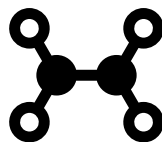




ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ЧЕТВЕРТОЕ ЗАНЯТИЕ



PN-переход.....	3
Что такое полупроводник.....	3
Полупроводники с электронной и дырочной проводимостью	4
ДИОД.....	5
Прямое включение диода. Прямой ток.	6
Обратное включение диода. Обратный ток.	7
Прямое и обратное напряжение.....	8
ВАХ диода	8
СТАБИЛИТРОН	11
Пример использования	12
ТРАНЗИСТОРЫ.....	13
Биполярный транзистор.....	15
Полевой транзистор	18
IGBT транзистор	23
СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ.....	27
Общий эмиттер.....	28
Общий коллектор.....	30
Общая база.....	31
Расчет ключа на транзисторе	33
Включение нагрузки от условий освещения.....	36



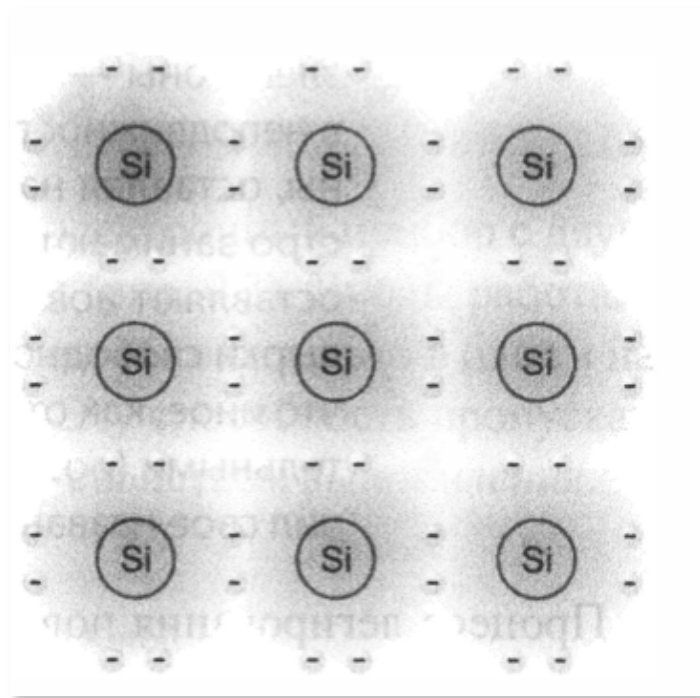
PN-ПЕРЕХОД

Между диэлектриками и проводниками существуют материалы, которые занимают промежуточное положение. Эти материалы называют полупроводниками. Под определенными условиями они ведут себя как проводники, а при других условиях – как диэлектрики. Это делает их уникальными материалами с особыми свойствами.

Используя элементы из таких материалов, например, кремния или германия, можно добиться точного управления потоком электронов внутри одной части элемента путем изменения напряжения на другой его части. Этот эффект позволяет создавать устройства с высокой степенью управляемости и точности, такие как транзисторы и другие полупроводниковые компоненты.

ЧТО ТАКОЕ ПОЛУПРОВОДНИК

Атомы материалов полупроводникового типа устраиваются в особую кристаллическую структуру, образуя регулярную трехмерную модель. В этом кристалле атомы связаны специфической ковалентной связью, где внешние электроны каждого атома (называемые валентными электронами) также служат внешними электронами для соседних атомов.



Существование такой уникальной системы связей и общих электронов у соседних атомов объясняет факт, что полупроводниковый кристалл, в большинстве случаев, ведет себя как диэлектрик. Каждый атом старается обладать большим числом валентных электронов, чем на самом деле, и эти электроны удерживаются вблизи «своего» атома. Это свойство значительно отличается от поведения атомов в типичных проводниках, где атомы часто имеют всего один валентный электрон, который может свободно двигаться.

ПОЛУПРОВОДНИКИ С ЭЛЕКТРОННОЙ И ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Возможно изменять кристаллическую структуру обычного чистого полупроводника с целью модификации его электрических характеристик. Этот процесс известен как легирование. Он является сложным и требует использования математических методов и глубоких знаний в области физики. В основе легирования лежит создание вариантов полупроводниковых материалов, отличающихся от чистых полупроводников по количеству электронов, увеличивая или уменьшая их количество.

Полупроводники с электронной проводимостью (N-типа) содержат множество свободных электронов, которые не оказывают влияния на ковалентные связи. Такие электроны называются носителями отрицательного заряда и перемещаются по кристаллу.

Полупроводники с дырочной проводимостью (P-типа) содержат меньше свободных электронов, что приводит к образованию дырок в кристаллической структуре. Дырки не остаются на месте, так как их занимают соседние электроны, создавая новые дырки, которые также быстро заполняются другими электронами. Поэтому дырки ведут себя, как положительные заряды, и свободно передвигаются по кристаллу.

Процесс легирования приводит к увеличению проводимости полупроводникового материала. Если на кристалл полупроводника P- или N-типа подать напряжение, то электроны начнут двигаться в направлении отрицательного к положительному напряжению. В результате полупроводники N- и P-типов становятся проводниками, в которых под воздействием напряжения проходит электрический ток.

При объединении полупроводников N-типа и P-типа образуется PN-переход, который позволяет току протекать только в одном направлении. Полупроводники N-типа содержат избыток свободных электронов, тогда как P-тип содержит дырки вместо свободных электронов. В зависимости от того, как приложено напряжение, ток может проходить через PN-переход или быть заблокированным.

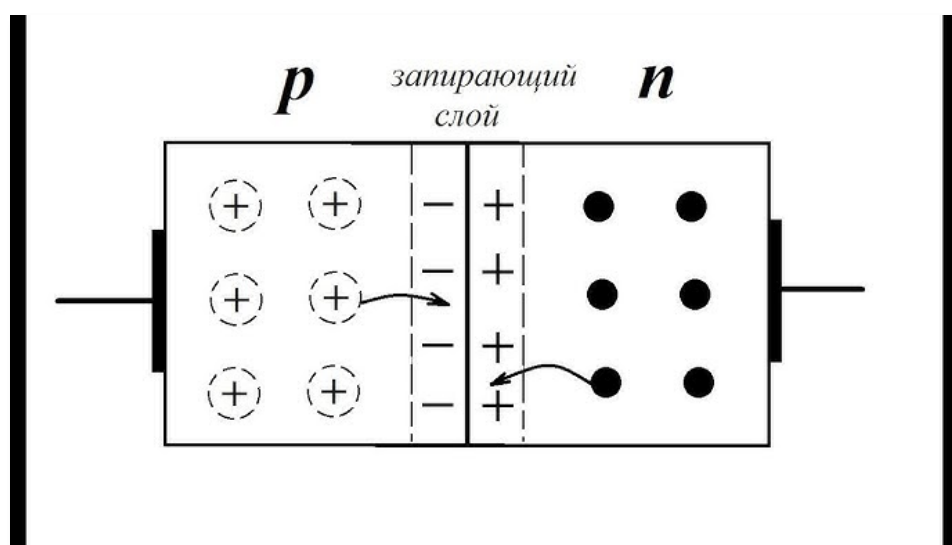
PN-переход является основой для твердотельной электроники, использующей электронные устройства из неподвижных, твердых материалов вместо вакуумных приборов. Такие полупроводники заменили многие вакуумные приборы в электронике.

В проводниках носители заряда - это электроны. В полупроводниках, помимо электронов, существуют дырки, которые могут передвигаться по кристаллу. В результате теплового движения даже при комнатной температуре некоторые электроны приобретают достаточную энергию для выхода из атомов и образования свободных электронов, а места, где электроны отсутствуют, называются дырками.

Кристаллический полупроводник с электрическим полем может иметь электронную проводимость, когда свободные электроны создают ток, или дырочную проводимость,

когда дырки двигаются и создают ток. Границу между областями Р-типа и N-типа называют PN-переходом. В этой зоне начинают происходить интересные физические явления:

- **Рекомбинация:** Дырки и электроны, находящиеся в PN-переходе, могут рекомбинировать, то есть соединяться и забирают друг с друга электроны. Это приводит к образованию области с обедненной носителями заряда, которая называется обедненной зоной или областью отрицательной инжекции.
- **Электрическое поле:** В результате разделения зарядов, образуется электрическое поле, направленное от Р-типа к N-типу. Это электрическое поле препятствует дальнейшей диффузии носителей заряда и формирует барьер.
- **Барьерный потенциал:** Электрическое поле создает барьерный потенциал, который представляет собой разницу потенциалов между Р- и N-областями. Этот барьерный потенциал препятствует дальнейшей диффузии носителей и определяет характеристики PN-перехода.



Слой PN-перехода очень условно можно рассматривать как конденсатор с заряженными границами перехода и обедненным слоем в качестве диэлектрика.

Как следствие данного явления появилась возможность производства разнообразной линейки полупроводниковых приборов. Диоды, стабилитроны, транзисторы и прочие представители данного вида не могли появиться без открытия PN-перехода.

ДИОД

Полупроводниковый диод представляет собой электронное устройство с двумя выводами, состоящее из одного PN-перехода. Его функция аналогична запорному клапану: он позволяет току проходить только в одном направлении, когда на диоде установлено напряжение. Эта способность пропускать ток только в одном направлении называется свойством выпрямления. Термин "диод" обычно используется для небольших сигнальных устройств, где ток $I \leq 1$ А. Если же устройство способно пропускать большие токи ($I > 1$ А), то оно может называться «выпрямителем».

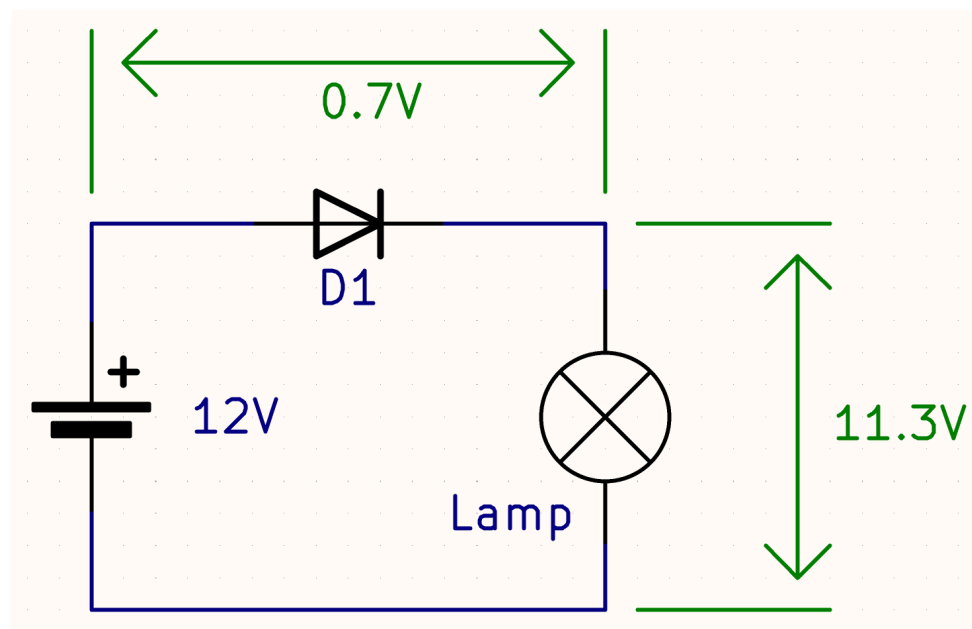
В полупроводниковом диоде участок PN-перехода с дырочной проводимостью (Р-типа) называется анодом, а с электронной проводимостью (N-типа) - катодом. Путем создания положительного перепада напряжения между анодом и катодом (подавая положительное напряжение на анод и отрицательное на катод), в большинстве диодов будет установлено направление тока от анода к катоду. Изменение полярности подключенного напряжения приведет к тому, что диод не будет пропускать ток.

Примечание. Стабилитроны представляют собой исключение. Они работают на обратной стороне характеристики вольт-амперной характеристики (ВАХ) и используются для обеспечения стабильного напряжения.

Примечание. В электронике используется условное направление тока. Условный ток идет от положительного полюса источника питания к отрицательному. Это соглашение было принято давно и стало стандартом, хотя на самом деле электроны движутся в обратном направлении - от катода к аноду.

ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА. ПРЯМОЙ ТОК.

Прямое смещение диода - это состояние, при котором на PN-переходе полупроводникового диода напряжение подается таким образом, что положительный потенциал подключен к Р-типу, а отрицательный - к N-типу. В этом случае, диод становится проводящим для электрического тока.



При такой полярности подключения, электроны из области n-типа будут двигаться в направлении дырок в области р-типа, а дырки из области р-типа будут двигаться в направлении электронов в области n-типа. На границе раздела между этими областями, который называется PN- переходом, происходит взаимное поглощение или рекомбинация электронов и дырок.

Например, электроны, основные носители заряда в области n-типа, при пересечении PN- перехода попадают в дырочную область р-типа, где они становятся неосновными носителями. Эти не основные электроны будут рекомбинировать с дырками, основными носителями заряда в области р-типа. То же самое происходит и с дырками: они попадают

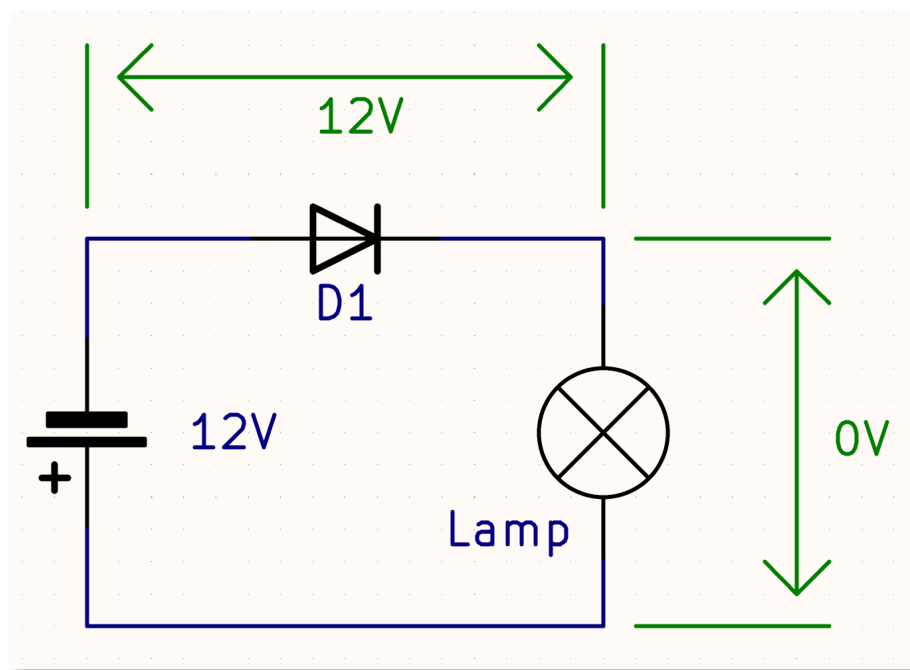
в область n-типа и рекомбинируют с электронами, основными носителями заряда в этой области.

