

# Электронные приборы

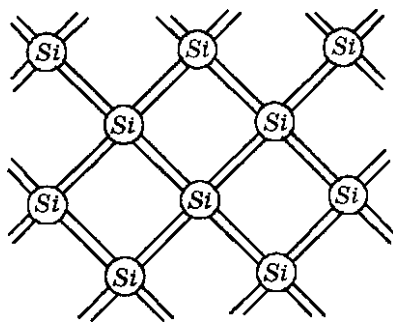
## Общие сведения о полупроводниках

Полупроводниками называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков. Полупроводники одновременно являются плохими проводниками и плохими диэлектриками. Граница между полупроводниками и диэлектриками условна, так как диэлектрики при высоких температурах могут вести себя как полупроводники, а чистые полупроводники при низких температурах ведут себя как диэлектрики. В металлах концентрация электронов практически не зависит от температуры, а в полупроводниках носители заряда возникают лишь при повышении температуры или при поглощении энергии от другого источника.

Типичными полупроводниками являются углерод (C), германий (Ge) и кремний (Si). Германий - это хрупкий серовато-белый элемент, открытый в 1886 г. Источником порошкообразной двуокиси германия, из которой получают твердый чистый германий, являются золы некоторых сортов угля.

Кремний был открыт в 1823 г. Он широко распространен в земной коре в виде кремнезема (двуокиси кремния), силикатов и алюмосиликатов. Двуокисью кремния богаты песок, кварц, агат и кремень. Из двуокиси кремния химическим путем получают чистый кремний. Кремний является наиболее широко используемым полупроводниковым материалом!

Рассмотрим подробнее образование электронов проводимости в полупроводниках на примере кремния. Атом кремния имеет порядковый номер  $Z = 14$  в периодической системе Менделеева. Поэтому в состав его атома входят 14 электронов. Однако только четыре из них находятся на незаполненной внешней оболочке и являются слабо связанными. Эти электроны называются валентными и обуславливают четыре валентности кремния. Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью так называемой ковалентной связи. При ковалентной связи валентные электроны совместно используются различными атомами, что приводит к образованию кристалла атомами, что приводит к образованию кристалла.



При повышении температуры кристалла тепловые колебания решетки приводят к разрыву некоторых валентных связей. В результате этого часть электронов, ранее участвовавших в образовании валентных связей, отщепляется и становится электронами проводимости. При наличии электрического поля они перемещаются против поля и образуют электрический ток.

Однако при освобождении электрона в кристаллической решетке образуется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами связи получили название «дырок». Возникновение дырок в кристалле полупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Действительно, дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома. В результате на этом месте будет восстановлена нормальная связь, но зато в другом месте появится дырка. В эту новую дырку в свою очередь может перейти какой-либо из других электронов связи и т.д. Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов.

Таким образом, если при наличии электрического поля электроны перемещаются против поля, то дырки будут двигаться в направлении поля, т.е. так, как двигались бы положительные заряды. Следовательно, в полупроводнике имеются два типа носителей тока - электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости (n-типа, от слова negative) и дырочной проводимости (p -типа, от слова positive).

Наряду с переходами электронов из связанного состояния в свободное существуют обратные переходы, при которых электрон проводимости улавливается на одно из вакантных мест электронов связи. Этот процесс называют рекомбинацией электрона и дырки. В состоянии равновесия устанавливается такая концентрация электронов (и равная ей концентрация дырок), при которой число прямых и обратных переходов в единицу времени одинаково.

Рассмотренный процесс проводимости в чистых полупроводниках называется собственной проводимостью. Собственная проводимость быстро возрастает с повышением температуры, и в этом существенное отличие полупроводников от металлов, у которых с повышением температуры проводимость уменьшается. Все полупроводниковые материалы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Чистые полупроводники являются объектом главным образом теоретического интереса. Основные исследования полупроводников связаны с влиянием добавления примесей в чистые материалы. Без этих примесей не было бы большинства полупроводниковых приборов.

Чистые полупроводниковые материалы, такие как германий и кремний, содержат при комнатной температуре небольшое количество электронно-дырочных пар и поэтому могут проводить очень маленький ток. Для увеличения проводимости чистых материалов используется легирование.

Легирование - это добавление примесей в полупроводниковые материалы. Используются два типа примесей. Примеси первого типа - пятивалентные - состоят из атомов с пятью валентными электронами, например, мышьяк и сурьма. Примеси второго типа - трехвалентные - состоят из атомов с тремя валентными электронами, например, индий и галлий.

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пятивалентным материалом, таким как мышьяк (As), то некоторые атомы полупроводника замещаются атомами мышьяка.

Атом мышьяка вводит четыре своих валентных электрона в ковалентные связи с соседними атомами. Его пятый электрон слабо связан с ядром и легко может стать свободным. Атом мышьяка называется донорским, поскольку он отдает свой лишний электрон. В легированном полупроводниковом материале находится достаточное количество донорских атомов, а следовательно, и свободных электронов для поддержания тока.

При комнатной температуре количество дополнительных свободных электронов превышает количество электронно-дырочных пар. Это означает, что в материале больше электронов, чем дырок. Поэтому электроны называют основными носителями. Дырки называют неосновными носителями. Поскольку основные носители имеют отрицательный заряд, такой материал называется полупроводником n - типа.

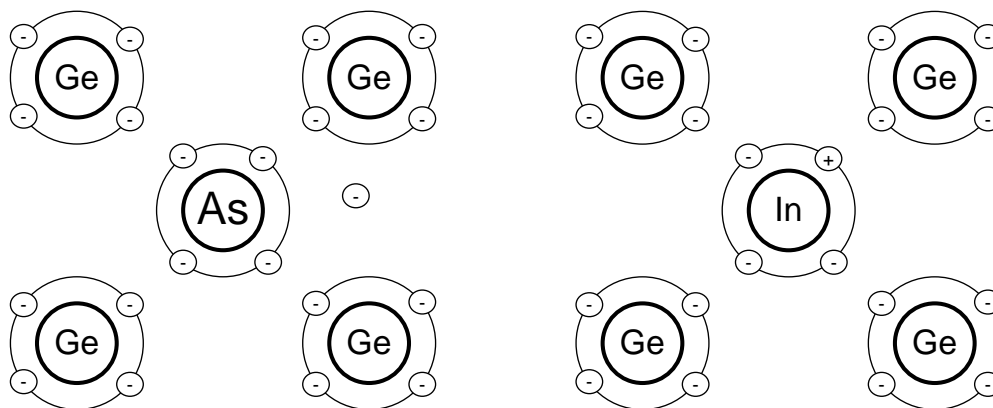
Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов.

Это создаст в ковалентной связи дырку. Наличие дополнительных дырок позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как дырки легко принимают электроны, атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, называются акцепторными.

При обычных условиях количество дырок в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, дырки являются основными носителями, а

электроны - неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником р-типа.

Полупроводниковые материалы n- и р-типов имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые полупроводники. Эта проводимость может быть увеличена или уменьшена путем изменения количества примесей. Чем сильнее полупроводниковый материал легирован, тем меньше его электрическое сопротивление

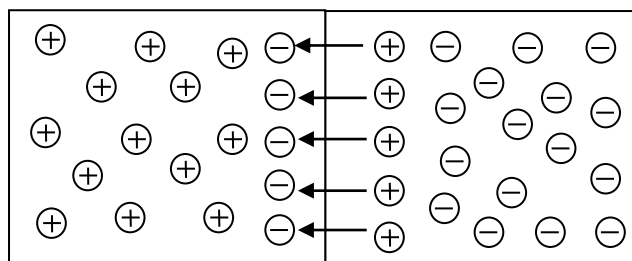


Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется р-ге-переходом и обладает очень важным свойством - его сопротивление зависит от направления тока. Отметим, что такой контакт нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника, р-n-переход создается в одной пластине полупроводника путем образования в ней областей с различными типами проводимости. Методы получения р-n-переходов описаны ниже.

Итак, в куске монокристаллического полупроводника на границе между двумя слоями с различного рода проводимостями образуется р-n-переход. На ней имеет место значительный перепад концентраций носителей зарядов. Концентрация электронов в n-области во много раз больше их концентрации в р-области. Вследствие этого электроны диффундируют в область их низкой концентрации (в р-область). Здесь они рекомбинируют с дырками и таким путем создают пространственный отрицательный заряд ионизированных атомов акцептора, не скомпенсированный положительным зарядом дырок.

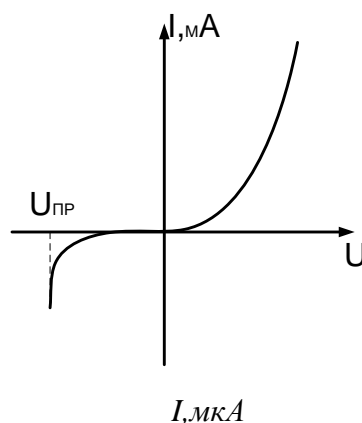
Одновременно происходит диффузия дырок в n-область. Здесь создается не скомпенсированный зарядом электронов пространственный положительный заряд ионов донора. Таким образом, на границе создается двойной слой пространственного заряда, обедненный основными носителями тока. В этом слое возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Но и в этом случае под действием тепла небольшая часть электронов и дырок будет продолжать проходить через потенциальный барьер, обусловленный пространственными зарядами, создавая ток диффузии. Однако одновременно с этим под действием контактного поля неосновные носители заряда р- и n-областей (электроны и дырки) создают небольшой ток проводимости. В состоянии равновесия эти токи взаимно компенсируются.



Если к р-п-переходу подключить внешний источник тока, то напряжение указанной на обратной полярности приведет к появлению внешнего поля  $E$ , совпадающего по направлению с контактным полем  $E_k$ . В результате ширина двойного слоя увеличится и тока за счет основных носителей практически не будет. В цепи возможен лишь незначительный ток за счет неосновных носителей (обратный ток  $I_{обр}$ ).

При включении напряжения прямой полярности направление внешнего поля противоположно направлению контактного поля. Ширина двойного слоя уменьшится, и в цепи возникнет большой прямой ток  $I_{пр}$ . Таким образом, р-п-переход обладает ярко выраженной односторонней проводимостью. Это отражает его вольтамперная характеристика.



Когда к р-п-переходу приложено прямое напряжение, ток быстро возрастает с ростом напряжения. Когда же к р-п-переходу приложено обратное напряжение, ток очень мал, быстро достигает насыщения и не изменяется до некоторого предельного значения обратного напряжения, после чего резко возрастает. Это так называемое *напряжение пробоя*  $U_{пр}$ , при котором наступает пробой р-п перехода и он разрушается. Следует отметить, что масштаб обратного тока в тысячу раз меньше масштаба прямого тока.

### Полупроводниковые диоды

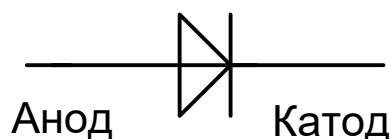
Р-п-переход является основой полупроводниковых диодов, которые применяются для выпрямления переменного тока и для других нелинейных преобразований электрических сигналов.

Диод проводит ток в прямом направлении только тогда, когда величина внешнего напряжения (в вольтах) больше потенциального барьера (в электронвольтах). Для германиевого диода минимальное внешнее напряжение равно 0,3 В, а для кремниевого — 0,7 В.

Когда диод начинает проводить ток, на нем появляется падение напряжения. Это падение напряжения равно потенциальному барьеру и называется *прямым падением напряжения*. Все диоды обладают малым обратным током. В германиевых диодах он измеряется в микроамперах, а в кремниевых — в наноамперах. Германиевый диод имеет больший обратный ток и более чувствителен к температуре. Этот недостаток германиевых диодов компенсируется невысоким потенциальным барьером.

При комнатной температуре обратный ток мал. При повышении температуры обратный ток увеличивается, нарушая работу диода. В германиевых диодах обратный ток выше, чем в кремниевых диодах, и сильнее зависит от температуры, удваиваясь при повышении температуры приблизительно на 10 °С.

Схематическое обозначение диода показано р-часть представлена стрелкой, а n-часть — чертой.



