

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Стефаненко П.В.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины в
качестве учебного пособия для студентов специальности
«Радиотехника» и курсантов высших военных учебных
заведений*

Донецк, ДонГТУ 2000

УДК 621.382(07)
С 79

С 79 Сифраенко П.В. Полупроводниковые приборы. Учебное пособие. — Донецк: ДонГУ, 2000. — 181 с.

Рецензенты:

В.В.Павленко канд.техн.наук, доцент кафедры
Военной подготовки ДонГУ

Н.Н.Дворак канд.техн.наук, доцент кафедры
Электрооборудования и автоматики
Керченского МИ

Распечатываются физические процессы, происходящие в полупроводниковых приборах, используемых в военной технике связи. Предназначено для самостоятельной работы студентов и курсантов высших учебных заведений.

ISBN 966-7559-41-6

© ДонГУ, 2000

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс тесно связан с электроникой, которая оказывает существенное влияние на все направления экономического и социального развития страны. Успехи электроники являются результатом создания разнообразных электровакуумных и полупроводниковых приборов. Появление электроники как науки обусловлено развитием радиотехники. Эти области развивались в тесной, взаимной связи, поэтому их часто объединяют и называют радиоэлектроникой.

В пособии изложены физические процессы в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах, их устройство, характеристики и параметры, а также некоторые вопросы их применения.

Значительно расширены сведения по микроэлектронике и другим перспективным отраслям полупроводниковой электроники.

В основу учебного пособия «Полупроводниковые приборы» положен учебный материал, способствующий усвоению в базовой подготовке студентов («Физика», «Электроника», изучаемые на первом курсе университета) и который они должны изучить для успешного овладения содержанием базовых модулей дисциплины.

§ 1-1. ВИДЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ. СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ.

К полупроводникам относятся вещества, занимающие промежуточное положение по величине удельной проводимости между проводниками и диэлектриками ($10^2 - 10^{10}$ Ом·см).

Основным признаком, выделяющим полупроводники как особый класс веществ, является сильное влияние температуры и концентрации примесей на их электрическую проводимость. Так зависимость проводимости от температуры носит экспоненциальный характер: при небольшом увеличении температуры резко увеличивается проводимость (у проводников наоборот).

Величие примесей еще в большей степени влияет на проводимость. К полупроводникам относятся следующие вещества:

- химические элементы - бор, олово, углерод, кремний, фосфор, селен, германий...
 - большинство химических соединений (особенно окислы металлов);
 - многие органические вещества.
- Основными свойствами полупроводников являются:
- правильная кристаллическая решетка, т.е. закономерное расположение атомов в пространстве;
 - малая работа, необходимая для выхода электрона из атома;
 - ковалентная связь между атомами решетки. В качестве материалов, обладающих перечисленными свойствами, наиболее широкое распространение получили германий и кремний (Ge, Si).

Прежде, чем раскрывать кристаллическую решетку, напомним основные положения ядерной физики. Электроны атома вращаются вокруг ядра по орбитам. Расположены в различных плоскостях. Эти орбиты могут занимать лишь определенные места, несущие названия оболочек К, L, M, N, O, P, Q. Радиусы этих оболочек пропорциональны квадрату их номера. На каждой оболочке может присутствовать только определенное количество электронов: $N=2 \cdot n^2$, где N - число электронов, n - номер орбиты.

Так, например:
 $K=1^2 \cdot 2=2$; $L=2^2 \cdot 2=8$;
 $M=3^2 \cdot 2=18$; $N=4^2 \cdot 2=32$ и т.д.

Наибольший интерес представляет внешняя оболочка, определяющая химические свойства элемента. Причем, если внешняя орбита имеет 8 электронов, то атом устойчив. Атомы, внешняя оболочка у которых имеет $N \neq 8$ электронов, способны присоединять (отдавать) электроны. При этом образуются новые химические соединения.

Внешняя оболочка определяет валентность атома, т.е. способность отдавать (забирать) электроны внешней орбиты.

Следует запомнить:

- если внешняя оболочка атома имеет 6 или 7 электронов, то такие атомы называются 6 и 7 валентными;

- если внешняя оболочка содержит 1, 2, 3 электрона (атом будет отдавать их), то элемент - донор, двух, трехвалентный;

- если внешняя оболочка имеет 4, 5 электронов, то атомы 4 х и 5 валентны. Общее место занимают 4-х валентные элементы германий и кремний, которые могут и отдавать и присоединять электроны.

Это основные материалы, используемые в полупроводниковой технике, однако закономерности, характерные для них, распространяются на весь класс полупроводниковых приборов.

Кремний и германий имеют кристаллическую структуру с решеткой алмазного типа. В основе такой решетки лежат пространственная фигура - тетраэдр, в углах и центре которой расположены атомы.

Особенностью такой системы является одинаковое расстояние центрального атома от угловых (рис. 1).

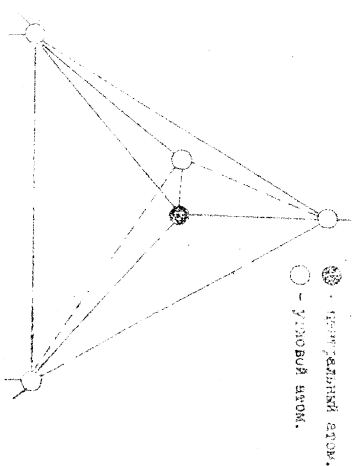


Рис. 1.

Если удаляющиеся атом в углах решетки, имеют особый квантовый-механический характер и возникают за счет обмена взаимодействующих атомов валентными электронами.

Такая связь называется парноэлектронной или ковалентной. Она образуется поэтому, что расстояние между атомами мало и сопоставимо с протяженностью электронных оболочек. Поэтому оболочки соприкасаются и даже перекрываются. В результате валентные электроны движутся не только вокруг ядра своего атома, но и вокруг ядер соседних атомов.

1. к у Ge и Si на наружной оболочке имеется по 4 валентных электрона, то каждый атом образует 4 ковалентные связи с ближайшими окружающими его атомами. (рис 2).

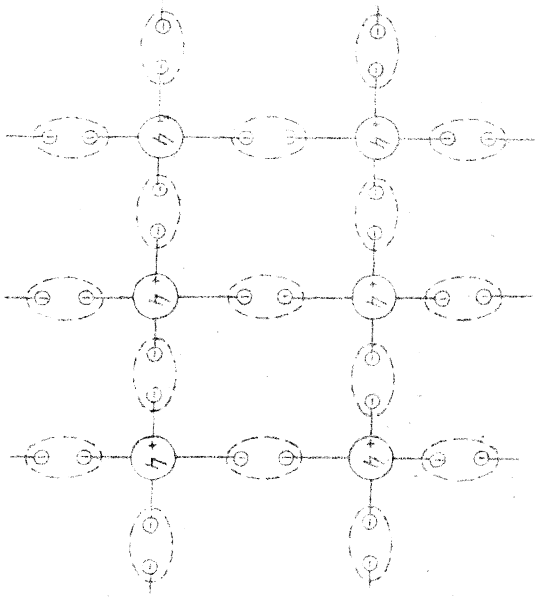


Рис. 2.

Если кристалл не получает энергии извне (находится при температуре абсолютного нуля), то электроны прочно связаны с атомами и прохождение тока через кристалл невозможно. Полупроводник подобен диэлектрику.

§ 1-2. ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАРЯДОВ В СОВМЕЩЕННОМ И РАЗМЕСТНОМ ПОЛУПРОВОДИКАХ

В полупроводниках (и это отличает их от диэлектриков) сравнительно небольшие энергетические возмущения, обусловленные напряжением или облучением, могут привести к разрыву валентных связей в решетке. При этом валентный электрон, оторвавшись от атома, переходит в новое состояние, в котором он может перемещаться по решетке, т.е. становится носителем заряда. Это электроны проводимости, обуславливающие проводимость полупроводника.

Минимальная энергия ΔW , которую надо сообщить электрону, чтобы оторвать его от атома и сделать подвижным, зависит от структуры полупроводника.

$$\Delta W_{Ge} = 0,72 \text{ Эв} \quad \Delta W_{Si} = 1,12 \text{ Эв}$$

В квантовой механике показано, что N электронов твердого тела характеризуются различными возможными энергетическими уровнями, причем на каждом уровне могут находиться два электрона с различными спинами.

Электроны, перемещающиеся по кристаллу, занимают целую зону энергетических состояний, называемую зоной проводимости. Валентные электроны занимают зону, называемую валентной. Между МАХ валентной зоны и МИН зоны проводимости лежит область неустойчивых энергетических состояний — запрещенная зона (рис. 3).

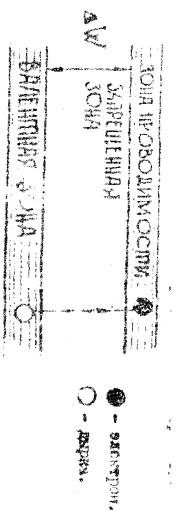


Рис. 3.

В полупроводниках запрещенной зоны — нет, в диэлектриках она шире. Ширина запрещенной зоны ΔW определяет энергию ионизации атомов полупроводника.

Отрыв валентного электрона от атома и превращение его в электрон проводимости соответствует перебору электрона из валентной зоны в зону проводимости.

При разрыве валентной связи и уходе электрона образуется незаполненная связь (+Е), на которую легко переходит электрон с соседних связей. Место с незаполненной связью называется дыркой. В собственном полупроводнике появление электрона связано обязательно с разрывением одной из связей, т.е. с появлением дырки. Дырка, как и оторвавшийся электрон, хаотически перемещается по решетке, обуславливая дырочную проводимость полупроводника.

Таким образом, полупроводника обусловлена перемещением как свободных электронов, так и дырок. Соответственно различают два вида проводимости полупроводников: электронную (типа n) и дырочную (типа p).

В химически чистом кристалле полупроводника число дырок всегда равно числу свободных электронов, и электрический ток в нем образуется в результате одновременного переноса зарядов обоих знаков.

Такая электронно-дырочная проводимость называется собственной проводимостью полупроводника.

Вместе с генерацией пар электрон-дырка происходит их рекомбинация: электрон проводимости, потеряв избыточную энергию, переходит в валентную зону, т.е. электрон и дырка прекращают существование. Под действием внешнего поля электроны и дырки приобретают направленные движение и создают ток. Общий ток

$$I = I_n + I_p$$

I_n — ток электронов проводимости;

I_p — ток дырок.

Особый интерес представляют полупроводники у которых часть атомов основного вещества в узлах кристаллической решетки замещена атомами примесей. Также полупроводники называются примесями. В качестве примесей используются химические элементы, валентность которых не равна валентности основного вещества (Ge Si). К ним относятся пятивалентные: мышьяк, фосфор, сурьма или трехвалентные: индий, галлий, бор, алюминий.

Если в решетку германия ввести атом мышьяка (рис. 4), то четыре валентные электрона примесного атома образуют ковалентные связи с четырьмя электронами соседних атомов германия а пятый валентный электрон оказывается несвязанным, т.е. он легко может перейти в катодорно свободных электронов. Дырка при этом не образуется, т.е. все валентные связи сохраняются. 5-й электрон отрывается от своего атома уже при комнатной температуре и способен перемещаться по решетке.

В результате образуется свободный электрон и неподвижный положительный ион (атом примеси, потерявший электрон). Примеси, отдающие электроны (это приводит к избытку свободных электронов над дырками) называются донорными. При

наличия легирующей примеси полупроводник остается электрически нейтральным, обладает преимущественной электронной проводимостью типа П.

Электроны - основные носители заряда, дырки - не основные носители заряда. Введение в четырехвалентный полупроводник трехвалентной примеси индия приводит к избытку дырок над электронами (рис 5).

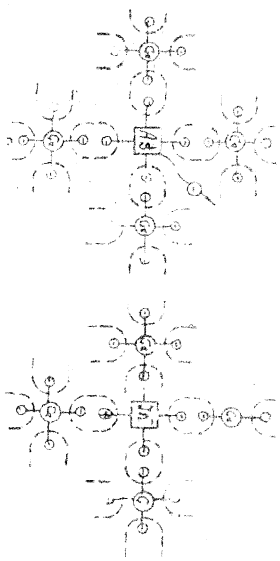


Рис. 5.

Примесный атом отдает три валентных электрона для образования ковалентной связи с соседними атомами, а связь с четвертым атомом не заполнена. На эту связь могут легко переходить валентные электроны с соседних связей. При этом в решетке образуется неподвижный ион и дырка способная перемещаться по решетке.

Такие примеси называются акцепторными и полупроводник обладает преимущественной дырочной проводимостью типа Р.

Дырки - основные носители заряда, электроны - не основные носители заряда.

С энергетической точки зрения донорные и акцепторные примеси образуют локальные энергетические уровни, лежащие в запрещенной зоне. Уровни доноров находятся около зоны проводимости (их энергия ионизации ΔW_D), уровни акцепторов у валентной (их энергия ионизации ΔW_A) (рис. 6).

При сравнительно невысокой температуре атомы доноров отдадут электроны в зону проводимости, образуя свободные электроны, атомы акцепторов получают электроны из валентной зоны, что сопровождается движением дырки.

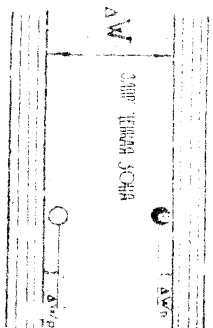


Рис. 6.

Таким образом введение примеси (донорные или акцепторные) можно изменить механизм электрического тока в полупроводнике, т.е. создавать условия при которых активно роль будут играть электроны или дырки.

Характер электропроводимости и проводящих носителей заряда существенно меняется при введении небольшого количества примеси. Для этой цели примесью может выступать 10^4 (одна десятая процента) примеси в основном материале полупроводника.

концентрация основных носителей возрастает в 1000 раз и соответственно увеличивается проводимость. Получение полупроводников с таким малым и строго дозированным содержанием примеси является весьма сложным процессом. При этом исходный полупроводник, к которому добавляется примесь, должен быть очень чистым (не более 10^8 % посторонних примесей).

ВЫВОДЫ

1. В химически чистом полупроводнике концентрация дырок и электронов одинаковы и электрический ток в таком полупроводнике состоит из дырочного и электронного токов одинаковой величины.

$$I = I_{n+Pr}, \text{ причем } I_n = I_p$$

2. В полупроводнике типа "п" (с примесью мышьяка) основными носителями тока являются электроны, а не основными - дырки, поэтому он обладает преимущественно электронной проводимостью и электрический ток также состоит из электронного и дырочного;

$$I = I_{n+Pr} \text{ но } I_n \gg I_p, \text{ поэтому } I \approx I_n$$

3. В полупроводнике типа "р" (с примесью индия) основными носителями тока являются дырки, а не основными - электроны, поэтому он обладает преимущественно дырочной проводимостью, и электрический ток также состоит из дырочного и электронного.

$$I = I_{p+Pr} \text{ но } I_p \gg I_n, \text{ поэтому } I \approx I_p$$

§1-3. ТОКИ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

а) Дрейфовый ток

При отсутствии внешнего поля, электроны и дырки в кристалле находятся в состоянии хаотического теплового движения. При включении поля на хаотическое движение накладывается компонента направленного движения, вызванного действием этого поля (рис. 7)



Рис. 7

В результате электроны и дырки перемещаются вдоль кристалла. Возникает дрейфовый ток. Этот ток обусловленный внешним полем, называется дрейфовым

б) Диффузионный ток

Электрический ток в полупроводнике может быть вызван не только электрическим полем. Пусть концентрация подвижных носителей заряда в различных точках полупроводника различна. Если при этом тело электрически нейтрально, и в любой его микрообласть суммарный положительный и отрицательный заряд равен нулю, то

различие в концентрациях не приводит к появлению электрического поля и электрических сил рассогласовывая, выравнивая концентрации.

Но в соответствии с общими законами теплового движения в полупроводнике возникает диффузия микрочастиц из областей с большей их концентрацией в область с меньшей концентрацией. Т.к. диффундирующие частицы несут заряд, то в результате диффузии появляется ток, обусловленный разностью концентраций. Этот ток называется диффузионным.

Диффузионный поток электронов движется в сторону уменьшения концентрации, однако, в соответствии с принятыми в технике условным направлением тока диффузионный ток считается текущим в сторону увеличения концентрации электронов, т.е. навстречу потоку электронов.

Интенсивность процесса диффузии характеризуется коэффициентом диффузии D . Он пропорционален подвижности носителей, различен для разных веществ и зависит от температуры. Единичная измерения его - $\text{см}^2/\text{сек}$. Коэффициент диффузии для электронов больше, чем для дырок. Так для германия $D_n = 98$, $D_p = 47$ для кремния $D_n = 34$, $D_p = 12$.

Если в некоторой части полупроводника создана избыточная концентрация носителей, то избыточные носители будут распространяться за счет диффузии в другие части полупроводника. Избыточная концентрация начнет убывать по экспоненциальному закону (рис. 8).

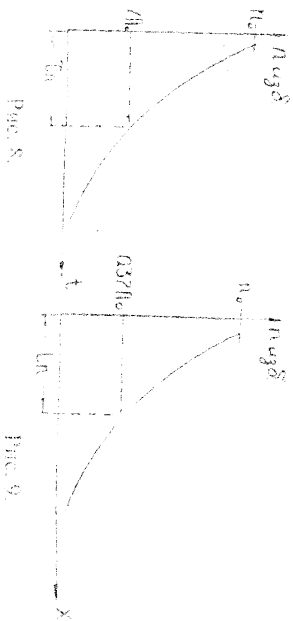


Рис. 8.

Рис. 9.

Время, в течение которого избыточная концентрация уменьшится в 2.7 раза, т.е. станет равна 0.37 первоначального значения N_0 , называется временем жизни носителей τ . Это значение для германия и кремния в различных случаях могут быть $(0.1 - 100)$ мксек.

При диффузионном распределении носителей вдоль полупроводника их концентрация вследствие рекомбинации также убывает по экспоненциальному закону (рис. 9). Расстояние L_n , на котором избыточная концентрация уменьшается в 2.7 раза, называется диффузионной длиной. Она характеризуется убывание избыточной концентрации в пространстве. Таким образом, убывание избыточной концентрации происходит во времени и в пространстве и поэтому величина τ_n и L_n связаны следующей зависимостью:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

В общем случае в полупроводнике могут существовать и электрическое поле и концентрации носителей. Тогда ток, протекающий в полупроводнике будет иметь две составляющие, так и диффузионного компонента.

§ 1-4 ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Рассмотрим физические процессы, происходящие на грани соприкосновения двух полупроводников имеющих проводимость разного типа: один полупроводник типа n , другой типа p . Контакт между ними будем считать идеальным. Это можно сделать либо путем сплавления двух кристаллов одного и того же вещества, обладающих разной проводимостью, или путем введения акцепторных примесей в кристалл с p -проводимостью или же донорных примесей в n -полупроводник.

Между (рис. 10а) n и p областями существует тонкий переходной слой (0.3 мк), обладающий особыми свойствами. Этот слой называется электронно-дырочным (n - p) переходом.

Концентрация электронов в n -полупроводнике больше концентрации электронов в p -полупроводнике ($N_n^0 > N_p^0$). Концентрация дырок выше в p -полупроводнике ($N_p^0 > N_n^0$). Следовательно на границе областей n - p существует разность концентраций (градиент) носителей, под действием которой начинается диффузия зарядов: диффузионный ток дырок из p -области в n -область. Диффузионный ток сопровождается нарушением электрической нейтральности полупроводника вблизи границы. Как только электрон донорной примеси (n -область) перенес в область p и заполнил связь акцепторной примеси, так на границе образуется пара неподвижных ионов положительный в p -области и отрицательный в p -области.

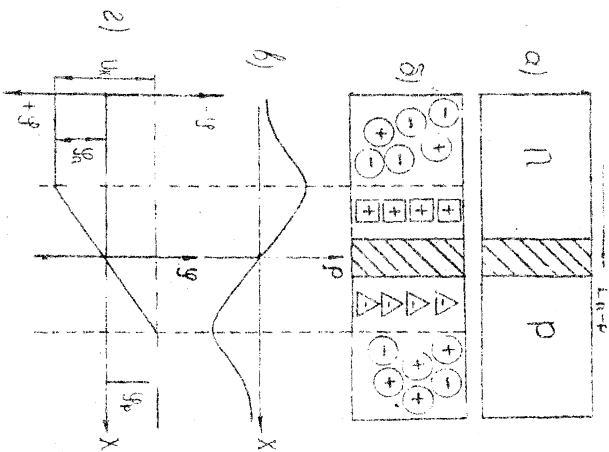


Рис. 10.

В результате в p -области возникает не скомпенсированный отрицательный заряд, а в n -области не скомпенсированный положительный (рис. 10в), где ρ - плотность заряда.

Потенциальный слой в p - области обедляется основными носителями-электронами, а потенциальный слой в n области обедляется дырками. Образованный двойной слой создает разность потенциалов и электрическое поле (вектор напряженности E_{n-p}).

$$U = \phi_n - \phi_p$$

На диаграмме (рис. 10г) изображено распределение потенциала вдоль оси X, перпендикулярной плоскости раздела двух полупроводников, за нулевой потенциал условно принят потенциал граничного слоя. Следует отметить, что объемные заряды разных знаков возникают вблизи границы n и p - областей, а потенциалы ϕ_n (положительный) и ϕ_p (отрицательный) будут одинаковыми по всей области p или n. В противном случае возник бы ток, в результате которого произошло бы выравнивание потенциала в данной области.

Образовавшийся потенциальный барьер называется контактной разностью потенциалов (внутреннее поле перехода).

Основным носителем это поле препятствует переходу через ЭДП, отталкивая их к периферии областей n и p. Зато не основные носители (дырки в области n и электроны p - области) движутся через ЭДП. Возникает дрейфовый ток не основных носителей. Другими словами диффузионный процесс, вызванный разностью концентраций основных носителей, уравновешивается внутренним полем перехода. Если не основные носители перешли через переход, то снижается контактная разность потенциалов, а это в свою очередь вызывает переход основных носителей в противоположном направлении. Устанавливается динамическое равновесие, при котором среднее значение тока через переход равно 0.

$$I_{диф} + I_{пр} = 0$$

Контактная разность потенциалов при этом имеет вполне определенную величину.

Так, для германия $\phi_p = 0,35$ в.

Если к p-n переходу приложено внешнее напряжение, то под его действием в цепи возникает электротермический ток. Как увидим ниже, характер токопроизводительности ЭДП и величина тока оказываются различными в зависимости от поларности приложенного напряжения. Поэтому, рассмотрим раздельно случаи, когда внешнее напряжение не совпадает по полярности с контактной разностью потенциалов, и случаи, когда их полярность одинакова.

а). Прямой ток.

Подложным положительный полюс внешнего источника к p - области, а отрицательный полюс к n - области (рис. 11). Токос напряжение называется прямым.

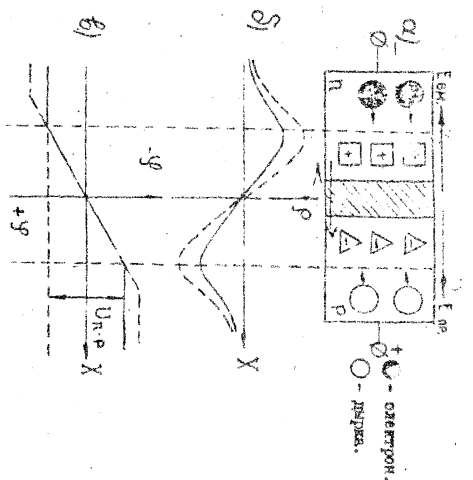


Рис. 11

Т.к. концентрация подвижных зарядов внутри ЭДП ниже, чем на периферии n и p областей, то сопротивляение ЭДП оказывается весьма большим. Поэтому внешнее напряжение почти полностью падает на переходе, а падение напряжения в остальных частях полупроводника настолько мало, что им можно пренебречь. Напряжение на переходе U_{p-n} будет меньше, чем при отсутствии внешнего напряжения $U_{вн}$

$$U_{p-n} = E_{p-n} - E_{внеш}$$

Т.к. внешнее поле направленно навстречу собственному полю перехода, то результирующее поле в переходе также уменьшается (рис 11б).

