

Урок-8.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Вот мы и подошли к уроку, с которого начинается старт во «взрослую жизнь» т. к. именно с этого урока вы сможете полноценно и с пониманием предметной области начинать паять простейшие конструкции. И для успешной сборки и наладки этих конструкций, очень важно четко понимать какую функцию в этой схеме выполняет тот, или иной радиоэлемент, какие параметры нужно проконтролировать и т. д. Практическая работа в этом уроке будет не менее интересна, и сводится к выполнению предложенных опытов с биполярным транзистором. Думаю что после этой практической работы, вопросы по поводу принципов работы транзистора отпадут сами собой. Если все - таки, вопросы будут, это говорит только о вашей целеустремленности и желании познать глубже суть происходящего.

В большую «семью» полупроводниковых приборов, называемых транзисторами, входят два вида: **биполярные и полевые**. Первые из них, чтобы как - то отличить их от вторых, часто называют **обычными транзисторами**. Биполярные транзисторы используются наиболее широко. Именно с них мы пожалуй и начнем. Термин «транзистор» образован из двух английских слов: **transfer - преобразователь и resistor - сопротивление**. В упрощенном виде биполярный транзистор представляет собой пластину полупроводника с тремя (как в слоеном пироге) чередующимися областями разной электропроводности (рис. 1), которые образуют два $p - n$ перехода. Две крайние области обладают электропроводностью одного типа, средняя - электропроводностью другого типа. У каждой области свой контактный вывод. Если в крайних областях преобладает дырочная электропроводность, а в средней электронной (рис. 1, а), то **такой прибор называют транзистором структуры $p - n - p$** . У транзистора **структуры $n - p - n$, наоборот**, по краям расположены области с электронной электропроводностью, а между ними - область с дырочной электропроводностью (рис. 1, б).

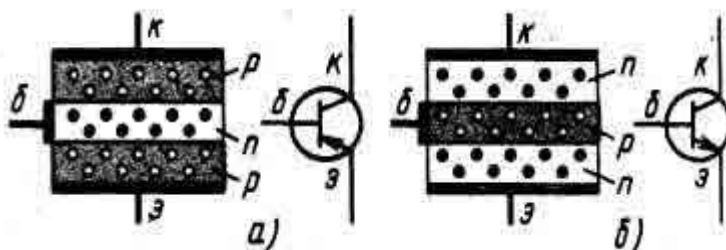


Рис. 1 Схематическое устройство и графическое обозначение на схемах транзисторов структуры $p - n - p$ и $n - p - n$.

Если мысленно прикрыть любую из крайних областей транзисторов, изображенных схематически на (рис.1). Что получилось? Оставшиеся две области есть не что иное, как плоскостной диод. Если прикрыть другую крайнюю область, то тоже получится диод. Значит, транзистор можно представить себе как два плоскостных диода с одной общей областью, включенных навстречу друг другу.

Общую (среднюю) область транзистора называют базой, одну крайнюю область - эмиттером, вторую крайнюю область - коллектором.

Это три электрода транзистора. Во время работы транзистора его эмиттер вводит (эмитирует) в базу дырки (в транзисторе структуры $p - n - p$) или электроны (в транзисторе структуры $n - p - n$), коллектор собирает эти электрические заряды, вводимые в базу эмиттером.

Различие в обозначениях транзисторов разных структур на схемах заключается лишь в направлении стрелки эмиттера: в $p - n - p$ транзисторах она обращена в сторону базы, а в $n - p - n$ транзисторах - от базы.

Электронно - дырочные переходы в транзисторе могут быть получены так же, как в плоскостных диодах. Например, чтобы изготовить транзистор структуры $p - n - p$, берут тонкую пластину германия с электронной электропроводностью и наплавляют на ее поверхность кусочки индия. Атомы индия диффундируют (проникают) в тело пластины, образуя в ней две области типа $p - \text{эмиттер}$ и $p - \text{коллектор}$, а между ними остается очень тонкая (несколько микрон) прослойка полупроводника типа $n - \text{база}$. Транзисторы, изготовляемые по такой технологии, называют сплавными.

Запомни наименования $p - n$ переходов транзистора: между коллектором и базой - коллекторный, между эмиттером и базой - эмиттерный.

Схематическое устройство и конструкция сплавного транзистора показаны на (рис. 2). Прибор собран на металлическом диске диаметром менее 10 мм. Сверху к этому диску приварен кристаллодержатель, являющийся внутренним выводом базы, а снизу - ее наружный проволочный вывод. Внутренние выводы коллектора и эмиттера приварены к проволочкам, которые впаяны в стеклянные изоляторы и служат внешними выводами этих электродов. Цельнометаллический колпак защищает прибор от механических повреждений и влияния света. Так устроены наиболее распространенные маломощные низкочастотные транзисторы серий МП39, МП40, МП41, МП42 и их разновидности. Буква (М) в обозначении говорит о том, что корпус транзистора холодносварной, буква (П) - первоначальная буква слов «плоскостной», а цифры - порядковые заводские номера приборов. В конце обозначения могут быть буквы А, Б, В (например, МП39Б), указывающие разницу в параметрах транзистора данной серии. Существуют другие способы изготовления транзисторов, например, диффузионно - сплавной (рис. 3). Коллектором транзистора, изготовленного по такой технологии, служит пластина исходного полупроводника. На поверхность пластины наплавляют очень близко один от другого два маленьких шарика примесных элементов. Во время нагрева до строго определенной температуры происходит диффузия примесных элементов в пластинку полупроводника. При этом один шарик (на рис. 3 - правый) образует в коллекторе тонкую базовую область, а второй (на рис. 3 - левый) эмиттерную область.

