

Рис. 12. Стабилизация напряжения

Входное напряжение может увеличиваться или уменьшаться, что обуславливает соответствующее увеличение или уменьшение тока через стабилитрон. Когда стабилитрон работает при напряжении стабилизации (в области пробоя), при увеличении входного напряжения через него может идти большой ток. Однако напряжение на стабилитроне останется прежним. Стабилитрон оказывает противодействие увеличению входного напряжения, так как при увеличении тока его удельное сопротивление падает, что позволяет выходному напряжению на стабилитроне оставаться постоянным при изменениях входного напряжения. Изменение входного напряжения проявляется только в изменении падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Сумма падений напряжения на этом резисторе и стабилитроне равна входному напряжению. Выходное напряжение снимается со стабилитрона и может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и включенного последовательно с ним резистора.

#### 4. Принцип работы биполярного транзистора

В 1948 г. Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли в лабораториях фирмы Bell изготовили первый работающий транзистор.

Наверное, ни одно из открытий современной физики не повлияло столь непосредственно на жизнь людей, как транзистор. Благодаря своим преимуществам перед электронной лампой транзистор совершил революцию в области электронных средств связи и обеспечил создание и широкое использование быстродействующих ЭВМ с большим объёмом памяти.

**Транзистором** называется полупроводниковый прибор с двумя **p-n**-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трех областей. Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя - противоположной проводимостью.

Транзисторы, у которых крайние области обладают электронной проводимостью, а средняя - дырочной проводимостью, называются транзисторами **n-p-n** - типа ([рис. 13](#)); транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями - транзисторами **p-n-p** - типа ([рис. 14](#)).

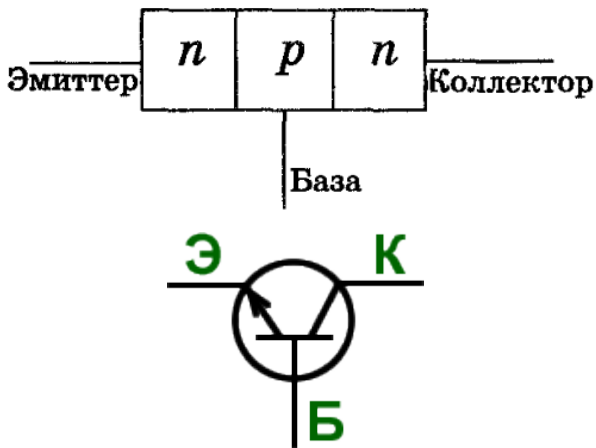


Рис. 13. Транзистор  $n-p-n$

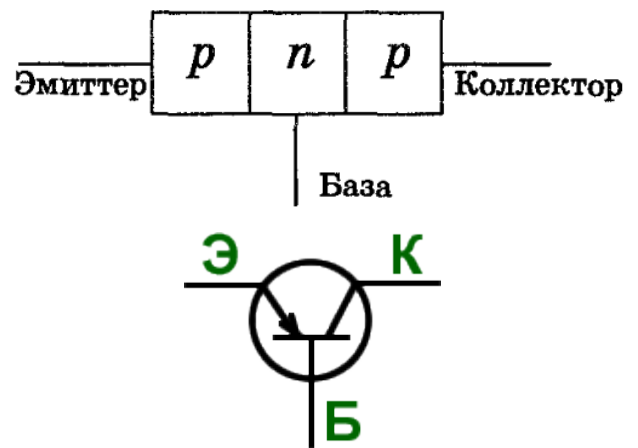


Рис. 14. Транзистор  $p-n-p$

Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны и различие между ними заключается в том, что полярности включения источников питания их противоположны, а также в том, что если в транзисторе  $n-p-n$ - типа электрический ток создается в основном электронами, то в транзисторе  $p-n-p$ - типа - дырками.

Смежные области, отделенные друг от друга  $p-n$ -переходами, называются эмиттером **Э**, базой **Б** и коллектором **К**.

**Эмиттер** является областью, испускающей (эмиттирующей) носители зарядов электронов в транзисторе  $n-p-n$ -типа и дырок в транзисторе  $p-n-p$ -типа, **коллектор** - область, собирающая носители зарядов, **база** - средняя область, основание.

В условиях работы транзистора к левому  $p-n$ -переходу прикладывается напряжение эмиттер - база  $U_{ЭБ}$  в прямом направлении, а к правому  $p-n$ -переходу - напряжение база - коллектор  $U_{БК}$  - в обратном.