Если один из контактов диода соединен с отрицательным полюсом источника постоянного напряжения, он будет инжектировать в область n-типа большое количество электронов, компенсируя потерю электронов в этой области. В то же время, контакт, соединенный с положительным полюсом источника, будет принимать из области p-типа аналогичное количество электронов, восстанавливая концентрацию дырок в этой области. Таким образом, проводимость PN- перехода увеличится, сопротивление уменьшится, и через диод будет протекать ток, который называется прямым током диода (I_f).

Прямое смещение обычно используется для создания диодов, которые предназначены для выпрямления переменного тока в постоянный, а также для создания светодиодов и других полупроводниковых приборов. Важно понимать, что в прямом смещении на диоде возникает небольшая потеря по напряжению, что обусловлено барьерным потенциалом на PN-переходе. Это явление также называется падением напряжения на диоде (V_f) и может быть важным параметром при проектировании электронных схем.

ОБРАТНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ДИОДА. ОБРАТНЫЙ ТОК.

Обратное смещение диода - это состояние, при котором на PN-переходе полупроводникового диода напряжение подается таким образом, что положительный потенциал подключен к N-типу, а отрицательный - к P-типу. В этом случае, диод становится непроводящим для большинства электрического тока.



В этой ситуации электроны в области n-типа будут двигаться в направлении положительного полюса источника питания, отдаляясь от PN- перехода, а дырки в области p-типа будут двигаться в направлении отрицательного полюса источника, отдаляясь также от PN- перехода. Это приводит к расширению границы между областями, создавая обедненную зону, которая содержит мало как электронов, так и дырок, и в результате такая зона представляет большое сопротивление для тока.

Но даже при наличии малого обмена электронами и дырками между областями, обратный ток всё же возникает. Это тот ток, который будет протекать через диод в обратном направлении, когда приложено обратное напряжение. Этот ток называется обратным током диода (I_r). Обычно он существенно меньше, чем прямой ток, и обратным током часто пренебрегают, особенно в большинстве практических случаев. Таким образом, можно сделать вывод, что PN-переход обладает односторонней проводимостью, позволяя пропускать ток только в одном направлении.

ПРЯМОЕ И ОБРАТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Напряжение, при котором диод начинает пропускать прямой ток, называется прямым напряжением ($U_{пр}$). Соответственно, обратное напряжение, при котором диод перестает пропускать ток и закрывается, называется обратным напряжением ($U_{обр}$).

Сопротивление диода меняется в зависимости от напряжения, подаваемого на него. При прямом напряжении сопротивление диода остается относительно низким, что позволяет пропускать прямой ток. Однако, при обратном напряжении, сопротивление диода значительно увеличивается. Для проверки этой характеристики можно использовать омметр.

Сопротивление PN-перехода диода не является постоянной величиной и зависит от величины прямого напряжения, подаваемого на диод. При увеличении этого напряжения сопротивление PN-перехода уменьшается, что ведет к увеличению прямого тока через диод. Когда диод закрыт и на нем падает практически всё напряжение, сопротивление PN-перехода становится большим, и обратный ток через диод становится небольшим.

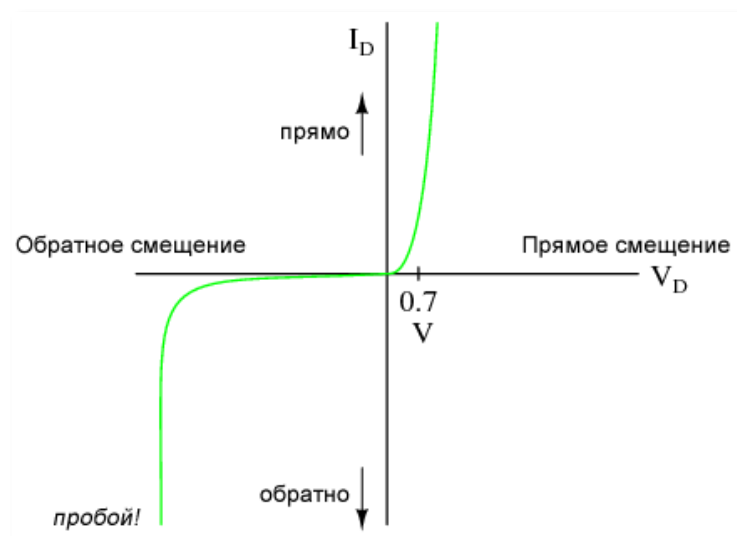
Применительно к переменному току, диод будет открываться во время положительных полупериодов, позволяя пропускать прямой ток, и закрываться во время отрицательных полупериодов, когда обратный ток становится незначительным. Такие свойства диодов используются для преобразования переменного тока в постоянный, и диоды, выполняющие эту функцию, называются выпрямительными диодами.

ВАХ ДИОДА

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода отображает зависимость тока, который протекает через PN-переход, от величины и полярности приложенного к нему напряжения. Эта характеристика представляет собой кривую, которая показывает, как ток меняется при различных уровнях напряжения.

На графике ВАХ диода можно видеть две ветви. Первая ветвь, расположенная в правой верхней части, представляет прямую ветвь и соответствует прямому току (I_f), который проходит через диод при положительных напряжениях (прямом напряжении). Вторая ветвь, расположенная в левой нижней части, представляет обратную ветвь и отражает

обратный ток (I_r), который проходит через диод при отрицательных напряжениях (обратном напряжении).



По горизонтальной оси графика обычно указывается напряжение, а по вертикальной оси — ток. Таким образом, ВАХ диода позволяет визуализировать, как диод реагирует на изменения напряжения и каким образом ток через него меняется в зависимости от этого напряжения.

Прямая ветвь ВАХ идет круто вверх и характеризует быстрый рост прямого тока с увеличением прямого напряжения. Как правило, германиевые диоды начинают проводить ток при напряжении порядка 0,1 - 0,2 В, в то время как кремниевые диоды обычно открываются при напряжении около 0,5 - 0,6 В.

Обратная ветвь ВАХ идет почти параллельно горизонтальной оси и показывает медленный рост обратного тока при увеличении обратного напряжения. Наличие небольшого обратного тока является недостатком диодов. Прямой ток диода в сотни раз больше обратного тока.

При повышении прямого напряжения через PN-переход ток сначала возрастает медленно, а затем начинается участок более быстрого нарастания. Однако следует учитывать, что повышение прямого тока может вызвать нагревание полупроводникового материала, и это может быть опасно. Обратная ветвь ВАХ, указывает на маленький обратный ток диода при увеличении обратного напряжения. Это свойство используется, например, в выпрямительных схемах для преобразования переменного тока в постоянный.

Пробой PN-перехода - это явление, при котором обратный ток резко увеличивается при достижении обратным напряжением определенного критического значения. Эти пробой подразделяются на электрический и тепловой.

Электрический пробой в свою очередь включает в себя туннельный и лавинный пробой.

Электрический пробой возникает в результате воздействия сильного электрического поля в PN-переходе. Этот вид пробоя является обратимым, то есть он не приводит к повреждению перехода, и при снижении обратного напряжения свойства диода

сохраняются. Примером такого режима являются стабилитроны – диоды, предназначенные для стабилизации напряжения.

Туннельный пробой происходит из-за явления, известного как туннельный эффект, который проявляется в том, что при сильном электрическом поле в тонком PN-переходе малой толщины некоторые электроны могут проникать (просачиваться) через переход из области р-типа в область n-типа без изменения своей энергии. Такие тонкие¹ PN-переходы возможны только при высокой концентрации примесей в полупроводнике. Туннельный пробой характеризуется резким ростом обратного тока при небольшом обратном напряжении – обычно несколько вольт. Туннельные диоды используют этот эффект и на их основе создают усилители, генераторы синусоидальных релаксационных колебаний и переключающие устройства на частотах до сотен и тысяч мегагерц.

Лавинный пробой связан с тем, что под действием интенсивного электрического поля в электронно-дырочном переходе дополнительные носители заряда приобретают достаточно энергии, чтобы вырвать один из электронов из атома и перенести его в зону проводимости, образовав тем самым пару электрон-дырка. Эти дополнительные носители также ускоряются и могут инициировать аналогичные процессы в других атомах, образуя новые пары электрон-дырка. Этот процесс усиливается и приобретает лавинообразный характер, что приводит к резкому увеличению обратного тока при почти постоянном обратном напряжении.

Диоды, использующие эффект лавинного пробоя, находят применение в мощных выпрямительных устройствах, которые используются в различных областях, таких как металлургическая и химическая промышленность, железнодорожный транспорт и другие электротехнические устройства, где существует потребность в защите от обратного напряжения, превышающего допустимое значение.

Тепловой пробой возникает из-за перегрева PN-перехода при протекании через него больших токов в условиях недостаточного теплоотвода, что может нарушить устойчивость теплового режима перехода.

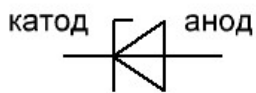
При увеличении обратного напряжения, приложенного к PN-переходу, рассеиваемая мощность на переходе также растет. Это приводит к повышению температуры как самого перехода, так и окружающих областей полупроводника. Увеличивается амплитуда колебаний атомов в кристаллической решетке, что ослабляет связь между валентными электронами и атомами. В таких условиях возникает вероятность перехода некоторых валентных электронов в зону проводимости, образуя дополнительные пары электрон-дырка.

¹ Толщина электронно-дырочного перехода диода варьируется в зависимости от мощности и предназначения. Она может колебаться от 100 нм (нанометров) до 1 мкм (микрометра).

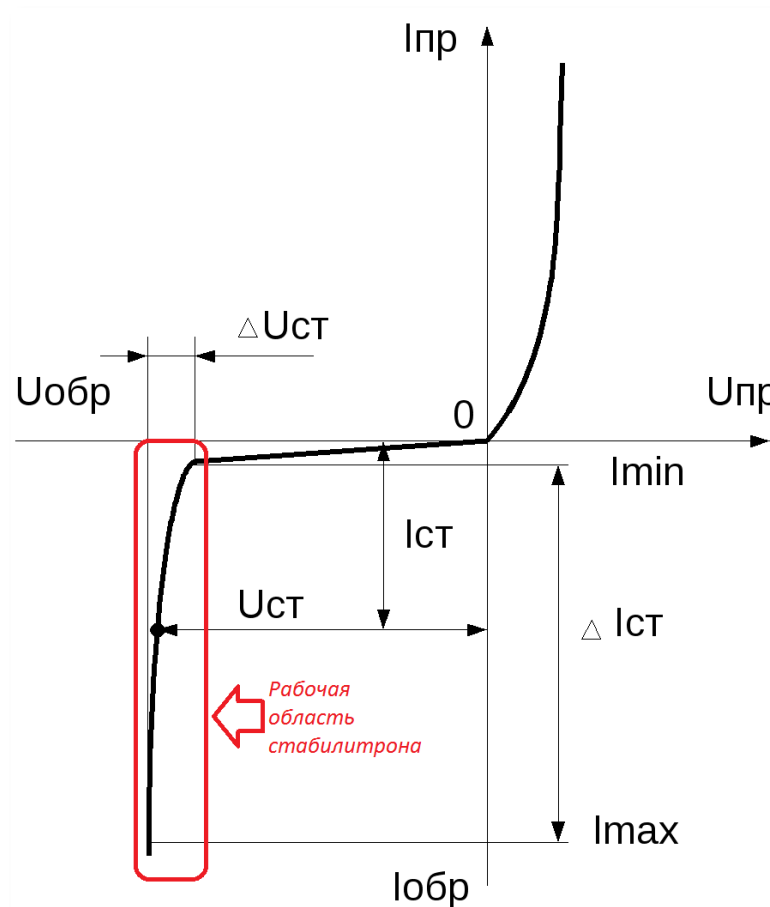
Если условия теплоотвода от PN-перехода неудовлетворительны, температура может начать быстро нарастать, что в итоге приведет к лавинообразному усилению этого процесса. Такой резкий рост температуры может стать причиной разрушения PN-перехода и повреждения диода в целом.

СТАБИЛИТРОН

Стабилитрон – это особый тип полупроводникового диода, созданный для обеспечения стабильности напряжения в разнообразных электрических схемах и устройствах. Этот компонент является важной составляющей современной электроники благодаря своей способности поддерживать постоянное напряжение при изменениях внешних условий.



Стабилитроны, также известные как диоды Зенера, представляют особую категорию диодов, которые функционируют на основе явления пробоя. По своей сути, они являются глубоко легированными диодами, в которых пробой происходит при значительно меньших напряжениях, чем у обычных диодов. При подаче обратного напряжения на стабилитрон и достижении напряжения стабилизации (или его превышения), стабилитрон внезапно начинает проводить ток в обратном направлении, т.е. от катода к аноду. При дальнейшем увеличении обратного напряжения (превышении точки стабилизации) стабилитрон будет продолжать проводить все более значительный ток, при этом на выводах диода сохранится сравнительно стабильное падение напряжения.