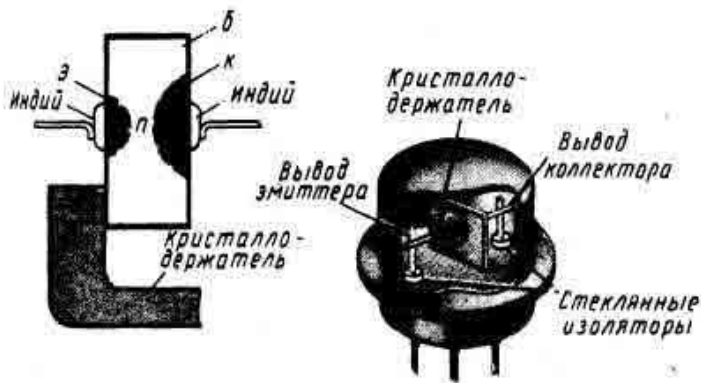


Рис. 2 Устройство и конструкция сплавного транзистора структуры р - п - р.

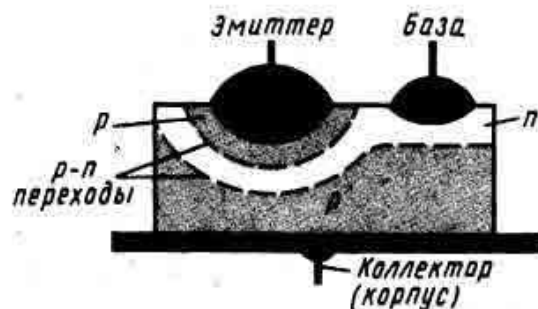


Рис. 3 Устройство и конструкция диффузионно-сплавного транзистора структуры р - п - р.

В результате в пластине исходного полупроводника получаются два р - п перехода, образующие транзистор структуры р - п - р. По такой технологии изготавливают, в частности, наиболее массовые маломощные высокочастотные транзисторы серий П401-П403, П422, П423, ГТ308. В настоящее время действует система обозначения транзисторов, по которой выпускаемые серийно приборы имеют обозначения, состоящие из четырех элементов, например: ГТ109А, КТ315В, ГТ403И.

- Первый элемент этой системы обозначения - буква Г, К или А (или цифра 1, 2 и 3) - характеризует полупроводниковый материал транзистора и температурные условия работы прибора. Буква Г (или цифра 1) присваивается германиевым транзисторам, буква К (или цифра 2) - кремниевым транзисторам, буква А (или цифра 3) - транзисторам, полупроводниковым материалом которых служит арсенид галлия. Цифра, стоящая вместо буквы, указывает на то, что данный транзистор может работать при повышенных температурах (германиевый - выше 4- 60°C, кремниевый - выше +85°C).
- Второй элемент - буква Т - начальная буква слова «транзистор».
- Третий элемент - трехзначное число от 101 до 999 - указывает порядковый номер разработки и назначение прибора. Это число присваивается транзистору по признакам, приведенным в таблице.

Транзистор P_{\max} , Вт	Низкая частота (до 3 МГц)	Средняя частота (3-30 МГц)	Высокая частота (свыше 30 МГц)
Малой мощности (до 0,3 Вт)	101-199	201-299	301-399
Средней мощности (0,3-3 Вт)	401-499	501-599	601-699
Большой мощности (свыше 3 Вт)	701-799	801-899	901-999

- Четвертый элемент обозначения - буква, указывающая разновидность транзисторов данной серии.

Вот некоторые примеры расшифровки обозначений транзисторов по этой системе : ГТ109А - германиевый маломощный низкочастотный транзистор, разновидность А; ГТ404Г - германиевый средней мощности низкочастотный транзистор, разновидность Г; КТ315В - кремниевый маломощный высокочастотный транзистор, разновидность В. Наряду с такой системой продолжает действовать и прежняя система обозначения транзисторов, например П27, П401, П213, МП39 и т.д. Объясняется это тем, что такие или подобные транзисторы были разработаны до введения современной маркировки полупроводниковых приборов. Внешний вид некоторых биполярных транзисторов, наиболее широко используемых радиолюбителями, показан на (рис. 4). Маломощный низкочастотный транзистор ГТ109 (структуры р - п - р) имеет в диаметре всего 3, 4 мм. Транзисторы этой серии предназначены для миниатюрных радиовещательных приемников. Их используют также в слуховых аппаратах, в электронных медицинских приборах т.д. Диаметр транзисторов ГТ309 (р - п - р) 7,4 мм. Такие транзисторы применяют в различных малогабаритных электронных устройствах для усиления и генерирования колебаний высокой частоты. Транзисторы КТ315 (п - р - п) выпускают в пластмассовых корпусах. Эти маломощные транзисторы предназначены для усиления и генерирования колебаний высокой частоты. Транзисторы МП39 - МП42 (р - п - р) - самые массовые среди маломощных низкочастотных транзисторов. Точно так выглядят и аналогичные им, но структуры п - р - п, транзисторы МП35 - МП38. Диаметр корпуса любого из этих транзисторов 11,5 мм. Наиболее широко их используют в усилителях звуковой частоты. Так выглядят и маломощные высокочастотные р - п - р транзисторы серий П401 - П403, П416, П423, используемые для усиления высокочастотных сигналов как в промышленных, так и любительских радиовещательных приемниках. Транзистор ГТ402 (р - п - р) - представитель низкочастотных транзисторов средней мощности. Такую же конструкцию имеет его «близнец» ГТ404, но он структуры (п - р - п). Их, обычно используют в паре, в каскадах усиления мощности колебаний звуковой частоты. Транзистор П213 (германиевый структуры р - п - р) - один из мощных низкочастотных транзисторов, широко используемых в оконечных каскадах усилителей звуковой частоты. Диаметр этого, а также аналогичных ему транзисторов П214 - П216 и некоторых других, 24 мм. Такие транзисторы крепят на шасси или панелях при помощи фланцев. Во время работы они нагреваются, поэтому их обычно ставят на специальные теплоотводящие радиаторы, увеличивающие поверхности охлаждения. КТ904 - сверхвысокочастотный кремниевый п - р - п транзистор большой мощности. Корпус металлокерамический с жесткими