Высота потенциального барьера понижается и контактная разность потенциалов не будет уравновешивать силы диффузии. Возникает диффузионный ток основных носителей через ЭДП. Ток дрейфа при этом не изменяется, т.к. он зависит только от числа не основных носителей, проходящих через p-n переход из p и n областей. Если пренебречь падением напряжения на сопротивлении областей n и p то напряжение на переходе можно считать равным U_{p-n} (рис. 11в). Для сравнения на этом рисунке штриховой линией повторена потенциальная диаграмма при отсутствии внешнего напряжения $E_{внеш}$.

Другими словами в n - области свободные электроны отталкиваются отрицательным полюсом источника в сторону перехода. Они пересекут ЭДП и начнут заполнять дырки, которые подолжили к ЭДП под действием положительного полюса источника.

Нарушается равновесие между дрейфовым и диффузионным током. Дрейфовый ток становится меньше диффузионного и результирующий ток через переход не будет равен нулю.

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др} > 0$$

По мере увеличения внешнего напряжения результирующий ток через переход может возрасти до больших значений, т.к. концентрация носителей в ЭДП и возможный диффузионный ток - велики.

Ток протекающий через переход в этом случае называется прямым током. $I_{пр} = I_{диф} - I_{др}$ т.к. $I_{диф} > I_{др}$

Иногда напряжение противоположно по полярности контактной разности потенциалов на переходе и, следовательно, прикладывается поюсом к дырочной области и минусом к электронной. Диффузное проникновение дырок в p-область, а электронов в r-область, где они являются не основными носителями, называется инжекцией (внедрение, впрыскивание). Очевидно, что при некотором прямом напряжении можно вообще уничтожить потенциальный барьер в ЭДП. Тогда сопротивление перехода станет близким к нулю. Прямой ток возрастает и будет зависеть только от сопротивления p- и r-областей. Теперь уже этими сопротивлением пренебречь нельзя, т.к. они определяют силу тока.

Рассмотрим характер прямого тока в различных участках цепи (рис. 11а). Через ЭДП движутся основные носители обоих знаков образующие электронный I_n и дырочный I_p токи. По мере продвижения этих носителей от перехода, их концентрация падает из-за рекомбинации.

Глубина проникновения носителей зарядов оценивается диффузионной длиной L . Это расстояние, которое проходит носитель от его появления (инжекция) до исчезновения (рекомбинация).

Для германия: $L_n=0,1-0,3$ см; $L_p=0,07-0,2$ см
 Каждый носитель существует определенное время, характеризуемое временем жизни τ .

Для германия: $\tau_p \approx \tau_n \approx 1000$ мкс
 Полный прямой ток $I_{пр}$ в любом сечении один и тот же:

$$I_{пр} = I_n + I_p = const$$

На рис. 12 показано изменение этих токов вдоль оси X для случая когда $I_n > I_p$.

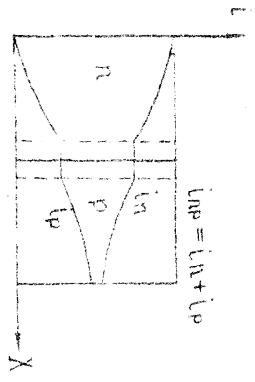


Рис. 12

При прямом напряжении кроме диффузионного тока есть еще ток дрейфа, вызванный не основными носителями. Но он мал и его можно не принимать во внимание.

б) Обратный ток

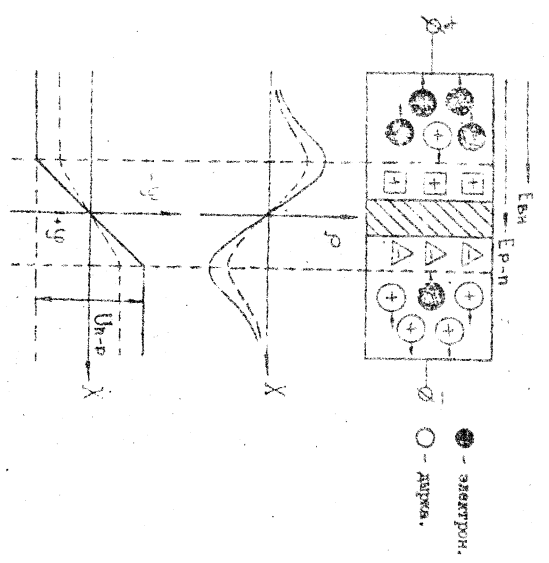


Рис. 13

Пусть внешнее напряжение совпадает по знаку с контактной разностью потенциалов (рис. 13). В этом случае напряжение возрастает и будет равным:

$$U_p - a = E_{n-p} + E_{внешн}$$

Собственное поле перехода и внешнее поле складываются, поэтому результирующая напряженность поля в переходе будет выше, чем при отсутствии внешнего поля (рис. 13 в).

Другими словами, свободные электроны в p-области и дырки в r-области устремятся к полюсам источника, что приведет к увеличению плотности зарядов в пограничном слое, его расширению и возрастанию потенциального барьера. Перемещение основных носителей через ЭДП прекратится, т.е. $I_{диф} = 0$.

Однако при этом увеличивается дрейфовый ток через переход, который становится больше диффузного, и результирующий ток через переход отличен от нуля.

$$I_{обр} = I_{др} - I_{диф} > 0$$

Но т.к. дрейфовый ток создается небольшим количеством не основных носителей, то величина его незначительна.

Ток, протекающий противоположно прямому току называется обратным, а напряжение вызывающее этот ток называется обратным напряжением. (Прохождение не основных носителей через ЭДП называется экстракцией (извлечение). Ток экстракции невелик, от приложенного напряжения почти не зависит, и является в этом смысле током насыщения.

На величину тока через переход может также влиять термическая генерация носителей в самом переходе. Появляющиеся при этом в переходе электроны и дырки отводятся электрическим полем, в результате общий ток через переход возрастает. Однако и эта компонента тока имеет небольшую величину.

Обратное напряжение совпадает с полнотью контактной разности потенциалов на переходе и, следовательно, прикладывается плюсом к p -области и минусом к n -области.

В заключение рассмотрим вольтамперную характеристику перехода. Переход представляет малое сопротивление для тока при прямом включении и большое сопротивление для тока при обратном включении, т.е. ЭПН обладает несимметричной проводимостью.

Как видно (рис. 14), величина обратного тока не зависит от величины приложенного напряжения, но до определенного предела.

Если превысить этот предел, то наступит пробой ЭПН. На использовании свойств p - n перехода основано применение полупроводниковых диодов и триодов.

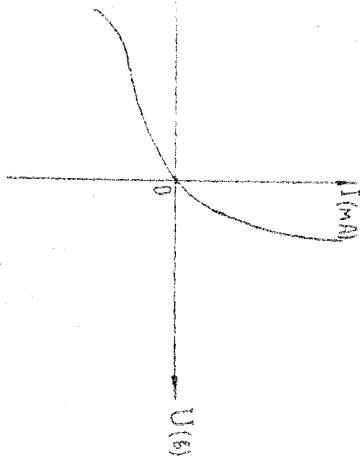


Рис. 14

Ток диффузии и ток дрейфа, генерации пар носителей к рекомбинации, изменение избыточной концентрации носителей во времени и пространные не исчерпывают всего многообразия сложных явлений, происходящих в полупроводниках, но они наиболее важны и, зная их, можно правильно понять работу полупроводниковых приборов.

§1.5. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Полупроводниковым диодом называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет электронно-дырочный переход. Основным материалом для изготовления диода служит германий и кремний.

В зависимости от способа получения перехода полупроводниковые диоды делятся на два типа: плоскостные и точечные.

а) Плоскостные (сплавные) диоды.

Схематическое устройство плоскостного диода изображено на рис. 15.

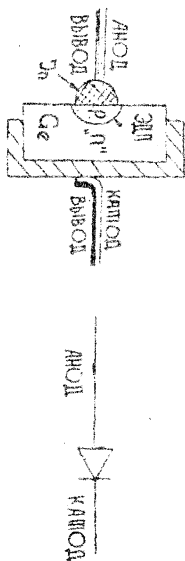


Рис. 15.

Основной частью диода является пластинка германия (кремния) с электронной проводимостью толщиной в несколько десятых долей миллиметра. Она помещена в герметичный металлический корпус и припаяна к нему одной из своих плоскостей.

В центр противоположной плоскости пластинки вплавляют индий (алюминий). Для германия индий (I_n), а для кремния алюминий (Al) являются акцепторными примесями.

В результате диффузии примеси в толщину пластинки в последней образуется область с дырочной проводимостью, а на границе между основной частью пластинки с электронной (n) проводимостью и зоной этой же пластинки с дырочной (p) проводимостью образуется плоский p - n переход (ЭПН).

Через него электрический ток проходит свободно в направлении от индиевого (алюминиевого) электрода к основной массе пластинки и плохо в обратном направлении. Следовательно, основная масса пластинки (область n) германия аналогична катоду, а область типа p - аналогична аноду обычного лампового диода.

Плоскостные диоды могут выдерживать большие (до 1000в) обратные напряжения и выпрямлять значительные по величине токи (до нескольких сотен ампер). Поэтому плоскостные диоды, иногда называемые силовыми, находят широкое применение в выпрямителях.

Одним из основных недостатков плоскостных диодов является их большая межэлектродная емкость (порядка 50пф), и поэтому они используются на частотах, обычно не превышающих 50 кГц.

б) Точечные диоды

Для работы на более высоких частотах применяются точечные полупроводниковые диоды, схематическое устройство которого приведено на рис. 16.

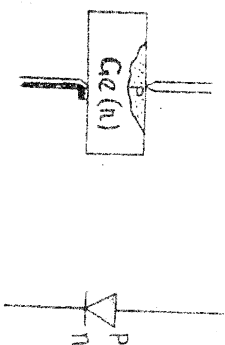


Рис. 16

Диод состоит из пластинки германия (область n) и контактного электрода вольфрамовой проволоочки.

Для получения ЭДП через контакт в прямом направлении продувается кратковременный импульс тока - электроформовка. ($I = 400 \text{ мА}$). В результате тонкий слой полупроводника, прилегающий к острю, приобретает дырочную проводимость, а на границе между этим слоем и основной пластинкой возникает ЭДП. Малая площадь контакта приводит к уменьшению емкости электронно-дырочного перехода, что позволяет использовать такие диоды на высоких и сверхвысоких частотах (до 600 МГц).

Но при малой площади контакта нельзя через диод пропустить большие токи и поэтому точечные диоды являются менее мощными, чем плоскостные, и не используются в выпрямителях, рассчитанных на большие напряжения и токи. Они обычно применяются в схемах радиоприемной и измерительной аппаратуры.

Таким образом, полупроводниковый диод состоит из двух областей с различными типами проводимостей: - область типа p - катод, - область типа n - анод.

Полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т.е. пропускает ток преимущественно в одном направлении и может быть использован для тех же целей, что и вакуумный диод.

Графическое изображение и маркировка полупроводниковых диодов

В соответствии с ГОСТ обозначения полупроводниковых диодов состоят из шести элементов.

Первый элемент (буква, или цифра) обозначает исходный материал: Г или I - германий, К или 2 - Кремний, А или 3 - соединения галлия. Если 1-й элемент содержит цифру, то диод работает при повышенной температуре (германиевый - до 70°C, кремниевый - до 120°C).

Второй элемент (буква) указывает тип диода:

Д - выпрямительные, универсальные, импульсные диоды;

Ц - выпрямительные столбы и блоки;

А - диоды С В Ч;

И - туннельные диоды;

В - варикапы;

П - излучающие диоды;

К - стабилизаторы тока и др.

Третий элемент - число, определяющее назначение и качественные свойства.

Четвертый элемент и пятый (цифры) обозначают порядковый номер разработки.

Шестой элемент (буквенный) - определяет разновидность прибора по технологическим признакам.

Примеры маркировки:

ГД12А - диод универсальный, германиевый, номер разработки 12, группа А.

АД902А - светодиод из соединений галлия, номер разработки 02, группа А.

Условные графические изображения полупроводниковых приборов приведены на рис. 17.

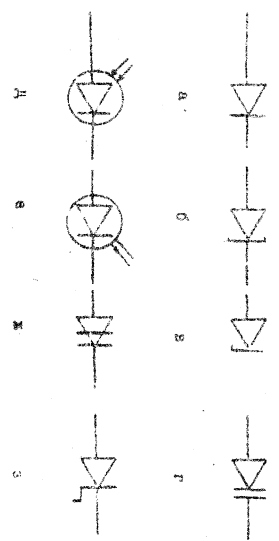


Рис. 17

а - диод, вентиль полупроводниковый, выпрямительный столб (общее обозначение); б - диод туннельный, в - стабилитрон; г - варикап. д - фотодиод; е - светодиод; ж - тристор диодный; з - тристор триодный.

§ 1-6. СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА

Графическая зависимость тока, протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к нему напряжения называется статической характеристикой полупроводникового диода.

Общий вид статической характеристики полупроводникового диода показан на рис. 18, а схема для его снятия -- на рис. 19.

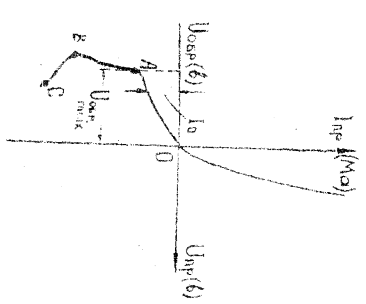


Рис. 18

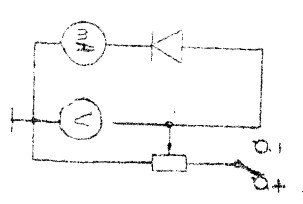


Рис. 19

Аналитическое выражение этой характеристики при комнатной температуре имеет вид:

$$I = I_0(e^{40U} - 1)$$

где I_0 - обратный ток насыщения, U - напряжение на диоде,

$$e = 2,718.$$

При $U > 0,05 \text{ в}$, когда диод включен в прямой направлении, ток протекающий через него, резко возрастает, т.е. из формулы видно, что e^{40U} для себя в диоду протеко-

жестко отрицательное напряжение, то $e^{-40V} \rightarrow 0$ и ток $I \rightarrow I_0$ т.е. обратный ток стремится к постоянному значению I_0 , которого зависит от типа полупроводникового диода.

Из статической характеристики диода можно определить ее особенности:

1. В области положительных значений напряжения на диоде прямой ток резко возрастает, т.е. крутизна характеристики значительно больше, чем у вакуумных диодов.

2. В области отрицательных значений напряжения через диод проходит небольшой ток (за счет несоединенных носителей), а у вакуумного диода обратный ветви нет.

3. Характеристика полупроводникового диода резко нелинейна. Дальнейшее увеличение обратного напряжения $U_{обр} > U_{обр\max}$ приводит к электрическому пробое ЭДП, при котором обратный ток резко увеличивается (участок АВ).

Электрический пробой ЭДП происходит за счет внутренней электростатической эмиссии и ударной ионизации атомов полупроводника. Сущность этого явления заключается в том, что под действием сильного электрического поля электроны могут освободиться из ковалентных связей и получить энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера в области ЭДП. Пройдя через переход и двигаясь с большой скоростью внутри полупроводника, электроны сталкиваются с атомами ионизируют их. В результате такой ударной ионизации появляются новые свободные электроны и дырки, которые в свою очередь, разгоняются полем и создают все возрастающее количество носителей тока. Этот процесс носит лавинообразный характер и приводит к резкому увеличению обратного тока. Таким образом, на переход можно подавать напряжение не больше, чем $U_{обр\max}$.

Если при электрическом пробое обеспечить теплоотвод от ЭДП, то может наступить тепловой пробой (участок ВС), при котором разрушится структура ЭДП и прибор выйдет из строя. Электрический пробой является обратным (разрушения структуры полупроводника не происходит) и ряд специальных диодов (стабилизаторный) работают на участке АВ. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима ЭДП, когда количество теплоты выделяющейся в переходе от вытравки его переменным током превышает количество теплоты, отводимой от перехода.

ПАРАМЕТРЫ ДИОДА

По статическим характеристикам можно определить статические параметры диода, основными из которых являются (рис. 20):

1. Сопротивление постоянному току R_0 . Оно определяется как отношение напряжения к току в данной точке характеристики:

$$R_0 = \frac{U}{I}$$

Во всеобщие нелинейности характеристики диода $R_{ср}$ (в прямом направлении) значительно меньше $R_{обр}$ (в обратном направлении)

$$R_{ср} = 100-300 \text{ Ом}$$

$$R_{обр} = 2+3 \text{ КОм.}$$

2. Внутреннее (дифференциальное) сопротивление R_i определяется как отношение приращения напряжения к вызванному им приращению тока:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

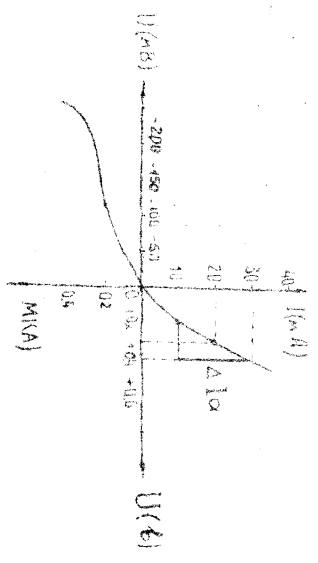


Рис. 20.

3. Крутизна характеристики $S = \frac{\Delta I}{\Delta U}$ величина, обратная внутреннему сопротивлению диода.

Чем больше крутизна S , тем меньше внутреннее сопротивление диода. С увеличением напряжения на диоде крутизна характеристики S растет, а внутреннее сопротивление падает.

4. Коэффициент выпрямления - это отношение прямого тока к обратному при определенном напряжении (обычно 1В).

$$K_{всп} = \frac{I_{пр} - I_{обр}}{I_{обр}} \approx 10^3 - 10^4$$

При эксплуатации полупроводниковых диодов наибольший интерес представляют следующие параметры:

1. Наибольший выпрямленный ток, не вызывающий порча диода при длительной эксплуатации - $I_{всп}$.
2. Наибольшая амплитуда обратного напряжения, не вызывающая пробоя при длительной эксплуатации - $U_{обр}$.
3. Деление постоянного напряжения на диоде при наибольшем выпрямленном токе - U_n .
4. Обратный ток при наибольшем обратном напряжении.

ПРИМЕР:

Тип диода	$I_{всп}$ (ма)	$U_{обр}$ (В)	U_n (в)	$I_{обр}$ (ма)
Д7Ж	300	400	0,3	300
Д9Ж	48	100	-	250

Известно, что температура сильно влияет на проводимость полупроводниковых приборов. Мощность, подводимая к переходу, определяется величиной обратного напряжения ($U_{обр}$) и обратным током ($I_{обр}$)

$$P_{отж} = U_{обр} \cdot I_{обр}$$

Эта мощность выделяется на переходе, температура ЭДП растет и вместе с ней растет концентрация носителей в переходе, т.е. возникает обратный ток.

Выделяющиеся в переходе тепло отводится от него за счет теплопроводности и тем лучше, чем ниже окружающая температура. В установившемся режиме выделяющаяся в р-п переходе мощность полностью излучается в окружающую среду.

При увеличении $U_{обр}$ не вся выделяющаяся мощность будет излучаться в пространство и начинает так называемый тепловой пробой р-п перехода, приводящий к разрушению диода за счет изменения структуры перехода.

Так как температура окружающей среды определяет температуру р-п перехода, то обратный и прямой ток также зависят от температуры окружающей среды.

Прямой ток незначительно меняется от температуры, а обратный — значительно. Кроме того, тепловой пробой при более низких температурах наступает при большем обратном напряжении и даже может не происходить при очень низких температурах. Характеристики диода при различных температурах имеют вид, показанный на рис. 21.

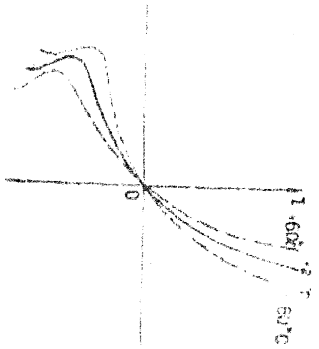


Рис. 21

Температура окружающей среды влияет на режим работы диода и может привести к тепловому пробую р-п перехода при напряжении на диоде

$$U_{обр} < U_{обр док}$$

Поэтому для стабилизации режима работы диода применяют для улучшения теплоотвода от диода (радиаторы, окна в каркасах для циркуляции воздуха, обдув и др.).

ЕМКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

ЭДП диода обладает емкостью, подобной емкости конденсатора, а роль диэлектрика выполняют ионизированные атомы донорно-акцепторной примеси. Эту емкость называют барьерной емкостью.

Барьерная емкость возрастает при увеличении площади р-п перехода, диэлектрической проницаемости полупроводника и уменьшении толщины запирающего слоя.

Особенность барьерной емкости состоит в том, что она является нелинейной, т.е. изменяется при изменении напряжения на переходе. Если обратное напряжение возрастает, то толщина запирающего слоя увеличивается, барьерная емкость уменьшается. Такая зависимость используется в специальных диодах — варикапах.

При прямом напряжении диод обладает также диффузионной емкостью, когда носители заряда в большом количестве диффундируют через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в п и р - областях. Эта емкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удается, т.к. она зашунтирована малым прямым сопротивлением самого диода. График зависимости этих емкостей от приложенного напряжения называется вольт-фарадной характеристикой диода $S=f(U)$ и будет приведен в следующем параграфе.

§1-7 ТИПЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Полупроводниковые диоды по своему назначению подразделяются на следующие типы:

1. Выпрямительные (низкочастотные).
2. Преобразовательные (детекторные) ВЧ в СВЧ.
3. Специальные:
 - стабилитроны,
 - варикапы,
 - туннельные и др.

ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока, низкой частоты. Предельная рабочая частота, выпрямительных диодов обычно не превышает 50 кГц. Конструктивно она выполняется в виде плоскостных диодов из германия или кремния.

Такие диоды, имея площадь р-п. перехода значительно большую чем точечные, допускают прохождение больших токов до 50 а и более при допустимом обратном напряжении до 1000В.

Следует отметить, плоскостные диоды имеют большую емкость перехода, которая не позволяет использовать их на высоких частотах.

Схема однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде изображена на рис. 22.

