

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВПО
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электроэнергетика и электротехника»

А.Ф. Анчугова, А.Н. Сущикова

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Учебное пособие

г. Набережные Челны,

2014г.

УДК 621.38

Анчугова А.Ф., Сущикова А.Н. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие - Набережные Челны, Издательско-полиграфический центр Набережночелнинского института (филиала) К(П)ФУ, 2014.- 60 с.

В учебном пособии рассмотрены принципы работы, устройство полупроводниковых приборов, их характеристики, параметры, а также их основные методы расчета.

Рецензент: к.т.н., В.В. Заморский (Наб.Челны, НЧИ КФУ)

Печатается в соответствии с решением научно-методического совета Набережночелнинского института (филиала) Казанского (приволжского) федерального университета.

© Набережночелнинский институт ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 2014 г.

Электрофизические свойства полупроводников

Все вещества состоят из атомов. Атомы состоят из положительного заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра (рис.1). Заряд ядра определяется положительно заряженными протонами, содержащимися в ядре. Отрицательный заряд электрона равен по величине положительному заряду протона. Электроны вращаются вокруг ядра по строго определённым орбитам, сгруппированным в слои, количество электронов в слоях строго определено. Электроны, находящиеся во внешних слоях, определяют валентность элемента. Внешний слой легко отдаёт и воспринимает электроны. Чем дальше ядра находится орбита электрона, тем большей энергией он обладает, то есть, расположен на более высоком энергетическом уровне.

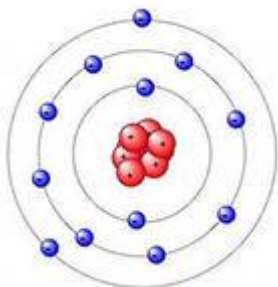


Рис.1

Под воздействием тепла, света или других внешних факторов электрон из валентной зоны может перейти на ещё более удаленную от ядра орбиту. Такой электрон при дальнейшем увеличении энергии может покинуть поверхность вещества.

Если электрон переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, выделяется некоторое количество энергии, называемое квантом. Если атом поглощает один квант энергии, то электрон переходит с более низкого уровня на более высокий. Таким образом, энергия электронов изменяется только квантами, то есть определёнными порциями.

Проводники, полупроводники и диэлектрики

Все вещества, существующие в природе, принято делить на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики. Данные группы веществ имеют разную зонную структуру и обладают разным электрическим сопротивлением. При рассмотрении зонной структуры веществ выделяют три основные зоны, играющие роль в создании электропроводности веществ.

Электроны располагаются по разным энергетическим уровням, которые объединяются в зоны. В соответствии с зонной теорией твёрдого тела электроны внешней оболочки атома заполняют энергетические уровни, составляющие валентную зону. Более низкие энергетические уровни составляют другие зоны, которые не играют роли в явлениях электропроводности.

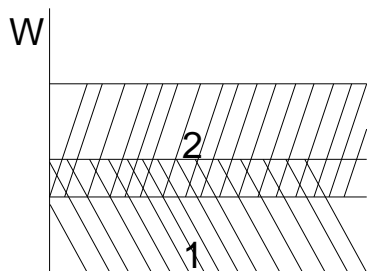
Металлы и полупроводники обладают большим количеством электронов, находящихся на более высоких энергетических уровнях. Эти уровни составляют зону проводимости. Высокая электропроводность металлов обеспечивается электронами проводимости. Эти электроны совершают беспорядочное движение внутри вещества, переходя от одних атомов к другим.

Третья зона располагается между зоной проводимости и валентной зоной. Это запрещённая зона, которую составляют уровни энергии, на которых электроны не могут находиться. Ширина запрещённой зоны - разность между энергией нижнего уровня зоны проводимости и верхнего уровня валентной зоны, составляет несколько электрон – вольт (энергия, которую приобретает электрон, разгоняясь в электрическом поле с разностью потенциалов в один вольт).

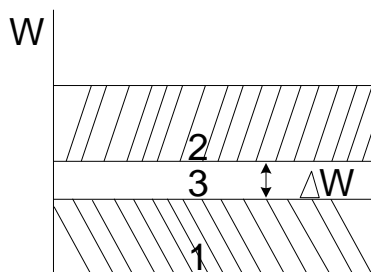
Понятно, что проводящие свойства вещества зависят от ширины запрещенной зоны. Чем шире запрещённая зона, тем меньше количество электронов, которые смогут проникнуть из

валентной зоны в зону проводимости, тем меньше проводимость кристалла.

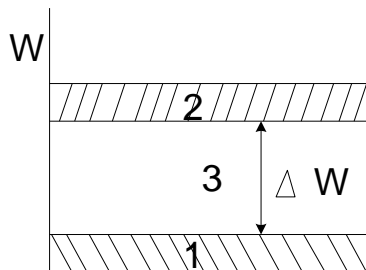
Рассмотрение зонных энергетических диаграмм наглядно показывает проводящие свойства всех веществ (рис.2).



а)



б)



в)

Рис. 2. Зонные энергетические диаграммы различных веществ: а)проводник б)полупроводник в) диэлектрик. 1 – валентная зона, 2 –зона проводимости, 3 – запрещённая зона.

Проводники. Валентная зона и зона проводимости у проводников не разделены, электроны свободно переходят из валентной зоны в зону проводимости и приобретают упорядоченную скорость под воздействием внешнего приложенного напряжения (в проводнике протекает электрический ток). Удельное электрическое сопротивление проводников $\rho = 10^{-6} - 10^{-8}$ Ом·м. При увеличении температуры сопротивление проводника увеличивается.

Полупроводники. Валентная зона и зона проводимости разделены узкой запрещённой зоной $\Delta W = 0,1 \div 3$ эВ. У полупроводников проводимость определяется количеством электронов, преодолевших запрещённую зону и проникших в зону проводимости. Удельное электрическое сопротивление полупроводников $\rho = 10^{-5} - 10^7$ Ом·м. Сопротивление полупроводников уменьшается с увеличением температуры. При низких температурах полупроводники являются диэлектриками.

Диэлектрики. Валентная зона и зона проводимости разделены широкой запрещённой зоной $\Delta W = 6$ эВ. Удельное электрическое сопротивление диэлектриков $\rho = 10^8 - 10^{13}$ Ом·м. При нормальной температуре у диэлектриков в зоне проводимости имеется небольшое количество электронов, поэтому диэлектрик обладает ничтожно малой проводимостью. При нагревании электроны из валентной зоны получают добавочную энергию и переходят в зону проводимости. Диэлектрик при этом приобретает заметную проводимость.

Электропроводность полупроводников

В полупроводнике все валентные электроны прочно связаны кристаллической решёткой. Чтобы создать проводимость в полупроводнике необходимо освободить электроны, разорвав ковалентные связи. Это возможно, если сообщить им энергию, источником которой может служить теплота. Величина сообщаемой энергии должна быть равна или превышать

энергию запрещённой зоны. Уже при комнатной температуре часть электронов разрывают ковалентные связи (рис.3) и переходят из валентной зоны в зону проводимости. Если к кристаллу полупроводника приложить внешнее напряжение, то движение электронов становится упорядоченным, начинает протекать электрический ток. Электропроводность полупроводника, обусловленная свободными электронами, называется электронной, а ток, протекающий при этом – электронным.

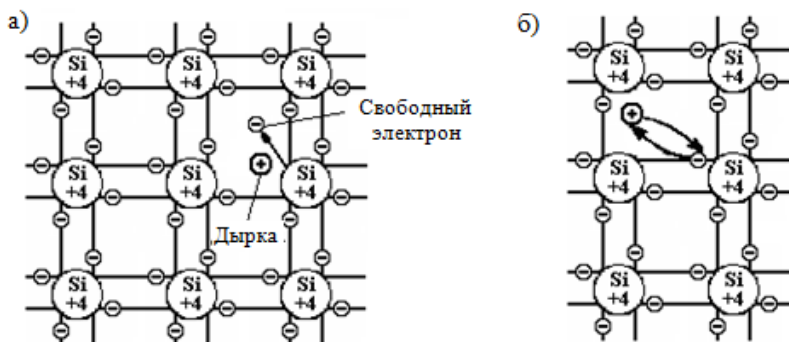


Рис 3. Генерация пар «свободный электрон – дырка» в результате разрушения ковалентной связи (а) и перемещение дырки в кристалле (б).

В результате разрыва валентных связей и ухода электрона у атома появляется положительный заряд, а в ковалентной связи оказывается пустое (вакантное) место, называемое дыркой. Это пустое место может быть занято другим электроном из соседней связи, тогда на его месте также образуется дырка. Таким образом, одновременно с перемещением электронов, в полупроводнике происходит и перемещение дырок. Если к кристаллу полупроводника приложить напряжение, то перемещение дырок станет упорядоченным и противоположным

перемещению электронов. Электропроводность полупроводника, возникающая в результате перемещения дырок называют дырочной, а ток, протекающий при этом – дырочным.

Электроны и дырки, способные создавать электропроводность, называются носителями заряда. Таким образом, под воздействием тепла в полупроводнике создаётся генерация пар электрон – дырка. Одновременно с генерацией пар электрон – дырка, в полупроводнике происходит процесс рекомбинации (исчезновения) носителей заряда. Как электроны в зоне проводимости, так и дырки в валентной зоне совершают тепловое движение в течение определенного времени, называемого временем жизни заряда и заканчивающегося процессом захвата электронов зоны проводимости дырками валентной зоны. Электроны снова занимают свободные места, объединяясь с дырками. Электропроводность полупроводника, возникающая в результате образования пар электрон – дырка называется собственной электропроводностью, а сам полупроводник – собственным полупроводником. Однако в природе нет собственных полупроводников. Полупроводники могут содержать различные примеси. Внесение примесей в полупроводник приводит к возрастанию его электропроводности. При этом характер электропроводности полупроводника будет зависеть от примесного вещества. В качестве основного кристалла в полупроводниковых приборах чаще всего используют четырёхвалентные элементы: германий или кремний.

Образование полупроводников *n* – типа и *p* – типа.

Рассмотрим два случая внесения примеси в полупроводник. **Образование полупроводника *n* – типа.** Если в расплав предварительно очищенного германия (кремния) внести примесь элемента пятой группы периодической системы Менделеева (фосфор, мышьяк, сурьма), то примесный атом занимает место

атома исходного полупроводника (рис.4). При этом четыре электрона примесного атома вступают в ковалентную связь с атомами исходного полупроводника, а пятый электрон остаётся свободным. Для того чтобы он оторвался от атома достаточно небольшого количества энергии. При этом примесь, отдаёт электроны в кристалл исходного полупроводника, примесный атом становится положительным.