выводами и винтом М5, с помощью которого транзистор крепят на теплопроводящем радиаторе. Функцию радиатора может выполнять массивная металлическая пластина или металлическое шасси радиотехнического устройства. Высота транзистора вместе с выводами и крепежным винтом чуть больше 20 мм. Транзисторы этой серии предназначаются для генераторов и усилителей мощности радиоаппаратуры, работающей на частотах выше 100 МГц, например диапазона УКВ.

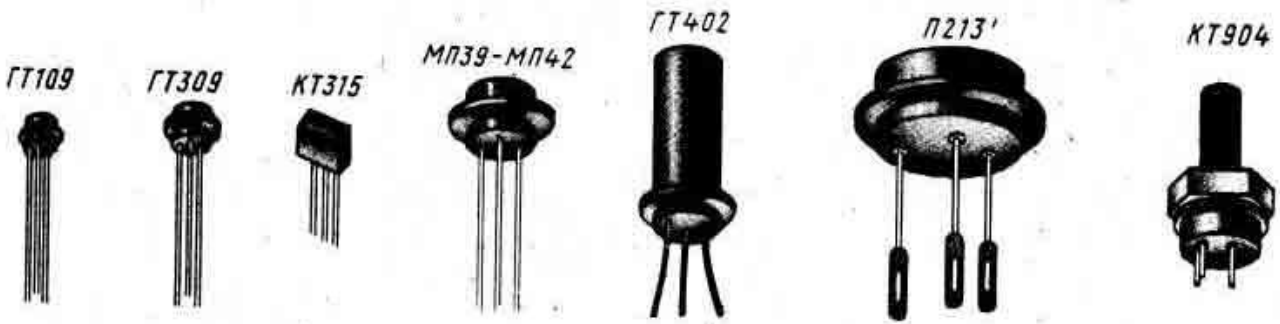


Рис. 4 Внешний вид некоторых транзисторов.

Схемы включения и основные параметры биполярных транзисторов

Итак, биполярный транзистор, независимо от его структуры, является трехэлектродным прибором. Его электроды - эмиттер, коллектор и база. Для использования транзистора в качестве усилителя напряжения, тока или мощности входной сигнал, который надо усилить, можно подавать на два каких-либо электрода и с двух электродов снимать усиленный сигнал. **При этом один из электродов обязательно будет общим.** Он - то и определяет название способа включения транзистора:

по схеме общего эмиттера (ОЭ), по схеме общего коллектора (ОК), по схеме общей базы (ОБ).

- Включение р-п-р транзистора по схеме ОЭ** показано на (рис. 5, а). Напряжение источника питания на коллекторе транзистора V подается через резистор R_k , являющийся нагрузкой, на эмиттер - через общий «заземленный» проводник, обозначаемый на схемах специальным знаком. Входной сигнал через конденсатор связи $C_{св}$ подается к выводам базы и эмиттера, т.е. к участку база - эмиттер транзистора, а усиленный сигнал снимается с выводов эмиттера и коллектора. Эмиттер, следовательно, при таком включении транзистора является общим для входной и выходной цепей. Транзистор, по схеме с ОЭ, в зависимости от его усилительных свойств может дать 10 - 200 - кратное усиление сигнала по напряжению и 20 - 100 - кратное усиление сигнала по току. Такой способ включения транзистора по схеме с ОЭ пользуется у радиолюбителей наибольшей популярностью. Существенным недостатком усилительного каскада на транзисторе, включенном по такой схеме, является его сравнительно малое входное сопротивление - всего 500-1000 Ом, что усложняет согласование усилительных каскадов, транзисторы которых включают по такой же схеме. Объясняется это тем, что в данном случае эмиттерный р - н переход транзистора включен в прямом, т.е. пропускном, направлении. А сопротивление пропускного перехода, зависящее от прикладываемого к нему напряжения, всегда мало. Что же касается выходного сопротивления такого каскада, то оно достаточно большое (2-20 кОм) и зависит от сопротивления нагрузки R_k и усилительных свойств транзистора.