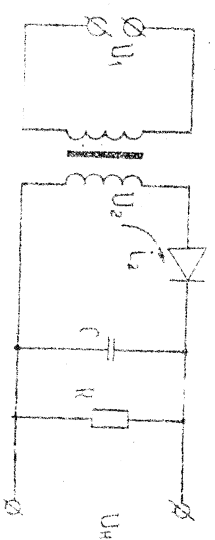


Рис. 22

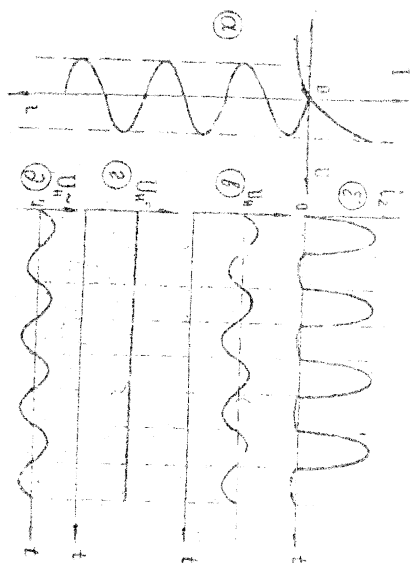


Рис. 23

На вторичной обмотке трансформатора будет действовать переменное напряжение U_2 . Так как последовательно с этой обмоткой включен нелинейный элемент (диод), то в цепи будет протекать ток I_2 , только за время положительных полупериодов. За время отрицательных полупериодов в этой цепи будет протекать обратный ток, величина которого незначительна и поэтому в дальнейшем мы им пренебрегаем. Ток I_2 протекает через сопротивление R за время положительных полупериодов U_2 , выделяется на нем напряжение и одновременно зарядом конденсатор C до максимальной величины U_{max} . Так как за время отсутствия тока I_2 (отрицательный полупериод U_2) напряжение на сопротивлении R равно нулю, то за этот промежуток времени конденсатор C будет разряжаться и поддерживать напряжение на сопротивлении R . Величина конденсатора C выбирается большой и за отрицательный полупериод U_2 он не успевает разрядиться, поэтому след напряжения будет незначительным.

Полученное на сопротивлении R напряжение в своем составе имеет постоянную составляющую U_n и переменную составляющую U_{ac} . Постоянное напряжение U_n через фильтр подается на потребителя постоянного тока.

Таким образом, подавая на вход схемы переменное напряжение U_1 , на выходе получаем постоянное напряжение. Данная схема, является однополупериодной схемой выпрямления.

Если необходимо выпрямить большой ток, то вместо одного диода включают два или несколько диодов параллельно, причем, для выравнивания токов в диодах последовательно с каждым включают сопротивление (рис. 24).

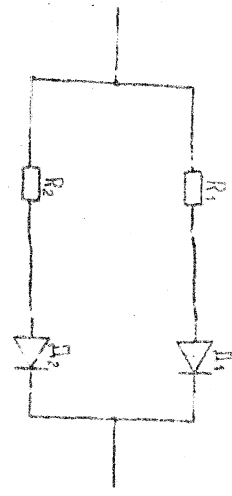


Рис.24

Если же необходимо выпрямить большое напряжение, вместо одного диода включают последовательно несколько, причем каждый из диодов нагружается сопротивлением для выравнивания напряжения на диодах (рис.25).

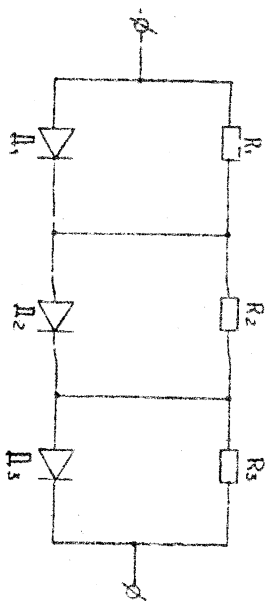


Рис.25

К выпрямительным диодам относятся Д7 (А-Ж), Д302-305, Д1601-1003А) - германиевые, ДК202-226) - кремниевые, и др.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Высокочастотные ($f=50-1000$ МГц) и сверхвысокочастотные (>1000 МГц) диоды используются в различных преобразовательных схемах. Обычно эти диоды изготавливаются из германия или кремния только гочечной конструкции. Они имеют очень малую емкость р-п перехода за счет малой поверхности контакта. Уменьшение площади контакта перехода приводит к уменьшению выпрямленного тока и уменьшению величин обратного напряжения.

- Примеры ВЧ и СВЧ диодов:
- кремниевые: ВЧД-101-103, Д-104-106
 - германиевые: Д9а - ж, Д2А - и, Д10А - б, Д - 14А
- СВЧ ДК-С1, ДК - 41, ДТ-С1, Д-401, ДК-42 и т.д.

При определенной величине обратного напряжения (точка А рис. 26) в диоде наблюдается лавиннообразное увеличение неосновных носителей тока, которое приводит к быстрому росту тока через ЭДП. Такое резкое увеличение обратного тока при незначительном увеличении обратного напряжения называется электрическим пробоем ЭДП. Следует отметить, что на участке АВ (рис. 26) при значительном изменении тока I_0 протекающем через диод, напряжение меняется на небольшую величину ΔU .

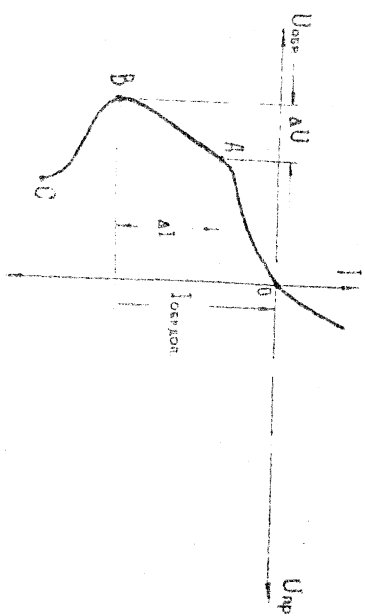


Рис. 26

Если же напряжение увеличивать и далее, то наступает тепловой пробой, кривая ВС.

Явление электрического пробоя используется в приборах, называемых стабилитронами или овервольтами диодами. Они используются для стабилизации напряжения. Стабилизация напряжения - это поддержание напряжения на нагрузке постоянным при изменении напряжения источника питания E .

Для стабилизации напряжения на нагрузке в схемах используют опорные диоды, которые представляют собой кремниевые плоскостные диоды ($I_0 - 818$ и др.).

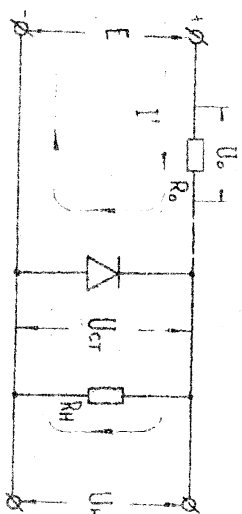


Рис. 27

Нагрузка R_n включена параллельно стабилитрону, в неравновесную часть цепи, если включено ограничительное сопротивление R_0 . Для установления и поддержания правильного режима стабилизации сопротивление R_0 должно быть определенной величи-

чины. Его выбирают таким, чтобы рабочая точка C' была посредине рабочего участка АВ (рис. 28).

Согласно второму закону Кирхгофа напряжение на стабилитроне будет равно напряжению на нагрузке:

В режиме стабилизации напряжение на стабилитроне и, следовательно, на нагрузке остается почти постоянным. Все изменения напряжения источника E при его незначительности поглощаются ограничительным сопротивлением.

Процесс стабилизации напряжения на нагрузке U_n рассмотрим с помощью рис. 28.

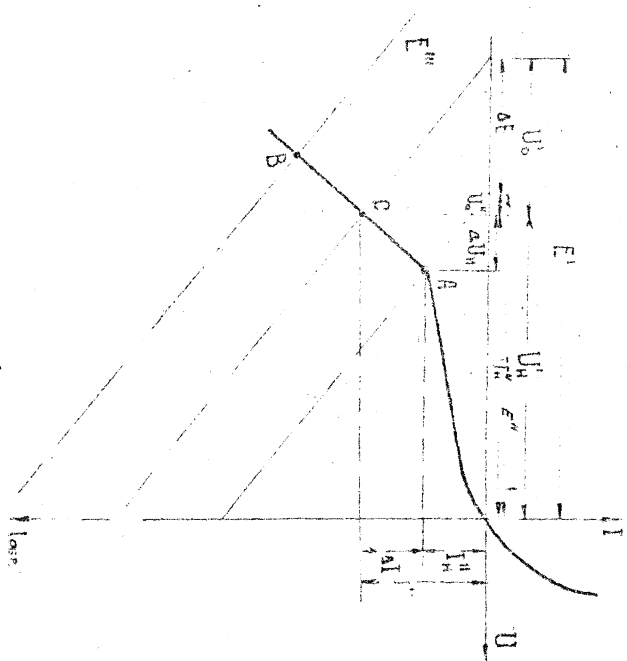


Рис. 28

Пусть напряжение источника равно E' , тогда через сопротивление R_0 будет протекать ток I' (на характеристике точка С). Напряжение источника выдвинется на сопротивление R_0 ($U'_0 = I'R_0$) и на диоде $U'_n = U_{cr}$. Предположим, что уменьшилось напряжение источника питания на величину $\Delta E'$ и стало равным E'' . Уменьшение E' привело к тому, что ток, протекающий через диод уменьшится и станет равным I'' (точка А).

Напряжение на R_0 уменьшится до величины $U''_0 = I''R_0$, а на диоде останется практически неизменным (изменится на ΔU_n). Очевидно, что изменение напряжения источника питания на значительную величину $\Delta E'$ привело к незначительному изменению напряжения на нагрузке ΔU_n . Это и есть стабилизация напряжения на нагрузке.

Аналогично будет если напряжение источника питания $E = \text{const}$, а меняться будет сопротивление нагрузки. Следует иметь в виду, что на рис. 28 участок характеристики АВ приведен с большим наклоном для лучшей наглядности. Практически же этот участок почти вертикален и поэтому ΔU_n стремится к нулю.

Полупроводниковую р-п структуру можно представить как электрический конденсатор, обкладками которого служат область р и область п, а диэлектриком ЭДП. Практически не имеющий подвижных зарядов.

Если к диоду приложено отрицательное (обратное) напряжение, то с увеличением обратного напряжения ширина ЭДП увеличивается (за счет расширения контированных областей донорных и акцепторных примесей). Это равносильно тому, что обкладки конденсатора раздвигаются, и емкость ЭДП уменьшается.

График зависимости емкости ЭДП от приложенного к нему напряжения изображен на рис. 29, а эквивалентная схема ЭДП на рис. 30.

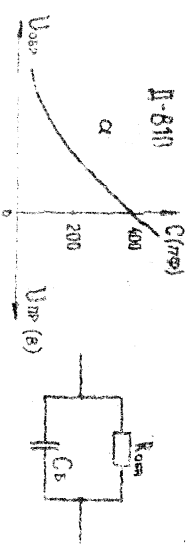


Рис. 29

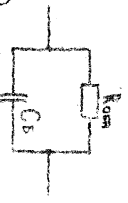


Рис. 30

Если же к диоду приложить положительное (прямое) напряжение, то с изменением этого напряжения емкость ЭДП также будет меняться (рис.29), но в этом случае диод будет иметь очень малое сопротивление $R_{пр}$, подключенное к емкости ЭДП, что значительно ухудшает добротность системы.

Зависимость емкости ЭДП от приложенного к нему напряжения используется в полупроводниковых приборах, называемых варикапами. Обычно используется не вся часть характеристики т.к. $R_{пр}$ велико и не индустрирует барьерную емкость C_b .

Варикап представляет собой электрический конденсатор, емкость которого управляется применением к нему напряжения.

Варикапы применяются для электронной настройки колебательных контуров. На рис. 31 показана простейшая схема включения варикапа в колебательный контур.

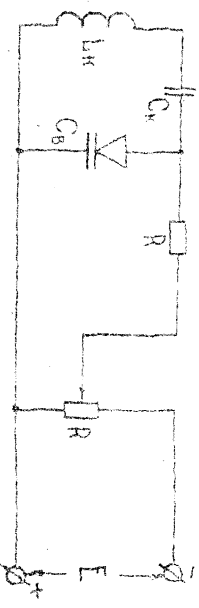


Рис. 31

Изменяя потенциометром обратное напряжение на варикапе, можно изменить резонансную частоту контура.

Малая инерционность перестройки, малые габариты, прибора делают его перспективным для частотной модуляции, автоматической подстройки частоты и т.д. Из-

готавливают варикапы из кремния, где можно получить малый обратный ток, т.е. большое $R_{пр}$, что увеличивает добротность конденсатора. Отечественной промышленностью выпускаются варикапы типа Д810, Д901 и др.

ТУННЕЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

В туннельном диоде п и р - области имеют большую концентрацию примесных атомов ($10^{19} - 10^{20}$) / см³.

За счет этого ширина перехода получается в сотни раз меньше, чем у обычного диода. При таком узком слое электрон, не обладающий энергией для преодоления потенциального барьера, может перейти через него, не затрачивая на это энергию. Такое прохождение электроном получило название туннельного эффекта.

Это обуславливает отличие характеристики туннельного диода от обычного (рис. 32).

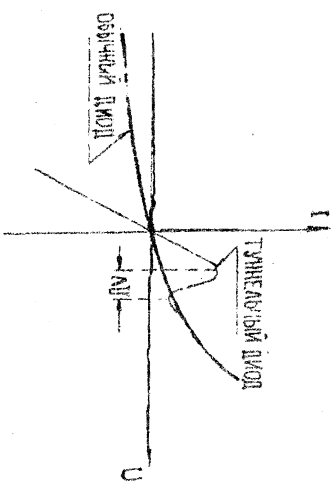


Рис. 32

При увеличении напряжения ток сначала растет, достигая максимума, а затем уменьшается до минимального значения и снова увеличивается. Специфической особенностью характеристики является падающий участок, где положительному приращению ΔU соответствует отрицательное приращение тока. Т.е. изменение тока и напряжения противофазны и внутреннее сопротивление падающего участка имеет отрицательный знак. Если за счет источника постоянного напряжения обеспечить работу диода на падающем участке и ввести в схему переменное напряжение (рис. 33), то мгновенная мощность переменного тока будет отрицательна, т.е. диод не поглощает, а отдает энергию переменного тока (преобразуя в нее энергию постоянного тока).

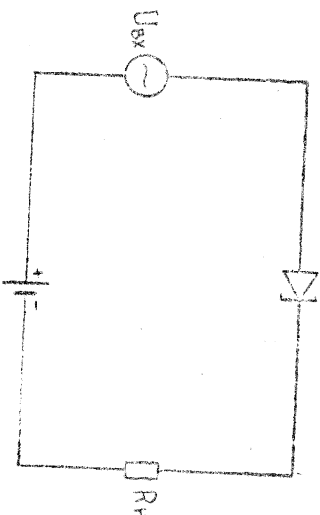


Рис. 33

Это позволяет использовать туннельный диод для генерации и усиления колебаний, преобразования сигналов и переключения.

Особенности туннельного диода:

- Малый уровень шумов.
- Малое потребление мощности.
- Устойчивость к ядерному излучению.
- Малый вес и габариты.
- Малая инерционность, что позволяет использовать их на СВЧ.

ГЛАВА II. ТРАНЗИСТОРЫ

§2-1. Устройство и маркировка транзисторов

Транзистором называется преобразовательный полупроводниковый прибор, имеющий не менее трех выводов, пригодный для усиления мощности.

Наиболее распространённые транзисторы имеют два электрически взаимодействующих ЭДП. В них используются носители заряда обеих полярностей и поэтому такие транзисторы называются биполярными.

В соответствии с ГОСТ 10862-72 транзисторам присваиваются обозначения из шести элементов:

Первый элемент – буква или цифра, обозначающая исходный материал: Г (1) – германий, К (2) – кремний, А (3) – соединение галлия.

Второй элемент – буква, указывающая класс прибора: Т – транзисторы биполярные, П – транзисторы полевые.

Третий элемент – цифра, определяющая назначение и качественные показатели прибора:

Транзисторы малой мощности (Р 0,3 Вт)	1	2	3
Транзисторы средней мощности (Р 1,6 Вт)	4	5	6
Транзисторы большой мощности (Р 1,5 Вт)	7	8	9

Четвертый и пятый элементы – цифры (от 01 до 99), определяющие номер разработки прибора.

Шестой элемент – буква (от А до Я), определяющая технологию производства.

ПРИМЕР

- а) 1Г - 109Д - германиевый транзистор маломощный, низкочастотный, номер разработки 09, группа Д.
 - б) 2Т - 803А - кремниевый среднечастотный транзистор большой мощности, номер разработки 03, группа А.
- Условные графические обозначения транзисторов изображены на рис. 2-1.

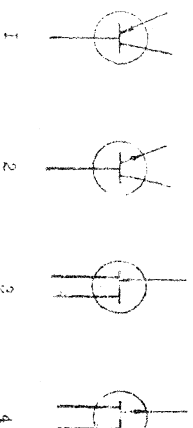


Рис.2-1

- 1 - транзистор типа р-п-р,
- 2 - транзистор типа п-р-п,
- 3 - полевой транзистор с каналом п - типа,
- 4 - полевой транзистор с каналом р - типа.

Основное назначение транзистора - усиление и генерирование электрических колебаний. Полупроводниковая структура транзистора представляет собой два сплавных или диффузионных ЭДП в монокристалле.

Крайние области транзистора обладают проводимостью одноименного типа, промежуточной проводимости средней области.

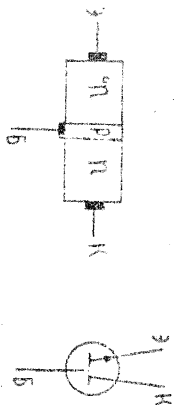


Рис. 2-2

Если крайние области обладают электронной проводимостью, а средняя - дырочной (рис. 2-2), то такой транзистор называется транзистором типа n-p-n. Если крайние области обладают дырочной проводимостью, а средняя электронной, то транзистор называется транзистором типа p-p-p (рис. 2-3).

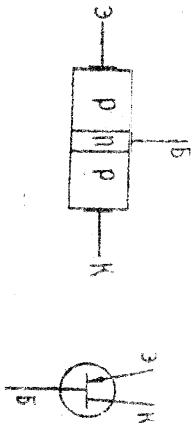


Рис. 2-3

Стрелки показывают направление тока, совпадающее с направлением движения дырок и противоположное направлению движения электронов.

Каждая область транзистора имеет определенную концентрацию примесей и в зависимости от этого выполняет определенную функцию.

Одна из крайних областей, имеющая повышенную концентрацию примесей, называется эмиттером. Его название состоит в инжектировании носителей в среднюю область, где они являются не основными.

Другой крайний слой называется коллектором. Он служит для собирания носителей, прошедших среднюю область.

Средняя область называется базой. Она управляет величиной коллекторного тока. Концентрация примесей в базе незначительна (в сотни раз меньше, чем в эмиттере) и толщина базы очень мала. Это является важнейшим условием работы транзистора. Таким образом в транзисторе имеется два ЭДП: эмиттерный, образованный областями эмиттер-база, и коллекторный, образованный областями база-коллектор. Наиболее часто, ЭДП получают методом сплавления. На пластинку германия типа - p толще германия образуются два слоя с проводимостью типа - p, представляющие собой эмиттер и коллектор транзистора.

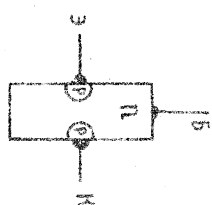


Рис. 2-4

Аналогичное устройство имеет транзистор типа p-p-n. В нем на пластину германия типа - p наплачивается донорное вещество, в результате чего образуются два слоя с проводимостью типа - n.

Таким образом, если провести сравнение транзистора с вакуумным триодом, то можно отметить, что электроды транзистора и электроды вакуумного триода выполняют аналогичные функции: анод - коллектор, сетка - база, катод - эмиттер.

§2-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИСТОРА

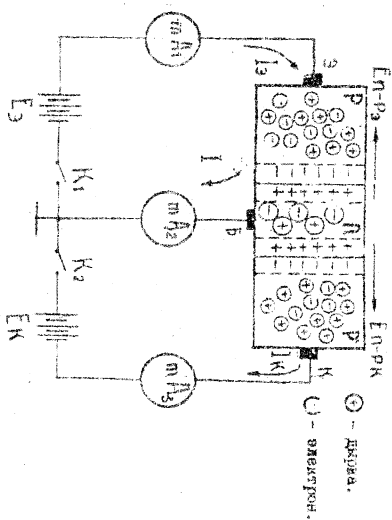


Рис. 2-5

Для нормальной работы транзистора на эмиттерный переход подается прямое напряжение E_3 , на коллекторный - обратное E_1 . В схемах с транзисторами, выделяют две цепи: входная, или управляющая, цепь (участок эмиттер-база) служит для управления работой транзистора. В выходной, или управляемой, цепи получают усиленные колебания (участок коллектор-база).

Рассмотрим физические процессы (рис. 2-5).

1. Замкнем ключ K_1 , а ключ K_2 - разомкнем. За счет прямого напряжения E_3 , через эмиттерный переход будет протекать ток базы I_b , который обеспечивается направлением движением основных носителей: дырок из эмиттера в базу и электронов - из базы в эмиттер. Путь тока I_b .

Хотя это прямой ток, по величине он мал, ибо по объему база мала и концентрация электронов в ней (основных для базы носителей) небольшая. Эмиттер же имеет потенциально высокую возможность обеспечить значительно больший ток. Вольт-амперная характеристика эмиттерного перехода представляет собой характеристику диода при прямом токе.

2. Замкнем ключ K_2 при разомкнутом K_1 . В этом случае за счет обратного напряжения E_{cb} через коллекторный переход будет протекать обратный коллекторный ток I_{co} :

$$+E_c \rightarrow K_2 \rightarrow MA_2 \rightarrow B \rightarrow K \rightarrow MA_1 \rightarrow -E_c$$

Этот ток создается движением неосновных носителей: дырок — из базы в коллектор и электронов — из коллектора в базу. Вольт-амперная характеристика перехода подобна характеристике диода при обратном токе.

Так как концентрация неосновных носителей мала, то величина тока I_{co} незначительна. Он иногда называется тепловым током или неуправляемым, т.к. его величина зависит от температуры.

3. Замкнем оба ключа.

Под воздействием прямого напряжения E_c на эмиттерном переходе в область базы вырываются дырки, образуя во входной цепи эмиттерный ток I_e , который протекает через миллиамперметр MA_1 .

Т.к. толщина базы мала и концентрация электронов в ней невелика, то большинство дырок, пройдя через базу, не успевают рекомбинировать с электронами базы. Лишь небольшая часть дырок рекомбинирует в базе с электронами. В результате этого в ней возникает ток базы I_b , протекающий в проводе базы через MA_2 .

Вследствии рекомбинации каждую секунду сколько-то электронов исчезает в базе, нарушая ее электрическую нейтральность. Восстановление нейтральности происходит за счет поступления электронов из отрицательного полюса источника E_c . Иначе говоря, в базе не может накапливаться много дырок. Если некоторое число инжектированных в базу из эмиттера дырок рекомбинирует с электронами, то точно такое же количество электронов должно поступать в базу от источника в виде базового тока. Остальная (порядку большая) часть дырок на участвует в рекомбинации и перемещается под действием коллекторного перехода E_{cb} в область коллектора, образуя так называемый управляемый коллекторный ток I_{co} , протекающий через MA_2 . Таким образом, в транзисторе всегда существуют три тока:

1. Ток эмиттера I_e , образованный перемещением дырок из эмиттера в базу.
2. Ток базы I_b , обратный за счет рекомбинации этих дырок с небольшим количеством электронов базы.
3. Ток коллектора I_c , состоящий из управляемого тока I_{co} и неуправляемого тока I_{co} .

$$I_c = I_{co} + I_{co} \approx I_{co} \text{ т.к. } I_{co} \gg I_{co}$$

Между этими тремя токами в соответствии с первым законом Кирхгофа всегда существует соотношение:

$$I_c = I_e + I_b$$

Ток базы является вредным. Желательно, чтобы он был как можно меньше. Обычно I_b составляет проценты тока I_e , т.е. $I_b \ll I_e$, но можно считать $I_b \ll I_e$. Иначе

для того, чтобы ток I_b был как можно меньше, базу делают тонкой и уменьшают в ней концентрацию примесей. Тогда меньшее число дырок будет рекомбинировать в базе с электронами. Важным свойством транзистора является линейная зависимость между его токами, т.е. все токи изменяются пропорционально друг другу.