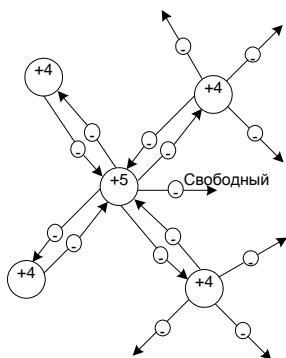


Рис.4

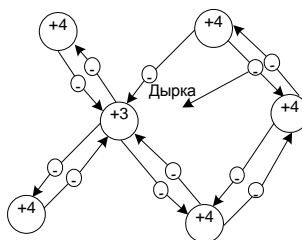


Рис.5.

Примесь данного типа называется донорной. Полупроводник, содержащий донорную примесь, имеет электронную проводимость. Его называют электронным полупроводником или полупроводником n – типа. Электроны в таком полупроводнике являются основными носителями заряда, дырки – неосновными носителями заряда.

Образование полупроводника p – типа. Если в расплав предварительно очищенного германия (кремния) внести примесь третьей группы периодической системы Менделеева (индий, галлий, бор), то примесный атом занимает место атома исходного полупроводника (рис.5). При этом три электрона примесного атома вступают в ковалентную связь с атомами исходного полупроводника, а четвёртая связь остаётся

незаполненной. Если электрону из соседней заполненной связи сообщить большую энергию, то он сможет перейти в эту незаполненную связь. При этом примесный атом становится отрицательным, а в той связи, откуда ушёл электрон образуется дырка.

В результате в полупроводнике образуется дырочная проводимость. Примесь, создающую в полупроводнике дырочную проводимость, называют акцепторной. Полупроводник, в котором преобладает дырочная проводимость, называют дырочным полупроводником или полупроводником p - типа. Дырки в таком полупроводнике являются основными носителями заряда, электроны – неосновными носителями заряда.

Понятие об электронно – дырочном ($p - n$)переходе.

Граница между двумя полупроводниками с различными типами электропроводности называется электронно – дырочным переходом или $p - n$ – переходом (рис.6).

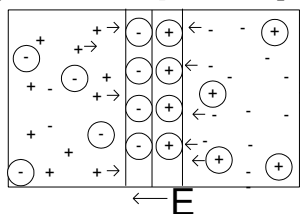


Рис.6

Так как в области полупроводника n -типа концентрация электронов больше, то они начинают диффундировать (переходить) в область полупроводника p -типа. Поскольку в области полупроводника p – типа концентрация дырок больше, то они начнут диффундировать в область n – типа. Электроны, расположенные в приконтактной области, диффундируя в p – область, оставят на границе раздела положительные ионы донорной примеси. Дырки, расположенные в приконтактной

области, диффундируя в n – область, оставят на границе раздела отрицательные ионы акцепторной примеси. В результате около границы раздела с двух сторон образуются слои с неподвижными объёмными зарядами противоположных знаков. Эта область полупроводника представляет собой слой, обеднённый носителями заряда. В нём нет ни электронов, ни дырок, поэтому он обладает большим сопротивлением. Это приводит к образованию электрического поля напряжённостью E .

Поле препятствует дальнейшему перемещению носителей заряда в противоположные области. Поскольку обеднённый слой обладает незначительной электропроводностью, то его называют запирающим слоем. Действие электрического поля проявляется в том, что через $p - n$ – переход могут перемещаться (дрейфовать) только неосновные носители заряда. Двойной электрический слой в области $p - n$ –перехода обуславливает контактную разность потенциалов, называемую потенциальным барьером.

Данная картина будет наблюдаться до тех пор, пока к $p - n$ – переходу не приложено внешнее напряжение. Рассмотрим движение носителей заряда через границу раздела при внесении внешнего электрического поля. В зависимости от полярности внешнего источника напряжения различают включение в прямом и в обратном направлении.

Включение в прямом направлении. Если к p –области подключить плюс, а к n - области минус источника внешнего напряжения (рис.7), то действие сил поля, созданного внешним источником

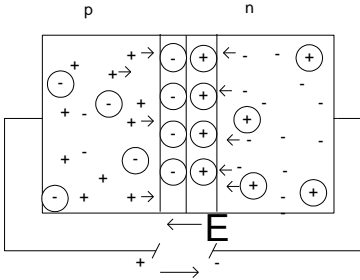


Рис.7.

будет противоположно направлению сил внутреннего поля, поэтому внутреннее поле ослабляется, основные носители заряда свободно проходят через $p - n$ - переход. В результате $p - n$ - переход пополняется основными носителями заряда, ширина обеднённого слоя уменьшается, сопротивление его падает. Величина потенциального барьера будет равна разности напряжений

перехода и внешнего источника $[(U)_{пер} - U_{вн})$.

Диффузионный ток резко возрастает. Такое включение называется включением в прямом направлении, а ток через $p - n$ -переход прямым.

Включение в обратном направлении. Если к p -области подключить минус, а к n - области плюс источника внешнего напряжения (рис.8), то действие сил поля, созданного внешним источником будет того же направления, что и действие сил внутреннего поля, поэтому внутреннее поле усиливается, основные носители заряда не смогут свободно проходить через $p - n$ - переход. Основные носители заряда будут оттягиваться от границы раздела к краям областей.

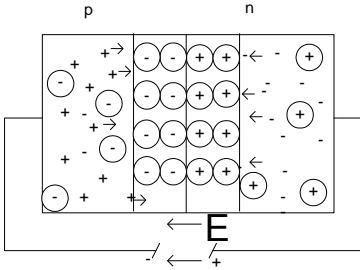


Рис.8.

В результате ширина обеднённого слоя увеличивается, сопротивление его растёт. Величина потенциального барьера будет равна сумме напряжений перехода и внешнего источника $\mathbb{K}(U)_{\text{пер}} + U_{\text{вн}}$. Диффузионный ток резко уменьшается, ток через $p-n$ -переход определяется неосновными носителями заряда. Поскольку концентрация неосновных носителей в десятки тысяч раз меньше чем основных, то ток оказывается очень малым. Такое включение называется включением в обратном направлении, а ток через $p-n$ -переход обратным.

Для идеального $p-n$ перехода имеет место следующая зависимость тока i от напряжения u :

$$i = i_s \cdot \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где i_s - ток насыщения (тепловой ток),

φ_T - температурный потенциал, при температуре 20° $\varphi_T \approx 0,025 \text{ В}$, при температуре 27° $\varphi_T \approx 0,026 \text{ В}$.

Работа всех полупроводниковых приборов основывается на использовании явлений на границе полупроводников с различными типами проводимости. К полупроводниковым приборам относятся диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы, тиристоры. Все они составляют элементарную базу электронных схем.

Элементы электронных схем

Полупроводниковые диоды.

Диод – это полупроводниковый прибор с одним $p - n$ – переходом и двумя выводами. Конструктивно диод представляет собой кристалл полупроводника, в котором одним из технологических приёмов (сплавление, диффузия) выполнен $p - n$ – переход (рис.9).

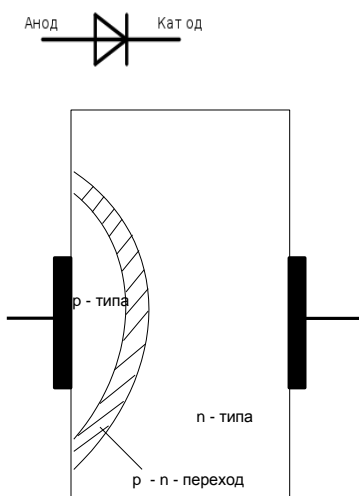


Рис.9.

Принцип действия диода основан на свойствах $p - n$ – перехода, образованного в результате соединения полупроводников с различными типами проводимости. Основной характеристикой диода служит его вольт – амперная характеристика.

ВАХ полупроводникового диода.

ВАХ показывает, что прямой ток в десятки мА получается

при прямом напряжении в десятые доли вольта (рис.10). Поэтому сопротивление бывает несколько десятков Ом. Нелинейность в начале характеристики для прямого тока объясняется тем, что существует сопротивление запирающего слоя, которое уменьшается при увеличении . При напряжении в десятые доли вольта запирающий слой исчезает и остаётся постоянное сопротивление, поэтому далее характеристика линейна.

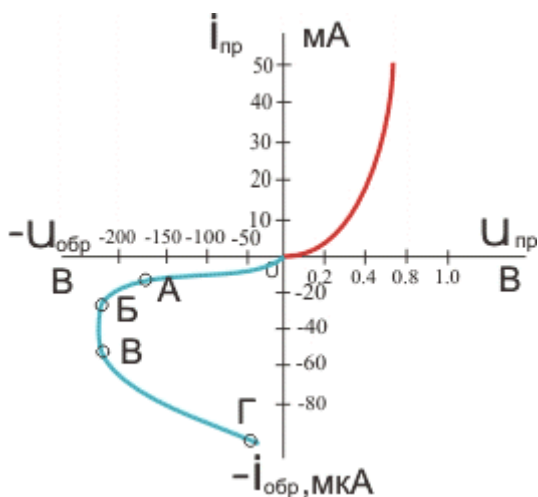


Рис.10.

Характеристику для обратного тока показывают в другом масштабе.

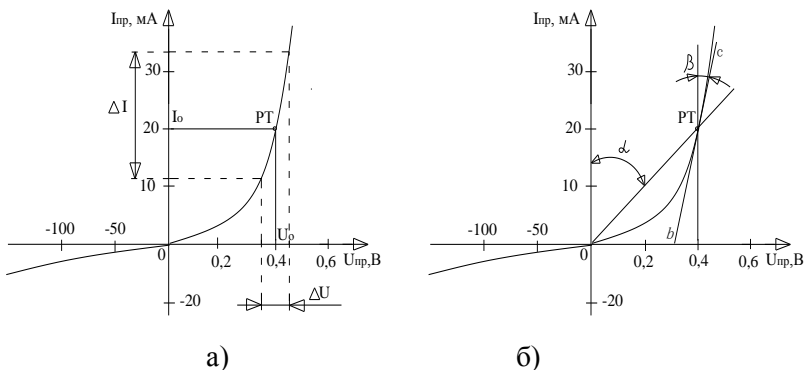


Рис. 11

Обратный ток при обратном напряжении до сотен вольт составляет единицы или десятки мкА. При увеличении обратного напряжения обратный ток увеличивается незначительно. Рост тока в дальнейшем происходит за счёт нагрева перехода в результате ударной ионизации (увеличения носителей заряда). Это явление вызвано тем, что при высоком электроны, приобретая большую скорость, выбивают из кристаллических решёток других атомов всё больше электронов. Процесс усиливается с увеличением напряжения. При некотором значении возникает пробой $p - n$ -перехода, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя резко уменьшается. Различают электрический и тепловой пробой $p - n$ -перехода. Электрический пробой (участок АБВ) является обратимым, то есть при данном виде пробоя в диоде не происходит необратимых явлений. Тепловой пробой (участок ВГ) является необратим, он сопровождается разрушением структуры вещества в месте $p - n$ -перехода.