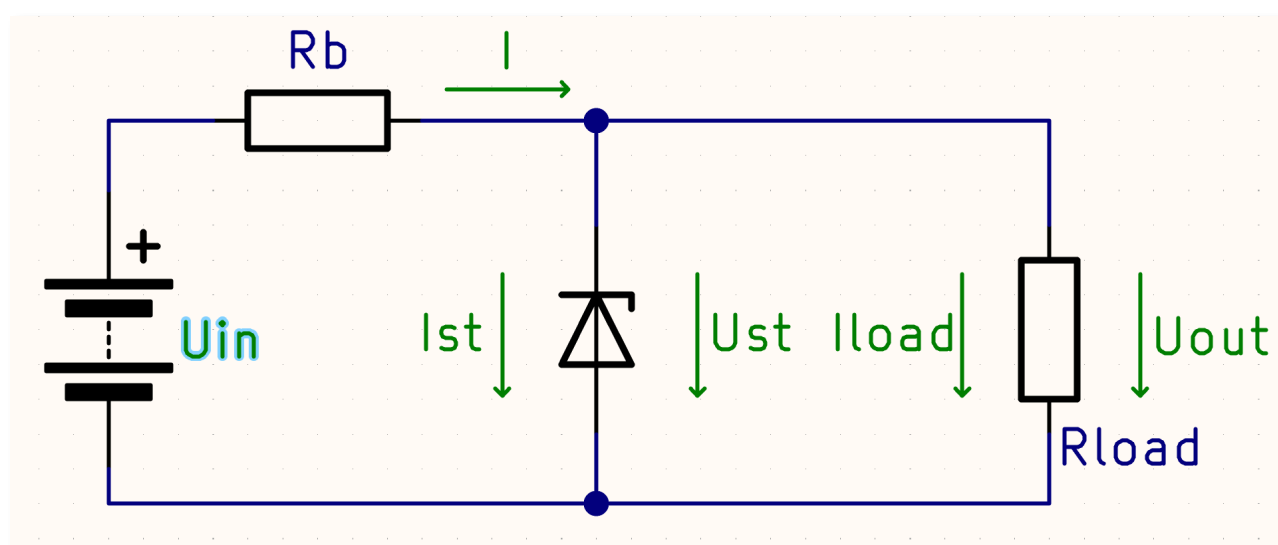


- $U_{обр}$ - обратное напряжение, измеряемое в вольтах (В).
- $U_{ст}$ - номинальное напряжение стабилизации, выраженное в вольтах (В).
- $I_{ст}$ - номинальный ток стабилизации, измеряемый в амперах (А).

- I_{\max} - максимальный ток стабилитрона, измеряемый в амперах (А).
- I_{\min} - минимальный ток стабилитрона, измеряемый в амперах (А).
- $I_{\text{ст}}$, I_{\max} , I_{\min} - это значения силы тока, протекающего через стабилитрон во время его работы.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Стабилитроны (диоды Зенера) обычно применяются в электрических схемах для осуществления стабилизации напряжения или ограничения его значений. В качестве простейшего **стабилизатора напряжения** стабилитрон можно использовать следующим образом:



В данной схеме присутствует R_b , что является балластным резистором, который предназначен для ограничения тока, который может пройти через стабилитрон и нагрузку. Его расчет в общем случае сводится к следующим шагам:

$$1. R_b = \frac{U_{in} - U_{st}}{I_{load} + I_{st}}$$

Расчет лучше выполнять для случаев возможных минимального и максимального напряжения U_{in} и тока I_{st} , при этом не забывая проверять выполнение соотношения:

$$2. I_{st.\min} < I_{st} < I_{st.\max}$$

Проверить данное соотношение возможно следующим способом- после того, как определена величина R_b из 1 формулы, вычисляется суммарный ток I :

$$3. I = \frac{U_{in} - U_{st}}{R_b}$$

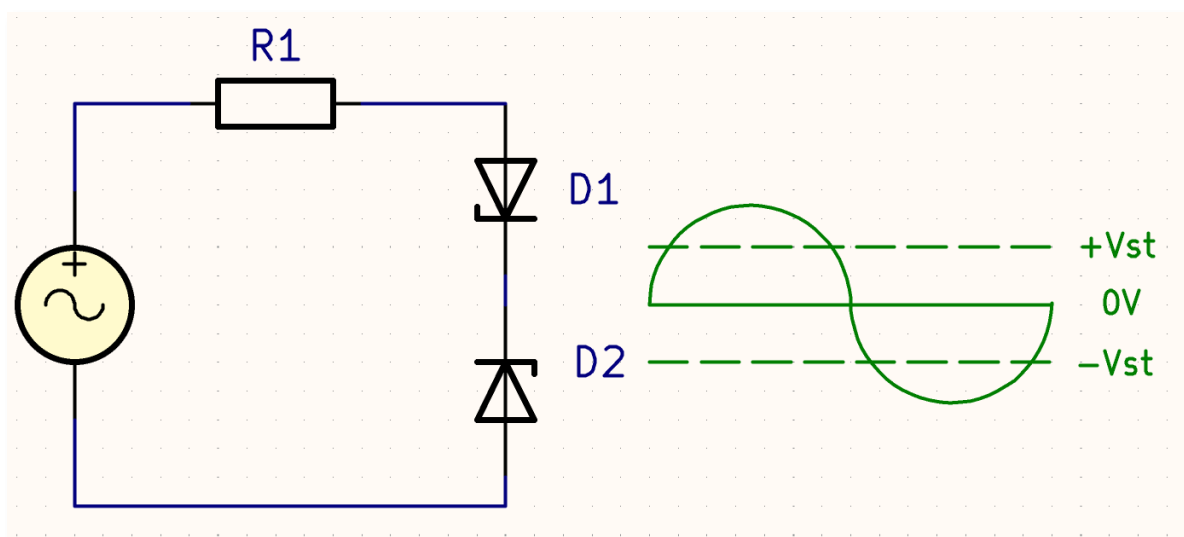
Следующим шагом уже возможно определить ток стабилитрона и после выполнить проверку неравенства из 2 формулы:

$$4. I_{st} = I - I_{load}$$

Из вольт-амперной характеристики стабилитрона видно, что напряжение стабилизации зависит от тока, проходящего через стабилитрон. При изменении нагрузки в рассмотренной схеме ток стабилитрона также изменится, и, следовательно, изменится и напряжение стабилизации. Проще говоря, нагрузочная характеристика данной схемы может иметь существенное влияние.

Если такая ситуация не соответствует требованиям или если формула 2 не выполняется, рекомендуется использовать схему параметрического стабилизатора с усилителем тока (эмиттерный повторитель), которую мы обязательно рассмотрим в одном из следующих занятий.

В качестве **ограничения напряжения** стабилитроны можно использовать следующим образом:



Если кратко, то на вход подается напряжение переменное, на выходе напряжение тоже переменное, но ограниченное по напряжению стабилизации D1 и D2.

ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор – это электронный полупроводниковый прибор, который играет ключевую роль в современной электронике, позволяя управлять потоком электрического тока. Этот компонент имеет огромное значение для разработки и функционирования устройств, начиная от микроэлектронных чипов и заканчивая мощными транзисторами, используемыми в энергетических системах.

Структура транзистора базируется на полупроводниковой технологии, и его основные виды – биполярный транзистор (BJT) и полевой транзистор (FET). Общая идея состоит в том, что транзистор управляет потоком тока между двумя разнотипными полупроводниковыми областями, называемыми эмиттером и коллектором (в BJT) или истоком и стоком (в FET).

Принцип работы транзистора основан на управлении потоком электронов (или дырок) между этими областями. В биполярных транзисторах управление происходит за счет изменения тока базы, который контролирует ток эмиттера. В полевых транзисторах

управление реализуется через напряжение на затворе, создавая или уменьшая проводимость канала между истоком и стоком.

Транзисторы имеют несколько ключевых характеристик, которые делают их столь важными:

- **Усиление сигнала:** Транзисторы могут усиливать слабые электрические сигналы. В устройствах усиления они играют роль усилителей, увеличивая амплитуду сигнала.
- **Импульсное управление:** Транзисторы способны быстро включаться и выключаться, что делает их идеальными для создания переключающих устройств, таких как ключи.
- **Малые размеры:** Транзисторы могут быть очень маленькими, что делает их применимыми в микроэлектронике, где миллионы транзисторов могут поместиться на одном кристалле.
- **Энергоэффективность:** Транзисторы потребляют мало энергии для управления большими токами, что делает их идеальными для устройств, работающих от ограниченных источников питания.
- **Интеграция:** Транзисторы можно интегрировать в один чип, создавая сложные логические схемы, микропроцессоры и многое другое.

В современных электронных чипах количество транзисторов исчисляется в миллиардах. Они используются в основном для вычислений и состоят из сложных структур.

Сейчас основными материалами для производства транзисторов являются кремний (Si), нитрид галлия (GaN), карбид кремния (SiC) и арсенид галлия (GaAs). Последний материал в основном применяется в высокочастотных приборах. Кроме того, находят применение транзисторы на основе углеродных нанотрубок. Также существуют транзисторы, специально разработанные для использования в прозрачных дисплеях LCD, а также полимерные транзисторы, которые считаются одной из наиболее перспективных областей.

Из основных наиболее распространенных типов транзисторов можно выделить три:

1. **Биполярные транзисторы (BJT):** Эти транзисторы используют два типа носителей заряда - электроны и дырки. В зависимости от типа биполярного транзистора (NPN или PNP), электрический ток протекает через два PN-перехода между тремя слоями полупроводника.

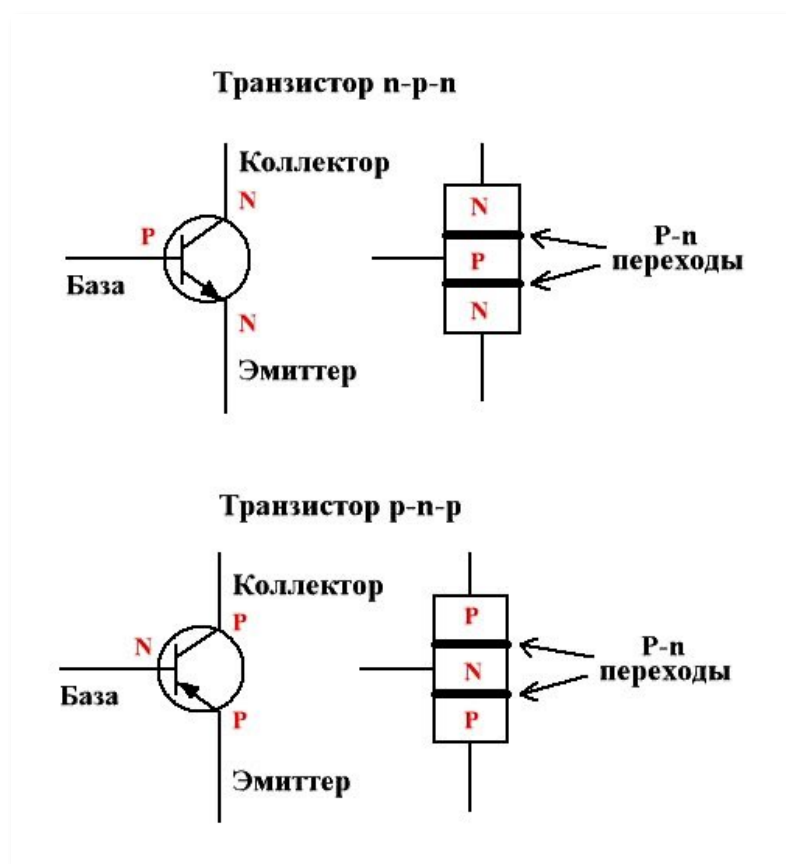
2. **Полевые транзисторы (FET):** Эти транзисторы основаны на управлении током проводимости через полупроводниковый канал с помощью электрического поля, создаваемого затвором. Полевые транзисторы могут быть устроены как с изолированным затвором (MOSFET) или без изоляции (JFET).

3. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, IGBT): Эти транзисторы объединяют преимущества биполярных транзисторов и полевых транзисторов. Они обладают высоким входным сопротивлением и способностью управлять большими токами, а также имеют удобное управление, подобное полевым транзисторам.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Биполярный транзистор, часто обозначаемый как BJT (Bipolar Junction Transistor), представляет собой один из наиболее фундаментальных и широко используемых полупроводниковых приборов в современной электронике. Этот прибор имеет глубокие исторические корни и играет ключевую роль во многих электронных системах, начиная от небольших усилителей и заканчивая мощными транзисторами, используемыми в коммутационных устройствах и интегральных микросхемах.

Структура биполярного транзистора основана на трех областях полупроводникового материала: эмиттере, базе и коллекторе. Эти области создают два последовательно соединенных PN-перехода, что и обеспечивает возможность управления током между эмиттером и коллектором через базу. Биполярные транзисторы обычно классифицируются как NPN (Negative-Positive-Negative) или PNP (Positive-Negative-Positive) в зависимости от типов полупроводников, используемых в каждой области.



Принцип работы биполярного транзистора опирается на инжекцию и диффузию носителей заряда (электронов и дырок) в различных областях. Эмиттер обогащен носителями, что позволяет электронам из эмиттера перемещаться в базу, а дыркам перемещаться в коллектор. Это обеспечивает усиление сигнала: малый ток базы управляет более крупным током коллектора.

Для переключения транзистора насыщенное состояние, ток базы должен быть превышен определенным порогом. В насыщенном состоянии транзистор переходит в режим, в котором ток коллектора максимален и больше не зависит от тока базы. Это свойство делает биполярные транзисторы подходящими для коммутации мощных нагрузок.

Основное применение биполярных транзисторов – это усиление сигналов. Они используются в усилителях для увеличения амплитуды слабых сигналов. Также они могут быть использованы в коммутационных устройствах, где необходимо переключать большие токи и нагрузки.

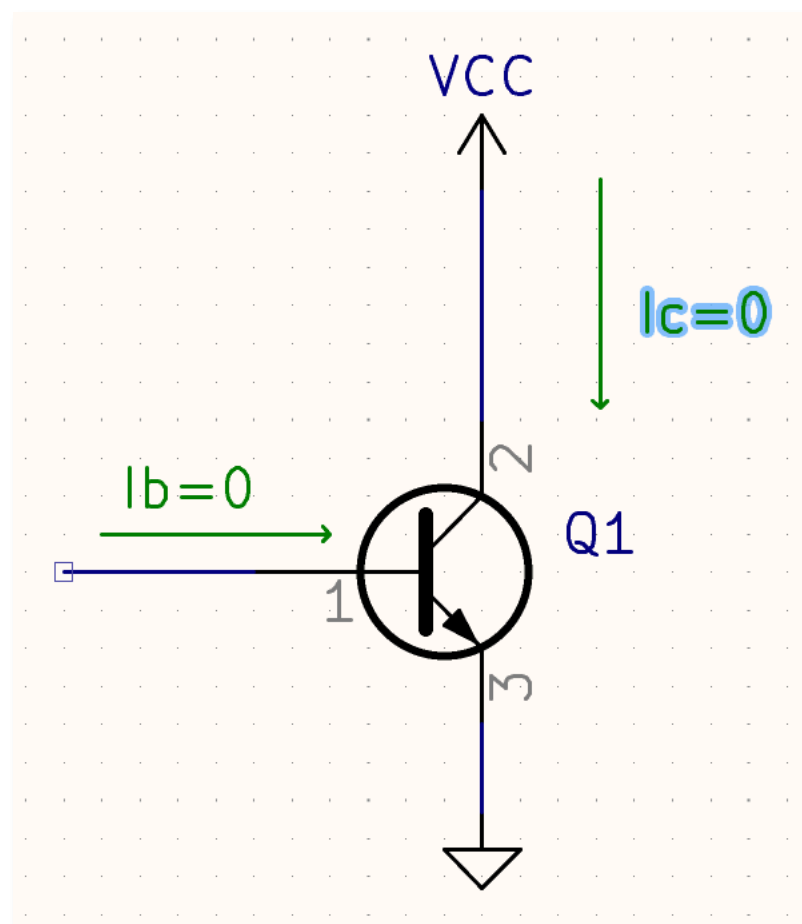
Важной характеристикой биполярных транзисторов является коэффициент усиления тока, обозначаемый как β (бета) или h_{FE} . Этот коэффициент показывает, во сколько раз ток коллектора больше тока базы. Коэффициент β может сильно изменяться в зависимости от типа транзистора, его конструкции и рабочих условий.

