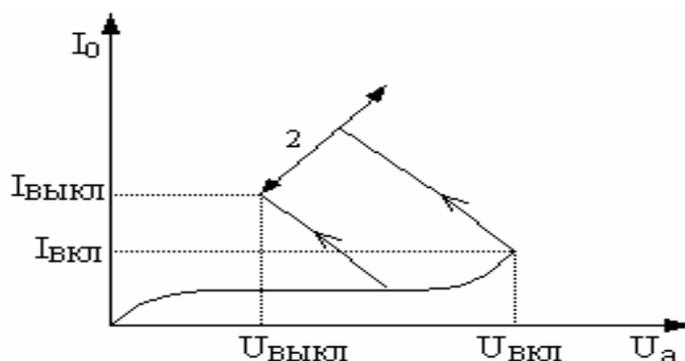


Рисунок 3.27

Участок 1 вольтамперной характеристики, изображенной на рисунке 3.27, подобен обратной ветви ВАХ диода, т.к. большая часть приложенного к структуре внешнего напряжения падает на коллекторном переходе, включенном в обратном направлении. С увеличением напряжения увеличивается и прямое напряжение на эмиттерных переходах П1 и П3. Электроны, инжектированные из n – эмиттера в p – базу, образуя в ней избыточный отрицательный заряд, понижающий потенциальный барьер для дырок перехода П3. Это вызывает увеличение инжекции дырок из p – эмиттера в n – базу, создавая в ней избыточный положительный заряд. Последнее обстоятельство увеличивает инжекцию электронов из n – эмиттера в p – базу и т.д. Так образуется положительная обратная связь.

В результате накопления избыточного положительного заряда в p – базе и отрицательного в n – базе при некотором напряжении $U_{ВКЛ}$ коллекторный переход оказывается включенным в прямом направлении, происходит резкое увеличение тока и одновременно уменьшение падения напряжения на тиристоре (участок 2 на рисунок 3.27). Для поддержания включенного (открытого) состояния необходим ток, поддерживающий избыточный заряд в базах. Если же ток понизить до значения $I_{ВЫКЛ}$, то в результате рекомбинации и рассасывания избыточных зарядов переход П2 вновь окажется включенным в обратном направлении и тиристор выключится (перейдет в закрытое состояние). Структура тиристора может быть представлена как два эквивалентных транзистора, соединенных между собой, как это показано на рисунке 3.28.

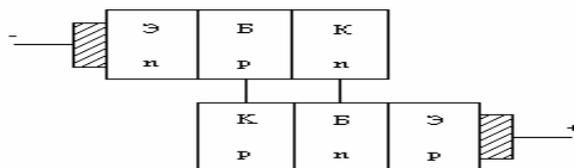


Рисунок 3.28

Для такой структуры справедливо соотношение:

$$I_{n2} = \alpha_1 \cdot I_{n1} + \alpha_1 \cdot I_{n3} + I_{кбо}, \quad (3.22)$$

где I_{n1}, I_{n2}, I_{n3} - токи переходов П1, П2, П3;

α_1, α_2 - коэффициенты усиления по току 1^{го} и 2^{го} транзисторов;

$I_{кбо}$ - обратный ток коллектора при эмитерных токах равных нулю.

Для двухэлектродной структуры очевидно:

$$I_{n1} = I_{n2} = I_{n3} = I_a. \quad (3.23)$$

Из выражений (3.22) и (3.23) следует:

$$I_a = \frac{I_{кбо}}{1 - \alpha}, \quad (3.24)$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$.

Таким образом, условием переключения динистора будет выполнение равенства $\alpha = 1$. Однако величины α_1 и α_2 уже при малых токах могут быть близки к единице, поэтому они должны быть уменьшены в процессе изготовления тиристора. Для этого необходимо:

1) одну из баз выполнить толстой: $w \gg L_d$, где w – ширина базы, а L_d – диффузионная длина соответствующих неосновных носителей;

2) один из эмиттерных переходов шунтируют объемным сопротивлением базы.

Если из одной из баз организовать управляющий электрод (невыпрямляющий, омический контакт), получится трех электродный тиристор (тринистор), в котором возможно управление напряжением включения тиристора (рисунок 3.29).

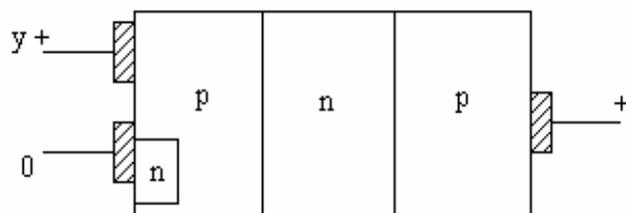


Рисунок 3.29

Если подать на управляющий электрод «у» напряжение такой полярности, что первый эмиттерный переход будет включен в прямом

направлении, то инжекция из эмиттера увеличится, что приведет к уменьшению напряжения включения.

Другими словами, меняя напряжение на управляющем электроде, можно изменять ток эмиттера, а, следовательно, и величину α и $U_{вкл.}$ (рисунок 3.30).

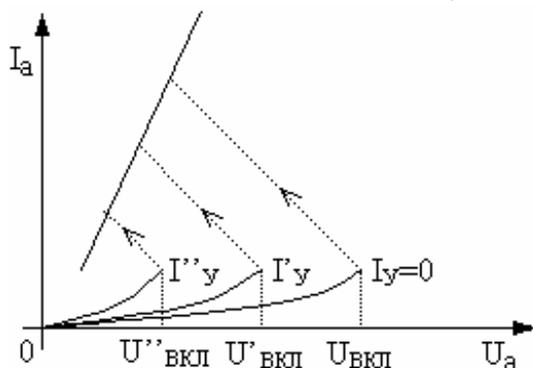


Рисунок 3.30

Разработаны тиристоры, имеющие одинаковые ВАХ при различной полярности приложенного напряжения. Это симметричные тиристоры – симисторы. ВАХ симистора показана на рисунке 3.31.

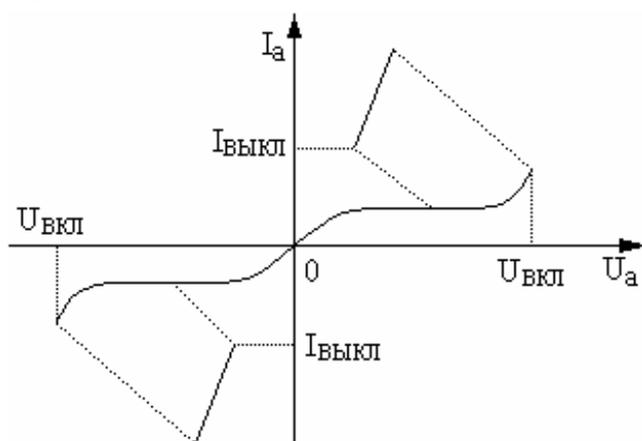


Рисунок 3.31

Симистор состоит из пяти областей с чередующимся типом проводимости и содержит четыре p – n – перехода (рисунок 3.32).

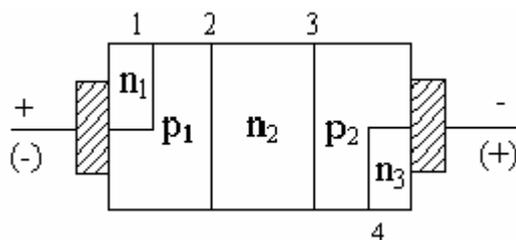


Рисунок 3.32

Крайние переходы (1 и 4) зашунтированы объемными сопротивлениями прилегающих к этим переходам областей с проводимостью p – типа. Если подать «+» на области $n1$ и «–» на области $n3$, то переход 1 включен в обратном направлении и весь ток идет через базу $p1$. Переход 4 включен в прямом направлении. Значит, при выбранной полярности напряжения рабочая часть тиристора представляет p - n - n - p – структуру, в которой происходят те же процессы, что и в динисторе, т.е. переключение.

При перемене полярности внешнего напряжения переход 4 включен в обратном направлении и зашунтирован базой $p2$, т.е. будем иметь n - p - n - p – структуру, т.е. тот же динистор. Таким образом, симистор – это два тиристора, включенных встречно и шунтирующих друг друга.

Симистор можно сделать и управляющим, если у одной из областей p – типа сделать омический контакт с соответствующим управляющим выводом.

Включение тиристора, как это следует из вышесказанного, можно производить:

- а) путем медленного увеличения анодного напряжения;
- б) путем подачи напряжения на управляющий электрод.

Возможно также включение тиристора путем быстрого увеличения анодного напряжения. При этом через прибор будут протекать значительные емкостные токи, приводящие к уменьшению напряжения включения с ростом скорости изменения напряжения $\partial U/\partial t$.

Выключение тиристора произойдет только при рассасывании неравновесных носителей заряда в базах.

Способы выключения:

- а) разрыв цепи анодного тока;
- б) изменение полярности анодного напряжения;
- в) с помощью тока управления.

Основные параметры тиристор:

- $U_{\text{вкл.}}$ – прямое анодное напряжение, при котором происходит включение тиристора;
- $I_{\text{вкл.}}$ – ток включения;
- $I_{y \text{ вкл.}}$ – отпирающий ток управления – наименьший ток в цепи управляющего электрода, который обеспечивает переключение при данном U_a ;
- $I_{\text{пр.мах.}}$ – максимальный допустимый ток в прямом направлении;

3.4 Фотоэлектрические полупроводниковые приборы

Фотоэлектрическими называют такие приборы, в которых лучистая энергия преобразуется в электрическую /4, 7/.

Принцип действия полупроводниковых фотоэлектрических приборов основан на использовании внутреннего фотоэффекта, суть которого заключается в следующем. Лучистая энергия излучается в виде квантов света

(фотонов) с энергией $W = h\nu$, где h - постоянная Планка, ν - частота излучения. Под воздействием этой энергии в чистых полупроводниках (и в меньшей степени в диэлектриках) энергия части валентных электронов может увеличиться настолько, что они смогут преодолеть запрещенную зону и перейти в зону проводимости, в примесных полупроводниках n -типа под воздействием лучистой энергии электроны с донорных уровней могут перейти в зону проводимости, а в полупроводниках p -типа дырки с акцепторных уровней - в валентную зону (т. е. фактически валентные электроны перейдут на акцепторные уровни). Для того чтобы электроны чистого полупроводника могли преодолеть запрещенную зону, необходимо сообщить им энергию, большую энергии активации собственной электропроводности ΔW_a или, в крайнем случае, равную ей, т.е. нужно выполнить условие возникновения фотоэффекта $h\nu > \Delta W_{и}$. В примесных полупроводниках электронам нужно сообщить энергию большую (или равную), чем энергия ионизации $\Delta W_{и}$, то есть $h\nu > \Delta W_{и}$.

Полупроводник при этом приобретает добавочную проводимость, которая называется фотопроводимостью. Отметим, что проводимость, обусловленная тепловым возбуждением носителей заряда, называется также темновой проводимостью. Когда энергия фотона равна энергии активации (энергии ионизации для примесных полупроводников), ее называют порогом фотоэффекта. Длину волны λ_0 , соответствующую минимальной частоте ν_0 , называют красной границей внутреннего фотоэффекта.

Для разных полупроводников значения λ_0 , различны. Так, для германия $\lambda_0 = 1,7$ мкм, т.е. граница фотоэффекта лежит в инфракрасной области.

3.4.1 Фоторезистор

Фоторезисторы - полупроводниковые приборы, которые имеют два контакта и электрическое сопротивление которых изменяется в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающего излучения.

На рисунке 3.33 показаны схема устройства фоторезистора (а) и его условное обозначение (б).

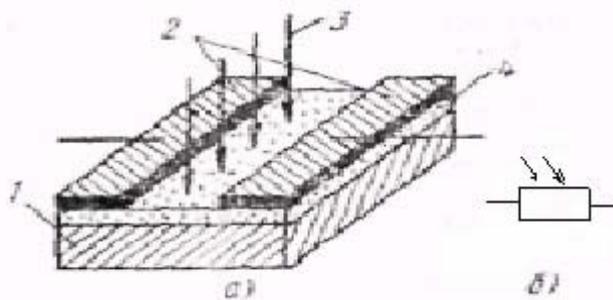


Рисунок 3.33

Пластины светочувствительного полупроводникового материала 4 закрепляют на подложке 1 из непроводящего материала (стекла, керамики, кварца), к полупроводнику крепят токоведущие электроды 2, изготовленные из таких материалов, как серебро, золото, платина. Чаще всего чувствительные элементы помещают в пластмассовый или металлический корпус, который имеет отверстие для пропускания света 3. Часть светочувствительной полупроводниковой пластины между металлическими контактами является рабочей. В качестве светочувствительного материала в основном используют полупроводниковые соединения сульфид или теллурид кадмия, сернистый свинец, антимонид индия. Промышленностью выпускается большое количество типов фоторезисторов в различном конструктивном исполнении.

При подключении фоторезистора к источнику питания в электрической цепи проходит небольшой ток I_T , называемый темповым. При освещении фоторезистора ток в цепи возрастает за счет фототока, обусловленного внутренним фотоэффектом. Вольтамперная характеристика, т. е. зависимость фототока от приложенного напряжения при постоянном световом потоке Φ , практически линейна (рисунок 3.34). Параметры фоторезисторов, как и других полупроводниковых приборов, существенно зависят от температуры.

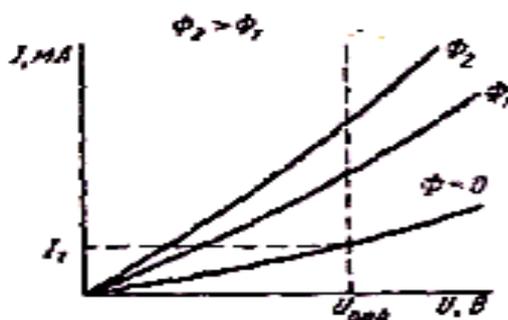


Рисунок 3.34

Фоторезисторы инерционны, что обусловлено конечным временем генерации и рекомбинации носителей заряда при изменении освещенности, вследствие чего фототок не успевает следовать за изменением освещенности. Это является их недостатком. Однако фоторезисторы просты по конструкции, их масса мала, они стабильны в работе, имеют практически неограниченный срок службы. Фоторезисторы широко применяют в различных схемах автоматики, контроля и измерения.

3.4.2 Фотодиод

Фотодиоды - это полупроводниковые фотоэлектрические приборы с одним $p-n$ -переходом и двумя контактами, принцип действия которых основан на использовании внутреннего фотоэффекта.

Устройство фотодиодов подобно устройству обычных диодов (рисунок 3.35 а), но в корпусе 2 (если он металлический), в который помещен диод, имеется стеклянное окно 1, через которое на диод падает свет. Стекло окна прозрачно для той части спектра, к которой должен быть чувствителен активный элемент фотодиода. Если корпус пластмассовый, полимерный материал должен быть прозрачным для нужной части спектра. Обычно свет направляют перпендикулярно плоскости $p-n$ -перехода (реже - параллельно) Условное обозначен фотодиода дано на рисунке 3.35 б.

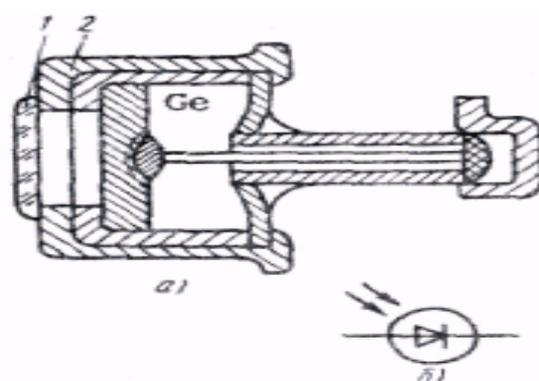


Рисунок 3.35

В качестве полупроводниковых материалов используют германий, кремний, селен, арсенид индия, сульфид кадмия и другие. Фотодиод может работать в режиме фотогенератора и в режиме фотопреобразователя. В первом случае, под действием света на зажимах фотодиода создается фото-ЭДС. Такие фотодиоды называют полупроводниковыми фотоэлементами. Во втором случае, в цепь фотодиода включают источник питания, создающий обратное смещение $p-n$ перехода (рисунок 3.36).

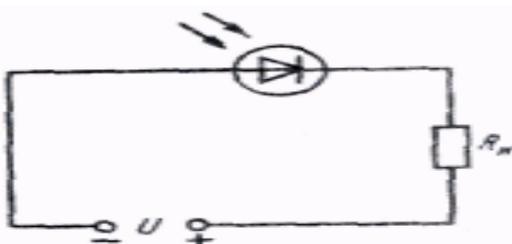


Рисунок 3.36

Если фотодиод не освещен, он ведет себя как обычный диод, через него проходит обратный ток, образованный неосновными носителями заряда областей p - и n - (в данном случае его можно назвать темновым). Если на фотодиод падает свет, то вследствие внутреннего фотоэффекта в обеих областях фотодиода генерируются пары носителей заряда. Неосновные носители заряда, для которых поле p - n -перехода является ускоряющим, могут легко преодолеть p - n -переход и попасть в смежную область (дырки n -области - в область p , а электроны p -области - в область n) и тем самым внести свой вклад в общий ток неосновных носителей заряда фотодиода. Ток неосновных носителей, вызванный освещением, не зависит от напряжения, приложенного к p - n -переходу. Он пропорционален световому потоку и называется световым током или фототоком. При этом следует отметить, что одновременно с процессом генерации пар носителей заряда происходит и их рекомбинация. Поэтому достигнут p - n -перехода и перейдут через него только те носители, диффузионная длина которых больше ширины p - или n - области. Кроме того, интенсивность света уменьшается по глубине облучаемого тела, поэтому генерация пар носителей происходит в основном на внешней облучаемой поверхности. Если ширина облучаемой области меньше диффузионной длины дырок, что соответствует реальным структурам фотодиодов, фототок в фотодиоде будет обусловлен движением дырок области n .

На рисунке 3.37 представлена вольтамперная характеристика фотодиода $I_\phi = f(U)$ для различных значений светового потока Φ .

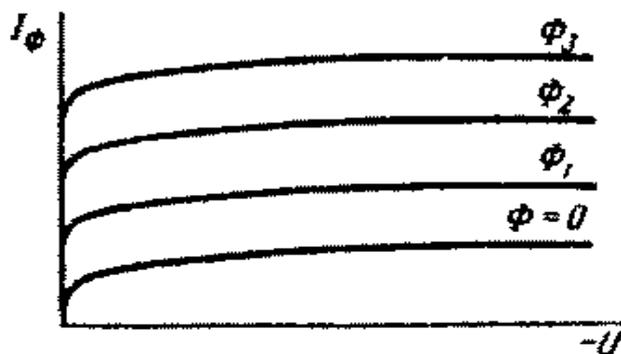


Рисунок 3.37

Характеристика при $\Phi = 0$ представляет собой обратную ветвь вольтамперной характеристики диода, т.е. характеристику темнового потока. Отношение фототока I_ϕ к вызвавшему его световому потоку Φ называют фоточувствительностью:

$$S_\phi = I_\phi / \Phi. \quad (3.25)$$

Чувствительность кремниевых фотодиодов равна 3 мА/лм, германиевых - 20 мА/лм, селенито-серебряных - 10-15 мА/лм. Фотодиоды обладают значительной инерционностью из-за конечного времени диффузии носителей заряда к р-п-переходу и прохождения их через область объемного заряда в р-п-переходе. Кроме того, на инерционность влияет также время зарядки емкости р-п-перехода. Частотные характеристики фотодиодов зависят от материалов, из которых они выполнены, а также от толщины и площади р-п-перехода. Менее инерционны германиевые и кремниевые диоды. Существенным недостатком фотодиодов является зависимость их параметров от температуры.

3.4.3 Фототранзистор

Фототранзистор - это полупроводниковый фотоэлектрический прибор с двумя р-п-переходами.

Устройство и принцип действия фототранзистора такие же, как и биполярного транзистора. Часто фототранзистор имеет два вывода от эмиттера и коллектора. Внешняя часть базы является фоточувствительной поверхностью, поэтому эмиттер обычно имеет небольшие размеры. В корпусе имеется окно для пропускания света. Одна из структур фототранзистора и схема его включения показаны на рисунках 3.38 а, б соответственно.

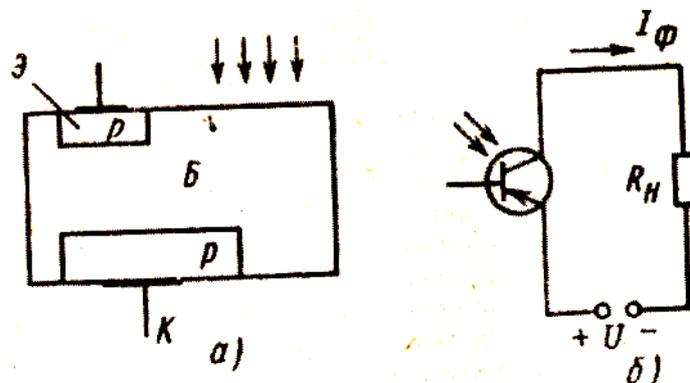


Рисунок 3.38

При отсутствии освещения в цепи фототранзистора проходит небольшой темновой ток. При освещении светочувствительной поверхности (на рисунке 3.38 а базы n-типа) в ней генерируются пары носителей заряда. Неосновные носители заряда базы (дырки) через коллекторный переход переходят в коллектор, и обратный ток перехода увеличивается на ток, образованный дырками базы (часть фототока, аналогичная фототоку диода). Однако в фототранзисторе в отличие от фотодиода имеется вторая составляющая фототока: уход дырок из базы приводит к образованию в ней нескомпенсированного отрицательного объемного заряда и к снижению

потенциального барьера эмиттера, в результате чего увеличивается число дырок, инжектируемых эмиттером в базу, а следовательно, и число дырок, переходящих из базы в коллектор.

Чувствительность фототранзистора, таким образом, значительно выше чувствительности фотодиода. Вольтамперные характеристики фототранзистора с оборванной базой аналогичны выходным характеристикам биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Основным параметром прибора является световой поток. Частотные характеристики фототранзисторов хуже, чем для фотодиодов, из-за инерционности эмиттерного перехода за счет его емкости. Параметры фототранзисторов существенно зависят от температуры.

3.4.4 Светодиод

Светодиод – это излучающие полупроводниковые приборы с одним *p-n*-переходом, преобразующие электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

В основе принципа действия светодиодов лежит свойство излучательной рекомбинации – излучение квантов света при рекомбинации пар электрон – дырка. Рекомбинация наблюдается, если *p-n*-переход включен в прямом направлении. Рекомбинация будет излучательной не всегда. В ряде случаев вся энергия, приложенная к переходу, передается атомам решетки, т.е. имеет место безизлучательная, или тепловая, рекомбинация. Так, в германиевых переходах электрическая энергия выделяется почти полностью в виде тепловой.

Диод, представляющий собой монокристалл *n*-типа, в котором создан *p-n*-переход, помещен в корпус – стеклянную линзу, пропускающую излучаемый свет. От областей *n*- и *p*- типа сделаны выводы из некорродирующего металла (золота, серебра).

Светодиоды имеют малые габариты и массу, низкое потребление мощности, высокую стабильность и большой срок службы. Инерционность светодиодов мала, она составляет десятимиллионные и стомиллионные доли секунды. Светодиодам можно придавать различную форму, а также располагать их на одном кристалле в виде черточек.

Светодиоды находят широкое применение в световых табло, в счетно-решающих машинах для ввода-вывода цифровой и буквенной информации, а также в оптоэлектронике.

3.5 Оптоэлектронные устройства

Оптоэлектроника - это область электроники, охватывающая вопросы теории и практического применения методов преобразования оптических

(световых) сигналов в электрические и наоборот в системах передачи, обработки и хранения информации.

Оптоэлектроника - сравнительно новое перспективное научно-техническое направление. В оптоэлектронных устройствах переработка сигналов осуществляется с помощью приборов, работа которых основана на электронных и фотонных процессах, т. е. элементами оптоэлектронных устройств являются фотоэлектрические приборы, а связь между элементами оптическая. В таких устройствах практически устранена гальваническая связь между входными и выходными цепями и до минимума сведена обратная связь между входом и выходом. Комбинации элементов позволяют создавать оптоэлектронные устройства с различным функциональным назначением.

Простейшим оптоэлектронным устройством является **оптрон**, который имеет две пары зажимов: входные соединены с фотоизлучающим прибором - светодиодом, выходные - с фотоприемником (например, с фотодиодом). При этом входная и выходная цепи гальванически не связаны между собой. На рисунке 3.39 показана принципиальная схема усилителя на оптроне с оптической связью.

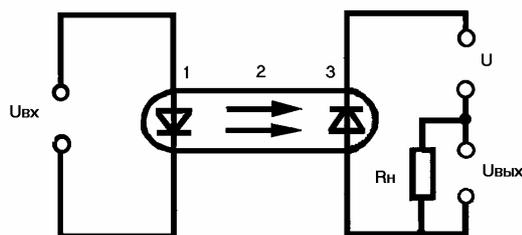


Рисунок 3.39

В выходную цепь включают нагрузочный резистор R_H , с которого снимается усиленный сигнал. Питание осуществляется от источника напряжения U . Напряжение входного электрического сигнала $U_{вх}$ подается на входные зажимы светодиода, под воздействием сигнала светодиод излучает световую энергию, которая по каналам оптической связи поступает на вход фотоприемника. Фототок, проходя через резистор нагрузки, создает на нем падение напряжения $U_{вых}$, которое и является усиленным входным сигналом.

При создании оптоэлектронных устройств необходимо сопрягать фотоизлучатели и фотоприемники так, чтобы спектральная полоса излучения перекрывалась спектром фоточувствительности. Эффективную оптическую связь между элементами оптрона осуществляют с помощью средств волоконной оптики, а именно с помощью тонких нитей из прозрачного материала, сигнал по которым передается по сложной траектории на основе эффекта полного внутреннего отражения. С помощью волокон можно производить поэлементную передачу изображения с высокой разрешающей способностью.

Эффективность светопередачи зависит от качества оптических контактов между излучающим элементом и световодом, световодом и фотоприемником. Эта задача решается путем применения стекол с высоким коэффициентом преломления (свинцовых или селеновых). Наименьшее внутреннее отражение можно обеспечить за счет создания излучающих устройств со сферической поверхностью, но в технологии микросхем, где используются элементы планарной конфигурации, наиболее пригодны устройства плоской конструкции (рисунок 3.40).

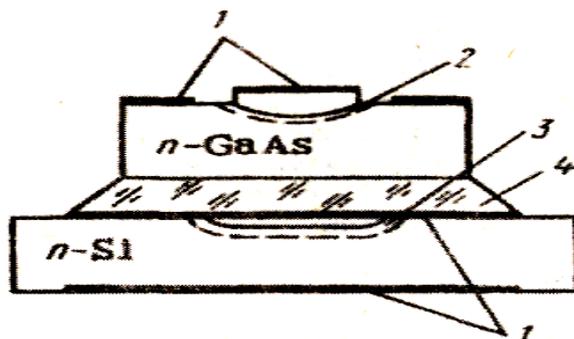


Рисунок 3.40

На рисунке 3.40 показана схема оптрона с плоской конструкцией, в котором оптический канал 4 между светоизлучателем 2 и фотоприемником 3 выполнен из селенового стекла; 1 - омические контакты. На рисунке 3.41 представлена схема **оптотранзистора** с прямой оптической связью.

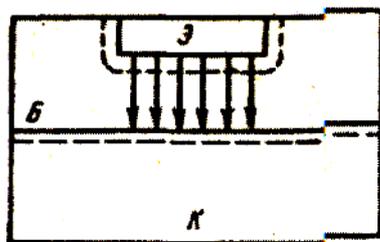


Рисунок 3.41

Эмиттерный переход включен в прямом направлении. За счет рекомбинационных процессов он излучает свет. Коллектор включают в обратном направлении. Излучение с эмиттерного перехода поглощается в области коллекторного перехода, в результате в коллекторе и во внешней цепи проходит ток. Для работы оптоэмиттерного транзистора необходимо, чтобы в базе не поглощалось излучение, испускаемое эмиттерным $p-n$ -переходом. Для электрической изоляции входной и выходной цепей в базе параллельно с $p-n$ -переходами (рисунок 3.41) создают высокоомный слой.

Оптотранзистор имеет высокое быстродействие по сравнению с обычными транзисторами. Кроме того, в нем нет гальванической связи между входной и выходной цепями. Прямая оптическая связь обеспечивает отсутствие отражения, которое может существовать на границах между фотоизлучателем и фотоприемником.