Параметры диодов

Наиболее широко используемые параметры, применяемые к диодам различных подклассов:

$I_{пр. макс}$ — максимально допустимый постоянный прямой ток;

$U_{пр}$ — постоянное прямое напряжение, соответствующее заданному току;

$U_{обр. макс}$ — максимально допустимое обратное напряжение диода;

$I_{обр. макс}$ — максимально допустимый постоянный обратный ток диода;

$R_{диф}$ — дифференциальное (динамическое) сопротивление диода (при заданном режиме работы).

$R_{ст}$ — статическое сопротивление диода для заданной точки ВАХ (рис. 11).

В настоящее время существуют диоды, предназначенные для работы в очень широком

диапазоне токов и напряжений. Для наиболее мощных диодов $I_{пр макс}$ составляет килоамперы, а $U_{обр макс}$ — киловольты.

Способы определения сопротивлений $R_{диф}$ и $R_{ст}$ в рабочей точке (РТ) (рис. 11а,б).

а) Первый способ:

Дифференциальное (динамическое) сопротивление:

$$R_{диф} = \frac{du}{di} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,425 - 0,325}{(33 - 12) \cdot 10^{-3}} = 4,76 \text{ Ом};$$

Статическое сопротивление:

$$R_{ст} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{0,4}{20 \cdot 10^{-3}} = 20 \text{ Ом};$$

б) второй способ:

$$R_{диф} = \text{tg} \beta \cdot \frac{m_u}{m_I} = 0,236 \cdot \frac{0,2}{10 \cdot 10^{-3}} = 4,72 \text{ Ом};$$

где $\beta=13,3^0$. ab – касательная к вольт-амперной характеристике в рабочей точке.

$$R_{cm} = tg \alpha \cdot \frac{m_u}{m_I} = 0,983 \cdot \frac{0,2}{10 \cdot 10^{-3}} = 19,73 \text{ Ом};$$

где $\alpha = 44,6^0$.

Разновидности диодов

Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный. К их быстродействию, ёмкости р – n – перехода и стабильности параметров высоких требований не предъявляют.

Выпрямительные диоды характеризуются малым сопротивлением в прямом направлении и позволяют пропускать большие токи (до десятков и сотен ампер), допустимые обратные напряжения до 1000 В. Для этого площадь р – n – перехода выполняется относительно большой и ёмкость перехода достаточно велика (десятки пикофарад). Поэтому переходные процессы из открытого состояния в закрытое и, наоборот (при смене полярности приложенного напряжения) протекают относительно долго.

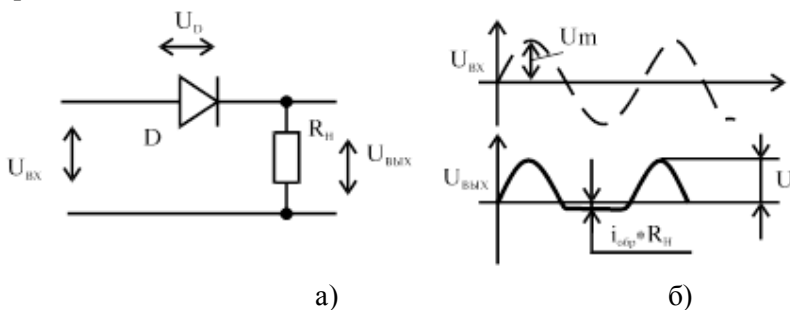


Рис.12.

Выпрямительный диод представляет собой вентиль (рис.12а,б). Подаче на вход переменного напряжения диод откроется при положительной полуволне и закроется при отрицательной полуволне. При этом напряжение на выходе будет иметь вид, представленный на рисунке 11.

Стабилитроны



Стабилитроны – диоды, использующие при работе участок вольт – амперной характеристики, соответствующей обратному электрическому пробую.

Стабилитрону свойственна стабильность, то есть неизменность падения напряжения на нём при изменениях в несколько раз тока, протекающего через него.

Благодаря этому свойству стабилитроны применяются в качестве источников опорного напряжения, которое должно оставаться неизменным при изменении других параметров схемы

Во избежание теплового пробоя последовательно со стабилитроном в цепь включают резистор R_1 , ограничивающий ток, который является обратным для структуры стабилитрона (рис.13).

При изменениях входного напряжения меняется ток и падение напряжения на сопротивлении R_1 .

Избыток напряжения выделяется на сопротивлении R_1 , а остаётся неизменным, следовательно и напряжение на нагрузке, включённой параллельно стабилитрону, будет стабильно.

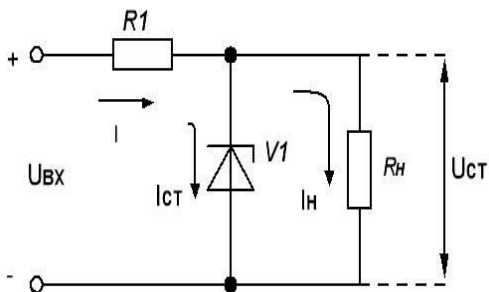


Рис.13.

ВАХ при обратном токе показывает, что в режиме стабилизации напряжение меняется мало. Характеристика для прямого тока стабилитрона такая же, как и для обычных диодов (рис.14).

Кремниевые стабилитроны могут быть изготовлены на малые напряжения (единицы вольт), а именно такие нужны для питания многих транзисторных схем.

Напряжение стабилизации может быть примерно от 5 до 200 В, изменение тока стабилитрона от $I_{стmin}$ до $I_{стmax}$ составляет десятки и даже сотни миллиампер.

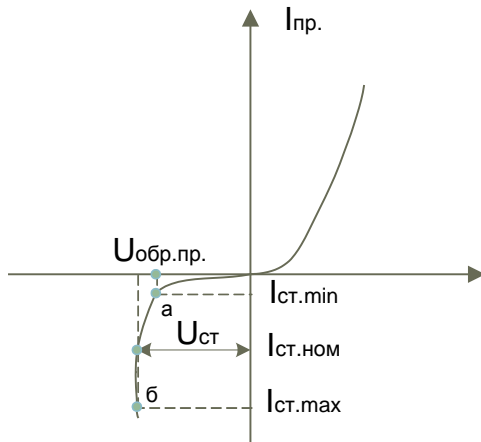


Рис. 14.

Основные параметры стабилитронов:

1. *Напряжение стабилизации* – напряжение на стабилитроне при протекании через него тока стабилизации;

2. *Ток стабилизации* – значение постоянного тока, протекающего через стабилитрон в режиме стабилизации;

3. *Дифференциальное (динамическое) сопротивление стабилитрона $R_{диф}$* – дифференциальное сопротивление при заданном значении тока стабилизации, т.е $R_{диф} = \frac{du}{di} \approx \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$.

Стабисторы.

Стабисторы-полупроводниковые приборы, предназначенные для работы в стабилизаторах напряжения. Однако, в отличие от стабилитронов, у стабисторов используется не обратное напряжение, а прямое. Значение напряжения мало зависит от тока в некоторых его пределах. При изменении прямого тока в

диапазоне от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$ падение напряжения будет изменяться в относительно в небольшом диапазоне ΔU .

В основном стабилитроны выполняются из кремния и имеют напряжение стабилизации в среднем около 0,7 В. Ток стабилитронов обычно может быть от 1 мА до нескольких десятков мА.

Чтобы получить стабильное напряжение в единицы вольт, необходимо последовательно соединить несколько стабилитронов. Особенность стабилитронов – отрицательный температурный коэффициент напряжения, то есть напряжение стабилизации с повышением температуры уменьшается. Стабилитроны предназначены для стабилизации малых напряжений (рис.15). Основные параметры стабилитронов такие же, как у стабилитронов.

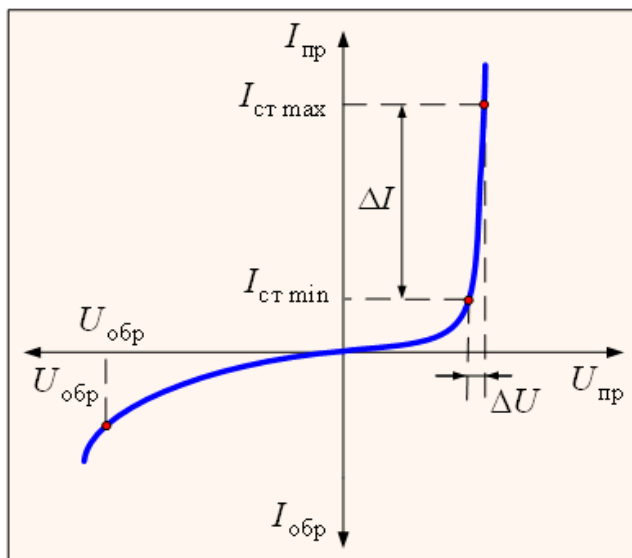


Рис.15.ВАХ стабилитрона.

$$\text{Дифференциальное (динамическое): } R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Варикапы.



Диоды, работающие при обратном напряжении, от которого зависит барьерная ёмкость. Таким образом, варикап представляет собой конденсатор переменной ёмкости, управляемый электрически, то есть изменением обратного напряжения (рис.16).

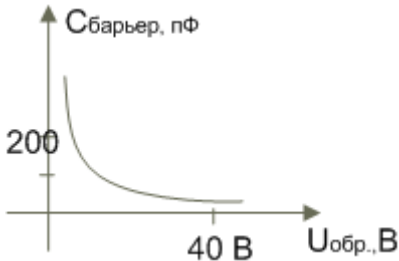


Рис16. Вольт-фарадная характеристика

Ёмкость конденсатора представляет собой зависимость: $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$

где S – площадь обкладок конденсатора, d - расстояние между обкладками, ϵ, ϵ_0 – абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости среды.

При постоянной абсолютной и относительной диэлектрических проницаемостей материала и площади $p - n$ – перехода, ёмкость варикапа зависит только от ширины $p - n$ – перехода.