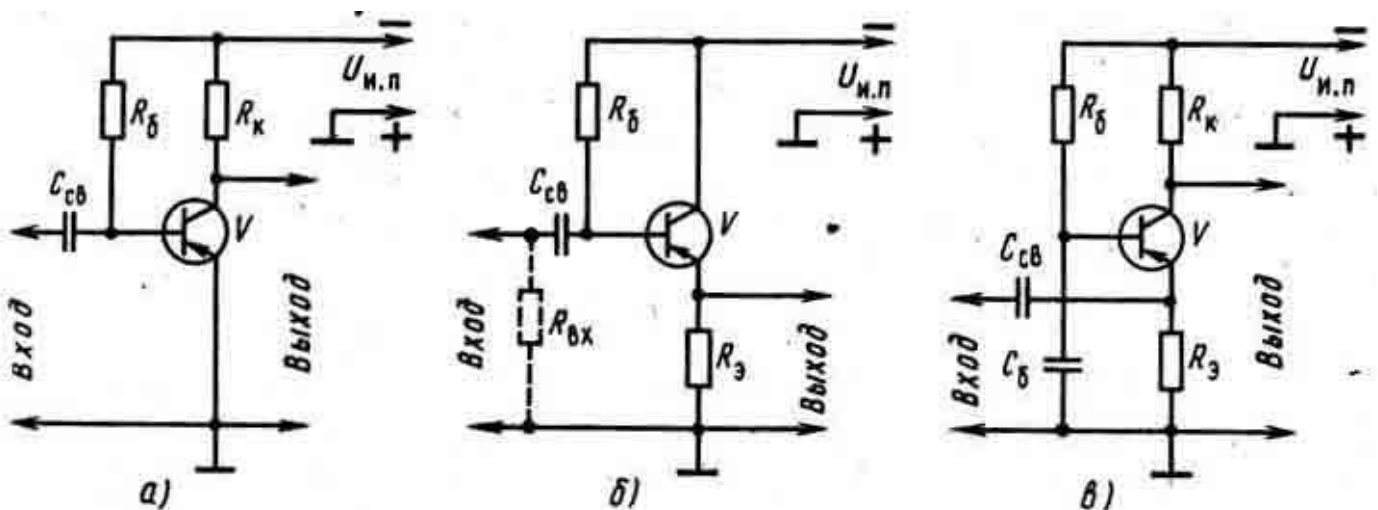


Рис. 5 Схемы включения транзисторов.

- **Включение транзистора по схеме ОК** показано на (рис. 5, б). Входной сигнал подается на базу и эмиттер через эмиттерный резистор $R_э$, который является частью коллекторной цепи. С этого же резистора, выполняющего функцию нагрузки транзистора, снимается и выходной сигнал. Таким образом, этот участок коллекторной цепи является общим для входной и выходной цепей, поэтому и название способа включения транзистора - ОК. Каскад с транзистором, включенным по такой схеме, по напряжению дает усиление меньше единицы. Усиление же по току получается примерно такое же, как если бы транзистор был включен по схеме ОЭ. Но зато входное сопротивление такого каскада может составлять 10 - 500 кОм, что хорошо согласуется с большим выходным сопротивлением каскада на транзисторе, включенном по схеме ОЭ. По существу, каскад не дает усиления по напряжению, а лишь как бы повторяет подведенный к нему сигнал. Поэтому транзисторы, включаемые по такой схеме, называют также **эмиттерными повторителями**. Почему эмиттерными? Потому что выходное напряжение на эмиттере транзистора практически полностью повторяет входное напряжение. Почему каскад не усиливает напряжение? Давайте мысленно соединим резистором цепь базы транзистора с нижним (по схеме) выводом эмиттерного резистора $R_э$, как показано на (рис. 5, б) штриховыми линиями. Этот резистор - эквивалент внутреннего сопротивления источника входного сигнала $R_{вх.}$, например микрофона или звукоснимателя. Таким образом, эмиттерная цепь оказывается связанной через резистор $R_{вх.}$ с базой. Когда на вход усилителя подается напряжение сигнала, на резисторе $R_э$, являющемся нагрузкой транзистора, выделяется напряжение усиленного сигнала, которое через резистор $R_{вх.}$ оказывается приложенным к базе в противофазе. При этом между эмиттерной и базовой цепями возникает очень сильная отрицательная обратная связь, сводящая на нет усиление каскада. Это по напряжению. А по току усиления получается такое же, как и при включении транзистора по схеме с ОЭ.
- **Теперь о включении транзистора по схеме с ОБ** (рис. 5, в). В этом случае база через конденсатор $C_б$ по переменному току заземлена, т. е. соединена с общим проводником питания. Входной сигнал через конденсатор $C_{св.}$ подают на эмиттер и базу, а усиленный сигнал снимают с коллектора и с заземленной базы. База, таким образом, является общим электродом входной и выходной цепей каскада. Такой каскад дает усиление по току меньше единицы, а по напряжению - такое же, как транзистор, включенный по схеме с ОЭ (10 - 200). Из-за очень малого входного сопротивления, БК превышающего нескольких десятковом (30-100) Ом, включение транзистора по схеме ОБ используют главным образом в генераторах электрических колебаний, в сверхгенеративных каскадах, применяемых, например, в аппаратуре радиоуправления моделями.

Чаще всего как я уже говорил применяются схемы с включением транзистора с ОЭ, реже с ОК. Но это только способы включения. А режим работы транзистора как усилителя определяется напряжениями на его электродах, токами в его цепях и, конечно, параметрами самого транзистора. Качество и усилительные свойства биполярных транзисторов оценивают по нескольким электрическим параметрам, которые измеряют с помощью специальных приборов. Вас же, с практической точки зрения, в первую очередь должны интересовать три основных параметра: обратный ток коллектора **Икбо**, статический коэффициент передачи тока **h213** (читают так: аш два один э) и граничная частота коэффициента передачи тока **Fгр**.