Прямой ток течет от части *p* к части *n* (по стрелке). Часть *n* называется катодом, а часть *p* - анодом. Существуют три типа *p-n*-переходов: выращенные переходы, вплавленные переходы и диффузионные переходы, которые изготавливаются по различным технологиям. Методы изготовления каждого из этих переходов различны.

Метод выращивания перехода (наиболее ранний) состоит в следующем: чистый полупроводниковый материал и примеси *p*-типа помещают в кварцевый контейнер и нагревают до тех пор, пока они не расплавятся. В расплавленную смесь помещают маленький полупроводниковый кристалл, называемый затравкой. Затравочный кристалл медленно вращается и вытягивается из расплава настолько медленно, чтобы на нем успел нарасти слой расплавленной смеси. Расплавленная смесь, нарастая на затравочный кристалл, охлаждается и затвердевает. Она имеет такую же кристаллическую структуру, как и затравка. После вытягивания затравка оказывается попеременно легированной примесями *n*- и *p*-типов. Это создает в выращенном кристалле слои *n*- и *p*-типов. Таким образом, выращенный кристалл состоит из многих *p-n* слоев.

Метод создания вплавленных *p-n*-переходов предельно прост. Маленькая гранула трехвалентного материала, такого как индий, размещается на кристалле полупроводника *n*-типа. Гранула и кристалл нагреваются до тех пор, пока гранула не расплавится сама и частично не расплавит полупроводниковый кристалл. На участке, где они стыкуются, образуется материал *p*-типа. После охлаждения материал перекристаллизовывается и формируется твердый *p-n*-переход.

В настоящее время чаще всего используют диффузионный метод получения *p-n*-переходов. Маска с прорезями размещается над тонким срезом полупроводника *p*- или *n*-типа, который называется подложкой. После этого подложка помещается в печь и подвергается контакту с примесями, находящимися в газообразном состоянии. При высокой температуре атомы примеси проникают в подложку. Глубина проникновения контролируется длительностью экспозиции и температурой.

После формирования *p-n*-перехода диод надо поместить в корпус, чтобы защитить его от влияния окружающей среды и механических повреждений. Корпус должен также обеспечить возможность соединения диода с цепью. Вид корпуса определяется назначением диода.

Если через диод должен протекать большой ток, корпус должен быть рассчитан так, чтобы уберечь *p-n*-переход от перегрева.

Диод можно проверить путем измерения с помощью омметра прямого и обратного сопротивлений. Величина этих сопротивлений характеризует способность диода пропускать ток в одном направлении и не пропускать ток в другом направлении. Германиевый диод имеет низкое прямое сопротивление, порядка 100 Ом, а его обратное сопротивление превосходит 100000 Ом. Прямые и обратные сопротивления кремниевых диодов выше, чем у германиевых. Проверка диода с помощью омметра должна показать низкое прямое сопротивление и высокое обратное сопротивление.

Если положительный вывод омметра соединен с анодом диода, а отрицательный вывод с катодом, то диод смещен в прямом направлении. В этом случае через диод идет ток, и омметр показывает низкое сопротивление. Если выводы омметра поменять местами, то диод будет смещен в обратном направлении, через него будет идти маленький ток, и омметр покажет высокое сопротивление.

Если сопротивление диода низкое в прямом и в обратном направлениях, то он, вероятно, закорочен. Если диод имеет высокое сопротивление и в прямом и в обратном направлениях, то в нем, вероятно, разорвана цепь.

Как германиевые, так и кремниевые диоды могут быть повреждены сильным нагреванием или высоким обратным напряжением. Производители указывают максимальный прямой ток, который может безопасно течь через диод, не перегревая его, а также максимальное обратное напряжение. Дело в том, что высокое обратное напряжение, приложенное к диоду, может создать сильный обратный ток, кото-

рый перегреет диод и приведет к его пробоя. Обратное напряжение, при котором наступает пробой, называется напряжением пробоя, или максимальным обратным напряжением.

## Стабилитроны

Для работы при напряжениях, превышающих напряжение пробоя диода, предназначены специальные диоды, которые называются *стабилитронами*. В этом случае область обратных напряжений, при которой наступает пробой, называется *областью стабилизации*.

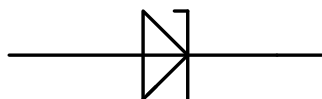
Когда обратное напряжение достаточно велико, чтобы вызвать пробой стабилитрона, через него течет высокий обратный ток. До наступления пробоя обратный ток невелик. После наступления пробоя обратный ток резко возрастает. Это происходит потому, что сопротивление стабилитрона уменьшается при увеличении обратного напряжения.

Стабилитроны выпускают с определенным напряжением пробоя, которое называют *напряжением стабилизации*. Напряжение пробоя стабилитрона определяется удельным сопротивлением диода. Оно в свою очередь зависит от техники легирования, использованной при его изготовлении. Паспортное напряжение пробоя - это обратное напряжение при токе стабилизации. Ток стабилизации несколько меньше максимального обратного тока диода. Напряжение пробоя обычно указывается с точностью от 1 до 20%.

Способность стабилитрона рассеивать мощность уменьшается при увеличении температуры. Следовательно, рассеиваемая стабилитроном мощность указывается для определенной температуры. Величина рассеиваемой мощности также зависит от длины выводов: чем короче выводы, тем большая мощность рассеивается на диоде. Производитель указывает также коэффициент отклонения для определения рассеиваемой мощности при других температурах. Например, коэффициент отклонения 6 милливатт на градус Цельсия означает, что рассеиваемая диодом мощность уменьшается на 6 милливатт при повышении температуры на один градус.

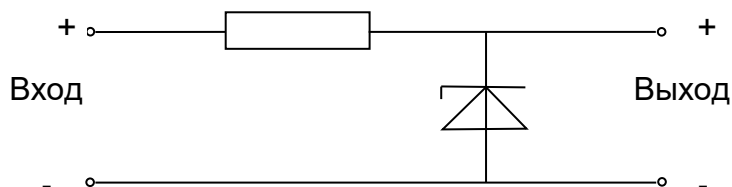
Корпуса стабилитронов имеют такую же форму, как и у обычных диодов.

Маломощные стабилитроны выпускаются в корпусах из стекла или эпоксидной смолы, а мощные - в металлическом корпусе с винтом. Схематическое обозначение стабилитрона показано на рисунке.



Основными параметрами стабилитронов являются максимальный ток стабилизации, обратный ток и обратное напряжение. Максимальный ток стабилизации - это максимальный обратный ток, который может течь через стабилитрон без превышения рассеиваемой мощности, указанной производителем. Обратный ток - это ток утечки перед началом пробоя. Он указывается при некотором обратном напряжении, равном примерно 80% напряжения стабилизации.

Стабилитроны используют для стабилизации напряжения, например, для компенсации изменения напряжения линии питания или изменения резистивной нагрузки, питаемой постоянным током.



На рисунке показана типичная регулирующая цепь со стабилитроном. Стабилитрон соединен последовательно с резистором R. Резистор обуславливает прохождение через стабилитрон такого тока, чтобы он работал в режиме пробоя (стабилизации). Входное постоянное напряжение должно быть выше напряжения стабилизации стабилитрона. Падение

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

Описанная цепь выдает постоянное напряжение. При расчете цепи должны учитываться как ток, так и напряжение. Внешняя нагрузка потребляет ток, который определяется ее сопротивлением и выходным напряжением. Через резистор, включенный последовательно со стабилитроном, протекает и ток нагрузки, и ток стабилизации. Этот резистор должен быть подобран таким образом, чтобы через стабилитрон шел ток стабилизации и он находился в области пробоя.

При увеличении резистивной нагрузки идущий через нее ток уменьшается, что должно вызвать увеличение падения напряжения на нагрузке. Но стабилитрон препятствует любому изменению напряжения. Сумма тока стабилизации и тока нагрузки через последовательно включенный резистор остается постоянной. Это обеспечивает постоянство падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Аналогично, когда ток через нагрузку увеличивается, ток стабилизации уменьшается, обеспечивая постоянство напряжения. Это позволяет цепи поддерживать выходное напряжение постоянным при колебаниях входного.

## Тиристоры

Тиристоры - это обширный класс полупроводниковых приборов, используемых для электронного переключения. Эти полупроводниковые устройства обладают двумя устойчивыми состояниями и имеют три или более  $p$ - $n$ -переходов. Тиристоры охвачены внутренней положительной обратной связью, позволяющей увеличивать амплитуду входного сигнала путем подачи на вход части выходного напряжения.

Тиристоры широко используются при управлении мощностью постоянного и переменного токов. Они применяются для включения и выключения мощности, подаваемой на нагрузку, а также для регулирования ее величины, например для управления освещенностью или скоростью вращения двигателя.

Тиристоры изготавливаются из кремния диффузионным или диффузионно-сплавным методом и состоят из четырех полупроводниковых слоев  $p$ -типа и  $n$ -типа, расположенных поочередно. Четыре слоя прилегают друг к другу, образуя три  $p$ - $n$ -перехода. Два крайних вывода - это анод и катод, а к одному из средних слоев может быть подключен управляющий электрод. Данный тиристор не содержит управляющего электрода, и управление его открыванием и закрыванием осуществляется путем изменения приложенного к нему напряжения. *Такие тиристоры называются динисторами.*

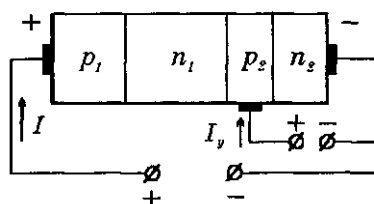
При указанной полярности приложенного к тиристорному напряжению, основная его часть придется на закрытый  $p$ - $n$ -переход, 2, тогда как переходы 1 и 3 окажутся открытыми. При этом дырки, переходящие из слоя  $p_1$  в слой  $p_2$ , частично рекомбинируют с электронами в слое  $n_1$ . Их нескомпенсированный заряд в слое  $p_2$  вызовет вторичную встречную инжекцию электронов из слоя  $n_2$ , и электроны из

слоя  $n_2$  пройдут через слой  $p_2$  в слой  $n_1$ , частично рекомбинируя с дырками в слое  $p_2$ . Они вызовут вторичную встречную инжекцию дырок из слоя  $p_1$ . Эти явления создадут необходимые условия для развития лавинного процесса. Однако лавинный процесс начнется только при некотором достаточно большом внешнем напряжении  $U_{пер}$ . При этом тиристор перейдет из точки  $A$  вольтамперной характеристики на участок  $BC$ , и ток через него резко возрастет. При этом благодаря обилию зарядов в переходе 2 напряжение на нем сильно упадет (примерно до 1 В), и энергия, выделяемая в этом переходе, окажется недостаточной для развития необратимых процессов в структуре прибора.

Если ток через тиристор сильно уменьшить до некоторого значения  $I_{уд}$  (тока удержания), то тиристор закроется и перейдет в состояние с низкой проводимостью. Если к тиристору приложить напряжение обратной полярности, то его вольтамперная характеристика будет такой же, как у полупроводникового диода.

Рассмотренный неуправляемый тиристор имеет существенный недостаток: его открывание и закрывание возможно лишь при больших изменениях внешнего напряжения и тока.

Значительно чаще используют тиристоры, которые имеют управляющий электрод.

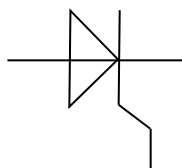


Анод должен иметь положительный потенциал по отношению к катоду, а управляющий электрод оставаться свободным,  $n-p-n$  транзистор не пропускает ток, поскольку на его эмиттерный переход не подано напряжение прямого смещения (обеспечиваемое коллектором  $p-n-p$  транзистора или управляющим сигналом). А поскольку  $n-p-n$  транзистор не пропускает ток,  $p-n-p$  транзистор также заперт (так как коллектор  $p-n-p$  транзистора обеспечивает смещение на базе  $p-n-p$  транзистора). При этих условиях ток от анода к катоду не течет.