Ширина $p - n$ – перехода d зависит от приложенного обратного напряжения (чем больше обратное напряжение, тем больше ширина $p - n$ -перехода и тем меньше ёмкость варикапа).

Светодиод



Схема работы светодиода (излучающий диод).

Светодиод - устройство, основанное на $p-n$ переходе, включенном в прямом направлении (рис.17). Под действием электрического поля внешнего источника потоки электронов и дырок движутся навстречу друг другу. В зоне $p-n$ перехода они встречаются, и происходит рекомбинация (исчезновение) электронов и дырок. Однако, исчезая, они выплескивают свою энергию в виде квантов света – фотонов. Таким образом, светодиод излучает свет. У светодиодов КПД преобразования электрической энергии в световую очень высок, и составляет 20-70%. Если сравнивать с лампой накаливания, то у нее лишь 4% энергии переходит в световую.

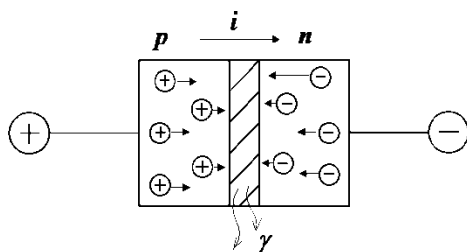


Рис.17.

Светодиоды используют в качестве экономичных источников света, индикаторов, цветных сигнализаторов. Для диодов, работающих в видимом диапазоне, широко используются следующие характеристики:

- зависимость яркости излучения L от тока диода i . (яркостная характеристика для диода типа АЛ 102А (рис.18) (цвет свечения –красный);

- зависимость силы света I_v от тока диода i для диода типа АЛ 316А (рис.19). Единица силы света кд- кандела (цвет свечения – красный).

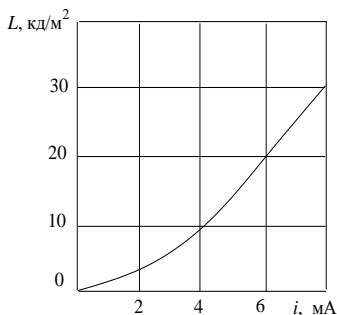


Рис.18.

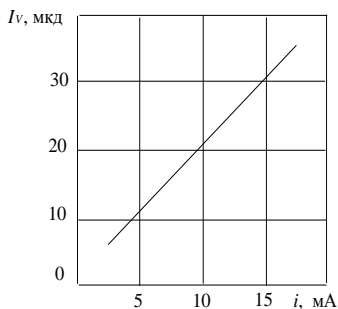


Рис.19.

Фотодиод

Фотодиод представляет собой p-n-переход включенный в обратном направлении. В этом случае при отсутствии светового потока фотодиод ток не пропускает.



Схема работы фотодиода.

Если на изолирующий слой направить свет, то в этом p-n переходе при поглощении фотонов будут рождаться пары электрон-дырка (рис.20). Этот процесс обратный тому, что происходит в светодиодах. Образовавшиеся электроны и дырки под действием электрического поля разбегаются в противоположные стороны из изолирующего слоя, образуется электрический ток.

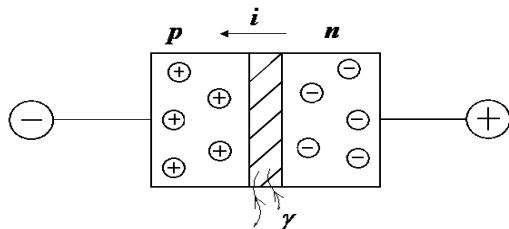


Рис.20

Фотодиоды являются светочувствительными приборами, так же как и фоторезисторы. Однако они выгодно отличаются

большой чувствительностью, очень малыми размерами и весом. Фотодиоды являются быстродействующими приборами, что позволяет их использовать в качестве приемников и детекторов модулированного светового сигнала.

С помощью большого количества фотодиодов создаются фотодиодные матрицы, которые могут считывать изображения, преобразуя его в электрический сигнал. На такой технологии основана работа видеокамер.

Фотодиоды удобно характеризовать семейством вольт-амперных (рис.21) характеристик, соответствующих различным световым потокам (световой поток измеряется в люменах, лм).

Φ – световой поток.

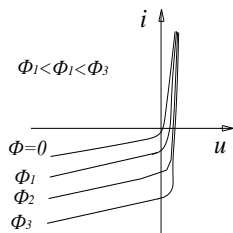


Рис.21.

Диод Шоттки



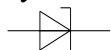
В диоде Шоттки используется не $p-n$ -переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Энергетические уровни, соответствующие зоне проводимости, в полупроводнике заполнены больше, чем в металле. Поэтому после соединения металла и полупроводника часть электронов перейдет из полупроводника в металл. Это приведет к уменьшению концентрации электронов в полупроводнике n -типа. Возникнет область полупроводника, обедненная свободными носителями электричества и обладающая повышенным удельным сопротивлением. В области перехода появятся объемные заряды и образуется потенциальный барьер, препятствующий дальнейшему переходу электронов из полупроводника в металл.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику n -типа,

то потенциальный барьер понизится и через переход начнет протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается очень малым.

При работе диода Шоттки отсутствуют инжекция неосновных носителей и соответствующие явления накопления и рассасывания, поэтому диоды Шоттки — очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц. У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) — около 0,5 В. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение — сотни вольт.

Туннельный диод.



Это полупроводниковый диод, в котором используется явление туннельного пробоя при включении в прямом направлении. Характерной особенностью туннельного диода является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис.22).

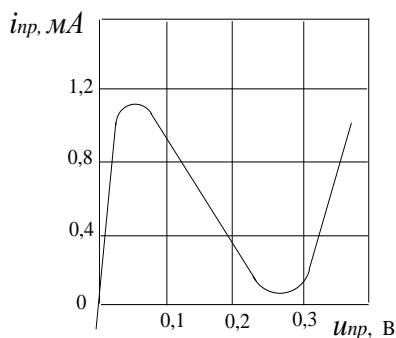


Рис.22.

Общая емкость диода в точке минимума характеристики составляет 0,8... 1,9 пФ. Туннельные диоды могут работать на очень высоких частотах — более 1 ГГц.

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента и в качестве основного элемента генераторов.

В настоящее время туннельные диоды используются именно в этом качестве в области сверхвысоких частот.

Обращенный диод.



Это полупроводниковый диод, физические явления в котором подобны физическим явлениям в туннельном диоде. При этом участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики обращенного диода (отличающаяся очень малым падением напряжения) используется в качестве прямой ветви «обычного» диода, а прямая ветвь — в качестве обратной ветви. Отсюда и название — обращенный диод.

Вольт-амперная характеристика германиевого обращенного диода 1И104А (рис.23).

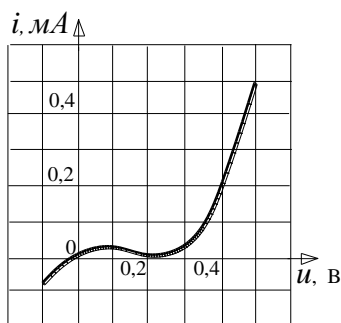


Рис.23.

(рис. 1.50), предназначенного, кроме прочего, для работы в импульсных устройствах (постоянный прямой ток — не более 0,3 мА,

постоянный обратный ток — не более 4 мА (при $t < 35^\circ\text{C}$), общая емкость в точке минимума вольт-амперной характеристики 1,2 ... 1,5 пФ

Для примера изобразим (рис. 1.49) прямую ветвь вольт-амперной характеристики германиевого туннельного усилительного диода 1И104А ($I_{\text{прмакс}} = 1$ мА — постоянный прямой ток, $U_{\text{обрмакс}} = 20$ мВ), предназначенного для усиления в диапазоне волн 2... 10 см (это соответствует частоте более 1 ГГц).

Биполярный транзистор

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя p-n-переходами, имеющий три электрода. Две крайние области обладают одинаковым типом проводимости. Если средняя область обладает электронной проводимостью, то транзистор p-n-p-типа, если же средняя область p-типа, то транзистор n-p-n-типа.

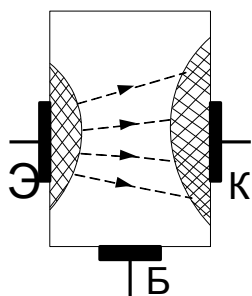
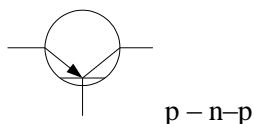
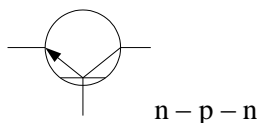
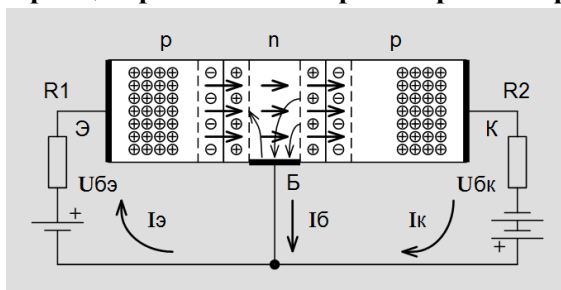


Рис.24

Средняя область транзистора - база. Одна из крайних областей транзистора – эмиттер. Она предназначена для инжекции (впрыскивания) неосновных носителей заряда в область базы. Электронно – дырочный переход между эмиттером и базой называется эмиттерным. Вторая крайняя область, предназначенная для экстракции (изъятия) из базы неосновных носителей заряда называется коллектором. Переход между базой и коллектором называется коллекторным.

Принцип работы биполярного транзистора



Эмиттерный переход включается в прямом направлении, в результате основные носители заряда (здесь дырки) попадают в базу и создают ток базы $I_{б}$.

Концентрация основных носителей заряда в базе (электронов) значительно меньше, чем в эмиттере и коллекторе, поэтому в базе рекомбинирует малая

Рис.25 часть зарядов из эмиттера, кроме того, база выполняется достаточно узкой и основное количество зарядов, попавшее в базу из эмиттера, уже имея достаточно высокую скорость и, получая дополнительное ускорение от поля перехода база–коллектор, пролетает в коллектор, создавая ток коллектора $I_{к}$, значительно превышающий ток базы $I_{б}$. Таким образом, ток маломощной цепи эмиттера управляет током более мощной цепи коллектора. Ток эмиттера равен сумме токов базы $I_{б}$ и коллектора $I_{к}$:

$$I_3 = I_k + I_6$$

Описанные физические процессы обеспечиваются конструктивными особенностями исполнения биполярных транзисторов:

1. База выполняется слаболегированной (т. е. количество основных носителей зарядов в ней значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере);
2. База выполняется достаточно узкой;
3. Эмиттер выполняется сильнолегированным (т. е. количество основных носителей зарядов в нём значительно больше, чем в коллекторе и базе).