- **Обратный ток коллектора Икбо - это неуправляемый ток через коллекторный p - n переход, создающийся неосновными носителями тока транзистора.** Он характеризует качество транзистора: чем численное значение параметра Икбо меньше, тем выше качество транзистора. У маломощных низкочастотных транзисторов, например, серий МП39 - МП42, Икбо не должен превышать 30 мкА, а у маломощных высокочастотных 5 мкА. Транзисторы с большими значениями Икбо в работе неустойчивы.
- **Статический коэффициент передачи тока h21э характеризует усилительные свойства транзистора. Статическим его называют потому, что этот параметр измеряют при неизменных напряжениях на его электродах и неизменных токах в его цепях.** Буква «Э» в этом выражении указывает на то, что при измерении транзистор включают по схеме ОЭ. Коэффициент h21э характеризуется отношением постоянного тока коллектора к постоянному току базы при заданных постоянном обратном напряжении коллектор - эмиттер и токе эмиттера. Чем больше численное значение коэффициента h21э, тем большее усиление сигнала может обеспечить данный транзистор.
- **Граничная частота коэффициента передачи тока Fгр, выраженная в килогерцах или мегагерцах, позволяет судить о возможности использования транзистора для усиления колебаний тех или иных частот.** Граничная частота Fгр транзистора МП39, например, 500 кГц, а транзисторов П401 - П403 - больше 30 МГц. Практически транзисторы используют для усиления частот значительно меньше граничных, так как с повышением частоты коэффициент h21э транзистора уменьшается.

При конструировании радиотехнических устройств надо учитывать и такие параметры транзисторов, как максимально допустимое напряжение коллектор - эмиттер $U_{кэ\max}$, максимально допустимый ток коллектора $I_{к\max}$ а также максимально допустимую рассеиваемую мощность коллектора транзистора $P_{к\max}$ - мощность, превращающуюся внутри транзистора в тепло.

Коротко о полевом транзисторе

В этом полупроводниковом приборе управление рабочим током осуществляется не током во входной (базовой) цепи, как в биполярном транзисторе, а воздействием на носители тока **электрического поля**. Отсюда и название транзистора **«полевой»**. Схематическое устройство и конструкция полевого транзистора с р - п переходом показаны на (рис. 6). Основой такого транзистора служит пластина кремния с электропроводностью типа п, в которой имеется тонкая область с электропроводностью типа р. Пластину прибора называют затвором, а область типа р в ней - каналом. С одной стороны канал заканчивается истоком, с другой стоком - тоже областью типа р, но с повышенной концентрацией дырок. Между затвором и каналом создается р - п переход. От затвора, истока и стока сделаны контактные выводы. Если к истоку подключить положительный, а к стоку - отрицательный полюсы батареи питания (на рис. 6 - батарея GB), то в канале появится ток, создающийся движением дырок от истока к стоку. Этот ток, называемый током стока I_c , зависит не только от напряжения этой батареи, но и от напряжения, действующего между источником и затвором (на рис. 6 - элемент G). И вот почему. Когда на затворе относительно истока действует положительное закрывающее напряжение, обедненная область р - п перехода расширяется (на рис. 6 показано штриховыми линиями). От этого канал сужается, его сопротивление увеличивается, из - за чего ток стока уменьшается. С уменьшением положительного напряжения на затворе обедненная область р - п перехода, наоборот, сужается, канал расширяется, и ток снова увеличивается. Если на затвор вместе с положительным напряжением смещения подавать низкочастотный или высокочастотный сигнал, в цепи стока возникнет пульсирующий ток, а на нагрузке, включенной в эту цепь, - напряжение усиленного сигнала. Так, в упрощенном виде устроены и работают полевые транзисторы с каналом типа р, например транзисторы КП102, КП103 (буквы К и П означают «кремниевый полевой»). Принципиально так же устроен и работает полевой транзистор с каналом типа п. Затвор транзистора такой структуры обладает дырочной электропроводностью, поэтому на него относительно истока должно подаваться отрицательное напряжение смещения, а на сток (тоже относительно истока) - положительное напряжение источника питания. На условном графическом изображении полевого транзистора с каналом типа п стрелка на линии затвора направлена в сторону истока, а не от истока, как в обозначении транзистора с каналом типа р. Полевой транзистор - тоже трехэлектродный прибор. Поэтому его, как и биполярный транзистор, включать в усилительный каскад можно тремя способами: по схеме общего стока (**ОС**), по схеме общего истока (**ОИ**) и по схеме общего затвора (**ОЗ**). В радиолюбительской практике применяют в основном только первые два способа включения, позволяющие с наибольшей эффективностью использовать полевые транзисторы. **Усилительный каскад на полевом транзисторе обладает очень большим, исчисляемым мегаомами, входным сопротивлением.** Это позволяет подавать на его вход высокочастотные и низкочастотные сигналы от источников с большим внутренним сопротивлением, например от пьезокерамического звукоснимателя, не опасаясь искажения или ухудшения усиления входного сигнала. **В этом главное преимущество полевых транзисторов по сравнению с биполярными.**

Усилительные свойства полевого транзистора характеризуют крутизной характеристики S - отношением изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора, включенного по схеме ОИ. Численное значение параметра S выражают в миллиамперах на вольт; для различных транзисторов оно может составлять от 0,1 - 0,2 до 10 - 15 мА/В и больше. Чем больше крутизна, тем большее усиление сигнала может дать транзистор.