В биполярных транзисторах (BJT) есть три контакта:

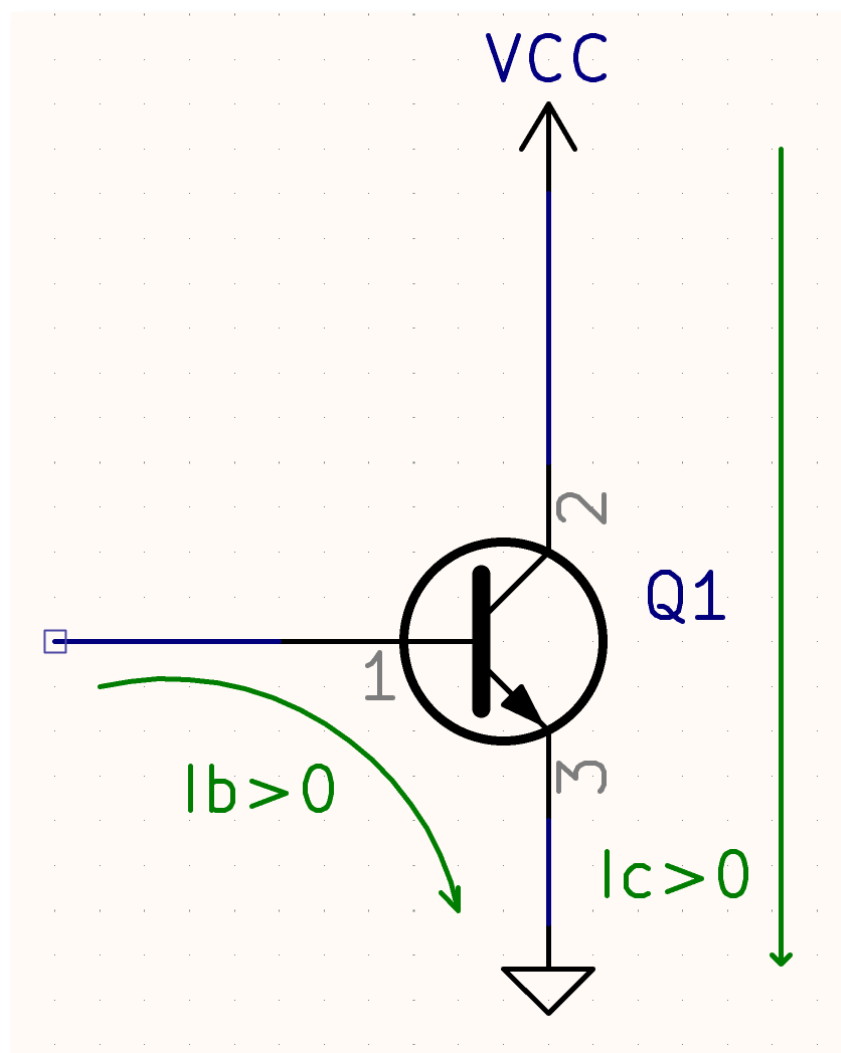
Коллектор (collector): На этот контакт подается высокое напряжение, которым требуется управлять.

База (base): Через базу подается небольшой ток для управления большим током между коллектором и эмиттером.

Эмиттер (emitter): Через эмиттер проходит общий ток от коллектора и базы, когда транзистор "открыт" и разрешен ток от коллектора к эмиттеру.



На схеме выше изображен NPN транзистор, на базу которого не подается ток. Соответственно переход закрыт, и ток по пути коллектор-эмиттер не течет. Если подать на базу NPN транзистора ток, то транзистор начнет открываться и пойдет ток через переход.



PNP транзисторы отличаются от NPN транзисторов зеркальной работой. Когда на базе PNP транзистора присутствует управляющий ток, транзистор закрыт, а при отсутствии тока на базе он открывается, позволяя току протекать от коллектора к эмиттеру. NPN транзисторы более эффективны и распространены в промышленности.

Коэффициент усиления тока биполярного транзистора, обозначаемый как h_{FE} , представляет собой важную характеристику этого полупроводникового прибора. Этот коэффициент определяет, насколько раз усиливается ток коллектора (I_C) в отношении тока базы (I_B) при работе транзистора в активном режиме.

Коэффициент h_{FE} вычисляется как отношение изменения тока коллектора к изменению тока базы:

$$h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Этот коэффициент измеряется в безразмерных единицах и представляет собой показатель, насколько сильно изменяется ток коллектора при изменении тока базы на единицу.

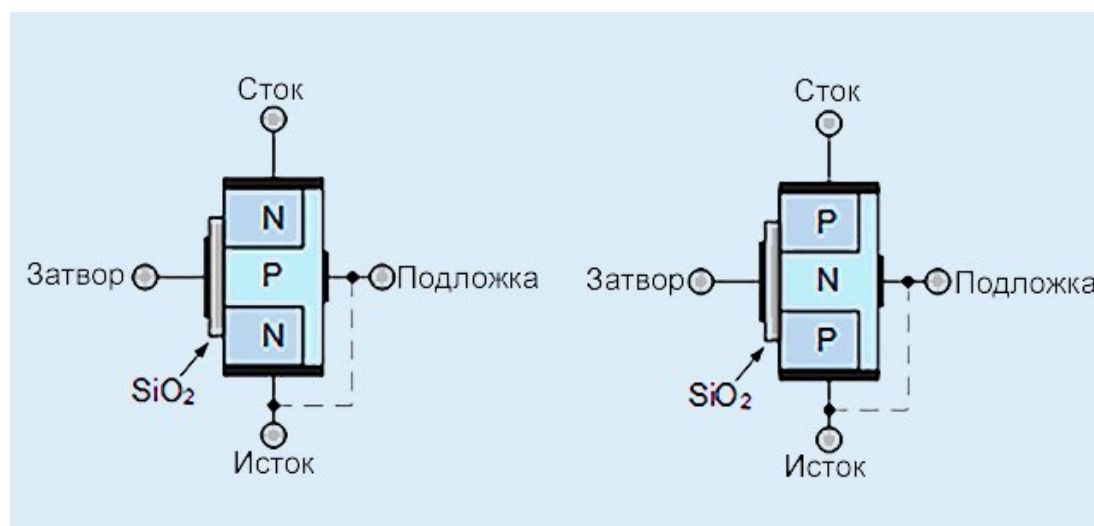
Значение h_{FE} для конкретного транзистора может варьироваться в зависимости от множества факторов, включая тип и конструкцию транзистора, температуру, напряжение питания и рабочие условия. Значение h_{FE} также может зависеть от рабочей точки (точки, находящейся на стабильной части ВАХ) и диапазона токов, в котором транзистор используется.

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

Полевой транзистор (Field-Effect Transistor, FET) - это один из наиболее значимых и распространенных полупроводниковых устройств, которое играет ключевую роль в электронике. FET представляет собой важный класс транзисторов, отличающихся своей структурой и принципом работы от более ранних биполярных транзисторов.

Суть работы полевого транзистора основана на управлении электрическим полем в его активной области, что делает его независимым от потока тока через управляющий электрод. Существует два основных типа полевых транзисторов:

1. MOSFET-транзисторы представляют собой полевые транзисторы с изолированным затвором. Аббревиатура MOSFET расшифровывается как Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors (полевые транзисторы на основе металл-оксид-полупроводник). В классе полевых транзисторов управление осуществляется внутренним электрическим полем. Это поле создается напряжением, что отличает полевые транзисторы от биполярных, которые управляются током. Именно это свойство обуславливает широкое применение полевых транзисторов.



MOSFET (с изолированным затвором)

MOSFET-транзисторы обладают следующими ключевыми преимуществами:

- низкое энергопотребление при переключении (фактически требуется лишь перезарядить емкость затвора);
- высокая скорость переключения;

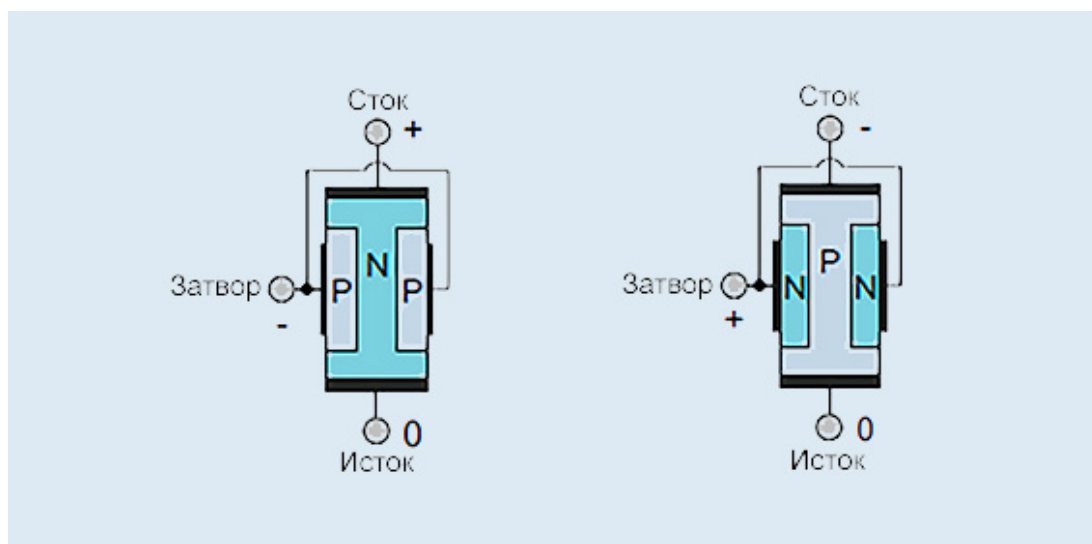
- низкое сопротивление во включенном состоянии, эквивалентное омическому сопротивлению.

Такие транзисторы, как и биполярные, существуют в двух основных вариантах: с n-каналом и p-каналом. Основное различие в принципе управления заключается в следующем:

- n-канальные MOSFET-транзисторы открываются при положительном напряжении между затвором и истоком, и в открытом состоянии пропускают ток от стока к истоку;
- p-канальные MOSFET-транзисторы открываются при отрицательном напряжении между затвором и истоком, и в открытом состоянии пропускают ток от истока к стоку.

По той же причине, что и в биполярных транзисторах, n-канальные MOSFET-транзисторы обычно обладают более высокой скоростью переключения по сравнению с p-канальными MOSFET-транзисторами.

2. JFET (Junction Field-Effect Transistor): JFET использует pn-переход в качестве затвора. Приложение напряжения к pn-переходу создает электрическое поле, контролирующее ток между стоком и истоком. JFET может быть N- или P-типа, и его характеристики зависят от напряжения на затворе. Эти транзисторы представляют собой удлинённый полупроводниковый кристалл, где металлические выводы на противоположных концах играют роль стока и истока. Затворная область с обратной проводимостью внедрена в центральную часть кристалла и выполняет функцию затвора. Также, как сток и исток, затвор комплектуется металлическим выводом.



JFET (с управляющим PN переходом)

PN-переход непосредственно влияет на мощность потока носителей заряда. Он представляет физическое препятствие для электронов или дырок в зависимости от типа проводимости основного кристалла.

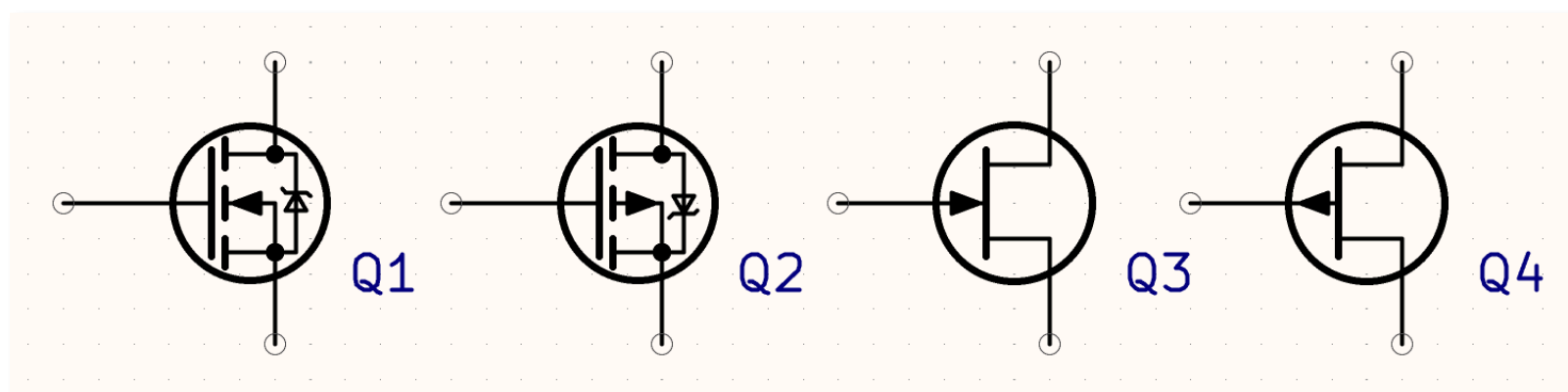
Основные характеристики полевых транзисторов:

- Высокое входное сопротивление: Одной из ключевых характеристик FET является его высокое входное сопротивление. Это означает, что FET обладает хорошей изоляцией между управляющим электродом и каналом, что позволяет малым токам управления управлять большими токами через канал.

- Малый потребляемый ток управления: Для управления FET требуется небольшой ток, что делает его эффективным для маломощных устройств, где необходимо минимизировать потери энергии.