Если на управляющий электрод подать положительное напряжение по отношению к катоду, эмиттерный переход  $p-n-p$  транзистора будет смещен в прямом направлении и  $p-n-p$  транзистор откроется. Это позволит течь току базы  $p-n-p$  транзистора и откроет его. Коллекторный ток  $p-n-p$  транзистора является током базы  $n-p-n$  транзистора. Оба транзистора будут поддерживать друг друга в проводящем состоянии, позволяя току течь непрерывно от анода к катоду. Процесс будет происходить даже в том случае, если управляющее напряжение приложено на короткий момент времени. Кратковременная подача управляющего напряжения переключает цепь в проводящее состояние, и она продолжает проводить ток даже при отключении управляющего напряжения. Ток анода ограничен только внешней цепью. Для переключения тиристора в непроводящее состояние необходимо уменьшить напряжение анод-катод до нуля. Это обеспечит запирающие обоих транзисторов, и они останутся запертыми до тех пор, пока опять не будет подано управляющее напряжение.

Тиристор включается положительным управляющим напряжением и выключается уменьшением напряжения анод-катод до нуля. Когда тиристор включен и проводит ток от анода к катоду, его проводимость в прямом направлении достаточно велика. Если изменить полярность напряжения катод-анод, то через цепь, проводимость которой резко уменьшится, будет течь только маленький ток утечки.

Схематическое обозначение управляемого тиристора изображено на рисунке.





Тиристоры используются главным образом для управления подачей мощности постоянного и переменного токов на различные типы нагрузок. Они могут быть использованы в качестве переключателей для включения и выключения цепей. Они также могут быть использованы для плавной регулировки мощности, подаваемой на нагрузку. При использовании тиристоров малый ток управляющего электрода может управлять большим током нагрузки.

Когда тиристор используется в цепи постоянного тока, не существует простого метода его выключения без снятия напряжения с нагрузки.

Когда тиристор используется в цепи переменного тока, он способен проводить ток только в течение половины каждого периода переменного тока, а именно в течение той половины, когда потенциал анода положителен по отношению к катоду. Когда ток управляющего электрода приложен постоянно, тиристор проводит постоянно. Когда ток управляющего электрода отсутствует в течение половины периода, тиристор выключается и остается выключенным до тех пор, пока ток управляющего электрода не будет подан снова. Необходимо заметить, что при этом на нагрузку подается только половина мощности. Тиристор можно использовать для управления током в течение обоих полупериодов каждого цикла, если выпрямить переменный управляющий ток перед подачей на тиристор.

Симистор - это двунаправленный управляемый тиристор. Он имеет такие же переключательные характеристики, как и обычный тиристор, но проводит переменный ток в обоих направлениях. Симистор эквивалентен двум обычным тиристорам, включенным встречно-параллельно.

Поскольку симистор может управлять током, текущим в любом направлении, он широко используется для управления подачей переменного тока на различные типы нагрузок. Он может быть включен подачей тока на управляющий электрод и выключен уменьшением рабочего тока до величины, меньшей уровня удержания. На рис.16 показаны упрощенная схема конструкции симистора и его эквивалентная схема.

Симистор является четырехслойным устройством типа  $n-p-n-p$ , соединенным параллельно с устройством типа  $p-n-p-n$  и рассчитанным на управление током, текущим через управляющий электрод. Выводы входа и выхода обозначаются  $MT_1$  и  $MT_2$ . Эти выводы соединены с  $p-n$ -переходами на противоположных концах устройства. Вывод  $MT_1$  представляет собой опорную точку, относительно которой измеряются напряжение и ток на управляющем электроде. Управляющий электрод соединен с  $p-n$ -переходом на том же конце устройства, что и  $MT_1$ . От вывода  $MT_1$  до вывода  $MT_2$  сигнал должен пройти через последовательность слоев  $n-p-n-p$  или  $p-n-p-n$ .

Симисторы могут быть использованы в качестве переключателей переменного тока или для управления величиной мощности переменного тока, подаваемой в нагрузку. Симисторы способны передать в нагрузку полную мощность. Когда симистор используется для регулировки величины мощности подаваемой в нагрузку, необходимо специальное запускаящее устройство для того, чтобы обеспечить работу симистора в течение заданного промежутка времени. Запускающее устройство необходимо потому, что симистор имеет неодинаковую чувствительность к токам управляющего электрода, текущим в противоположных направлениях.

По сравнению с обычными тиристорами симисторы обладают рядом недостатков. Симисторы могут управлять токами не более 25 А, тогда как обычные тиристоры могут управлять токами до 1400 А.

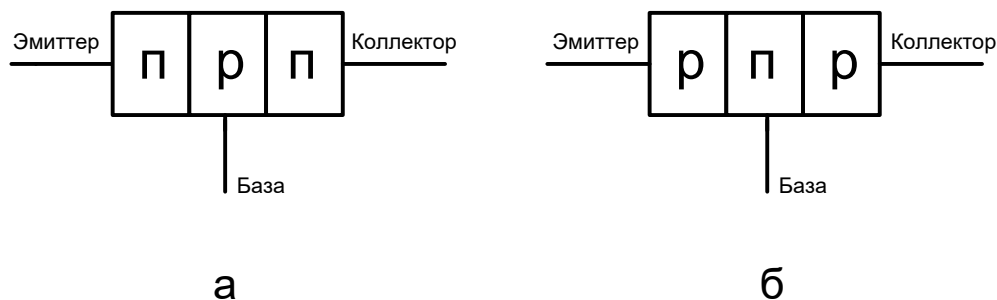
Максимальное напряжение для симисторов - 500 В, а для обычных тиристоров - 2 600 В. Симисторы рассчитаны на работу при низких частотах (от 50 до 400 Гц), тогда как обычные тиристоры могут работать на частотах до 30 000 Гц. Симисторы также имеют трудности при переключении мощности на индуктивной нагрузке.

## **Биполярные транзисторы**

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

Наверное, ни одно из открытий современной физики не повлияло столь непосредственно на жизнь людей, как транзистор. Благодаря своим преимуществам перед электронной лампой

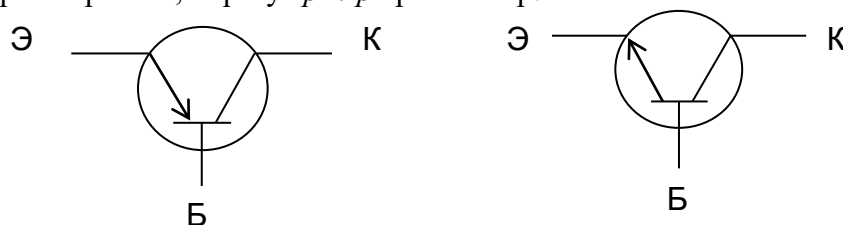
транзистор совершил революцию в области электронных средств связи и обеспечил создание и широкое использование быстродействующих электронно-вычислительных машин с большим объемом памяти. Наиболее очевидные преимущества транзистора: он имеет малый объем; работая при меньших значениях напряжений, не требует громоздких источников питания; у него отсутствует нагреваемый катод, требующий времени на разогрев и отвод тепла. И, наконец, еще одно важное свойство транзистора, которое особенно ценно при его применении в вычислительной технике - это малое количество потребляемой энергии в расчете на один бит информации. По некоторым оценкам, эта энергия сравнима с энергией, используемой нейронами головного мозга.



*Транзистор* - это устройство, состоящее из двух *p-n* переходов, которое используется для управления электрическим током. Изменяя величину напряжения, приложенного к его электродам, можно управлять величиной тока через транзистор и использовать его для усиления, генерации или переключения.

Транзистор, как и диод, может быть изготовлен из германия или кремния, но кремний более популярен. Биполярный транзистор состоит из трех областей с чередующимся типом проводимости (по сравнению с двумя у диода). Эти три области могут быть расположены двумя способами.

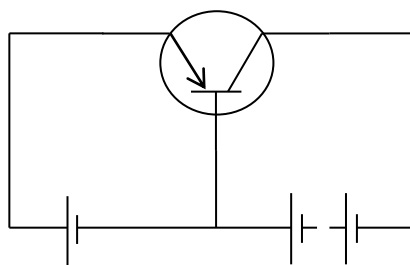
В первом случае материал *p*-типа расположен между двумя слоями материала *n*-типа, образуя *n-p-n* транзистор. Во втором случае слой материала *n*-типа расположен между двумя слоями материала *p*-типа, образуя *p-n-p* транзистор.



У транзисторов обоих типов средняя область называется базой, а внешние области называются эмиттером и коллектором. Схематические обозначения транзисторов обоих типов показаны на рисунке.

Транзистор может использоваться различными способами, но основной его функцией является усиление сигналов.

Для того чтобы области эмиттера, базы и коллектора взаимодействовали должным образом, к транзистору должно быть правильно приложено напряжение. Напряжение, приложенное от внешнего источника эд.с. к *p-n*-переходу, называется смещением. При прямом смещении (плюс подан на *p*-область, а минус - на *n*-область), *p-n*-переход открыт и ток через него (прямой ток) может достигать больших значений. При обратном смещении *p-n*-переход закрыт, и ток через него (обратный ток) очень мал. В правильно смещенном транзисторе эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный переход - в обратном.



Смещение в прямом направлении заставляет электроны течь с эмиттера p-n-p транзистора (напомним, что направление тока противоположно направлению движения электронов). При прямом смещении потенциал базы положителен по отношению к эмиттеру. Положительный потенциал притягивает электроны, создавая поток электронов из эмиттера. На электроны, притянутые базой, начинает влиять положительный потенциал, приложенный к коллектору. Большинство электронов притягивается к коллектору и к положительному выводу источника тока, создающего обратное смещение. Небольшая часть электронов поглощается областью базы и поддерживает небольшой поток электронов от базы. Для того чтобы это имело место, область базы должна быть предельно тонкой.

В правильно смещенном p-n-p транзисторе выводы источников тока необходимо поменять местами, и направление потока электронов изменится на противоположное.

Как и в диоде, в транзисторе существует потенциальный барьер. В транзисторе потенциальный барьер возникает у перехода эмиттер-база. Для того чтобы электроны могли проходить через этот переход, внешнее смещение должно превышать это напряжение. Величина внутреннего потенциального барьера определяется типом используемого полупроводникового материала. Как и в диодах, величина внутреннего потенциального барьера составляет 0,3 В для германиевых транзисторов и 0,7 В для кремниевых.

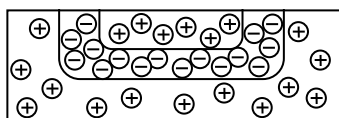
К переходу коллектор-база транзистора также должен быть приложен положительный потенциал, достаточно высокий для того, чтобы притягивать большинство электронов, поставляемых эмиттером. Напряжение обратного смещения, приложенное к переходу коллектор-база, обычно намного выше напряжения прямого смещения, приложенного к переходу эмиттер-база, снабжающего электронами этот источник более высокого напряжения.

## Полевые транзисторы

### Полевые транзисторы с р-п-переходом

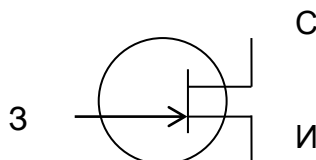
Полевой транзистор с р-п-переходом - это устройство, управляемое напряжением, в котором работают только основные носители. Эти транзисторы состоят из полупроводниковых материалов n- и p-типа и способны усиливать электронные сигналы, но их конструкция отличается от конструкции биполярных транзисторов и их работа основана на других принципах. Для того чтобы понять, как работают полевые транзисторы с р-п-переходом, необходимо знать их конструкцию.

Базой таких транзисторов является подложка, изготовленная из слаболегированного полупроводникового материала. Подложка может быть из материала n- или p-типа. р-п-переход в подложке изготавливается как методом диффузии, так и методом выращивания. Важную роль играет форма р-п-перехода.



U-образная область называется каналом, она утоплена по отношению к верхней поверхности подложки. Когда канал сделан из материала n-типа, в подложке из материала p-типа образуется полевой транзистор с каналом n-типа. Когда канал сделан из материала p-типа, в подложке из материала n-типа образуется полевой транзистор с каналом p-типа.