Режимы работы биполярного транзистора

В зависимости от того, в каких состояниях находятся переходы транзистора, различают режимы его работы. Поскольку в транзисторе имеется два перехода (эмиттерный и коллекторный), и каждый из них может находиться в двух состояниях (открытом и закрытом), различают четыре режима работы транзистора.

1) Основным режимом является **активный (нормальный) режим**, при котором эмиттерный переход находится в открытом состоянии, а коллекторный - в закрытом. Транзисторы, работающие в активном режиме, используются в усилительных схемах. Этот режим соответствует максимальному значению передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальные искажения усиливаемого сигнала.

2) Помимо активного, выделяют **инверсный режим**, при котором эмиттерный переход закрыт, а коллекторный – открыт. Инверсный режим работы способствует значительному уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера по сравнению с нормальным режимом работы. Это происходит потому, что коллектор является более слаболегированной областью, чем эмиттер.

3) **Режим насыщения**, при котором оба перехода открыты. Выходной ток не зависит от входного тока и определяется

параметрами нагрузки. Режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала.

4) **Режим отсечки**, при котором оба перехода закрыты. Поскольку в таком режиме входной ток равен нулю, то данный режим используется для размыкания цепей передачи сигналов.

Режимы насыщения и отсечки применяются совместно для осуществления коммутации как силовых, так и информационных цепей.

Схемы включения биполярных транзисторов

В зависимости от того, какой вывод транзистора подключен одновременно к входу и выходу схемы, различают три схемы включения транзистора — с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).

Схема с ОЭ

Данная схема включения биполярного транзистора является наиболее распространённой, так как даёт наибольшее усиление по мощности.

Усилительные свойства транзистора характеризует один из главных его параметров - статический коэффициент передачи тока базы или статический коэффициент усиления по току β . Поскольку он должен характеризовать только сам транзистор, его определяют в режиме без нагрузки ($R_k = 0$). Численно он равен:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \text{ при } U_{к-э} = const$$

Этот коэффициент бывает равен десяткам или сотням, но реальный коэффициент k_i всегда меньше, чем β , т. к. при включении нагрузки ток коллектора уменьшается.

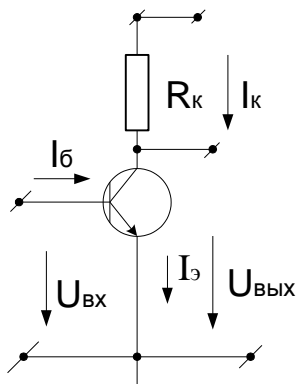


Рис. 26 Коэффициент усиления по току:

Коэффициент усиления по напряжению:

Напряжение база-эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное достигает единиц и десятков вольт, следовательно, K_U составит десятки – сотни.

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_i \cdot K_U$$

Коэффициент усиления каскада по мощности равен сотням, тысячам, а иногда десяткам тысяч.

Важной характеристикой является входное сопротивление $R_{вх}$, которое определяется по закону Ома:

и составляет обычно от сотен Ом до единиц кОм. Входное сопротивление транзистора при включении по схеме ОЭ, как видно, получается сравнительно небольшим, что является существенным недостатком.

К недостаткам также относят худшие частотные и температурные свойства (например, в сравнении со схемой ОБ). С повышением частоты усиление в схеме ОЭ снижается. К тому же, каскад по схеме ОЭ при усилении вносит значительные искажения.

Работа транзистора характеризуется семействами входных и выходных характеристик.

Входные характеристики показывают зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером, при постоянном

напряжении, приложенном к коллектору. Выходные характеристики показывают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при постоянном значении тока базы.

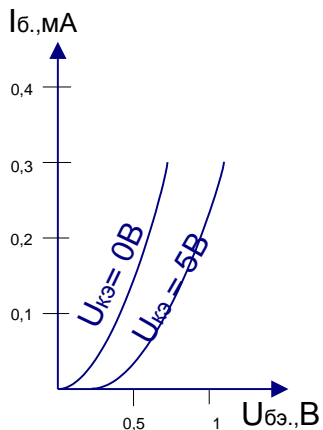


Рис. 27. Входные характеристики

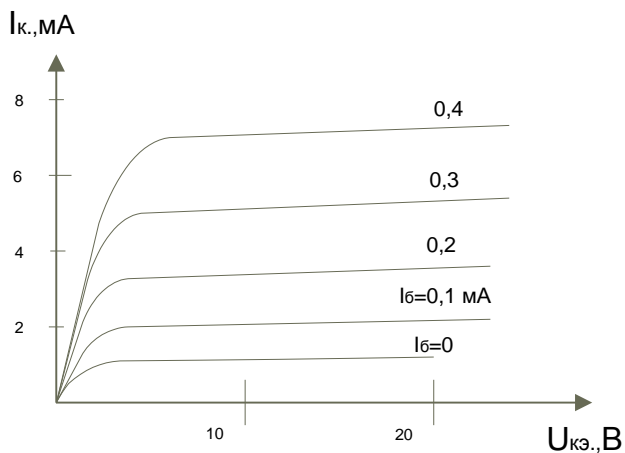


Рис.28. Выходные характеристики

Схема с ОБ.

Такая схема включения не дает значительного усиления, но обладает хорошими частотными и температурными свойствами (рис.. Применяется она не так часто, как схема ОЭ).

Коэффициент усиления по току схемы ОБ всегда немного меньше единицы:

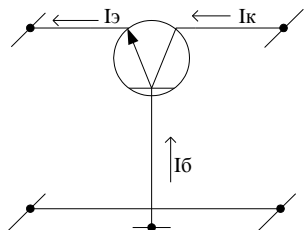


Рис. 29

т. к. ток коллектора всегда лишь немного меньше тока эмиттера.

Статический коэффициент передачи тока для схемы ОБ обозначается α и определяется:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}$$

при $u_{\text{к-б}} = \text{const}$

Этот коэффициент всегда меньше 1 и чем он ближе к 1, тем лучше транзистор.

Коэффициент усиления по напряжению получается таким же, как и в схеме ОЭ:

В итоге коэффициент усиления по мощности примерно равен $k_{\text{и}}$.

Входное сопротивление схемы ОБв десятки раз ниже, чем в схеме ОЭ.

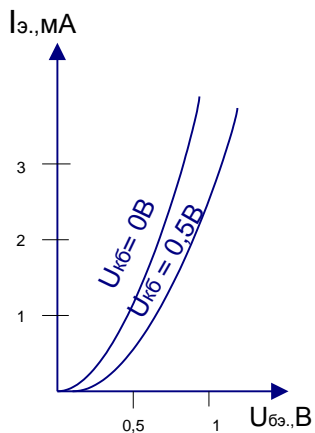


Рис. 30. Входные характеристики

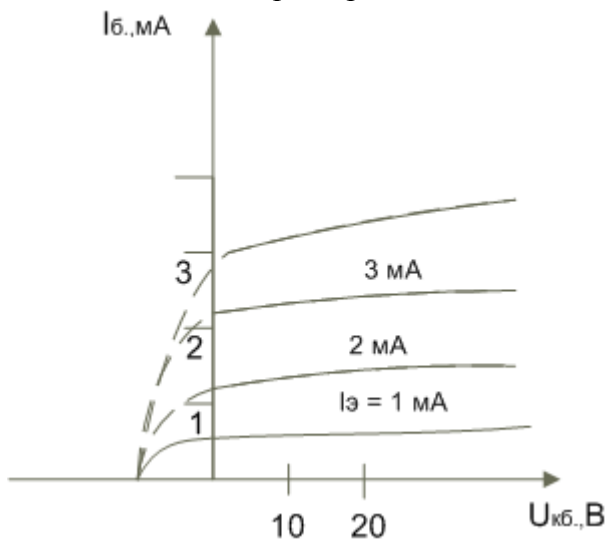


Рис 31. Выходные характеристики

Схема с ОК.

Схема получила название эмиттерный повторитель (рис.. Особенность этой схемы в том, что входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. очень сильна

отрицательная обратная связь. Коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме ОЭ:

Коэффициент усиления по напряжению приближается к единице, но всегда меньше её:

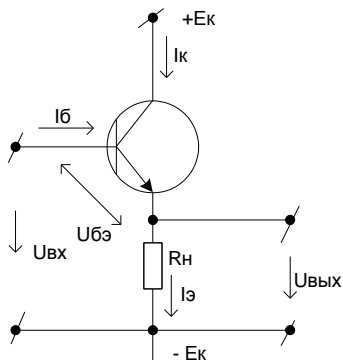


Рис.32

В итоге коэффициент усиления по мощности примерно равен k_i , т. е. нескольким десяткам.

Поскольку коэффициент усиления по напряжению близок к единице, выходное напряжение по фазе и амплитуде совпадает с входным, т. е. повторяет его. Именно поэтому такая схема называется эмиттерным повторителем. Эмиттерным - потому, что выходное напряжение снимается с эмиттера относительно общего провода.

Входное сопротивление схемы ОК довольно высокое (десятки – сотни кОм):

а выходное - сравнительно небольшое (сотни Ом – единицы кОм):

Это является немаловажным достоинством схемы. Схему с общим коллектором очень часто применяют в качестве входного каскада усиления из-за его высокого входного сопротивления и способности не нагружать источник входного сигнала, а также данная схема имеет наименьшее выходное сопротивление.

Параметры схем включения биполярных транзисторов

Параметр	Схема с ОЭ	Схема с ОБ	Схема с ОК
Коэффициент усиления по току	Десятки – сотни единиц	Немного меньше единицы	Десятки – сотни единиц
Коэффициент усиления по напряжению	Десятки – сотни единиц	Десятки – сотни единиц	Немного меньше единицы
Коэффициент усиления по мощности	Сотни – десятки тысяч единиц	Десятки – сотни единиц	Десятки – сотни единиц
Входное сопротивление	Сотни Ом – единицы кОм	Единицы – десятки Ом	Десятки – сотни кОм
Выходное сопротивление	Единицы – десятки кОм	Сотни кОм – единицы МОм	Сотни Ом – единицы кОм

Параметры биполярного транзистора.

Все параметры биполярного транзистора можно разделить на первичные (собственные) и вторичные.