4 Усилители электрических сигналов

4.1 Определения. Характеристики

Устройства, с помощью которых путем затраты небольшого количества электрической энергии управляют энергией существенно большей, называют усилителями. Усилители находят широкое применение в различных областях науки и техники. В состав усилителя входят усилительный (активный) элемент, пассивные элементы и источник питания. Назначение усилительного элемента - преобразование электрической энергии источника питания в энергию усиливаемых сигналов. Усиливаемый сигнал, подаваемый на вход усилителя, осуществляет управление процессом преобразования этой энергии. В результате выходной сигнал является функцией входного сигнала. Мощность выходного сигнала за счет энергии источника питания во много раз больше мощности усиливаемого сигнала. Мощность усиленных сигналов выделяется в нагрузку, которую включают в выходную цепь усилителя. Пассивные элементы усилителя служат для обеспечения нужного режима работы усилительного элемента и для некоторых других целей.

Усилитель можно представить в виде четырехполюсника 2 к входным зажимам которого подключен источник сигнала 1, а к выходным – нагрузка 3 (рисунок 4.1). Если один усилительный элемент усилителя не обеспечивает нужного усиления сигнала, используют несколько усилительных элементов, соединяя их между собой с помощью тех или иных элементов связи; резисторов, трансформаторов и др. Один усилительный элемент и отнесенные к нему элементы называют усилительным каскадом.

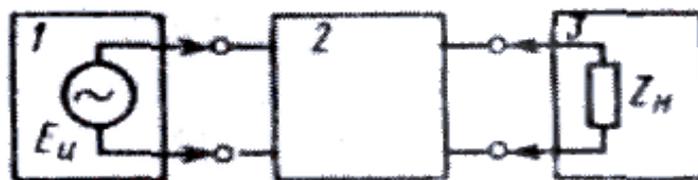


Рисунок 4.1

Усилители можно условно подразделить на три типа усилители напряжения, тока и мощности. Условность такого подразделения связана с тем, что любой усилитель в конечном итоге усиливает мощность.

По характеру усиливаемых сигналов различают *усилители гармонических* и *импульсных* сигналов. По диапазону и абсолютным значениям усиливаемых частот сигнала - *усилители постоянного тока* (полоса частот от

нулевой до верхней рабочей точки), *переменного тока*, высокой частоты, промежуточной частоты, низкой частоты (усилители звуковой частоты), широкополосные усилители. В зависимости от используемых усилительных элементов - транзисторные, ламповые, диодные, магнитные и др. В зависимости от используемых межкаскадных связей бывают *усилители с гальванической связью* (это непосредственная или потенциометрическая связь; каскады с этим видом связи могут усиливать не только переменные составляющие тока и напряжения сигнала, но и постоянную составляющую), *с резисторно-емкостной (RC) связью*; *с трансформаторной связью*; *со связью через колебательный контур* /4, 7/.

4.1.1 Основные показатели усилителей

При усилении электрических сигналов неизбежно возникают некоторые отклонения формы выходного сигнала от формы входного, которые называют искажениями. Свойства усилителя и вносимые им искажения характеризуют рядом величин, которые обычно называют показателями. К основным показателям относятся следующие:

- *входные данные усилителя* - входное напряжение $U_{вх}$, ток $I_{вх}$ и мощность $P_{вх}$, при которых усилитель отдает в нагрузку заданные мощность, напряжение или ток, а также входное сопротивление усилителя $Z_{вх}$, которое в некоторых случаях можно считать активным, равным $R_{вх}$:

- *выходные данные усилителя* - выходная мощность сигнала $P_{вв.лх}$ выделяемая в нагрузку, выходное напряжение $U_{вв.лх}$ или ток $I_{вв.лх}$ при работе усилителя на расчетное сопротивление нагрузки R_H выходное сопротивление усилителя $R_{вв.лх}$. Обычно считают, что нагрузка не комплексная, т.е. ее сопротивление активное R_H .

Важными показателями усилителей являются коэффициенты усиления: по напряжению:

$$K_U = U_H / U_{вх} \quad (4.1)$$

по току:

$$K_I = I_H / I_{вх} \quad (4.2)$$

по мощности

$$K_P = P_H / P_{вх} \quad (4.3)$$

Коэффициенты K_U и K_I - комплексные величины, поскольку выходные и входные напряжения и токи сдвинуты по фазе относительно друг друга из-за реактивных составляющих сопротивлений в цепях усилителя и нагрузки:

$$K = K e^{j\varphi}, \quad (4.4)$$

где K - модуль коэффициента усиления;

φ - фазовый сдвиг между выходным и входным напряжениями (токами) усилителя.

Если усилитель является многокаскадным, то общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (4.5)$$

Часто модули коэффициентов усиления выражают в логарифмических единицах - децибелах (дБ):

$$K_{\text{УдБ}} = 20 \lg K_U, \quad K_{\text{ИдБ}} = 20 \lg K_I, \quad K_{\text{РдБ}} = 10 \lg K_P. \quad (4.6)$$

Общий коэффициент усиления усилителя, если коэффициенты усиления каскадов выражены в децибелах, равен сумме коэффициентов отдельных каскадов:

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_n. \quad (4.7)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) выходной цепи усилительного элемента - отношение мощности сигнала на выходе к потребляемой выходной цепью мощности от источника питания выходной цепи:

$$\eta = P_{\text{н}} / P_{\text{п. вых}}. \quad (4.8)$$

Линейные искажения вызываются наличием в схеме усилителя реактивных элементов - конденсаторов и катушек индуктивности, сопротивление которых зависит от частоты. Поскольку это линейные элементы искажения называют линейными.

Входной сигнал любой формы можно представить как сумму гармонических составляющих сигнала, имеющих различные частоты и усиливающихся неодинаково, то есть с различными коэффициентами усиления. Такие искажения называют **частотными**. Кроме того, гармонические составляющие сигнала проходят через усилитель в течение неодинакового времени, что приводит к их временным сдвигам на выходе усилителя, т. е. возникают искажения, которые называют **фазовыми**.

Частотные искажения оцениваются по **амплитудно-частотной характеристике** (АЧХ) усилителя, представляющей собой зависимость модуля коэффициента усиления K от частоты f (или от угловой частоты ω) (рисунок 4.2). Если бы в усилителе не было искажений, АЧХ представляла бы прямую линию, параллельную оси абсцисс, т.е. одинаково усиливались бы сигналы с частотой от 0 до ∞ .

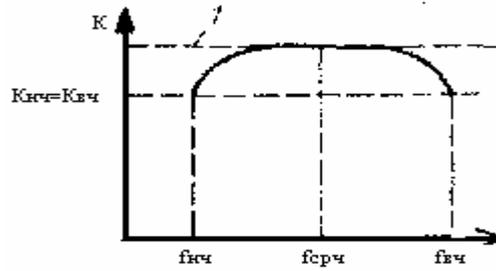


Рисунок 4.2

Диапазон частот усилителя, в пределах которого усилитель обеспечивает заданное значение модуля коэффициента усиления, называют полосой пропускания. Диапазон частот ограничивается нижней $f_{нч}$ и верхней $f_{вч}$, граничными частотами, которые определяются назначением усилителя. Звуковые колебания в диапазоне частот от 50 Гц до 10000 Гц обеспечивают достаточно хорошее качество звучания, в телефонной связи используется диапазон частот от 300 Гц до 3400 Гц. Частотные искажения, вносимые усилителем на какой-то частоте f , оценивают коэффициентом частотных искажений:

$$M = K_{срч} / K. \quad (4.9)$$

Если $M = 1$, частотных искажений нет. Чем M больше единицы, тем больше вносимые усилителем искажения. Коэффициент частотных искажений выражают как в относительных единицах, так и в логарифмических. Соотношение между ними:

$$M_{дБ} = 20 \lg(M). \quad (4.10)$$

Обычно в зависимости от назначения усилителя допустимые частотные искажения лежат в интервале от сотых долей децибела до нескольких децибел.

Фазовые искажения оцениваются по **фазочастотной характеристике (ФЧХ)** - зависимости угла сдвига фазы (между выходным и входным напряжениями усилителя от частоты) (рисунок 4.3).

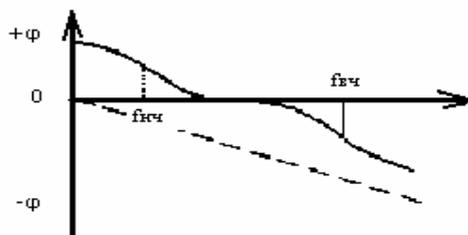


Рисунок 4.3

Пунктиром на рисунке 4.3 показана ФЧХ усилителя без фазовых искажений - это прямая линия, проходящая через начало координат. В усилителях звуковых сигналов фазовые искажения не играют существенной роли, поскольку они не воспринимаются на слух при прослушивании речи и музыки, В Усилителях импульсных сигналов они влияют на форму усиливаемых сигналов.

Переходные искажения. В усилителях импульсных сигналов линейные искажения вызываются переходными процессами в цепях усилителя, содержащих реактивные элементы, а также некоторой инерционностью усилительного элемента. Они называются переходными искажениями и оцениваются по **переходным характеристикам**, представляющим собой зависимость мгновенного значения выходного сигнала от времени t при подаче на вход усилителя мгновенного скачка напряжения или тока. На рисунке 4.4 а показан импульс, поступающий на вход усилителя. Переходная характеристика представлена на рисунке 4.4 б. Переходные искажения подразделяют на искажения фронтов и искажения вершин импульса. Для удобства их принято рассматривать для разных частотных областей: по переходной характеристике в области малых времен (верхних частот) судят об искажениях фронта (рисунок 4.4 в), по переходной характеристике в области больших времен (нижних частот) судят об искажениях вершин (рисунок 4.4 г).

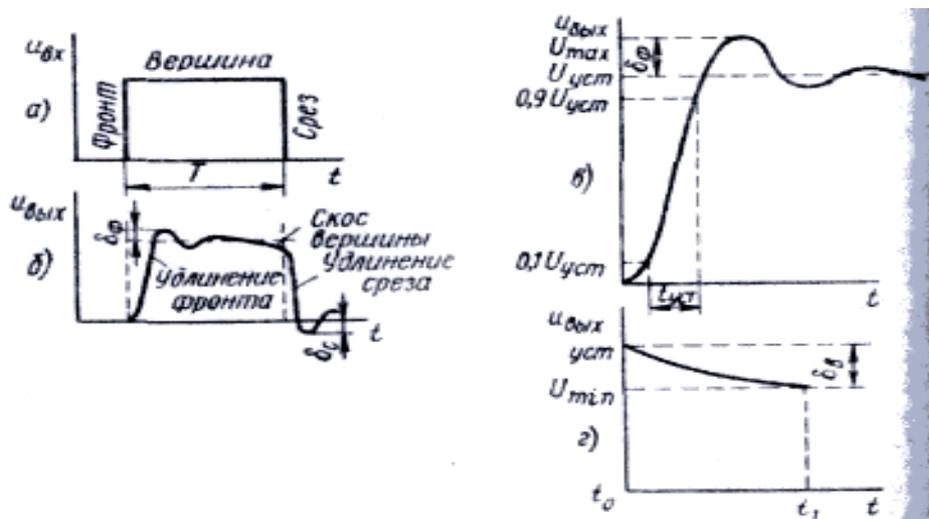


Рисунок 4.4

Искажения фронта характеризуются временем установления $t_{уст}$ и выбросом фронта импульса δ_{ϕ} . Время установления - это отрезок времени, в течение которого напряжение выходного импульсного сигнала возрастает от 0,1 до 0,9 своего установившегося значения $U_{уст}$:

$$t_{уст} = t_{0,9} - t_{0,1} \quad (4.11)$$

Выброс фронта δ_ϕ характеризуется отношением разности между максимальным U_{\max} и установившимся $U_{\text{уст}}$ значениями напряжения выходного сигнала к установившемуся значению $U_{\text{уст}}$.

$$\delta_\phi = (U_{\max} - U_{\text{уст}}) / U_{\text{уст}} = U_{\max} / U_{\text{уст}} - 1 \quad (4.12)$$

Искажения плоской вершины импульса характеризуют отношением разности между установившимся в момент времени t_0 значением напряжения выходного сигнала $U_{\text{уст}}$ и значением напряжения U_{\min} в момент t_1 достигаемым через время $T = t_1 - t_0$, к установившемуся значению выходного напряжения:

$$\delta_B = (U_{\text{уст}} - U_{\min}) / U_{\text{уст}} = 1 - (U_{\min} / U_{\text{уст}}) . \quad (4.13)$$

Допустимые переходные искажения зависят от назначения Усилителя и указываются в технических требованиях на него.

Амплитудно-частотная, фазовая и переходная характеристики линейных электрических цепей однозначно связаны между собой, поэтому с помощью графических методов по экспериментально полученным, например, амплитудно-частотной и фазовой характеристикам можно построить переходную характеристику.

Собственные шумы усилителя. Это сигналы на выходе усилителя, существующие и при отсутствии усиливаемых сигналов на его входе. Напряжение собственных шумов усилителя ограничивает его чувствительность, из-за наличия шумов нельзя усиливать сколь угодно малые сигналы.

Собственные шумы возникают в основном за счет теплового, беспорядочного движения электронов в элементах схемы и хаотического теплового движения носителей заряда в области базы биполярных транзисторов. Собственные шумы оценивают по коэффициенту шума равному отношению мощности шума на выходе усилителя $P_{\text{ш.вых}}$ мощности шума на его входе $P_{\text{ш.вх}}$, умноженному на коэффициент усиления по мощности K_p :

$$F_{\text{ш}} = (P_{\text{ш.вых}} / P_{\text{ш.вх}}) / K_p . \quad (4.14)$$

Динамический диапазон усилителя характеризует диапазон напряжений сигнала, которые данный усилитель может усилить без внесения помех и искажений сверх нормы. Он определяется отношением максимального напряжения входного сигнала к его минимальному напряжению и выражается в децибелах. Динамический диапазон усилителя определяют по амплитудной характеристике усилителя - зависимости установившегося значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ сигнала от входного $U_{\text{вх}}$. В идеальном случае эта характеристика должна быть прямолинейной, угол ее наклона к оси абсцисс равен $\arctg(K_u)$ на данной частоте. При малых и больших значениях входного

напряжения характеристика отклоняется от прямолинейной. В первом случае выходное напряжение усилителя определяется напряжением собственных шумов в выходной цепи $U_{ш}$, а во втором - амплитудная характеристика искажается потому, что коэффициент усиления усилителя уменьшается из-за нелинейных искажений, вносимых усилительными элементами усилителя.

Нелинейные искажения. Это искажения формы усиливаемого сигнала на выходе вследствие нелинейности вольтамперных характеристик отдельных элементов схемы усилителя (усилительных элементов, катушек индуктивности с ферромагнитными сердечниками, трансформаторов и т. д.). Причиной появления значительных нелинейных искажений могут быть и неправильный выбор начального положения рабочей точки транзистора, и чрезмерно большая амплитуда входного сигнала, и неправильно рассчитанная индуктивность. Нелинейные искажения при подаче на вход усилителя чисто синусоидального сигнала вызывают появление на его выходе высших гармонических составляющих, которые искажают форму входного сигнала /1, 4/.

Оцениваются нелинейные искажения по коэффициенту гармоник (в процентах):

$$K_r = (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{(1/2)} / I_1 = (U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2)^{(1/2)} / U_1, \quad (4.15)$$

где I_1, I_2, \dots, I_n – действующие (амплитудные) значения первой, второй, третьей, n-й гармоник выходного тока;

U_1, U_2, \dots, U_n – действующие (амплитудные) значения первой, второй, третьей, n-й гармоник выходного напряжения.

Допустимое значение коэффициента гармоник зависит от назначения усилителя. Для усиления речи и музыки среднего качества коэффициент гармоник $\sim 2\%$.

4.1.2 Обратная связь в усилителях

Обратной связью (ОС) называют передачу части энергии усиливаемого сигнала из выходной цепи усилителя во входную. На рисунке 4.6 показана структурная схема усилителя с обратной связью. Цепь обратной связи характеризуется коэффициентом передачи, или коэффициентом обратной связи β , показывающим, как часть выходного сигнала передается на вход усилителя. Обычно $|\beta| < 1$

Обратная связь может быть *внутренней* (она проявляется в усилителе из-за физических свойств усилительных элементов), *паразитной* (из-за образования паразитных емкостных и индуктивных связей между выходной и входной цепями) и *искусственной* (ее создают специально). Внутренняя и паразитная ОС являются нежелательными их пытаются устранить.

Искусственную ОС применяют с целью уменьшения нелинейных искажений и стабилизации положения начальной рабочей точки.

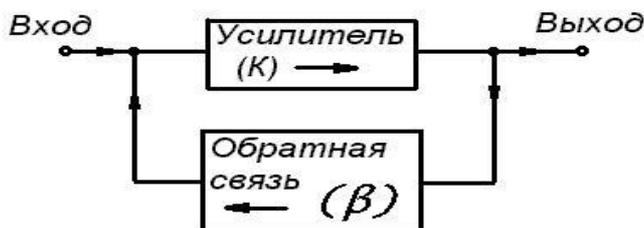


Рисунок 4.6

Для этого с помощью обратной связи на вход подают напряжение точно в противофазе с ЭДС источника сигнала. Такую ОС называют *отрицательной*. Если напряжение обратной связи подать точно совпадающим по фазе с ЭДС источника сигнала, то сигнал на входе увеличится. Такую ОС называют *положительной*. Ее используют, например, в автогенераторах для поддержания автоколебаний.

В зависимости от того, каким образом цепь ОС присоединена выходу и входу усилителя, различают:

- *обратную связь по напряжению* - цепь ОС соединяют с выходом схемы параллельно нагрузке так, что напряжение ОС пропорционально напряжению на нагрузке усилителя;

- *обратную связь по току* - цепь ОС соединяют с выходом схемы последовательно с нагрузкой так, что напряжение ОС пропорционально току в нагрузке;

- *обратную связь последовательную* - цепь ОС со стороны входа соединена последовательно с источником сигнала;

- *обратную связь параллельную* - цепь ОС со стороны входа соединена параллельно источником сигнала.

Бывают также комбинированные (смешанные) обратные связи: ОС одновременно по току и напряжению ОС одновременно последовательная и параллельная.

Обратную связь называют частотно-независимой, если отношение напряжений на выходе и входе цепи ОС не зависит от частоты (цепь ОС не содержит индуктивностей и емкостей). В противном случае ОС называют частотно-зависимой. Если между напряжением ОС и ЭДС источника сигнала сдвиг фаз отличается от 0 и от 180°, то ОС называют комплексной. Замкнутый контур, образуемый цепью обратной связи и частью схемы усилителя, к которой эта цепь присоединена, называется цепью обратной связи.

Рассмотрим, как влияет отрицательная ОС на основные показатели усилителя и в первую очередь на коэффициент усиления. Пусть имеется

последовательная ОС по напряжению. Для простоты все величины считаем действительными. Напряжение ОС, подаваемое во входную цепь усилителя:

$$U_{oc} = \beta U_{вых}. \quad (4.16)$$

Это напряжение U_{oc} вычитается из входного напряжения, поэтому

$$U_1 = U_{вх} - U_{oc} = U_{вх} - \beta U_{вых} \quad \text{или} \quad U_{вх} = U_1 + \beta U_{вых} \quad (4.17)$$

Если ОС отсутствует, то $U_{вх} = U_1$ и коэффициент усиления усилителя:

$$K = U_{вых} / U_{вх} = U_{вых} / U_1 \quad (4.18)$$

При наличии отрицательной ОС с учетом выражений (4.17):

$$K_{oc} = U_{вых} / U_{вх} = U_{вых} / (U_1 + \beta U_{вых}) \quad (4.19)$$

Из моделей (4.18) и (4.19) следует, что при наличии ОС коэффициент усиления усилителя определится из соотношения:

$$K_{oc} = K / (1 + \beta K) \quad (4.20)$$

Следовательно, отрицательная ОС снижает коэффициент усиления, в $(1 + \beta K)$ раз. Величина βK характеризует усиление цепи обратной связи. Сумму $(1 + \beta K)$ называют глубиной отрицательной ОС. Если при отрицательной ОС $|\beta| \gg 1$, то такую связь называют глубокой отрицательной ОС.

Все сказанное справедливо не только для последовательной по напряжению, но и для всех других видов отрицательной ОС.

Введение отрицательной ОС повышает стабильность коэффициента усиления усилителя при изменении режима усилительного элемента, частоты, амплитуды сигнала и др. При этом изменение K вызывает изменение K_{oc} , в $(1 + \beta K)$ раз меньшее, а при глубокой отрицательной, ОС почти совсем не зависит от K . Отрицательная ОС позволяет расширить полосу пропускания, снижает уровень нелинейных искажений, фон и шумы, возникающие внутри усилителя. В зависимости от типа отрицательной ОС можно уменьшать или увеличивать входное и выходное сопротивления. Так, введение отрицательной последовательной ОС по напряжению увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление усилителя, что в ряде случаев значительно улучшает его показатели. Поэтому, несмотря на снижение коэффициента усиления при введении отрицательной обратной связи, ее широко используют в усилителях различного назначения. Отметим, что при положительной ОС коэффициент усиления увеличивается в $(1 - \beta K)$ раз, а разность $(1 - \beta K)$ называют глубиной положительной ОС.

4.1.3 Динамические характеристики усилительного элемента

В реальных цепях к выходу усилительных (активных) элементов обычно подключают нагрузку (резисторы, индуктивные катушки и др.). Такой режим работы активного элемента называют динамическим. Рассмотрим динамический режим работы активного элемента на примере простейшей схемы усилителя на биполярном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, когда вход и выход схемы подсоединены к источникам постоянного напряжения смещения $E_{\bar{\sigma}}$ и E_K , а усиливаемый сигнал на вход не подан (рисунок 4.7 а).

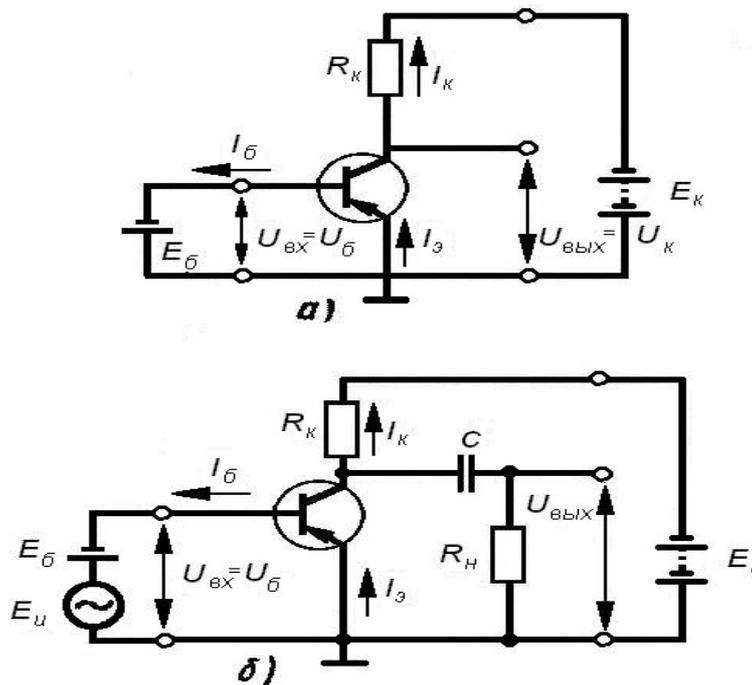


Рисунок 4.7

Выходное напряжение в этом случае в соответствии со вторым законом Кирхгофа определяется:

$$U_{\text{вых}} = E_K - I_{\text{вых}} R_K \quad \text{или} \quad U_K = E_K - I_K R_K \quad (4.21)$$

Если напряжение на входе изменится, то изменится и ток эмиттера, а следовательно, и ток коллектора. В соответствии с формулой (4.21) изменится выходное напряжение. Таким образом, в динамическом режиме работы активного элемента изменение напряжения на его входе вызывает изменение напряжения на его выходе.

Анализ работы и расчет усилительных каскадов можно провести графическим методом с использованием динамических характеристик [7, 8/.

Нагрузочные линии. С помощью нагрузочных линий или выходных динамических характеристик можно установить зависимость выходного тока от напряжения на выходе усилителя для различных значений входного сигнала. Когда сигнал отсутствует, в цепях усилителя протекает постоянный ток, называемый током покоя, и связь между выходным током I_k и выходным напряжением U_k можно установить по формуле (4.21). Зависимость $U_k = f(I_k)$ при $R_k = \text{const}$, $E_k = \text{const}$ есть прямая линия, которую можно построить по двум точкам: полагая $U_k = 0$, что соответствует короткому замыканию выходных зажимов, определяют значение тока на оси ординат, $I_k = E_k / R_k$ (первая точка). Для определения второй точки принимают $I_k = 0$, что имеет место при холостом ходе со стороны выходных зажимов, и находят ее на оси абсцисс $U_k = - E_k$. Проведенную между этими точками линию называют *нагрузочной линией* постоянного тока или *нагрузочной прямой* постоянного тока. На рисунке 4.8 построено семейство из двух нагрузочных линий постоянного тока, соответствующих двум значениям сопротивления нагрузки R_{k1} и R_{k2} и напряжению E_k .

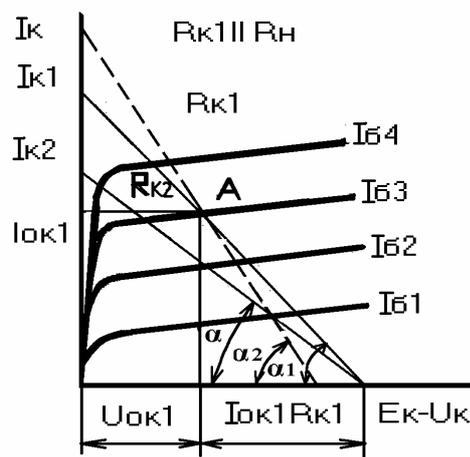


Рисунок 4.8

Наклон прямых определяется соответственно углами α_1 и α_2 , где $\alpha_1 = \text{arctg} R_{k1}$, а $\alpha_2 = \text{arctg} R_{k2}$. Если значения E_k ($R_k = \text{const}$) другие, то нагрузочные линии переместятся параллельно вправо или влево. Нагрузочные линии строят на семействе выходных статических характеристик, точки пересечения с которыми определяют значения $I_k = f(U_k)$. Для заданных значений R_k и E_k и различных значений токов базы $I_б$. В многокаскадных усилителях выходные цепи через разделительный конденсатор C нагружены входным сопротивлением следующего каскада, которое в большей части полосы рабочих частот можно считать активным R_n . По переменному току нагрузочное сопротивление усилителя равно не R_k , а $R_k || R_n$, так как сопротивление R_n включено параллельно резистору R_k (см. рисунок 4.7 б). Нагрузочная линия каскада, когда по цепи протекает переменный ток, отличается от нагрузочной

линии постоянного тока и называется нагрузочной линией переменного тока. Нагрузочная линия переменного тока пересекается с нагрузочной линией постоянного тока в так называемой начальной рабочей точке, так как в момент прохождения переменного сигнала через нуль, рабочая точка находится в начальном положении. Наклон нагрузочной линии переменного тока определяется углом α . На рисунке 4.8 она проходит через начальную рабочую точку А круче соответствующей нагрузочной прямой постоянного тока при $R_K = R_{K1}$ (пунктир на рисунке).

Входная динамическая характеристика - это зависимость $I_{BХ} = f(U_{BХ})$ в динамическом режиме. Для схемы усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ - это зависимость $I_6 = f(U_6)$. Графически ее строят путем переноса точек пересечения нагрузкой прямой со статическими выходными характеристиками на семейство входных статических характеристик. Поскольку входные статические характеристики для разных значений U_K отличаются очень незначительно, обычно в качестве динамической входной характеристики используют усредненную входную статическую характеристику (кривая 1 на рисунке 4.9 б).