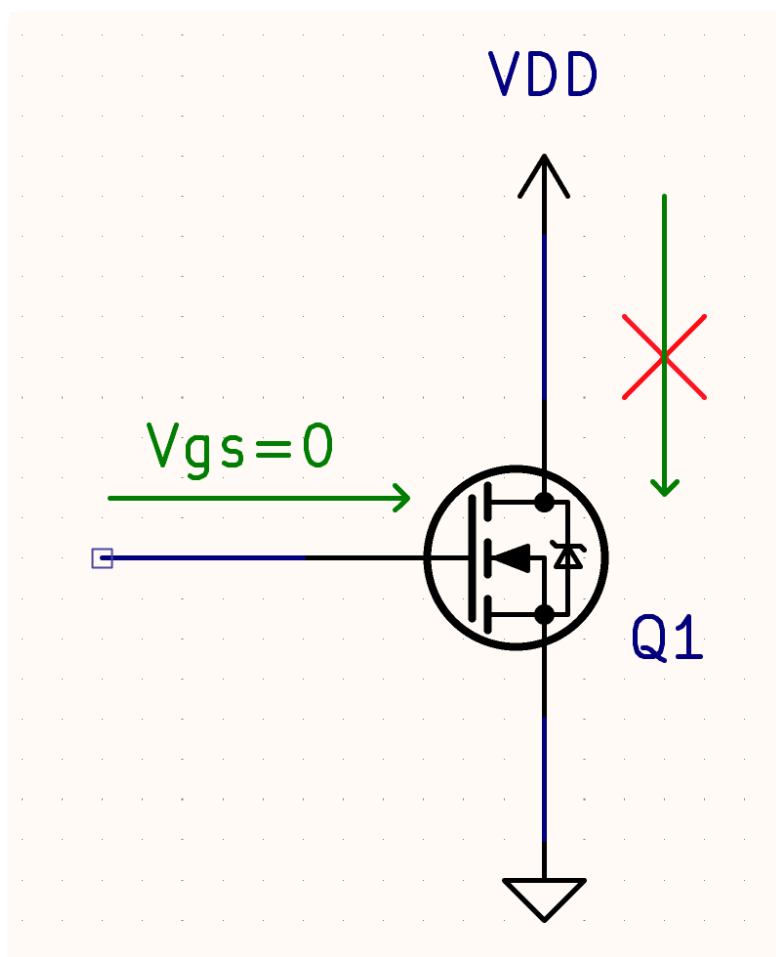
- Быстродействие: MOSFET имеют высокую скорость коммутации, что делает их подходящими для высокочастотных приложений.

УГО полевых транзисторов:



Q1 - N-Channel MOSFET. Q2 - P-Channel MOSFET. Q3 - NJFET. Q4 - PJFET.

На схеме изображен N-канальный MOSFET, на затворе которого отсутствует напряжение, оно равно нулю. Соответственно канал сток-исток закрыт и напряжение



через него проходить не может. Для открытия N-канального транзистора необходимо подать на затвор напряжение, выше определенного порога, который бывает разным и указывается в документации на определенный транзистор.

На самом деле, когда говорят о том, что для управления полевыми транзисторами требуется только напряжение, то это не совсем верно. Так как в силу физических особенностей и производства данных транзисторов образуется несколько паразитных емкостей ², которые могут внести свои нюансы в схемотехнические решения с использованием транзисторов подобного типа. Паразитную емкость затвора при управлении таким транзистором потребуется заряжать и разряжать, соответственно определенные токи присутствовать при этом процессе будут. Существуют уже стандартные схемотехнические решения для данной процедуры, а так же использование специализированных микросхем-драйверов верхнего и нижнего плеча, о чем будет в одном из следующих занятий.

MOSFET-транзисторы находят широкое применение в различных областях электроники и электротехники, включая:

- импульсные преобразователи и стабилизаторы;
- генераторные устройства;
- усилительные каскады, особенно в звуковых Hi-Fi усилителях;
- твердотельные реле;
- элементы логических схем.

Основные преимущества MOSFET-транзисторов особенно востребованы при их использовании в качестве ключей.

Следует отметить, что MOSFET-транзисторы требуют бережного обращения, так как они чувствительны к статическому электричеству и могут разрушиться при перегреве свыше 150 °С. Важно помнить, что полевые транзисторы более чувствительны к перегреву при пайке по сравнению с биполярными. Также рекомендуется обеспечивать защиту от статического электричества при работе с ними.

Приведенные ниже параметры MOSFET-транзистора являются основными и часто указываются в справочных листках (datasheet):

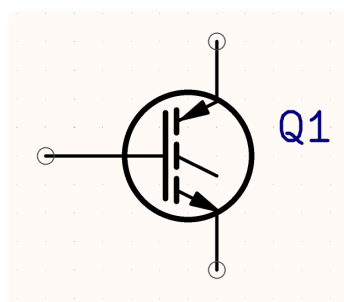
1. Максимальное напряжение сток-исток (Drain-Source Voltage) V_{DS} – максимально допустимое напряжение между стоком и истоком транзистора.
2. Сопротивление сток-исток R_{DS} – сопротивление между стоком и истоком в открытом состоянии, при заданном напряжении затвор-исток и токе стока.

² Про структуру MOSFET-транзисторов [Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. Дьяконов В.П., Максимчук А.А., Ремиев А.М., Смердов В.Ю. СОЛОН-Р. 2002. 512 с.].

3. Максимальное напряжение затвор-исток (Gate-Source Voltage) V_{GS} – максимальное управляющее напряжение затвор-исток, превышение которого может вызвать пробой затворного диэлектрика.
4. Максимальный ток стока в непрерывном режиме (Continuous Drain Current) I_D – максимальная величина постоянно протекающего тока стока в непрерывном режиме, зависит от температуры корпуса и условий теплоотвода.
5. Максимальный импульсный ток стока (Pulsed Drain Current) I_{DM} - максимальная величина импульсного тока стока, зависит от коэффициента заполнения и условий теплоотвода.
6. Энергия рассеивания кристалла (Single Pulse Avalanche Energy) E_{AS} – максимальная энергия, которую можно рассеять на кристалле транзистора без разрушения.
7. Максимальная рассеиваемая мощность (Maximum Power Dissipation) P_D – максимальная тепловая мощность, которую можно отвести от корпуса транзистора при заданной температуре корпуса.
8. Диапазон рабочих температур - диапазон температур, в пределах которого допускается эксплуатация транзистора.
9. Тепловое сопротивление транзистор-воздух R_{thJA} (Maximum Junction-to-Ambient) - максимальное тепловое сопротивление транзистор-воздух (при свободной конвекции).
10. Тепловое сопротивление корпус транзистора – теплоотвод (Case-to-Sink, Flat, Greased Surface) R_{thCS} - максимальное тепловое сопротивление перехода корпус транзистора – теплоотвод.
11. Тепловое сопротивление корпус транзистора (Maximum Junction-to-Case (Drain) R_{thJC} - максимальное тепловое сопротивление кристалл - корпус транзистора.
12. Пороговое напряжение затвор-исток (Gate-Source Threshold Voltage) $V_{GS(th)}$ - напряжение, при котором начинается переход транзистора в проводящее состояние.
13. Ток утечки стока (Zero Gate Voltage Drain Current) I_{DSS} – ток стока в выключенном состоянии (при нулевом напряжении затвор-исток), зависит от температуры.
14. Ток утечки затвора (Gate-Source Leakage) I_{GSS} – ток через затвор при максимальном напряжении затвор-исток.
15. Входная емкость (Input Capacitance) C_{iss} – суммарная емкость затвор-исток и затвор-сток при некотором напряжении сток-исток.
16. Выходная емкость (Output Capacitance) C_{oss} – суммарная емкость затвор-сток и сток-исток.
17. Проходная емкость (Reverse Transfer Capacitance) C_{rss} – емкость затвор-сток.
18. Общий заряд затвора (Total Gate Charge) Q_g – суммарный заряд затвора, необходимый для перевода транзистора в проводящее состояние.
19. Заряд затвор-исток (Gate-Source Charge) Q_{gs} – заряд емкости затвор-исток.

20. Заряд затвор-сток (Gate-Drain Charge) Q_{gd} - заряд емкости затвор-сток.
21. Время задержки включения (Turn-On Delay Time) $t_{d(on)}$ – время накопления заряда на затворе, при котором транзистор начинает открываться.
22. Время роста тока через транзистор (Rise Time) – время нарастания тока стока от 10% до 90%.
23. Время задержки выключения (Turn-Off Delay Time) $t_{d(off)}$ – время, за которое заряд затвора становится меньше заряда включения, транзистор начинает закрываться.
24. Время спада тока через транзистор (Fall Time) - время спада тока стока от 10% до 90%.
25. Индуктивность вывода стока (Internal Drain Inductance) L_D – паразитная индуктивность вывода стока.
26. Индуктивность вывода истока (Internal Source Inductance) L_S – паразитная индуктивность вывода истока.
27. Постоянный прямой ток через обратный диод (Continuous Source-Drain Diode Current) I_S – максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный PN-диод.
28. Импульсный ток через обратный диод (Pulsed Diode Forward Current) I_{SM} – максимальное значение импульсного тока через паразитный PN-диод.
29. Падение напряжения на диоде (Body Diode Voltage) V_{SD} – прямое падение напряжения на паразитном диоде.
30. Время восстановления паразитного диода (Body Diode Reverse Recovery Time) t_{rr} - время восстановления обратной проводимости паразитного диода.
31. Заряд восстановления паразитного диода (Body Diode Reverse Recovery Charge) Q_{rr} – заряд, необходимый для восстановления обратной проводимости паразитного диода.
32. Время включения паразитного диода (Forward Turn-On Time) t_{on} - время перехода диода в проводящее состояние.
33. Паразитное сопротивление затвора (Gate resistance) R_G – паразитное сопротивление затвора, ограничивающее скорость переключения при управляющем драйвере с большим выходным током.

IGBT ТРАНЗИСТОР



Транзистор с изолированным затвором и обратным диодом (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) представляет собой мощный полупроводниковый прибор, который объединяет преимущества биполярных транзисторов (BJT) и полевых транзисторов (FET). IGBT широко используется в современной электронике и электротехнике благодаря своим уникальным характеристикам, которые делают его особенно эффективным для высоковольтных и высокотоковых

приложений.

Основным компонентом структуры IGBT является транзистор, который объединен с полевым транзистором с изолированным затвором. Эта комбинация обеспечивает мощный и контролируемый способ управления электрическим током. Работа IGBT основана на воздействии управляющего напряжения на затвор, что позволяет управлять током между коллектором и эмиттером.

Практически все IGBT-транзисторы, выпускаемые на рынке, являются N-канальными. Теоретически существующие P-канальные IGBT-транзисторы, из-за не востребоваемости на практике, отсутствуют.

Среди ключевых преимуществ IGBT-транзисторов можно выделить следующие:

- Способность коммутировать высокие мощности.
- Работа при больших значениях рабочего напряжения.
- Устойчивость к токовым перегрузкам.
- Небольшие мощности для управления.

Области применения IGBT-транзисторов включают:

- Силовые импульсные преобразователи и инверторы с мощностью более 1 кВт.
- Системы индукционного нагрева.
- Системы управления двигателями, такие как частотно-регулируемые приводы.

Таким образом, IGBT-транзисторы используются в основном в качестве ключевых элементов в указанных областях. Во многих случаях IGBT-транзисторы включают в своей структуре интегрированный быстродействующий обратный диод.

Перечислены основные параметры IGBT-транзистора, которые обычно указываются в документации:

1. Максимальное напряжение коллектор-эмиттер (V_{CES}) - максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером транзистора.
2. Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($V_{CE(on)}$) - падение напряжения между коллектором и эмиттером в открытом состоянии. При заданном токе коллектора и температуре.
3. Максимальное напряжение затвор-исток (V_{GE}) - максимальное управляющее напряжение затвор-эмиттер. При превышении этого напряжения возможен пробой затворного диэлектрика и выход транзистора из строя.

4. Максимальный ток коллектора в непрерывном режиме (I_C) - максимальная величина постоянно протекающего тока коллектора. Обычно приводится для двух значений температуры: 25°C и 100°C.
5. Максимальный импульсный ток через коллектор (I_{CM}) - максимальная величина импульсного тока через коллектор. Зависит от коэффициента заполнения и условий теплоотвода.
6. Пороговое напряжение затвора ($V_{GE(th)}$) - напряжение затвора, при котором транзистор начинает переходить в проводящее состояние.
7. Температурный коэффициент снижения максимального напряжения коллектор-эмиттер ($\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$) - коэффициент, показывающий снижение максимального напряжения коллектор-эмиттер с увеличением температуры.
8. Температурный коэффициент уменьшения порогового напряжения затвора ($\Delta V_{GE(th)}/\Delta T_J$) - коэффициент, показывающий снижение порогового напряжения затвора с увеличением температуры.
9. Ток коллектора при нулевом напряжении затвор-эмиттер (I_{CES}) - ток утечки через коллекторный переход при выключенном состоянии транзистора.
10. Прямое падение напряжения на обратном диоде (V_{FM}) - напряжение на встроенном в транзистор быстродействующем обратном диоде.
11. Энергия рассеивания кристалла (E_{AS}) - максимальная энергия, которая может быть рассеяна на кристалле транзистора без его разрушения.
12. Максимальная рассеиваемая мощность (P_D) - максимальная тепловая мощность, которая может быть отведена от корпуса транзистора.
13. Диапазон рабочих температур - диапазон температур, в пределах которого допускается эксплуатация транзистора.
14. Тепловое сопротивление транзистор-воздух $R_{\theta JA}$ (Junction-to-Ambient) - максимальное тепловое сопротивление транзистор-воздух (при свободном конвективном теплообмене).
15. Тепловое сопротивление кристалл транзистора – корпус транзистора (Junction-to-Case - IGBT) $R_{\theta JC}$ - максимальное тепловое сопротивление перехода кристалл транзистора – корпус транзистора.
16. Тепловое сопротивление кристалл диода – корпус транзистора (Junction-to-Case - Diode) $R_{\theta JC}$ - максимальное тепловое сопротивление перехода кристалл интегрированного диода – корпус транзистора.
17. Ток утечки затвора (I_{GES}) - ток затвора при максимальном напряжении затвор-исток.
18. Общий заряд затвора (Q_g) - суммарный заряд затвора, необходимый для перехода транзистора в проводящее состояние.