Полевой транзистор с р-п-переходом имеет три вывода. Один вывод соединен с подложкой и образует затвор (З). Выводы, соединенные с концами канала, образуют исток (И) и сток (С). Неважно, какой из выводов соединен со стоком, а какой с истоком, так как канал симметричен. Схематические обозначения для полевых транзисторов с р-каналом и с n-каналом показаны на рисунке.



### Полевые транзисторы с изолированным затвором обедненного типа

**Полевые** транзисторы с изолированным затвором не используют р-п-переход. Вместо него применяется металлический затвор, который электрически изолирован от полупроводникового канала тонким слоем окисла. Это устройство известно как полевой транзистор на основе структуры металл-окисел-полупроводник (**МОП транзистор**).

Существуют два типа таких транзисторов: устройства n-типа с n-каналами и устройства p-типа с p-каналами. Устройства га-типа с га-каналами называются устройствами обедненного типа, так как они проводят ток при нулевом напряжении на затворе. В устройствах обедненного типа электроны являются носителями тока до тех пор, пока их количество не уменьшится благодаря приложенному к затвору смещению, так как при подаче на затвор отрицательного смещения ток стока уменьшается. Устройства p-типа с p-каналами называются устройствами обогащенного типа. В устройствах обогащенного типа поток электронов обычно отсутствует до тех пор, пока на затвор не подано напряжение смещения. Хотя полевые транзисторы обедненного типа с p-каналом и транзисторы обогащенного типа с га-каналом и существуют, они обычно не используются.

### Оптоэлектронные устройства

Полупроводники вообще, и полупроводниковые диоды в частности, широко используются в опто-электронике в качестве устройств, взаимодействующих с электромагнитным излучением (световой энергией) в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах.

Существуют три типа устройств, которые взаимодействуют со светом:

- устройства для регистрации света,
- устройства для преобразования света,
- светоизлучающие устройства.

Полупроводниковый материал и использованная

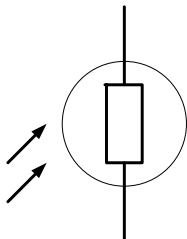
техника легирования определяют длину световой волны для каждого конкретного устройства.

### Светочувствительные устройства

Старейшим из оптоэлектронных устройств является фоторезистор. Его внутреннее сопротивление изменяется при изменении интенсивности света. Изменение сопротивления не пропорционально интенсивности света. Фоторезисторы изготавливают из светочувствительных материалов, таких как сульфид кадмия (CdS) или селенид кадмия (CdSe). Типичный фоторезистор устроен следующим образом. Светочувствительный материал нанесен на изолирующую подложку из стекла или керамики в виде S-образной фигуры для увеличения длины фоторезистора. Все это помещено в корпус с окошком, пропускающим свет. Его сопротивление может изменяться от нескольких сотен МОм до нескольких сотен Ом. Фоторезисторы применяются при низких интенсивностях света. Они

могут выдерживать высокие рабочие напряжения до 200-300 В при малом потреблении мощности до 300 мВт. Недостатком фоторезисторов является медленный отклик на изменения света.

На рисунке показано схематическое обозначение фоторезистора. Стрелки показывают, что это - светочувствительное устройство.



Фоторезисторы используются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, в охранных датчиках, в устройствах автоматического открывания дверей, в различном тестирующем оборудовании для измерения интенсивности света.

Фотогальванический элемент (солнечный элемент) преобразует световую энергию непосредственно в электрическую энергию. Батареи солнечных элементов применяются главным образом для преобразования солнечной энергии в электрическую.

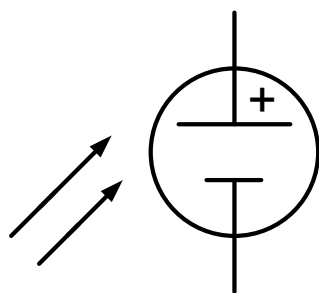
Солнечный элемент - это устройство на основе р-п-перехода, сделанное из полупроводниковых материалов. В большинстве случаев их делают из кремния. На металлическую подложку, служащую одним из контактов, наносятся слои полупроводника р-типа и п-типа, которые образуют р-п-переход. Сверху наносится металлическая пленка, служащая вторым контактом.

Свет, попадая на поверхность солнечного элемента, передает большую часть своей энергии атомам полупроводникового материала. Световая энергия выбивает валентные электроны с их орбит, создавая свободные электроны. Вблизи обедненного слоя электроны притягиваются материалом п-типа, создавая небольшое напряжение вдоль р-п-перехода. При увеличении интенсивности света это напряжение увеличивается. Однако не вся световая энергия, попадающая в солнечный элемент, создает свободные электроны. В действительности солнечный элемент - это довольно неэффективное устройство с максимальной эффективностью порядка 15%.

Солнечные элементы дают низкое выходное напряжение порядка 0,45 В при токе 50 мА. Их необходимо соединять в последовательно-параллельные цепи для того, чтобы получить от них желаемое выходное напряжение и ток.

Солнечные элементы применяются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, для декодирования звуковой дорожки в кинопроекторах и для зарядки батарей на космических спутниках.

Схематическое обозначение солнечного элемента показано на рисунке. Положительный вывод обозначается знаком плюс (+).



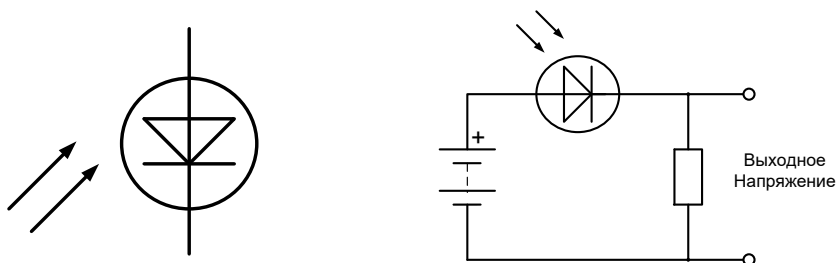
Фотодиод также использует р-п-переход, и его устройство подобно устройству солнечного элемента. Он используется так же, как и фотосопротивление, в качестве резистора, сопротивление которого меняется при освещении. Фотодиоды - это полупроводниковые устройства, которые изготавливаются главным образом из кремния. Их делают двумя способами. Первый способ - это простой р-п-переход. При другом способе между слоями р-типа и д-типа вставляется слой нелегированного полупроводника, образуя р-і-п фотодиод.

Принципы работы фотодиода с р-п-переходом такие же, как у солнечного элемента, за исключением того, что он используется для управления током, а не для создания его. К фотодиоду прикладывается обратное напряжение смещения, формирующее широкий обедненный слой. Когда свет попадает в фотодиод, он проникает в обедненный слой и создает там свободные электроны. Электроны притягиваются к положительному выводу источника смещения. Через фотодиод в обратном направлении течет малый ток. При увеличении светового потока возрастает число свободных электронов, что приводит к увеличению тока.

р-і-п фотодиод имеет слой нелегированного материала между областями р и п. Это эффективно расширяет обедненный слой. Более широкий обедненный слой позволяет р-і-п фотодиоду реагировать на свет с более низкими частотами. Свет с более низкими частотами имеет меньшую энергию и, следовательно, должен глубже проникать в обедненный слой перед созданием свободных электронов. Более широкий обедненный слой дает больше возможностей для создания свободных электронов, р-і-п фотодиоды являются более эффективными во всех отношениях.

Благодаря слою нелегированного материала, р-і-п фотодиоды имеют более низкую собственную емкость. Это обеспечивает более быстрый отклик на изменения интенсивности света. Кроме того, изменение их обратного тока в зависимости от интенсивности является более линейным.

Преимуществом фотодиода является его быстрый отклик на изменения интенсивности света, самый быстрый из всех фоточувствительных устройств. Недостатком является низкая выходная мощность по сравнению с другими фоточувствительными устройствами.



Фототранзистор устроен подобно другим транзисторам с двумя р-п-переходами. Фототранзисторы могут давать больший выходной ток, чем фотодиоды. Их отклик на изменения интенсивности света не так быстр, как у фотодиодов. В данном случае за увеличение выходного тока приходится жертвовать скоростью отклика.

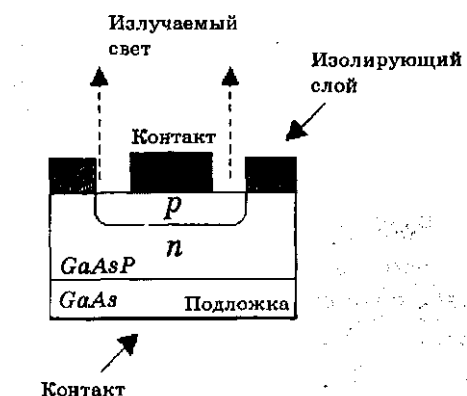
Фототранзисторы применяются для измерения скорости вращения различных устройств (фототахометры), для управления фотографической экспозицией, в противопожарных датчиках, в счетчиках предметов и в механических позиционерах.

## Светоизлучающие устройства

Светоизлучающие устройства излучают свет при прохождении через них тока, преобразуя электрическую энергию в световую. Светоизлучающий диод (светодиод) - это наиболее распространенное полупроводниковое светоизлучающее устройство. Будучи полупроводниковым устройством, он имеет неограниченный срок службы ввиду отсутствия высокотемпературного нагрева, что служит причиной выхода из строя обычных ламп.

Любой р-п-переход может испускать свет, когда через него проходит ток. Свет возникает, когда свободные электроны рекомбинируют с дырками и лишняя энергия освобождается в виде света. Частота испускаемого света определяется типом полупроводникового материала, использованного при изготовлении диода. Обычные диоды не излучают свет потому, что они упакованы в непрозрачные корпуса.

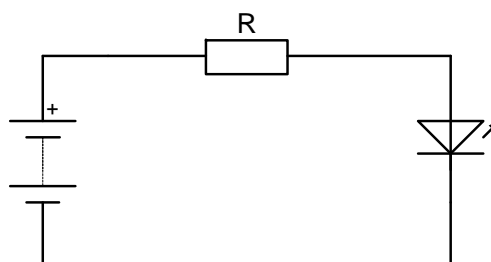
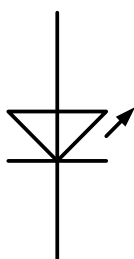
Светодиоды - это просто диоды с р-п-переходом, которые излучают свет при прохождении через них тока. Этот свет виден потому, что светодиоды упакованы в полупрозрачный материал. Частота излучаемого света зависит от материала, использованного при изготовлении светодиода. Арсенид галлия (GaAs) излучает свет в инфракрасном диапазоне, который не воспринимается человеческим глазом. Арсенид-фосфид галлия излучает видимый красный свет. Изменяя содержание фосфора, можно получить светодиоды, излучающие свет различной частоты.

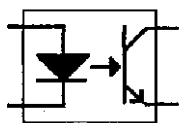


После изготовления светодиод помещается в корпус, который рассчитан на максимальное пропускание света. Многие светодиоды содержат линзы, которые собирают свет и увеличивают его интенсивность. Корпус светодиода может также служить светофильтром для того, чтобы обеспечить излучение света определенной частоты.

Для того чтобы светодиод излучал свет, на него должно быть подано прямое смещающее напряжение, превышающее 1,2 В. Так как светодиод легко может быть поврежден большим током или напряжением, последовательно с ним включается резистор для ограничения тока.

Схематическое обозначение светодиода показано на рисунке, а также изображена схема включения светодиода. Включенный последовательно резистор используется для ограничения прямого тока.





Сборки светодиодов применяются для изготовления широко распространенных семисегментных индикаторов, используемых для отображения цифр.

Оба устройства размещены в одном корпусе. Они связаны световым лучом, излучаемым светодиодом. Сигнал, поступающий на светодиод, может меняться, что в свою очередь изменяет интенсивность излучаемого света. Фототранзистор преобразует изменения света опять в электрическую энергию. Оптопара позволяет передавать сигнал от одной цепи к другой, обеспечивая высокую степень электрической изоляции их друг от друга.