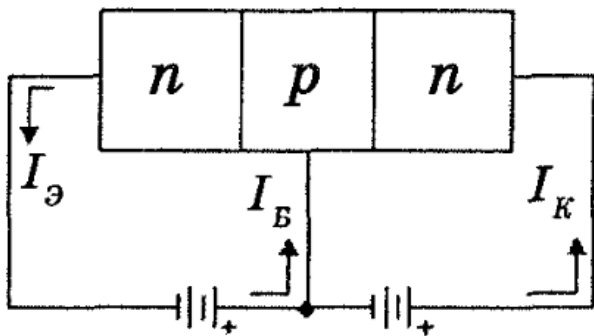


Рис. 15. Схема включения транзистора структуры  $n-p-n$

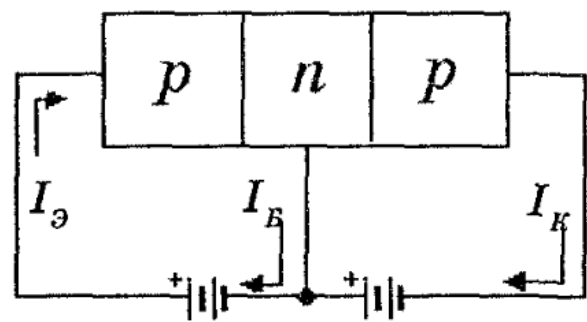


Рис. 16. Схема включения транзистора структуры  $p-n-p$

Под действием электрического поля большая часть носителей зарядов из левой области (эмиттера), преодолевая  $p-n$ -переход, переходит в очень узкую среднюю область (базу). Далее большая часть носителей зарядов продолжает двигаться ко второму переходу и, приближаясь к нему, попадает в электрическое поле, созданное внешним источником  $U_{К}$ .

Под влиянием этого поля носители зарядов втягиваются в правую область (коллектор), увеличивая ток в цепи батареи  $U_{К}$ .

Если увеличить напряжение  $U_{э}$ , то возрастет количество носителей зарядов, перешедших из эмиттера в базу, т. е. увеличится ток эмиттера на некоторую величину  $\Delta I_{э}$ . При этом также увеличится ток коллектора на величину  $\Delta I_{к}$ .

В базе незначительная часть носителей зарядов, перешедших из эмиттера, рекомбинирует со свободными носителями зарядов противоположной полярности, убыль которых пополняется новыми носителями зарядов из внешней цепи, образующими ток базы  $I_{б}$ .

Таким образом, ток коллектора  $I_{к} = I_{э} - I_{б}$  окажется меньше тока эмиттера, незначительно отличаясь от последнего. Отношение  $\alpha = \Delta I_{к} / \Delta I_{э}$  при  $U_{к} = const$  называется коэффициентом усиления по току и обычно имеет значение  $\alpha = 0,9 \div 0,995$ .

Если цепь эмиттер - база разомкнута и ток в ней равен нулю  $I_{э} = 0$ , а между коллектором и базой приложено напряжение  $U_{к}$ , то в цепи коллектора будет проходить небольшой обратный (тепловой) ток  $I_{ко}$ , обусловленный неосновными носителями зарядов. Этот ток в сильной степени зависит от температуры и является одним из параметров транзистора (меньшее его значение соответствует лучшим качествам транзистора).

Так как левый (эмиттерный) **p-n**-переход находится под прямым напряжением, то он обладает малым сопротивлением. На правый же (коллекторный) **p-n**-переход воздействует обратное напряжение и он имеет большое сопротивление. Поэтому напряжение, прикладываемое к эмиттеру, весьма мало (десятые доли вольта), а напряжение, подаваемое на коллектор, может быть достаточно большим (до нескольких десятков вольт).

Изменение тока в цепи эмиттера, вызванное малым напряжением  $U_{э}$ , создает примерно такое же изменение тока в цепи коллектора, где действует значительно большее напряжение  $U_{к}$ , в результате чего транзистор осуществляет усиление мощности.

## 5. Схемы включения транзисторов.

При работе транзистора в качестве усилителя электрических колебаний входное переменное напряжение  $U_{вх}$  (сигнал, подлежащий усилению) подают последовательно с источником постоянного напряжения смещения  $U_{см}$  между эмиттером и базой, а выходное напряжение  $U_{вых}$  (усиленный сигнал) снимается с нагрузочного резистора  $R_{н}$ .

Возможны три схемы включения транзисторов, рассмотрим их на примере транзистора структуры  $n-p-n$  (рис. 17): с общей базой **ОБ** (а), с общим эмиттером **ОЭ** (б) и с общим коллектором **ОК** (в). Название схемы показывает, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей. Схемы включения транзисторов отличаются своими свойствами, но принцип усиления колебаний остается одинаковым.

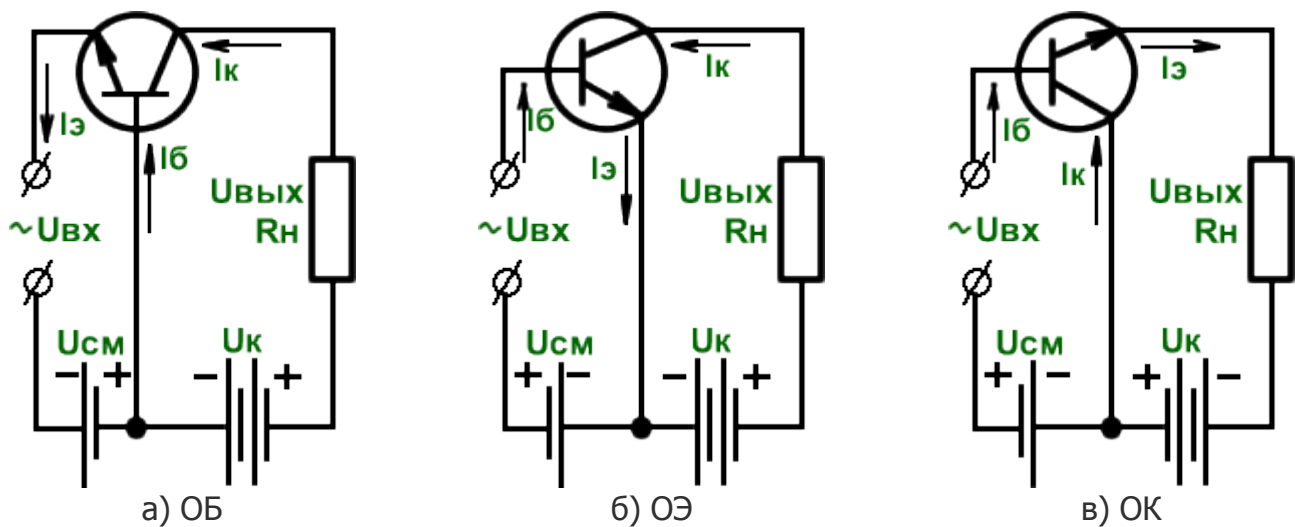


Рис. 17. Схемы включения транзистора структуры  $n-p-n$ .