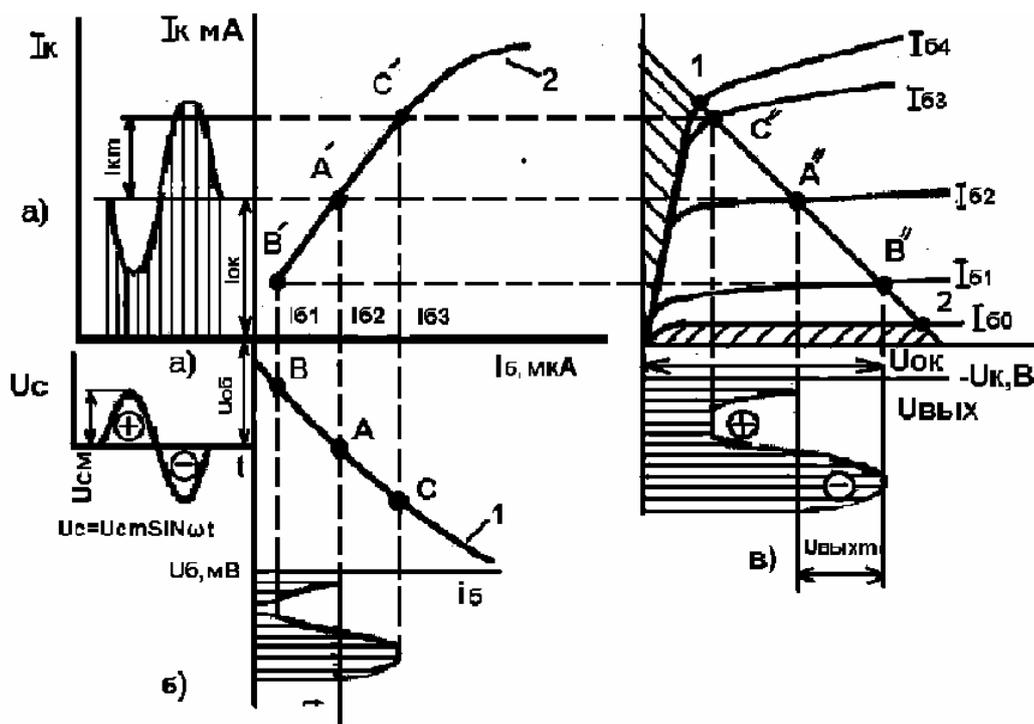


Рисунок 4.9

Проходная динамическая характеристика - это зависимость $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ или $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ})$ в динамическом режиме. Для усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ, - это зависимость $I_K = f(U_6)$ или $U_K = f(I_6)$. Вид проходной характеристики $I_K = f(I_6)$ показан на рисунке 4.9 а (кривая 2).

4.1.4 Принцип работы усилителя

Принцип работы усилителя рассмотрим на примере усилительного каскада (см. рисунок 4.8 а). В отсутствие усиливаемого сигнала при подаче на эмиттерный и коллекторный переходы напряжения смещения в цепях транзистора проходят постоянные токи $I_{об}$ во входной цепи и $I_{ок}$ в выходной. А на входных и выходных зажимах (нуль в индексах величин означает, что рассматривается режим по постоянному току) устанавливаются соответственно напряжения $U_{об}$, равное напряжению смещения на эмиттерном переходе, и $U_{ок}$, определяемое ЭДС источника питания E_k и сопротивлением резистора R_k в соответствии с уравнением (4.21).

Как было сказано ранее, эти значения токов и напряжений определяют положение точки на статических характеристиках, которую называют начальной рабочей точкой.

Если на вход усилителя подается сигнал, например синусоидальной формы $u_c = U_{CM} \sin \omega t$ (рисунок 4.9 а), то он алгебраически суммируется с постоянным напряжением смещения на эмиттерном переходе и рабочая точка А перемещается между точками В и С.

В отрицательные полупериоды напряжение сигнала складывается с отрицательным напряжением смещения, напряжение смещения базы увеличивается, в результате чего увеличивается ток базы и коллекторный ток и рабочая точка плавно перемещается из положения А и А' соответственно в положение С и С'. В положительные полупериоды напряжение сигнала, складываясь с отрицательным напряжением смещения, снижает напряжение смещения базы, поэтому токи базы и коллектора уменьшаются, а рабочая точка плавно перемещается в положение В и В'. На выходной характеристике соответственно С'' и В''. Токи i_b и i_k изменяются в фазе с изменениями мгновенного значения суммарного напряжения. В цепи источник ЭДС смещения -коллекторный переход проходит пульсирующий ток, состоящий из постоянной $I_{ок}$ и переменной i_k составляющих тока. Переменная составляющая тока создаст на резисторе R_k падение напряжения, амплитуда которого равна амплитуде выходного сигнала $U_{вых}$. При этом напряжение на резисторе изменяется синфазно, а выходное напряжение находится в противофазе с напряжением сигнала (рисунок 4.9 в). При большом сопротивлении R_k амплитуда выходного сигнала значительно больше амплитуды напряжения входного сигнала (напряжение сигнала порядка десятка милливольт, ток - десятка микроампер, а выходное напряжение порядка нескольких вольт, ток - нескольких миллиампер). Таким образом, в приборе происходит усиление как напряжения, так и тока сигнала, а следовательно, и мощности.

КПД усилителя равен отношению мощности сигнала на выходе $P_{вых}$ к мощности, потребляемой активным элементом от источника питания P_0 . В рассмотренном случае КПД усилителя:

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_o = (U_{\text{Км}} \cdot I_{\text{Км}}) / (2U_{\text{ОК}} I_{\text{ОК}}) \quad , \quad (4.22)$$

причем, поскольку $U_{\text{Км}} \ll U_{\text{ОК}}$, $I_{\text{Км}} \ll I_{\text{ОК}}$, КПД усилителя (по схеме с ОЭ) меньше 50%.

4.1.5 Режимы работы усилительного каскада

Для того чтобы форма переменной составляющей тока на выходе усилителя совпадала с формой подаваемого на вход сигнала, зависимость между ними должна быть линейной. Поскольку транзистор является нелинейным элементом, возможно искажение сигнала. Наличие или отсутствие искажения зависит как от амплитуды сигнала, так и от выбора положения начальной рабочей точки на нагрузочной линии. Выбор положения начальной рабочей точки влияет также на КПД усилителя. В момент, когда сигнал отсутствует, вся энергия источников питания идет только на нагрев p - n -переходов. Если начальная рабочая точка лежит на середине прямолинейного участка, а амплитуда сигнала такова, что рабочая точка, перемещаясь, не выходит за пределы прямолинейного участка входной характеристики, то искажения сигнала не происходит. КПД в этом случае меньше 50%.

В зависимости от положения начальной рабочей точки на характеристиках активных элементов и амплитуды усиливаемого сигнала различают три основных режима работы усилительного каскада: А, В и С. Режимы работы активных элементов часто называют классами усиления. Количественно режимы усиления для синусоидального сигнала характеризуют углом отсечки θ - половиной той части периода, в течение которой через выходную цепь активного элемента проходит ток. Угол отсечки выражают в градусах или радианах /4/.

Режим А. В этом режиме начальная рабочая точка А находится примерно в середине линейной части проходной характеристики, а амплитуда сигнала такова, что, как видно из рисунка 4.10, ток в выходной цепи протекает в течение всего периода сигнала. Угол отсечки θ равен 180'. (Отметим, что характеристики даны для усилителя с транзистором типа p - n - p по схеме с ОЭ.).

Транзистор работает в активном режиме. Рабочая точка А, перемещаясь по нагрузочной линии, не выходит за пределы точек 1 и 2 на нагрузочной линии (рисунок 4.9 в, точка А). При работе ниже точки 2 транзистор переходит из активного режима в режим отсечки, а при работе выше точки 1 - в режим насыщения. Из-за большого тока покоя КПД в этом режиме низкий, менее 50%. Это основной недостаток рассматриваемого режима. В режиме А активный элемент работает почти без искажений, а форма выходного сигнала соответствует форме входного. Режим А используют в основном в каскадах предварительного усиления.

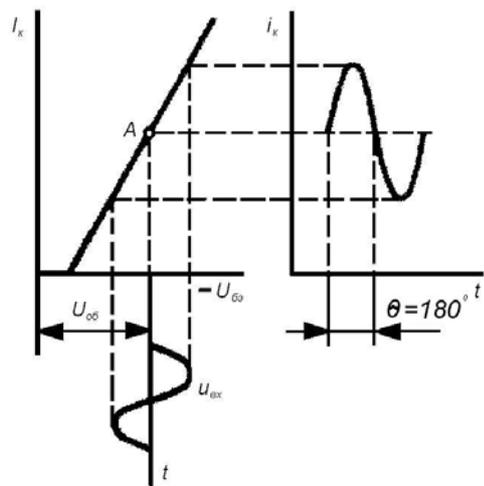


Рисунок 4.10

Режим В. Начальная рабочая точка A лежит в начале проходной характеристики (рисунок 4.11). Ток коллектора проходит через активный элемент лишь в течение отрицательного (для транзистора типа $p-n-p$) полупериода входного напряжения, во время же другого полупериода тока нет, т. е. активный элемент «заперт», рабочая точка A находится ниже точки 2 на нагрузочной линии в области отсечки (см. рисунок 4.9 в, точка A). Угол отсечки θ составляет 90° . КПД каскада, работающего в режиме В, значительно выше, чем для режима А, поскольку ток покоя мал.

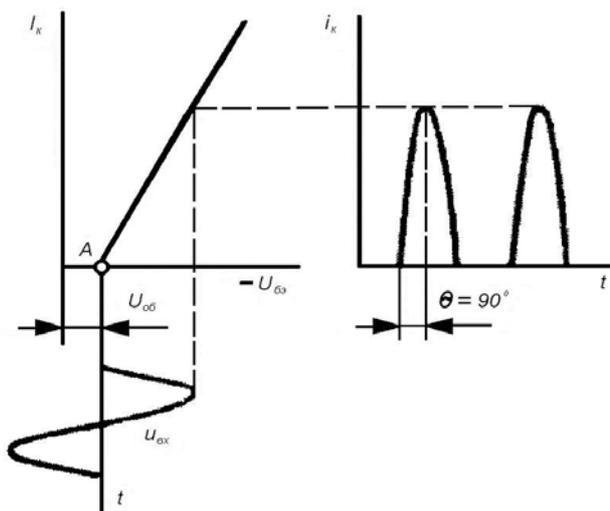


Рисунок 4.11

В режиме В усилитель имеет высокий КПД (до 80%), однако усиливается только один полупериод входного сигнала. Кроме того, сигнал сильно искажается. Для усиления сигнала в течение всего периода используют двухтактные схемы, когда одно плечо схемы работает в положительный

полупериод, а другое - в отрицательный. В режиме В (так как КПД высок) работают каскады мощного усиления (выходная мощность от 10 Вт и более).

Режим С. В режиме С начальная рабочая точка А располагается правее начальной точки проходной характеристики (рисунок 4.12). Угол θ менее 90° . В отсутствие сигнала ток через активный элемент не проходит - элемент полностью «заперт». При подаче сигнала ток коллектора проходит в течение времени, меньшем отрицательного полупериода напряжения входного сигнала, причем искажение сигнала большее, чем в режиме В. КПД каскада, работающего в режиме С, выше, чем в режиме В, так как ток покоя отсутствует. Режим С применяют мощных резонансных усилителях.

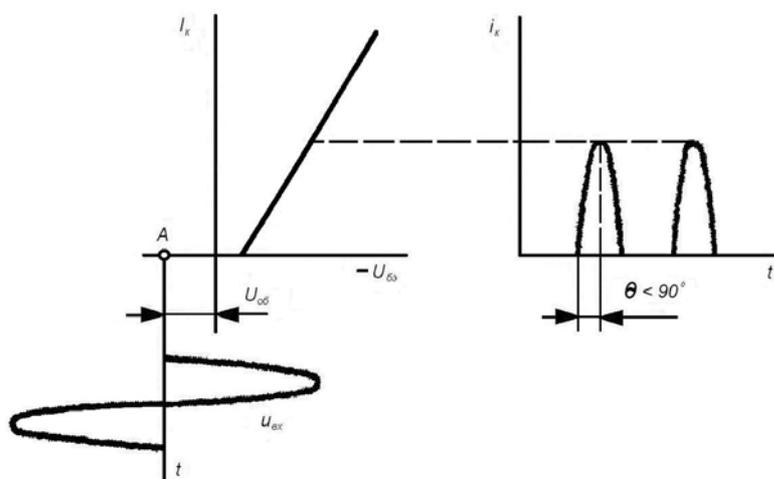


Рисунок 4.12

Режим Д. Иначе этот режим называют ключевым. Активный элемент в этом режиме работы усилителя находится либо в состоянии отсечки, либо в состоянии насыщения. В первом случае ток через активный элемент равен нулю, во втором - равно нулю падение напряжения между выходными зажимами. КПД в этом режиме выше, чем в режиме С (он близок к единице), потери энергии малы. Этот режим используют только для усиления прямоугольных сигналов.

4.1.6 Схемы стабилизации положения рабочей точки

Основные свойства усилительного каскада (КПД, нелинейные искажения, мощность сигнала на выходе каскада и т.д.) определяются положением начальной рабочей точки, которое задает ток покоя выходной цепи. Поэтому при изменении температуры, замене активного элемента и т. д. положение начальной рабочей точки не должно изменяться (сверх допустимых значений).

Если же активным элементом является биполярный транзистор, то изменение температуры или замена активного элемента могут повлиять на значение коэффициента усиления по току и значение теплового тока (обратного тока коллекторного перехода). Если транзистор полевой, то влияние скажется на напряжении отсечки и крутизне характеристики. Поэтому схема подачи смещения фиксированным током нецелесообразна, особенно если активным элементом является биполярный транзистор по схеме с ОЭ.

При подаче смещения фиксированным напряжением изменение температуры и замена транзистора в меньшей степени влияют на ток покоя коллектора (при использовании в качестве активного элемента биполярного или полевого транзисторов), поэтому такие схемы находят применение в промышленности.

Для того чтобы обеспечить работоспособность усилительного каскада при изменении температурных условий в режиме А, используют схемы стабилизации положения начальной рабочей точки.

Эмиттерная стабилизация. Стабилизация осуществляется введением в схему последовательной отрицательной ОС по постоянному току. Напряжение обратной связи снимается с резистора R_3 , который включен в цепь эмиттера.

Напряжение смещения, приложенное к эмиттерному переходу равно:

$$U_{об} = R_{д2}I_{д2} - R_3I_{оэ} \quad (4.23)$$

С изменением, например, температуры изменится ток покоя коллектора, а следовательно, и ток покоя эмиттера $I_{оэ}$. Пусть токи $I_{ок}$ и $I_{оэ}$ увеличатся. Начальная рабочая точка на выходной динамической характеристике должна подняться вверх (см. рисунок 4.9 в), но этого не произойдет, так как напряжение смещения $U_{об}$ уменьшится согласно формулы (4.23), а вместе с этим уменьшатся и токи транзистора. Начальная рабочая точка останется на прежнем месте.

Для исключения влияния отрицательной обратной связи по переменному току на коэффициент усиления параллельно резистору R_3 включен конденсатор C_3 . Если конденсатор C_3 отсутствует, то переменная составляющая эмиттерного тока создает на резисторе падение напряжения $u_3 = i_3R_3$, что снижает усиливаемое напряжение (так как $u_6 = u_{вх} - i_3R_3$), а следовательно, и коэффициент усиления. Чтобы переменная составляющая на всех частотах усиливаемого напряжения проходила через резистор, емкость конденсатора C_3 должна быть большой. При этом емкостное сопротивление $1/(2\pi fC_3) \ll R_3$.

Коллекторная стабилизация. Стабилизация осуществляется введением параллельной отрицательной ОС по напряжению. Напряжение подается через резистор R_6 , который включают между коллектором и базой. При этом напряжение на коллекторе $U_{ок} = U_{об} + R_6I_{об}$. Поскольку напряжение $U_{об}$ ничтожно мало по сравнению с напряжением на резисторе R_6 , им можно пренебречь.

Тогда

$$R_6 I_{06} = E_k - R_k (I_{ок} + I_{06}). \quad (4.24)$$

Откуда следует, что, например, при увеличении температуры и, следовательно, тока $I_{ок}$ напряжение на резисторе, равное $R_6 I_{06}$ уменьшается, т.е. уменьшается ток I_{06} , а это вызывает уменьшение тока $I_{ок}$. Чтобы исключить отрицательную ОС по переменному составляющей коллекторного напряжения (что вызвало бы снижение коэффициента усиления усилителя), в цепь базы вводят конденсатор C_ϕ . При этом резистор R_6 заменяют двумя с примерно равными сопротивлениями и конденсатор включают между ними и заземленной точкой. В результате переменная составляющая напряжения не попадает на резистор R_{61} . Следует заметить, что сопротивление конденсатора C_ϕ должно быть значительно меньше (в десятки раз) сопротивления $R_6 = R_{61} + R_{62}$.

Коллекторная стабилизация проще и экономичней эмиттерной, но уступает ей по диапазону стабилизируемых температур (стабилизация осуществляется в пределах изменения температуры не более чем на 30° и изменениях статического коэффициента передачи по току $H_{21Э}$ не более чем в 1,5 – 2 раза).

4.2 Разновидности усилителей

4.2.1 Многокаскадный усилитель

Многокаскадные усилители - усилители, образованные путем соединения между собой с помощью элементов связи нескольких усилительных каскадов. Как правило, усилители состоят из нескольких каскадов, при этом каждый отдельный каскад в составе усилителя выполняет свои функции. На рисунке 4.13 а приведена структурная схема многокаскадного усилителя, а на рисунке 4.13 б - реальная схем двухкаскадного усилителя с RC-связью (указаны только основные элементы).

Входное устройство служит для передачи сигнала от источника во входную цепь каскада предварительного усиления. В качестве входного устройства могут быть использованы конденсаторы резисторы, трансформаторы. Так, например, входными устройствами на рисунке 4.13 б являются конденсаторы C_1 и C_2 . Конденсатор C_1 включают, чтобы исключить прохождение постоянной составляющей тока и напряжения смещения первого активного элемента в источник сигнала, а также чтобы постоянная составляющая тока от источника сигнала не поступала на вход активного элемента. Конденсатор C_2 – входное устройство для второго каскада, он осуществляет связь каскадов.

Каскады предварительного усиления служат для усиления ТОКА напряжения или мощности сигнала до значения, необходимого для подачи на вход мощного усилителя. Для уменьшения нелинейных искажений в них почти всегда используется режим А. Транзисторы обычно включают по схеме с ОЭ.

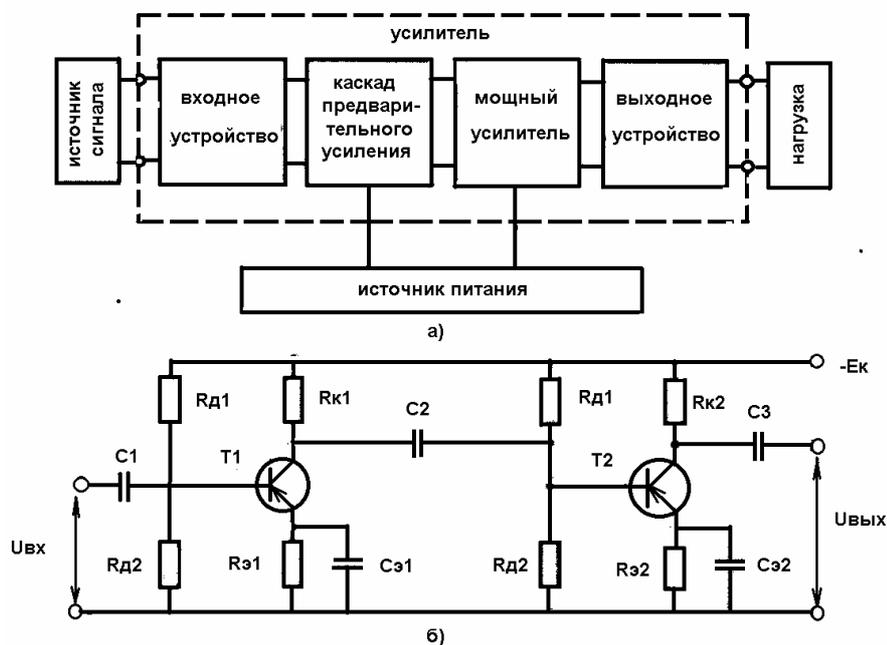


Рисунок 4.13

Усилитель мощности предназначен для отдачи в нагрузку сигнала требуемой мощности и может состоять из нескольких каскадов. Иногда мощный усилитель называют оконечным. Усилительный элемент в них и может работать как в режиме А, так и В. Транзисторы чаще всего включают по схемам с ОЭ и с ОБ

Выходное устройство необходимо для передачи сигнала и выходной цепи последнего усилителя в нагрузку. В качестве выходного устройства используют трансформаторы, конденсаторы и резисторы. Трансформаторы служат, например, для согласования выходного сопротивления последнего усилителя с сопротивлением нагрузки. На рисунке 4.13 б выходным устройством является конденсатор C_3 . Конденсаторы и резисторы используют для разделения постоянных составляющих тока и напряжения выходной цепи усилителя и нагрузки.

Межкаскадные связи служат для передачи сигнала от источника сигнала на вход первого усилителя, от выхода одного каскада на вход другого и от выходной цепи последнего усилителя на нагрузку, осуществляя функции разделительных элементов. При этом через них напряжения питания подаются на зажимы усилительных устройств.

Основные виды межкаскадных связей - гальваническая, резисторная, емкостная, трансформаторная и дроссельная. Иногда используют комбинации

этих связей. Прохождение постоянной составляющей сигнала обеспечивает только гальваническая связь, поэтому этот вид связи может быть применен и в усилителях постоянного тока. Остальные виды связей - в любых усилителях. Гальваническая связь может быть непосредственной и потенциометрической /3, 4, 7/.

Усилительные каскады называют по типу использованной в нем связи каскад с RC- связью (рисунок 4.13 б), трансформаторный каскад и т.д.

4.2.2 Импульсный усилитель

В общем случае импульсные сигналы любой формы можно представить в виде суммы постоянной составляющей и ряда гармонических колебаний разных частот. Спектр частот импульсного сигнала может быть очень широким - от десятков герц до десятков мегагерц. На рисунке 4.4 а, б был показан импульс наиболее распространенной прямоугольной формы, без искажений и с искажениями. Искажения обычно вызываются тем, что усилители обладают ограниченной полосой пропускания. Удлинение фронта импульса и выброс являются следствием завала частотной характеристики в области верхних частот а скос (спад) вершины импульса - завала частотной характеристики в области низких частот.

Так как прохождению высокочастотных составляющих сигнала препятствуют паразитные емкости внутренние сопротивления и т.д. а прохождению низкочастотных составляющих сигнала - емкости и индуктивности элементов усилителя, то импульс на выходе усилителя будет воспроизводиться без искажений только при достаточно широкой полосе пропускания усилителя. Таким образом, основное требование, предъявляемое к импульсным усилителям – это широкая полоса пропускания частот. Поэтому импульсные усилители часто называют широкополосными. Для удовлетворения требованию широкополосности в импульсных усилителях используют резисторные каскады которые обладают наилучшими амплитудно-частотными, фазовыми и переходными характеристиками

В качестве активных элементов импульсных усилителей используют высокочастотные транзисторы, биполярные чаще всего включают по схеме с ОЭ, а полевые - с ОИ. Для расширения полосы усиливаемых частот в каскады вводят специальные корректирующие цепи, позволяющие управлять частотной, фазовой и переходной характеристиками каскада. Схемы коррекции бывают с ОС и без нее. Рассмотрим в качестве примера схемы низкочастотной и высокочастотной коррекции без ОС.

Низкочастотная коррекция (коррекция плоской вершины импульса). Искажение плоской вершины импульса обычно происходит из-за наличия конденсаторов C_2 и C_3 (рисунок 4.14 а). Заряд их длится сравнительно долго (соизмерим с длительностью входного импульса). Приближенно можно

считать, что она начинается с того момента, когда формирование фронта выходного импульса уже закончилось и напряжение на коллекторе равно установившемуся значению напряжения выходного импульса $U_{уст}$ (см. рисунок 4.4, б). При заряде конденсатора C_2 на низких частотах произойдет увеличение его сопротивления и увеличение падения напряжения на нем а это снизит напряжение $U_{вых}$.

Целью коррекции является увеличение усиления сигнала по мере уменьшения его частоты. Один из возможных вариантов коррекции - включение в цепь коллектора каскада цепочки $R_\phi C_\phi$ (рисунок 4.14 а). На рисунке 4.14 б показана эквивалентная схема выходной цепи усилителя. Выходное сопротивление активного элемента переменному току отражено в ней сопротивлением R_Γ . Как известно усиление будет тем больше, чем выше сопротивление нагрузки. Сопротивление конденсатора изменяется с изменением частоты. Чтобы это сопротивление на средних (и тем более на верхних частотах полосы пропускания) было очень незначительным, емкость конденсатора C_ϕ выбирается сравнительно большой.

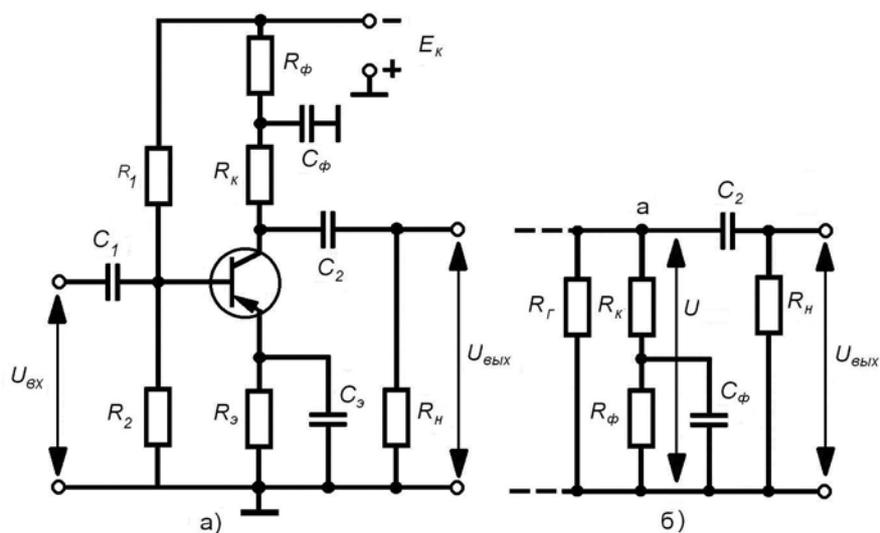


Рисунок 4.14

В этом случае на верхних частотах конденсатор C_ϕ шунтирует резистор R_ϕ , и корректирующая цепь не оказывает влияния на работу усилителя. С уменьшением частоты сопротивление конденсатора C_ϕ увеличивается, он уже не шунтирует R_ϕ и общее сопротивление $R_\phi || X_c$ увеличивается. Общее сопротивление коллекторной нагрузки ($R_\phi || X_c + R_k$) в результате возрастает, а вместе с этим увеличивается и напряжение, вследствие чего коэффициент усиления каскада на низких частотах возрастет. Таким образом, $U_{вых}$ вследствие увеличения падения напряжения на разделительном конденсаторе C_2 в идеальном случае не уменьшается, так как оно компенсируется

увеличением напряжения U (рисунок 4.14 б). С помощью рассмотренной низкочастотной коррекции при правильном выборе значений $R_{\phi}C_{\phi}$ можно значительно увеличить полосу пропускания за счет увеличения диапазона нижних рабочих частот и существенно снизить скос плоской вершины импульса на выходе.

Цепи, изменяющие частотную характеристику в области нижних частот и переходную характеристику в области больших времен, называют цепями низкочастотной коррекции. Цепочка $R_{\phi}C_{\phi}$ одновременно является развязывающим фильтром, предотвращающим появление паразитной ОС через общий источник питания, так как переменная составляющая напряжения питания замыкается через C_{ϕ} на землю и не попадает в коллекторную цепь транзистора.

Высокочастотная коррекция (коррекция фронта импульса). Наибольшее распространение получила схема высокочастотной параллельной коррекции индуктивностью. Корректирующая катушка индуктивности L_K включается последовательно с резистором коллекторной нагрузки R_K (рисунок 4.15 а). Они образуют параллельный резонансный контур с емкостью C_0 , нагружающей каскад.

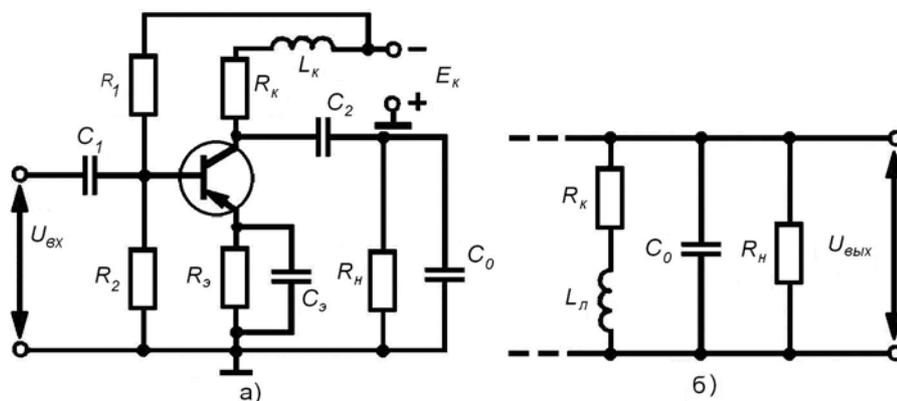


Рисунок 4.15

На рисунке 4.15 б показана эквивалентная схема выходной цепи каскада для верхних частот полосы пропускания. Емкость

$$C_0 = C_H + C_M + C_{\text{ВЫХ}} \quad (4.25)$$

где C_H - емкость нагрузки;
 C_M - емкость монтажа;
 $C_{\text{ВЫХ}}$ - выходная емкость транзистора.