Собственные параметры характеризуют свойства самого транзистора, независимо от схемы его включения, а вторичные параметры для различных схем включения различны.

Основными первичными параметрами являются сопротивления эмиттера $r'_э$, коллектора $r'_к$ и базы $r'_б$ для переменного тока. При этом сопротивление эмиттера представляет собой сопротивление эмиттерного перехода, к которому добавляется сопротивление эмиттерной области. Подобно этому сопротивление коллектора представляет собой сопротивление коллекторного перехода, к которому добавляется сопротивление коллекторной области. Сопротивление базы представляет собой поперечное сопротивление базы.

Параметры транзистора как четырехполюсника. h-параметры

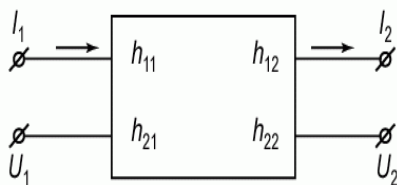


Рис. 33

Биполярный транзистор в схемотехнических приложениях представляют как четырехполюсник и рассчитывают его параметры для такой схемы. Для транзистора как четырехполюсника характерны два значения тока I_1 и I_2 и два значения напряжения U_1 и U_2

Если две величины считать независимыми, то две другие будут зависеть от них. Существует несколько систем вторичных параметров транзистора: Y - параметры, Z – параметры, H - параметры. Для транзисторов чаще всего используются H – параметры, так как они наиболее удобны для измерений. Для системы H -параметров в качестве входных параметров задаются ток I_1 и напряжение U_2 , а в качестве выходных параметров рассчитываются ток I_2 и напряжение U_1 , при этом система, описывающая связь входных I_1 , U_2 и выходных I_2 , U_1 параметров, выглядит следующим образом:

С учетом h -параметров эквивалентная схема замещения транзистора примет вид (рис.34)

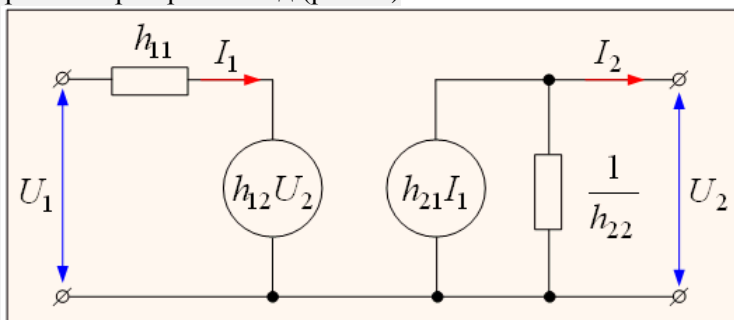


Рис.34

где

$$1) h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \text{ при } U_2 = const \text{ или } (\Delta U_2 = 0),$$

h_{11} представляет собой сопротивление транзистора между входными зажимами для переменного входного тока при коротком замыкании на входе, т.е. при отсутствии выходного переменного напряжения. Измеряется в омах (Ом).

$$2) h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \text{ при } I_1 = const \text{ или } (\Delta I_1 = 0),$$

h_{12} представляет собой коэффициент обратной связи по напряжению. Коэффициент показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие наличия в нем внутренней обратной связи.

Условие $I_1 = const$ подчеркивает, что входная цепь разомкнута для переменного тока.

$$3) h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \text{ при } U_2 = const \text{ или } (\Delta U_2 = 0),$$

h_{21} - коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока) показывает усиление тока транзистором в режиме работы без нагрузки.

$$4) h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \text{ при } I_1 = const \text{ или } (\Delta I_1 = 0),$$

h_{22} представляет собой внутреннюю проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора. Величина h_{22} измеряется в сименсах (См).

Определение Н-параметров

Определим Н-параметры биполярного транзистора $KT 315A$, рабочая точка: $I_{BO} = 350 \text{ мкА}$; $U_{KЭO} = 5,45 \text{ В}$.

Параметр $h_{11Э}$ определим следующим образом. На входных характеристиках зададимся приращением тока базы $\Delta I_B = \pm 50 = 100 \text{ мкА}$ относительно рабочей точки $I_{BO} = 350 \text{ мкА}$. Соответствующее приращение напряжения база-эмиттер составит $\Delta U_{БЭ1} = 0,018 \text{ В}$. Входное сопротивление:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{0.018}{0.1 \times 10^{-3}} = 180 \text{ Ом}$$

Параметр $h_{12Э}$ определим по входным характеристикам. При постоянстве тока базы ($I_{Б0} = 350 \text{ мкА}$) найдем приращение напряжения база-эмиттер: $\Delta U_{БЭ2} = 0,035 \text{ В}$. Тогда коэффициент обратной связи по напряжению составит:

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ2}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{0,035}{10 - 0} = 0.0035$$

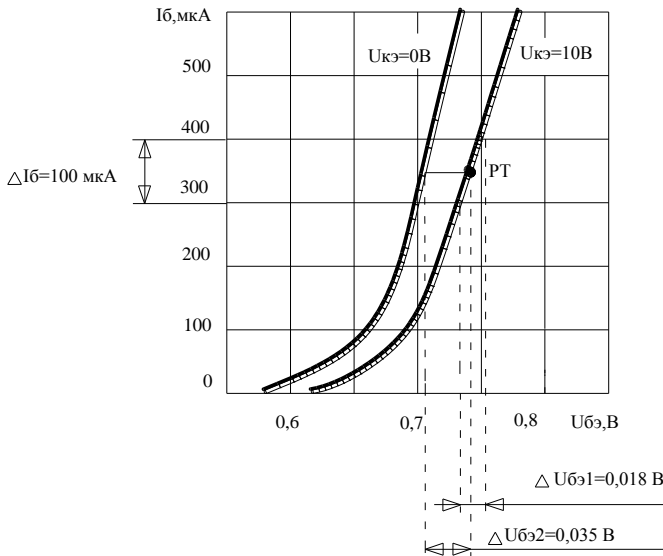


Рис.35. Входные характеристики

По выходным характеристикам определим параметр $h_{21Э}$.

Зададимся приращением тока базы относительно рабочей точки $\Delta I_{Б} = 100 \text{ мкА}$, соответствующее приращение тока коллектора составит $\Delta I_{К1} = 5,6 \text{ мА}$.

Коэффициент передачи тока базы:

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{K1}}{\Delta I_B} = \frac{5,6 \times 10^{-3}}{(400 - 300) \times 10^{-6}} = 56.$$

Выходную проводимость определим по выходным характеристикам. Около рабочей точки зададимся приращением напряжения коллектор-эмиттер: $\Delta U_{KЭ} = 4В$. Соответствующее приращение тока коллектора составит

$\Delta I_{K2} = 1 мА$. Выходная проводимость:

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{K2}}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{4} = 2,5 \times 10^{-4} СМ$$

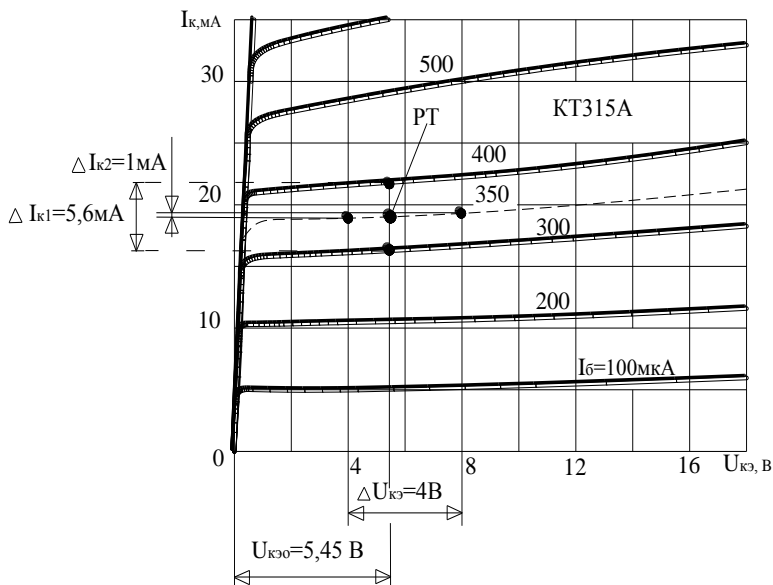


Рис.36.Выходные характеристики

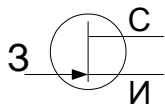
Полевой транзистор

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий три вывода: исток, сток, затвор.

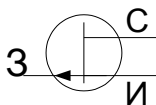
Между истоком и стоком в кристалле полупроводника располагается канал, по которому течёт ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа проводимости, либо n – типа, либо p – типа. Управление током транзистора осуществляется изменением проводимости канала, которая зависит от напряжения. В отличие от биполярного транзистора, ток в полевом транзисторе протекает через канал одного типа проводимости, тогда как в биполярном транзисторе ток течёт через два $p-n$ –перехода. В полевом транзисторе ток через $p-n$ – переход не течёт. Поскольку направление тока от истока к стоку, а управление током осуществляется посредством затвора, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора, сток – коллектору, а затвор – базе. Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от способа управления различают полевые транзисторы с управляющим $p-n$ –переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором.

Полевой транзистор с управляющим $p-n$ –переходом

Условное обозначение:



с n – каналом



с p - каналом

В полевом транзисторе данного типа управление током, протекающим через канал, осуществляется посредством изменения проводимости канала. Это осуществляется за счёт подаваемого на затвор напряжения. При этом на затвор всегда подаётся обратное напряжение. У полевого транзистора с каналом n – типа, а затвор будет p –типа.

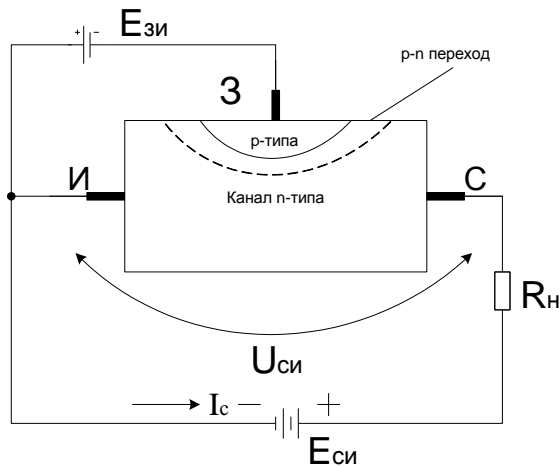


Рис.37.