### Схема с общей базой (ОБ)

В схеме с общей базой положительное приращение напряжения на входе  $\Delta U_{вх}$  вызывает увеличение тока эмиттера  $I_{э}$ , что приводит к увеличению как тока коллектора  $I_{к}$ , так и напряжения выхода  $\Delta U_{вых}$ , причем  $\Delta U_{вых} \gg \Delta U_{вх}$ .

В схеме с **ОБ** источник входного напряжения включен в цепь эмиттер - база, а нагрузка и источник питания - в цепь коллектор - база.

Входное сопротивление схемы с **ОБ** мало (несколько ом или десятков ом), так как эмиттерный переход включен в прямом направлении. Выходное сопротивление схемы, наоборот, велико (сотни килоом), так как коллекторный переход включён в обратном направлении.

Малое входное сопротивление схемы с **ОБ** является существенным ее недостатком, ограничивающим применение ее в усилителях. Через источник входного сигнала в этой схеме проходит весь ток эмиттера, и усиления по току не происходит (коэффициент усиления по току  $\alpha < 1$ ). Усиление по напряжению и по мощности в этой схеме может достигать нескольких сотен.

### Схема с общим эмиттером (ОЭ)

В схеме с общим эмиттером **ОЭ** источник входного напряжения включен в цепь эмиттер - база, а сопротивление нагрузки **Rн** и источник питания - в цепь эмиттер - коллектор, так что эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей.

Входное сопротивление схемы с **ОЭ** больше, чем у схемы с **ОБ**, так как входным током в ней является ток базы, который много меньше тока эмиттера и тока коллектора. Это сопротивление составляет сотни ом. Выходное сопротивление схемы с **ОЭ** велико и может составлять до ста килоом.

Коэффициент усиления по току  **$\beta$**  в этой схеме определяется как отношение приращения тока коллектора  **$I_{к}$**  к приращению тока базы  **$I_{б}$**  при постоянном напря-

жении на коллекторе, т. е.  $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$  при  $U_k = \text{const}$  и может иметь значения  $\beta = 10 \div 200$  для различных транзисторов.

Учитывая равенства  $I_{\Sigma} = I_k + I_b$  и  $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_{\Sigma}$ , получим  $\beta = \Delta I_k / (\Delta I_{\Sigma} - \Delta I_k) = (\Delta I_k / \Delta I_{\Sigma}) / (1 - \Delta I_k / \Delta I_{\Sigma}) = \alpha / (1 - \alpha)$ .

Коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  для схемы с **ОЭ** того же порядка, что и для схемы с **ОБ**. Коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_i K_u$  во много раз больше, чем в схеме с **ОБ**.

В схеме с общим эмиттером **ОЭ** при усилении входного напряжения происходит **поворот фазы выходного напряжения на половину периода, т. е. на 180°**, как это видно из схемы: положительные приращения входного напряжения вызывают отрицательное приращение выходного и наоборот.

### Схема с общим коллектором (ОК)

В схеме с общим коллектором **ОК** источник входного напряжения включается в цепь базы, а источник питания и сопротивление нагрузки - в цепь эмиттера. Входным током является ток базы, а выходным - ток эмиттера.

Коэффициент усиления по току для этой схемы  $K_i = \Delta I_{\Sigma} / \Delta I_b = \Delta I_{\Sigma} / (\Delta I_{\Sigma} - \Delta I_k) = 1 / (1 - \alpha)$ .

Входное сопротивление схемы с **ОК** велико (десятки килоом), а выходное сопротивление мало (до **1 ÷ 2 кОм**).

Коэффициент усиления по напряжению схемы с общим коллектором **ОК** -  $K_u = 0,9 \div 0,95$ , т. е. близок к единице, и эту схему часто называют **эмиттерным повторителем**.

Схема с общим коллектором **ОК** используется для согласования отдельных каскадов усиления, источника сигнала или нагрузки с усилителем.

Сведём параметры схем включения транзисторов в таблицу 1.

Таблица 1

	Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
Коэффициент усиления по току $K_i$	$\alpha < 1$	$\beta = 10 \dots 200$	десятки раз
Коэффициент усиления по напряжению $K_u$	до нескольких сотен	до нескольких сотен	0.9...0.95
Коэффициент усиления по мощности $K_p = K_u \cdot K_i$	до нескольких сотен	до нескольких тысяч, десятков тысяч	десятки раз
Входное сопротивление $R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$	единицы-десятки Ом	сотни Ом	десятки кОм
Выходное сопротивление $R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}}$	сотни кОм	десятки кОм	до 1...2 кОм

## 6. Характеристики транзисторов.

**Характеристиками транзистора** называются зависимости между токами и напряжениями во входной и выходной цепях. При разных схемах включения транзистора входные и выходные цепи различны, следовательно, и характеристики представляют собой зависимости различных величин для каждой схемы включения.