Значение индуктивности L_K выбирают очень малым, так что индуктивное сопротивление на нижних и средних частотах незначительно и влияния на работу цепи не оказывает. На высоких частотах при соответственно выбранном значении L_K контур находится вблизи резонанса и сопротивление его возрастает. Так как контур является нагрузкой выходной цепи, произойдет увеличение коэффициента усиления, расширится полоса пропускания и улучшится частотная характеристика. Цепи, изменяющие частотную характеристику на верхних частотах и переходную характеристику в области малых времен, называют цепями высокочастотной коррекции.

Параллельная коррекция индуктивности отличается конструктивной простотой, невысокой стоимостью, надежностью в работе. Но этот вид коррекции пригоден лишь для усилителей в дискретном исполнении.

4.2.3 Усилитель постоянного тока

Усилителями постоянного тока (УПТ) называют такие приборы, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы, т. е. они способны усиливать не только переменные, но и постоянные составляющие напряжения и тока. Низшая рабочая частота таких усилителей нулевая, а верхняя может быть любой, вплоть до очень высокой (несколько мегагерц).

Усилители постоянного тока - наиболее распространенный тип усилительных устройств в вычислительной технике. Они имеют много разновидностей (дифференциальные, операционные, усилители с преобразованием сигнала и др.). Амплитудно-частотная характеристика УПТ равномерна.

Исходя из назначения УПТ, связь между каскадами должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечивалось прохождение постоянной составляющей, поэтому для межкаскадной связи нельзя использовать конденсаторы и трансформаторы. Усилители не должны содержать также блокировочных и разделительных конденсаторов. Связь между каскадами осуществляется или через резисторы, или непосредственно с помощью соединительных проводников (гальваническая межкаскадная связь).

В УПТ необходимо обеспечить условие, чтобы в отсутствие входного сигнала на выходе отсутствовали как переменная, так и постоянная составляющие сигнала, иначе нарушится пропорциональность между входным и выходным напряжениями. Однако если не будут приняты соответствующие меры, это требование в УПТ не будет соблюдаться. Отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения в отсутствие сигнала называется дрейфом усилителя.

Основными причинами дрейфа являются температурная и временная нестабильность параметров усилительных элементов, резисторов и источников питания, а также низкочастотные шумы и помехи. Дрейф нуля искажает

усиливаемые сигналы, может нарушить работу цепи настолько, что она будет неработоспособна.

Для компенсации дрейфа нуля, возникающего за счет изменения температуры, применяют специальные термокомпенсационные схемы, а на входе усилителя - дифференциальные каскады. Иногда усилитель предварительно прогревают, чтобы все его элементы к началу работы имели постоянную температуру, реже – термостатируют. Для исключения дрейфа, являющегося следствием нестабильности источников питания, последние стабилизируют с помощью электронных, магнитных и других стабилизаторов. УПТ не содержат элементов, которые не поддаются микроминиатюризации, поэтому в основном выполняются в виде гибридных и полупроводниковых интегральных микросхем. Усилители могут быть однотактными и двухтактными (дифференциальными). В настоящее время усилители постоянного тока выполняют по дифференциальной схеме

4.2.4 Дифференциальный усилитель

По структуре дифференциальные усилители (ДУ) являются усилителями постоянного тока. В микроэлектронике они являются одним из универсальных элементов линейных интегральных микросхем. Другое название их - параллельно-балансные каскады Их используют с целью обеспечения значительного снижения дрейфа нуля в усилителях постоянного тока.

Принцип работы балансной схемы можно пояснить на примере четырехплечевого моста, показанного на рисунке 4.16. Если выполняется условие $R_1/R_2=R_3/R_4$, т.е. мост сбалансирован, то в нагрузочном сопротивлении R_H ток равен нулю. Баланс не нарушится и в том случае, если будут изменяться напряжение E и сопротивления резисторов плеч моста, но при условии, что соотношение между сопротивлениями резисторов сохраняется.

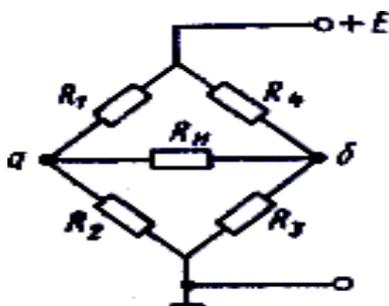


Рисунок 4.16

На рисунке 4.17 представлена схема простейшего дифференциального каскада. Нетрудно убедиться, что она аналогична схеме, представленной на рисунке 4.16, если резисторы R_2 , R_3 заменить транзисторами T_1 , и T_2 , и считать, что $R_1 = R_{k1}$, $R_2 = R_{k2}$.

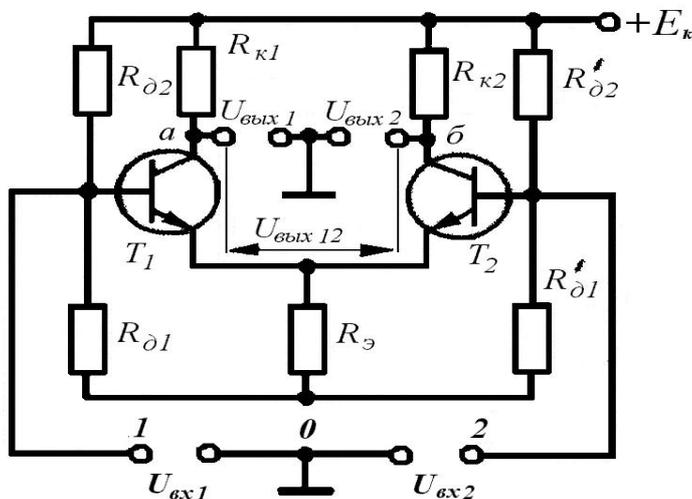


Рисунок 4.17

Сопротивления резисторов $R_{к1}$ и $R_{к2}$ выбирают равными, а транзисторы T_1 и T_2 с идентичными характеристиками. В этом случае схема симметрична.

Как и в случае четырехплечевого моста (см. рисунок 4.16), в отсутствие сигнала напряжение на выходе равно нулю, т.к. токи и потенциалы коллекторов транзисторов T_1 и T_2 равны. Поскольку схема симметрична, всякое изменение характеристик транзисторов (за счет изменения температуры или из-за старения) вызовет одинаковое изменение токов в обоих плечах, поэтому разбаланса схемы не произойдет и дрейф выходного напряжения будет практически равен нулю.

Рассмотрим, как изменится состояние цепи при подаче на входы 1 и 2 сигналов: равных по значению и однофазных (синфазных); равных по значению, но с противоположными фазами (дифференциальных).

На вход ДУ поданы синфазные сигналы. Потенциалы баз транзисторов T_1 и T_2 изменятся на $\Delta U_{б1} = \Delta U_{б2} = U_{вх1} = U_{вх2}$. На это же значение изменятся потенциалы эмиттеров. Ток через резистор $R_э$ поровну распределится между плечами ДУ, и потенциалы коллекторов изменятся на одно и то же значение. Напряжение на выходе будет равно нулю ($U_{вх12} = 0$). Таким образом, идеально симметричный ДУ не пропускает на выход синфазный сигнал.

На вход ДУ поданы дифференциальные сигналы. Входное напряжение между точками 1 и 2 будет равно разности этих сигналов $U_{вх12} = U_{вх1} - U_{вх2}$. Поскольку схема симметрична, часть напряжения равная $U_{вх12}/2$, приложится к эмиттерному переходу одного транзистора (со знаком плюс), а другая часть - к эмиттерному переходу другого транзистора (со знаком минус), Потенциал

эмиттера одна I транзистора увеличится, а другого уменьшится на $U_{\text{вх}12}/2$ соответственно, приращения токов в плечах схемы будут одинаковы, но будут иметь разные знаки. Потенциал коллектора одного транзистора увеличится, а другого уменьшится на одно и то же значение. На выходе схемы между точками а и б появится разность потенциалов, а следовательно, выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{вых}12} = U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2} . \quad (4.18)$$

Таким образом, дифференциальный сигнал, поданный на вход ДУ, вызывает появление усиленного сигнала на выходе. Поскольку рассмотренный тип усилителей реагирует только на дифференциальный сигнал, его называют дифференциальным усилителем.

В идеальных ДУ за счет подавления синфазного сигнала дрейфа нуля не существует, так как напряжение дрейфа обоих плеч является синфазным сигналом для симметричных цепей ДУ. Помехи и наводки действующие одновременно на оба входа, часто являются синфазными составляющими входного сигнала, но, поскольку абсолютная симметрия плеч ДУ практически невозможна, полностью подавить синфазную составляющую входного сигнала не удастся; в реальных ДУ дрейф нуля существует, но он очень незначителен по сравнению с дифференциальным (полезным) сигналом.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала при идеальной симметрии схемы, когда отсутствует синфазная составляющая входного сигнала определяется:

$$K_{\text{д}} = U_{\text{вых}12} / (U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}) , \quad (4.19)$$

где выходное напряжение $U_{\text{вых}12} = U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2}$.

В реальном ДУ в присутствии синфазной составляющей сигнала

$$U_{\text{вых}12} = K_{\text{д}} (U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}) + K_{\text{с}} (U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}) / 2 , \quad (4.20)$$

где $K_{\text{с}}$ – коэффициент усиления синфазного сигнала, когда дифференциальный сигнал отсутствует.

Качество дифференциального усилителя оценивают коэффициентом подавления синфазного сигнала:

$$K_{\text{псс}} = K_{\text{д}} / K_{\text{с}} . \quad (4.21)$$

ДУ считается хорошим, если $K_{\text{псс}} \geq 10^4 \div 10^5$ или 80 - 100 Дб. Отметим, что, поскольку в основе работы ДУ лежит идеальная симметричность его плеч, а выполнить это практически возможно только при микроэлектронном исполнении, наиболее широко ДУ используются в интегральных микросхемах.

В ИМС элементы расположены близко (на расстоянии нескольких десятков микрометров), что обеспечивает идентичность параметров элементов схемы.

4.2.5 Операционный усилитель

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входным каскадом, с очень высоким и стабильным коэффициентом усиления (от 1000 до 100000), широкой полосой пропускания ($f_b = 10 \div 100$ МГц), высоким входным сопротивлением ($R_{вх} > 10$ кОм), малым выходным сопротивлением ($R_{вых} < 100$ Ом), малым дрейфом нуля, высоким коэффициентом подавления синфазных сигналов, несимметричным выходом. Таким образом, под термином «операционный усилитель» понимают высококачественный универсальный усилитель /4/.

Условное обозначение ОУ показано на рисунке 4.18 а, а его амплитудная характеристика – на рисунке 4.18 б. Вход 1, обозначенный знаком плюс на рисунке 4.18 а, называют неинвертирующим (прямым), так как сигнал на выходе и СИГНАЛ на этом входе имеют одинаковую полярность. Вход 2, обозначенный знаком «-», называют инвертирующим, так как сигнал на выходе по отношению к сигналу на этом входе имеет противоположную полярность. На рисунке 4.18 в показана принципиальная схема ОУ.

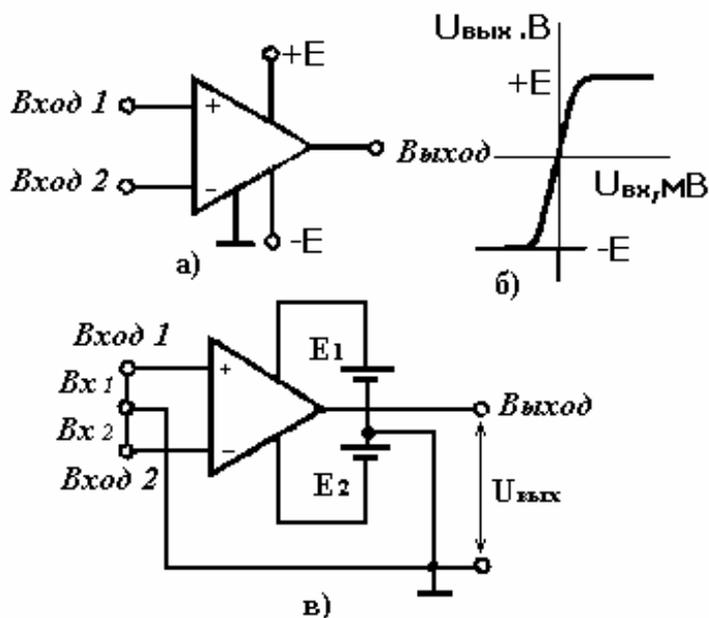


Рисунок 4.18

Питание осуществляется от двух последовательно включенных источников, напряжения которых одинаковы, но знаки относительно заземленной точки разные. Этим обеспечивается нулевой сигнал на выходе в

отсутствие входного сигнала и возможность получить выходной сигнал или положительной, или отрицательной полярности. Сигнал можно подавать от симметричного источника сигнала, соединенного с общим проводом, на вход 1 - вход 2 либо от двух отдельных источников, один из которых подключают к инвертирующему входу и общему проводу, Другой - к неинвертирующему и общему проводу. Часто сигнал подают на неинвертирующий вход, а через инвертирующий вход ОУ охватывают глубокой ОС. В этом случае можно получать устройства с различными свойствами, которые будут определяться параметрами цепи ОС. С помощью такого ОУ можно осуществлять математические операции (умножение, интегрирование, дифференцирование, сравнение и др. отсюда название этих усилителей - операционные).

Многообразие функций, которые можно выполнять ОУ, сделало его основным универсальным устройством аналоговых (линейных) интегральных микросхем.

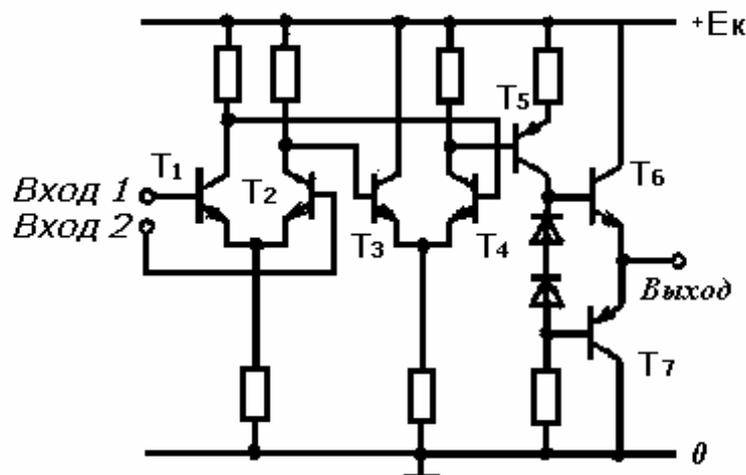


Рисунок 4.19

Типовая схема ОУ показана на рисунке 4.19. В ней имеется два дифференциальных каскада. Один – на транзисторах T₁ и T₂, другой – на транзисторах T₃ и T₄ (каскады предварительного усиления); переходный однотактный каскад на транзисторе T₅, и выходной каскад (мощный) на транзисторах T₆ и T₇, выполненный по схеме эмиттерного повторителя с дополнительной симметрией. Диоды играют роль нелинейных сопротивлений обеспечивающих температурную стабильность.

5 источники вторичного электропитания

5.1 Назначение источников вторичного питания

Источники вторичного питания предназначены для создания напряжений и токов, необходимых для питания радиоэлектронной аппаратуры. Они обеспечивают допустимый уровень переменных составляющих в выходном постоянном напряжении, стабильность выходного напряжения (или тока) при изменении напряжения сети или тока нагрузки, заданную экономичность, устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям выходных зажимов, работоспособность в заданном диапазоне температур [4, 5, 7].

Функциональная схема источника питания показана на рисунке 5.1.

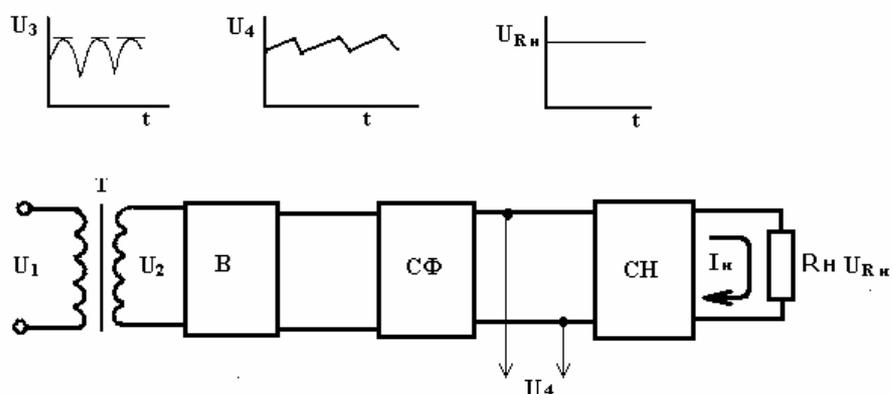


Рисунок 5.1

Трансформатор T служит для преобразования переменного напряжения U_1 сети в необходимое напряжение U_2 и для гальванической развязки источника питания от сети. Выпрямитель B , состоящий из выпрямительных диодов, преобразует переменное напряжение U в постоянное пульсирующее напряжение U_3 , а сглаживающий фильтр CF преобразует его в постоянное напряжение U_4 с небольшими пульсациями. Напряжение U_4 может быть использовано для питания каскадов аппаратуры, нормально работающих и при пульсациях (например, оконечных каскадов усилителей мощности звуковой частоты). Стабилизатор напряжения CH предназначен для окончательного сглаживания пульсаций, а также создания напряжения U_{RH} которое мало зависит от напряжения U_1 сети и тока I_H нагрузки.

5.2 Выпрямители

Выпрямители - это устройства, предназначенные для преобразования переменных напряжений (токов) в постоянные напряжения (токи). В схеме

однополупериодного выпрямления (рисунок 5.2 а, б) в течение первого полупериода (полярность напряжения U_2 , вторичной обмотки трансформатора Т указана без скобок) ток нагрузки I_H проходит по цепи: вывод 1 трансформатора Т, диод VD, резистор R_H , вывод 2. При этом на нагрузке появляется синусоидальный импульс напряжения U_{RH} (рисунок 5.2 б), а на диоде VD - малое прямое напряжение $U_{пр}$ (рисунок 5.2 г). В течение следующего полупериода (полярность напряжения указана в скобках) в цепи нагрузки протекает малый обратный ток $I_{обр}$ диода VD, максимальное обратное напряжение на котором будет равно амплитуде вторичного напряжения U_{2m} .

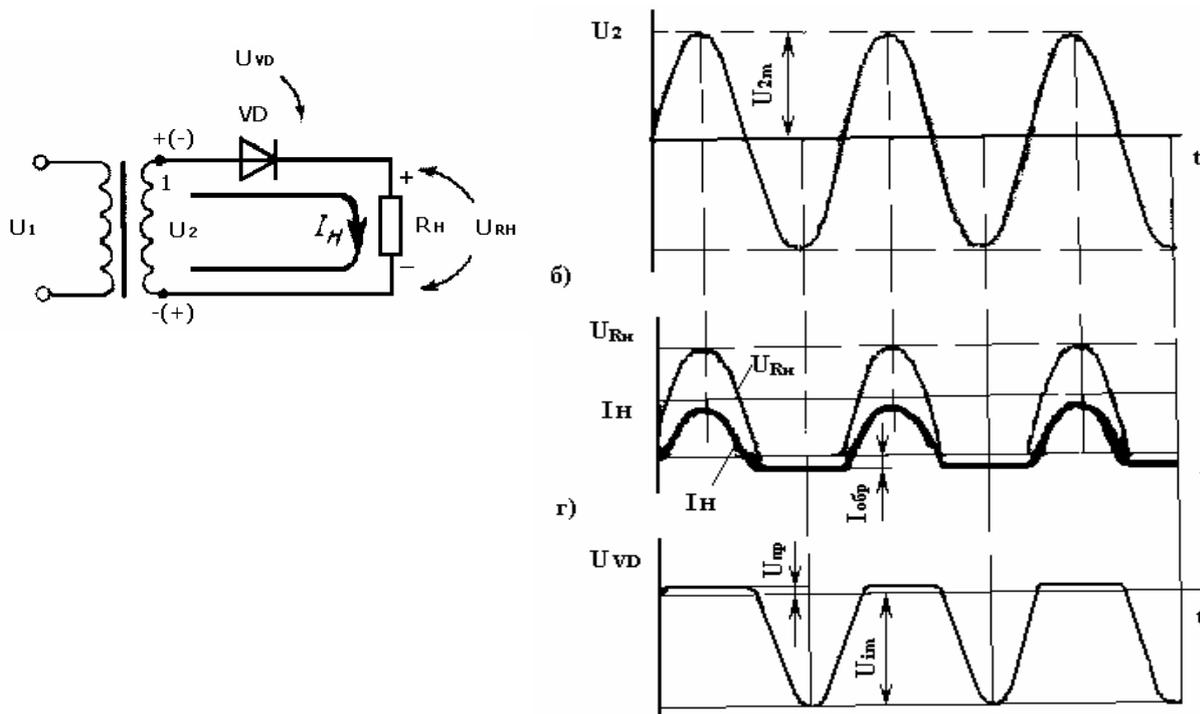


Рисунок 5.2

Так как при *однополупериодном выпрямлении* выходное напряжение один раз за период достигает максимального значения, частота его пульсаций равна частоте сети. Такую схему выпрямления имеют, например, слаботочные высоковольтные выпрямители, служащие для питания анодов электронно-лучевых трубок.

В схеме *двухполупериодного выпрямления с нулевым выводом* (рисунок 5.3 а), временные диаграммы которой показаны на рисунке 5.3 б, в, г, д, е, в первый полупериод в точке 1 относительно точки 2 действует положительное напряжение, а в точке 3 - отрицательное. Вторичную обмотку трансформатора Т выполняют так, чтобы в точках 1 и 3 были одинаковые, но противофазные относительно точки 2 напряжения. U'_2 и U''_2 - Напряжение U'_2 вызывает ток I_1 , который протекает по цепи: точка 1, диод VD1, резистор R_H , точка 2 (т.е. ток в нагрузку поступает с верхней половины вторичной обмотки трансформатора Т). Ток I_1 создает на резисторе R_H падение напряжения U_{RH} , полярность

которого указана, а амплитуда равна амплитуде напряжения U_{2m} между точками 1 и 2. В течение этого полупериода диод VD2 закрыт напряжением, действующим между точками 1 и 3, максимальное значение которого равно амплитудному значению напряжения на всей вторичной обмотке трансформатора или двойной его амплитуде $2U_{2m}$ на ее половине. При этом на проводящем ток в течение всего полупериода диоде VD1 образуется небольшое прямое падение напряжения $U_{пр}$.

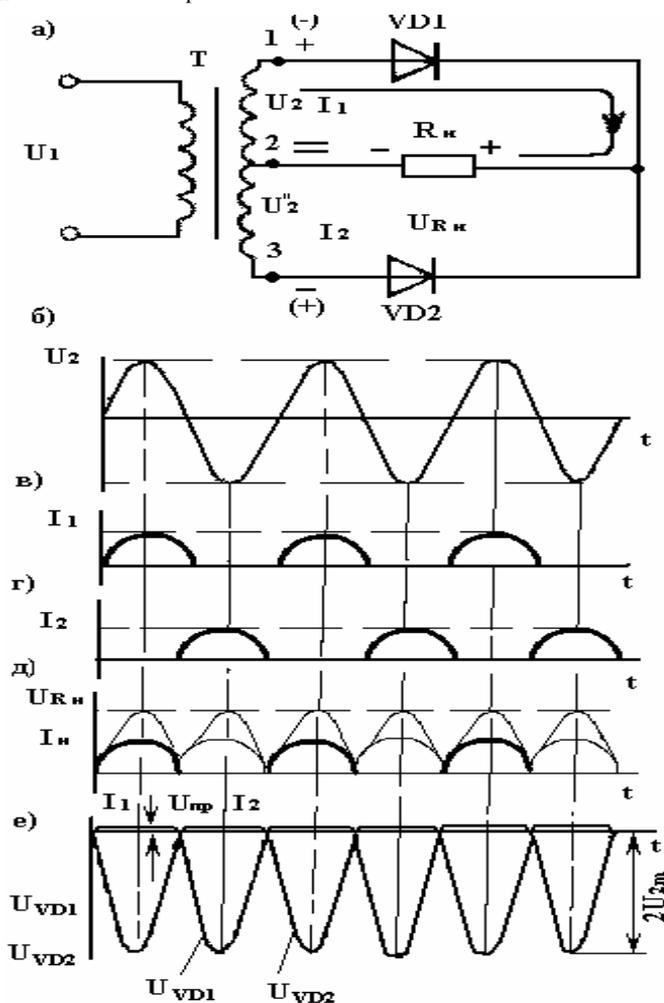


Рисунок 5.3

В следующий полупериод диод VD2 начинает проводить ток по цепи: точка 3, диод VD2, резистор R_n , точка 2. При этом на нагрузке появляется синусоидальный импульс напряжения той же полярности, что и в первый полупериод. Диод VD1 в течение второго полупериода закрыт. Таким образом, диоды поочередно проводят ток в нагрузку.

Частота пульсаций выходного напряжения при двухполупериодном выпрямлении равна удвоенной частоте напряжения сети, так как за один период ток нагрузки дважды достигает максимума. Такую схему выпрямления используют в сильноточных низковольтных выпрямителях.

5.3 Сглаживающие фильтры

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения до необходимого уровня. Оценивают выпрямленное напряжение коэффициентом пульсаций k_p - отношением амплитуды первой гармоники U_{1m} , к среднему выходному напряжению U_{cp} , т.е. $k_p = U_{1m}/U_{cp}$. Обычно k_p определяют как отношение половины размаха пульсаций ΔU (рисунок 5.4) к среднему выходному напряжению U_{cp} , т.е.

$$k_p = 0.5\Delta U / U_{cp} \quad (5.1)$$

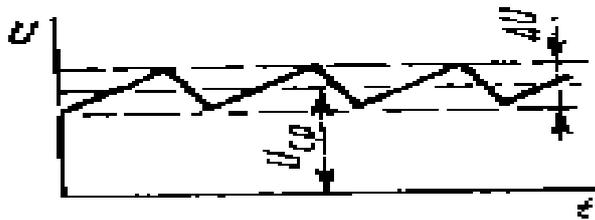


Рисунок 5.4

Сглаживание пульсаций оценивают коэффициентом сглаживания $k_{cгл}$, который показывает, во сколько раз коэффициент пульсаций $k_{пвых}$ на выходе фильтра меньше коэффициента пульсаций $k_{пвх}$ на его входе, т.е.

$$k_{cгл} = k_{пвх} / k_{пвых} \quad (5.2)$$

5.3.1 Индуктивный фильтр

Индуктивный сглаживающий фильтр (рисунок 5.5 а) представляет собой катушку индуктивности L (дроссель), активное сопротивление которой $R_{др}$ (рисунок 5.5 б) постоянному току I невелико и значительно меньше сопротивления нагрузки R_H . Поэтому напряжение на нагрузке U_{RH} близко по значению постоянной составляющей $U_{=}$ входного напряжения $U_{вх}$.

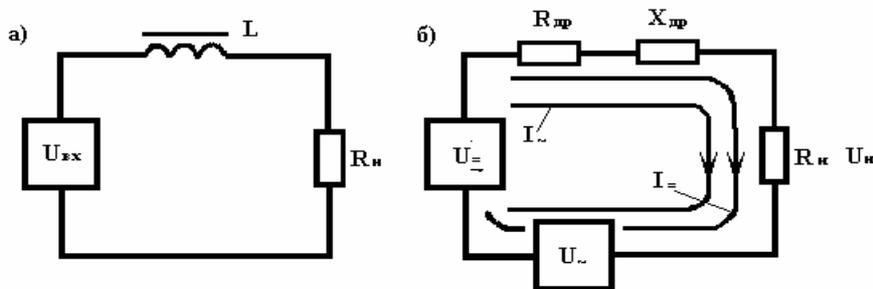


Рисунок 5.5

Для переменной составляющей тока $I_{\text{р}}$ реактивное сопротивление $X_{\text{др}}$ значительно больше сопротивлений $R_{\text{др}}$ и $R_{\text{н}}$, поэтому основное падение напряжения, вызванное током I приходится на катушку индуктивности, а на нагрузке переменное напряжение невелико [4].