19. (Q_{ge}) - заряд емкости затвор-эмиттер.
20. (Q_{gc}) - заряд емкости затвор-коллектор.
21. Время задержки включения ($t_{d(on)}$) - время накопления заряда затвора, при котором транзистор начинает открываться.
22. Время роста тока через транзистор (Rise Time) - время нарастания тока коллектора транзистора от 10% до 90%.
23. Время задержки выключения ($t_{d(off)}$) - время, за которое заряд затвора становится меньше заряда включения, и транзистор начинает закрываться.
24. Время спада тока через транзистор (Fall Time) - время спада тока коллектора транзистора от 10% до 90%.
25. Потери энергии на включение транзистора (Turn-On Switching Loss) E_{on} - это энергия, которая выделяется в кристалле транзистора в процессе переходного процесса включения (открытия) транзистора. Это происходит при заданном напряжении коллектор-эмиттер, напряжении затвора и токе коллектора.
26. Потери энергии на выключение транзистора (Turn-Off Switching Loss) E_{off} - это энергия, которая выделяется в кристалле транзистора в процессе переходного процесса выключения (закрытия) транзистора. Это также происходит при заданном напряжении коллектор-эмиттер, напряжении затвора и токе коллектора.
27. Суммарные потери энергии на включение-выключение транзистора (Total Switching Loss) E_{ts} - это общая сумма потерь энергии, связанных с переходными процессами включения и выключения транзистора в рамках одного рабочего цикла. Этот параметр учитывает и E_{on} , и E_{off} , и показывает общие потери на переключении..
28. Максимальная скорость нарастания напряжения исток-сток (dv/dt ruggedness) - максимальная скорость нарастания напряжения исток-сток, при которой транзистор еще не переходит в проводящее состояние.
29. Индуктивность вывода (L_E) - паразитная индуктивность вывода эмиттера транзистора.
30. Максимальная скорость обрыва тока при переходе в непроводящее состояние $di_{(rec)M}/dt$ (Diode Peak Rate of Fall of Recovery) - максимальная скорость обрыва тока через интегрированный диод при переходе в непроводящее состояние под действием смены полярности.
31. Постоянный прямой ток через обратный диод (I_S) - максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный диод.
32. Импульсный ток через обратный диод (I_{SM}) - максимальное значение импульсного тока через паразитный диод.

33. Падение напряжения на диоде (V_{SD}) - прямое падение напряжения на интегрированном в транзистор диоде. При заданной температуре и токе.

34. Время восстановления паразитного диода (t_{rr}) - время восстановления обратной проводимости паразитного диода.

35. Заряд восстановления паразитного диода (Q_{rr}) - заряд, необходимый для восстановления обратной проводимости паразитного диода.

36. Время включения паразитного диода (t_{on}) - время перехода диода в проводящее состояние. Обычно малое значение.

37. Входная емкость (C_{ies}) - сумма емкостей "затвор-коллектор" и "затвор-эмиттер" при некотором напряжении коллектор-эмиттер.

38. Выходная емкость (C_{oes}) - сумма емкостей "затвор-коллектор" и "коллектор-эмиттер" при некотором напряжении коллектор-эмиттер.

39. Проходная емкость (C_{res}) - емкость «затвор-коллектор».

IGBT-транзисторы и MOSFET-транзисторы имеют различные характеристики и применяются в разных областях из-за своих преимуществ и ограничений.

Тип	F, кГц	$V_{CE(on)}$, В	E_{ts} , мДж
S-Standart (стандарт)	<1	1,2	6,95
F-Fast (быстрые)	1-8	1,4	2,96
U-Ultrafast (ультрабыстрые)	8-30	1,7	1,1
W-Warp (сверхбыстрые)	>30	2,05	0,34

Классификация IGBT-транзисторов по скорости переключения [Мощные и эффективные IGBT седьмого поколения от IR. Донцов Александр. Силовая электроника №5, 2013].

Как отражено в таблице, повышение скорости переключения (уменьшение потерь на переключение) сопровождается увеличением потерь на проводимость. По сравнению с MOSFET-транзисторами IGBT-транзисторы имеют меньшую скорость переключения, но большую устойчивость к токовым перегрузкам. Потери на проводимость в MOSFET-транзисторе пропорциональны квадрату тока, а в IGBT-транзисторе пропорциональны току. По этой причине превышение номинальной величины тока критично для MOSFET-транзистора, поскольку это может привести к катастрофическим потерям, в то время как для IGBT-транзистора такое превышение вполне допустимо. Именно по этой причине IGBT-транзисторы широко используются там, где возможны импульсные токовые перегрузки, такие как сварочные инверторы, системы пуска двигателей и другие подобные решения.

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Существует несколько классических схем включения транзисторов:

1. Схема усилителя на транзисторе с общим эмиттером (common emitter amplifier) - это самая распространенная схема усилителя, при которой входной сигнал подается на базу транзистора, а выходной сигнал берется с коллектора. Эта схема обеспечивает высокое усиление и большую мощность.

2. Схема усилителя на транзисторе с общей базой (common base amplifier) - в этой схеме база транзистора является общей для входного и выходного контура. Это позволяет добиться высокого коэффициента усиления и широкой полосы пропускания, но при этом уровень выходного сигнала ниже, чем в схеме с общим эмиттером.

3. Схема усилителя на транзисторе с общим коллектором (common collector amplifier) - также известная как схема "эмиттерный следящий", в данной схеме база и эмиттер транзистора являются общими. Это обеспечивает низкий уровень искажений, но коэффициент усиления в этой схеме невелик.

ОБЩИЙ ЭМИТТЕР

Схема усилителя с общим эмиттером (common emitter amplifier) является наиболее распространенной и широко используется для создания усилителей. Она обладает рядом преимуществ, которые делают ее предпочтительной в множестве решений.

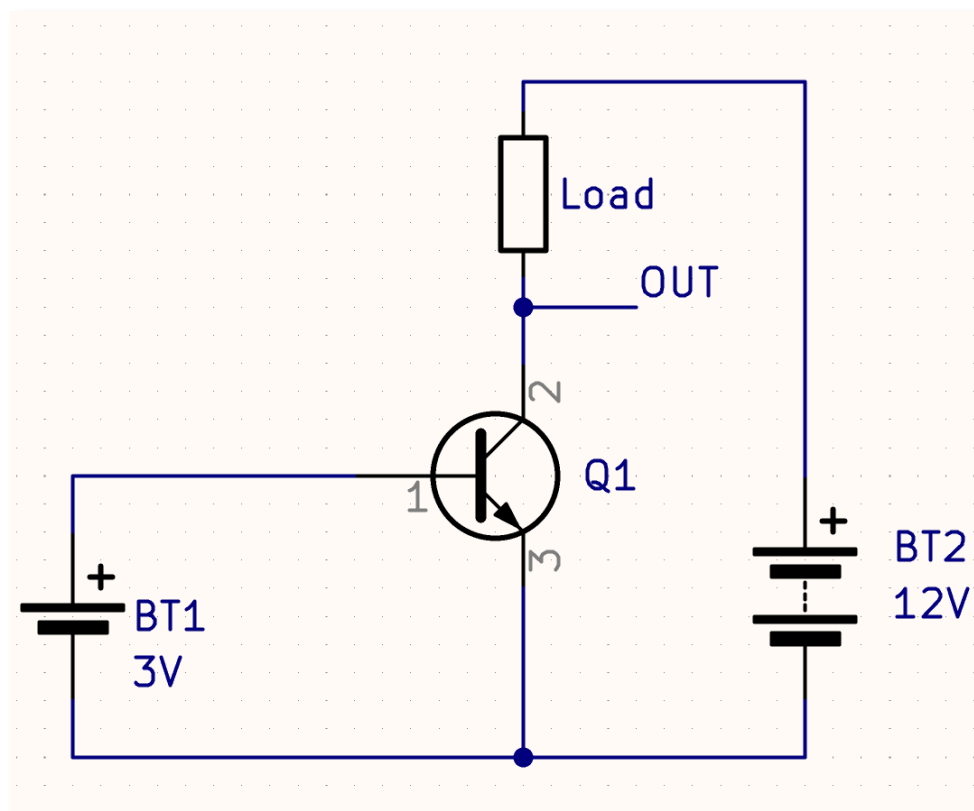
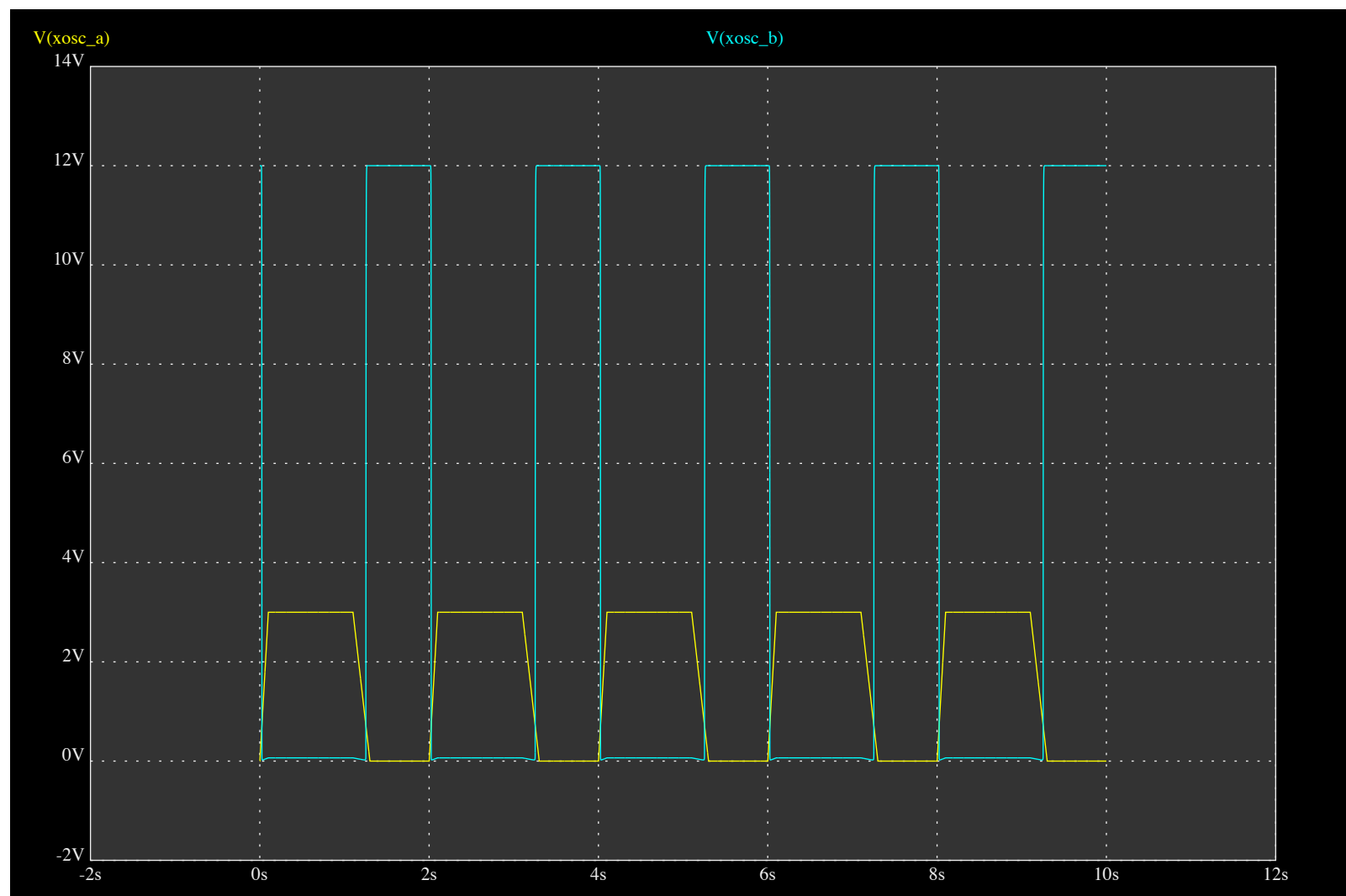


Схема с общим эмиттером

Схема с общим эмиттером обеспечивает наибольшее усиление как по напряжению, так и по току. Это связано с тем, что входной сигнал подается на базу транзистора, а выходной сигнал берется с коллектора. Это позволяет достичь высокого коэффициента усиления напряжения и усилить входной сигнал. Кроме того, такая схема позволяет обеспечить значительное усиление по току, что важно для усиления сигналов с низким уровнем. Однако следует отметить некоторые ограничения данной схемы. Например, небольшое входное сопротивление, ограничивающееся диапазоном 500-1000 Ом, а

выходное сопротивление, напротив, будет заметно выше. Стоит также учитывать, что сигнал на выходе данной схемы будет инвертированным.

На схеме с общим эмиттером присутствуют два источника питания. Первый ВТ1 играет роль источника сигнала- управляющего тока для NPN-транзистора Q1. Ток от ВТ1 проходя через переход база-эмиттер позволяет транзистору открыться и пустить ток от второго источника питания ВТ2, который пройдет через нагрузку, находящуюся в цепи коллектора, через транзистор и выйдет через общий эмиттер на минусовой контакт. Тем самым контур с нагрузкой получается замкнут и работает. Выходной сигнал в таком подключении снимается с OUT схемы.



Симуляция ОЭ

На скриншоте программы симуляции входящий сигнал xosc_a желтого цвета, прямоугольный 3 Вольта. Синий сигнал xosc_b - это выходной сигнал на OUT, как видно происходит инверсия, то есть изменение фазы сигнала на 180 градусов

Коэффициент усиления определяется как отношение тока коллектора к току базы и, как правило, может находиться в диапазоне от десятков до нескольких сотен. В схеме с общим эмиттером транзистор способен обеспечить максимальное усиление сигнала по мощности в сравнении с другими вариантами подключения транзистора. В цепи эмиттера транзистора протекает ток, равный сумме тока базы и тока коллектора.

ОБЩИЙ КОЛЛЕКТОР

Схема с общим коллектором часто используется для достижения высокого входного сопротивления. Коэффициент усиления по мощности в этой схеме включения транзистора обычно ниже, чем в схеме с общим эмиттером, но сопоставим с коэффициентом усиления в схеме с общей базой. Это объясняется тем, что схема с общим коллектором не обеспечивает усиление по напряжению. В данной схеме происходит усиление только по току.