Пусть $I_e = 10$ мА; $I_b = 9,5$ мА; $I_c = 0,5$ мА. Если I_e увеличится, например на 20% и станет равным $I_e = 12$ мА, то остальные токи также возрастут на 20%:

$$I_b = 0,5 + 0,1 = 0,6 \text{ мА} \\ I_c = 9,5 + 1,9 = 11,4 \text{ мА}$$

Это подтверждает справедливость равенства $I_c = I_e + I_b = 11,4 + 0,6 = 12$ мА.

Принцип действия транзистора типа п-р-п не отличается от рассмотренного типа р-п-р, только в области базы выводится из эмиттера не дырки, а электроны. Для таких транзисторов полярность напряжений E_c и E_b должна быть противоположна той, которая показана на рис.2-5. Направление токов также изменится на противоположное, т.к. они обусловлены в данном случае не дырочной, а электронной проводимостью.

§2-3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНЗИСТОРА

Для анализа работы транзистора используются его эквивалентными схемами. Транзистор в них рассматривается как устройство, имеющее два входных и два выходных зажима (рис.2-6а) и обладающее способностью усиливать мощность подводимых к нему колебаний. Такое устройство получило название активного четырехполюсника.

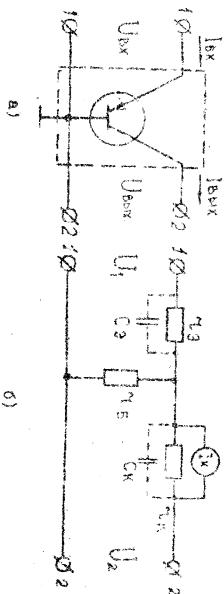


Рис.2-6

Транзистор имеет только три вывода (эмиттер, база, коллектор), поэтому один из них является общим, для целей входа и выхода, что соответствует трем возможным схемам включения транзистора.

Эмиттерный и коллекторный переходы, также как и тонкий слой базы, обладают некоторым сопротивлением r_e , — десятки Ом, r_b — сотни Ом, а r_c — сотни тысяч Ом.

Поэтому ясно, что, подключив ко входу такой схемы (зажимы 1-1) источник входного сигнала, мы создадим в сопротивлении r_e — и в нагрузке, подключенной к выходным зажимам 2-2, значительно меньший ток, чем ток в сопротивлении r_e и в цепи базы. Такой режим не соответствует реальным условиям работы транзистора, обладающего усилительными свойствами. В действительности, через сопротивление, нагрузки проходит ток $I_c \approx I_e$, поэтому необходимо изменить распределение тока между ветвями эквивалентной схемы. Это можно сделать, подключив параллельно со-

протяжении t_K в эквивалентной схеме дополнительный генератор, вырабатывающий ток $I_0 = \alpha I_1$ (рис. 2-6б), где α - коэффициент усиления по току:

$$\alpha = \frac{I_0}{I_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_1}$$

Сопротивления r_1, r_2, r_3 входные в эквивалентную схему, и коэффициент усиления по току α получают название первичных параметров транзистора. Эти параметры характеризуют электрические свойства транзистора независимо от схемы его включения.

Помимо первичных параметров, транзисторы характеризуются вторичными параметрами, которые для разных схем включения имеют различные значения. Вторичные параметры характеризуют связь между переменными составляющими напряжений и токов на входе и выходе транзистора.

Наиболее часто используются вторичные параметры, имеющие размерность сопротивлений и проводимостей и получившие название h -параметров. К ним относятся:

1. Входное сопротивление

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}, \text{ при } U_{вых} = \text{const.}$$

2. Коэффициент обратной связи

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вых}}, \text{ при } I_{вх} = \text{const.}$$

Эти параметры определяются по входным статическим характеристикам.

3. Коэффициент усиления по току

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}, \text{ при } U_{вых} = \text{const.}$$

4. Выходная проводимость

$$h_{22} = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta U_{вых}}, \text{ при } I_{вх} = \text{const.}$$

Параметры h_{11}, h_{22} определяются по выходным статическим характеристикам.

В паспортах транзисторов указываются и другие параметры. Наиболее важными из них являются:

а) $I_{с0}$ - обратный ток коллектора.

б) $P_{к}$ - допустимая мощность, рассеиваемая коллектором.

Этот параметр определяет принадлежность к той или иной группе. Маломощные транзисторы - $P_{к} < 0,25$ Вт. Средней мощности $P_{к} = 0,5$ Вт. Большой мощности $P_{к} > 1$ Вт. Мощность, рассеиваемая коллектором, превращается в тепло, т.е. бесполезно расходуется. При незначительном теплоотводе резистор коллекторного перехода может привести к резкому увеличению тока. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию мощности, рассеиваемой на коллекторе, и к еще большему нагреву коллекторного перехода. Процесс приобретает лавинообразный характер, и транзистор необратимо выходит из строя. Следует учитывать, что повышение температуры окружающей среды снижает $P_{к}$. Поэтому необходимо следить за режимом работы транзистора, исключая внешний нагрев прибора, особенно работающего при повышенных мощностях.

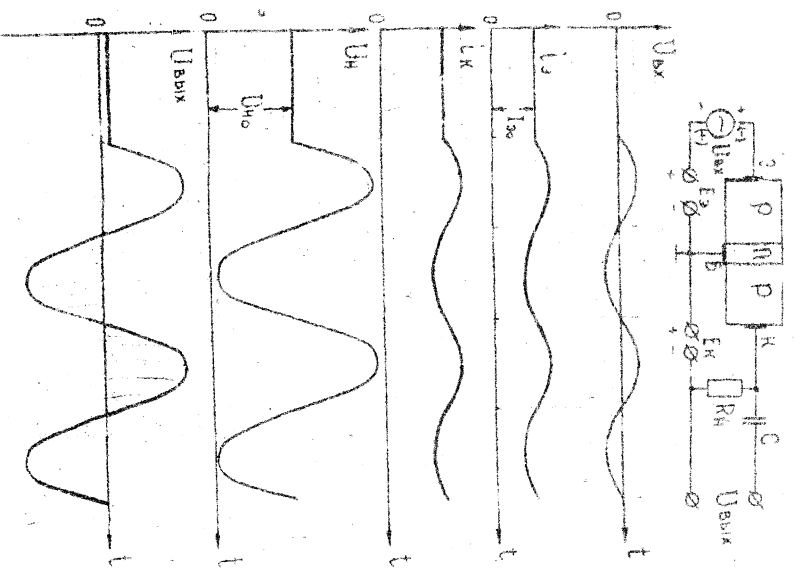


Рис. 2-5

§2.4. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ТРАНЗИСТОРА

Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано на зависимости тока коллектора от величины напряжения, приложенного к участку эмиттер-база.

На рис. 2-5 изображена схема усилительного каскада с транзистором типа р-п-р и трафика, выполняющие работу усилителя.

Входное напряжение $U_{вх}$, которое необходимо усилить, подается на участок эмиттер-база. Сюда же подано положительное смещение от источника E_0 , являющееся прямым для эмиттерного перехода. Цепь коллектора питается от источника $E_к$. Для получения усиленного напряжения в эту цепь включена нагрузка $R_н$.

При отсутствии переменного напряжения $U_{вх}$ в цепи эмиттера протекает ток I_0 , а в цепи коллектора - ток I_0 , почти равный по величине току I_0 . Проходя по сопротивлению нагрузки $R_н$, включенному в цепь коллектора, ток $I_к$ создает на нем падение напряжения $U_{кн} = I_к R_н$.

При подаче на вход транзистора последовательно с напряжением E_0 переменного напряжения $U_{вх}$ эмиттерный ток становится пульсирующим. При этом будет изме-

дятся количество дырок, вводимых из эмиттера в базу, а следовательно, и ток I_{κ} в цепи коллектора. Этот ток, проходя по сопротивлению нагрузки R_{κ} , создает на нем увеличенное напряжение, повторяемое по форме входной сигнал.

Для расмотрения усиительных свойств транзистора используем упрощенную эквивалентную схему коллекторной цепи транзистора по постоянному току (рис.2-6).

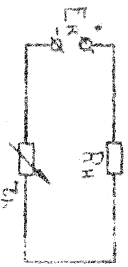


Рис. 2-6.

Из схемы видно, что напряжение источника E_{κ} делится между сопротивлением нагрузки R_{κ} и внутренним сопротивлением r_e транзистора (в основном сопротивлением коллекторного перехода).

Под действием переменного напряжения сигнала $U_{вх}$ ток эмиттера начнет изменяться. Это вызовет соответствующие изменения тока коллектора, который создается носителем заряда эмиттера.

При прохождении тока через коллекторный переход его сопротивление будет изменяться чем больше ток I_{κ} , тем меньше становится сопротивление r_e , и наоборот. Напряжение источника E_{κ} при этом будет перераспределяться между R_{κ} и r_e . Так как R_{κ} имеет большую величину (порядка нескольких кОм), то это позволяет получить напряжение $U_{вых}$ во много раз превышающее напряжение $U_{вх}$. Таким образом, усиление напряжения с помощью транзистора происходит за счет энергии источника питания. Сам транзистор выполняет функцию своеобразного регулятора, который под воздействием слабого входного сигнала, введенного в цепь с малым сопротивлением, изменяет ток в выходной цепи, обладающей большим сопротивлением.

Число, показывающее, во сколько раз переменное напряжение на выходе усилителя превышает напряжение сигнала на входе, называется коэффициентом усиления по напряжению.

$$K_{\Pi} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{I_{\kappa} \cdot R_{\kappa}}{I_{\kappa} \cdot r_e} \approx \frac{R_{\kappa}}{r_e}$$

Следовательно коэффициент усиления по напряжению равен отношению сопротивления нагрузки в цепи коллектора к сопротивлению цепи эмиттера. Поэтому полупроводниковые триоды называют транзисторами, т.е. трансформаторами сопротивлений.

Другим основным показателем, характеризующим усилительные свойства транзистора, является коэффициент усиления по току, представляющий собой отношение приращения выходного тока к вызвавшему его приращению входного тока:

$$K_I = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}}$$

Это величина зависит от схемы включения транзистора (см. § 2-5).

§ 2-5. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Транзистор может быть включен в усилительный каскад тремя различными способами:

- по схеме с общей базой - ТОБ (рис.2-7а);
- по схеме с общим эмиттером - ТОЭ (рис.2-7б);
- по схеме с общим коллектором - ТОК (рис.2-7в).

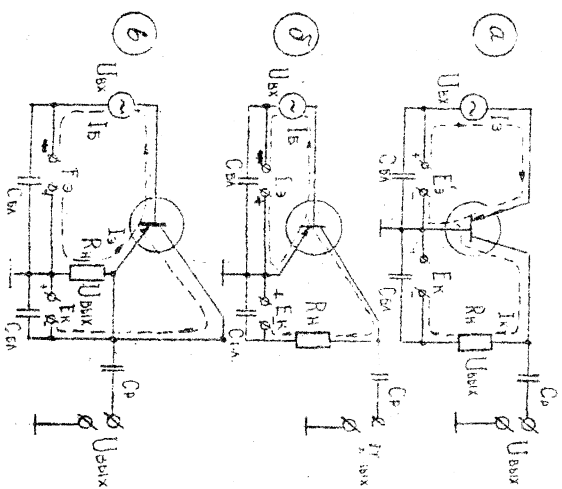


Рис. 2-7

Такая терминология указывает, какой из электродов — транзистора является общим для входной и выходной цепей. Иногда эти схемы называют соответственно схемами с заземленными базой, эмиттером, коллектором, поскольку общая точка обычно заземляется с корпусом устройства.

В усилительных каскадах протекают переменные и постоянные токи, а на электродах транзистора действуют постоянные и переменные напряжения. В рассматриваемых схемах наибольший интерес представляют нормальные входные и выходные токи ($I_{вх}$, $I_{вых}$) и напряжения ($U_{вх}$, $U_{вых}$), определяющие способ включения транзистора в электрическую схему. Входная цепь включает источник входного (усиливаемого) напряжения $U_{вх}$, под действием которого возникает ток $I_{вх}$. Выходная цепь включает сопротивление нагрузки $R_{н}$, через которую проходит ток $I_{вых}$ и на котором выделяется усиленное напряжение $U_{вых}$. При определении пути переменного тока следует исходить из того, что для рассматриваемых частот входного сигнала $U_{вх}$, реактивные сопротивления конденсаторов схемы ничтожно малы.

$$X_{С\text{от}} = X_{С\text{р}} \approx 0$$

Одним из основных параметров транзистора является коэффициент усиления по току (§ 2-4):

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$$

Определим его для любой схемы включения транзистора.

а) Схема с общей базой (рис. 2-7а).

В этой схеме входной сигнал $U_{\text{вх}}$ прикладывается к электродам эмиттер-база, а выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается с сопротивлений $R_{\text{вх}}$, которое включено к участку эмиттер-коллектор, т.е.

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}; U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}.$$

Во входной цепи действует ток эмиттера $I_{\text{э}}$, а в выходной протекает коллекторный ток $I_{\text{к}}$, т.е.

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{э}}; I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}.$$

Коэффициент усиления по току схемы ТОб (α):

$$\alpha = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{к}} + I_{\text{б}}}; \alpha < 1.$$

Таким образом, схема ТОб усиления по току не даст. У отечественных транзисторов различного типа $\alpha=0,9-0,99$.

б) Схема с общим эмиттером (рис. 2-7б).

В этой схеме входной сигнал прикладывается к участку эмиттер-база, а выходное напряжение снимается с сопротивления $R_{\text{вх}}$, которое включено между коллектором и эмиттером, т.е.

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}; U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}.$$

Особенностью схемы является то, что входным током является малый по величине ток базы $I_{\text{б}}$, а в выходной цепи протекает ток коллектора $I_{\text{к}}$.

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}; I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}.$$

Коэффициент усиления схемы ТОб по току (β):

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}} = \frac{I_{\text{к}}/I_{\text{э}}}{1 - I_{\text{к}}/I_{\text{э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Если, например $\alpha=0,93$, то $\beta=49$.

Большой коэффициент усиления схемы по току является ее достоинством.

в) Схема с общим коллектором (рис. 2-7в).

В этой схеме входной сигнал прикладывается к участку база-коллектор (т.е. $R_{\text{вх}}$ тораздело больше по величине сопротивления коллекторного перехода), а выходное напряжение снимается с сопротивления $R_{\text{вх}}$, которое включено между эмиттером и коллектором, т.е.

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}; U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}.$$

Входным током является малый ток базы $I_{\text{б}}$, а через сопротивление нагрузки (выход схемы) протекают два тока:

$$I_{\text{б}} + I_{\text{к}} = I_{\text{э}}.$$

Значит:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}; I_{\text{вых}} = I_{\text{э}}.$$

Коэффициент усиления по току схемы ТОб:

$$\gamma = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{э}} - I_{\text{к}}} = \frac{1}{1 - I_{\text{к}}/I_{\text{э}}} = \frac{1}{1 - \alpha}.$$

Если, например $\alpha=0,93$, то $\gamma=50$.

Таким образом, коэффициент усиления по току схемы ТОб больше, чем схемы ТОб.

Остальные параметры схем ТОб, ТОб, ТОб (коэффициенты усиления по мощности и напряжению, входные и выходные сопротивления, фазовый сдвиг между $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$) будут рассмотрены ниже.

§ 2-6. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

Как и электронные лампы, транзисторы являются нелинейными элементами электрических цепей и их параметры в значительной степени зависят от режима работы.

Статические характеристики транзисторов, как и статические характеристики электронных ламп, связывают между собой токи и напряжения различных электродов прибора. Статические характеристики электронных ламп характеризуются зависимостью лишь между тремя величинами — напряжением на сетке, напряжением на аноде и анодным током. Поэтому для электровакуумного триода имеется два семейства статических характеристик — анодно-сеточные и анодные, причем для расчетов усиленных схем обычно используют только одно из указанных семейств.

В транзисторах взаимно связаны всегда четыре величины: входные и выходные токи и напряжения. Одним семейством характеристик эту зависимость показать нельзя.

Поэтому для расчетов необходимо пользоваться двумя семействами статических характеристик транзистора. Наибольшее распространение получили входные и выходные статические характеристики. Входной характеристикой называется зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном токе или напряжении.

$$I_{\text{вх}} = f(I_{\text{вых}}), \text{ при } I_{\text{вых}} = \text{const.}$$

Выходной характеристикой называется зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе или напряжении.

$$I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}}), \text{ при } I_{\text{вх}} = \text{const.}$$

Статические характеристики схемы ТОб экспериментально снимаются с помощью схемы (рис. 2-8).

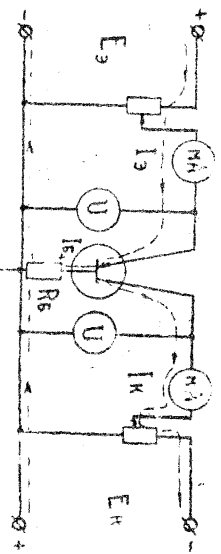


Рис. 2-8

а) Входная характеристика.

Это зависимость тока эмиттера I_e от напряжения на эмиттере U_e при постоянном напряжении на коллекторе (рис.2-9).

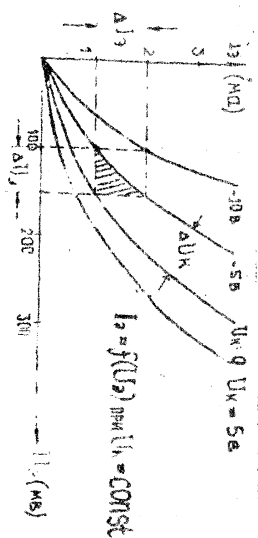


Рис.2-9

При $U_e=0$ входная характеристика представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики диода (эмиттер-база). В цепи коллектора при этом протекает ток $I_k = I_e - I_b$, т.к. при $U_{кв} = 0$ дырки, инжектированные в базу, перемещаются подем коллекторного перехода в коллектор.

Ток рекомбинации, протекая по сопротивлению базы R_b , создает на нем падение напряжения $U_{кб} = I_b \cdot R_b$, приложенном к эмиттерному переходу в обратном направлении (рис.2-8). Это несколько снижает нижнюю дырочку из эмиттера в базу.

При увеличении отрицательного напряжения на коллекторе входная характеристика смещается в область больших токов (вызов). Это происходит за счет расширения коллекторного перехода и сужения области базы, что уменьшает рекомбинационный ток базы и, следовательно, падение напряжения $U_{кб}$. Это приводит к увеличению прямого напряжения на эмиттерном переходе и увеличению тока эмиттера I_e .

Экспериментально снятые характеристики показывают, что изменение напряжения U_k слабо влияет на ток I_e . По семейству входных характеристик можно определить параметры h_{11} , h_{22} (рис.2-9).

Входное сопротивление:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_e}{\Delta I_e}, \text{ при } U_k = \text{const.}$$

Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_k}, \text{ при } \Delta I_e = \text{const.}$$

б) Выходная характеристика.

Это зависимость тока коллектора I_k от напряжения на коллекторе U_k при постоянном токе эмиттера I_e (рис.2-10).

$$I_k = f(U_k), \text{ при } I_e = \text{const.}$$

При $I_e=0$ в цепи коллектора протекает неуравновешенный коллекторный ток $I_{к0}$ и выходная характеристика представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики диода (коллектор-база).

Если в цепи эмиттера создан некоторый ток ($I_e = 0,5 \text{ ма}$), то уже при $U_k=0$ в выходной цепи протекает ток $I_k \approx I_e$. Поскольку дырки и коллектор перемещаются внутренним полем коллекторного перехода, то для поддержания тока I_k коллекторное на-

пряжение не требуется. При увеличении обратного напряжения $-U_k$ ток коллектора несколько возрастает за счет появления неуравновешенного тока $I_{к0}$.

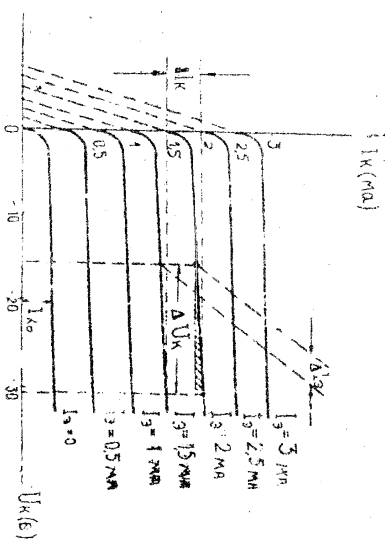


Рис.2-10

Из рисунка видно, что при нормальной полярности напряжения U_k , когда коллекторный переход работает в обратном направлении, выходные характеристики представляют собой почти прямые линии, идущие с очень небольшим наклоном.

При перемене полярности напряжения U_k ток I_k резко уменьшается и достигает нуля при U_k равном десятикратному току. В этом случае коллекторный переход работает в прямом направлении и напряжение U_k противопоставляет диффузии носителей зарядов, идущих от эмиттера к коллектору.

При дальнейшем увеличении прямого напряжения, приложенного к коллекторному переходу, ток через этот переход резко возрастает и идет в направлении, обратном нормальному рабочему току. При этом транзистор может выйти из строя. Поэтому участки характеристик, показанные на рис.2-10 штриховыми линиями, не являются рабочими и на риффиках не приводятся.

По семейству выходных характеристик можно определить статические параметры транзистора схемы с общей базой h_{21} , h_{22} (рис.2-10).

Выходная проводимость:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_k}, \text{ при } I_e = \text{const.}$$

Коэффициент усиления по току:

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e}, \text{ при } U_k = \text{const.}$$

§2.7 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМЫ ТЭСЭ

Экспериментальные характеристики снимаются с помощью схемы (рис. 2-11).

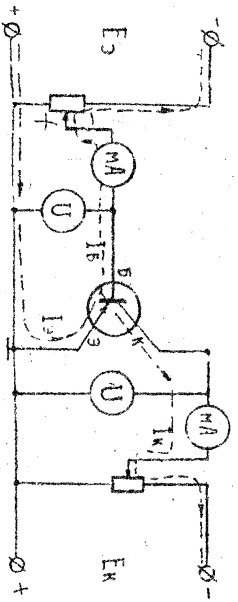


Рис. 2-11

а) Входная характеристика.

Это зависимость тока базы I_0 от напряжения на базе U_0 при постоянном напряжении на коллекторе U_k (рис. 2-12)

$$I_0 = f(U_0), \text{ при } U_k = \text{const.}$$

Входная характеристика, снятая при $U_k=0$ представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики диода эмиттер-база. При подаче на коллектор отрицательного напряжения $-U_k$ в цепи базы будет протекать обратный ток I_{k0} даже при напряжении $U_0=0$ (рис. 2-13). Этот ток образуется движением неосновных носителей базы и коллектора и величина его практически равна I_{k0} .

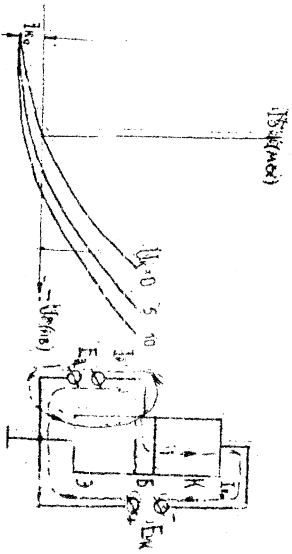


Рис. 2-12

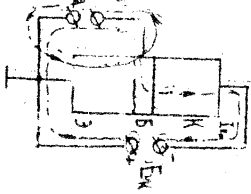


Рис. 2-13

При подаче прямого напряжения на базу $-U_0$ открывается эмиттерный переход и в цепи базы появляется рекомбинационный ток I_0 направленный навстречу I_{k0} . С увеличением прямого напряжения $-U_0$ входной ток уменьшается до нуля, затем меняет направление и растет по экспоненциальному закону. Чем больше отрицательное напряжение коллектора $-U_k$, тем шире коллекторный переход, уже ширина базы и меньше базовый ток. Значит, при большем $-U_k$ входная характеристика смещается вправо, в область меньших токов I_0 . По семейству входных характеристик можно определить статические параметры h_{11} , h_{12} .