Коэффициент сглаживания такого фильтра может быть определен как:

$$k_{\text{сгл}} = 2\pi f_{\text{п}} L / (R_{\text{др}} + R_{\text{н}}) \quad (5.3)$$

Для улучшения сглаживания выбирают схему выпрямления с наибольшей частотой пульсаций $f_{\text{п}}$ индуктивность катушки L должна быть по возможности большей, а ее активное сопротивление $R_{\text{др}}$ - малым.

Индуктивные сглаживающие фильтры применяют в силовых выпрямителях.

5.3.2 Емкостной фильтр

Емкостной фильтр (рисунок 5.6 а) представляет собой конденсатор $C_{\text{ф}}$, сопротивление которого переменному току значительно меньше сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$. Поэтому общее сопротивление параллельно включенных конденсатора $C_{\text{ф}}$ и нагрузки $R_{\text{н}}$ оказывается значительно меньше сопротивлений диодов и обмотки трансформатора, являющихся внутренним сопротивлением выпрямителя. Падение напряжения, вызываемое переменной составляющей выпрямленного тока, происходит в основном на внутреннем сопротивлении выпрямителя и лишь незначительное переменное напряжение пульсаций выделяется на нагрузке $R_{\text{н}}$. Сглаживание пульсаций тем лучше, чем больше емкость конденсатора $C_{\text{ф}}$ и сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. Емкостные фильтры широко используются в источниках питания.

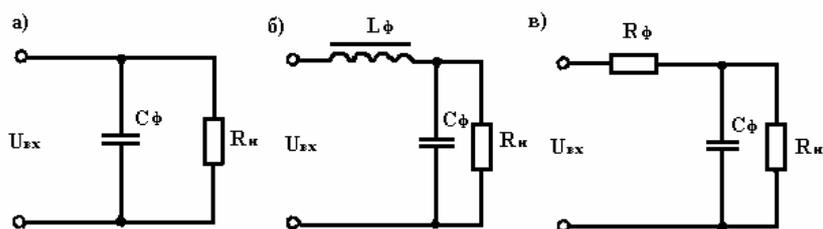


Рисунок 5.6

5.3.3 Индуктивно-емкостной фильтр

Индуктивно-емкостной (LC) фильтр (рисунок 5.6 б) состоит из катушки индуктивности $L_{\text{ф}}$ и конденсатора $C_{\text{ф}}$. Коэффициент сглаживания LC-фильтра определяется:

$$k_{\text{сгл}} = 4\pi f_n^2 LC - 1 \quad (5.4)$$

LC-фильтры обладают лучшими по сравнению с другими фильтрами параметрами, но громоздки и довольно дороги. Эти фильтры применяют в выпрямителях, предназначенных для питания выходных каскадов мощных передатчиков на электронных лампах, а также в тиристорных выпрямителях, так как тиристоры могут работать только на индуктивную нагрузку и выходят из строя, если первый элемент сглаживающего фильтра - конденсатор.

5.3.4 Резистивно-емкостной фильтр

Резистивно-емкостной (RC) фильтр (рисунок 5.6 в) состоит из резистора R_{ϕ} и конденсатора C_{ϕ} .

Коэффициент сглаживания RC-фильтра:

$$k_{\text{сгл}} = R_{\phi}(R_{\phi} + R_{\text{H}})2\pi f_n C_{\phi} . \quad (5.5)$$

Для увеличения $k_{\text{сгл}}$ номиналы резистора R_{ϕ} и конденсатора C_{ϕ} должны быть как можно большими, а схема выпрямления иметь наибольшую частоту пульсаций. Однако чрезмерное увеличение сопротивления резистора R_{ϕ} уменьшает выходное напряжение и КПД фильтра, т.к. на резисторе R_{ϕ} рассеивается слишком большая мощность, поэтому его сопротивление рассчитывают по формуле:

$$R_{\phi} = (0,15 \div 0,5)R_{\text{H}}. \quad (5.6)$$

RC-фильтры просты по конструкции, сравнительно дешевы и применяются в маломощных источниках питания, имеющих ток нагрузки несколько десятков миллиампер.

5.4 Стабилизация напряжения и тока

Стабилизатор - электронное устройство, предназначенное для стабилизации напряжения (тока) в цепи вторичного электропитания. Стабилизированные источники питания в основном применяют в радио-электронных устройствах, выполненных на транзисторах интегральных микросхемах, так как для их работы необходимы постоянные и независимые питающие напряжения и токи. Кроме того, стабилизаторы напряжения защищают эти устройства от кратковременных бросков напряжения сети, предохраняя от перенапряжений транзисторы и микросхемы. Одновременно стабилизаторы сглаживают пульсации выпрямленного напряжения, т. е. ведут себя как активные сглаживающие фильтры /4/.

5.4.1 Стабилизатор напряжения

Стабильность выходного напряжения оценивают коэффициентом стабилизации:

$$k_{ст} = (\Delta U_{вх} / \Delta U_{вых}) \cdot (U_{вых} / U_{вх}), \quad (5.7)$$

где $\Delta U_{вх}$ - изменение входного напряжения;

$\Delta U_{вых}$ - изменение выходного напряжения, вызванное изменением входного.

В параметрических стабилизаторах напряжения (рисунок 5.7) используется малая зависимость напряжения стабилитрона от проходящего через него тока (см. ВАХ стабилитрона).

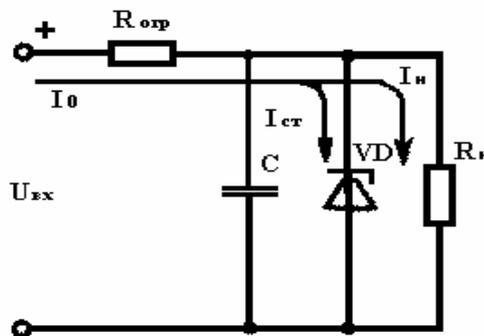


Рисунок 5.7

При этом входное напряжение $U_{вх}$ распределяется между ограничивающим резистором $R_{огр}$ и параллельно включенными стабилитроном VD и резистором нагрузки $R_н$. Схему стабилизатора рассчитывают так, чтобы при полных изменениях напряжения $U_{вх}$ режим стабилитрона соответствовал рабочему участку. В этом случае напряжение на нагрузке изменяется не более чем на малую величину $\delta U_{ст}$, т.е. будет стабильным. При импульсном изменении нагрузки параллельно стабилитрону включают конденсатор C (см. рисунок 5.7), зарядом которого поддерживается выходное напряжение в моменты увеличения нагрузки.

Параметрический стабилизатор имеет $k_{ст}$ порядка 20-30. Больший $k_{ст}$ получают последовательным включением двух параметрических стабилизаторов, но в этом случае недопустимо мал КПД. Параметрические стабилизаторы применяют в качестве вспомогательных опорных источников напряжения в стабилизаторах напряжения и тока других типов, а также когда ток нагрузки невелик – несколько миллиампер.

Компенсационные стабилизаторы напряжения бывают двух типов: с параллельным (рисунок 5.8) и последовательным (рисунок 5.9) регулирующими элементами.

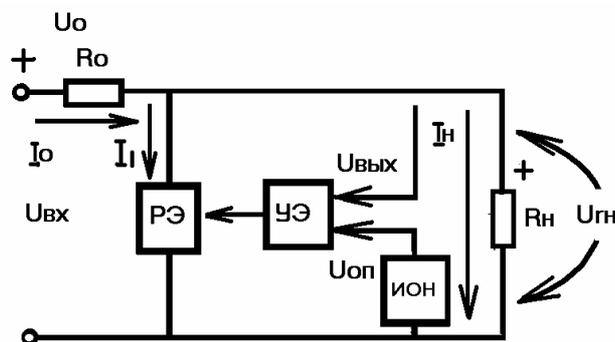


Рисунок 5.8

В схеме, показанной на рисунке 5.8, регулирующий элемент РЭ включен параллельно нагрузке R_H и его сопротивление задается выходным сигналом управляющего элемента УЭ, на вход которого для сравнения поступают выходные напряжения $U_{вых}$ и $U_{оп}$ соответственно стабилизатора и источника опорного напряжения ИОН (обычно это параметрический стабилизатор). При увеличении входного напряжения $U_{вх}$ (или нагрузки R_H) увеличивается выходное U_{RH} . Сигнал рассогласования $U_p = U_{RH} - U_{оп}$, усиливаемый управляющим элементом УЭ, уменьшает сопротивление РЭ. При этом токи I_1 и $I_0 = I_1 + I_H$ увеличиваются, увеличивая падение напряжения U_0 на балластном резисторе R_0 частично компенсируя рост $U_{вх}$. При уменьшении входного напряжения происходит обратное: ток I_1 и напряжение U_0 уменьшаются, частично компенсируя уменьшение $U_{вх}$.

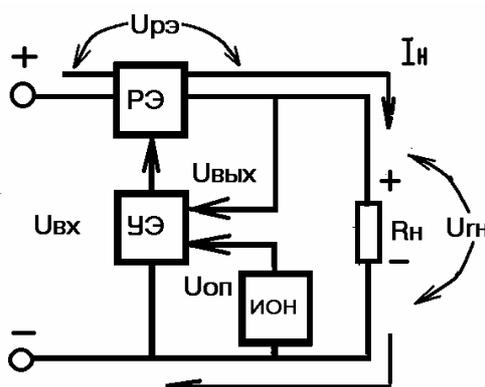


Рисунок 5.9

В схеме, показанной на рисунке 5.9, регулирующий элемент включен последовательно нагрузке R_H . При увеличении $U_{вх}$ увеличиваются напряжение нагрузки U_{RH} , сигнал рассогласования $U_p = U_{вых} - U_{оп}$ и сопротивление регулирующего элемента РЭ. При этом напряжение $U_{рэ}$ увеличивается, частично компенсируя рост U_{RH} .

Компенсационный стабилизатор напряжения на транзисторах (рисунок 5.10) имеет цепь тока нагрузки, состоящую из двух участков коллектор-эмиттер регулирующего транзистора VT1 (так выполнен регулирующий элемент) и резистора нагрузки R_H . Входное напряжение распределяется между этими участками цепи, т.е. $U_{вх} = U_{кэ1} + U_{RH}$. Усилитель сигнала рассогласования выполнен на транзисторе VT2, на переход база – эмиттер которого поступает напряжение рассогласования:

$$U_p = \alpha U_{RH} - U_{оп}, \quad (5.8)$$

где αU_{RH} – напряжение базы, пропорциональное напряжению U_{RH} нагрузки;

$$\alpha = R_4 / (R_3 + R_4) - \text{коэффициент пропорциональности.}$$

Вырабатываемое параметрическим стабилизатором на стабилитроне VD опорное напряжение $U_{оп}$ не зависит от напряжения $U_{вх}$ и тока нагрузки I_H .

При подаче усиленного сигнала рассогласования U_p на базу регулирующего транзистора VT1, потенциал эмиттера которого равен напряжению нагрузки U_{RH} , напряжение на эмиттерном переходе:

$$U_{бэ1} = U_{к2} - U_{RH}. \quad (5.9)$$

При увеличении входного напряжения напряжение нагрузки растет и увеличиваются напряжение базы αU_{RH} и токи транзистора VT2. При этом уменьшаются напряжения $U_{к2}$ и $U_{бэ1}$, и соответственно токи базы и эмиттера транзистора VT1. Это равноценно увеличению сопротивления промежутка коллектор-эмиттер транзистора VT1 и падения напряжения на нем, т.е. почти все приращение входного напряжения $U_{вх}$ приходится на регулирующий транзистор.

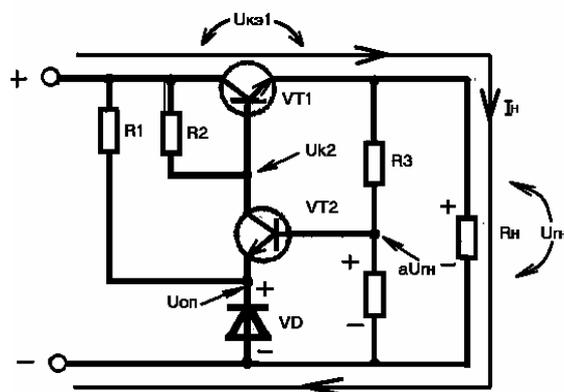


Рисунок 5.10

При уменьшении входного напряжения уменьшаются сопротивление промежутка коллектор-эмиттер транзистора VT1 и напряжение на этом транзисторе, а выходное напряжение остается неизменным. Коэффициент стабилизации компенсационных стабилизаторов напряжения достигает сотен и даже тысяч единиц. Эти стабилизаторы являются основными источниками питания радиоэлектронных устройств на транзисторах и микросхемах.

5.4.2 Стабилизатор тока

Для питания некоторых каскадов радиоэлектронной аппаратуры необходимы стабилизированные токи, значения которых не зависят от входных напряжений и сопротивлений нагрузки. Параметрический стабилизатор тока (рисунок 5.11 а) выполняется на транзисторе, включенном по схеме с ОБ. Эмиттерный ток транзистора $I_{\text{Э}} = U_{\text{СТ}} / R_1$, поскольку обычно сопротивление резистора R_1 значительно больше сопротивления, эмиттерного перехода. Т.к. ток коллектора $I_{\text{К}} = H_{21} \cdot I_{\text{Э}} = H_{21} \cdot U_{\text{СТ}} / R_1$ не зависит от сопротивления нагрузки и входного напряжения, данная схема является стабилизатором тока.

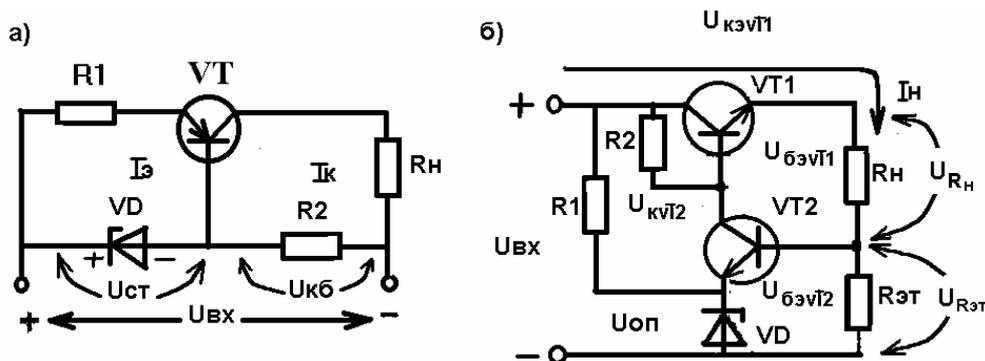


Рисунок 5.11

Компенсационный стабилизатор тока (рисунок 5.10 б) имеет схему, аналогичную схеме компенсационного стабилизатора напряжения. Отличие состоит лишь в том, что резистор нагрузки подключается вместо резистора R_3 . В качестве источника опорного напряжения используется параметрический стабилизатор на низковольтном стабилитроне VD. Сопротивление эталонного резистора определяют по формуле:

$$R_{\text{ЭТ}} = (U_{\text{оп}} + U_{\text{бэвТ2}}) / I_{\text{н}} \quad (5.10)$$

Поскольку все параметры в этой формуле стабильны и не зависят от входного напряжения и тока нагрузки, стабилен и ток нагрузки.

6 Основы микроэлектроники

Все увеличивающиеся требования к электронным устройствам привели к созданию нового быстро и эффективно развивающегося научно-технического направления - микроэлектроники.

Микроэлектроника - это область электроники, которая охватывает комплекс проблем по созданию электронных устройств в микроминиатюрном интегральном исполнении. Элементной базой микроэлектроники являются интегральные микросхемы.

6.1 Интегральная микросхема

Интегральная микросхема – это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала (или накопления информации) и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставки и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Основная особенность ИМС состоит в том, что она выполняет законченную, как правило, весьма сложную функцию и может быть усилителем, триггером, счетчиком или другим устройством, тогда как для выполнения той же функции на электронных (дискретных) приборах требуется собрать соответствующую схему. ИМС содержит элементы и компоненты /4, 9/.

Элементом ИМС называют ее часть, которая выполняет функцию электронного элемента (диода, транзистора, конденсатора, резистора), конструктивно неотделимую от ИМС.

Компонентом ИМС называется та ее часть, которая выполняет функцию электронного элемента, но перед монтажом является самостоятельным изделием.

Под кристаллом в микроэлектронике понимают готовый полупроводниковый прибор и микросхему без внешних выводов и корпуса.

ИМС обладают высокой степенью надежности, что обеспечивается технологией их изготовления и малым числом внутренних соединений. Стоимость ИМС значительно ниже стоимости аналогичных изделий на дискретных элементах, так как изготовление различных элементов производится в едином технологическом цикле и число операций не превышает числа операций при изготовлении одного дискретного элемента, например транзистора. ИМС имеют малые массу и размеры, а также малое потребление энергии.

6.2 Элементы интегральных микросхем

Классифицируют ИМС по различным признакам: по функциональному назначению - цифровые, аналоговые (линейные), аналого-цифровые; по характеру выполняемой функции - усилители, генераторы (мультивибраторы, блокинг-генераторы и др.), триггеры, логические элементы и другие; по принципу действия основных элементов - биполярные, МДП и комплементарные КМДП; по конструктивно-технологическим признакам - полупроводниковые, пленочные, гибридные и совмещенные. Наиболее распространена классификация по двум последним признакам.

Полупроводниковая ИМС представляет собой полупроводник, в поверхностном слое и объеме которого сформированы области, эквивалентные элементам электрической схемы, изоляции и межсоединения. В качестве полупроводника обычно используют кремний, он является несущей частью конструкции и называется подложкой. Пример структуры полупроводниковой ИМС с омическими контактами 1-5 и ее эквивалентная схема показаны на рисунке 6.1 а, б.

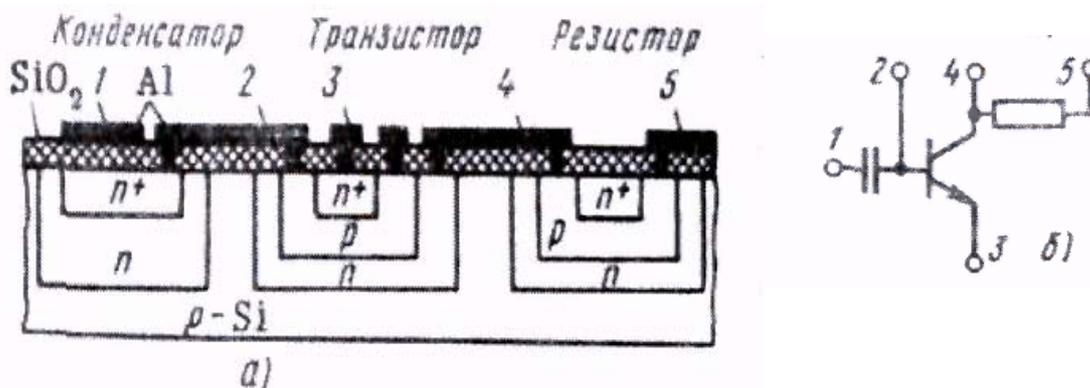


Рисунок 6.1

Изготавливают полупроводниковые ИМС групповым методом, при котором одновременно создается большое число микросхем. Так, на одной пластине диаметром 76 мм можно разместить до 5000 электронных микросхем, каждая из которых может содержать от 10 до 20000 электронных элементов. В перспективе диаметр пластин предполагают увеличить до 300 мм и разместить на них до нескольких десятков миллионов элементов /7/.

Пленочные ИМС представляют собой изолирующую подложку (основание), на поверхности которой все элементы и межсоединения сформированы в виде послойно нанесенных пленок. Пленочные ИМС содержат только пассивные элементы, так как путем комбинации различных пленок

получить активные элементы (диоды и транзисторы) еще не удалось. Поэтому применение пленочных ИМС ограничено.

Гибридные ИМС- это микросхемы представляющие собой комбинацию пленочных микросхем, навесных дискретных (активных) компонентов и полупроводниковых ИМС. которые обычно располагают на диэлектрической подложке пленочной ИМС. Пример структуры гибридной ИМС и ее эквивалентная схема показаны на рисунке 6.2 а, б (1 – 6 омические контакты).

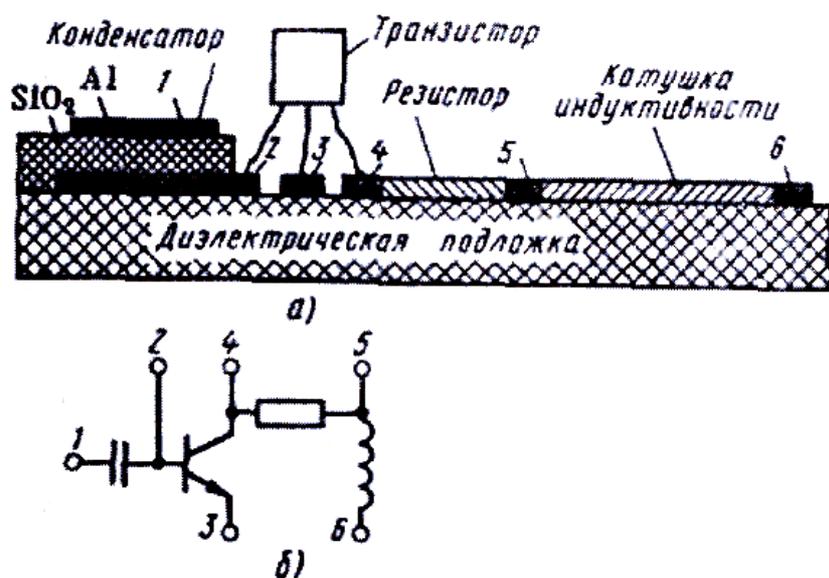


Рисунок 6.2

Совмещенные ИМС - это микросхемы, у которых активные элементы выполнены так же, как и у полупроводниковых ИМС, а пассивные - как у пленочных ИМС. При этом пассивные элементы выполняются на предварительно изолированной части той же подложки, что и активные элементы. Все ИМС помещают в герметичный корпус.

Функциональную сложность ИМС характеризуют степенью интеграции - числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Количественную оценку степени интеграции производят по коэффициенту $K = \lg(N)$, где N число элементов и компонентов схемы (таблица 6.1).

Таблица 6.1

Степень интеграции	Значение К	Число элементов	Название ИМС
1	<1	до 10	Простая (малая)
2	$1 < k < 2$	11-100	Средняя (СИС)
3	$2 < k < 4$	101-10000	Большая (БИС)
4-5	>4	> 10000	Сверхбольшая (СБИС)

Примером простых ИМС могут служить логические элементы. Средние ИМС - это сумматоры, счетчики, оперативные запоминающие устройства (ОЗУ), постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) емкостью 256-1024 бит. Большие ИМС (БИС) – это арифметико-логические и управляющие устройства. В последние десятилетия разработаны ИМС 4-5-ой степени интеграции с числом элементов $M=10^4-10^6$ и минимальными размерами элементов 1,0-0,1 мкм сверх большие ИМС (СБИС).

В качестве характеристики ИМС используют также плотность упаковки элементов - количество элементов (чаще всего транзисторов} на единицу площади кристалла. В настоящее время плотность упаковки ИМС составляет 500-1000 элементов/мм² и более.

Элементы ИМС. Все элементы полупроводниковых ИМС выполняют на поверхности и в объеме полупроводникового кристалла. Каждому из них соответствует определенная область полупроводникового материала, свойства и характеристики которой соответствуют свойствам и характеристикам дискретных элементов - диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов и др. Эти области изолируют друг от друга либо путем создания обратносмещенных *p-n*-переходов, либо диэлектриками. Все элементы соединяют в соответствии с электрической схемой. Межсоединения выполняют путем напыления металла на поверхность полупроводника или создают высоколегированные полупроводниковые полоски (металлизация). Межсоединения называют также металлической разводкой. Основным материалом для межсоединений служит алюминий.

В основе конструкций ИМС лежит транзисторная структура, все активные и пассивные элементы реализуются с ее помощью. Базовыми элементами являются биполярные и МДП-транзисторы.

Биполярные транзисторы. В ИМС используют обе структуры биполярных транзисторов *n-p-n* и *p-n-p*. Наиболее часто применяют транзистор *n-p-n*-типа. Технология таких ИМС разрабатывается в расчете на то, чтобы обеспечить оптимальные параметры транзисторов, остальные элементы ИМС

(транзисторы p - n - p -типа, диоды, резисторы и др.) создаются на основе структурных слоев транзисторов n - p - n -типа.

Многоэмиттерные транзисторы. Помимо биполярных транзисторов, соответствующих дискретным транзисторам, в микроэлектронике применяют разновидности транзисторов, не имеющие аналогов в дискретном исполнении. Многоэмиттерные транзисторы (МЭТ) являются одним из таких видов. Они имеют (рисунок 6.3 а) один коллектор К и несколько (до 8 и более) эмиттеров Э₁, Э₂, Э₃, объединенных одним общим базовым слоем Б.

Эмиттеры представляют собой высоколегированные n -слои малых размеров, под эмиттерными переходами расположен общий базовый p -слой. Коллектором является эпитаксиальный n -слой, нанесенный на подложку n^+ -типа (эпитаксиальным называют тонкий рабочий слой однородного полупроводника, наращиваемый на сравнительно толстую подложку) В общем случае МЭТ можно рассматривать как совокупность отдельных транзисторов с соединенными базами и коллекторами (рисунок 6.3 б, в) МЭТ в ИМС используются для созданий схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

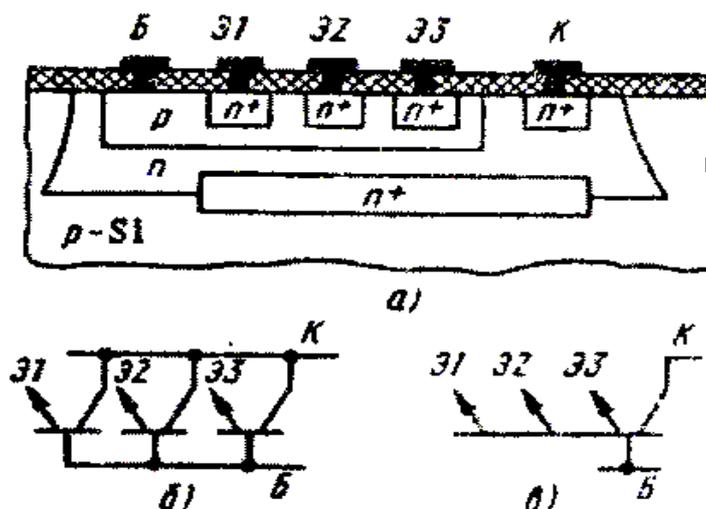


Рисунок 6.3

Многоколлекторные транзисторы. Структура многоколлекторного транзистора (МКТ) (рисунок 6.4 а) такая же, как и структура МЭТ, но используется она иначе. Здесь роль эмиттера выполняет эпитаксиальный n -слой, а коллекторами являются высоколегированные n -слои малых размеров. Поэтому МКТ можно рассматривать как МЭТ в инверсном режиме (рисунок 4.4 б, в). Исходя из такого использования структуры, необходимо увеличивать коэффициент инжекции эмиттера. С этой целью подложку n^+ -типа располагают по возможности ближе к базовому слою. Будучи высоколегированной, она обеспечивает увеличение коэффициента инжекции.

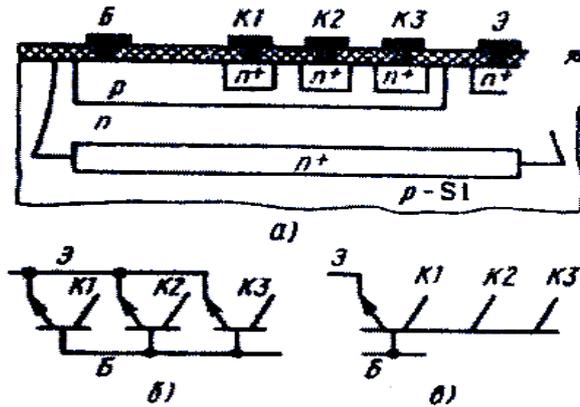


Рисунок 6.4

МКТ используют для создания логических схем с инжекционным питанием, называемых схемами И²Л (интегральная инжекционная логика). Такие схемы нельзя выполнить на дискретных элементах. В общем случае схемы И²Л состоят из нескольких многоколлекторных *n-p-n*-транзисторов и многоколлекторного *p-n-p*-транзистора выполняющего функции источника питания многоколлекторных транзисторов и называемого инжекторным. Эмиттер инжекторного транзистора называют инжектором и обозначают И.