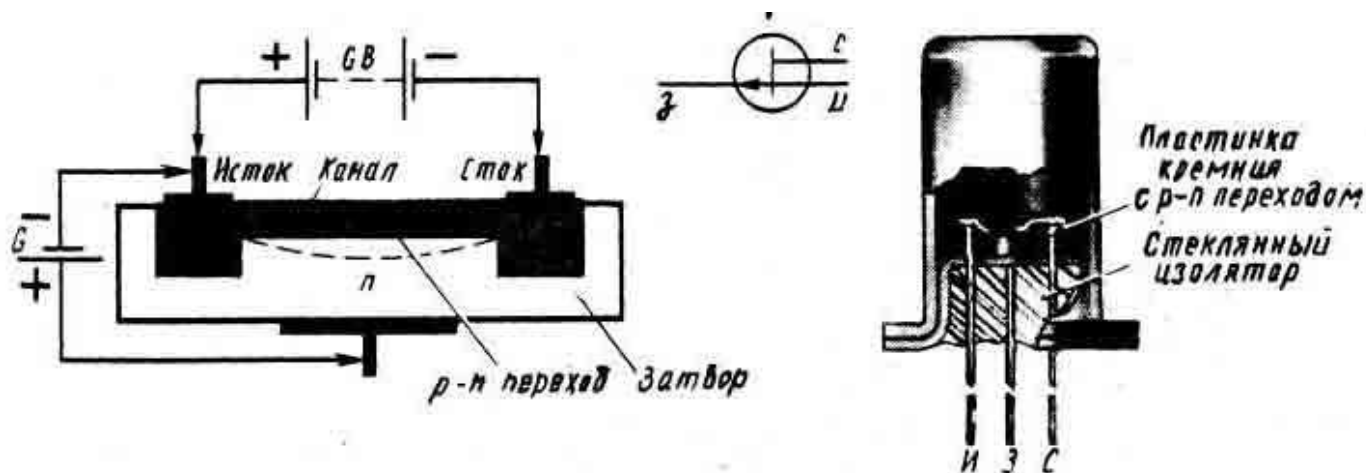


Рис. 6 Конструкция и графическое изображение полевого транзистора с каналом типа (р).

Другой параметр полевого транзистора - напряжение отсечки $U_{зи.отс.}$ - Это обратное напряжение на р - п переходе затвор - канал, при котором ток через этот переход уменьшается до нуля. У различных транзисторов напряжение отсечки может составлять от 0,5 до 10 В. О полевых транзисторах и их уникальных свойствах можно говорить еще много, я попытался рассказать о наиболее существенных. Полевым транзисторам посвящены целые учебники, поэтому для более детального изучения их свойств и области применения, нужно будет самостоятельно разыскать литературу и детально изучить.

Опыты с транзистором

В этого урока я сказал, что биполярный транзистор можно представить себе как два включенных встречно плоскостных диода, совмещенных в одной пластине полупроводника. В этом нетрудно убедиться на опытах, для которых потребуются любой бывший в употреблении, но не испорченный германиевый низкочастотный транзистор структуры р - п - р, например МП39 или подобные ему транзисторы МП40 - МП42 (коих сейчас великое множество в старых бросовых телевизорах, транзисторных радиоприемниках и т.д., т.е. покупать как правило ничего не нужно, а если и придется, то за копейки). Между коллектором и базой транзистора включите последовательно соединенные батарею 3336Л или другой источник питания на 4,5 В и лампочку от карманного фонаря, рассчитанную на напряжение 2,5 В и ток 0,075 или 0,15 А (рис. 1). Если положительный полюс батареи (GB окажется соединенным (через лампочку) с коллектором, а отрицательный - с базой (рис. 1, а), то лампочка должна гореть. При другой полярности включения батареи (рис. 1, б) лампочка гореть не будет. Как объяснить эти явления?

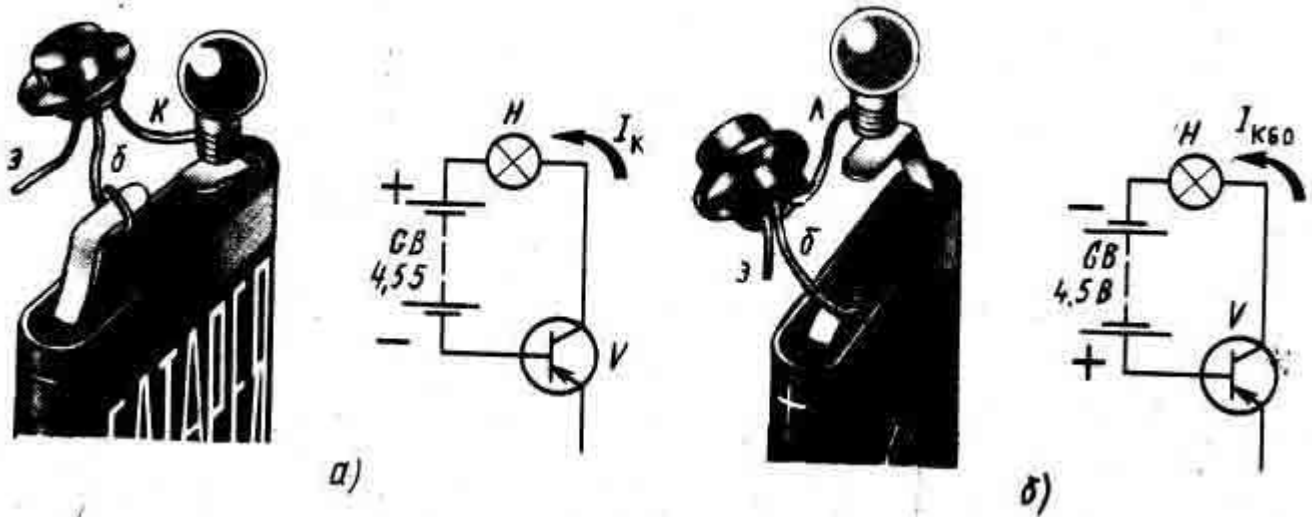


Рис. 1 опыты с биполярным транзистором.