Входное сопротивление

$$h_{11} = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}, \text{ при } U_k = \text{const.}$$

Коэффициент обратной связи по напряжению

$$h_{12} = \frac{\Delta U_0}{\Delta U_k}, \text{ при } \Delta I_0 = \text{const.}$$

Методика определения этих параметров такая же, как и для характеристики схемы ТОБ.

б) Выходная характеристика.

Это зависимость тока коллектора I_k от напряжения на коллекторе U_k при постоянном токе базы I_0 (рис. 2-14).

$$I_k = f(U_k), \text{ при } I_0 = \text{const.}$$

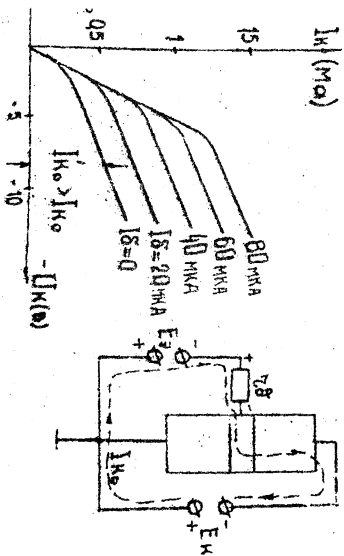


Рис. 2-14

Рис. 2-15

При токе базы $I_0=0$ в цепи коллектора протекает ток $I_{k0} > I_{k0}$. Это объясняется тем, что ток неосновных носителей I_{k0} создает на сопротивлении r_0 падение напряжения (рис. 2-15):

$$U_{r0} = I_0 \cdot r_0$$

Это напряжение является препятствием для эмиттерного перехода, оно препятствует переходу и в цепи коллектора появляется ток, превышающий управляемый ток I_{k0} . С увеличением тока I_0 выходная характеристика перемещается в область больших значений тока I_k (вверх).

Из рис. 2-14 видно, что при увеличении отрицательного напряжения на коллекторе (при $I_0 = \text{const}$) ток коллектора вначале увеличивается резко, а затем возрастает медленно.

Резкое увеличение тока в начале характеристики объясняется малым сопротивлением коллекторного перехода. За перегибом характеристики ток коллектора медленно увеличивается с увеличением $-U_k$ но более быстро, чем в схеме с общей базой (за счет увеличения тока I_{k0}).

По семейству выходных характеристик можно определить статические параметры h_{21} , h_{22} .

Выходная проводимость

$$h_{22} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_k}, \text{ при } I_0 = \text{const.}$$

Коэффициент усиления по току

$$h_{21} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_0}, \text{ при } U_k = \text{const.}$$

Методика определения этих параметров такая же как и для выходных характеристик схемы ТОВ.

§2.8. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

При работе транзистора в динамическом режиме в его выходную цепь обычно включается сопротивление нагрузки R_n , а во входной цепи действует источник входного сигнала U_k , (рис.2-76). В этом случае во время работы изменяются все токи и напряжения транзистора.

Связь между токами и напряжениями при этом определяется уже не двумя уравнениями, как в статическом режиме. Напряжение источника питания E_k распределяется между коллекторным переходом и сопротивлением нагрузки R_n в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

$$U_k = -E_k + I_k \cdot R_n$$

Это выражение называется уравнением динамической характеристики. Видно, что изменение напряжения на входе транзистора I_{b0} приведет к изменению тока I_k , и следовательно, и тока коллектора I_c . В свою очередь, это вызовет изменение коллекторного напряжения U_k .

Таким образом коллекторный ток зависит от двух одновременно изменяющихся величин

$$I_k = f(U_k, U_k)$$

Пользоваться в этом случае статическими характеристиками нельзя.

К двум уравнениям, описывающим поведение транзистора в статическом режиме

$$U_k = f(I_k), \text{ при } U_k = \text{const},$$

$$U_k = f(U_k), \text{ при } I_k = \text{const},$$

следует добавить еще уравнение динамической характеристики

$$U_k = -E_k + I_k \cdot R_n$$

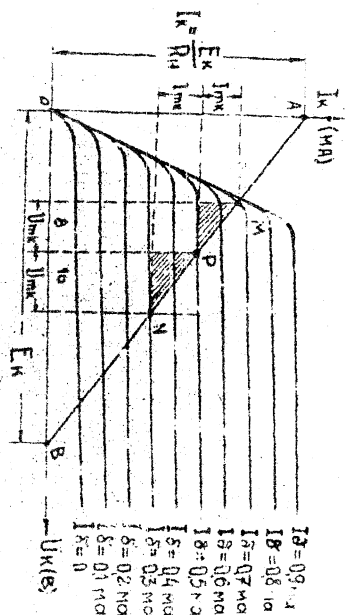


Рис.2-16

Построим график уравнения динамической характеристики на семействе выходных статических характеристик. Это прямая вида $U = AX + B$, не проходящая через начало координат.

На рис. 2-16 изображено семейство выходных статических характеристик транзистора. Зная ЭДС источника питания цепи коллектора E_k и сопротивление нагрузки R_n , можно построить динамическую характеристику (нагрузочную прямую) транзистора. Для этого используем уравнение

$$E_k = U_k + I_k \cdot R_n$$

откуда

$$I_k = \frac{E_k - U_k}{R_n}$$

Если, например, $E_k = 24В$, а $R_n = 1,5 кОм$, то ток коллектора, соответствующий $U_k = 0$, будет равен

$$I_k = \frac{E_k}{R_n} = \frac{24}{1,5} \left[\frac{В}{кОм} \right] \cdot I_k = 16мА$$

На оси ординат выходных характеристик складывают значение тока $I_k = 16мА$ (точка А), а на оси абсцисс — значение напряжения E_k (точка В).

Полученные точки А и В соединяют прямой, которая и является динамической характеристикой транзистора. Оба промежуточные положения точек на динамической линии характеризуют величины напряжения и тока в схеме. Любому току базы I_b соответствуют вполне определенные значения тока коллектора I_k и коллекторного напряжения U_k .

Для получения наименьших искажений усищаемого сигнала рабочую точку Р располагают на середине отрезка АВ нагрузочной прямой.

Положение рабочей точки Р соответствует току смещения в цепи базы. Для получения выбранного режима необходимо в усилителе обеспечить требуемую величину тока смещения в цепи базы.

На динамической характеристике выбирается рабочий участок MN. По проекциям рабочего участка на оси координат определяются двойные амплитуды переменных составляющих выходного тока $2I_{kmax}$ и выходного напряжения $2U_{kmax}$. После этого можно найти выходную мощность:

$$P_{вых} = 0,5 I_{kmax} \cdot U_{kmax}$$

Если имеется семейство входных характеристик, то можно построить входную динамическую характеристику путем перенесения по точкам в это семейство выходной динамической характеристики. Однако в справочниках обычно не приводятся семейство входных характеристик, а дается лишь одна кривая. Поэтому расчет входных токов и напряжений производят по этой кривой (рис.2-12). На эту кривую переносят точки М, N, Р выходной динамической характеристики. Прямая этих перенесенных точек на ось абсцисс позволяет определить значения входных токов и напряжений I_{bmax} , U_{bmax} .

§2-9. УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ (ОЭ)

Принципиальная и структурная схемы усилителя на транзисторе с общим эмиттером изображены на рис. 2-17.

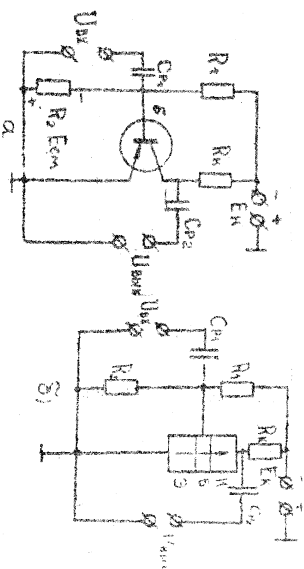


Рис. 2-17

В данной схеме $U_{вк} = U_{бк}$, а $U_{вкк} = U_{кк}$, т.е. общим электродом является эмиттер, что обусловило наименование схемы усилителя. На эмиттерный переход с сопротивлением $R_э$ делителя подается прямое напряжение смещения $E_{см}$, обеспечивающее эмиттерный переход открытым. При этом в базу вырываются дырки. Под воздействием напряжения источника $E_к$ в коллекторной цепи протекает постоянный ток $I_{к0}$:

$$+E_к \rightarrow I \rightarrow \text{Э} \rightarrow \text{Б} \rightarrow \text{К} \rightarrow R_к \rightarrow -E_к$$

Однако незначительная часть дырок, вырванных в базу, не достигает коллекторного перехода и рекомбинирует в ней, создавая ток базы $I_{б0}$:

$$+E_к \rightarrow I \rightarrow \text{Э} \rightarrow \text{Б} \rightarrow \text{К} \rightarrow R_к \rightarrow -E_к$$

Величина тока базы по сравнению с коллекторным током незначительна (2-5% - 5%)

Постоянный ток $I_{б0}$ протекает по сопротивлению нагрузки $R_н$, создает на нем постоянное напряжение:

$$U_{кк} = I_{б0} \cdot R_н$$

На коллекторе, относительно корпуса выделяется постоянное отрицательное напряжение $U_{кк}$:

$$U_{кк} = -E_к + I_{б0} \cdot R_н$$

Таким образом, при отсутствии входного сигнала (0-1) В схеме протекают постоянные токи, а на ее элементах выделяются постоянные напряжения (рис.2-18). При подаче на вход усилителя входного сигнала $U_{вк}$ (1-1₅) напряжение на эмиттерном переходе будет пульсующим, что приведет к изменению (пульсации) токов в схеме и напряжений на ее элементах.

За положительный полупериод входного сигнала (1-1₅) прямое напряжение на эмиттерном переходе меньше, чем $E_{см}$ и в момент t_2 достигает минимального значения.

Уменьшение прямого напряжения на эмиттерном переходе приведет и уменьшению токов $I_к$ и $I_б$. В момент t_2 эти токи будут минимальны, падение напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$ также будет минимальным, а напряжение на коллекторе будет максимальным по величине (стремится к $-E_к$).

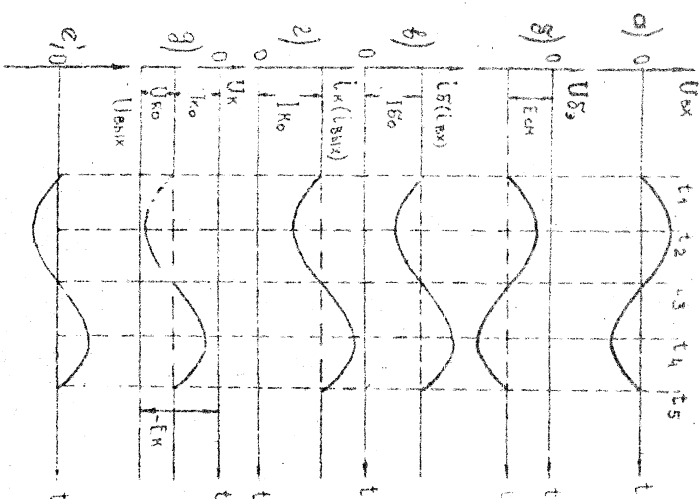


Рис. 2-18

За отрицательный полупериод входного сигнала (1₅-1₂) прямое напряжение на эмиттерном переходе больше, чем $E_{см}$ и в момент t_2 достигает максимального значения. Увеличение прямого напряжения на эмиттерном переходе приведет к увеличению токов $I_к$ и $I_б$. В момент t_2 эти токи будут максимальны, падение напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$ также будет максимальным, а на коллекторе напряжение будет минимальным по величине. Таким образом, под действием входного сигнала напряжение на $R_к$ и коллекторном переходе будут пульсующими, причем с амплитудой пульсации во много раз больше амплитуды входного сигнала. Это происходит потому, что незначительное изменение прямого напряжения на эмиттерном переходе приводит к большим изменениям коллекторного тока, вызывающим большие пульсации напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$.

Переменная составляющая напряжения с участка коллектор-эмиттер через раздельный конденсатор С подается на выход схемы.

Из графика (рис.2-18) видно, что входной и выходной сигналы находятся в противофазе, т.е. усилитель с ОЭ изменяет фазу входного сигнала на 180°.

Основными параметрами любого усилителя являются:

- а) входное сопротивление $R_{вх}$;
- б) выходное сопротивление $R_{вых}$;
- в) коэффициент усиления по току K_t ;
- г) коэффициент усиления по напряжению K_u ;
- д) коэффициент усиления по мощности K_p .

Для определения этих параметров необходимо знать входные и выходные токи и напряжения.

Для данной схемы:

$I_{вх} = I_0$ (через источник входного сигнала, протекает переменный составляющая тока базы),

$I_{вх} = I_0$ (из сопротивлению нагрузки протекает коллекторный ток),

$U_{вх} = U_{бэ}$ (выходное напряжение приложено к открытому эмиттерному переходу),

$U_{вх} = U_{кэ}$ (выходное напряжение снимается с участка коллектор-эмиттер),

а) Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{бэ}}{I_0}, \quad (0,2-2) \text{ КОМ}$$

Так как входным током является ток базы, который не может быть большим по величине, то входное сопротивление такого усилителя будет достаточно большим.

б) Выходное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{кэ}}{I_0}, \quad (10-100) \text{ КОМ}$$

Изменение напряжения на коллекторе слабо влияет на величину коллекторного тока, поэтому выходное сопротивление усилителя также будет достаточно большим.

в) Коэффициент усиления по току:

$$\beta = \frac{I_{вх}}{I_{вх}} = \frac{I_0}{I_0}, \quad (20-200)$$

Так как входным током является небольшой по величине (по сравнению с током коллектора) ток базы, то коэффициент усиления по току будет большим.

г) Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{вх}}{U_{вх}} = \frac{I_0}{I_0}, \quad (\text{несколько сотен})$$

Изменение напряжения на эмиттерном переходе (открытом) во много раз сильнее влияет на коллекторный ток, чем изменение напряжения на закрытом коллекторном переходе, поэтому коэффициент усиления по напряжению будет большим.

д) Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_U \cdot \beta, \quad (\text{несколько тысяч})$$

ВЫВОДЫ:

1. Усилитель на транзисторе с ОЭ изменяет фазу сигнала на 180° и поэтому может использоваться как фазоинверсный каскад.
2. Данная схема является наиболее распространённой благодаря своим достоинствам:
 - а) большое усиление по току, напряжению и мощности,
 - б) достаточно большие по величине входное и выходное сопротивления, что позволяет применять многокаскадные усилители без дополнительных мер межкаскадного согласования.

§ 2-10. УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ (ОБ)

Принципиальная и структурная схемы усилителя на транзисторе с ОБ изображены на рис. 2-19.

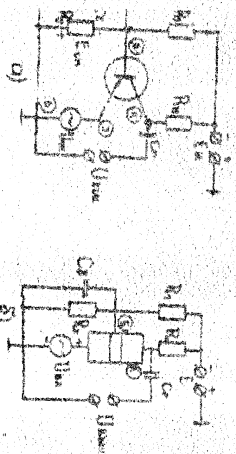


Рис. 2-19

В данной схеме $U_{вх} = U_{кэ}$, а $U_{вх} = U_{кэ}$, т.е. общим электродом для входной и выходной цепи является база.

На эмиттерный переход с сопротивлением $R_э$ делителя подается прямое напряжение смещения $E_{см}$, обеспечивающее эмиттерный переход открытым. Под воздействием этого напряжения в базу вырывается дырка. В коллекторной цепи за счет источника $E_к$, протекает постоянный ток I_0 :

$$+E_к \rightarrow I_{вх} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow К \rightarrow R_н \rightarrow -E_к.$$

Однако незначительная часть дырок, вырванных из эмиттера в базу, не достигает коллектора, а рекомбинирует с электронами внеи, создавая небольшой ток базы $I_{б0}$:

$$+E_к \rightarrow I_{вх} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow R_б \rightarrow -E_к.$$

Постоянный коллекторный ток I_0 , протекая по сопротивлению нагрузки $R_н$, создает на нем постоянное напряжение $U_{к0}$:

$$U_{к0} = I_0 \cdot R_н.$$

На коллекторе относительно корпуса выделяется постоянное отрицательное напряжение $U_{к0}$:

$$U_{к0} = -E_к + I_0 \cdot R_н.$$

Таким образом, при отсутствии входного сигнала ($U_{вх} = 0$) (рис. 2-20) в схеме протекают постоянные токи, а на ее элементах выделяются постоянные напряжения.

При подаче на вход усилителя входного сигнала $U_{вх}$ ($t_1 - t_2$) напряжение на эмиттерном переходе будет пульсирующим, что приведет к пульсации токов в схеме и напряжений на ее элементах. За положительный полупериод входного сигнала ($t_1 - t_2$) на эмиттер прикладывается положительный потенциал, а на базу — отрицательный. В результате этого прямое напряжение на эмиттерном переходе больше, чем $E_{см}$, и в момент t_2 оно достигает максимального значения. Увеличение прямого напряжения на эмиттерном переходе приведет к увеличению тока $I_э$ и $I_к$. В момент t_2 эти токи будут максимальны. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$ будет также максимальным, а на коллекторе напряжение будет минимальным.

За отрицательный полупериод входного сигнала ($t_3 - t_4$) прямое напряжение на эмиттерном переходе меньше, чем $E_{см}$ и в момент t_4 оно достигает минимального значения.

Уменьшение прямого напряжения на эмиттерном переходе приведет к умень-

дленно токов I_0 и $I_{\text{к}}$. В момент t_2 эти токи будут минимальны, падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n также будет минимальным, а на коллекторе напряжение будет минимальным по величине. Таким образом, под воздействием входного сигнала напряжение на сопротивлении нагрузки R_n и коллекторном переходе будет пульсировать, причем с амплитудой пульсации во много раз больше амплитуды входного сигнала. Переменная составляющая напряжения с участка коллектор-база через радиопередающий конденсатор C_p подается на выход схемы.

Из графиков (рис. 2-20) видно, что входной и выходной сигналы находятся в фазе, т.е. усилитель с ОБ не изменяет фазу сигнала.

Определим параметры усилителя с ОБ. Для данной схемы:

$$I_{\text{кэ}}=I_0 \quad (\text{через источник входного сигнала протекает ток базы и ток коллектора})$$

$$I_{\text{кэ}}=I_{\text{к}} \quad (\text{через сопротивление нагрузки } R_n \text{ протекает коллекторный ток})$$

$$U_{\text{кэ}}=U_{\text{об}}; \quad U_{\text{кэ}}=U_{\text{кб}}$$

а) Входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_0} \quad (30-1500) \text{ Ом.}$$

Так как входным током является большой по величине эмиттерный ток, сильно зависящий от входного напряжения (прямого напряжения на эмиттерном переходе), то входное сопротивление схемы — мало. Это является недостатком схемы, т.к. в многокаскадных усилителях на транзисторах с ОБ малое входное сопротивление вступает в противоречие с требованием каскада, уменьшая его величину, что приводит к уменьшению коэффициента усиления предыдущего каскада.

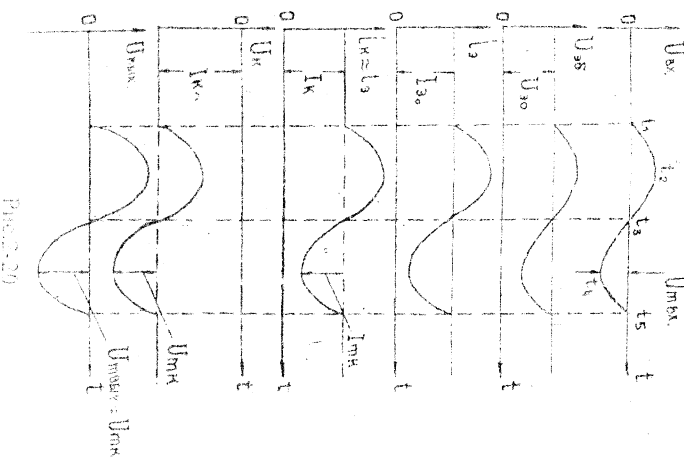


Рис. 2-20

б) Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{кэ}}}{I_{\text{кэ}}} = \frac{U_{\text{кб}}}{I_0} \quad (0,5-2) \text{ МОм}$$

Изменение напряжения на коллекторном переходе слабо влияет на величину коллекторного тока, поэтому выходное сопротивление усилителя велико (значительно больше, чем в усилителе с ОЭ).

в) Коэффициент усиления по току:

$$\alpha = \frac{I_{\text{кэ}}}{I_{\text{б}}} = 1 \quad (0,96-0,995)$$

Данная схема усиления по току не дает, т.к. $\alpha < 1$.

г) Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{кэ}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{кб}}}{U_{\text{вх}}} \quad (\text{несколько сотен или тысяч}).$$

Коэффициент усиления по напряжению для данной схемы велик, даже больше, чем в схеме с ОЭ.

д) Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_u \cdot \alpha \quad (\text{несколько сотен}).$$

ВЫВОДЫ:

1. Выходной и входной сигналы в схеме с ОБ находятся в фазе.
2. Усиление по току в схеме отсутствует.
3. Схема с ОБ имеет малое входное сопротивление.
4. Несмотря на недостаток схемы с ОБ имеет достаточно широкое применение, так она обеспечивает хорошее усиление по напряжению и обладает хорошими частотными свойствами (об этом будет сказано ниже).

§2-11. УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ (ОК).

Принципиальная и структурная схемы усилителя на транзисторе с ОК изображены на рис. 2-21.

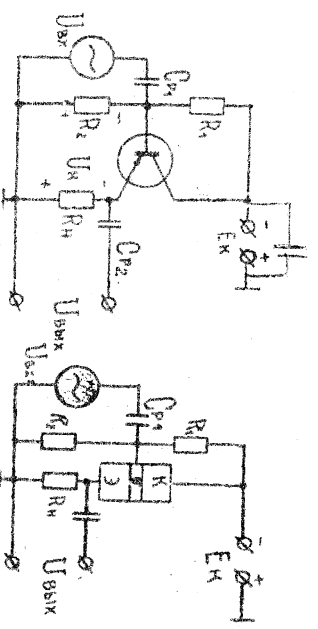


Рис. 2-21

В данной схеме: $I_{вх} = I_6$; $I_{вх\max} = I_6$; $U_{вх} = U_{вх0}$; $U_{вх\max} = U_{вх0}$

С сопротивлением R_2 делителя на эмиттерный переход подается прямое напряжение $U_{вх0}$. Вызывающее инжекцию дырок из эмиттера на базу.

Так как эмиттерный переход открыт, то в цепи коллектора будет протекать постоянный ток $I_{с0}$:

$$+E_c \rightarrow \Delta \rightarrow R_2 \rightarrow \Delta \rightarrow B \rightarrow K \rightarrow -E_c$$

Этот ток, протекая по сопротивлению нагрузки R_n , создает на нем постоянное напряжение $U_{н0}$, которое прикладывается к эмиттерному переходу в обратном направлении.

Таким образом, напряжение смещения на эмиттерном переходе состоит из суммы двух напряжений: прямого $U_{вх0}$ и обратного ($U_{н0}$):

$$E_{св} = U_{вх0} - U_{н0}$$

Кроме тока $I_{с0}$ и тока делителя в схеме протекает незначительный по величине постоянный ток базы $I_{б0}$:

$$+E_c \rightarrow \Delta \rightarrow R_2 \rightarrow \Delta \rightarrow B \rightarrow K_1 \rightarrow E_c$$

Из рассмотренного выше следует, что на сопротивлении нагрузки R_n протекает ток коллектора и ток базы, т.е. эмиттерный ток. Следовательно, выходным током является ток эмиттера. При отсутствии входного сигнала (0 - t_1) токи и напряжения в схеме будут постоянными, а напряжение на выходе равно нулю (рис. 2-22).