Схема из двух МКТ и одного двухколлекторного инжекторного транзистора показана на рисунке 6.5 а.

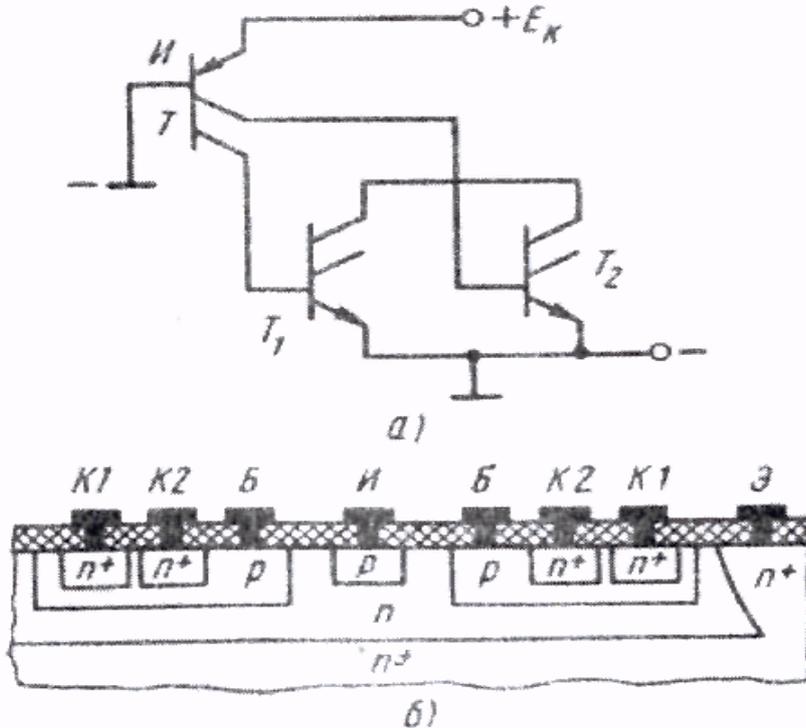


Рисунок 6.5

На рисунке 6.5 б представлена структура этой схемы (И²Л). Эпитаксиальный *n*-слой (вместе с подложкой *n*-типа) является эмиттером всех *n-p-n*-транзисторов, базой каждого МКТ является свой *p*-слой, а коллектором - малые *n*⁺-слои. Инжекторный *p-n-p*-транзистор имеет отдельно выполненный в виде длинной *p*-полоски инжектор, его базой служит эпитаксиальный *n*-слой, а коллекторами - базовые *p*-слои многоколлекторных *n-p-n*-транзисторов. Таким образом, в схеме один и тот же слой выполняет две функции: является базой *p-n-p*-транзистора и коллективом *n-p-n*-транзистора, эмиттер *n-p-n*-транзистора является базой *p-n-p*-транзистора.

Полевые МДП-транзисторы. В ИМС в основном применяют МДП-транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом. В качестве диэлектрика обычно используют SiO₂, тогда эти транзисторы называют МОП-транзисторами. Канал транзисторов может быть, и *p*-, и *n*-типа. По сравнению с ИМС на биполярных транзисторах ИМС на МОП-транзисторах технологически проще, так как при этом не требуется изоляции элементов, истоки и стоки смежных транзисторов разделены встречно включенными *p-n*-переходами. Поэтому МДП-транзисторы можно располагать близко друг к другу, что обеспечивает большую плотность компоновки. МДП-транзисторы можно использовать и в качестве пассивных элементов ИМС, а также нагрузочных резисторов (при соответствующем включении). Все это позволяет создавать логические ИМС полностью на базе только МДП-структур.

Диоды. Для создания диода нужно сформировать один *p-n*-переход. Но в биполярных ИМС основной структурой является транзисторная, поэтому диоды получают путем диодного включения транзисторов. Возможны пять вариантов таких включений (рисунок 6.6).

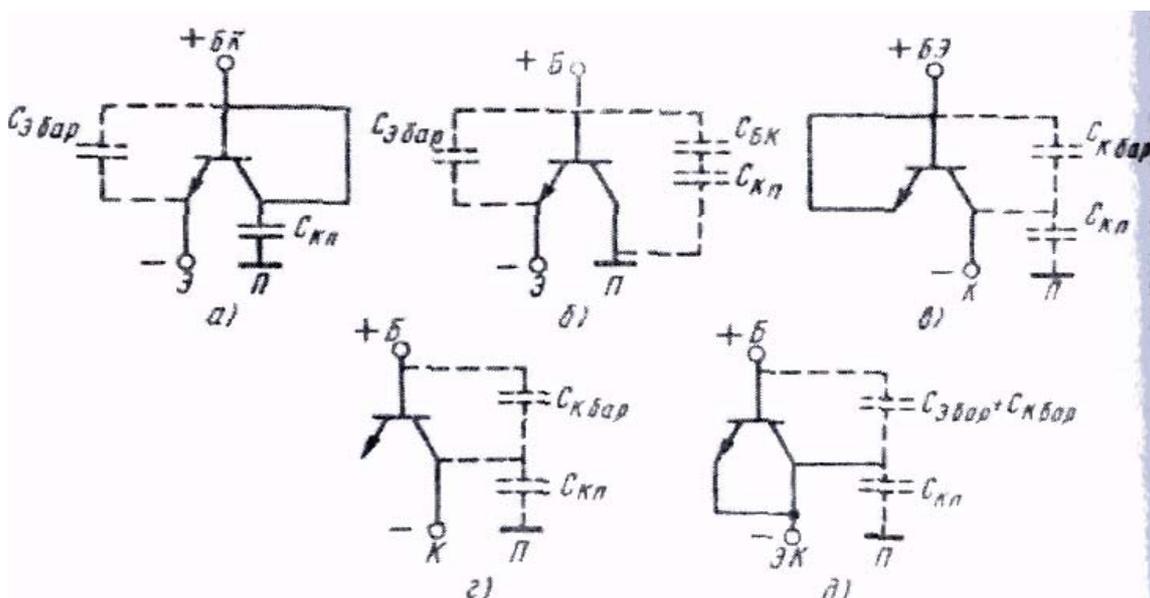


Рисунок 6.6

На рисунке обозначены подложки П, пунктиром показаны паразитные емкости, барьерные $C_{Эбар}$ и $C_{Кбар}$ между соответствующими $p-n$ -переходами, а также между коллектором и подложкой $C_{КП}$. В первом варианте (а) используется $p-n$ -переход эмиттер - база, $p-n$ -переход коллектор-база замкнут; во втором варианте (б) используется $p-n$ -переход коллектор-база, а эмиттер разомкнут, в третьем варианте (в) используется $p-n$ -переход коллектор-база, а $p-n$ -переход эмиттер-база замкнут; в четвертом варианте (г) используется $p-n$ -переход коллектор-база, а эмиттер разомкнут; в пятом варианте (д) используются оба $p-n$ -перехода, но эмиттер и коллектор соединены между собой так, что эмиттерный и коллекторный $p-n$ -переходы включены параллельно. В каждом варианте включения параметры диодов разные. Первый вариант обеспечивает получение быстродействующих диодов, так как в этом случае накопление носителей заряда может происходить только в базовой области, которая очень тонкая, поэтому время восстановления обратного тока $\tau_{вос}$ в этом варианте минимально. В других вариантах заряд накапливается не только в базе, но и в коллекторе ($\tau_{вос}$ большое). Вследствие этого первый вариант используют в логических ИМС, где необходимо высокое быстродействие.

Резисторы. В биполярных ИМС для создания резисторов используют одну из областей биполярной транзисторной структуры: эмиттер, базу или коллектор. Основу этих структур составляет один из слоев ИМС, получаемый методом диффузии. Отсюда название таких резисторов - диффузионные. Диффузионные резисторы изолированы от остального объема полупроводника $p-n$ -переходами. Полупроводниковые резисторы с большими значениями сопротивлений получают не диффузией, а методом ионной имплантации примесей. Такие резисторы называют ионно-легированными.

Резисторы получают также на основе различных вариантов МОП-структур Их используют в качестве нагрузочных резисторов в цифровых ИМС на основе МОП-транзисторов.

Конденсаторы. В полупроводниковых биполярных ИМС применяют конденсаторы на основе $p-n$ -переходов, смещенных в обратном направлении (диффузионные конденсаторы). Формирование конденсаторов производится в едином технологическом цикле одновременно с изготовлением транзисторов и диффузионных резисторов, что не требует дополнительных технологических операций для их изготовления.

Диэлектриком в таком конденсаторе служит область объемного заряда $p-n$ -перехода. Условием работы конденсаторов является правильное включение напряжения смещения, так как принцип их работы основан на том, что барьерная емкость $p-n$ -перехода проявляется при обратном смещении перехода и зависит от смещения. Диффузионные конденсаторы могут выполнять функции как постоянной, так и переменной емкостей.

Конденсаторы могут быть созданы и на основе МОП-транзисторов В качестве диэлектрика используют слой SiO_2 . Одной обкладкой такого конденсатора служит слой металла - пленка алюминия, другой -

сильнолегированная область полупроводника (n^+ -слой). Индуктивные катушки и трансформаторы в полупроводниковых ИМС отсутствуют.

Элементы пленочных ИМС. Технология пленочных ИМ позволяет выполнить только пассивные элементы, в том числе и индуктивные катушки. Резисторы, конденсаторы и индуктивные катушки изготавливают путем напыления или нанесения многослойных резистивных, проводящих и изолирующих пленок на поверхность подложки.

Пленочные ИМС в зависимости от способа нанесения и толщины пленок подразделяют на тонкопленочные (толщина пленок до 1-2 мкм) и толстопленочные (толщина пленок 10-20 мкм и выше). Так как все пленочные элементы располагают на диэлектрической подложке, отпадает необходимость в их изоляции. Расстояния между элементами сравнительно большие, подложка достаточна толстая, поэтому паразитные емкости практически отсутствуют.

Индуктивные катушки изготавливают путем напыления на подложку проводящих спиралей различной конфигурации. На рисунке 6.7 показана пленочная катушка индуктивности в виде прямоугольной спирали.

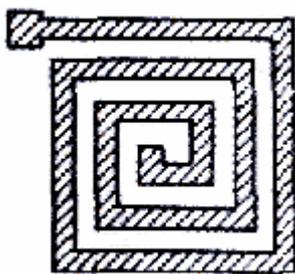


Рисунок 6.7

Большие интегральные схемы (БИС). Создание БИС (см. в таблице 6.1) характеризует новый этап в развитии микроэлектроники. Высокая степень интеграции в БИС может быть обеспечена увеличением плотности упаковки элементов. Функциональная сложность БИС связана с большим числом контактов, сложным рисунком и большой площадью металлизации, а также значительной площадью для изоляции элементов. Все это требует решения схемотехнических проблем, размещения базовых элементов.

Решение комплекса проблем - технологических, схемотехнических физических и других - привело к функциональной интеграции, то есть к интеграции элемента, иначе - к использованию одного и того же участка кристалла для выполнения нескольких функций. С этой целью совмещают пассивные элементы с базовыми или коллекторными элементами транзисторов; рабочие области диодов и транзисторов; области различных транзисторов с вертикальной и горизонтальной структурами. Кроме того, функциональная

интеграция предусматривает новую организацию цепи питания. Типичным примером такой интеграции могут служить схемы И²Л.

В качестве активных элементов, на базе которых создают БИС, используют и биполярные транзисторы, и МДП-транзисторы. БИС одинакового функционального назначения на биполярных транзисторах обладают большими быстродействием и отношением быстродействия к потребляемой мощности, чем БИС на МДП-транзисторах. Однако использование МДП-транзисторов позволяет значительно увеличить степень интеграции.

Наиболее перспективными являются схемы с инжекционным питанием И²Л. Поскольку БИС представляют собой сложные ИМС, содержащие огромное число активных элементов, производство их может быть экономически оправдано только в случае массового выпуска. Для этого необходимо, чтобы БИС были универсальными.

7 Основы микропроцессорной техники

Микропроцессор (МП) представляет собой функционально завершенное универсальное программно-управляемое устройство цифровой обработки данных, выполненное в виде одной или нескольких микропроцессорных БИС.

Микропроцессорные БИС относятся к новому классу микросхем, одной из особенностей которого является возможность программного управления работой БИС с помощью определенного набора команд. Эта особенность нашла отражение в программно-аппаратном принципе построения микропроцессорных систем (МС) – цифровых устройств или систем обработки данных, контроля и управления, построенных на базе одного или нескольких МП. Программно-аппаратный принцип построения МС является одним из основных принципов их организации и заключается в том, что реализация целевого назначения МС достигается не только аппаратными средствами, но и с помощью программного обеспечения – организованного набора программ и данных /9/.

Микросистема общего назначения, содержащая кроме одного или нескольких МП память для хранения управляющих программ и данных, а также средства обмена информацией с периферийными устройствами ввода-вывода, называется микропроцессорной ЭВМ (микро-ЭВМ). Микро-ЭВМ, совмещенная с периферийными устройствами, называется микро-вычислительным комплексом.

7.1 Общая характеристика ЭВМ

Микро-ЭВМ — это конструктивно законченное вычислительное устройство, имеющее свой источник питания, пульт управления, узлы ввода-вывода информации, что позволяет использовать его в качестве автономного, независимо работающего устройства со своим программным обеспечением.

На практике нередко применяют функциональный блок, содержащий микропроцессорный комплект и оформленный конструктивно в виде платы. Он может выполнять роль микро-ЭВМ, встраиваемой в измерительный прибор или другую аппаратуру (без источника питания, корпуса, пульта управления, периферийных узлов), но не способной работать как самостоятельное, автономное устройство. Такой блок, выполняющий функции управления, называют *микроконтроллером*. Иногда для сокращения его называют просто *контроллером*. Он может быть программируемым и непрограммируемым. Контроллеры для измерительных систем выпускают и в виде автономных устройств.

7.1.1 Основные узлы ЭВМ

Образно говоря, ЭВМ – это «фабрика» по переработке информации, в которую вводится исходная, а выводится обработанная информация, представленная в виде последовательности чисел, таблиц, графиков, текста. Но это – внешняя сторона. Если же окинуть ЭВМ взглядом «изнутри», поинтересоваться ее устройством, то выяснится, что структура ЭВМ может быть представлена основными узлами, изображенными на рисунке 7.1.

Арифметическо-логическое устройство (АЛУ) предназначено для выполнения арифметических и логических операций. К арифметическим операциям относятся операции сложения, вычитания, умножения и деления чисел.

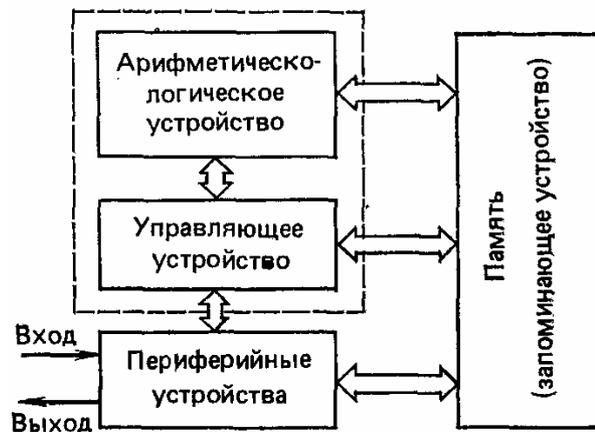


Рисунок 7.1

Основные логические операции, используемые в ЭВМ:

- логическое умножение (иначе называемое конъюнкцией, операцией И), обозначаемое знаком « ^ » (рисунок 7.2):

$$(7.1) \quad F = X_1 \quad \wedge \quad X_2 \quad \wedge \quad X_3 \quad \wedge \quad \dots \quad \wedge \quad X_n \quad ;$$

- логическое сложение (дизъюнкция, операция ИЛИ), обозначаемое знаком « V » (рисунок 7.3):

$$(7.2) \quad F = X_1 \quad \vee \quad X_2 \quad \vee \quad X_3 \quad \vee \quad \dots \quad \vee \quad X_n \quad ;$$

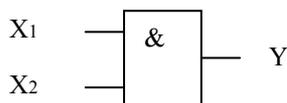
логическое отрицание (инверсия, операция НЕ), обозначают чертой над переменной (рисунок 7.4):

$$F = \bar{X}.$$

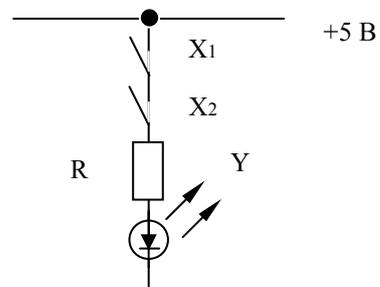
(7.3)

Логическая схема «И»

а) обозначение



б) электрический аналог



в) диодно-резисторная схема

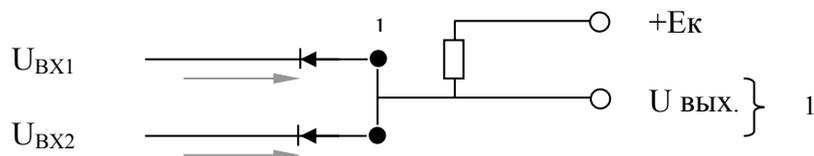
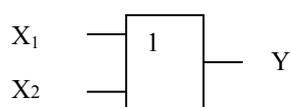


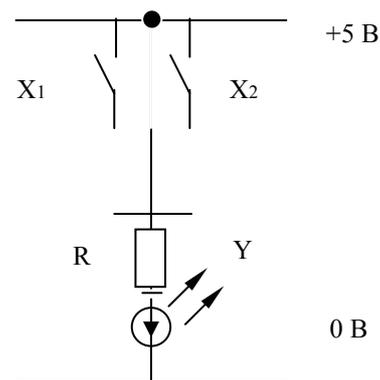
Рисунок 7.2

Логическая схема «ИЛИ»

а) обозначение



б) электрический аналог



в) диодно-резисторная схема

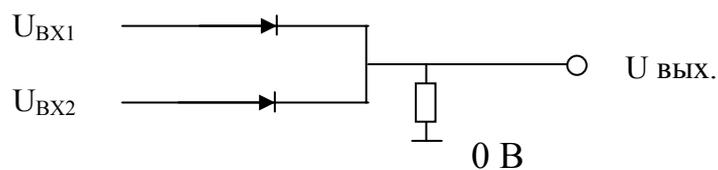
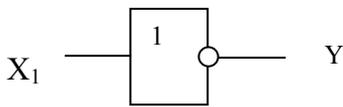


Рисунок 7.3

Логическая схема «НЕ»

а) обозначение



б) диодно-резисторная схема

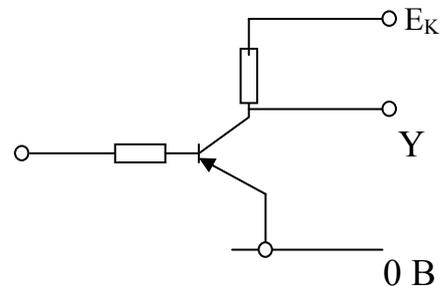
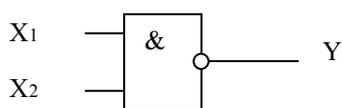


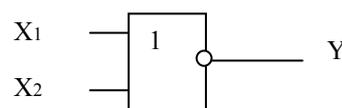
Рисунок 7.4

Логическая схема «НЕ» действует как инвертор.

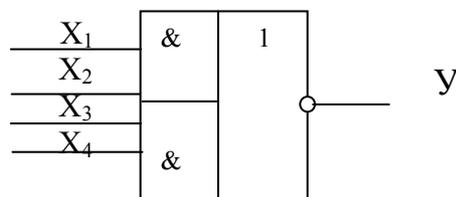
Перечисленные выше операции «И», «ИЛИ», «НЕ» позволяют реализовать любую переключательную функцию. Такая система называется базисом. В настоящее время в вычислительной технике, как правило, используется либо элементы «И-НЕ», либо «ИЛИ-НЕ». Эти элементы обладают замечательным свойством. Оно заключается в том, что каждый из них образует функционально полную систему, состоящую из одного элемента. Указанное обстоятельство приводит к сокращению номенклатуры элементов, то есть вместо трех элементов «И», «ИЛИ», «НЕ» можно использовать один элемент «И-НЕ», либо элемент «ИЛИ-НЕ». Обозначения элементов «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ», «И-ИЛИ-НЕ» приведены на рисунках 7.5 а, б, в соответственно.



а)



б)



в)

Рисунок 7.5

Управляющее устройство (УУ) осуществляет управление работой всех

остальных узлов, а также потоками информации внутри ЭВМ. Действия УУ определяются командами. Совокупность команд, которые должны быть выполнены для решения данной задачи, называется программой.

Запоминающее устройство (ЗУ), или память ЭВМ служит для хранения программ и обрабатываемой информации—данных. Память состоит из блоков одинакового размера, называемых ячейками. Каждая ячейка, в свою очередь, состоит из элементов памяти. Один элемент может хранить только одну двоичную цифру: 1 или 0. Совокупность единиц и нулей, заполняющих ячейку, называют содержимым ячейки памяти. Чтобы ввести число в ячейку или извлечь ее содержимое, необходимо указать адрес этой ячейки.

Периферийные устройства—это устройства *ввода и вывода (УВВ)* информации, которые выполняют функции считывания данных с перфоленки или другого носителя, преобразования их к форме, требуемой для ввода в ЭВМ (форме, «понятной» машине), а также фиксации результатов обработки информации, т. е. отображения их в виде чисел, текста или графика на экране дисплея, печатания с помощью телетайпа, запоминания и т. п. Напомним, что дисплей — это устройство отображения информации, выполняемое на основе электронно-лучевой трубки, газоразрядных панелей, жидких кристаллов и т. п. /7, 9/.

Тесная связь между АЛУ и УУ позволяет рассматривать их как единое целое, называемое *центральным процессором*, или сокращенно, просто *процессором* (от англ. to process—обработать). Таким образом, процессор—это устройство ЭВМ, осуществляющее автоматическую обработку информации в соответствии с заданной программой.

7.1.2 Системы счисления и формы представления чисел

Системы счисления. Данные, обрабатываемые ЭВМ, представляют собой числа. Одно и то же число можно выразить различными комбинациями цифр и буквенных символов. Конкретный вид такой комбинации зависит от выбранной системы счисления.

Напомним, что любое целое число N можно представить в виде:

$$N_{(h)} = a_{n-1} h^{n-1} + a_{n-2} h^{n-2} + \dots + a_i h^i + \dots + a_1 h^1 + a_0 h^0, \quad (7.4)$$

где h —основание системы;

a —разрядные коэффициенты;

n —число разрядов числа N .

Для формальной записи числа N используют только разрядные коэффициенты, т. е.

$$N_{(h)} \rightarrow a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 a_0. \quad (7.5)$$

Причем в индексе приводится помещенное в скобки основание системы. Подобная запись характерна для позиционной системы счисления, так как в этой записи значение каждой цифры зависит от места, позиции, которую эта цифра занимает. Позиционные системы счисления различают в зависимости от их основания. В наиболее привычной для нас десятичной системе счисления $h=10$, т. е. основанием системы служит число 10, и алфавит системы состоит из десяти цифр (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Например, представив число $7314_{(10)}$ суммой $7314 = 7 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0$, найдем, что разрядные коэффициенты соответственно равны: $a_3=7$; $a_2=3$; $a_1=1$; $a_0=4$.

При вычислениях, проводимых в ЭВМ, используется *двоичная система*. Для нее $h=2$, и алфавит системы образуют две цифры: 0 и 1. Следовательно, в этой системе счисления n -разрядное число N имеет вид:

$$N_{(2)} = a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0, \quad (7.6)$$

где a может принимать только два значения: либо 0, либо 1.

Например, число $21_{(10)}$ в двоичной системе запишется так: $10101_{(2)}$.

Помимо основной двоичной системы счисления в вычислительной технике применяют также восьмеричную и шестнадцатеричную системы — не для проведения вычислений, а для сокращения записи двоичных чисел.

Формы представления чисел. В ЭВМ используются две формы представления чисел: *естественная* и *нормальная*. При естественной форме, иначе называемой формой с фиксированной запятой, числа вводятся в виде целой и дробной частей, разделенных запятой (точкой). Положение последней строго фиксировано: запятая находится либо перед цифрой старшего разряда, либо после цифры младшего разряда. Первый вариант относится к представлению чисел, которые по модулю (без учета знака) меньше единицы, второй вариант представления распространяется только на целые числа. Порядковые номера разрядов идут слева направо, начиная с нулевого. Его называют знаковым разрядом, и в *этом* разряде 0 соответствует знаку плюс, а 1 — знаку минус.

Нормальная или полулогарифмическая форма, иначе называемая формой с плавающей запятой, предполагает ввод чисел в полулогарифмическом виде — число состоит из двух частей: мантиссы числа, обозначаемой буквой m , и порядка числа, который обозначается буквой p , причем $|m| < 1$, а p — всегда целое. Положение запятой в числе зависит от порядка p (отсюда и название формы — с плавающей запятой). Например, одно и то же десятичное число можно представить в таких вариантах:

$$\begin{aligned} 0,81756423 \cdot 10^0 & \quad P=0; \\ 8,17564230 \cdot 10^{-1} & \quad P=-1; \end{aligned}$$

$$0,08175642 \cdot 10^1 \quad P = +1. \quad (7.7)$$

Когда в мантиссе перед запятой стоит нуль, а после запятой—цифра, отличная от нуля, то такую форму называют нормализованной. Действия над числами, представленными в нормальной форме, сложнее, чем над числами с фиксированной запятой. Но зато форма «с плавающей запятой» позволяет охватить очень широкий диапазон чисел.

В вычислительной технике вообще и микропроцессорной технике в частности, имеющими дело с числами, широко используются такие термины, как «бит», «слово», «байт». Дадим соответствующие определения.

Бит (от англ. binary digit—двоичный разряд)—это разряд двоичного числа: 0 или 1. Так, 0101—четырёхбитовое двоичное число, причем крайняя левая цифра представляет старший разряд данного числа, а крайняя правая—младший разряд. Напомним, что четырёхбитовое двоичное число называется тетрадой, а трехбитовое — триадой.

Слово—законченная последовательность символов (нулей и единиц) определенной длины или сигналов, представляющих эти символы.

Машинное слово — специальная последовательность нулей и единиц, которая может быть прочитана или интерпретирована ЭВМ данного типа. Иначе говоря, машинное слово — это группа битов, которую обрабатывает ЭВМ за один шаг.

В общем случае слово имеет переменную длину. Число двоичных разрядов (битов) в слове может находиться в пределах $1 \leq z \leq n$. Величина n зависит от технических возможностей ЭВМ. Обычно под длиной машинного слова понимают число битов, хранимых в одном регистре ЭВМ.

В технике больших ЭВМ иногда словом называют последовательность из 32 бит, полусловом — из 16 бит и двойным словом — из 64 бит. Для микропроцессорной техники основополагающим является байт. По отношению к нему определяется формат данных.

Байт (от англ. Byte) — восьмибитовое слово, рассматриваемое как единица для обмена цифровой информацией между устройствами микропроцессорной системы. Отсюда происходит выражение «побайтовая обработка». В микропроцессорной технике принято длину слова, формат данных конкретной макро-ЭВМ измерять числом байтов. Также в байтах часто выражают емкость запоминающих устройств.

7.2 Микропроцессорные устройства

Необходимо подчеркнуть, что микропроцессор рассчитан на совместную работу с запоминающими устройствами и устройствами ввода-вывода информации. В зависимости от функциональных возможностей микропроцессоры делят на универсальные и специализированные.

Универсальный микропроцессор служит основой микро-ЭВМ, используется для решения широкого круга задач в системах управления, измерительных приборах, диагностических устройствах и т. п.

Специализированный микропроцессор рассчитан на узкое применение, решение конкретной задачи и оптимизирован по определенному параметру. Так, специализированный матричный перемножитель решает только одну задачу—умножение двух чисел, но выполняет эту процедуру во много раз быстрее, чем универсальный микропроцессор.