### **Интегральные микросхемы**

Транзисторы и другие полупроводниковые устройства благодаря их малым размерам и энергопотреблению сделали возможным уменьшение размеров электронных цепей. Следующим шагом в миниатюризации электронных устройств стали интегральные микросхемы, содержащие целые цепи. Целью разработки интегральных микросхем является получение устройства, выполняющего определенную функцию (например, усиление или переключение) и устраняющего разрыв между отдельными компонентами и цепями.

Интегральная микросхема (ИС) - это законченная электронная цепь в корпусе не большем, чем стандартный маломощный транзистор. Цепь состоит из диодов, транзисторов, резисторов и конденсаторов. ИС производятся по такой же технологии и из таких же материалов, которые используются при производстве транзисторов и других полупроводниковых устройств.

Наиболее очевидным преимуществом ИС является ее малый размер. Она состоит из кристалла полупроводникового материала, размером примерно в один квадратный сантиметр. Благодаря малым размерам ИС находят широкое применение в военных и космических программах. Использование ИС превратило калькулятор из настольного в ручной инструмент, а компьютерные системы, которые раньше занимали целые комнаты, превратились в портативные модели.

Вследствие малых размеров ИС потребляют меньшую мощность и работают с более высокой скоростью, чем стандартные транзисторные цепи, так как благодаря прямой связи внутренних компонент уменьшается время перемещения электронов.

ИС более надежны, чем непосредственно связанные транзисторные цепи, поскольку в них все внутренние компоненты соединены непрерывно. Все эти компоненты сформированы одновременно, что уменьшает вероятность ошибки. После того как ИС сформирована, она проходит предварительное тестирование перед окончательной сборкой.

Производство многих типов ИС унифицировано, что приводит к существенному снижению их стоимости. Производители предлагают полные и стандартные линии микросхем.

ИС уменьшают количество деталей, необходимых для конструирования электронного оборудования. Это уменьшает накладные расходы производителя, что в дальнейшем снижает цену электронного оборудования.

ИС имеют также некоторые недостатки. Они не могут работать при больших значениях токов и напряжений. Большие токи создают избыточное тепло, повреждающее устройство. Высокие напряжения пробивают изоляцию между различными внутренними компонентами.



Большинство ИС являются маломощными устройствами, питающимися напряжением от 5 до 15 В и потребляющими ток, измеряющийся миллиамперами) Это приводит к потреблению мощности, меньшей, чем 1 Вт.

ИС содержат компоненты только четырех типов: диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы. Диоды и транзисторы - самые легкие для изготовления компоненты и самые миниатюрные. Резисторы более трудны в изготовлении, к тому же чем больше сопротивление резистора, тем больше он по размерам. Конденсаторы занимают больше места, чем резисторы, и также увеличиваются в размере по мере увеличения емкости.

ИС не могут быть отремонтированы. Это обусловлено тем, что внутренние компоненты не могут быть отделены друг от друга. Следовательно, проблема решается заменой микросхемы, а не заменой отдельных компонентов. Преимущество этого "недостатка" состоит в том, что он сильно упрощает эксплуатацию систем высокой сложности и уменьшает время, необходимое персоналу для сервисного обслуживания оборудования.

Если все факторы собрать вместе, то преимущества перевесят недостатки. ИС уменьшают размеры, вес и стоимость электронного оборудования, одновременно увеличивая его надежность. По мере пояснения микросхем они стали способны выполнять более широкий круг операций.

ИС классифицируются согласно способу их изготовления. Наиболее широко используются следующие способы изготовления: монолитный, тонкопленочный, толстопленочный и гибридный.

Монолитные ИС изготавливаются так же, как и транзисторы, но включают несколько дополнительных шагов. Изготовление ИС начинается с круглой кремниевой пластины диаметром 8-10 см и около 0,25 мм толщиной. Эта пластина служит основой (подложкой), на которой формируется ИС. На одной подложке одновременно формируется до нескольких сотен ИС. Обычно все микросхемы на подложке одинаковы.

После изготовления ИС тестируются прямо на подложке. После тестирования подложка разрезается на отдельные чипы. Каждый чип представляет собой одну ИС, содержащую все компоненты и соединения между ними. Каждый чип, который проходит тест контроля качества, монтируется в корпус. Несмотря на то, что одновременно изготавливается большое количество ИС, далеко не все из них оказываются пригодными для использования. Эффективность производства характеризуют таким параметром, как выход. Выход - максимальное число пригодных ИС по сравнению с полным числом изготовленных.

Тонкопленочные ИС формируются на поверхности изолирующей подложки из стекла или керамики, обычно размером около 5 см<sup>2</sup>. Компоненты (резисторы и конденсаторы) формируются с помощью очень тонких пленок металлов и окислов, наносимых на подложку. После этого наносятся тонкие полоски металла для соединения компонентов. Диоды и транзисторы формируются как отдельные полупроводниковые устройства и подсоединяются в соответствующих местах. Резисторы формируются нанесением тантала или никрома на поверхность подложки в виде тонкой пленки толщиной 0,0025 мм. Величина резистора определяется длиной, шириной и толщиной каждой полоски. Проводники формируются из металла с низким сопротивлением, такого как золото, платина или алюминий. С помощью этого процесса можно создать резистор с точностью  $\pm 0,1\%$ .

Тонкопленочные конденсаторы состоят из двух тонких слоев металла, разделенных тонким слоем диэлектрика. Металлический слой нанесен на подложку. После этого на металл наносится слой окисла, образуя диэлектрическую прокладку конденсатора. Она формируется обычно такими изолирующими материалами, как окись тантала, окись кремния или окись алюминия. Верхняя часть конденсатора создается из золота, тантала или платины, нанесенных на диэлектрик. Полученное значение емкости конденсатора зависит от площади электродов, а также от толщины и типа диэлектрика.

Чипы диодов и транзисторов формируются с помощью монолитной техники и устанавливаются на подложке. После этого они электрически соединяются с тонкопленочной цепью с помощью очень тонких проводников.

Материалы, используемые для компонентов и проводников, наносятся на подложку методом испарения в вакууме или методом напыления. В процессе испарения в вакууме

материал достигает предварительно нагретой подложки, помещенной в вакуум, и конденсируются на ней, образуя тонкую пленку.

Процесс напыления происходит в газонаполненной камере при высоком напряжении. Высокое напряжение ионизирует газ, и материал, который должен быть напылен, бомбардируется ионами. Ионы выбивают атомы из напыляемого материала, которые затем дрейфуют по направлению к подложке, где и осаждаются в виде тонкой пленки. Для осаждения пленки нужной формы и в нужном месте используется маска. Другой метод состоит в покрытии всей подложки полностью и вырезании или вытравливании ненужных участков.

При толстопленочном методе резисторы, конденсаторы и проводники формируются на подложке методом трафаретной печати: над подложкой размещается экран из тонкой проволоки, и металлизированные чернила делают сквозь него отпечаток. Экран действует как маска. Подложка и чернила после того нагреваются до температуры свыше 600 °C для затвердевания чернил.

Толстопленочные конденсаторы имеют небольшие значения емкости (порядка нескольких пФ). В тех случаях, когда требуются более высокие значения емкости, используются дискретные конденсаторы. Толстопленочные компоненты имеют толщину 0,025 мм. Толстопленочные компоненты похожи на соответствующие дискретные компоненты.

Гибридные ИС формируются с использованием монокристаллических, тонкопленочных, толстопленочных и дискретных компонентов. Это позволяет получать цепи высокой степени сложности, используя монокристаллические цепи, и в то же самое время использовать преимущества высокой точности и малых допусков, которые дает пленочная техника. Дискретные компоненты используются потому, что они могут работать при относительно высокой мощности.

ИС упаковываются в корпуса, рассчитанные на защиту их от влаги, пыли и других загрязнений. Наиболее популярным является корпус с двухрядным расположением выводов (DIP). Он производится нескольких размеров для того, чтобы соответствовать различным размерам ИС: микросхемам малой и средней степени интеграции, микросхемам большой степени интеграции (БИС) и сверхбольшим интегральным микросхемам (СБИС). Корпуса изготавливаются либо из керамики, либо из пластмассы. Пластмассовые корпуса дешевле и пригодны для большинства применений при рабочей температуре от 0 °C до 70 °C. Микросхемы в керамических корпусах дороже, но обеспечивают лучшую защиту от влаги и загрязнений. Кроме того, они работают в более широком диапазоне температур (от -55 °C до +125 °C). Микросхемы в керамических корпусах рекомендуются для использования в военной и аэрокосмической технике, а также в некоторых отраслях промышленности.

Маленький 8-выводный корпус типа DIP используется для устройств с минимальным количеством входов и выходов. В нем располагаются главным образом монокристаллические интегральные микросхемы.

Плоские корпуса меньше и тоньше, чем корпуса типа DIP, и они используются в случаях, когда пространство ограничено. Они изготавливаются из металла или керамики и работают в диапазоне температур от -55 °C до +125 °C.

После того как интегральная микросхема заключена в корпус, ее тестируют, чтобы проверить, удовлетворяет ли она всем требуемым параметрам. Тестирование проводится в широком диапазоне температур.

## **Основы электроники**

### **Основные схемы выпрямления переменного тока**

Одним из главных применений полупроводниковых диодов является выпрямление переменного тока. Выпрямитель служит для преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямленное напряжение еще содержит переменные составляющие, которые называются пульсациями. От пульсаций избавляются с помощью сглаживающих фильтров.

Для обеспечения неизменной величины выходного напряжения используется стабилизатор напряжения. Стабилизатор напряжения удерживает выходное напряжение на постоянном уровне.

Основными параметрами, характеризующими выпрямители, являются: номинальное среднее выпрямленное напряжение  $U_0$ , номинальный средний выпрямленный ток  $I_0$  и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения  $k_p$ .

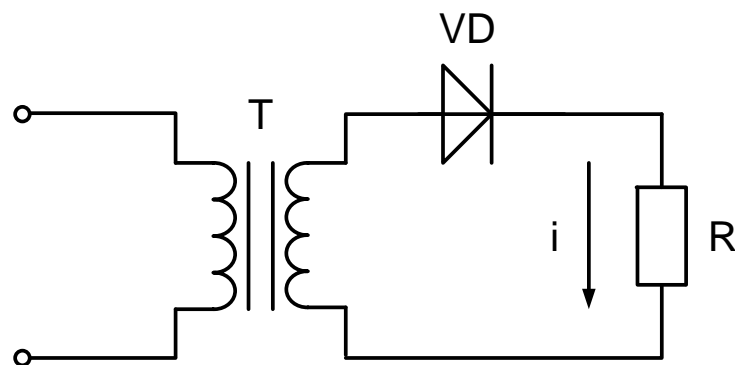
Коэффициентом пульсаций  $k_p$  называется отношение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения.

Основными параметрами, характеризующими диоды в выпрямителях, являются: среднее значение прямого тока, максимальное значение обратного напряжения и рассеиваемая мощность.

Трансформаторы, работающие в выпрямителях, характеризуются действующими значениями токов и напряжений первичной и вторичной обмоток и номинальной мощностью.

Наиболее распространены три основные схемы выпрямителей: однополупериодная, двухполупериодная и мостовая.

Схема однополупериодного выпрямителя изображена на рис. 43, где Т - трансформатор, VD - полупроводниковый диод, а R - нагрузка.



Когда на верхнюю часть вторичной обмотки подан положительный полупериод переменного тока, на диод подается прямое напряжение, и он пропускает его, а когда отрицательный, то диод заперт. Через нагрузку протекает пульсирующий прерывистый ток.

Сопротивление  $R_d$  диода непостоянно: оно определяется крутизной вольтамперной характеристики в каждой точке. Однако при включении последовательно с диодом нагрузки  $R_n$ , сопротивление этой цепи становится равным  $R_d + R_n$ , и характеристику можно считать линейной (динамическая характеристика).