При подаче входного сигнала ($t_1 - t_2$) токи в цепи базы и коллектора будут нулевыми.

За положительный полупериод входного сигнала ($t_1 - t_2$) прямое напряжение на эмиттерном переходе меньше $E_{св}$, что приводит к уменьшению токов I_6 и I_c . В момент времени t_2 прямое напряжение на эмиттерном переходе будет минимальным, в результате чего токи I_6 и I_c также будут минимальными. За отрицательный полупериод входного сигнала ($t_2 - t_3$) прямое напряжение на эмиттерном переходе больше $E_{св}$, что приводит к увеличению токов I_6 и I_c . В момент времени t_3 прямое напряжение на эмиттерном переходе будет максимальным, а токи I_6 и I_c также достигнут максимальных значений.

Таким образом, под воздействием входного сигнала напряжение на сопротивлении нагрузки R_n будет пульсирующим.

Переменная составляющая напряжения с сопротивлением нагрузки через разделительный конденсатор C_p подается на выход схемы. Из графиков (рис. 2-22) видно, что входной и выходной сигналы находятся в фазе, т.е. усилитель с ОК фазу сигнала не изменяет.

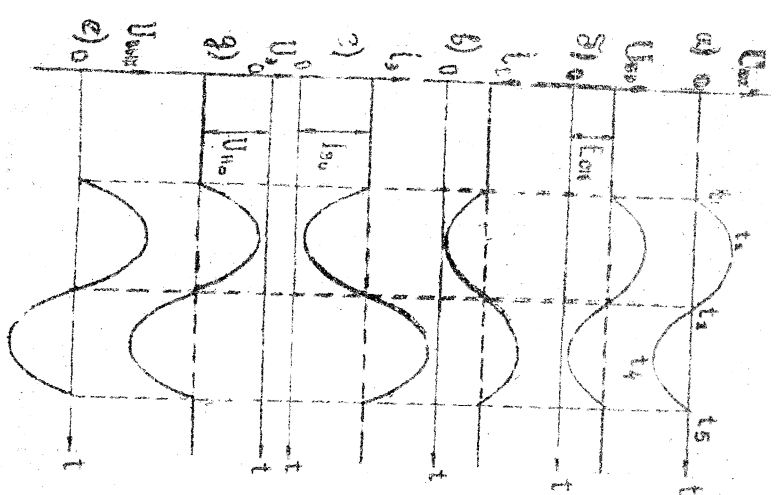
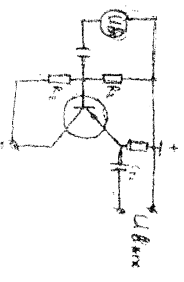


Рис. 2-22

Определим параметры усилителя с ОК.

Для данной схемы:

$I_{вх} = I_6$ (через источник входного сигнала протекает переменная составляющая тока базы),

$I_{вх\max} = I_6$ (по сопротивлению нагрузки протекает и ток базы и ток коллектора),

а) Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{вх}}{I_6}, \quad (0,2 - 2) \text{ МОм}$$

Так как входным током является малый по величине ток базы, то входное сопротивление схемы с ОК велико, значительно больше, чем в схеме с ОЭ.

б) Выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}} = \frac{U_{св}}{I_c}, \quad (50 - 500) \text{ Ом}$$

Напряжение на сопротивлении нагрузки, т.е. выходное напряжение, оказывается приложенным (через R_2) снова ко входу усилителя (к эмиттерному переходу).

Это напряжение сильно влияет на величины I_6 и I_c (оно приложено к открытому переходу). Поэтому выходное сопротивление усилителя с ОК мало.

в). Коэффициент усиления по току.

$$\gamma = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_1}{I_0} \quad (20-200)$$

Выходным током является большой по величине эмиттерный ток, а входным - малый ток базы, поэтому коэффициент усиления по току усилителя с ОК велик.

г). Коэффициент усиления по напряжению.

$$K_v = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{э}}}{U_{\text{б}}}; \quad K_v < 1.$$

Коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, но амплитуда напряжения на выходе будет меньше амплитуды входного сигнала. Действительно, за счет очень сильной отрицательной обратной связи результирующее действие входного напряжения ослаблено.

Когда полуволна сигнала стремится сделать отрицательной базу по отношению к эмиттеру, появляясь ток, последнее, то это увеличение тока, делает эмиттер более отрицательным, что препятствует действию входного сигнала.

Таким образом, $U_{\text{э}} = U_{\text{б}} - U_{\text{баз}}$, т.е. за счет обратной связи уменьшается амплитуда напряжения на эмиттерном переходе.

д). Коэффициент усиления по мощности.

$$K_p = K_v \cdot \gamma \quad (\text{сотни})$$

ВЫВОДЫ.

1. Так как выходящий и входной сигналы имеют одну и ту же фазу и одну и ту же амплитуду напряжения, то усилитель с ОК иногда называют повторным элементом.
2. Входное сопротивление схемы велико, а выходное мало. Это свойство позволяет использовать схему в качестве согласующего устройства (рис. 2-23).

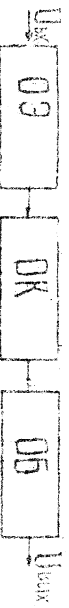


Рис. 2-23

Входное сопротивление схемы с ОБ мало и оно шунтирует нагрузку схемы с ОЭ. Если между этими каскадами поставить схему с ОК, то ее большое $R_{\text{вх}}$ хорошо согласуется с большим $R_{\text{вых}}$ схемы, а ее малое $R_{\text{вых}}$ согласуется с малым входным сопротивлением схемы с ОБ.

3. Кроме рассмотренного выше схема используется в том случае, где надо получить большой ток в нагрузочной нагрузке. Для удобства сравнения основные свойства всех схем включения транзисторов сведены в таблицу:

Параметр	10Э	10Б	10К
K_v	Десятки-сотни	Меньше единицы	Десятки-сотни
K_p	" "	Десятки-сотни	Меньше единицы
K_r	сотни-десятки тысяч	" "	Десятки-сотни
$R_{\text{вх}}$	сотни Ом - единицы КОм	единицы-десятки Ом	Десятки-сотни КОм
$R_{\text{вых}}$	единицы-десятки КОм	сотни КОм-единицы МОм	Сотни Ом - единицы КОм
Фазовый сдвиг	180°	0°	0°

§ 2-12. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ.

1. Канальный (полевой) транзистор.

Одним из наиболее перспективных типов специальных транзисторов является канальный (полевой) транзистор.

В отличие от рассмотренных ранее биполярных транзисторов он называется униполярным, т.к. ток в нем создается перемещением зарядов одного знака (дырки или электроны).

Канальный транзистор представляет полупроводниковую структуру, ограниченную поверхностью электронно-дырочного перехода с одной или с двух сторон (рис. 2-24). Выходной ток протекает через узкую область полупроводника, которая называется каналом. Канал может быть проводимостью как n-типа, так и p-типа. Электроды, обеспечивающие включение канала в электрическую цепь, называются истоком и стоком.

Электроды, из которого в канал вытекают основные носители заряда, называется истоком. Из канала носители проходят к электроду, который называется стоком. Исток и сток аналогичны соответственно катоду и аноду электронной лампы.

Область с противоположным по отношению к каналу типом проводимости называется затвором.

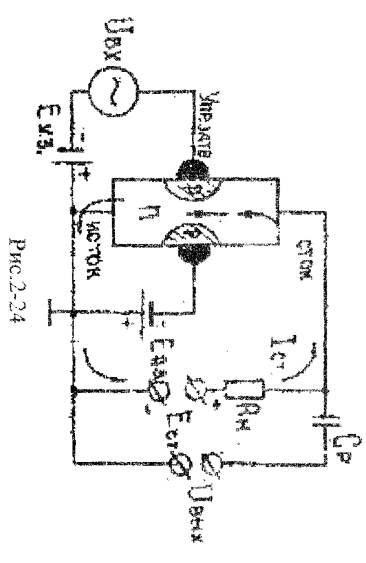


Рис.2-24

Он предназначен для регулирования площади поперечного сечения канала и в какой-то степени аналогичен сетке вакуумного триода или базе биполярного транзистора.

Ширина канала зависит от глубины проникновения в него электронно-дырочного перехода. При увеличении обратного напряжения, подаваемого на переход, ширина последнего возрастает, а поперечное сечение канала уменьшается. Уменьшение обратного напряжения на переходе приводит к возрастанию сечения канала.

Поскольку проводимость p-p переходов, ограничивающих канал, очень низка, то электрическое сопротивление канала зависит только от величины его поперечного сечения. Изменение ширины канала, осуществляемое с помощью напряжения, подаваемого на управляющий затвор, сопровождается изменением величины тока, протекающего в выходной цепи.

На этом принципе и основано действие канального транзистора. При включении в цепь управляющего затвора источника входного сигнала, ширина канала и ток через транзистор изменяется по закону входного сигнала. На резисторе R_n будет создаваться выходное падение напряжения. Дополнительный затвор служит для первоначальной установки падения напряжения. В реальных радиосхемах он может отсутствовать. Существует ряд конструктивных модификаций канальных транзисторов - тесктрон, алькатрон и др. Канальные транзисторы обладают следующими достоинствами:

1. Малый уровень шума, определяемый лишь тепловыми флуктуациями в канале. Рекомбинационные томы, представляющие главный источник шумов инжекционных транзисторов - отсутствуют.
2. Незначительно малая величина управляющего тока, поскольку в цепи затвора протекает лишь обратный ток p-p перехода, что определяет большую величину входного сопротивления.
3. Высокий коэффициент усиления по напряжению.
4. Температурные коэффициенты канальных транзисторов значительно лучше, чем у инжекционных.
5. Высокая радиационная стойкость.

2. Тиристоры.

Тиристоры являются переключающими приборами. Структура двоядного p-n-p-р-п (динистора) n-p-p-р-р показана на рис. 2-25.

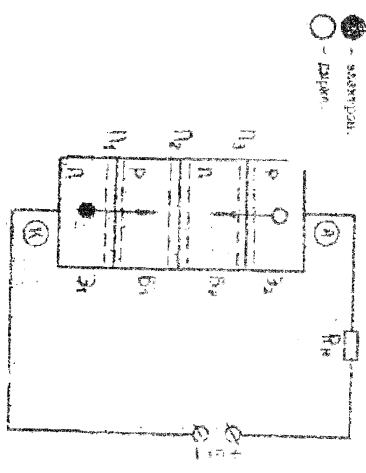


Рис.2-25

Он имеет три ЭДП: n_2 — в обратном. Крайнюю область "p" называют анодом, а крайнюю область "n" — катодом. Таким образом, тиристор состоит из двух транзисторов типа p-p-p и p-n-p. Переходы p_1 и n_2 являются эмиттерными, а переход n_2 работает в качестве коллекторного.

Физические процессы в тиристоре можно объяснить следующим образом. Как известно, в транзисторе может быть получен большой коллекторный ток, если в базу со стороны эмиттерного перехода инжектируются в большом количестве неосновные носители. Чем больше прямое напряжение эмиттерного перехода, тем больше ток коллектора.

Это приводит к уменьшению сопротивления коллекторного ЭДП и возрастанию падения напряжения на нагрузке, включенной в цепь коллектора. При определенном прямом напряжении на эмиттерном переходе ток коллектора достигает максимального значения, а напряжение $U_{кз}$ снижается до десятых долей вольт. Транзистор переходит в открытое состояние (режим насыщения). Нечто подобное получается и в тиристоре. Через переходы p_1 и n_2 работают в прямом направлении, в области, прилегающей к переходу n_2 , инжектируются неосновные носители, которые уменьшают сопротивление перехода n_2 .

Вольт-амперная характеристика тиристора приведена рис. 2-26. При повышении внешнего напряжения E , ток растет медленно, что соответствует участку OA (тиристор закрыт).

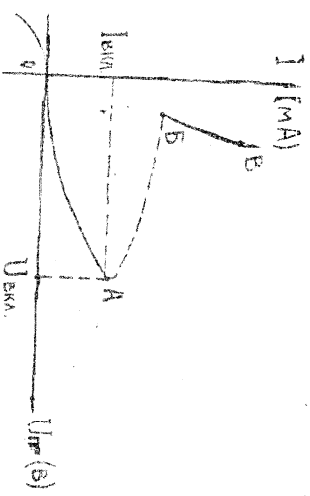


Рис. 2-26

На сопротивлении перехода p_2 влияют два взаимно противоположных процесса. С одной стороны, повышение $U_{обр}$ увеличивает сопротивление перехода, т.к. основные носители уходят от p_2 , обедняя его носителями. Однако, повышение прямых напряжений на переходах p_1 и p_2 увеличивает инжекцию носителей в переход p_2 , уменьшая его сопротивление. До точки А перевес имеет первый процесс. При напряжении $U=U_{кр}$ называемом напряжением включения (т.А), влияние обоих процессов уравновешивается.

Дальнейшее повышение подводящего напряжения приведет к лавинообразному отпиранию тиристора. Ток резко, скачком, возрастает (участок АВ). В результате увеличивается режим насыщения транзистора – большой ток при малом напряжении (участок ВВ). Время включения тиристора обычно единицы микросекунд, а время выключения до десятков микросекунд. Поэтому тиристоры могут работать на сравнительно низких частотах. Рабочее напряжение у них достигает 1000В, ток 1000А и более.

Если от одной из базовых областей слеган вывод, получается управляемый переключательный прибор – триодный тиристор). Подавая на этот вывод (управляющий электрод) напряжение, можно регулировать значение $U_{кр}$. Чем больше ток в цепи управляющего электрода, тем ниже $U_{кр}$. Простейшая схема включения тиристора показана на рис. 2-27. Его называют тиристором с управлением по катоду, т.к. управляющим электродом является базовая область B_1 , ближайшая к катоду.

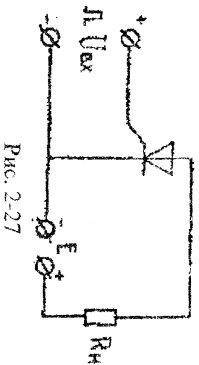


Рис. 2-27

При подаче импульса прямого напряжения через управляющий электрод тиристор отпирется (при достаточном напряжении источника E). Тиристоры находят широкое применение в импульсных схемах связи, радиолокации и автоматике.

Наиболее часто используются они как управляемые ключи. Важнейшей областью применения тиристоров являются мощные выпрямители, устройства управления электродвигателями и т.д. Для этой цели выпускаются мощные тиристоры с принудительным воздушным или водяным охлаждением. Тиристоры обладают высокой надежностью и долговечностью, имеют малые габариты и высокую экономичность. Они значительно превосходят по эксплуатационным качествам газоразрядные приборы, применяющиеся для аналогичных целей.

3. Полупроводниковые диоды для СВЧ.

а). Диоды Шоттки.

Для переключения и других процессов в технике СВЧ в последнее время применяются диоды Шоттки. В этих диодах используется контакт между металлом и полупроводником. Если в контакте работа выхода электронов из металла A_m больше, чем работа выхода из полупроводника A_n ($A_m > A_n$), то электроны будут переходить главным образом из полупроводника в металл и в приграничном слое образуется область обеднения основными носителями и имеющая большое сопротивление. Создается

сравнительно высокий потенциальный барьер. В диодах Шоттки отсутствуют процессы накопления и расщепления зарядов основных носителей, характерные для PN -диодов. Поэтому диоды Шоттки обладают большим быстродействием, зависящим от времени пробоя электронов через контакт ($< 10^{-11}$ с).

В результате этого диоды могут работать на частотах 15-20 ГГц в режиме переключения у них составляет сотые доли наносекунды. Обратный ток у этих диодов очень мал.

б). Лавино-пролетные диоды (ЛПД).

Для усиления и генерации колебаний СВЧ успешно применяются ЛПД, в первую очередь разработанные в СССР А.О.Татаром и В.М. Вальд-Нерловым. Эти диоды работают в режиме электрического пробоя и при известных условиях могут обладать отрицательным сопротивлением для переменного тока.

Если к ЛПД приложено постоянное обратное напряжение и переменное, то под действием положительного полупериода последнего происходит лавинообразное нарастание тока – импульс. Вследствии инерционности этот импульс, проходя через $n-p$ переход, запаздывает относительно переменного напряжения и может совпасть с отрицательным полупериодом переменного напряжения. Значит, импульс тока и отрицательное напряжение будут отличаться по фазе на 180° , что характерно для отрицательного сопротивления (см. § 1-7). Подключая ЛПД к колебательной системе СВЧ, можно за счет отрицательного сопротивления получить режим генерации или усиления. На более низких частотах инерционность процессов мала и запаздывание импульса тока по отношению к переменному напряжению не получается ничтожно малым, поэтому отрицательное сопротивление практически отсутствует.

в). Диод Ганна.

Этот полупроводниковый диод с отрицательным сопротивлением на СВЧ основан на эффекте, открытым английским физиком Д. Ганном в 1963г. Эффект Ганна состоит в том, что при достаточно большом напряжении, приложенном к полупроводнику, в этом полу проводнике возникает СВЧ-колебания. Диод Ганна представляет собой полупроводниковый кристалл без $n-p$ перехода, в котором создано сильное электрическое поле. В качестве полупроводника должен использоваться арсенид галлия, имеющий две зоны проводимости, в которых подвижность электронов различна.

При достаточно большой внешней напряжении большая часть электронов переходит в верхнюю зону проводимости, где их подвижность уменьшается, а сопротивление полупроводника резко увеличивается. Ток уменьшается, и в вольт-амперной характеристике возникает пологий участок, соответствующий отрицательному сопротивлению (рис. 2-27).

Дальнейшее увеличение приложенного напряжения снова вызывает пропорциональное возрастание тока.

Расомощенное повышение сопротивления происходит в данный момент, времени ни не во всем полупроводнике, а в одной области, называемой доменом (рис. 2-28).

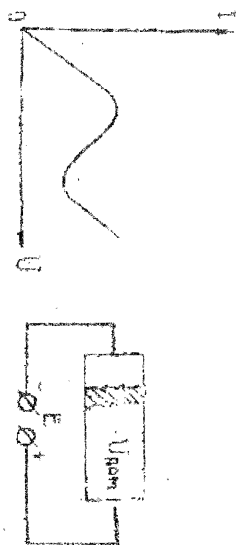


Рис. 2-27

Рис. 2-28

Домен образуется около катода (минус) и движется с большой скоростью к аноду. Дойдя до анода, домен исчезает, но новый домен возникает около катода, движется к аноду и т.д. Пронзание доменов и возникновение новых сопровождается периодическим изменением сопротивления диода, вследствие чего появляются колебания тока, частота которого оказывается в диапазоне СВЧ. Частота этих колебаний

$$f = \frac{V}{l}$$

где $V_{\text{дом}}$ — скорость перемещения домена

l — длина полупроводника.

Диоды Ганна работают на частотах десятки Гц. Важной особенностью диодов является то, что в них "работает" весь полупроводник, а не только p-p переход. Поэтому в диодах Ганна можно допустить большие мощности (единицы киловатт в импульсном режиме).

§2-13. ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.

Частотные свойства определяют частотную стойкость полупроводниковых приборов, под которой понимают их способность сохранять работоспособность в широком частотном диапазоне. Повышенные требования предъявляются к частотной стойкости на высоких и сверхвысоких частотах. Критерием оценки частотных свойств транзистора является зависимость коэффициента по току от частоты входного сигнала.

Частотная зависимость свойств r-p перехода объясняется наличием собственной емкости. Величина емкости пропорциональна площади r-p перехода, концентрации носителей заряда и диэлектрической проницаемости полупроводника. Эквивалентная схема r-p перехода показана на рис. 2-29.

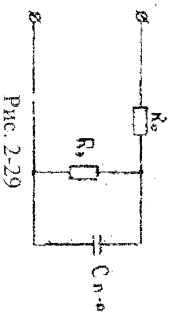


Рис. 2-29

R_0 — сопротивление полупроводников "p" и "n" и их выводов;

R_1 — сопротивление ЭДП, зависящее от величины и полярности приложенного напряжения;

C_0 — собственная емкость ЭДП

При работе на высоких частотах емкостное сопротивление $X_c = \frac{1}{\omega C}$ уменьшается

и переменный ток будет проходить через эту емкость, минуя сопротивление ЭДП-К. Это нарушает нормальную работу прибора, т.к. ЭДП терять свойство односторонней проводимости. Поэтому для работы на высоких частотах используются в основном точечные полупроводниковые приборы, имеющие малую собственную емкость.

Для транзистора собственными емкостями являются:

C_1 — емкость эмиттерного перехода C_1 (1000 пФ),

C_2 — емкость коллекторного перехода C_2 (5 + 50 пФ).

Их влияние можно учесть, шунтируя эмиттерный и коллекторный переходы емкостями C_1 и C_2 . С учетом этих емкостей эквивалентная схема транзистора имеет вид (рис. 2-30).

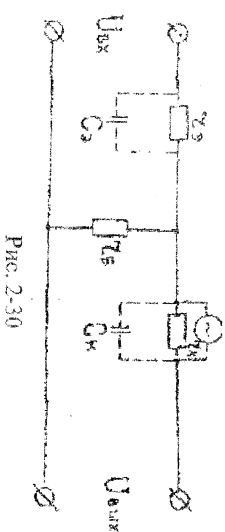


Рис. 2-30

R_2 — сопротивление эмиттерного перехода (100 Ом);

R_3 — сопротивление базы (100 Ом);

R_4 — сопротивление коллекторного перехода (100 кОм).

На высоких частотах сопротивление емкостей C_1 и C_2 резко падает ($X_c = \frac{1}{\omega C}$),

шунтируя сопротивление ЭДП. Переменные составляющие токов I_p , I_k будут проходить в основном через емкости C_1 , C_2 , что существенно ухудшит усилительные свойства транзистора.

Несмотря на то, что $C_1 > C_2$ влияние этой емкости на работу транзистора мало, т.к. она шунтирует малое сопротивление эмиттерного перехода. Емкость C_2 играет более существенную роль при работе транзистора на высоких частотах, т.к. в этом случае сопротивление $X_{c2} < X_{c1}$ и коллекторный переход терет свои свойства.

Для улучшения частотных свойств следует уменьшать собственные емкости, путем применения точечных приборов.

Существенную роль в исследовании частотной зависимости параметров полупроводниковых приборов играет диффузионный характер движения носителей.

С увеличением частоты время движения носителей в базе может оказаться сравнимым с периодом входного напряжения. При этом носители, введенные в базу во время максимального значения $U_{вх}$ не успевают достичь коллекторного перехода, как напряжение на входе существенно уменьшится. В результате от места повышенной концентрации носителей заряда начинается диффузия не только к коллекторному, но и к эмиттерному переходу. Число рекомбинаций в области базы увеличивается, что приводит к увеличению базового тока и, следовательно, к уменьшению тока коллектора, т.к. $I_c = I_b - I_r$.

Кроме того, ток базы создает падение напряжения на R_b , $U_{Rb} = I_b R_b$, которое является обратным эмиттерного перехода и снижает ток эмиттера.

Частотные свойства транзистора характеризуются граничной частотой f_c (для ТОВ) и f_β (для ТОЭ). Это такая частота, на которой коэффициент усиления по току $\alpha(\beta)$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз (рис.2-31).

В схеме ТОЭ, где ток базы является входным, коэффициент усиления по току с ростом частоты резко уменьшается, т.к.