Микропроцессорный комплект или набор — это совокупность специально разработанных отдельных микропроцессорных и других интегральных схем, которые совместимы по своим конструктивно-технологическим данным: могут быть собраны в единое целое. Они предназначены для совместной работы в микро-ЭВМ, микропроцессорных системах, микроконтроллерах и т.п. Обычно в комплект входят БИС микропроцессора, запоминающих устройств, ввода-вывода информации, микропрограммного управления и др.

Микропроцессорная система — это собранная в единое целое совокупность взаимодействующих БИС микропроцессорного комплекта — модулей (иногда дополненная БИС из других комплектов), организованных в работающую систему, т. е. вычислительная или управляющая система с микропроцессором в качестве узла обработки информации. Система, в которой используются два или более микропроцессоров, называется мультимикропроцессорной системой.

7.3 Характеристики микропроцессоров

Свойства микропроцессора могут быть описаны многими характеристиками /9/. К основным из них, используемым при сопоставлении и выборе микропроцессоров, можно отнести:

- вид микропроцессора (универсальный или специализированный, однокристалльный или многокристалльный);
- технология изготовления: р-канальная МОП (р-МОП), n-канальная МОП (n-МОП), комплементарная МОП (КМОП), кремний на сапфире, биполярная ТТЛ, ТТЛ с диодами Шотки (ТТЛДШ), инжекционной интегральной логики (И²Л), эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ) (информация о технологии изготовления дает представление о потреблении энергии и среднем быстродействии микропроцессора);
- разрядность (4; 8; 16; 32) —длина информационного слова, которое может быть одновременно обработано микропроцессором (она может быть фиксированной или наращиваемой, например, у многокристалльных микропроцессоров);
- принцип управления: программное управление с «жесткой логикой»,

микропрограммное управление (храняемая в памяти логика);

- емкость адресуемой памяти характеризует возможности микропроцессора по взаимодействию с запоминающим устройством;
- быстродействие, в справочниках наиболее часто его характеризуют продолжительностью выполнения одной операции (или числом операций «регистр-регистр» в секунду), а также тактовой частотой продолжительностью цикла простой команды;
- потребляемая мощность;
- питающие напряжения (число уровней, номиналы);
- конструктивные данные: габаритные размеры корпуса, число выводов;
- условия эксплуатации (интервал рабочих температур, относительная влажность воздуха, допускаемые вибрационные нагрузки и т. п.);
- надежность;
- стоимость.

Рассматривая характеристики, необходимо коснуться вопроса о поколениях микропроцессоров. В первые годы развития микропроцессоров в литературе различали их поколения. Однако теперь такая классификация практически не имеет смысла. Дело в том, что понятие поколений для микропроцессоров носит совсем иной характер, чем для больших машин. У ЭВМ каждое новое поколение имело более высокие основные технико-экономические характеристики по отношению к предыдущему поколению и поэтому вытесняло его. В микропроцессорной технике появление новой разработки не исключает применения ранее созданных микропроцессоров, а расширяет технические возможности применения микропроцессорных систем. Различные «поколения» микропроцессоров существуют совместно в течение продолжительного периода, часто взаимно дополняя (а не исключая) друг друга. Есть немало примеров того, что в одном устройстве работают два микропроцессора, моменты появления которых разделяет несколько лет (при условной классификации — два-три поколения).

7.4 Архитектура микропроцессора

Под *архитектурой микропроцессора* понимают принцип его внутренней организации, общую структуру, конкретную логическую структуру отдельных устройств, совокупность команд и взаимодействие между аппаратной частью (устройствами, входящими в состав микропроцессора) и программой обработки информации системой, выполненной на основе микропроцессора. Иначе говоря, архитектуру микропроцессора определяют как совокупность его свойств и характеристик, рассматриваемую с позиции пользователя.

Архитектуры микропроцессоров во многом сходны с архитектурами процессоров ЭВМ, но имеют и свою специфику.

Очевидно, что для глубокого изучения архитектуры микропроцессоров

необходимо охватить широкий круг вопросов. В отведенном объеме обстоятельное изложение всего множества этих вопросов не представляется возможным, да и, пожалуй, учитывая поставленную в названии главы цель— первое знакомство с микропроцессорами, в этом нет необходимости.

7.4.1 Разновидности микропроцессоров

Множество выпускаемых промышленностью универсальных микропроцессоров можно разделить по конструктивному признаку на две разновидности:

- однокристалльные микропроцессоры с фиксированной длиной (разрядностью) слова и определенной системой команд;
- многокристалльные (секционированные) микропроцессоры с наращиваемой разрядностью слова и микропрограммным управлением, которые состояются из двух и более БИС. В последнее время появились и однокристалльные микропроцессоры с микропрограммным управлением.

Внутренняя логическая организация однокристалльных микропроцессоров в значительной степени подобна организации ЭВМ общего назначения. Это дает возможность при разработке микропроцессорной системы на основе однокристалльного микропроцессора опираться на методы проектирования и использования обычных ЭВМ малой и средней производительности.

Структура многокристалльного микропроцессора, микропрограммное управление позволяют достичь гибкости в его применении, улучшить характеристики и сравнительно простыми средствами организовать распараллеливание отдельных машинных операций, что повышает производительность ЭВМ, выполняемых на таких микропроцессорах.

Однако, хотя возможности многокристалльных микропроцессоров существенно выше, чем однокристалльных, многие прикладные задачи, в том числе построения автоматических измерительных приборов, успешно решаются на основе использования однокристалльного микропроцессора. Поэтому ограничимся знакомством со структурой последнего.

7.4.2 Структура микропроцессора

Рассмотрим структуру однокристалльного универсального микропроцессора, причем для определенности выберем восьмиразрядный прибор. Как видно из приведенной на рисунке 7.5 структурной схемы, в состав микропроцессора входят арифметическо-логическое устройство, управляющее устройство и блок внутренних регистров. Кратко охарактеризуем эти узлы.

Арифметическо-логическое устройство (АЛУ), служащее ядром микропроцессора, как правило, состоит из двоичного сумматора со схемами

ускоренного переноса, сдвигающего регистра и регистров для временного хранения операндов. Обычно это устройство выполняет по командам несколько простейших операций: сложение, вычитание, сдвиг, пересылку, логическое сложение (ИЛИ), логическое умножение (И) (см. раздел 7.1).

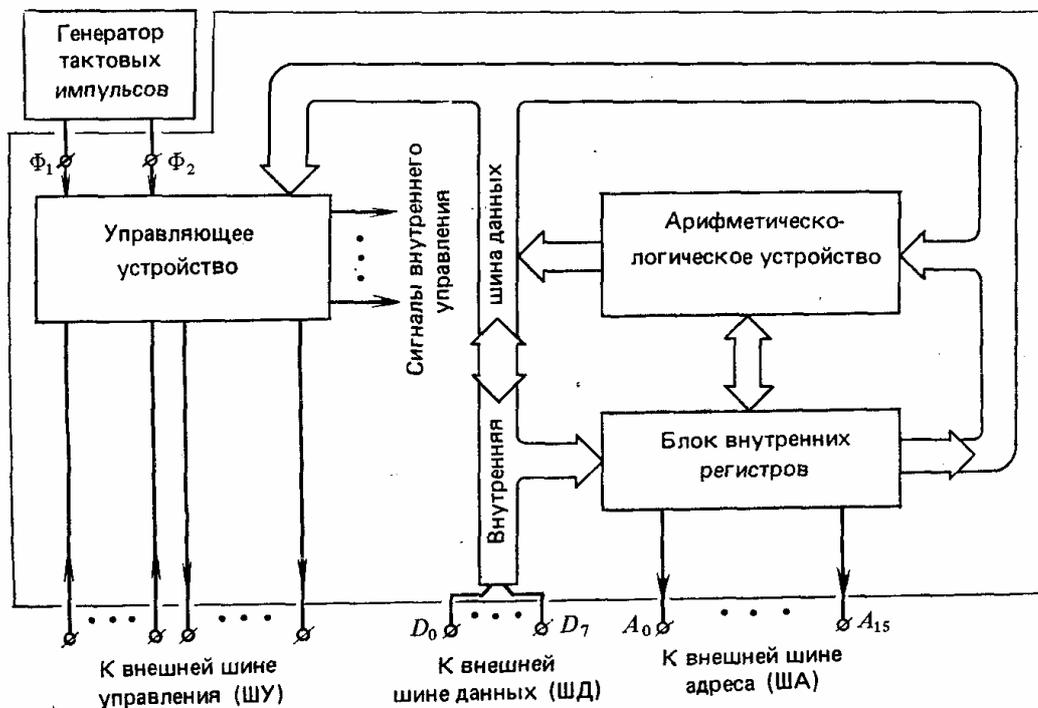


Рисунок 7.5

Так как появились новые понятия — регистр и операнд, то поясним их, прежде чем описывать другие узлы микропроцессора.

Регистром называется электронная схема для временного хранения двоичной информации (машинного слова). Ее строят на триггерах, общее число которых определяет разрядность регистра. Каждый триггер регистра используется для ввода, хранения и вывода одного разряда (1 или 0) двоичного числа. Разрядность регистра выбирают соответственно длине хранимого в нем слова.

Регистры, которые служат только для ввода, хранения и вывода двоичной информации, называют накопительными. От них отличаются сдвигающие регистры, которые помимо выполнения указанных функций позволяют осуществлять сдвиг двоичного числа вправо или влево (а иногда — в обоих направлениях). Если в накопительный регистр вводят числа в параллельном коде, т. е. одновременно во все триггеры, то ввод чисел в сдвигающий регистр часто производят в последовательном коде, подавая последовательно один разряд за другим, хотя возможен и ввод чисел в параллельном коде.

Операндом называют число или символ, участвующие в машинной операции. Так, в выражении $y = a + b$ или $\omega = 2^k - 1$ операнды — это $a, b, 2, k, 1$.

Типичным примером операнда, используемого при процедуре обработки данных микропроцессором, служит байт.

Устройство управления (УУ) «руководит» работой АЛУ и внутренних регистров в процессе выполнения команды. Согласно коду операции, содержащемуся в команде, оно формирует внутренние сигналы управления блоками микропроцессора. Адресная часть команды совместно с сигналами управления используется для считывания данных из определенной ячейки памяти (записи данных в ячейку). По сигналам УУ осуществляется выборка каждой новой, очередной команды.

Блок внутренних регистров, расширяющий возможности АЛУ, служит внутренней памятью микропроцессора—используется для временного хранения данных и команд. Он также выполняет некоторые процедуры обработки информации. Обычно этот блок содержит регистры общего назначения и специальные регистры: регистр-аккумулятор, буферный регистр адреса, буферный регистр данных, счетчик команд, регистр команд, регистры стека, регистр признаков. Кратко охарактеризуем функции всех регистров.

Регистры общего назначения (РОН), число которых может изменяться от 4 до 64, в значительной мере определяют вычислительные возможности микропроцессора. Их основная функция—хранение операндов, т. е. подлежащих обработке данных. Но они могут выполнять и роль специальных регистров. Все РОН доступны программисту, который их рассматривает как сверхоперативное запоминающее устройство (понятия оперативного и постоянного внешних запоминающих устройств — ОЗУ и ПЗУ — поясняются в следующем параграфе). Иногда в технической документации к микропроцессору содержатся рекомендации по использованию РОН.

Регистр-аккумулятор, обычно называемый просто аккумулятором (встречается также название накопитель), предназначен для временного хранения операнда или промежуточного результата арифметических и логических операций, производимых АЛУ. При выполнении какой-либо операции с двумя операндами в этом регистре содержится один из используемых операндов, а после выполнения операции — ее результат. Разрядность регистра равна разрядности информационного слова (в рассматриваемом примере микропроцессора аккумулятор — восьмиразрядный регистр). Часто ввод и вывод всех данных в микропроцессоре производятся через аккумулятор. Встречаются микропроцессоры с двумя и более аккумуляторами, что позволяет повысить гибкость работы и эффективность решения задач.

Буферный регистр адреса — специальный регистр, служащий для приема и хранения адресной части исполняемой команды. Иначе говоря, в нем содержится до выдачи на адресную шину адрес слова, хранимого в ячейке внешней памяти или другом регистре. Возможное количество адресов, т. е. непосредственно адресуемых слов памяти, определяется разрядностью этого регистра. Так, в 16-разрядном регистре можно, изменяя нули и единицы отдель-

ных разрядов двухбайтового слова, поместить (разумеется, не одновременно) $2^{16} = 65536$ адресов ячеек (слов) памяти.

Буферный регистр данных служит для временного хранения выбранного из памяти слова перед выдачей его на внешнюю шину данных. Разрядность этого регистра определяется количеством байтов информационного слова (для хранения однобайтового слова необходим 8-разрядный регистр, двухбайтового слова — 16-разрядный).

Счетчик команд — счетчик, содержащий адрес ячейки памяти, в которой помещены байты выполняемой команды. Обычно команды определенной программы находятся в последовательно расположенных ячейках памяти: для однобайтовой команды число, указывающее адрес каждой последующей ячейки, на единицу больше числа, отмечающего адрес данной ячейки. Поэтому переход к следующей команде достигается увеличением числа, содержащегося в счетчике команд, на единицу (для возврата к предыдущей команде содержимое счетчика должно быть уменьшено на единицу). В ходе выполнения текущей команды, т. е. при передаче команды из памяти в микропроцессор, содержимое счетчика команд увеличивается на единицу и образуется адрес очередной команды. Вот почему говорят, что счетчик команд предназначен для хранения адреса команды, следующей в программе по порядку за выполняемой командой. Возможна ситуация, когда требуется после данной команды использовать команду, хранимую не в соседней, а в другой, скажем удаленной, ячейке памяти. Тогда по сигналу УУ в счетчик команд заносится адрес удаленной ячейки.

Регистр команд принимает и хранит код очередной команды, адрес которой находится в счетчике команд. По сигналу УУ в него передается из регистра хранимая там информация.

Регистры стека делятся на стек и указатель стека. Название «стек» происходит от английского слова *steck*, что в дословном переводе означает «штабель» (дров), кipa (бумага) и др. В микропроцессорах стек представляет собой набор регистров, хранящих адреса (команды возврата — при обращении к подпрограммам) или запоминающих состояния внутренних регистров (при обработке прерываний). Этот набор организован таким образом, что слово адреса или данных выбирается по принципу: «вошедший последним — выходит первым» — подобно тому, как из штабеля дров первым берут полено, положенное последним (в английском языке этот принцип определяется выражением *Last-in-First Out*, и аббревиатура *LIFO* иногда встречается как название стековой памяти). При записи в стек очередного слова все находящиеся в нем слова смещаются на один регистр вниз (процесс такой записи называют «проталкиванием»). После выборки слова из стека оставшиеся слова сдвигаются на один регистр вверх (процесс считывания называют «выталкиванием» вверх). Стек может быть выполнен не только на внутренних регистрах микропроцессора, составляя его часть, но и находиться во внешнем оперативном запоминающем устройстве, занимать там выделенную для него

зону. В последнем случае стек получается более глубоким, емким, однако для обращения к нему необходим указатель стека — специальный регистр.

Указатель стека — регистр, служащий для хранения адреса последней занятой ячейки стека, которую называют вершиной. Содержащееся в регистре число указывает, где находится вершина стека. Когда в стек записывается очередное слово, то число в указателе стека соответственно увеличивается. Извлечение слова из стека сопровождается, наоборот, уменьшением заполняющего указатель стека числа. Кроме такой процедуры предусматривается и возможность считывания без разрушения содержимого любой ячейки стека при неизменном числе, хранимом в указателе стека.

Регистр признаков представляет набор триггеров, называемых флажками. В зависимости от результатов операций, выполняемых АЛУ, каждый триггер устанавливается в состояние 0 или 1. Флажковые биты, определяющие содержимое регистра, индицируют условные признаки: нулевого результата, знака результата, переполнения и т. п. Эта информация, характеризующая состояние процессора, важна для выбора дальнейшего пути вычислений /9/.

Мы ознакомились с основными частями микропроцессора. Теперь коснемся вопроса о связи между ними. Как видно из рисунка 7.5 для структуры микропроцессора характерно наличие внутренней шины данных, соединяющей между собой его основные части. *Шиной* называют группу линий передачи информации, объединенных общим функциональным признаком. В микропроцессорной системе используются три вида шин: данных, адресов и управления.

Разрядность внутренней шины данных, т. е. количество передаваемых по ней одновременно (параллельно) битов числа, соответствует разрядности слов, которыми оперирует микропроцессор. Очевидно, что разрядность внутренней и внешней шин данных должна быть одной и той же. У 8-разрядного микропроцессора внутренняя шина состоит из восьми линий, по которым можно передавать последовательно 8-разрядные слова — байты. Следует иметь в виду, что по шине данных передаются не только обрабатываемые АЛУ слова, но и командная информация. Следовательно, недостаточно высокая разрядность шины данных может ограничить состав (сложность) команд и их число. Поэтому разрядность шины данных относят к важным характеристикам микропроцессора — она в большой мере определяет его структуру.

Шина данных работает в режиме двунаправленной передачи. Это означает, что по ней можно передавать слова в обоих направлениях, но, разумеется, не одновременно: требуется применение специальных буферных схем и мультиплексного режима обмена данными между микропроцессором и внешней памятью. Мультиплексный режим (от англ. multiple – многократный, множественный), иногда называемый многоточечным режимом, — режим одновременного использования канала передачи большим числом абонентов с разделением во времени средств управления обменом.

Мультиплексором называют устройство, которое выбирает данные от

одного, двух или более входных информационных каналов и подает эти данные на свой выход (рисунок 7.6 а). По схемному решению он представляет совокупность логических элементов И-ИЛИ, управляемых распределителем импульсов. Мультиплексоры могут входить в состав микропроцессора. Они также выпускаются в виде отдельных БИС, как, например, мультиплексор восьмивходовый одноразрядный; двухвходовый четырехразрядный; трехвходовый четырехразрядный и др.

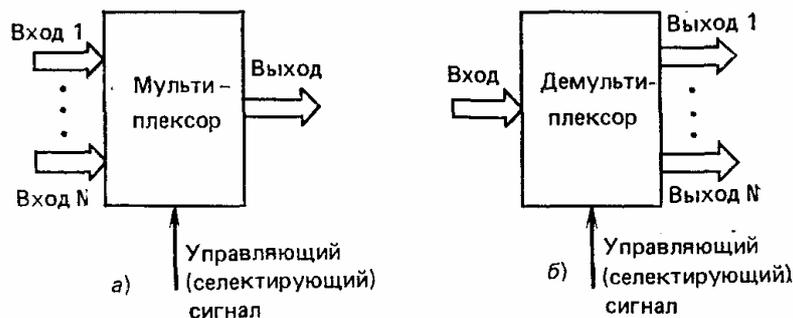


Рисунок 7.6

Противоположную мультиплексору функцию выполняет демультиплексор – устройство, которое подает данные, подводимые к его входу, на один или более выходных информационных каналов (рисунок 7.6 б).

7.4.3 Обработка данных

Рассмотрим процедуру обработки данных, хранимых во внутренней памяти микропроцессора. Для этого необходима более подробная структурная схема, чем изображенная на рисунке 7.5. На ее основе, в соответствии с назначением узлов структурной схемы, составом блока внутренних регистров и выполняемых ими функций, а также характеристикой цепей взаимодействия узлов построена детальная структурная схема (рисунок 7.7). Хотя эта схема и не лишена упрощений, она достаточно хорошо отражает организацию 8-разрядного однокристалльного микропроцессора (примерно такую структуру имеет микропроцессор КР580ВМ80А).

Чтобы облегчить восприятие рассуждений, придадим им конкретный характер. Будем полагать, что задача обработки данных заключается в сложении двух операндов, каждый из которых представляет собой 8-разрядное двоичное число, т. е. байт. Все арифметические и логические операции осуществляет 8-разрядное АЛУ, расположенное в верхней правой части рисунка 7.7 (числа разрядов АЛУ и всех регистров указаны в скобках рядом с названиями блоков).

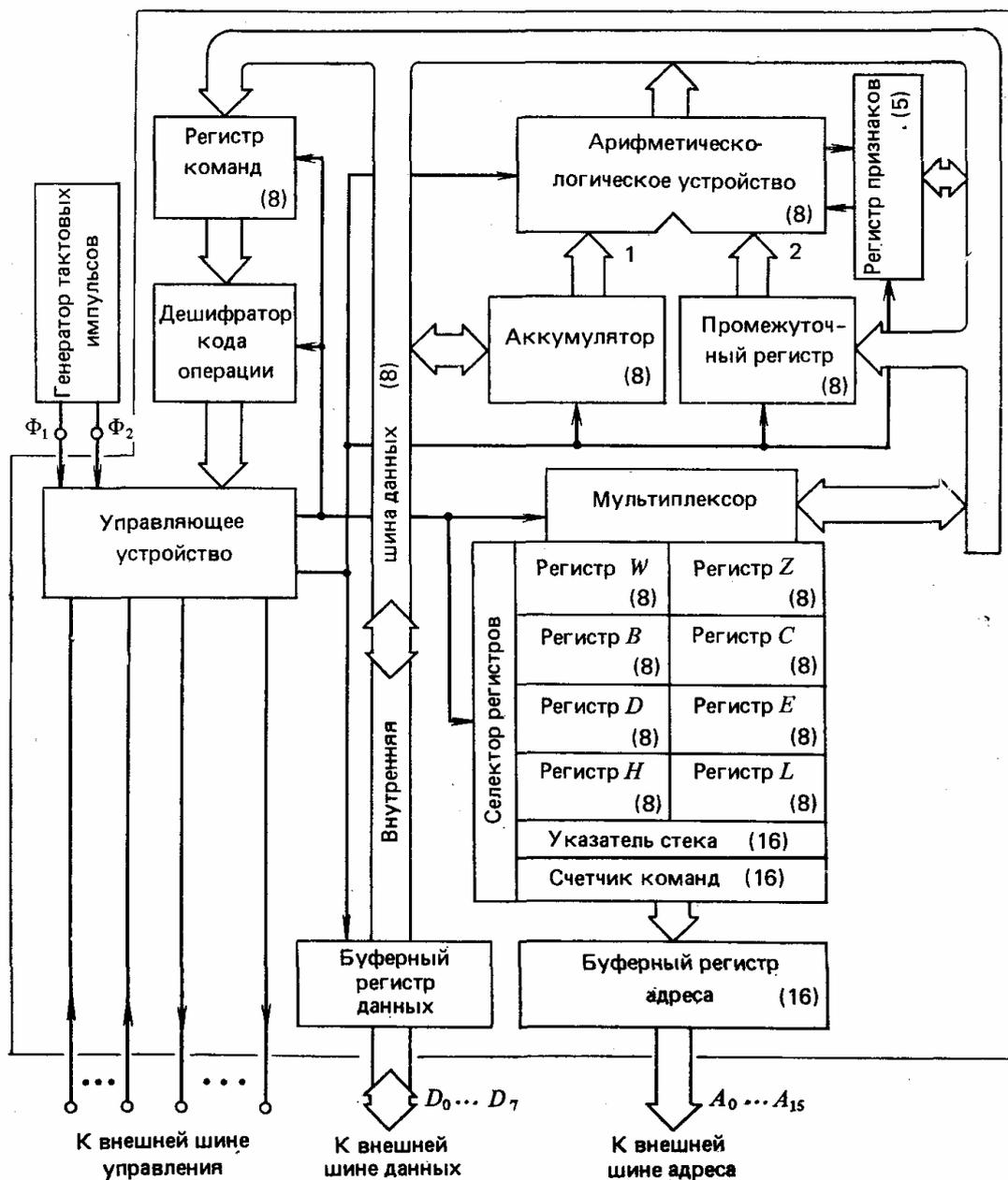


Рисунок 7.7

На первый вход АЛУ подается байт из 8-разрядного аккумулятора, а на второй вход поступает байт из 8-разрядного промежуточного регистра. В некоторых книгах этот регистр назван ТЕМ регистром — от английского слов (temporary storage — временная память). Результат сложения указанных двух байтов передается с выхода АЛУ через внутреннюю шину данных в аккумулятор. Это одноадресная организация микропроцессора микро-ЭВМ. Для нее характерно то, что один из операндов, участвующих в обработке, всегда находится в аккумуляторе, адрес которого известен. Поэтому при выполнении операции сложения двух операндов требуется указывать только один адрес — второго операнда, содержащегося, например, в одном из

регистров общего назначения (РОН). К АЛУ подключены регистр признаков, предназначенный для хранения и анализа признаков результата операции, и схема десятичной коррекции (она не показана на рисунке 7.7), позволяющая проводить обработку данных в двоично-десятичном коде.

В правой нижней части рисунка 7.7 изображены восемь РОН, а также указатель стека, счетчик команд и буферный регистр адреса (стековый регистр на рисунке отсутствует, так как стек представляет собой определенную зону внешней памяти—ОЗУ). Первые два РОН—регистры *W* и *Z*—предназначены для кратковременного хранения данных во время выполнения команды (эти регистры недоступны программисту), остальные шесть РОН — регистры *B*, *C*, *D*, *E*, *H* и *L* — служат ячейками внутренней памяти, называемой часто сверх-оперативным запоминающим устройством (СОЗУ). В них хранятся операнды, подлежащие обработке в АЛУ, результаты обработки данных, выполненной АЛУ, и управляющие слова. В каждом регистре помещается один байт. Обращение к РОН — адресное. Парное расположение регистров *B* и *C*, *D* и *E*, *H* и *L* дает возможность проводить обработку двухбайтовых слов, называемую обработкой «удвоенной точности». Обмен данными с РОН (считывание и запись информации) осуществляется через мультиплексор, причем требуемый регистр выбирается с помощью селектора регистров по сигналу УУ. В левой части рисунка 7.7 расположены регистр команд, дешифратор кода операции и УУ (хотя дешифратор относится к УУ, он нарисован отдельно для большей наглядности) /9/.

Обмен информацией между регистрами и другими блоками микропроцессора производится через внутреннюю шину данных, причем передача команд и передача данных разделены во времени. Связь с внешней шиной данных осуществляется через буферный регистр данных, показанный в нижней части рисунка 7.7.

Микропроцессор — это программно-управляемое устройство. Процедура выполняемой им обработки данных определяется программой, т. е. совокупностью команд, каждая из которых представляет собой определенную комбинацию электрических сигналов, соответствующих 0 и 1. Команда делится на две части: код операции и адрес. В коде операции заключена информация о том, какая операция должна быть выполнена над данными, подлежащими обработке. Адрес указывает место, где расположены эти данные (в регистрах общего назначения микропроцессора, т. е. во внутренней памяти, или во внешней памяти). Слово данных, подвергаемое обработке, представляет один байт. Команда может состоять из одного, двух или трех байтов, последовательно расположенных в памяти. Первый байт команды содержит код операции. Считанный в начале интервала выполнения команды, называемого циклом команды, ее первый байт поступает из памяти по внутренней шине данных в регистр команд, где хранится в течение всего цикла. Дешифратор кода операции дешифрует содержимое регистра команд — определяет характер операции и адреса операндов. Эта информация передается в УУ, которое

вырабатывает управляющие сигналы, направляемые в блоки микропроцессора, участвующие в выполнении данной команды.

Возможен случай, когда код операции непосредственно указывает адрес данных — объекта обработки. Тогда она начинается сразу после считывания первого байта команды. Если же в команде содержится более одного байта, то остальные байты, несущие информацию об адресе ячейки памяти, где хранятся данные, передаются либо в буферный регистр адреса, либо в один из РОН. Только после завершения всей процедуры считывания команды или, иначе говоря, получения полной информации о местонахождении операндов и о том, какая операция должна выполняться над ними, начинается обработка.

В рассматриваемом примере выполняемая операция — сложение двух операндов. Первый операнд хранится в аккумуляторе, второй — в одном из РОИ (его адрес указан в команде), откуда он передается в промежуточный регистр. Согласно коду операции АЛУ исполняет команду: суммирует поступающие на его входы байты. Полученная сумма фиксируется в аккумуляторе. Этот результат, может быть использован на дальнейших этапах обработки (более сложной, чем суммирование двух байтов), записан во внешнюю память или передан в устройство вывода.

7.4.4 Выводы из корпуса микропроцессора и их назначение

Кратко опишем систему выводов, выбрав в качестве примера универсальный 8-разрядный микропроцессор КР580ВМ80А. У него 40 выводов.