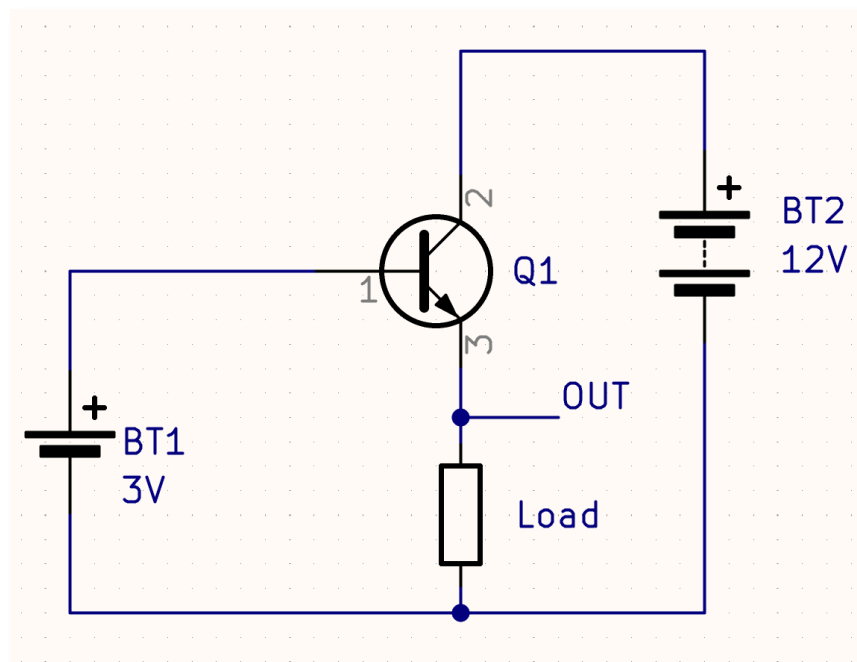
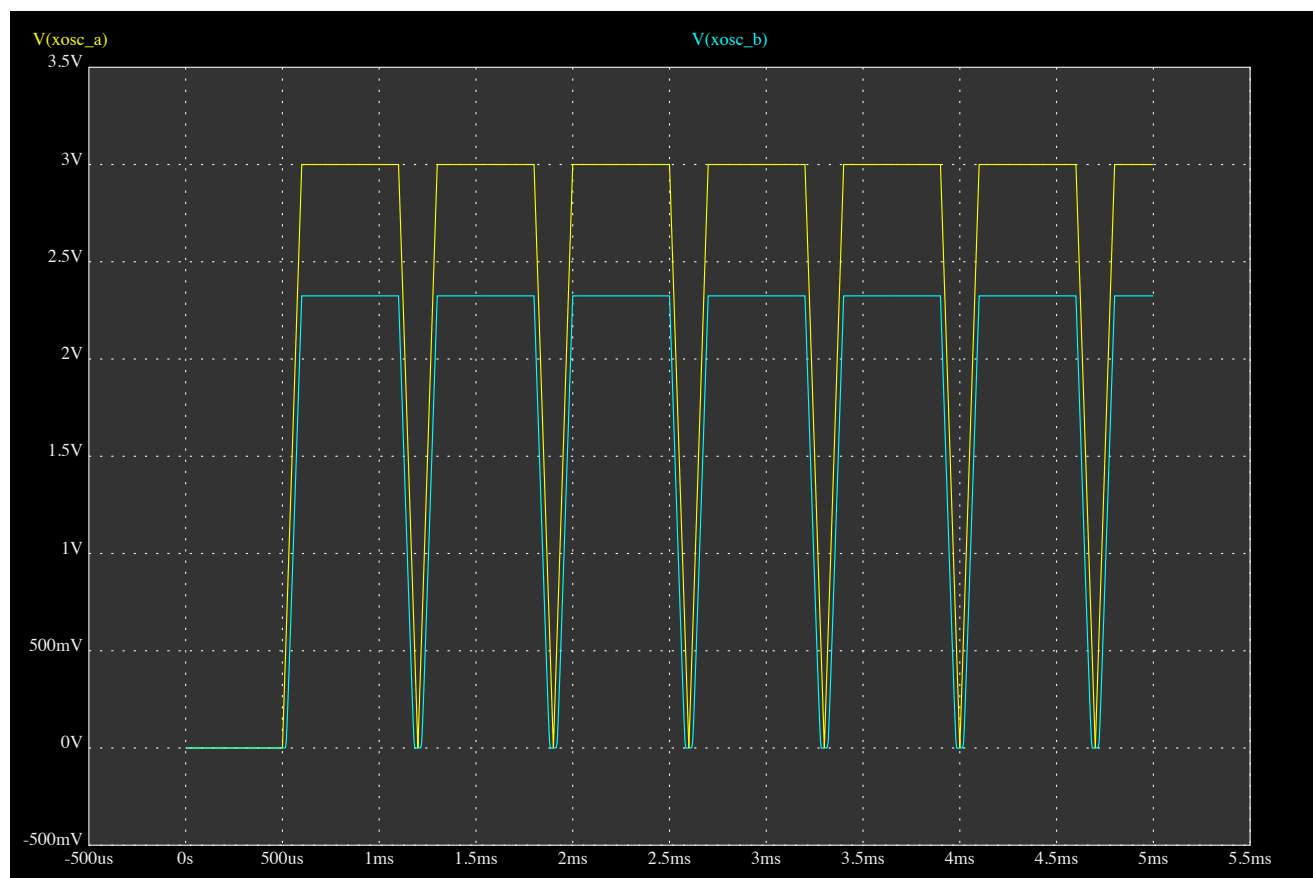


Схема с общим эмиттером



Симуляция ОК

- входной сигнал подаётся на базу
- выходной сигнал снимается с эмиттера

Коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме с общим эмиттером. Однако коэффициент усиления по напряжению в этой схеме невелик (главный недостаток данной конфигурации). Он стремится к единице, но всегда остается ниже этого значения. В результате коэффициент усиления по мощности составляет всего несколько десятков.

В схеме с общим коллектором отсутствует фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением. Поскольку коэффициент усиления по напряжению близок к единице, выходное напряжение по фазе и амплитуде совпадает с входным, то есть повторяет его. Именно по этой причине данная схема получила название "эмиттерный повторитель". "Эмиттерный" здесь указывает на то, что выходное напряжение снимается с эмиттера относительно общего провода.

На скриншоте окна симуляции можно наблюдать входной сигнал `xosc_a` желтого цвета импульсами 3 Вольт, на выходе OUT синий сигнал `xosc_b` несколько ниже по напряжению, не смотря на источник питания VT2 12 Вольт. Если посмотреть по делениям шкалы, то можно понять, что разница примерно в 0,7 Вольт, которые как раз и являются следствием падения напряжения на переходе база-эмиттер.

Эта схема применяется для согласования каскадов или тогда, когда используется источник входного сигнала с высоким входным сопротивлением. В качестве такого источника можно привести, например, пьезоэлектрический звукосниматель или конденсаторный микрофон. Входное сопротивление у данной схемы довольно высокое, что благоприятно скажется при подаче маломощного сигнала на него. Выходное сопротивление, наоборот низкое, что позволяет строить своего рода каскады для согласования с последующей нагрузкой.

ОБЩАЯ БАЗА

Схема включения транзистора с общей базой находит применение в основном в каскадах усилителей высоких частот. В этой схеме усиление каскада достигается только по напряжению. Такое включение транзистора позволяет более полно использовать его частотные характеристики, обеспечивая минимальный уровень шумов. Частотная характеристика транзистора представляет собой способность усиливать высокие частоты, близкие к граничной частоте усиления. Значение этой характеристики зависит от типа транзистора, причем более высокочастотные транзисторы способны усиливать более высокие частоты. С увеличением рабочей частоты коэффициент усиления транзистора уменьшается.

Если использовать для построения усилителя схему с общим эмиттером, то при определенной (граничной) частоте каскад перестает усиливать входной сигнал. Однако использование того же транзистора, но включенного по схеме с общей базой, позволяет существенно повысить эту граничную частоту усиления. Каскад, созданный по схеме с общей базой, характеризуется низким входным сопротивлением и сравнительно низким выходным сопротивлением. Эти параметры хорошо сочетаются при работе в антенных

усилителях с применением "коаксиальных" несимметричных высокочастотных кабелей, где волновое сопротивление обычно составляет не более 100 ом.

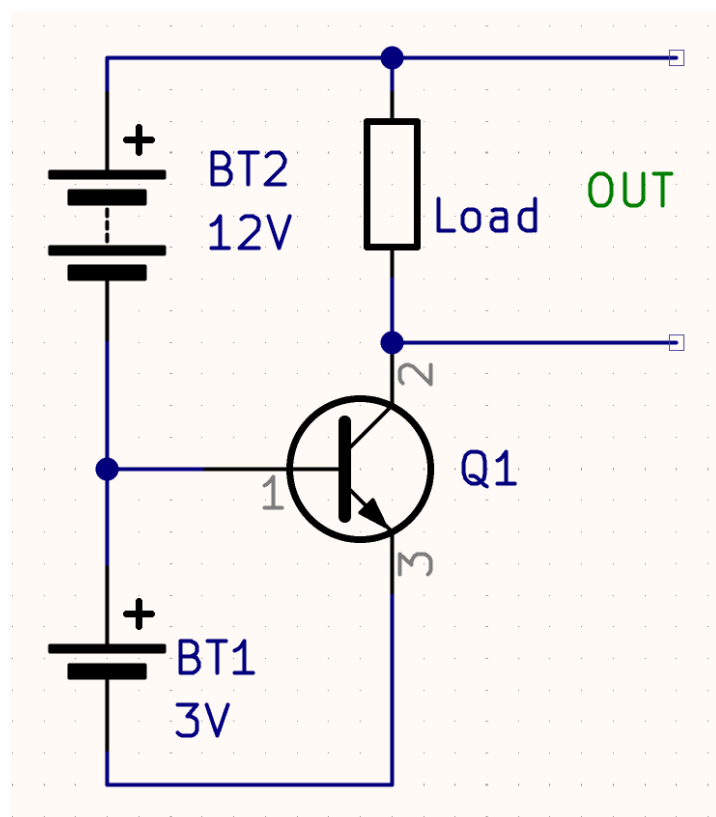
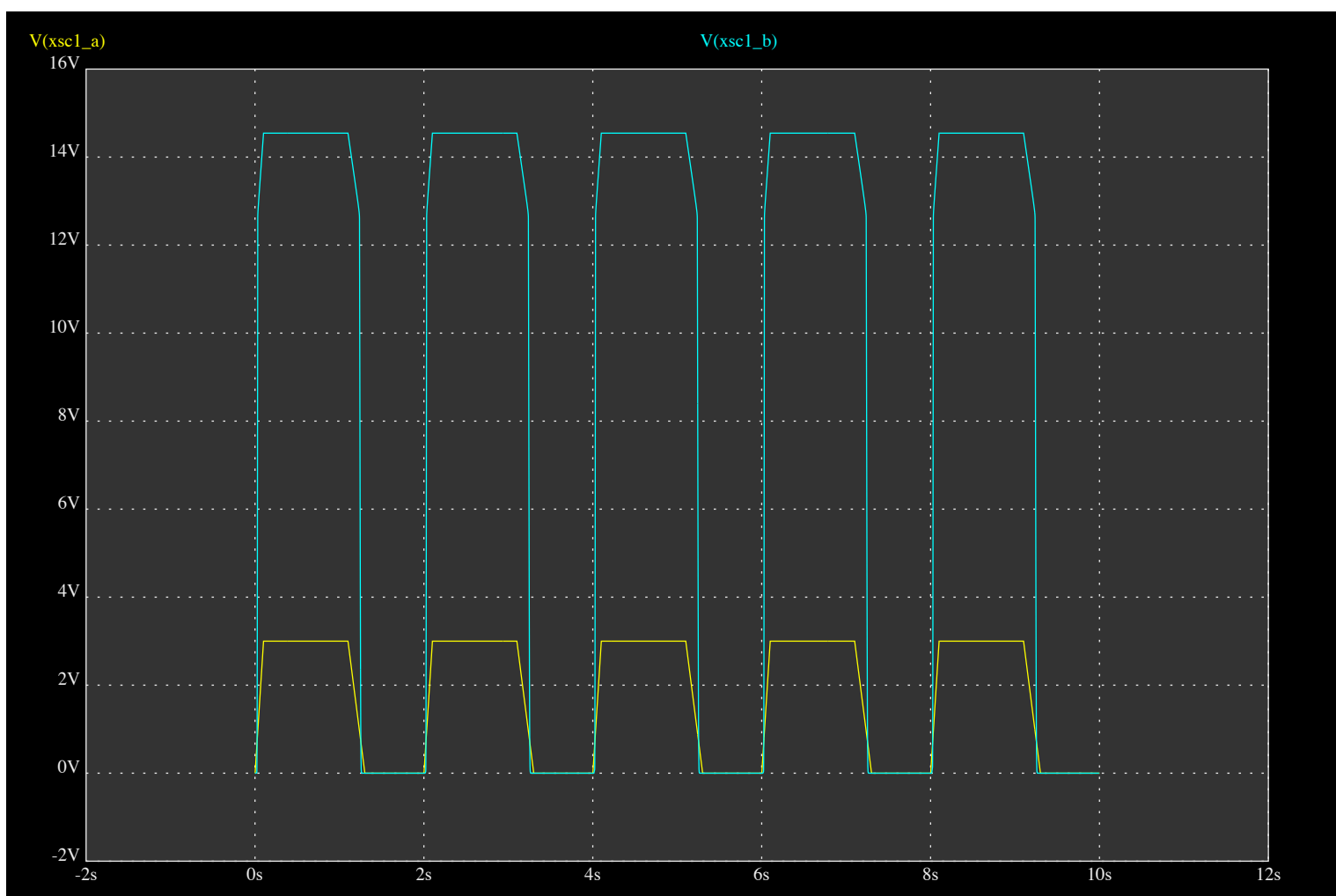


Схема с общей базой



Симуляция ОБ

На скриншоте окна симуляции можно наблюдать входной сигнал $xosc_a$ желтого цвета импульсами 3 Вольта, на выходе OUT синий сигнал $xosc_b$, который совпадает по фазе со входным, но усилен по напряжению.

Схема с общей базой не вызывает инвертирование фазы сигнала и способствует снижению уровня шумов на высоких частотах. Тем не менее, следует отметить, что коэффициент усиления по току в этой схеме всегда немного ниже единицы. Однако коэффициент усиления по напряжению в схеме с общей базой остается таким же, как и в схеме с общим эмиттером. К одному из недостатков схемы с общей базой также можно отнести необходимость использования двух источников питания. Это одна из самых редко используемых схем включения.