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

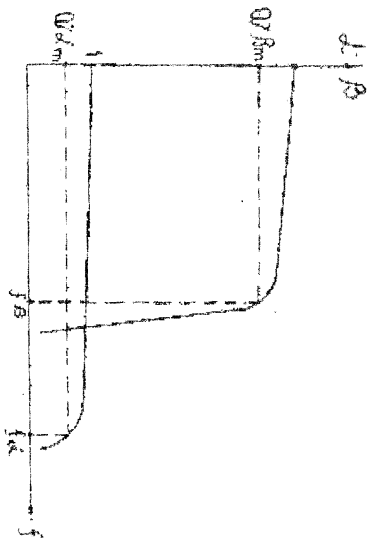


Рис. 2-31

В схеме ТОВ, коэффициент усиления по току с ростом частоты меняется мало,

$$\text{т.к. } \alpha = \frac{I_c}{I_b} < 1.$$

Поэтому частотные свойства схемы ТОВ оказываются гораздо лучше, чем у схемы ТОЭ:

$$f_c > f_\beta$$

Время движения носителей в базе, которое определяет граничную частоту, зависит.

- 1) от материала полупроводника.
- 2) от типа носителя.

Так у кремния подвижность носителей меньше, чем у германия, поэтому германиевые транзисторы имеют лучшие частотные свойства, чем кремниевые.

Подвижность электронов выше подвижности дырок, поэтому при одинаковой толщине базы транзисторы типа п-р-п являются более высокочастотными, чем типа р-п-р.

Для уменьшения времени движения носителей в базе толщину ее стремятся сделать возможно меньшей. Лучшими в этом отношении являются диффузионные и дрейфовые транзисторы.

При изготовлении диффузионных транзисторов примеси вводят в пластинку германия способом диффузии, например из газовой среды. За счет этого база удаляется слоем толщиной (2-3 мк), а транзитную частоту доводят до 400-600 МГц.

Способом диффузии изготавливают так называемые дрейфовые транзисторы, в базе которых примеси распределены неравномерно. При этом в базе создается электрическое поле и носители заряда перемещаются не только за счет диффузии, но и по-

дем. Скорость пролета базы носителей заряда возрастает, что снижает количество рекомбинации и улучшает частотные свойства.

ВЫВОДЫ:

1. Полупроводниковые приборы усугубают по частотным свойствам ЭВП за счет наличия собственных емкостей и диффузионного характера движения носителей в базе.
2. Улучшение частотных свойств полупроводников достигается:
 - правильным выбором схемы (на высоких частотах предпочтительнее ТОВ),
 - специальной технологией изготовления приборов,
 - применением германиевых транзисторов п-р-п типа.

§2-14. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.

Под температурной стойкостью понимают способность полупроводниковых приборов сохранять работоспособность в широком температурном диапазоне.

Свойства ЭВП существенно зависят от температуры окружающей среды. При повышении температуры возрастает генерация пар — электронов и дырок, т.е. увеличивается концентрация носителей и проводимость полупроводника. Это оказывает вольт-амперные характеристики ЭВП, снятые при различной температуре (рис.2-32).

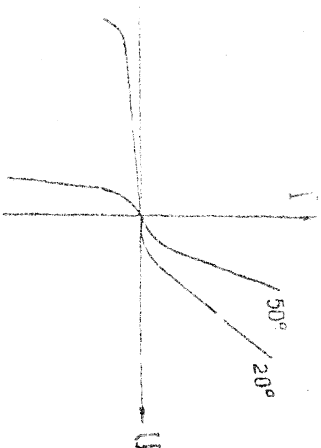


Рис. 2-32

На рис. 2-32 видно, что при повышении температуры прямой и обратный токи растут, а п-р переход, теряет свое основное свойство — одностороннюю проводимость. Максимальная рабочая температура определяется энергией ионизации атомов основного вещества. С ростом температуры увеличивается количество ионизированных атомов и концентрация неосновных носителей приближается к концентрации основных носителей — работоспособность транзистора нарушается.

Чем выше энергия ионизации основного вещества, тем выше максимальная рабочая температура транзистора.

Для германиевых приборов верхний температурный предел не превышает 100°С. У кремниевых приборов в следствии большой энергии, необходимой для отрыва валентного электрона от ядра атома, этот предел более высок: до 200°С.

Следует иметь в виду, что изменение температуры транзистора в пределах рабочего диапазона также сказывается на его рабочих свойствах, что может вызывать температурную нестабильность параметров транзисторной аппаратуры.

Известно, что общий коллекторный ток $I_c = I_{c0} + I_{c\theta}$.

где $I_{к0}$ — температурный ток (неуправляемый).
 Температурный ток $I_{к0}$ создается движением неосновных зарядов через коллекторный переход и величина его быстро растет с повышением температуры. Это явление причиной того, что выходные характеристики транзистора поднимаются и наклон их увеличивается (рис. 2-33).

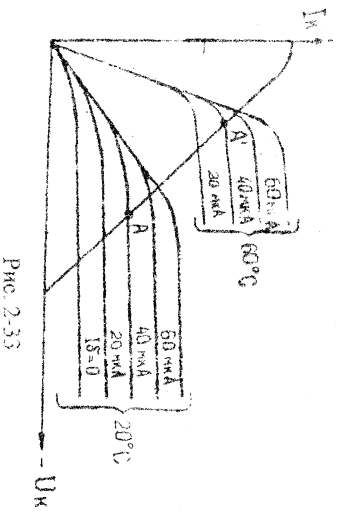


Рис. 2-33

При этом рабочая точка "А" смещается в положение "А'", что в большинстве случаев неопустимо (нарушается режим работы усилителя). Для обеспечения устойчивости в транзисторных каскадах предусматривается температурная стабилизация (рис. 2-34). В цепь эмиттера включается стабилизирующее сопротивление R_3 , падение напряжения на котором пропорционально току эмиттера и является обратным для эмиттерного перехода.

$$I_{в\kappa} = I_3 R_3$$

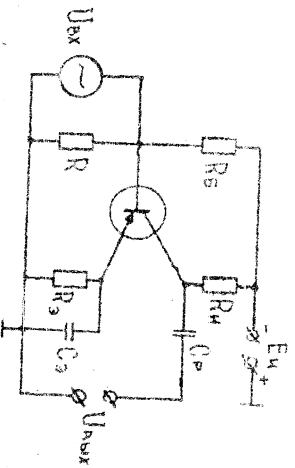


Рис. 2-34

Пусть за счет разорвана увеличится коллекторный ток $I_к$. При этом одновременно увеличится ток $I_3 = I_к + I_в$, что приведет к увеличению напряжения U_{R_3} .

Увеличение обратного напряжения на эмиттерном переходе приведет к снижению инжекции дырок из эмиттера в базу и, следовательно, к уменьшению коллекторного тока $I_к$. При уменьшении $I_к$ обратное напряжение снижается, что приводит к возрастанию тока $I_к$.

Таким образом, через резистор R_3 в схеме имеется последовательная обратная связь по постоянному току. Во избежание отрицательной обратной связи по перемен-

ному току и связанного с этим уменьшения усиления резистор R_3 шунтируется конденсатором C_3 .

ВЫВОДЫ:

1. Работа полупроводниковых приборов ухудшается при увеличении температуры.
2. Нормальная работа приборов обеспечивается:
 - применением схем температурной стабилизации;
 - правильным выбором материала полупроводника (предпочтительно кремний).

§2-15. РАДИОЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.

Радиационная стойкость — это способность полупроводниковых приборов сохранять свою работоспособность при воздействии излучений. Воздействие на полупроводниковый прибор различных ионизирующих облучений приводит к различным атомов полупроводника и увеличению электрической проводимости. Воздействие проникающей радиации вызывает в полупроводниковых приборах как обратимые, так и необратимые изменения. Обратимые изменения возникают от гамма-излучения, вызывающего допоницительную ионизацию вещества, вследствие чего возрастает его проводимость, уменьшается время жизни носителей. Эти эффекты исчезают после прекращения облучения за доли миллисекунды. Необратимые изменения обусловлены потоком нейтронов, которые вызывают смещение атомов в узлах решетки, а также изменение их структуры.

При этом изменяются проводимость вещества, время жизни носителей, тип проводимости.

На рис. 2-35 показано, как изменяется вольт-амперная характеристика диода при облучении его потоком нейтронов различной интенсивности.

С ростом потока возрастает прямое и падает обратное сопротивление диода, что приводит к нарушению его односторонней проводимости. У германиевых диодов, имеющих меньшую энергию ионизации возрастание обратного тока, обусловленное увеличением концентрации носителей, выражено более значительно, чем у кремниевых диодов.

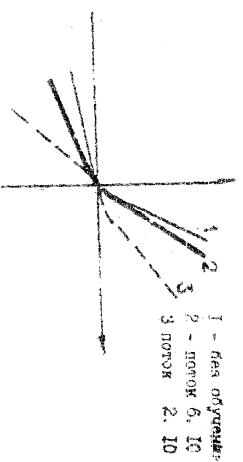


Рис. 2-35

При облучении транзисторов наблюдается уменьшение коэффициента усиления по току, что обуславливается уменьшением времени жизни носителей в базе, возрастанием числа рекомбинаций и, следовательно, увеличением тока базы.

1.5. Интерпретация данных, отказ 50% полупроводниковых приборов выделяется следующим значением потока быстрых нейтронов:

- для высокочастотных транзисторов - $6,5 \cdot 10^{11}$ нейтр/см²
- для высокочастотных транзисторов - $6 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²
- для полупроводниковых диодов - $1,6 \cdot 10^{13}$ нейтр/см².

Высокой радиационной стойкостью обладают туннельные диоды и канальные транзисторы. Это объясняется тем, что в них величина тока определяется основными носителями и уменьшение времени жизни неосновных носителей, возникающее при облучении нейтронами, не играет роли.

ВЫВОДЫ

1. Улучшение параметров полупроводниковых приборов под воздействием радиации может иметь
 - характер обратимых изменений (γ - излучение);
 - характер необратимых изменений (нейтронное излучение)
2. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов ниже, чем у электронных ламп.
3. Применение униполярных транзисторов, туннельных диодов повышает радиационную стойкость полупроводниковых приборов.

ГЛАВА III. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА.

§ 3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ.

Бурное развитие микроэлектроники, усложнение РЭА, повышение требований к ней привели к необходимости использования очень большого числа элементов для изготовления аппаратуры. В частности, особенно много их требуется для электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Создание таких машин, да и многих других типов РЭА из дискретных элементов, т.е. элементов, представляющих собой самостоятельные изделия (диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы и др.) стало практически невозможным. Это объясняется возрастанием требований, предъявляемым к радиоэлектронной аппаратуре. Эти требования заключаются в следующем:

1. Усложнение функций, выполняемых аппаратурой, приводит к возрастанию количественных и качественных требований в отношении функционального назначения аппаратуры. Количественно требования заключаются в том, что радиоэлектронная аппаратура используется не только в военной технике связи, но и в радиолокации, ЦВМ, ЭВМ, аналогово-вычислительных машинах, космических аппаратах. Качественно смысл этого требования заключается в возрастании ответственности выполняемых функций. Например, выход из строя аппарата слепой посадки самолета неизбежно приводит к аварии и т.д.
2. Резко возросла сложность радиоэлектронной аппаратуры. Так например, в аппаратуре самолета 300-350 тыс. различных элементов; комплекс управления космическим кораблем содержит до 10-12 млн. элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Вполне понятно, что с ростом числа элементов радиоэлектронной аппаратуры возрастает и интенсивность отказов.

По мере усложнения функций радиоэлектронного оборудования и условий, в которых оно работает, по мере увеличения ответственности этих функций, все более важными становятся такие показатели, как миниатюризация (уменьшение габаритов) и повышение надежности при сохранении и даже улучшении функциональных параметров.

Микроэлектроника - это область электроники, занимающаяся созданием электронных устройств и узлов РЭА чрезвычайно малых габаритов и высокой надежностью.

Переход к микроэлектронике произошел постепенно. Сначала в РЭА на дискретных элементах стали применять вместо старого навесного (объемного) монтажа печатные схемы. Они представляли собой нанесенные на платы из диэлектрика соединительные провода в виде металлических пленок, к которым припаивались дискретные элементы.

Объем аппаратуры при этом снижался. Далее стали конструировать РЭА из модулей и микромодулей. Это были смонтированные в минипортных корпусах устройства (усилители, генераторы, различные преобразователи и др.). Микромодули можно было быстро заменить в случае отказа. Специально для таких микромодулей были разработаны миниатюрные диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы, катушки и другие элементы. В некоторых типах микромодулей были использованы миниатюрные печатные схемы. Однако и микромодули не дали полного решения проблемы.

Огромный шаг в создании сложнейших типов РЭА позволили сделать интегральные микросхемы. Интеральными они названы потому, что все элементы или часть их и соединения между элементами нераздельно связаны и схема рассматривается как единое целое.

Особенности типов микросхем являются пленочные, в которых элементы и соединения выполняются в виде различных пленок (проводящие, резистивные и диэлектрические) на подложке из диэлектрика, и полупроводниковые, элементы которых выполнены внутри и на поверхности полупроводника. Применяются еще и так называемые гибридные микросхемы, у которых часть элементов дискретные. Эти элементы называются компонентами.

Главное достоинство ИС состоит в том, что они имеют малые размеры и массу, потребляют малую мощность от источников питания, обладают высокой надежностью за счет уменьшения числа паяных соединений, высоким быстродействием, так как при очень коротких соединительных линиях между элементами время пробега сигналов по этим линиям уменьшается, имеют относительно низкую стоимость. В таблице дано сравнение типов схем по плотности монтажа, т.е. числу элементов в единице объема, и надежности.

Вид схемы	Число элементов в 1 см ³	Интенсивность отказов, ч ⁻¹
Дамповые схемы с навесным монтажем	10^1	10^{-5}
Транзисторные схемы с навесным монтажем	1	10^{-6}
Схемы на микропроводах	10	10^{-7}
Пленочные и гибридные ИС	10^2	10^{-8}
Полупроводниковые ИС	10^3-10^5	10^{-9}

По числу элементов (степени интеграции) ИС подразделяются на несколько типов. Простые ИС имеют не более 10 элементов. В средних ИС число элементов от 10 до 100. Большие ИС или БИС, имеют от 100 до 1000 элементов. И сверхбольшие ИС, или СВБИС, насчитывают более 1000 элементов.

По характеру выполняемых функций ИС делятся на цифровые и аналоговые.

Цифровые ИС, применяемые главным образом в электронно-вычислительной технике, характерны тем, что они работают в импульсном режиме и могут находиться в одном из двух резко различных состояний, поскольку в современных ЭВМ применяются двойная система счисления, в которой используются только две цифры — 0 и 1. Аналоговые ИС работают в таких режимах, когда изменения токов и напряжений происходят непрерывно по тому или иному закону, например по синусоидальному. К аналоговым схемам относятся усилители, генераторы, различные преобразователи сигналов.

В развитии элементной базы, на которой строятся РЭА, можно выделить ряд этапов:

1 ЭТАП. Основной элементной базой являлись электровакуумные приборы. Ему соответствует первое поколение РЭА, которая отличалась большими габаритами, большой энергоемкостью и малой надежностью при решении сложных функциональных задач. Плотность составляла $0,2 \text{ эл/см}^2$.

II ЭТАП. Элементной базой стали дискретные полупроводниковые приборы. РЭА второго поколения обладала значительно меньшими габаритами, весом. Резко снизилось энергопотребление, расширились функциональные возможности, повысилась надежность аппаратуры. Плотность упаковки достигла 20 эл/см^2 .

III ЭТАП. Элементной базой аппаратуры третьего поколения, главной особенностью которой является высокая степень микроминиатюризации как элементов, так и аппаратуры в целом, стали интегральные микросхемы. Плотность упаковки составила 10^3 эл/см^2 .

IV ЭТАП. Сейчас уже существует аппаратура четвертого поколения создаваемая на интегральных микросхемах высокой степени интеграции (ВИС) и функциональных микросхемах. Компонентная база аппаратуры значительно сложнее традиционных дискретных элементов. Плотность упаковки достигает десятков тысяч эл/см^2 .

§3-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.

Изделия микроэлектроники обычно классифицируются по конструктивно-технологическому признаку (рис. 1).

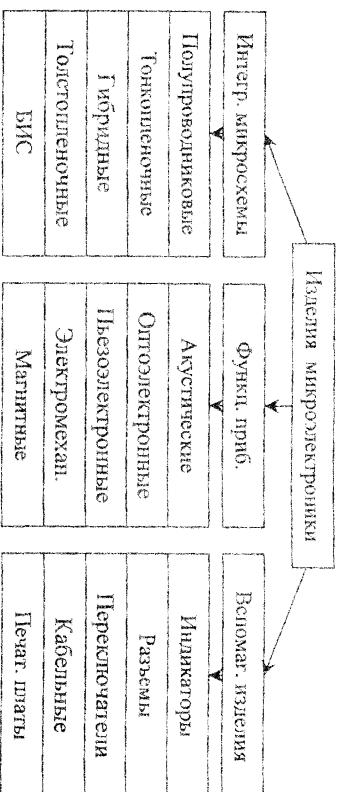


Рис. 1

1. Интегральные микросхемы — это микроэлектронные изделия, выполняющие функции преобразования и обработки сигнала, имеющие высокую плотность упаковки элементов, которые рассматриваются как единое целое. По своим конструктивным и технологическим признакам ИМС делятся на несколько типов.

2. Функциональные приборы и микросхемы — это изделия микроэлектроники, использующие различные физические явления и эффекты (тепловые, оптические, акустические, фотоэлектрические и др.) для выполнения определенных функций в РЭА.

Примером функциональной микросхемы может служить пьезоэлектрический фильтр, где кварцевая пластина с нанесенной на ее поверхности системой электронов выполняет функции многозвенного электрического фильтра. Подробнее направления развития функциональной микроэлектроники будут рассмотрены отдельным вопросом.

3. Конструктивно-вспомогательные элементы.

В их состав входят элементы, указанные на рисунке. Надо отметить, что в направлении их миниатюризации ведется большая работа, так как они оказывают достаточно большое влияние на принципы конструирования и компоновки РЭА.

Основные электрические процессы, связанные с преобразованием и обработкой сигналов в аппаратуре, построенной на интегральных и функциональных элементах, протекают внутри этих сложных элементов. Поэтому на современном этапе работу по проектированию и разработке РЭА и технологическая задача создания ее элементной базы совмещаются на одном предельности.

Особенности РЭА на микроэлементной базе таковы, что ремонт их в обычных условиях очень затруднен и сводится, как правило, к замене узлов, панелей, блоков. Это накладывает отпечаток на особенности подготовки личного состава, обслуживания и хранения современной РЭА.

§3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.

Интегральная микросхема (ИМС) - это изделие микроэлектроники высокой степени миниатюризации, которое с точки зрения разработки, испытаний, приемки, поставки и эксплуатации рассматривается как неделимая часть аппаратуры.

Интегральная схема представляет собой неразборный и неремонтируемый узел аппаратуры. Входящие в интегральную схему транзисторы, резисторы, конденсаторы и другие детали рассматриваются как компоненты интегрального элемента, параметры и характеристики которых отдельно не нормируются. При создании ИМС в едином технологическом процессе формируются как элементы, так и соединения.

Грубеемкость разработки ИМС очень велика. Особенно сложной становится "ручная" разработка больших интегральных схем.

Здесь колоссальный объем вычислительной работы и случайные ошибки разработчиков могут затянуть процесс проектирования на несколько лет. Поэтому разработка больших интегральных схем возможна только с помощью комплекса ЭВМ для машинного проектирования. При этом не только сокращаются затраты времени на разработку, но и существенно повышается качество. Чаще всего ИМС синтезируются из готовых типовых элементов схем, одновременно рассчитанных и хранящихся в памяти вычислительного комплекса.

В настоящее время выделяются два направления развития ИМС:

1. Гибридная технология.
2. Полупроводниковая технология.

ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ (ГИС).

ГИС устроены таким образом: на диэлектрической подложке в виде тонких пленок выполняются резисторы, конденсаторы, межсоединения. Бескорпусные транзисторы и диоды отдельно крепятся к подложке и соединяются выводами с контактными площадками (рис. 2).

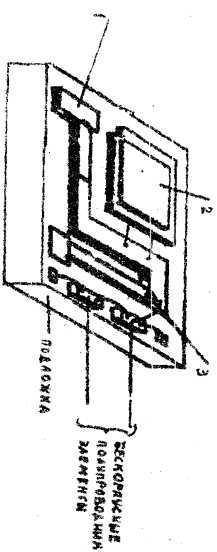


Рис. 2. Устройство гибридной интегральной схемы. 1, 2, 3 - тонкие пленки.

Нанесение пленок элементов осуществляется в один или несколько слоев через маски соответствующей конфигурации или методом фотолитографии с последующим травлением. Последний метод имеет высокую разрешающую способность.

Так как величина сопротивлений, емкостей и индуктивностей при такой технологии ограничена, то при необходимости применяются навесные элементы в пределах размеров корпуса микросхем. Достоинства ГИС:

- простота технологического оборудования и относительно малая стоимость производства;
 - возможность оперативного изменения схемы с целью улучшения ее параметров.
- Недостатки ГИС:
- сравнительно большие габариты;
 - невысокая надежность из-за паяк навесных элементов;
 - невысокая стойкость к механическим воздействиям.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ.

В этих схемах все элементы выполняются в едином кристалле полупроводника (рис. 3).

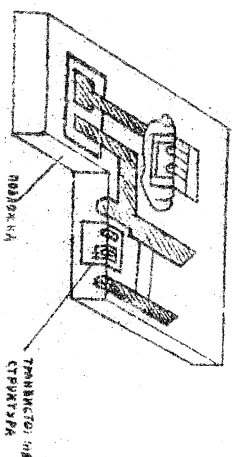


Рис. 3. Устройство полупроводниковой интегральной схемы.

Все элементы схемы выполняются в виде транзисторных структур. Например, роль резистора может выполнять сопротивление р-п перехода. Его же используют для получения емкости. Индуктивность таким способом получить нельзя. В качестве индуктивности используются входные сопротивления схемы транзистора с общей базой. Некоторые компоненты полупроводниковых схем могут выполняться путем напыления.

Поскольку все компоненты интегральной схемы в данном случае выполняются не в диэлектрической, а в полупроводниковой подложке, то возникает задача изоляции их от подложки. Наиболее широко применяется изоляция с помощью обратного смещения р-п перехода. Например, транзистор имеет не два, а три электронно-дырочных перехода. Один из них используется для изоляции всей структуры. Иногда применяется и другой способ изоляции - с помощью тонкого слоя диэлектрика (двуокись кремния).

Полупроводниковая технология более сложная и дорогая. Поэтому она перспективна для изготовления больших тиражей схем.

Достоинства ИМС:

- малые габариты (например в современных схемах на подложке 6х6 мм реализуется до 300 тысяч элементов);
- высокая надежность и стойкость к механическим воздействиям как следствие отсутствия межсоединений.

Интегральные схемы по степени интеграции, т.е. по количеству элементов на подложке делятся на малые, средние и большие (МИС, СИС, БИС).

ИС-1	№-10
ИС-2	№-10 ² МИС
ИС-3	№-10 ³ СИС
ИС-4	№-10 ⁴
ИС-5	№-10 ⁵ БИС

§ 3.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИС

Как было указано выше, полупроводниковые ИС имеют, все элементы вытравлены внутри (в приповерхностном слое) и на поверхности полупроводниковой подложки, называемой кристаллом, которая представляет собой пластинку кремния толщиной 200-300 мкм. Размеры кристалла бывают обычно от 1,5х1,5 до 6х6 мм. Но сравнении с дисковыми и гибридными ИС полупроводниковые микросхемы имеют наиболее высокое число элементов в единице объема и высочайшую надежность (наименьшую интенсивность отказов). Некоторым недостатком полупроводниковых ИС надо считать несколько худшее качество пассивных элементов (резисторы и конденсаторы) и невозможность создания в полупроводнике катушек индуктивности. Тем не менее полупроводниковые ИС занимают все большее место в микроэлектронике, так как именно на их основе делаются большие и сверхбольшие ИС.