Среднее за период значение тока, выпрямленного однополупериодным выпрямителем - где  $I$  - амплитуда тока, а среднее постоянное напряжение на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{U_m}{\pi} - I_0 R_d.$$

Без нагрузки ( $I_0 = 0$ ) напряжение на зажимах выпрямителя будет равно среднему за период значению положительной волны синусоиды:

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi} = 0,318 U_m = 0,45 U$$

где  $U$  - действующее значение переменного напряжения. При увеличении тока нагрузки напряжение на ней уменьшается на величину падения напряжения на диоде ( $I_0 R_d$ ).

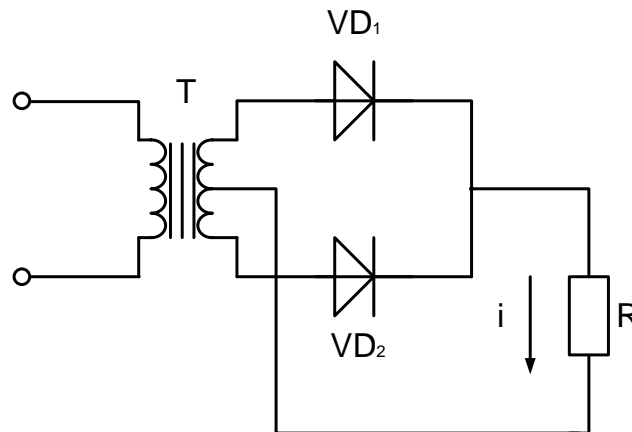
Во время отрицательного полупериода, когда диод закрыт, он находится под напряжением вторичной обмотки трансформатора, поэтому наибольшее обратное напряжение,

действующее на диод,

Мы видим, что обратное напряжение на диоде более чем в 3 раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке.

Однополупериодная схема очень редко используется в современных выпрямителях, поскольку вторичная обмотка трансформатора работает только половину периода, и поэтому габаритная мощность трансформатора должна превышать мощность выпрямленного тока примерно в 3 раза. Кроме того, выпрямленное напряжение имеет очень высокий коэффициент пульсаций, что затрудняет его сглаживание.

На рис. изображена двухполупериодная схема, где Т - трансформатор с отводом от середины вторичной обмотки, VD<sub>1</sub> и VD<sub>2</sub> - полупроводниковые диоды, а R - нагрузка.



Эту схему можно рассматривать как две самостоятельные однополупериодные схемы, имеющие общую нагрузку. В ней диоды VD<sub>1</sub> и VD<sub>2</sub> оказываются открытыми в разные половины периода переменного напряжения, и поэтому ток через нагрузку R протекает в обе половины периода, пульсируя с двойной частотой.

Каждый диод здесь работает как в однополупериодной схеме. Токи диодов складываются, поэтому постоянные составляющие тока и напряжения

$$I_o = \frac{2I_m}{\pi};$$
$$U_o = I_o R_n = \frac{2U_m}{\pi} - I_o R_n.$$

Из выражения следует, что в отсутствие нагрузки напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя вдвое больше напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя.

В двухполупериодной схеме максимальное обратное напряжение, действующее на каждый диод, находящийся в закрытом состоянии, равно сумме амплитуд напряжений обеих половин вторичной обмотки:

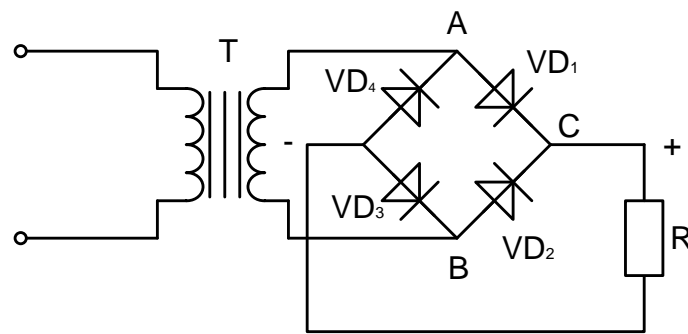
Ток, протекающий через каждый диод, равен:

$$I_n = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi I_o}{4} = 0,785 I_o$$

т. е. по сравнению с однополупериодной в двухполупериодной схеме через каждый диод протекает вдвое меньший ток. Коэффициент пульсаций в двухполупериодной схеме значительно ниже.

Двухполупериодная схема довольно часто используется на практике. Ее недостатками являются: необходимость отвода от середины вторичной обмотки трансформатора и

неполное использование вторичной обмотки трансформатора по напряжению. Эти недостатки устранены в мостовой схеме.



Диагональ АВ моста подключена к вторичной обмотке трансформатора, а диагональ CD - к нагрузке. Полярность напряжения на вторичной обмотке изменяется каждую половину периода, в результате чего при более высоком потенциале точки А (+) по сравнению с потенциалом точки В (-) ток проходит в течение полупериода  $A \rightarrow VD_1 \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow D \rightarrow VD_3 \rightarrow B \rightarrow A$ , а в следующий полупериод по пути  $B \rightarrow VD_2 \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow D \rightarrow VD_4 \rightarrow A \rightarrow B$ .

Таким образом, выпрямленный ток идет через нагрузку R, в течение всего периода переменного тока, поэтому мостовая схема является двухполупериодной.

В мостовой схеме выпрямленный ток и напряжение имеют такую же форму, как и в двухполупериодной схеме со средней точкой, поэтому согласно значению выпрямленного тока

$$I_o = \frac{2I_m}{\pi};$$

а выпрямленного напряжения согласно:

$$U_o = I_o R_n = \frac{2U_m}{\pi} - I_o R_n$$

Без нагрузки ( $I_o = 0$ ) напряжение на зажимах выпрямителя

$$U_o = \frac{2U_m}{\pi}$$

Особенностью мостовой схемы является отсутствие во вторичной обмотке трансформатора отвода от ее середины, поэтому для получения одного и того же значения выпрямленного напряжения по сравнению со схемой с отводом от середины вторичной обмотки в мостовой схеме требуется обмотка с вдвое меньшим числом витков. Вследствие этого обратное напряжение, действующее на каждый диод, в два раза меньше, чем в схеме с отводом от середины вторичной обмотки:

Действующее значение тока, протекающего через Диод,

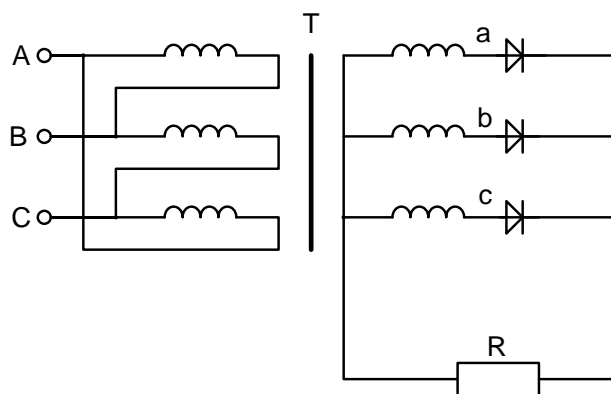
$$I = \frac{\pi I_o}{4} = 0,785 I_o$$

В мостовой схеме ток через каждый диод идет только в течение одного полупериода, тогда как через вторичную обмотку трансформатора - в течение всего периода. Действующее значение тока, протекающего через вторичную обмотку,

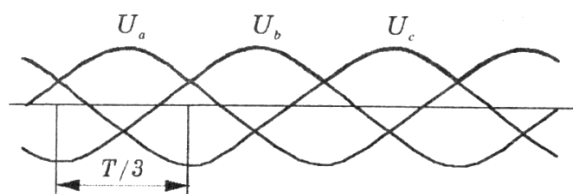
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_o}{2\sqrt{2}} = 1,11 I_o$$

Частота пульсаций и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения в мостовой схеме такие же, как и в схеме с отводом от середины вторичной обмотки.

Рассмотрим теперь трехфазные схемы выпрямления.



а



б

В этой схеме первичные обмотки трехфазного трансформатора соединяются звездой или треугольником, а вторичные - звездой, причем в каждую вторичную обмотку включено по диоду. В этом случае в каждый момент выпрямленный ток проходит только через тот диод, анод которого соединен с зажимом обмотки, имеющим наибольший положительный потенциал по отношению к нейтральной точке трансформатора. Поэтому выпрямленное напряжение будет изменяться по кривой, являющейся огибающей положительных полуволн фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора (рис.496). Переключение диодов происходит в моменты, соответствующие пересечению положительных полусинусоид напряжения. В нагрузке  $RH$  токи, проходящие через три диода, суммируются.

Среднее значение выпрямленного напряжения в этой схеме

$$U_o = 1,17U_{\text{ф}}$$

а среднее за период значение выпрямленного тока, проходящего через каждый диод,

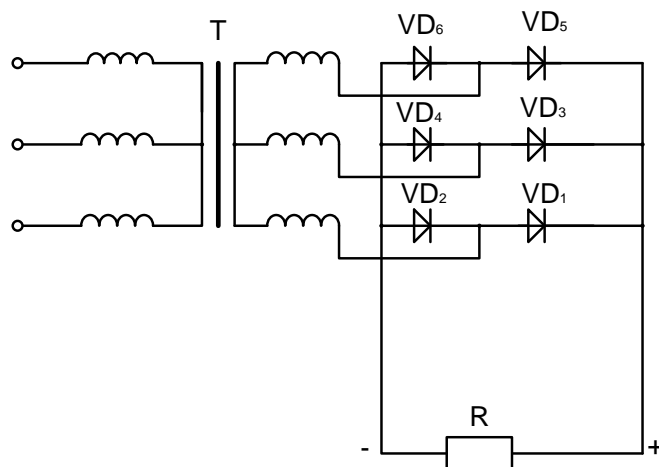
$$I_{\text{д}} = \frac{I_o}{3}$$

Обратное напряжение, действующее на каждый диод, равно амплитуде линейного напряжения, действующего в системе вторичных обмоток трансформатора, соединенных звездой, поскольку диоды подключены анодами к каждой из фаз, а катодами к другой фазе через открытый диод.

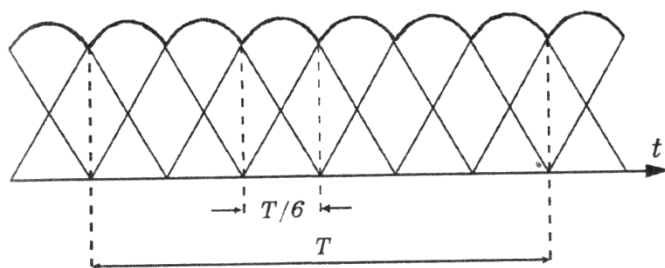
Существенным недостатком этой схемы является то, что проходящие только через вторичные обмотки токи одного направления (выпрямленный ток) создают во взаимно связанных стержнях трехфазного трансформатора дополнительный постоянный магнитный поток. Чтобы не допустить насыщения магнитной системы за счет этого дополнительного потока, приходится увеличивать сечение стержней и габариты трансформатора. Трехфазную схему выпрямления с нейтральной точкой применяют только в маломощных силовых

установках.

Мостовая трехфазная схема выпрямления переменного тока изображена на рис. В ней сочетаются принципы мостовой схемы и схемы многофазного выпрямления. В этой схеме нулевая точка трансформатора для выпрямления не нужна и поэтому первичные и вторичные обмотки могут быть соединены как звездой, так и треугольником.



Шесть диодов образуют две группы - нечетную  $VD_1$ ,  $VD_3$  и  $VD_5$  и четную  $VD_2$ ,  $VD_4$  и  $VD_6$ . У нечетной группы катоды соединены вместе и служат точкой вывода выпрямителя с положительным потенциалом, а у четной группы - аноды соединены вместе и служат точкой вывода с отрицательным потенциалом. При работе этой схемы выпрямляются обе полуволны переменных напряжений всех вторичных обмоток трансформатора, благодаря чему пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются. В схеме в каждый момент работает тот диод нечетной группы, у которого анод в этот момент имеет наибольший положительный потенциал, а вместе с ним тот диод четной группы, у которого катод имеет наибольший по абсолютной величине отрицательный потенциал. Выпрямленное напряжение будет изменяться по огибающей с двойной частотой пульсаций.