Все три рассмотренных типа включения объединяет один нюанс - **отсутствие ограничения тока базы** транзистора. Обычно для этого используется резистор, который умышленно опущен в примерах для легкости восприятия основной концепции. Переход база-эмиттер ведет себя аналогично обычному диоду. Это означает, что независимо от напряжения, подаваемого на базу, на базе всегда будет присутствовать падение напряжения общепринято 0.6 Вольт (точные параметры отражены в документации на конкретный транзистор) . Поэтому если мы подадим 12 вольт, например, на базу и не ограничим ток, то транзистор будет перегружен и выйдет из строя. Чтобы ограничить ток базы, включается последовательно резистор. Слишком большой ток может перегреть транзистор, а слишком маленький не позволит транзистору пропустить достаточный ток между выводами коллектора и эмиттера. Важно помнить об общем правиле - ток базы транзистора нужно ограничивать, иначе неуправляемый ток базы может привести к выходу из строя транзистора и всей схемы.

РАСЧЕТ КЛЮЧА НА ТРАНЗИСТОРЕ

В общих чертах, резистор базы выбирается так, чтобы обеспечить нужный ток базы и, следовательно, нужный ток коллектора. Закон Ома ($U = I * R$) используется для расчета резистора базы. Выходной ток коллектора можно рассчитать как произведение коэффициента усиления транзистора (h_{FE} или β) на ток базы (I_b):

$$I_c = h_{FE} * I_b$$

Входной ток базы (I_b) также может быть рассчитан с использованием тока коллектора (I_c) и коэффициента усиления тока базы (h_{FE}):

$$I_b = \frac{I_c}{h_{FE}}$$

После определения требуемого тока базы (I_b) и напряжения между базой и эмиттером (U_{be}) для вашего транзистора, можно рассчитать резистор базы по следующей формуле:

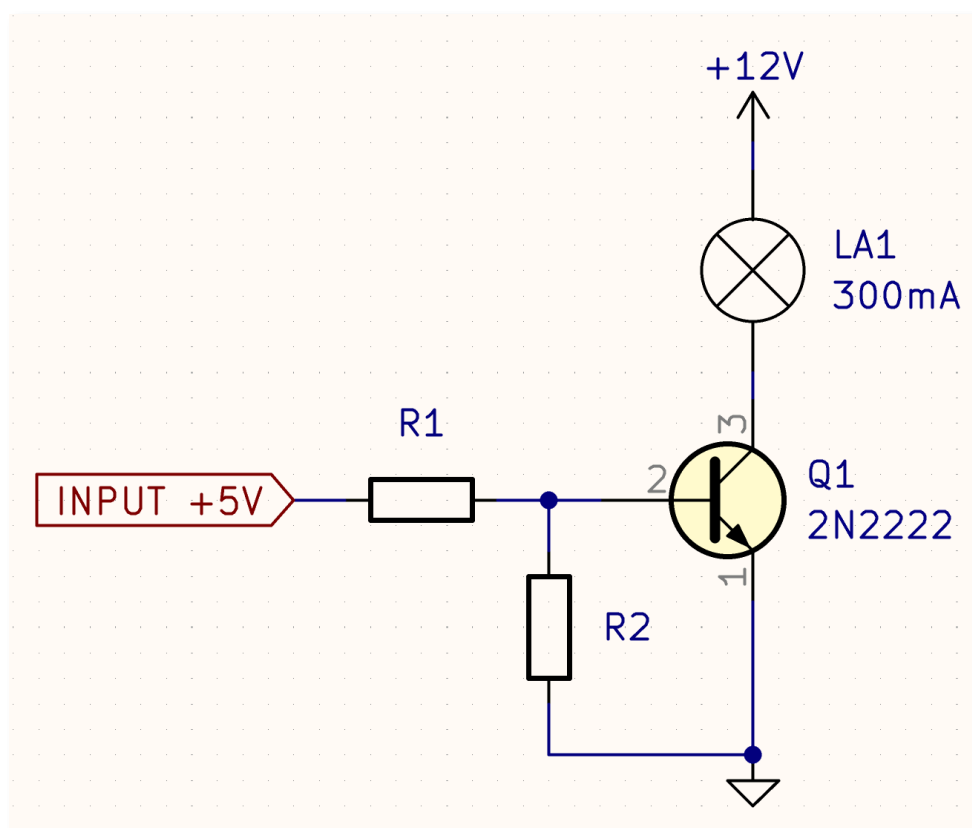
$$R_b = \frac{U - U_{be}}{I_b}$$

Где:

- R_b - значение резистора базы (в омах).
- U - напряжение питания (в вольтах).
- U_{be} - напряжение между базой и эмиттером транзистора (в вольтах).
- I_b - ток базы (в амперах).

Это общий подход к расчету резистора базы для NPN транзисторного ключа. Необходимо учитывать параметры конкретного транзистора и условия работы³, чтобы провести точные расчеты.

Пример расчета.



Включение автомобильной лампы через 2N2222

Требуется управлять автомобильной лампой. Напряжение лампочки 12 Вольт, ток потребления 300 мА.

Управляем ключом от микроконтроллера, у которого выходное напряжение 5 вольт.

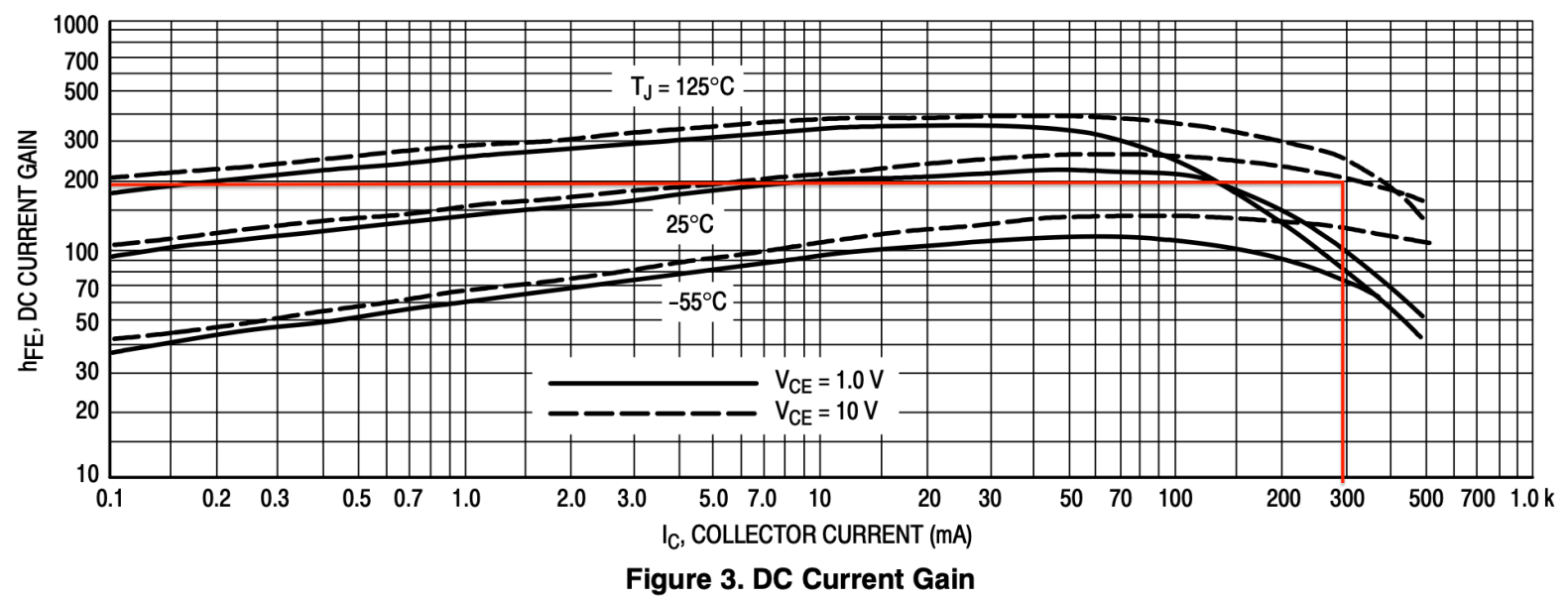
- Выбираем транзистор по максимальному напряжению коллектор-эмиттер
- Транзистор должен иметь максимальный ток коллектор-эмиттер более чем 300 мА.
- Рассчитываем ток базы.
- Рассчитываем токоограничивающий резистор.

³ Ток базы всегда выбирается больше чем нужно (с запасом), так как коэффициент усиления по току зависит от температуры. И если мы хотим чтобы наш ключ работал во всём диапазоне температур, мы должны учесть уменьшение этого коэффициента.

Определим h_{FE}

DC Current Gain	h_{FE}			
($I_C = 0.1 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$)	35	–	–	–
($I_C = 1.0 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$)	50	–	–	–
($I_C = 10 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$)	75	–	–	–
($I_C = 10 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $T_A = -55^\circ\text{C}$)	35	–	–	–
($I_C = 150 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) (Note 1)	100	300	–	–
($I_C = 150 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ Vdc}$) (Note 1)	50	–	–	–
($I_C = 500 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$) (Note 1)	40	–	–	–

Не самая информативная табличка, более подробную информацию можно почерпнуть из семейства графиков, которые присутствуют в большинстве даташитов на транзисторы:



Примем $h_{FE} = 200$, при токе коллектора 300mA, температуре окружающей среды 25 градусов, напряжению коллектор-эмиттер 10 Вольт (в схеме 12 Вольт).

Вычисляем требуемый ток через базу для пропускания 300 мА- ток нагрузки делим на принятый h_{FE} из документации. Получаем $300/200=1.5 \text{ mA}$ требуемый ток базы.

Рассчитываем сопротивление для ограничения тока.

$$R_1 = \frac{5 - 0.6}{0.0015} \approx 2.933 \text{ Ohm}$$

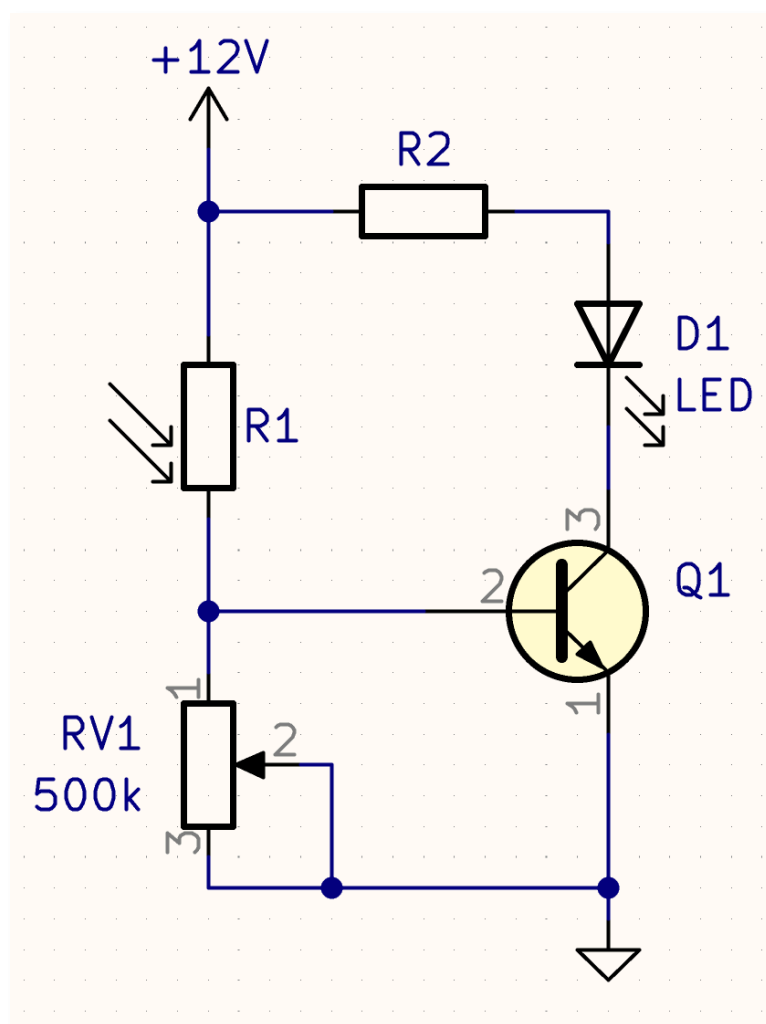
Ближайший из стандартного ряда E24 резистор по номиналу будет 2.7 кОм, что даст небольшой запас по току. В реальности можно брать чуть больший запас по току, чтобы гарантировано открывать транзистор в режим насыщения. То есть в данном случае для реального использования лучше выбрать номинал резистора 2.2 - 2.4 кОм.

В данной схеме присутствует R_2 между базой транзистора и GND, что немаловажно к использованию. Так называемый подтягивающий резистор, который при отсутствии управляющего сигнала будет гарантировано удерживать транзистор в закрытом состоянии. Если его не будет и управляющий сигнал отсутствует, то база остается не подключенной ни к чему, то есть «висит в воздухе». Соответственно, данный вывод, как антенна будет ловить все электромагнитные наводки и схема будет вести себя весьма непредсказуемо. Возможны ложные срабатывания, частичное открытие транзистора,

достаточно прикоснуться пальцем к данному выводу и потенциала на человеческом теле будет достаточно, чтобы транзистор начал открываться. Номинал данного резистора обычно принято выбирать на порядок больше, чем резистор R_1 (R_b). То есть если $R_1 = 1$ кОм, то R_2 можно выбрать 10-15 кОм. Следует помнить, что данные резисторы, образуют делитель напряжения, что может сказаться на токе базы, поэтому всегда стоит помнить о разумности выбора подтягивающего (стягивающего) базу к эмиттеру резистора.

ВКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ ОТ УСЛОВИЙ ОСВЕЩЕНИЯ

Фоторезистор представляет собой полупроводниковый компонент, способный изменять свое сопротивление под воздействием света. Он не имеет p-n перехода, что обеспечивает одинаковую проводимость независимо от направления тока.



В схеме фоторезистор подключается между линией питания и базой транзистора. Величина освещенности, падающей на фоторезистор, влияет на его сопротивление: с увеличением света сопротивление уменьшается, и наоборот.

При попадании света на фоторезистор его сопротивление уменьшается, что приводит к увеличению тока через него. Этот ток становится достаточным для открытия p-n перехода между базой и эмиттером транзистора. Это, в свою очередь, открывает переход коллектор-эмиттер и обеспечивает ток, необходимый для работы подключенной нагрузки (в данном случае светодиода) через соответствующий токоограничивающий резистор.

Подстроечный резистор является частью делителя напряжения, включающего в себя фоторезистор. Они совместно используются для регулировки напряжения, поступающего на базу транзистора