Если на затвор подать обратное (здесь отрицательное) напряжение, то область, занимаемая р – n – переходом, будет увеличиваться, поскольку расширится область, обеднённая носителями заряда. При этом область канала сужается и ток, протекающий через канал, уменьшается. Таким образом, чем больше будет обратное напряжение на затворе, тем меньше будет ток, протекающий через канал.

В зависимости от типа полупроводника, в котором расположен канал, различают транзисторы с р – каналом и с n – каналом. При этом на условном обозначении стрелка направлена от р к n области.

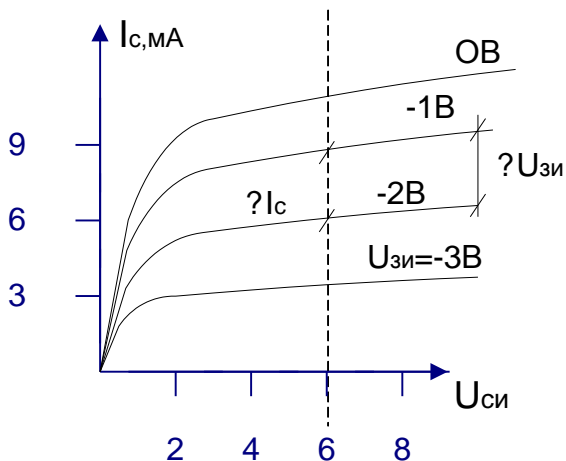


Рис.38.Выходные характеристики

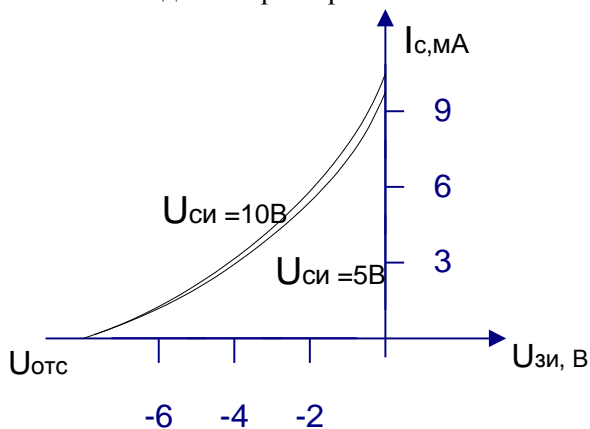


Рис.39.Стокзатворные характеристики

где $U_{отс}$ -напряжение отсечки, при котором канал полностью перекрывается (ток стока $I_c = 0$).

Полевые транзисторы характеризуются следующими параметрами.

1) Крутизна S - основной параметр полевого транзистора, показывает управляющее действие затвора (на выходных характеристиках):

при $=const$

2) Внутреннее сопротивление при $=const$

3) Коэффициент усиления показывает во сколько раз на ток I_c сильнее действует напряжение, чем напряжение.

Так как управляющий р – n – переход всегда заперт, то у полевых транзисторов практически отсутствует входной ток. В связи с этим данные транзисторы обладают очень большим сопротивлением и является существенным преимуществом перед биполярными транзисторами.

Полевые транзисторы с изолированным затвором.

В таких транзисторах отсутствует электрический контакт затвора с каналом.

В зависимости от изоляции различают МДП и МОП – транзисторы (МДП – металл – диэлектрик – полупроводник, МОП – металл – оксид - полупроводник).

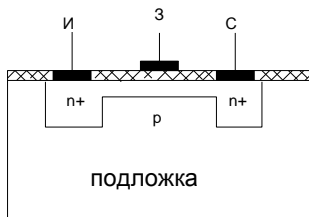
Исток и сток формируют из сильнолегированных областей полупроводника, из-за этого области истока и стока имеют высокую концентрацию носителей заряда. Как МДП, так и МОП транзисторы могут быть выполнены с каналом р и n – типа. Канал может быть встроенным и индуцированным.

Полевой транзистор с встроенным каналом.

Условное обозначение:



с n - каналом



Канал - тонкий слой полупроводника n – типа, соединяющий исток и сток. В зависимости от полярности приложенного напряжения, в канале может изменяться концентрация носителей заряда (здесь электроны). При отрицательном значении напряжения, электроны выталкиваются из канала в области истока и стока, канал обедняется носителями заряда, и ток стока I_c снижается. При положительном напряжении на затворе электроны втягиваются из n – областей в канал и ток стока I_c увеличивается. Таким образом, напряжение может быть положительным и отрицательным.

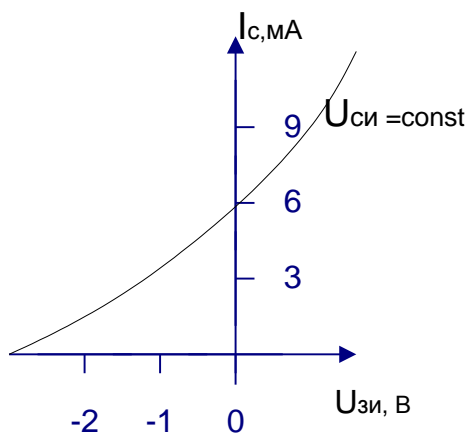


Рис. 40. Стокозатворные характеристики

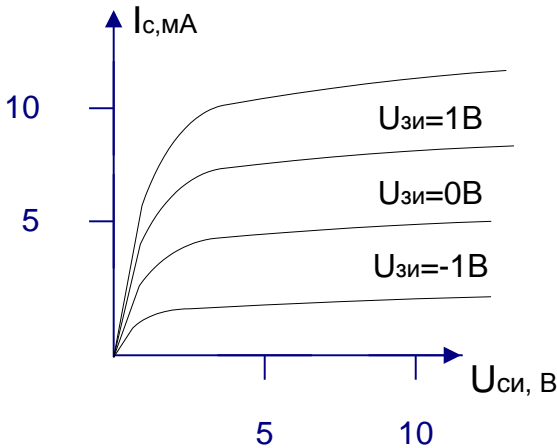
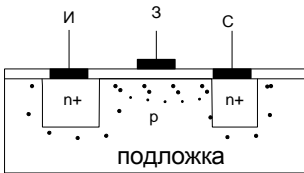


Рис.41.Выходные характеристики

Полевой транзистор с индуцированным каналом.



При отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует, так как n – области образуют с подложкой два $p - n$ – перехода, включённые навстречу друг другу, а значит, при любой полярности напряжения один из переходов заперт.

Если на затвор подать напряжение, то созданное им электрическое поле вытягивает электроны из n – областей, образуя тонкий слой n – типа в приповерхностной области p – подложки. Этот слой объединяет исток и сток, являясь каналом n – типа. От подложки он изолирован обеднённым слоем. Таким образом, полевые транзисторы с индуцированным каналом управляются только положительным напряжением . Значение порогового напряжения у них $0,1 - 0,2$ В (у МОП транзисторов $2 - 4$ В).

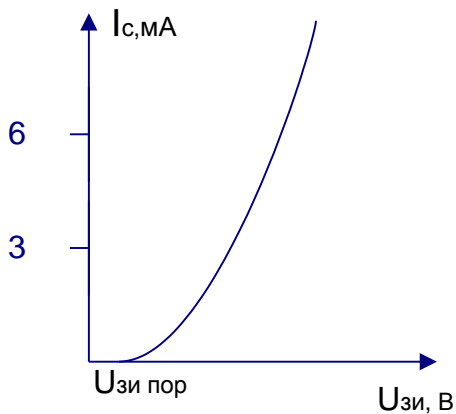


Рис.42. Стокозатворные характеристики

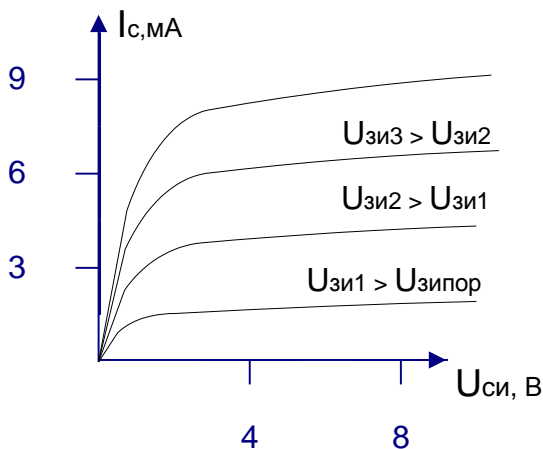


Рис.43. Выходные характеристики

Определение параметров полевого транзистора

По выходным характеристикам полевого транзистора построить передаточную (стокзатворную) характеристику при указанном напряжении стока. Определить дифференциальные параметры полевого транзистора и построить их зависимость от напряжения на затворе: $\mu ; R_i ; S = f(U_{зи})$.

Пусть дан полевой транзистор типа КП103, напряжение сток-исток $U_{СИО} = -6 \text{ В}$; $U_{ЗИО} = 4 \text{ В}$. Даны выходные характеристики. Для построения стокзатворной характеристики (прямой передачи) определим ток стока при $U_{ЗИ} = 0 \text{ В}; 0,5 \text{ В}$ и т.д.

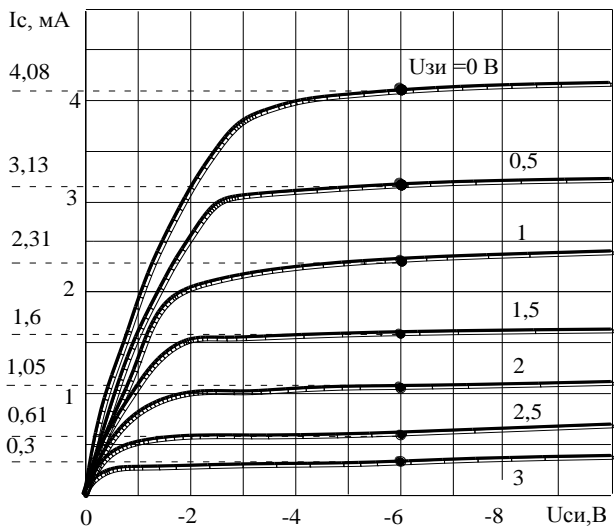


Рис. 44. Выходные характеристики Результаты заносим в таблицу 1

Таблица 1

$U_{ЗИ}, \text{В}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4
$I_C, \text{мА}$	4,08	3,13	2,31	1,6	1,05	0,61	0,3	0

По полученным результатам строим характеристику прямой передачи – стокзатворную характеристику.