ИЗОЛЯЦИЯ

Поскольку все элементы делаются в едином полупроводниковом кристалле, то важно обеспечить изоляцию элементов от кристалла и друг от друга. Наиболее простой и дешевой является изоляция p-p переходом. В этом случае в кристалле, например, из кремния типа P, методом диффузии делаются области типа n, называемые "карманами" (рис.4).

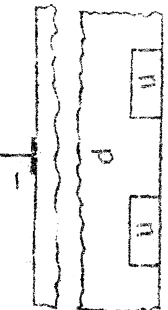


Рис. 4. Изоляция элементов p-p переходом.

В "карманах" в дальнейшем формируются необходимые пассивные или активные элементы, а p-p переход между "карманом" и кристаллом в рабочей области ИС постоянно находится под обратным напряжением. Для этого на кристалл постоянно подается отрицательный потенциал в несколько вольт. Кремниевый p-p переход при обратном напряжении имеет очень высокое сопротивление (несколько МОм), которое и выполняет роль изоляции.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Методом диффузии в кристалле создаются области коллектора, базы и эмиттера (рис. 5).

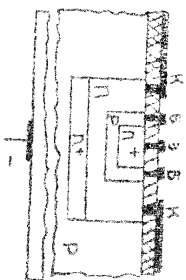


Рис. 5. Биполярный транзистор полупроводниковый ИС.

Структура транзистора углубляется в кристалл не более чем на 10-15 мкм, а линейные размеры транзистора на поверхности не превышают нескольких десятков микрометров.

Как правило, изготавливаются транзисторы типа p-p-n. Внутренний (скрытый) слой с повышенной концентрацией примесей в коллекторе служит для уменьшения сопротивления и, следовательно, потерь мощности в области коллектора. Но у коллекторного перехода область коллектора должна иметь пониженную концентрацию примесей, чтобы переход имел большую толщину.

Тогда емкость у него будет меньше, а напряжение пробоя - выше. Область эмиттера также часто делают типа n для уменьшения сопротивления и увеличения инжекции. Сверху на транзисторе создается защитный слой оксида SiO₂. От областей коллектора и базы часто делают по два вывода, для того чтобы можно было соединить биполярный транзистор с соседними элементами без пересечений соединительных линий. Также пересечения весьма нежелательны, так как они значительно усложняют производство.

Типичные параметры биполярных транзисторов полупроводниковых ИС таковы: коэффициент усиления тока базы 200, транзитная частота до 500 мГц, емкость коллектора до 0,5 пф, пробивное напряжение для коллекторного перехода до 50В, для эмиттерного до 8 В.

МНОГОЭМИТТЕРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Помимо обычных транзисторов в цифровых полупроводниковых ИС применяются также многоэмиттерные транзисторы. Так, например, четырехэмиттерный транзистор, можно опирать подачей импульса прямого напряжения на любой из четырех эмиттерных переходов. К каждому эмиттеру подключается свой источник отрицательного импульса. При этом важно, что такой импульс напряжения не проникнет в другие источники входных импульсов, так как эмиттерные переходы, не работающие в данный момент, будут находиться под обратным напряжением.

СУПЕРЪЕТА - ТРАНЗИСТОР

В микросхемах иногда делают транзисторы с таким названием. В них база имеет толщину всего лишь 0,2-0,3 мкм и за счет этого коэффициент β достигает нескольких тысяч. Однако предельное напряжение U_{к-э} в этих транзисторах не превышает 1,5-2В. При большом напряжении происходит смыкание коллекторного перехода с эмиттерным.

СОСТАВНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Составные транзисторы представляют собой пару транзисторов, соединенных так, что получается элемент с очень высоким коэффициентом усиления β .

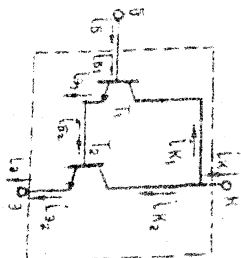


Рис. 6. Электрическая схема составного транзистора.

Результирующий коэффициент усиления такого составного транзистора:

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$$

При $\beta_1 = \beta_2 = 100$ получаем $\beta = 10^4$. Практически β может достигать нескольких тысяч.

Раньше диоды ИС выполнялись в виде структуры из двух областей с различным типом электропроводимости, т. е. в виде обычного n-p перехода. В последние годы в качестве диодов стали применяться биполярные транзисторы в диодном включении. Это оказалось удобным для производства. Возможны пять вариантов диодного включения транзистора. Они показаны на рисунке 7 и несколько отличаются друг от друга по своим параметрам.

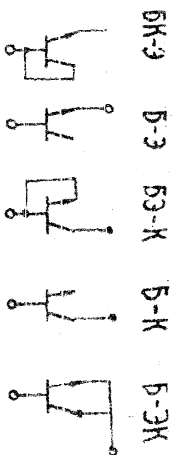


Рис. 7. Варианты использования транзисторов в качестве диодов.

В варианте БК-Э замкнуты коротко база и коллектор. У такого диода время восстановления, т. е. время переключения из открытого состояния в закрытое, наименьшее - единицы наносекунд. В варианте Б-Э используется только эмиттерный переход. Время переключения в этом случае в несколько раз больше. Оба этих варианта имеют минимальную емкость (десятые доли пикофарды) и минимальный обратный ток, однако и минимальное пробивное напряжение. Последнее не существует для низковольтных ИС. Вариант БЭ-К, в котором закорочены база и эмиттер, вариант Б-К с использованием одного коллекторного перехода по времени переключения и емкости примерно равновалены варианту Б-Э, но имеют более высокое пробивное напряжение (40-50 В) и больший обратный ток. Вариант Б-ЭК с параллельным соединением обоих переходов имеет наибольшее время переключения (100 нс), наибольший обратный ток, несколько большую емкость и такое же малое пробивное напряжение, как и в первых двух вариантах. Чаще всего используется вариант БК-Э и Б-Э.

Некоторые из рассмотренных вариантов диодов иногда применяются в качестве стабилизаторов. Для стабильного напряжения 5-10 В используют вариант Б-Э при определенном напряжении в режиме электрического пробоя.

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С N-P ПЕРЕХОДОМ

Эти транзисторы могут быть изготовлены совместно с биполярными — на одном кристалле. На рисунке 8 показана структура полевого транзистора с n - каналом.

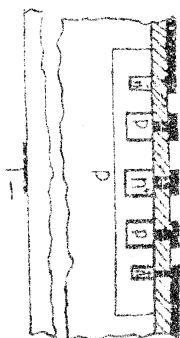


Рис. 8. Полевой транзистор полупроводниковой ИС с каналом n - типа.

В "кармане" n - типа созданы области (p - типа) стока и истока и область (p-типа) затвора. Сток расположен в центре, затвор вокруг него. Для уменьшения начальной толщины канала иногда внутри делают скрытый слой p, но это связано с усложнением технологических процессов.

РЕЗИСТОРЫ

В полупроводниковых ИС используются так называемые диффузионные резисторы, представляющие собой созданные внутри кристалла области с тем или иным уровнем электропроводимости. На рисунке 9 показана структура такого резистора.

Сопrotивление диффузионного резистора зависит от длины, ширины и толшины области, выполняющей роль резистора, и от углового сопротивления, т. е. от концентрации примесей. Резистор типа p делается одновременно с базами транзисторов. В том случае угловое сопротивление составит сотни Ом на квадрат и могут быть получены номиналы сопротивления до десятков кОм. Для увеличения сопротивления иногда резистор делают энгагообразной конфигурации. Если необходимы относительно малые сопротивления (единицы и десятки Ом), то резисторы изготавливают одновременно с эмиттерными областями типа n - транзисторов.

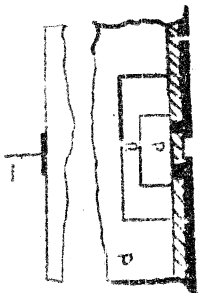


Рис. 9. Диффузионный резистор полупроводниковых ИС.

КОНДЕНСАТОРЫ

Типичным для полупроводниковых ИС является диффузионный конденсатор, в котором используется барьерная емкость n-p перехода. Емкость такого конденсатора, структура которого показана на рисунке 10, зависит от площади перехода, диэлектрической проницаемости полупроводника и толшины перехода, которая, в свою оче-

редь, зависит от концентрации примесей. Если нужна большая емкость, то используют переход, сделанный одновременно с эмиттерными переходами транзисторов.

Диффузионные конденсаторы работают только при наличии на них обратного напряжения, которое должно быть постоянным для получения постоянной емкости. Так как барьерная емкость является нелинейной, то диффузионный конденсатор может работать в качестве конденсатора переменной емкости, регулируемой электрически - путем изменения постоянного напряжения на конденсаторе. Изменяя обратное напряжение в пределах 1-10 В, можно изменить емкость в 2-2,5 раза. В некоторых схемах РЭА должны применяться нелинейные конденсаторы. Их функции могут выполнять диффузионные конденсаторы.

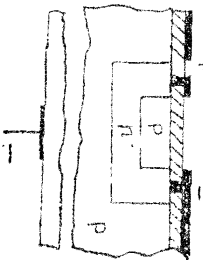


Рис. 10. Диффузионный конденсатор полупроводниковой ИС

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ (ДУБЛИРОВАНИЕ)

Как уже было указано, полупроводниковые ИС имеют весьма важную надежность. Однако в некоторых, особо ответственных случаях необходимо надежность еще повысить. Одним из методов повышения надежности является резервирование (дублирование) элементов. Новейшим этот принцип на практике дублирования диода. На рисунке показана схема включения четырех диодов вместо одного, причем диоды соединены друг с другом последовательно и параллельно.

Отказ диода может быть, как правдо, следствием либо пробоя (короткого замыкания), либо нарушения проводимости. Пусть каждый диод имеет прямое сопротивление 10 Ом и обратное - 1 Мом.

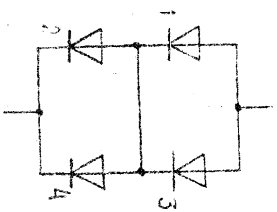


Рис. 11. Принцип дублирования диода.

Если, например, пробой диод 1 и его сопротивление приближенно можно считать равным нулю, то будут работать диоды 2 и 4, которые создадут прямое сопротивление 5 Ом и обратное 0,5 Мом. А если в диоде 1 произойдет нарушение контакта (обрыв), то останутся работающими диоды 2,3,4. Они дадут прямое сопротивление 15 Ом и обратное 1,5 Мом.

Аналогично все будет при отказе любого диода. Вероятность отказа одновременно двух диодов, приводящая к отказу работы всей четверки, ничтожно мала. Таким образом, повышение надежности по принципу дублирования дает весьма ощутимый эффект.

§3.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ.

Работа различных полупроводниковых приборов изучая (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототристоры) основана на использовании внутреннего фотоэффекта, который состоит в том, что под действием излучения в полупроводниках происходит генерация пар носителей заряда - электронов и дырок. Эти дополнительные носители увеличивают электрическую проводимость. Такая дополнительная проводимость, обусловленная действием фотонов, получила название фотопроводимости.

В некоторых приборах за счет фотогенерации электронов и дырок возникает ЭДС, которую принято называть фото-ЭДС, и тогда эти приборы работают как источники тока. А процессы рекомбинации электронов и дырок в полупроводниках создают фотоны, и при некоторых условиях полупроводниковые приборы могут работать в качестве источников излучения.

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ.

В качестве маломощных источников полупроводниковых источников излучения все шире применяются световызлучающие диоды (светодиоды), работающие при прямом напряжении. Иногда их называют инжекционными светодиодами. А свечение, возникающее в светодиодах, относят к явлению так называемой инжекционной электролюминесценции.

Свечение полупроводникового диода наблюдал еще в начале 20-х годов в Нижегородской радиолаборатории О.В. Лосев во время своих экспериментов по генерации энергетических катодных с помощью кристаллического детектора. Однако дальнейшее изучение этого явления началось лишь в середине 50-х годов. В настоящее время промышленность выпускает десятки типов светодиодов и более сложных инжекционных приборов, представляющих собой комбинации того или иного числа светодиодов.

Принцип работы светодиодов заключается в следующем. При прямом напряжении в полупроводниковом диоде происходит инжекция носителей заряда из активной области в область базы. Инжектированные электроны рекомбинируют с основными носителями базовой области. Рекомбинирующие электроны переходят с более высоких энергетических уровней зоны проводимости на более низкие уровни. При этом выделяется фотон, энергия которого почти равна ширине запрещенной зоны.

Германий и кремний непригодны для светодиодов, так как у них ширина запрещенной зоны слишком мала. Для современных светодиодов применяют главным образом фосфид галлия GaP и карбид кремния SiC, а также некоторые тройные соединения. Внесение в полупроводника некоторых примесей позволяет свечение различного цвета.

Нормально светодиодов, дающих видимое свечение, выпускаются светодиоды инфракрасного (ИК) излучения, изготавливаемые преимущественно из арсенида галлия GaAs. ИК - светодиоды применяются в фотореле, различных датчиках и входят в состав некоторых оптронов. Существуют светодиоды переменного цвета свечения с

вектор суммируемых перекладки, один из которых имеет максимум спектральной плотности в красной части спектра, а другой — в желтой. Цвет свечения та-кого люминофора зависит от соотношения токов через переходы. Светодиоды являются ос-новной более сложными приборами. Линейная светодиодная шкала представляет собой интегральную микросхему, состоящую из последовательно размещенных светодиод-ных структур (сегментов), число которых может быть от 5 до 100. Такие линейные шкалы могут заменять цифроые измерительные приборы и служат для отображения непрерывно изменяющейся информации.

Цифро-буквенный светодиодный индикатор также сделан в виде интегральной микросхемы из нескольких светодиодных структур (сегментов), расположенных так, чтобы при соответствующих комбинациях светящихся сегментов получалось изобра-жение цифры или буквы. Аналогичные индикаторы позволяют воспроизвести одну цифру от 0 до 9 и некоторые буквы. Многоцветные индикаторы воспроизводят од-новременно несколько знаков.

В течение ряда лет разрабатываются многоэлементные блоки, содержащие де-сятки тысяч светодиодов для получения сложных изображений. На этом принципе могут быть созданы плоские экраны для телевизионных приемников, замещающие кинескопы.

Цифро-буквенные индикаторы широко используются в измерительной аппара-туре, устройствах автоматизации и вычислительной техники, микрокалькуляторах, элек-тронных часах и др.

ОПТРОНЫ

Оптроны — это полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь. В источ-нике излучения электрические сигналы преобразуются в световые, которые воздейст-вуют на фотоприемник излучения и создают в нем снова электрические сигналы. Ес-ли оптрон имеет один излучатель и один приемник излучения, то его называют опто-парой или элементарным оптроном. Микросхема, состоящая из одной или нескольких оптопар с дополнительными соединительными и управляемыми устройствами, называ-ется оптоэлектронной интегральной микросхемой. На выходе и входе оптрона всегда имеются электрические сигналы, а связь входа с выходом осуществляется световыми-сигналами. Цель излучателя является управляющей, а цель фотоприемника — управ-ляемой.

Важнейшими достоинствами оптронов являются следующие их свойства:

1. Отсутствие электрической связи между входом и выходом и обратной связи между фотоприемником и излучателем.
2. Широкая полоса частот колебаний, пропускательных оптронов. Возможность пе-релани сигналов с частотой от нуля до 10^{13} - 10^{14} Гц.
3. Возможность управления выходными сигналами путем воздействия на опти-ческую связь прибора.
4. Высокая помехозащищенность оптического канала, т.е. его невосприимчи-вость к воздействию внешних электромагнитных полей.
5. Возможность совмещения оптронов в РЭА с другими полупроводниковыми и микроэлектронными приборами.

Рассмотрим различные типы оптронов. Отличающиеся друг от друга фотоприем-никами.

Резисторные оптопары имеют в качестве излучателя сверхминипаторную лам-почку накаливания или светодиод, лающий видное или инфракрасное излучение.

§ 2-11. УСИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ПОДЛЕЖАЮЩИМ (ОП).

Принципиальная и структурная схемы усилителя на транзисто-ре с ОП изображены на рис.2-21.

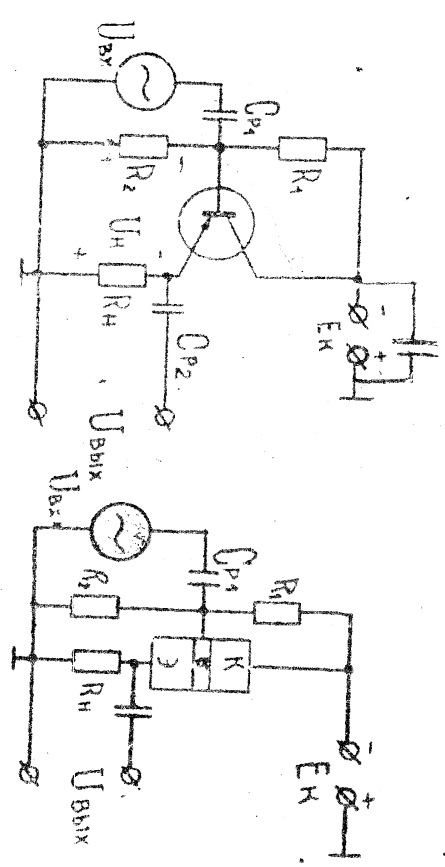


Рис.2-21

В данной схеме: $I_{кх} = I_{вх}$, $I_{ввых} = I_{с}$.

$$U_{вх} = U_{бк}, \quad U_{ввых} = U_{жк}.$$

С сопротивлением R_2 делитель на эмиттерный переход подается прямое напряжение U_{R_2} , выходящее нижнего диода из эмиттера и база.

Так как эмиттерный переход открыт, то в цепи коллектора будет протекать постоянный ток $I_{к0}$:

$$+E_k \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_н \rightarrow \text{Э} \rightarrow \text{Б} \rightarrow \text{К} \rightarrow E_k.$$

Отсюда ток, протекающий по сопротивлению нагрузки $R_н$, создает на нем постоянное напряжение $U_{R_н}$, которое прикладывается к

ЛИТЕРАТУРА

1. Колтушев В.А. Электронные элементы военной техники связи. Возниклият. М.-1974 г.
2. Колтушев В.А. Электронные приборы. Высшая школа, 1979 г.
3. Цинский Ю.Д., Житарев А.А. Электронные приборы. М.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники. Энергоатомиздат, -1965 г.
5. Житарев А.А., Шамбаев Г.Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы. -М. Высшая школа, 1984 г.
6. Котан Д.М. Полупроводниковые диоды. - М.: Энергоиздат, 1983 г.
7. Погов Ю.Р. Оптоэлектроника -М.: Советское радио, 1977г.
8. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники - М.: Советское радио, 1980 г.
9. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов. - М.: Энергия, 1977 г.
10. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств. Под общ. ред. А.А. Куликовского. - М.: Энергия, 1977 г.

эмиттерному переходу в обратном направлении.

Таким образом, напряжение смещения на эмиттерном переходе состоит из суммы двух напряжений: прямого U_{B2} и обратного U_{C1} :

$$E_{C1} = U_{C1} - U_{B2}.$$

Кроме тока I_{C1} и тока деградации в схеме протекает значительный по величине постоянный ток базы I_{B1} :

$$E_{C1} \rightarrow I_{B1} \rightarrow R_{B1} \rightarrow B \rightarrow R_{B1} \rightarrow E_{C1}.$$

Из рассмотренного выше следует, что по сравнению с нагрузкой R_{H1} протекает ток коллектора и ток базы, т.е. эмиттерный ток. Следовательно, входным током является ток эмиттера. При отсутствии входного сигнала ($0 - t_1$) токи и напряжения в схеме будут постоянными, а напряжение на выходе равно нулю (рис.2-22).

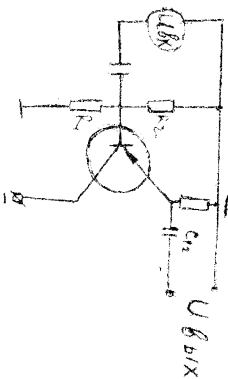
При подаче входного сигнала ($t_1 - t_2$) токи в цепи базы и коллектора будут пульсировать.

За положительный полупериод входного сигнала ($t_1 - t_2$) прямое напряжение на эмиттерном переходе меньше E_{C1} , что приводит к увеличению токов I_{B1} и I_{C1} . В момент времени t_2 прямое напряжение на эмиттерном переходе будет минимальным, в результате чего токи I_{B1} и I_{C1} также будут минимальными.

За отрицательный полупериод входного сигнала ($t_3 - t_4$) прямое напряжение на эмиттерном переходе больше E_{C1} , что приводит к увеличению токов I_{B1} и I_{C1} . В момент времени t_4 прямое напряжение на эмиттерном переходе будет максимальным, а токи I_{B1} и I_{C1} также достигнут максимальных значений.

Таким образом, под воздействием входного сигнала напряжение на сопротивлении нагрузки R_{H1} будет пульсировать.

Переменная составляющая напряжения с сопротивлением нагрузки R_{H1} через радиодиффузионный конденсатор C_{D1} подается на выход схемы. Из графика (рис.2-22) видно, что входной и выходной сигналы находятся в фазе, т.е. усилитель с (К фазу сигнала не изменяет).



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2	стр.
ГЛАВА I. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ	2	
1-1. Виды полупроводниковых материалов, структура полупроводников	3	
1-2. Носители зарядов в собственном и примесном полупроводниках	5	
1-3. Токи в полупроводнике	8	
1-4. Энергетико-диффузионный переход	16	
1-5. Устройство и принцип действия полупроводникового диода	16	
1-6. Статические характеристики и параметры полупроводникового диода	18	
1-7. Типы полупроводниковых диодов	22	
ГЛАВА II. ТРАНЗИСТОРЫ	22	
2-1. Устройство и маркировка транзисторов	30	
2-2. Принцип действия транзистора	32	
2-3. Эквивалентная схема транзистора	34	
2-4. Усилительные свойства транзистора	37	
2-5. Схемы включения транзистора	38	
2-6. Статические характеристики и параметры транзистора в схеме с ОБ	40	
2-7. Статические характеристики	43	
2-8. Характеристики транзистора в динамическом режиме	45	
2-9. Усилитель на транзисторе с общим эмиттером	46	
2-10. Усилитель на транзисторе с общей базой	49	
2-11. Усилитель на транзисторе с общей коллектор	53	
2-12. Специальные полупроводниковые приборы	57	
2-13. Частотные свойства полупроводниковых приборов	62	
2-14. Температурные свойства полупроводниковых приборов	64	
2-15. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов	66	
ГЛАВА III. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА	66	
3-1. Общие сведения о микроэлектронике	68	
3-2. Классификация изделий микроэлектроники	70	
3-3. Общая характеристика интегральных микросхем	71	
3-4. Полупроводниковые МС	73	
3-5. Полупроводниковые оттолевые приборы	78	
3-6. Функциональная микроэлектроника	80	
ЛИТЕРАТУРА	82	

Стефаненко Павло Вікторович

ПОЛУПРОВОДНИ ПРИБОРИ

Учебний посібник

Рекламно-видавнича агенція ДонДІТУ
83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58,
Гірничий інститут, 9-й учбовий корпус
Тел.: (0622) 99-99-94, 90-36-31

Укладання, коректура і редакційно-технічне оформлення Ю. В. Кошкірової
Комп'ютерна верстка В. Д. Довчишкіно

Надруковано в печатні 17.09.2000 г. Формат 60×84 1/8. Бумага PolSpeed. Печать цифровая
графаретная. Усл. печ. л. 21,04. Уч.-изд. л. 20,79. Тираж 200 экз. Заказ № 608. Цена
договорная.