Среднее значение выпрямленного напряжения в этой схеме

$$U_0 = 1,35 U_{\text{л}} = 2,34 U_{\text{ф}}$$

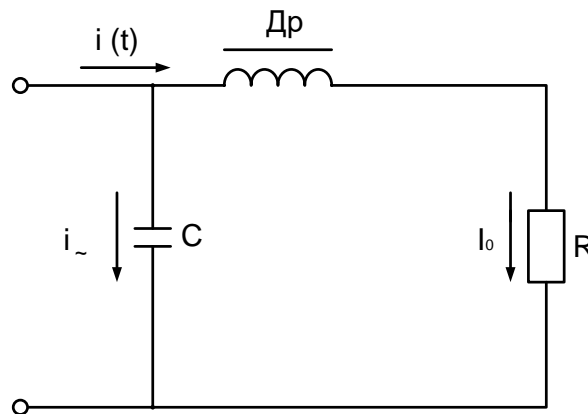
Средний ток через диод  $I_{\text{д}} = I_0 / 3$ , причем этот ток проходит через два последовательно включенных диода. Обратное напряжение, действующее на каждый диод, здесь также равно амплитудному значению линейного напряжения

В мощных выпрямителях в основном используется мостовая трехфазная схема. Она получила широкое применение в управляемых выпрямителях, в которых, регулируя моменты открывания и закрывания диодов (тиристоров), можно в широких пределах регулировать среднее значение выпрямленного тока.

## Сглаживающие фильтры

Рассмотренные схемы выпрямления переменного тока позволяют получать выпрямленное, но пульсирующее напряжение. Для питания электронных приборов пульсирующее напряжение непригодно: оно создает фон переменного тока, вызывает искажения сигналов и приводит к неустойчивой работе приборов. Для устранения пульсаций (сглаживания) применяют сглаживающие фильтры.

Сглаживающий фильтр состоит из реактивных элементов: конденсаторов и катушек индуктивности (дресселей). Сущность работы сглаживающего фильтра состоит в разделении пульсирующего тока на постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая направляется в нагрузку, а нежелательная переменная замыкается через конденсатор, минуя нагрузку.



Физическая сущность работы в фильтре конденсатора и дросселя состоит в том, что конденсатор (обычно большой емкости), подключенный параллельно нагрузке, заряжается при нарастании импульсов выпрямленного напряжения и разряжается при их убывании, сглаживая тем самым его пульсации. Дроссель, наоборот, при нарастании импульсов выпрямленного тока в результате действия ЭДС самоиндукции задерживает рост тока, а при убывании импульсов задерживает его убывание, сглаживая пульсации тока в цепи нагрузки. С другой стороны, конденсатор и дроссель можно рассматривать как некие резервуары энергии. Они запасают ее, когда ток в цепи нагрузки превышает среднее значение, и отдают, когда ток стремится уменьшиться ниже среднего значения. Это и приводит к сглаживанию пульсаций.

## Стабилизаторы напряжения

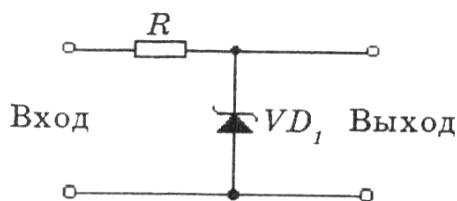
Выходное напряжение выпрямителя может изменяться по двум причинам. Во-первых, может изменяться входное напряжение выпрямителя, что приводит к увеличению или уменьшению выходного напряжения. Во-вторых, может изменяться сопротивление нагрузки, что приводит к изменению потребляемого тока.

Многие электрические цепи рассчитаны на работу при определенном напряжении. Изменения напряжения могут влиять на работу цепи. Следовательно, выпрямитель должен обеспечивать выходное напряжение постоянной величины независимо от изменения нагрузки или входного напряжения. Для того чтобы этого добиться, после сглаживающего фильтра ставят стабилизатор напряжения.

Существует два основных типа стабилизаторов напряжения: параллельные и последовательные. Их названия определяются методом их соединения с нагрузкой. Параллельный стабилизатор подключается к нагрузке параллельно. Последовательный стабилизатор подсоединяется к нагрузке последовательно. Последовательные стабилизаторы более популярны, чем параллельные, так как они более эффективны и рассеивают меньшую



мощность. Последовательный стабилизатор также работает в качестве управляющего устройства, защищая источник питания от короткого замыкания в нагрузке.

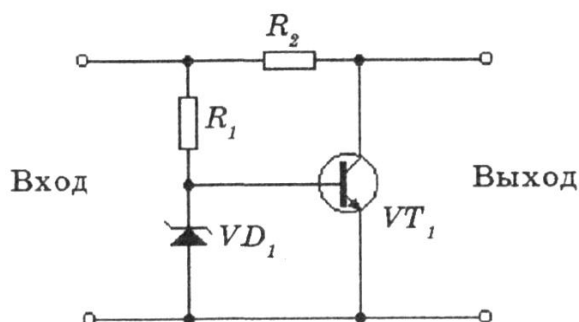


Это параллельный стабилизатор. Стабилитрон соединен последовательно с резистором. Входное постоянное напряжение прикладывается к стабилитрону и резистору и смещает стабилитрон в обратном направлении. Резистор позволяет протекать малому току и поддерживать стабилитрон в области пробоя. Входное напряжение должно быть выше, чем напряжение стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на резисторе равно разности между входным напряжением и напряжением стабилизации стабилитрона.

Цепь, изображенная обеспечивает постоянное выходное напряжение при изменениях входного напряжения. Любое изменение напряжения проявляется в виде изменения падения напряжения на резисторе. Сумма падений напряжения должна равняться входному напряжению. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и последовательно включенного резистора.

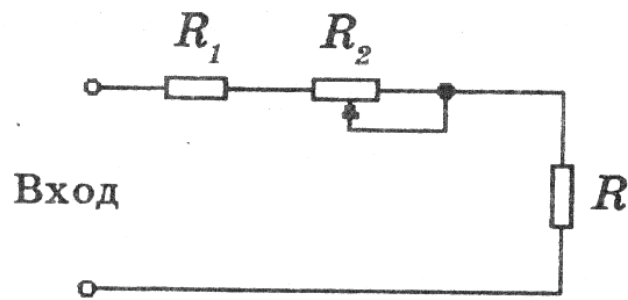
Ток через нагрузку определяется сопротивлением нагрузки и выходным напряжением. Через последовательно включенный резистор течет сумма тока нагрузки и тока стабилитрона. Этот резистор должен быть тщательно подобран таким образом, чтобы ток через стабилитрон удерживал его в области стабилизации.

Когда ток через нагрузку увеличивается, ток через стабилитрон уменьшается и сумма этих токов поддерживает напряжение постоянным. Это позволяет цепи поддерживать постоянное выходное напряжение при изменениях выходного тока так же, как и при изменениях входного напряжения.



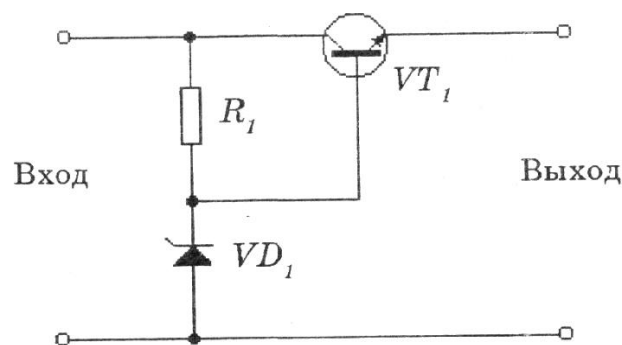
На рис. изображена параллельная регулирующая цепь, использующая транзистор. Заметим, что транзистор  $VT_1$  включен параллельно нагрузке. Это защищает стабилизатор в случае короткого замыкания в нагрузке. Существуют более сложные параллельные стабилизаторы, которые используют более одного транзистора.

Для иллюстрации принципа работы последовательного стабилизатора рассмотрим переменный резистор, включенный последовательно с нагрузкой. Для поддержания постоянного напряжения на нагрузке сопротивление  $R_2$  можно изменять. При увеличении входного напряжения сопротивление  $R_2$  увеличивают, чтобы на нем падало излишнее напряжение, и напряжение на нагрузке оставалось постоянным.



С помощью резистора  $R_2$  можно также компенсировать изменения тока нагрузки. При увеличении тока нагрузки падение напряжения на переменном резисторе увеличивается. Это приводит к уменьшению падения напряжения на нагрузке. Если в момент увеличения тока уменьшить сопротивление, то падение напряжения на переменном резисторе останется постоянным. В результате постоянным окажется и выходное напряжение, несмотря на изменения тока нагрузки.

На практике переменный резистор заменяют транзистором. Транзистор включен таким образом, что через него течет ток нагрузки. Путем изменения тока базы можно управлять величиной тока, текущего через транзистор. В схему включают дополнительные элементы, которые позволяют транзистору автоматически компенсировать изменения входного напряжения и тока нагрузки.



На рисунке изображен простой последовательный стабилизатор. На его вход подается нестабилизированное постоянное напряжение, а на его выходе получается стабилизированное постоянное напряжение меньшее по величине. Транзистор включен как эмиттерный повторитель, и поэтому здесь отсутствует обращение фазы между базой и эмиттером. Напряжение на эмиттере повторяет напряжение на базе. Нагрузка подключена между эмиттером транзистора и землей. Напряжение на базе транзистора устанавливается с помощью стабилитрона. Следовательно, выходное напряжение равно напряжению стабилизации стабилитрона минус  $0,7\text{ В}$  падения напряжения на переходе база-эмиттер.

Когда входное напряжение на транзисторе увеличивается, выходное напряжение также пытается увеличиться. Напряжение на базе транзистора установлено с помощью стабилитрона. Если на эмиттере появляется больший положительный потенциал, чем на базе, проводимость транзистора уменьшается. Когда транзистор уменьшает свою проводимость, это действует так же, как установка между входом и выходом большого резистора. Большая часть добавившегося входного напряжения падает на транзисторе, и только малая его часть увеличит выходное напряжение.

В последние годы вместо стабилизаторов на дискретных компонентах все чаще используют стабилизаторы на интегральных микросхемах.

Современные стабилизаторы на интегральных микросхемах дешевы и просты в применении. Большинство стабилизаторов на интегральных микросхемах имеют только три вывода (вход, выход и земля) и могут быть подсоединены непосредственно к выходу

фильтра выпрямителя. Стабилизаторы на интегральных микросхемах обеспечивают широкий диапазон выходных напряжений как положительной, так и отрицательной полярности. Существуют также двухполярные стабилизаторы напряжения. Если стабилизатора с нужным напряжением нет среди стандартных микросхем, можно использовать микросхему стабилизатора с регулируемым напряжением.

При выборе микросхемы стабилизатора необходимо знать напряжение и ток нагрузки, а также электрические характеристики нестабилизированного блока питания.

### Типы усилителей на транзисторах

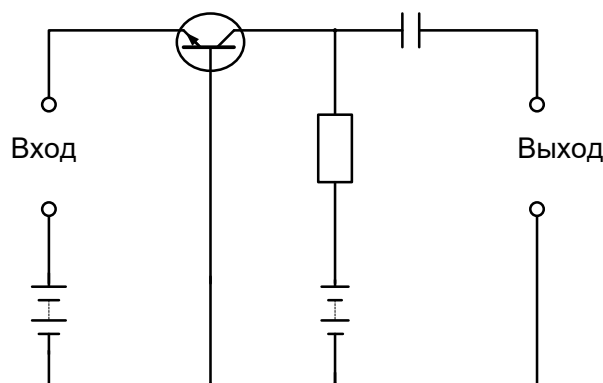
Усилители - это электронные цепи, которые используются для увеличения амплитуды электронного сигнала. Цепь, рассчитанная на преобразование низкого напряжения в высокое, называется усилителем напряжения. Цепь, рассчитанная на преобразование слабого тока в сильный, называется усилителем тока. В современной радиоэлектронике основными усилительными устройствами являются транзисторы.

Для того чтобы транзистор обеспечивал усиление, он должен быть в состоянии принять входной сигнал и выдать выходной сигнал, значительно больший, чем входной.