Так, для схемы с общим эмиттером **ОЭ** входной цепью является цепь базы и **входная характеристика** отражает зависимость **тока базы** от **напряжения эмиттер - база** при постоянном напряжении между эмиттером и коллектором, т. е.  $I_B = f(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$ .

Выходной цепью для этой схемы является цепь коллектора и **выходной характеристикой** - зависимость **тока коллектора** от **напряжения эмиттер - коллектор** при неизменном токе базы, т. е.  $I_K = f(U_{ЭК})$  при  $I_B = \text{const}$ .

Статические характеристики транзистора типа **p-n-p**, включенного по схеме с общим эмиттером.

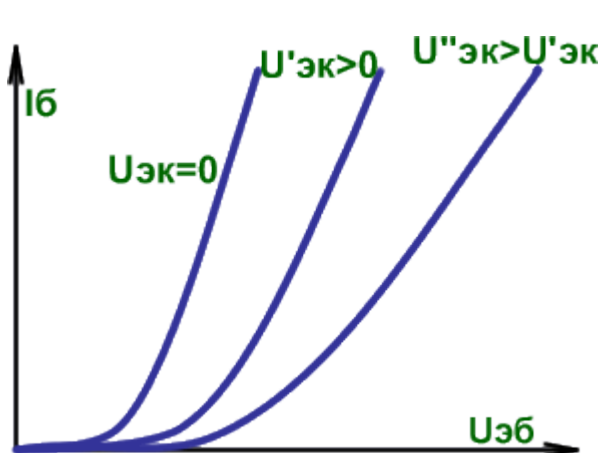


Рис. 18. Входные характеристики.

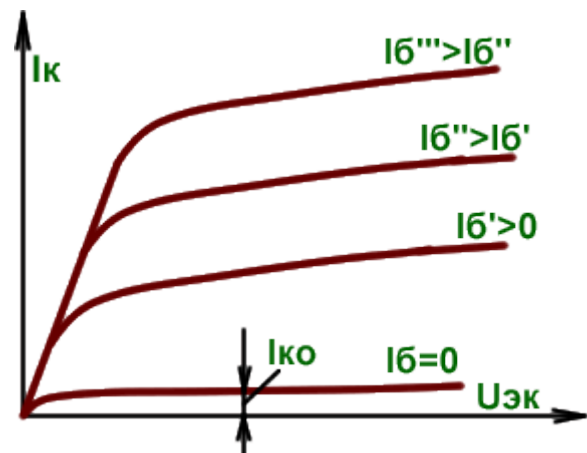


Рис. 19. Выходные характеристики.

На рисунках 18 и 19 показан примерный вид входных и выходных характеристик транзистора типа **p-n-p**.

При малых значениях напряжения между эмиттером и базой ( $U_{БЭ}$ ) ток базы растет медленно из-за большого сопротивления **p-n**-перехода, которое с увеличением тока уменьшается.

С увеличением коллекторного напряжения  $U_{ЭК}$  входные характеристики смещаются вправо, т. е. с увеличением  $U_{ЭК}$  необходимо повысить напряжение  $U_{БЭ}$ , для того чтобы ток базы остался неизменным.

Выходные характеристики показывают, что в рабочей области напряжение  $U_{ЭК}$  незначительно влияет на коллекторный ток  $I_K$ , так как в основном он зависит от количества дырок, инжектируемых в базу, т. е. от тока эмиттера.

## 7. Устройство биполярных транзисторов

Устройство плоскостного германиевого транзистора **p-n-p**-типа показано на рис. 20.

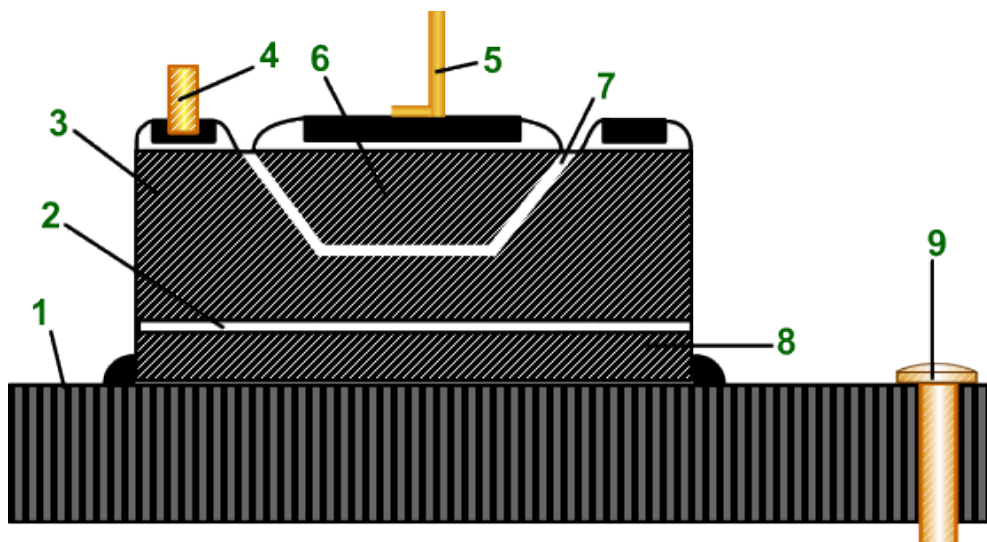


Рис. 20. Устройство транзистора:

1 – кристаллодержатель; 2 – коллекторный переход; 3 – база; 4 – вывод базы; 5 – вывод эмиттера; 6 – эмиттер; 7 – эмиттерный переход; 8 – коллектор; 9 – вывод коллектора.