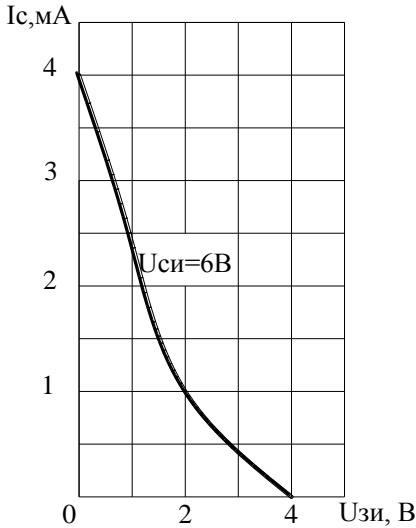


Рис.45. Стокозатворная характеристика

Определяем крутизну и строим ее зависимость от напряжения на затворе. Сначала найдем крутизну при напряжении на затворе $U_{зи}=0,25 В$.

Определяем токи $I_{C1}=4,08 mA$ и $I_{C2}=3,13 mA$ при напряжениях $U_{зи1}=0 В$ и $U_{зи2}=0,5 В$, соответственно (рисунок 44). Затем вычисляем крутизну характеристики передачи:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} / U_{си} = 6B = \frac{4,08 - 3,13}{0,5 - 0} = 1,9 \text{ mA/V}$$

Аналогично проделываем эту операцию при $U_{зи}=0,75 В$; $1,25 В$; $1,75 В$ и т.д. Результаты вычислений заносим в таблицу 2 и построим зависимость $S=f(U_{зи})$ (рисунок 4).

Таблица 2

$U_{зи}, В$	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	4
$S, mA/V$	1,9	1,64	1,42	1,1	0,88	0,62	0

Для определения дифференциального сопротивления стока R_C , задаемся приращением напряжения $U_{CH} = \pm 2 \text{ В}$ относительно напряжения $U_{CH0} = 6 \text{ В}$ (рисунок 46).

Определяем приращение тока стока при напряжении на затворе $U_{зи} = 0 \text{ В}$. Вычисляем значение сопротивления стока:

$$R_C = \frac{\Delta U_{CH}}{\Delta I_C} \Big/ U_{зи} = 0 \text{ В} = \frac{4}{0,14 \times 10^{-3}} = 28,5 \text{ кОм}$$

Аналогичным образом определяем сопротивление R_C при $U_{CH} = 0,5 \text{ В}; 1 \text{ В}$ и т.д.

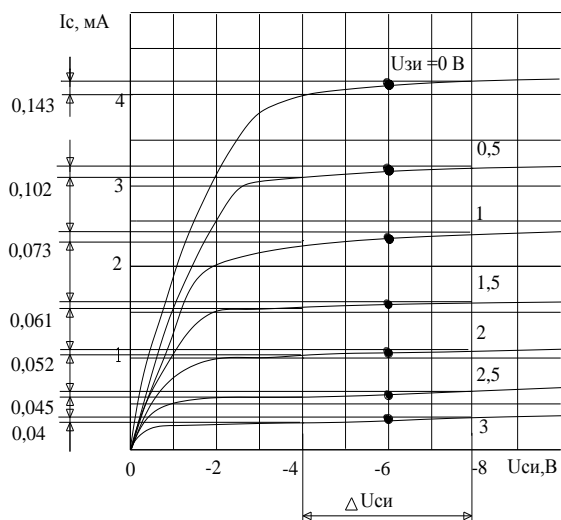


Рис.46.
Таблица 3

$U_{зи}, \text{В}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$\Delta I_c, \text{мА}$	0,14	0,1	0,7	0,6	0,5	0,045	0,04
$R_C, \text{кОм}$	28	39,2	54,8	65,6	77	88,9	100
$S, \text{мА/В}$	2	1,75	1,5	1,25	1	0,75	0,5
μ	56	68,5	82,2	82	77	66,6	50

Результаты заносим в таблицу 3.

Построим зависимость $R_C=f(U_{3и})$ (рисунок 47).

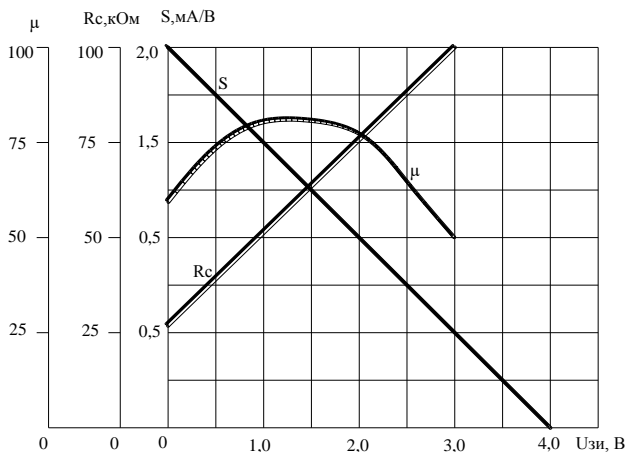


Рис.47.

По графику на рисунке 45 определяем значения крутизны S для тех же величин что и R_C . Результаты также занесем в таблицу 3.

Определяем коэффициент усиления транзистора по формуле: $\mu=S \times R_C$. Результат также заносим в таблицу 3 и строим зависимость $\mu=f(U_{3и})$.

Тиристоры

Условное обозначение



Динистор Тринистор

Тиристор – полупроводниковый прибор с тремя и более р – п – переходами, ВАХ имеет участок отрицательного сопротивления. При включении в цепь переменного тока тиристор открывается и начинает пропускать ток в нагрузку

лишь тогда, когда значение напряжения достигает определённого уровня, либо при подаче отпирающего напряжения на специальный управляющий электрод.

Тиристоры подразделяются на двухэлектродные (диодные) и трёхэлектродные (триодные). Тиристоры имеют четырёхслойную структуру полупроводника с электропроводимостями разного типа. Крайние слои – анод и катод. У триодных тиристоров третий электрод служит управляющим

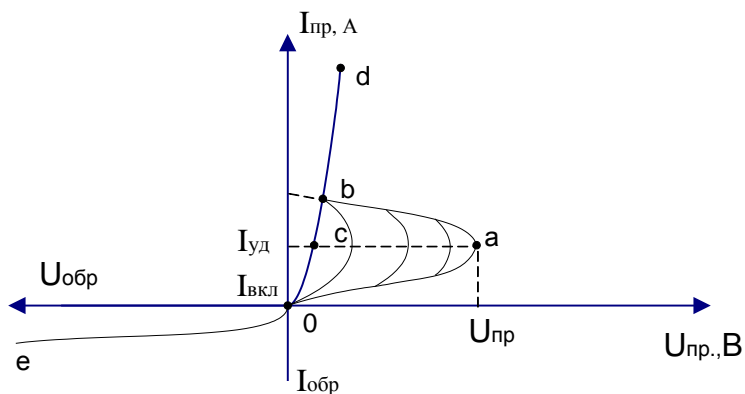


Рис.48

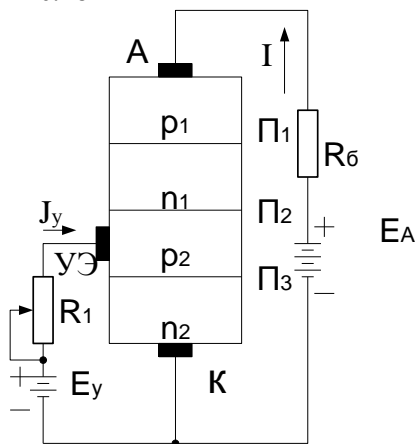


Рис.49.

К аноду и катоду тиристора подключается источник внешнего напряжения E_A (рис.48). Средние слои n_1 и p_2 – базовые области. База p_2 имеет контакт, называемый управляющим электродом (УЭ). Управляющий электрод подключается к внешнему источнику управляющего напряжения E_V . Таким образом, четырёхслойная структура – сочетание двух транзисторов в одном приборе: $p_1n_1p_2$ – один транзистор и $n_2p_2n_1$ – второй транзистор.

Переход P_2 – коллекторный для обоих транзисторов, а переходы P_1 и P_3 – эмиттерные переходы.

Если ток в цепи управляющего электрода равен нулю ($I_V = 0$), а между анодом и катодом приложено напряжение указанной на ВАХ полярности (рис.49), меньше напряжения, то переходы P_1 и P_3 сместятся в прямом направлении, а переход P_2 – в обратном. При этом большая часть приложенного напряжения будет восприниматься переходом P_2 .

С повышением внешнего напряжения ток растёт, так как увеличивается смещение переходов и P_3 в прямом направлении. При этом снижение потенциального барьера перехода P_3 приводит к инжекции электронов из эмиттера p_2 в базу n_2 , часть которых, избежав рекомбинации достигает перехода P_2 и перебрасывается его полем в базу n_1 . Рост концентрации носителей в базе n_1 приводит к уменьшению потенциального барьера, в результате увеличивается инжекция дырок из p_1 в n_1 . Дырки, продифундировав через базу n_1 достигают перехода и перебрасываются его полем в p_2 . При этом концентрация их возрастает, что ведёт к уменьшению потенциального барьера. Таким образом, в структуре развивается лавинообразный процесс увеличения тока (участок *oa*).

Когда внешнее напряжение станет $U_a = U_a$, происходит резкое увеличение концентрации электронов в базе n_1 и дырок в базе p_2 , что приводит к быстрому снижению напряжения U_2 , следовательно, напряжение на тиристоре уменьшается, так как $U_a = U_1 + U_2 + U_3$. Поэтому на прямой ветви вольт – амперной характеристики появляется участок отрицательного

сопротивления (ab), где рост тока обусловлен уменьшением напряжения. С развитием лавинообразного процесса, при котором происходит включение тиристора, ток в его внешней цепи растёт до значения, определяемого $R_{\text{б}}$ и E_{A} (участок cd). При этом напряжение между анодом и катодом невелико, так как все переходы смещены в прямом направлении.

Для выключения тиристора необходимо уменьшить ток до значения, не превышающего некоторого удерживающего $I_{\text{уз}}$ (точка c). Кроме этого можно подать на тиристор напряжение обратной полярности. При этом переходы П_1 и П_3 смещаются в обратном направлении, а П_2 – в прямом направлении. Вольт – амперная характеристика при этом получается такой же, как и для обычного диода при обратном включении (участок oe).

Список литературы

1. Лачин В.И., Савёлов Н.С.. Электроника- Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2002.-576с.
2. Миловзоров О.В. Электроника: учебник для вузов/Миловзоров О.А., Панков И.Г.-2-е изд., перераб.-Москва: Высшая школа,2005.- 288с.
3. Гусев В.Г., Электроника и микропроцессорная техника.: учебник для студ. вузов.-М.: Высш. шк., 2008.-798с.