Сначала на коллекторный р - н переход вы подавали прямое, т. е. пропускное напряжение. В этом случае коллекторный р - н переход открыт, его сопротивление мало и через него течет прямой ток коллектора I_k . Значение этого тока в данном случае определяется в основном сопротивлением нити накала лампочки и внутренним сопротивлением батареи. При другом включении батареи ее напряжение подавалось на коллекторный переход в обратном, непропускном направлении. В этом случае переход закрыт, его сопротивление велико и через него течет лишь небольшой обратный ток коллектора I_{k60} . У исправных маломощных низкочастотных транзисторов обратный ток коллектора не превышает 30 мкА. Такой ток, естественно, не мог накалить нить лампочки, поэтому она и не горела. Проведите аналогичный опыт с эмиттерным р - н переходом. Результат будет таким же: при **обратном** напряжении переход будет закрыт - лампочка не горит, а при **прямом** напряжении он будет открыт - лампочка горит.

Следующий опыт, иллюстрирующий один из режимов работы транзистора, проводите по схеме, показанной на (рис. 2). Между эмиттером и коллектором транзистора включите последовательно соединенные батарею 3З36Л и ту же лампочку накаливания. Положительный полюс батареи должен соединиться с эмиттером, а отрицательный - с коллектором (через нить накала). Горит лампочка? Нет, не горит. Соедините про - волочной перемычкой базу с эмиттером, как показано на схеме штриховой линией. Лампочка, включенная в коллекторную цепь транзистора, тоже не будет гореть. Удалите перемычку, а вместо нее подключите к этим электродам последовательно соединенные резистор R_6 сопротивлением 200-300 Ом и один гальванический элемент G_6 , например, типа миниатюрной пальчиковой батарейки от китайского карманного приемника, но так, чтобы минус элемента к этим электродам транзистора. В этом случае лампочка гореть не должна. Повторите несколько раз этот опыт и вы убедитесь в том, что лампочка в коллекторной цепи будет гореть только тогда, когда на базе транзистора относительно эмиттера действует отрицательное напряжение. Разберемся в этих опытах. В первом из них, когда вы, соединив перемычкой базу с эмиттером, замкнули накоротко эмиттерный переход, коллекторный переход стал просто диодом, на который подавалось обратное напряжение. Через транзистор шел лишь незначительный обратный ток коллекторного перехода, который не мог накалить нить лампочки. В это время транзистор находился в **закрытом состоянии**. Затем, удалив перемычку, вы восстановили эмиттерный переход. Первым включением элемента между базой и эмиттером вы подали на эмиттерный переход прямое напряжение. Эмиттерный переход открылся, и через него пошел прямой ток, который открыл второй переход транзистора - коллекторный. Транзистор оказался открытым и по цепи эмиттер - база - коллектор пошел коллекторный ток транзистора I_k , который во много раз больше тока цепи эмиттер - база. Он - то и накалил нить лампочки. Когда же вы изменили полярность включения элемента на обратную, то его напряжение закрыло эмиттерный переход, а вместе с тем закрылся и коллекторный переход. При этом ток транзистора почти прекратился (присутствовал только обратный ток коллектора) и лампочка не горела.



Рис. 2 Опыт, иллюстрирующий работу транзистора в режиме переключения.

Какова роль резистора R_6 ? В принципе этого резистора может и не быть. Я же рекомендовал включить его исключительно для того, чтобы ограничить ток в базовой цепи. Иначе через эмиттерный переход пойдет слишком большой прямой ток, в результате чего может произойти тепловой пробой перехода и транзистор выйдет из строя (по аналогии со стабилитроном,

этим резистором можно задавать режимы работы транзистора, выводя его на линейный участок ВАХ, но об этом позже). Если бы при проведении этих опытов в базовую и коллекторную цепи были включены измерительные приборы, то при закрытом транзисторе токов в его цепях почти не было бы. При открытом же транзисторе ток базы I_B был бы не более 2 - 3 мА, а ток коллектора I_K составлял 60 - 75 мА. Это означает, что транзистор может быть услителем тока. В этих опытах транзистор был в одном из двух состояний: **открытом или закрытом**. Переключение транзистора из одного состояния в другое происходило под действием напряжения на базе U_B . Такой режим работы транзистора, проиллюстрированный графиками на (рис. 2), называют **режимом переключения или, что то же самое, ключевым**. Такой режим работы транзисторов используют в основном в приборах и устройствах электронной автоматики. В радиовещательных приемниках и усилителях транзисторы работают в режиме усиления. Отличается он от режима переключения тем, что, используя малые токи в базовой цепи, мы можем управлять значительно большими токами в коллекторной цепи транзистора.