Базой является пластина **3** из кристаллического германия с электронной проводимостью. С двух сторон в пластину вплавлены индиевые электроды, служащие эмиттером **6** и коллектором **8**. При плавлении индия между каждым из этих электродов и германиевой пластиной - базой образуются области с дырочной проводимостью и создаются эмиттерный **7** и коллекторный **2** **p-n**-переходы. Коллектор **8** крепится на кристаллодержателе **1**, от которого наружу проходит вывод коллектора **9**. Выводы от эмиттера **5** и базы **4** изолированы от корпуса стеклянными проходными изоляторами.

Транзистор помещается в металлический корпус.

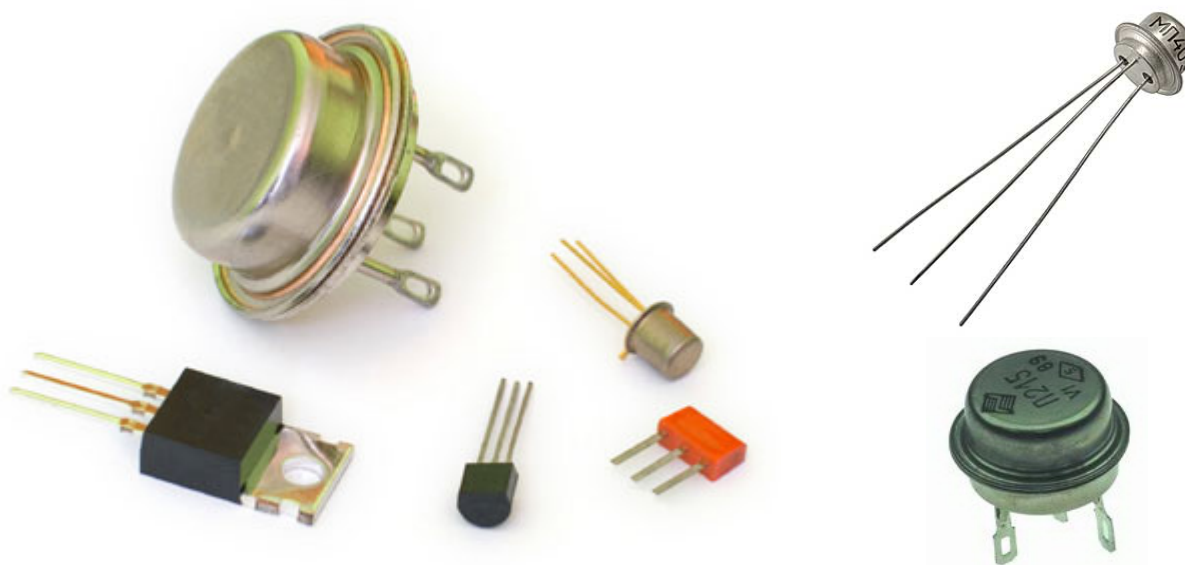


Рис. 21. Биполярные транзисторы

## 8. Достоинства и недостатки биполярных транзисторов.

Транзисторы по сравнению с электронными лампами имеют следующие **преимущества**: большую механическую прочность и долговечность, постоянную готовность к работе, малые габариты и массу, низкое напряжение питания и высокий КПД;

кроме того, отсутствует цепь накала и, следовательно, упрощена схема и нет потребления мощности для разогрева катода.

К **недостаткам** транзисторов относится зависимость режима работы его от температуры окружающей среды, небольшая выходная мощность, чувствительность к перегрузкам, разброс параметров, вследствие которого отдельные транзисторы одного типа значительно отличаются друг от друга по своим параметрам, большое различие между входными и выходными сопротивлениями.

## 9. Полевые транзисторы

В основу полевых транзисторов положены физические принципы, которые известны давно, однако их реализация встретила существенные технические трудности. Только в 1960-х гг. полевые транзисторы начали широко применять в различных областях электроники.

*В полевых транзисторах используют эффект воздействия поперечного электрического поля на проводимость канала, по которому движутся носители электрического заряда.*

Полевые каналные транзисторы имеют существенные преимущества, к которым прежде всего относятся: большое входное сопротивление приборов ( $10^{10} - 10^{15}$  Ом); большая устойчивость к проникающим излучениям (допускается уровень излучения на 3-4 порядка больший, чем для биполярных транзисторов), малый уровень собственных шумов, малое влияние температуры на усилительные свойства.

Полевые транзисторы изготовляют двух типов: с затвором в виде  $p-n$ -перехода и с изолированным затвором.

Устройство транзистора с затвором в виде  $p-n$ -перехода схематично представлено на рис. 22.