Они, как это видно из рисунка 7.8, распределены следующим образом: три вывода соединяются с зажимами источников питания, один вывод—корпус микросхемы (выводы 11, 20, 28 и 2 на рисунке не показаны), два вывода (Φ_1 и Φ_2) служат для подключения к выходным зажимам генератора тактовых импульсов, восемь выводов ($D_0...D_7$)—линии внутренней шины данных, 16 выводов (A_0-A_{15}) соединяются с линиями адресной шины и десять выводов, связанных с устройством управления микропроцессора, служат для подключения к линиям внешней шины управления. Расшифруем обозначения этих выводов: П — разрешение приема информации с внешней шины, В — признак выдачи информации на внешнюю шину, R (Уст.) — перевод БИС в исходное состояние (установка), Г — признак готовности внешнего устройства к обмену информацией, ЖД — признак ожидания микропроцессором готовности внешнего устройства к обмену информацией, Зх — запрос внешними устройствами допуска к шинам данных и адреса (требование захвата шин), ПЗх — признак допуска внешнего устройства к шинам данных и адреса (подтверждение захвата), ЗПр — запрос внешних устройств об обслуживании их микропроцессором (запрос о возможности прерывания), РПр — разрешение на обслуживание микропроцессором внешнего устройства (разрешение на

прерывание), С—синхронизация.

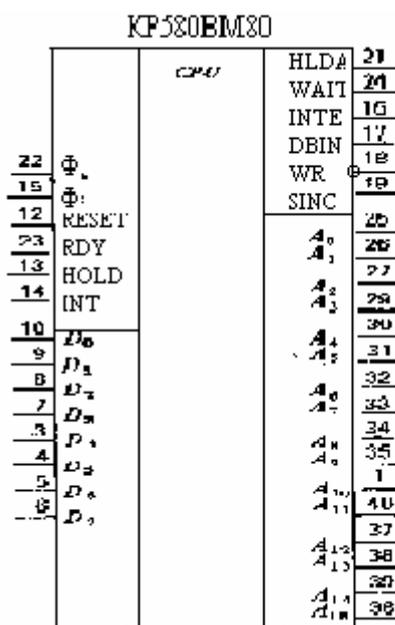


Рисунок 7.8

Общее обозначение микропроцессора – CPU (от англ. слов Central Processor until – центральный процессор).

7.5 Система команд микропроцессора КР580ВМ80

Рассмотрим кратко возможности данного микропроцессора в отношении выполнения различных арифметических, логических и прочих команд.

Методы адресации. Код команды состоит из кода операции (КО) и сведений об операндах. Операнды в команде могут быть обозначены по-разному, в зависимости от чего и говорят о разных методах адресации:

- первый метод предусматривает довольно много однобайтных команд, в которой сам код операции несет информацию о внутренних регистрах МП, куда записаны операнды (регистровая адресация); в этом случае регистрам А, В, С, D, E, H, L соответствуют шестнадцатичные одноразрядные коды 7, 0, 1, 2, 3, 4, 5;
- второй метод заключается в том, что в двухбайтных командах второй байт может представлять собой непосредственно код операнда (непосредственная адресация);
- третий метод заключается в том, что в этом случае второй и третий байты трехбайтной команды представляют собой адрес ячейки памяти, в которой находится операнд (прямая адресация);
- четвертый метод заключается в том, что код команды содержит

информацию о 16-разрядном регистре, содержащем адрес ячейки памяти, в которой находится операнд (косвенная адресация);

- пятый метод используется в МП 8080 (стековая адресация); в этом случае однобайтная команда работы со стеком не несет информации об адресе, просто используется очередная ячейка стековой памяти.

Краткое описание команд МП 8080 приведено в таблице 7.1. В этой таблице приняты следующие обозначения. Буквой *r* обозначается один из регистров микропроцессора (B, C, D, E, H, L, M или A). Этим регистрам соответствуют коды R (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7). В двухбайтной команде код операнда обозначен как N_0 . В трехбайтной команде коды второго и третьего байтов N_0N_1 указывают шестнадцатиричный адрес ячейки памяти $N_1N_0=N_1 \cdot 16^1 + N_0 \cdot 16^0$. Все приводимые в таблице коды операций также представлены шестнадцатиричными числами. Запись в столбце «Код операции» формулы вида $06+8R$ означает, что нужно код R, соответствующий регистру *r*, умножить на 8 и к полученному произведению прибавить 6. Найденное таким путем шестнадцатиричное число будет кодом операции.

Таблица 7.1

№ пп.	Обозначение команд	Код операции	Содержание команды
1	2	3	4
1	MVI r N_0	06+8R	$r \leftarrow N$, $r = B, C, D, E, H, L, M, A$
2	LXI r N_0N_1	01+8R	$rr' \leftarrow N_1N_0$
3	LXI SP N_0N_1	31	$SP \leftarrow N_1N_0$
4	LDA N_0N_1	3A	$A \leftarrow [N_1N_0]$
5	STA N_0N_1	32	$[N_1N_0] \leftarrow A$
6	LDAX r	0A+8R	$A \leftarrow [r r']$, $r = B, D$
7	STAX r	02+8R	$[r r'] \leftarrow A$, $r = B, D$
8	MOV r_1, r_2	40+8R _{1+R₂}	$r_1 \leftarrow r_2$, $r_1 \leftarrow r_2$, $r = B, C, D, E, H, L, M, A$
9	LHLD N_0N_1	2A	$L \leftarrow [N_1N_0]$, $H \leftarrow [N_1N_0+1]$
10	SHLD N_0N_1	22	$[N_1N_0] \leftarrow L$, $[N_1N_0+1] \leftarrow H$
11	XTHL	E3	$HL \leftrightarrow SP$
12	XCHG	EB	$D \leftrightarrow H$, $E \leftrightarrow L$
13	PCHL	E9	$PC \leftarrow HL$
14	SPHL	F9	$SP \leftarrow HL$
15	PUSH r	C5+8R	$S \leftarrow r r'$, $r = B, D, H$
16	PUSH PSW	F5	$S \leftarrow AF$
17	POP r	C1+8R	$r r' \leftarrow S$, $r = B, D, H$
18	POP PSW	F1	$AF \leftarrow S$

Продолжение таблицы 7.1

19	ANA r	A0+R	$A \leftarrow A \wedge r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
20	ORA r	80+R	$A \leftarrow A \vee r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
21	XRA r	A8+R	$A \leftarrow A \vee r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
22	ANI N ₀	E6	$A \leftarrow A \Delta N_0$
23	ORI N ₀	F6	$A \leftarrow A \nabla N_0$
24	XRI N ₀	EE	$A \leftarrow A \nabla N_0$
25	CMP r	B8+R	$A \leftrightarrow r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
26	CPI N ₀	FE	$A \leftrightarrow N_0$
27	INR r	04+8R	$r \leftarrow r+1, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
28	DCR r	05+8R	$r \leftarrow r-1, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
29	INX r	03+8R	$rr' \leftarrow rr'+1, r = B, D, H$
30	INX SP	33	$SP \leftarrow SP+1$
31	DCX r	0B+8B	$rr' \leftarrow rr'-1, r = B, D, H$
32	DCX SP	3B	$SP \leftarrow SP - 1$
33	ADD r	80+R	$A \leftarrow A+r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
34	SUB r	90+R	$A \leftarrow A - r, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
35	ADC r	88+R	$A \leftarrow A+r+c, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
36	SBB r	98+R	$A \leftarrow A - r - c, r = B, C, D, E, H, L, M, A$
37	ADI N ₀	C6	$A \leftarrow A+ N_0$
38	SUI N ₀	D6	$A \leftarrow A - N_0$
39	ACI N ₀	CE	$A \leftarrow A+ N_0+c$
40	SBI N ₀	DE	$A \leftarrow A - N_0 - c$
41	DAD r	09+8R	$HL \leftarrow HL+rr', r = B, D, H$
42	DAD SP	39	$HL \leftarrow HL+SP$
43	NOP	00	Пустая операция
44	HLT	76	Останов
45	CMA	2F	$A \leftarrow A$
46	CMC	3F	$c \leftarrow c$
47	STC	37	$c \leftarrow I$
48	DAA	27	Десятичная коррекция
49	IN N ₀	DB	$A \leftarrow (N_0)$
50	OUT N ₀	D3	$(N_0) \leftarrow A$
51	DI	F3	Запрет прерывания
52	EI	F8	Разрешение прерывания
53	RST n	C7+8n	$S \leftarrow PC, PC \leftarrow 8n, N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

Продолжение таблицы 7.1

54	RLS	07	$A_{m+1} \leftarrow A_m, A_0 \leftarrow A_7, c \leftarrow A_7$
55	RRC	0F	$A_m \leftarrow A_{m+1}, A_7 \leftarrow A_0, c \leftarrow A_0$
56	RAL	17	$A_{m+1} \leftarrow A_m, A_0 \leftarrow c, c \leftarrow A_7$
57	RAR	1F	$A_m \leftarrow A_{m+1}, A_7 \leftarrow c, c \leftarrow A_0$

Стрелки, используемые в столбце «Содержание команды», показывают направления пересылки данных. В частности, запись $r \leftarrow N_0$ означает, что число N_0 помещается в регистр r . Двухбайтное число, заключенное в квадратные скобки, означает, что данные следует взять из ячейки памяти или поместить в ячейку памяти, адрес которой и приведен в этих квадратных скобках. Однобайтное число в круглых скобках – это адрес порта ввода или вывода. Остальные команды будут расшифрованы ниже при описании отдельных команд.

Команды загрузки и пересылки помещены в первых 18 строках таблицы 7.1. Здесь имеются команды со всеми упомянутыми выше видами адресации. Имеются также команды взаимной пересылки, например XCHG, в соответствии с которой взаимно меняется местами содержимое регистровых пар DE и HL.

По команде PCHL содержимое регистровой пары HL загружается в программный счетчик PC.

Команда SPHL (как и команда LXI SP), позволяет разместить стек в конкретной области пространства памяти. По этой команде в указатель стека SP загружается двухбайтное число из регистровой пары HL.

Команды PUSH и POP – это команды пересылки двухбайтных чисел из регистровых пар в стек и обратно.

Команды логических операций помещены в строках 19 – 26 таблицы 7.1. Здесь приняты следующие обозначения: \wedge - операция И, \vee - операция ИЛИ, ∇ - операция «исключающая ИЛИ», Δ - операция «исключающая И». Перечисленные операции выполняются поразрядно. Запись $A \leftarrow A \wedge r$, например, означает, что в каждый разряд регистра-аккумулятора помещается одноразрядное двоичное число, представляющее собой функцию И чисел в аналогичных разрядах прежнего содержимого аккумулятора и содержимого регистра r .

Команда CMP – это команда сравнения чисел, хранящихся в аккумуляторе и регистре r . При этом содержимое аккумулятора не изменяется, но разряды регистра флажков F устанавливаются в соответствии с разностью $r - A$.

Команды арифметических операций размещены в строках 27 – 42 таблицы 7.1. Буква c в описании этих команд означает содержимое разряда

переноса регистра флажков F.

Системные и специальные команды – это команды, помещенные в строках 43 – 53 таблицы 7.1. Команда NOP означает просто пропуск одного цикла и никак не влияет на содержимое регистров микропроцессорной системы.

Команда HLT останавливает работу МП до прихода запроса прерывания или сигнала сброса.

Команда CMA инвертирует число, записанное в аккумуляторе.

Команды CMC и STC оперируют с содержимым бита переноса регистра флажков.

Для того, чтобы запретить или разрешить микропроцессору реагировать на команды прерывания, используются команды DI и EI.

Команды сдвигов приведены в последних четырех строках таблицы 7.1. По этим командам осуществляется кольцевой сдвиг числа в аккумуляторе на один двоичный разряд влево или вправо, с включением или без включения в кольцо разряда переноса из регистра флажков F.

Программирование микропроцессорных системы заключается в составлении программы и последующем помещении кодов команд в ячейки памяти системы. Программа может состояться в виде последовательности двоичных машинных кодов команд. Однако она будет ненаглядна. Более удобно пользоваться при написании программ мнемоническими обозначениями команд, приведенными в таблице 7.1. Существует специальная программа – ассемблер, с помощью которой можно на ЭВМ перевести написанную таким образом программу в машинные коды.

Выбор метода программирования микропроцессорной системы зависит от наличия и стоимости запоминающих устройств и от резерва времени для выполнения в системе более длинной программы.

7.6 Микропроцессорная система

Согласно ранее приведенному определению, микропроцессорная система – это собранная в единое целое совокупность взаимодействующих БИС микропроцессорного комплекта (иногда дополненная БИС из других комплектов), организованная в систему, т.е. вычислительная или управляющая система с микропроцессором в качестве узла обработки информации.

Общая структурная схема. Типовая структура микропроцессорной системы изображена на рисунке 7.9. Кратко охарактеризуем узлы-модули, входящие в ее состав, за исключением уже описанного микропроцессора.

Генератор тактовых импульсов — источник последовательности прямоугольных импульсов, с помощью которых осуществляется управление

событиями во времени. Он задает цикл команды — интервал времени, необходимый для считывания выборки команды из памяти и ее исполнения. Цикл команды состоит из определенной последовательности элементарных действий, называемых состояниями (тактами). Для некоторых микропроцессоров не требуется внешний генератор тактовых импульсов: он содержится непосредственно в схеме однокристалльного микропроцессора.

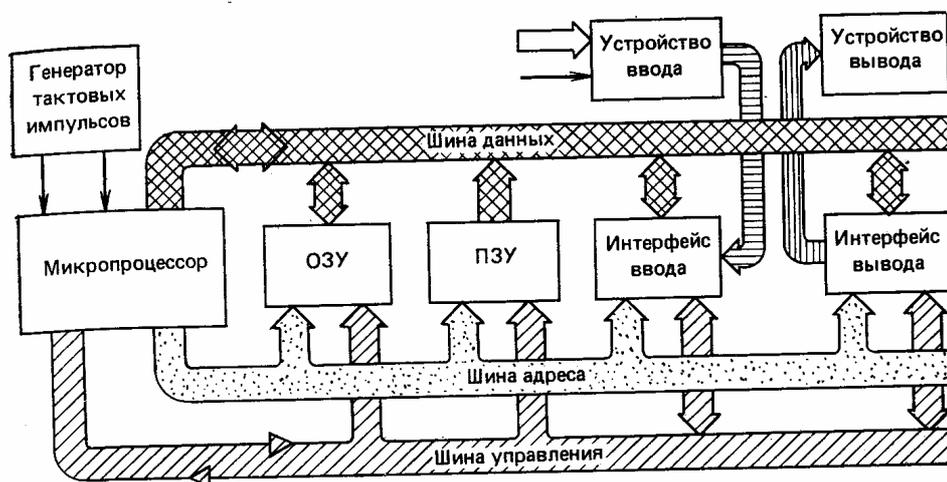


Рисунок 7.9

Основная память системы (внешняя по отношению к микропроцессору) состоит из ПЗУ и ОЗУ.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) — это устройство, в котором хранится программа (и при необходимости совокупность констант). Содержимое ПЗУ не может быть стерто. Оно используется как память программы, составленной заранее изготовителем в соответствии с требованиями ее пользователей. В таких случаях говорят, что программа жестко «зашията» в запоминающем устройстве. Чтобы осуществить иную программу, необходимо применить другое ПЗУ или его часть. Из ПЗУ можно только выбирать хранимые там слова, но нельзя вносить новые, стирать и заменять записанные слова другими. Оно подобно напечатанной таблице выигрышей по облигациям: можно лишь считывать имеющиеся там числа, но заменять их или вносить новые невозможно. Помимо ПЗУ используются также ППЗУ и РППЗУ.

Программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) отличается от ПЗУ тем, что пользователь может самостоятельно запрограммировать ПЗУ (ввести в него программу) с помощью специального устройства — программатора, но только один раз (после введения программы). Содержимое памяти уже нельзя изменить).

Репрограммируемое постоянное запоминающее устройство (РППЗУ), называемое также стираемым ПЗУ, имеет такую особенность: хранимая информация может стираться несколько раз (при этом она разрушается). Иначе говоря, РППЗУ допускает перепрограммирование, осуществляемое с помощью

программатора. Это облегчает исправление обнаруженных ошибок и позволяет изменять содержимое памяти.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), которое иначе называют запоминающим устройством с произвольной выборкой (ЗУПД) или произвольным доступом (ЗУПД), служит памятью данных, подлежащих обработке, и результатов вычислений, а в некоторых микропроцессорных системах — также программ, которые часто меняются. Его характерное свойство заключается в том, что время, требуемое для доступа к любой из ячеек памяти, не зависит от адреса этой ячейки. ОЗУ допускает как запись, так и считывание слов. По отношению к этому запоминающему устройству приемлема аналогия с классной доской, на которой мелом записаны числа: их можно многократно считывать, не разрушая, а при необходимости — стереть число и записать на освободившемся месте новое. Следует иметь в виду, что информация, содержащаяся в ОЗУ, исчезает, стирается, если прерывается напряжение питания.

Интерфейсом называют устройство сопряжения. Это упрощенное определение. В более строгом толковании под интерфейсом понимают совокупность электрических, механических и программных средств, позволяющих соединять модули системы между собой и с периферийными устройствами. Его составными частями служат аппаратные средства для обмена данными между узлами и программные средства — протокол, описывающий процедуру взаимодействия модулей при обмене данными. Интерфейс микропроцессорной системы относится к машинным интерфейсам.

В микропроцессорной системе применяют специальные интерфейсные БИС для сопряжения периферийных устройств с системой (на рисунке 7.9 они показаны в виде модулей интерфейса ввода и интерфейса вывода). Для этих БИС характерна универсальность, осуществляемая путем программного изменения выполняемых ими функций.

Более простые задачи решают порты ввода-вывода — схемы, спроектированные (запрограммированные) для обмена данными с конкретными периферийными устройствами: приема данных с клавиатуры или устройства считывания, передачи их дисплею, телетайпу и т. п. *Порт* — это схема средней степени интеграции, содержащая адресуемый многорежимный буферный регистр ввода-вывода (МБР) с выходными тристабильными схемами, логикой управления и разъемом для подключения устройств ввода-вывода. Возможности перепрограммирования порта ограничены.

Когда периферийные устройства, входящие в состав микропроцессорной системы, сложны, выполняют многочисленные разнообразные операции, то для сопряжения применяют усложненный интерфейс, называемый периферийным программируемым адаптером. Он содержит набор встроенных портов и других регистров, облегчающих программирование и осуществление временного согласования. К одному периферийному программируемому адаптеру может быть подключено несколько простых устройств ввода-вывода. Подобный

интерфейс считают универсальным интерфейсом широкого применения; поскольку его можно сочетать почти со всеми имеющимися периферийными устройствами.

Для многих микропроцессорных систем и микро-ЭВМ характерно несоответствие между относительно высокой скоростью обработки информации внутри микропроцессора и низкой скоростью обмена данными между модулями через интерфейс. Характеристики последнего в значительной степени определяют эффективность и производительность системы в целом.

Устройство ввода осуществляет введение в систему данных, подлежащих обработке, и команд. *Устройство вывода* преобразует выходные данные (результат обработки информации) в форму, удобную для восприятия пользователем или хранения. Устройствами ввода-вывода служат блоки считывания информации с перфоленты и магнитной ленты (или записи на них), кассетные магнитофоны, гибкие диски, клавиатуры, дисплеи, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, графопостроители, телетайпы и т. п.

Далее предметом нашего внимания будут шины системы. Шиной называют группу линий передачи, используемых для выполнения определенной функции (по одной линии на каждый передаваемый бит). Особенность структуры микропроцессорной системы заключается в магистральной организации связей между входящими в ее состав модулями. Она осуществляется с помощью трех шин. По ним передаются вся информация и сигналы, необходимые для работы системы. Эти шины соединяют микропроцессор с внешней памятью (ОЗУ, ПЗУ) и интерфейсами ввода-вывода, в результате чего создается возможность обмена данными между микропроцессором и другими модулями системы, а также передачи управляющих сигналов.

При применении микропроцессорных систем в измерительных приборах достигается многофункциональность приборов; упрощается управление процессом измерения; автоматизируется регулировка, сама калибровка и поверка; улучшаются метрологические характеристики прибора; повышается качество вычислительных процедур, статистической обработки результатов наблюдений; определяются и переводятся в линейную форму функции измеряемой физической величины; создаются программируемые, полностью автоматизированные приборы. Появился новый класс «интеллектуальных» приборов, называемых также «думающими» или «разумными». Радикально изменилась идеология построения приборов.

8 Блок контроля

8.1 Контрольные вопросы

Раздел «Полупроводники и их свойства»

Что изучает электроника?

Какая зона называется зоной проводимости?

Чем отличаются проводники и полупроводники?

В чем различие между полупроводниками и диэлектриками?

Какая проводимость называется собственной проводимостью?

В каких случаях полупроводники обладают примесной проводимостью?

Дайте определение процесса генерации.

В полупроводнике p-типа какие носители будут основными?

Охарактеризуйте уровень Ферми.

Раздел «Электронно-дырочный переход»

Почему p-n переход часто называют запирающим слоем?

Электронно-дырочный переход – это слой, обедненный или обогащенный носителями заряда?

Нарисуйте энергетическую диаграмму p-n перехода

Дайте характеристику обратимому и необратимому пробоем p-n перехода.

Какие пробои можно отнести к электрическим?

Какое напряжение называется прямым?

Дайте определение контактной разности потенциалов.

Движением каких носителей обусловлен диффузионный ток?

Какое явление называется инжекцией?

Раздел «Полупроводниковые приборы»

Объясните область применения стабилитрона.

Чем вызвано отклонение вольт-амперной характеристики диода от вольт-амперной характеристики p-n перехода?

Перечислите основные режимы работы транзисторов .

Какие факторы определяют усилительные свойства транзистора?

Какими отличительными особенностями характеризуются три схемы включения транзистора ?

Перечислите h - параметры транзистора, объясните их физический смысл и способ их экспериментального определения.

Почему процесс усиления по току не осуществляется в схеме включения транзистора с общей базой?

Объясните принцип работы полевого транзистора с р-n переходом и МДП-транзистора.

Укажите основные отличия полевых транзисторов от биполярных.

Изобразите и поясните статические стоковые характеристики полевых транзисторов.

Какие составляющие токов протекают в управляемом тиристоре?

Как меняется ВАХ триодного тиристора при изменении напряжения на управляющем электроде?

Начертите схему включения тиристора, выполняющего роль ключа.

Раздел «Усилители электрических сигналов»

Перечислите и охарактеризуйте усилители переменного тока.

Объясните принцип построения линии нагрузки.

Объясните назначение элементов усилительного каскада.

Как можно добиться значительного усиления входного напряжения?

Объясните причину возникновения линейных и нелинейных искажений сигнала.

Перечислите и охарактеризуйте режимы работы усилительного каскада.

Перечислите и охарактеризуйте виды межкаскадной связи.

Назначение и основные схемы включения операционного усилителя.

Какие бывают обратные связи в усилителях?

Сформулируйте условия самовозбуждения операционного усилителя.

Какова зависимость работы операционного усилителя от частоты?

Раздел «Источники вторичного питания»

Охарактеризуйте вторичные источники питания.

Приведите однофазную схему однополупериодного выпрямления.

Приведите однофазную схему двухполупериодного выпрямления с нулевым выводом.

Какие из эффективных параметров выпрямителей задаются потребителем?

Назовите достоинства и недостатки двухполупериодной схемы выпрямления с нулевым выводом.

Приведите и охарактеризуйте индуктивные фильтры. Как выбирается значение индуктивности?

Приведите и охарактеризуйте емкостные фильтры. Как выбирается значение индуктивности?

Как определяется коэффициент фильтрации?
Для каких целей применяются стабилизаторы напряжения?

Раздел «Основы микроэлектроники»

Что является элементной базой микроэлектроники?
Приведите классификацию интегральных микросхем по функциональному назначению.
Объясните назначение триггера, счетчика, регистра.
Что характеризует степень интеграции микросхемы?
Охарактеризуйте работу многоэмиттерного транзистора.
С чем связана функциональная сложность больших интегральных схем (БИС)?

Раздел «Основы микропроцессорной техники»

Запишите условное графическое обозначение, логическое уравнение и таблицу истинности логического элемента ИЛИ-НЕ.
Запишите условное графическое обозначение, логическое уравнение и таблицу истинности логического элемента И-НЕ.
Можно ли соединять между собой два (или более) выхода логических элементов?
Как работает счётчик импульсов?
От чего зависит количество триггеров в счётчике?
Перечислите и охарактеризуйте основные узлы ЭВМ.
Какие устройства относятся к периферийным устройствам?
Представьте число 178 в двоичной системе счисления.
Приведите примеры и объясните формы представления чисел.
Перечислите основные характеристики микропроцессоров.
Объясните назначение регистра общего назначения и регистра аккумулятора.
Какой режим называют мультиплексным?
Назначение оперативного запоминающего устройства.
Объясните назначение программного обеспечения микропроцессоров.

8.2 Тесты контроля качества усвоения дисциплины

Тест 1. Какое из приведенных утверждений правильное ?
Варианты ответа:

- а) Электронно-дырочный переход - это слой, обеднённый носителями заряда;
- б) Электронно-дырочный переход - это слой, обогащённый носителями заряда;

Тест 2. Какой из приведенных пробоев является необратимым?

Варианты ответа:

- а) лавинный;
- б) туннельный;
- в) тепловой.

Тест 3. Какая схема включения биполярного транзистора обеспечивает наибольшее усиление мощности? Почему?

Варианты ответа:

- а) схема с общим коллектором;
- б) схема с общим эмиттером;
- в) схема с общей базой.

Тест 4. Какой из приведенных униполярных транзисторов закрывается сразу после отключения питающего напряжения ?

Варианты ответа:

- а) с управляющим р-п переходом;
- б) МДП структуры с индуцированным каналом;
- в) МДП структуры с встроенным каналом.

Тест 5. В каком режиме работает усилительный каскад, если рабочая точка расположена на переходной характеристике на участке линейной зависимости?

Варианты ответа:

- а) режим А;
- б) режим В;
- с) режим С.

Тест 5. Какой тип межкаскадной связи присутствует в усилителе низкой частоты?

Варианты ответа:

- а) по переменной составляющей;
- б) гальваническая.

Тест 6. Чем обусловлены нелинейные искажения в усилителе?

Варианты ответа:

- а) появлением высших гармоник в выходном сигнале;
- б) наличием реактивных элементов в схеме усилителя;

в) зависимостью коэффициента усиления от частоты.

Тест 7. Какие из перечисленных характеристик цифровых интегральных схем относятся к статическим характеристикам?

Варианты ответа:

- а) передаточные характеристики;**
- б) амплитудно-временные характеристики;**
- в) формирующие характеристики.**

Тест 8. Какой из перечисленных генераторов относится к генератору синусоидальных колебаний?

Варианты ответа:

- а) генератор напряжения прямоугольной формы;**
- б) генератор ступенчато изменяющегося напряжения;**
- в) RC-генератор.**

Тест 9. Какое число в двоичной системе счисления будет иметь вид 10110010?

Варианты ответа:

- а) 245;**
- б) 178;**
- в) 98.**

Тест 10. Пленочные ИМС, представляющие собой изолирующую основу, на поверхности которой все элементы и межсоединения сформированы в виде послойно нанесенных пленок, содержат:

Варианты ответов:

- а) только пассивные элементы;**
- б) только активные элементы;**
- в) и пассивные, и активные элементы.**

Заключение

В настоящее время доля электронных информационных устройств и устройств автоматики непрерывно увеличивается. Это является результатом развития интегральной технологии, внедрение которой позволило наладить массовый выпуск дешевых, высококачественных, не требующих специальной настройки и наладки микроэлектронных функциональных узлов различного назначения, основой которых являются такие элементы электроники как полупроводниковые приборы. Создание разнообразных и замечательных по своим свойствам полупроводниковых приборов обусловили современные успехи электроники.

Чтобы изучить современную электронику, надо, прежде всего, познать принципы устройства и физические основы работы этих приборов, их характеристики, параметры и важнейшие свойства, определяющие возможности их применения. При этом очень важным являются оперативность и точность получения информации, чему должно способствовать использование различных технических средств. Этим вопросам и посвящено предлагаемое учебное пособие.

Список использованных источников

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.- М.: Энергия, 1977.- 320 с.
2. Гершунский Б.С. Основы электроники .- Киев, 1977.- 287 с.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учебное пособие для вузов.- М.: Высшая школа, 1991.- 622 с.
5. Глазенко Т.А., Прянишников В.А. Электротехника и основы электроники.- М.: Высшая школа, 1996.- 460 с.
6. Основы промышленной электроники / Под ред. В.В. Герасимова.- М.: Высшая школа, 1986.- 432 с.
7. Ибрагим К.Ф. Основы электронной техники.- М.: Мир, 1997.- 546 с.
8. Жеребцов И.П. Основы электроники.- Л.: Энергоатомиздат, 1985.- 560 с.
9. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах.- М.: Радио и связь, 1984.- 160 с.