Иллюстрировать работу транзистора в режиме усиления можно следующим опытом (рис.3). В коллекторную цепь транзистора V включим электромагнитный телефон $B1$, а между базой и минусом источника питания GB (батарея 3336Л) - резистор R_B сопротивлением 200 - 250 кОм. Второй телефон $B2$ подключим к участку база - эмиттер транзистора, но через конденсатор C_{CB} емкостью 0,1 - 0,5 мкФ. У вас получится простейший усилитель, который может выполнять, например, роль одностороннего телефонного аппарата. Если ваш приятель будет негромко говорить перед телефоном $B2$, включенным на входе усилителя, его разговор вы будете слышать в телефоне $B1$, включенном на выходе усилителя. На вход усилителя вместо телефона $B2$ можно подать любой другой слабый электрический сигнал. Тогда в телефоне $B1$ он будет хорошо и достаточно громко прослушиваться. В качестве $B1, B2$, можно использовать телефоны от старых телефонных аппаратов, с маркировкой (ТОН-1, ТОН-2 и др.). Для наших опытов желательно парочку разыскать, чтобы они были в вашем арсенале. Каковы здесь функции резистора R_B и конденсатора C_{CB} ? Через резистор R_B на базу транзистора от батареи питания GB подается небольшое отрицательное напряжение, называемое **напряжением смещения**, которое открывает транзистор и тем самым обеспечивает ему работу в режиме усиления. Без начального напряжения смещения эмиттерный $p - n$ переход транзистора будет закрыт и, подобно диоду, будет «срезать» положительные полупериоды входного напряжения, отчего усиление будет сопровождаться искажениями. А конденсатор C_{CB} выполняет функцию связующего элемента между телефоном $B2$ и базой транзистора. Он беспрепятственно пропускает колебания звуковой частоты и преграждает путь постоянному току из базовой цепи к телефону. Без такого разделительного конденсатора база транзистора по постоянному току оказалась бы соединенной с эмиттером и режим усиления был бы нарушен (этот конденсатор так и называют **конденсатором связи**, среди радиолюбителей можно еще услышать такое понятие как **проходной**).

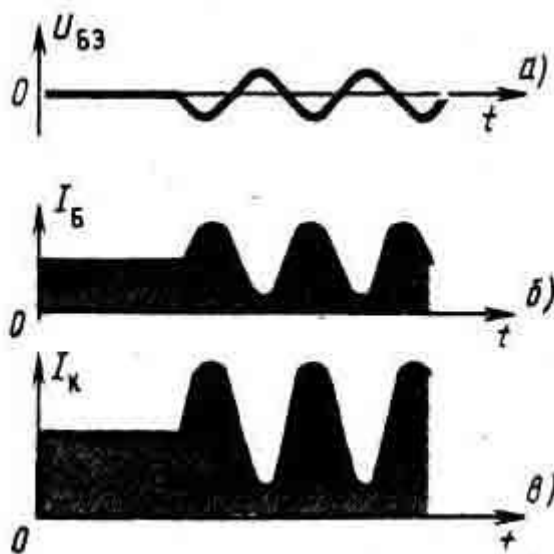
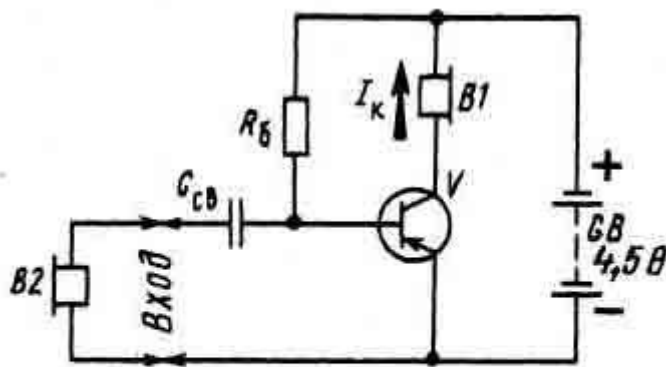


Рис. 3 Опыт иллюстрирующий транзистор в режиме усиления.

В этом опыте на вход усилителя подавалось переменное напряжение звуковой частоты, источником которого был телефон, преобразующий, как микрофон, **звуковые колебания в электрические** (на рис. 3 - график а). Это напряжение создавало в цепи эмиттер - база колебания постоянного тока (график б), которые управляли значительно большим током в коллекторной цепи (график в). **Происходило усиление входного сигнала**. Усиленный же транзистором сигнал преобразовывался телефонами В1, включенными в цепь коллектора, в **звуковые колебания с помощью мембраны**. Транзистор работал в режиме усиления. Процесс усиления в общих чертах происходит следующим образом. При отсутствии напряжения входного сигнала в цепях базы и коллектора текут небольшие токи (на рис. 3 - левые участки графиков б и в), определяемые напряжением источника питания, напряжением смещения на базе и усилительными свойствами транзистора. Как только в цепи базы появляется сигнал, соответственно ему начинают изменяться и токи в цепях транзистора: во время отрицательных полупериодов, когда суммарное отрицательное напряжение на базе возрастает, токи цепей увеличиваются, а во время положительных полупериодов, когда напряжения сигнала и смещения противоположны и, следовательно, отрицательное напряжение на базе уменьшается, токи в обеих цепях тоже уменьшаются. Происходит усиление по напряжению и току. Если нагрузкой транзистора будут не телефоны, а резистор, то создающееся на нем напряжение переменной составляющей усиленного сигнала можно будет подать во входную цепь второго транзистора для дополнительного усиления. Один транзистор может усилить сигнал в 30 - 50 раз. Точно так работают и транзисторы структуры п - р - п. Но для них полярность включения батареи, питающей цепи базы и коллектора, должна быть не такой, как у р - п - р транзисторов, а **обратной** поэтому п - р - п транзисторы еще называют **обратными**.

Нужно запомнить: для работы транзистора в режиме усиления на его базу (относительно эмиттера) вместе с напряжением усиливаемого сигнала обязательно должно подаваться постоянное напряжение смещения, открывающее транзистор и устраняющее искажение типа ступенька,

к этому типу искажений сигнала мы еще вернемся. Для германиевых транзисторов оно должно составлять 0,1-0,2 В, а для кремниевых транзисторов 0,5-0,7 В. Напряжение смещения на базу не подают лишь в тех случаях, когда эмиттерный переход транзистора используют для детектирования радиочастотного модулированного сигнала.