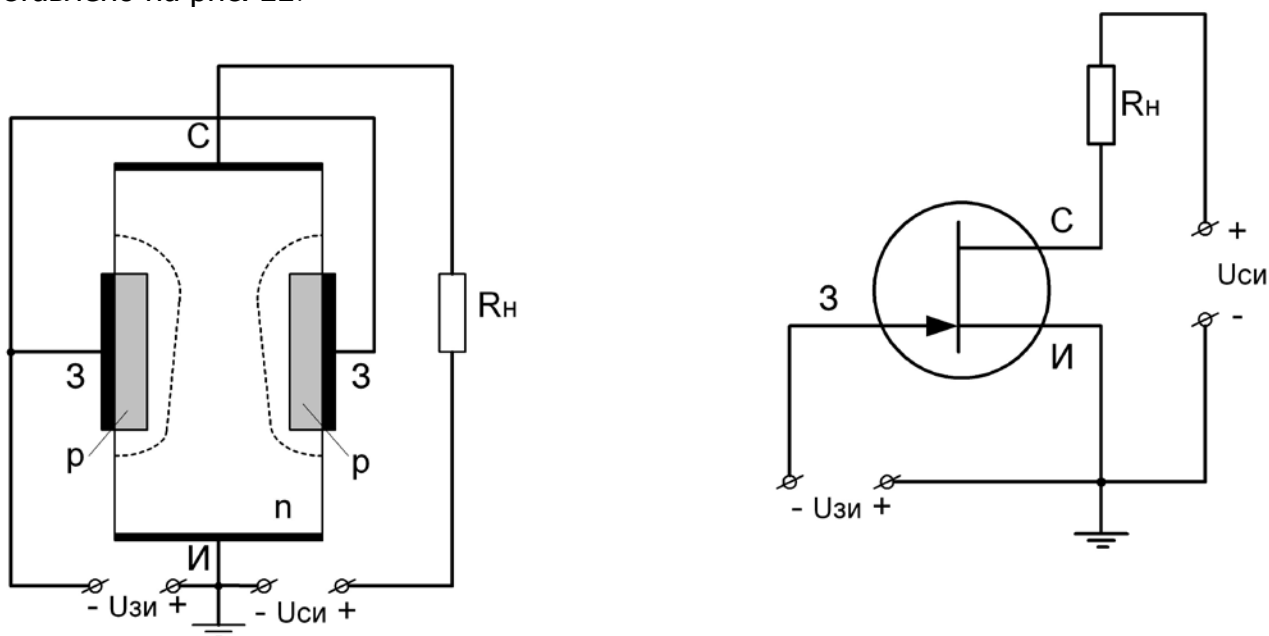


Рис. 22. Схематическое изображение и схема включения полевого транзистора с  $p-n$ -переходом и  $p$ -затвором: И — исток; С — сток.

Основу прибора составляет слаболегированная полупроводниковая пластина  $n$ -типа, к торцам которой приложено напряжение  $U_c$ , создающее ток  $I_c$  через со-



противление нагрузки  $R_H$ . В полупроводниковой пластине этот ток обеспечивается движением основных носителей заряда. Торце пластины, от которого движутся носители заряда, называется истоком. Торце, к которому движутся носители заряда, — стоком. В две противоположные боковые поверхности основной  $n$ -пластины вплавлены пластинки типа  $p$ . На границе раздела пластин  $n$  и  $p$  возникают электронно-дырочные переходы. К этим переходам в непроводящем направлении приложено входное напряжение  $U_{BX}$ . Значение напряжения  $U_{BX}$  можно менять при обязательном сохранении указанной на рисунке полярности источника смещения. Обычно  $U_{BX}$  состоит из двух составляющих: переменного напряжения управляющего сигнала и постоянной составляющей начального смещения, значение которой превышает амплитуду сигнала. Пластины  $p$ -типа образуют затвор. При указанной полярности напряжения на затворе вокруг этих пластин образуется слой, обедненный носителями заряда и, следовательно, имеющий малую проводимость. Между обедненными слоями сохраняется канал с высокой проводимостью.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении ширины обедненного слоя при изменении обратного напряжения  $p-n$ -перехода (см. рис. 10). С увеличением напряжения на затворе ширина обедненных слоев увеличивается, а поперечное сечение канала и его проводимость уменьшаются.

Таким образом, изменяя напряжение  $U_{3И}$  на затворе, можно менять ток через сопротивление нагрузки  $R_H$  и выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  на нём.

Работу полевого транзистора принято характеризовать зависимостью тока стока  $I_C$  от напряжения между истоком и стоком  $U_C$  при различных значениях напряжения на затворе  $U_3$ . Эта зависимость аналогична анодной характеристике усилительной лампы.

Семейство характеристик полевого транзистора с затвором и в виде  $p-n$ -перехода изображено на рис. 23.

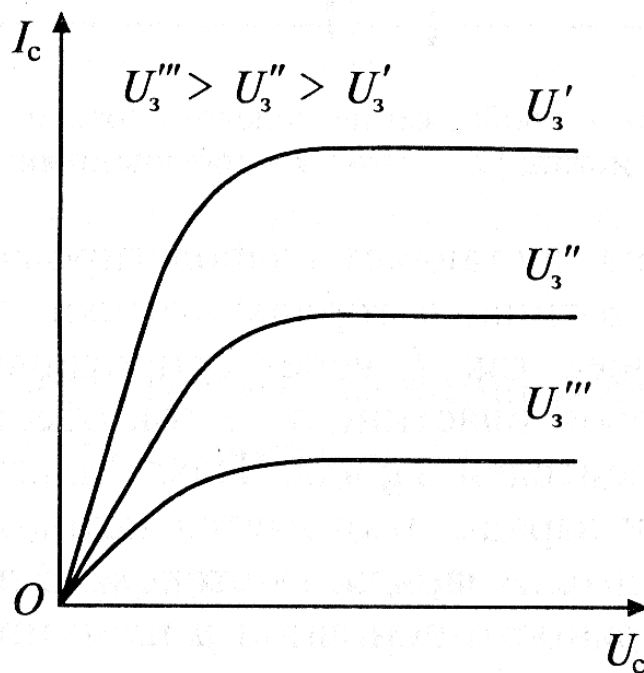


Рис. 23. Семейство ВАХ полевого транзистора с затвором в виде  $p-n$ -перехода

Сначала с увеличением  $U_c$  ток  $I_c$  нарастает практически линейно. Затем наступает режим насыщения и увеличение  $U_c$  не приводит к росту тока. Это объясняется тем, что при насыщении напряженность продольного поля в канале складывается с напряженностью поперечного поля и канал в области стока сужается. Причем чем больше напряженность продольного поля (чем больше  $U_c$ ), тем больше сужается канал в области стока. Ток при этом остается постоянным. Ток насыщения тем меньше, чем больше напряжение на затворе (обратное напряжение  $p-n$ -перехода).

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором схематически показано на рис. 24. Основу прибора составляет пластина полупроводника  $p$ -типа. На небольшом расстоянии друг от друга в поверхность основной пластины вплавляют донорную примесь. Затем поверхность пластины кремния подвергают термической обработке, в результате чего на ней наращивается тонкий (0,1 мкм) слой диоксида, являющегося хорошим изолятором. На слой изолятора накладывают металлическую пластину затвора, перекрывающую области донорной примеси  $n$ .

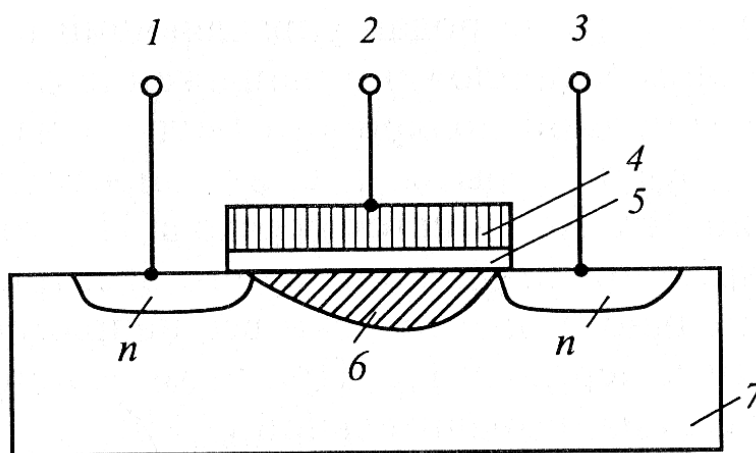


Рис. 24. Схематическое изображение полевого транзистора с изолированным затвором: 1 — исток; 2 — затвор; 3 — сток; 4 — металл; 5 — диэлектрик; 6 — канал л-типа; 7 — полупроводник  $p$ -типа

Транзисторы с изолированным затвором чаще называют транзисторами типа МДП (металл—диэлектрик—полупроводник). Упрощенно принцип его работы можно представить следующим образом. При отсутствии напряжения на затворе области  $n$  истока и стока разделены непроводящей прослойкой основной пластины. При подаче на затвор положительного напряжения электроны вытягиваются из основной пластины и скапливаются под изолирующей прослойкой. При определенной разности потенциалов концентрация электронов под диэлектриком превысит концентрацию дырок и области  $n$  будут соединены проводящим электронным каналом.

В рассмотренном случае проводящий канал между истоком и стоком индуцируется напряжением затвора. Разновидностью МДП-транзисторов являются конструкции, при которых канал встраивается в процессе изготовления прибора путем введения соответствующих примесей. Напряжение затвора меняет концентрацию носителей и проводимость встроенного канала.

Полевые транзисторы могут быть изготовлены и на основе пластин  $n$ -типа.

## 10. Тиристоры.

Четырехслойный кремниевый вентиль с двумя электродами (анодом и катодом) называется **динистором**. Если кроме анода и катода имеется третий (управляющий) электрод, то вентиль становится управляемым и называется **тиристором**.

Тиристор, а также динистор имеют четыре слоя - **p-n-p-n** (рис. 25), между которыми находятся три **p-n**-перехода **П1, П2, П3**.

У тиристора от средней области **p** имеется вывод - управляющий электрод **У**.

При отключенном управляющем электроде тиристор превращается в динистор.

Если между анодом и катодом вентиля приложено небольшое постоянное напряжение в прямом направлении, то переходы **П1** и **П3** будут открытыми и их сопротивление мало. Переход **П2** будет включен в обратном (непроводящем) направлении и его сопротивление велико, так что все приложенное к тиристорному напряжению будет практически на переходе **П2**, а ток в цепи мал.

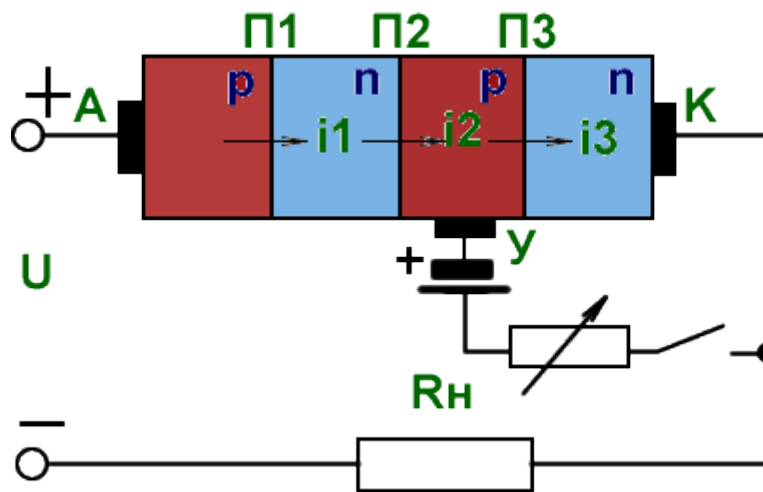


Рис. 25. Схема устройства тиристора.

При повышении напряжения **U** на тиристоре ток в цепи увеличивается незначительно, так как ограничивается большим сопротивлением перехода **П2** и вольт-амперная характеристика тиристора будет подобна обратной ветви характеристики диода (кривая **Оа** на рис. 26).

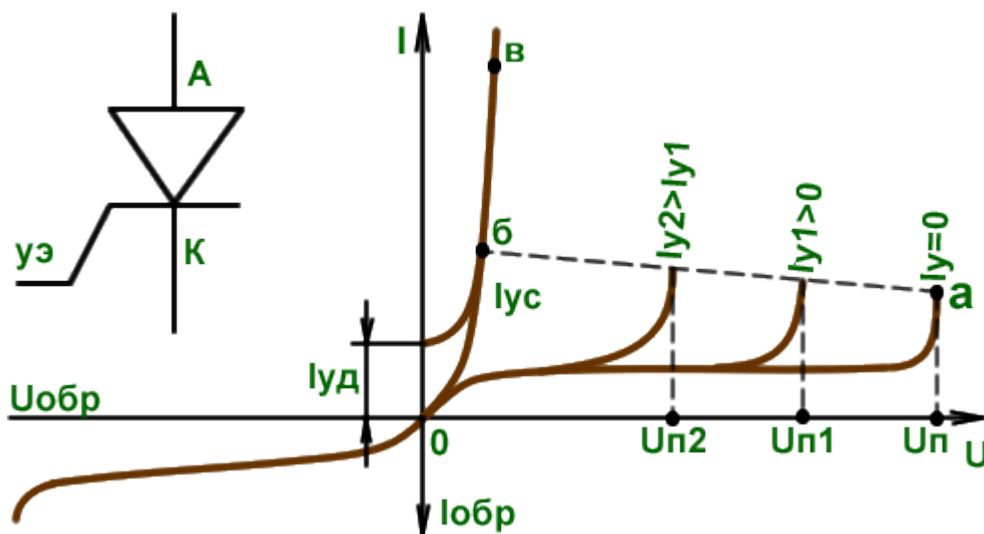


Рис. 26. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) тиристора и его условное обозначение.

Если напряжение достигнет некоторого определенного значения, называемого напряжением переключения **Uпер**, то в переходе **П2** напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов (электронов и дырок), его сопротивление резко уменьшается и тиристор открывается.

Напряжение на открытом тиристоре (участок **бв** вольтамперной характеристики) мало (порядка **1÷2 В**) и почти неизменно, так что ток в цепи ограничивается сопротивлением внешней нагрузки.

Наибольший ток тиристора лимитируется предельно допустимой мощностью, рассеиваемой им. Если уменьшать ток через открытый тиристор, то он будет оставаться открытым до тех пор, пока ток в тиристоре достаточен для поддержания процесса образования носителей зарядов в переходе **П2**. При токе, меньше определенного значения, называемого током удержания **Iуд**, тиристор закрывается, т. е. возвращается в непроводящее состояние.

Если на управляющий электрод подать положительный потенциал от постороннего источника, то в переходе **П3** возникнет ток управления и появятся дополнительные носители зарядов, вследствие чего уменьшится напряжение переключения этого перехода и тиристор открывается при меньшем напряжении **Uп1**.

Чем больше ток управления **Iу**, тем больше дополнительных зарядов в переходе **П3** и меньше напряжение переключения тиристора.

При определенном значении тока управления, называемом током спрямления **Iус** тиристор будет работать как неуправляемый вентиль, т. е. будет открыт при любом положительном напряжении на его аноде.

*Таким образом, тиристор открывается как при подаче на его анод напряжения переключения, так и при включении тока управления достаточной величины **Iус**.*

Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепи управляющего электрода проходит кратковременный импульс тока прямоугольной формы и длительностью примерно 10 мкс.

При подаче на зажимы тиристора обратного напряжения **Uобр** он будет закрыт обратно включенными переходами **П1** и **П3** независимо от управляющего тока и его вольт-амперная характеристика практически не отличается от обратной ветви вольт-амперной характеристики неуправляемого вентиля (см. рис. 9).

Тиристоры имеют два устойчивых состояния: при закрытом тиристоре его сопротивление очень велико (**R ~ ∞**), при открытом - мало (**R ~ 0**). Поэтому тиристоры находят применение как бесконтактные переключатели в инверторах, регулируемых выпрямителях, в схемах защиты и т. д.