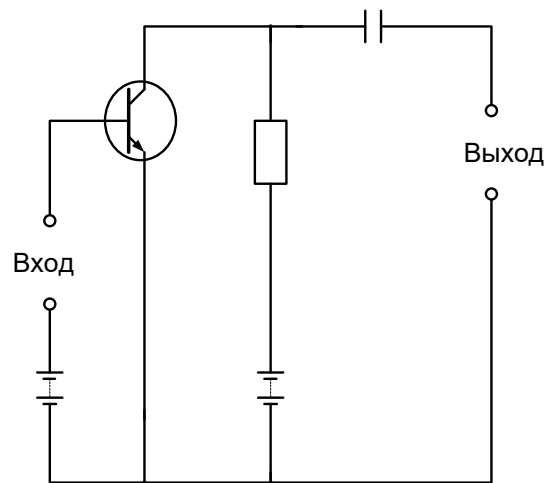
Входной сигнал управляет током, текущим через транзистор. Этот ток в свою очередь управляет напряжением на нагрузке. Транзисторная цепь рассчитана таким образом, чтобы брать напряжение от внешнего источника питания и подавать его на резистор нагрузки в виде выходного напряжения.

Существует несколько способов включения транзистора в цепь: схема с общей базой, схема с общим эмиттером и схема с общим коллектором. В каждой из этих схем один из выводов транзистора служит общей точкой, а два других являются входом и выходом, при этом на переход эмиттер-база подается напряжение смещения в прямом направлении, а на переход коллектор-база - в обратном. Каждая схема имеет преимущества и недостатки и может быть собрана как с р-н-р, так и с n-р-n транзистором.

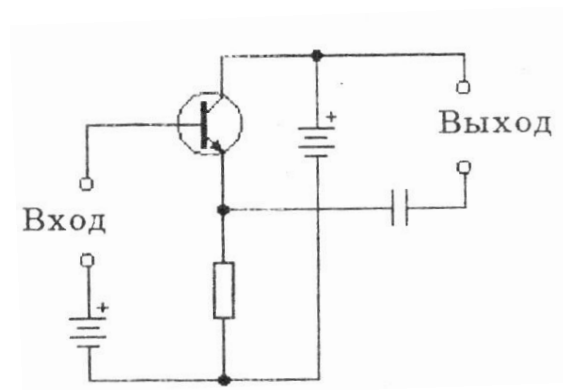
В схеме с общей базой входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной снимается с цепи коллектор-база. База является общим элементом для входа и выхода.



В схеме с общим эмиттером входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной сигнал снимается с цепи коллектор-эмиттер. Эмиттер является общим для входа и выхода. Этот способ включения транзистора используется наиболее широко.



Третий тип соединения - это схема с общим коллектором. В этой схеме входной сигнал подается в цепь база-коллектор, а выходной сигнал снимается с цепи эмиттер-коллектор. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Эта схема используется для согласования импедансов (импедансом называется полное сопротивление цепи переменному току).



В таблице 1 приведены входные и выходные сопротивления, а также величина усиления по напряжению, току и мощности для трех схем включения транзистора.

Таблица 1

Тип цепи	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
Общая база	Десятки Ом	Сотни килоом - единицы МОм	Несколько сотен	Меньше единицы	Несколько сотен
Общий эмиттер	Тысячи Ом	Десятки - сотни кОм	Несколько десятков	Несколько сотен	Несколько тысяч
Общий коллектор	Десятки - сотни кОм	Десятки - сотни Ом	Меньше единицы	Несколько сотен	Несколько десятков

Отметим, что схема с общим эмиттером изменяет фазу входного сигнала на  $180^\circ$ , тогда как схемы с общей базой и с общим коллектором фазу входного сигнала не изменяют.

Как видно все три схемы усиления требуют двух источников тока. Переход база-эмиттер должен быть смещен в прямом направлении, а переход база-коллектор должен быть смещен в обратном направлении. Однако оба напряжения смещения могут быть обеспечены с помощью одного источника тока.

Поскольку цепи с общим эмиттером используются наиболее часто, мы их опишем более детально. Те же принципы применимы и к цепям с общей базой и общим коллектором.

## Генераторы синусоидальных колебаний

Генератор электрических колебаний - это нелинейное устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию колебаний. Генераторы широко используются в электронике: в радиоприемниках и телевизорах, в системах связи, компьютерах, промышленных системах управления и устройствах точного измерения времени.

Генератор - это электрическая цепь, которая генерирует периодический сигнал переменного тока. Частота сигнала может изменяться от нескольких герц до многих миллионов герц. Выходное напряжение генератора может быть синусоидальным, прямоугольным или пилообразным в зависимости от типа генератора.

Когда колебательный контур возбуждается внешним источником постоянного тока, в нем возникают колебания. Эти колебания являются затухающими, поскольку активное сопротивление колебательного контура поглощает энергию тока. Для поддержания колебаний в колебательном контуре поглощенную энергию необходимо восполнить. Это осуществляется с помощью положительной обратной связи. Положительная обратная связь - это подача в колебательный контур части выходного сигнала для поддержки колебаний. Сигнал обратной связи должен совпадать по фазе с сигналом в колебательном контуре.

Генератор можно разбить на три части. Частотозадающей цепью генератора обычно является LC колебательный контур. Усилитель увеличивает амплитуду выходного сигнала колебательного контура. Цепь обратной связи подает необходимое количество энергии в

колебательный контур для поддержки колебаний. Таким образом, генератор - это схема с обратной связью, которая использует постоянный ток для получения колебаний переменного тока.



Генераторы синусоидальных колебаний - это генераторы, которые генерируют напряжение синусоидальной формы. Они классифицируются согласно их частотозадающим компонентам. Тремя основными типами генераторов синусоидальных колебаний являются LC генераторы, кварцевые генераторы и RC генераторы.

LC генераторы используют колебательный контур из конденсатора и катушки индуктивности, соединенных либо параллельно, либо последовательно, параметры которых определяют частоту колебаний. Кварцевые генераторы подобны LC генераторам, но обеспечивают более высокую стабильность колебаний. LC генераторы и кварцевые генераторы используются в диапазоне радиочастот. Они не подходят для применения на низких частотах. На низких частотах используются RC генераторы, в которых для задания частоты колебаний используется резистивно-емкостная цепь.

## Элементы цифровых электронных цепей

В основе цифровой электроники лежит двоичная система счисления. Для записи чисел в двоичной системе нужны только две цифры - ноль (0) и единица (1). Двоичная система счисления используется в цифровых цепях благодаря тому, что двоичные цифры легко представить в виде двух напряжений - высокого и низкого. Данные в двоичной системе представляются двоичными цифрами, которые называются битами. Термин бит означает двоичная цифра (разряд) (binary digit).

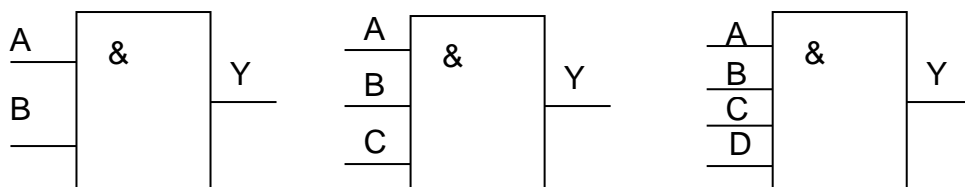
Все цифровое оборудование, от простого до сложного, сконструировано с использованием небольшого количества основных схем. Эти схемы, называемые логическими элементами, выполняют некоторые логические функции с двоичными данными.

Существуют два основных типа логических схем: схемы принятия решений и память. Логические схемы принятия решений контролируют двоичные состояния входов и выдают выходной сигнал, основанный на состояниях входов и характеристиках логической схемы. Схемы памяти используются для хранения двоичных данных.

## Логические элементы

Рассмотрим некоторые логические схемы.

Элемент И - это логическая схема, на выходе которой 1 появляется только тогда, когда на все его входы поступает сигнал 1. Если на какой-либо из входов поступает 0, на выходе появляется 0.



Элемент И может иметь любое количество входов, большее одного. Показанные на рисунке обозначения представляют наиболее часто используемые элементы с двумя, тремя и четырьмя входами.

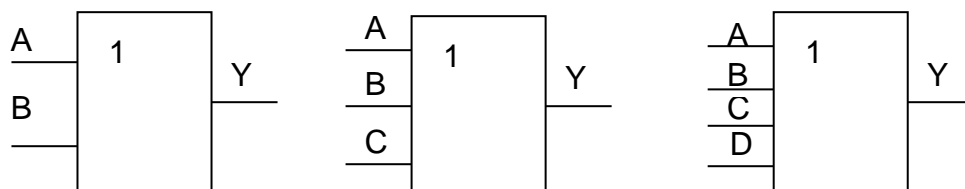
Состояние и логическую связь между входными и выходными сигналами элемента И отражает так называемая таблица истинности (таблица 2), которая показывает выходное состояние двухвходового элемента для любых возможных состояний входов: А и В - входы; Y - выход.

Таблица 2

A	B	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Элемент И выполняет операцию логического умножения. Логическое умножение известно как функция И.

Элемент ИЛИ - это логическая схема, на выходе которой появляется 1, если на любой из его входов подана 1. На его выходе появляется 0, если на все его входы поданы 0. Этот элемент, как и элемент И, может иметь два или более входов. На рис.89 показаны стандартные обозначения, используемые для элементов ИЛИ с двумя, тремя и четырьмя входами.



Значения на выходе элемента ИЛИ с двумя входами приведены в таблице истинности (таблица 3): А и В - входы; Y - выход.

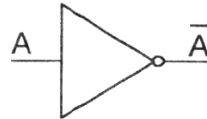
Таблица 3

A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Элемент ИЛИ выполняет логическую операцию сложения.

Элемент НЕ выполняет функцию, которая называется инверсией, или дополнением, и обычно называется инвертором. Цель инвертора - сделать состояние выхода противоположным состоянию входа. В логических цепях возможны два состояния - 1 и 0.

Состояние 1 также называют высоким, чтобы указать, что напряжение в этом состоянии выше, чем в состоянии 0. Состояние 0 также называют низким, чтобы указать, что напряжение в этом состоянии ниже, чем в состоянии 1. Если на вход инвертора подано высокое состояние, или 1, то на выходе появится низкое состояние, или 0. Если же на вход инвертора подать низкое состояние, или 0, то на выходе появится высокое состояние, или 1.



Работу инвертора отражает таблица истинности (таблица 4). Вход инвертора обозначен A, а выход  $\bar{A}$  (читается «не A»). Черточка над буквой A показывает отрицание A. Поскольку инвертор имеет только один вход, то возможны только два состояния входа.

Таблица 4

A	Y
0	1
1	0

Элемент И-НЕ является комбинацией элементов И и НЕ. Элемент И-НЕ является наиболее широко используемой логической функцией. Это обусловлено тем, что эти элементы могут быть использованы для создания некоторых других логических элементов.

## Триггеры

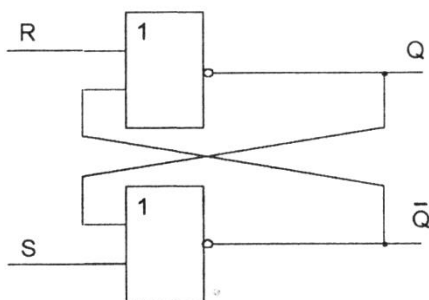
Триггеры принадлежат к категории цифровых цепей, называемых мультивибраторами. Мультивибратор - это цепь с положительной обратной связью, имеющая два активных устройства, рассчитанных таким образом, что одно устройство проводит ток, в то время как другое устройство закрыто. Мультивибраторы могут хранить двоичные числа, импульсы счета, синхронизировать арифметические операции и выполнять другие полезные функции в цифровых системах. Существуют три типа мультивибраторов: бистабильные, моностабильные и астабильные.

Триггер - это бистабильный мультивибратор, на выходе которого может быть либо высокое, либо низкое напряжение, т. е. либо 1, либо 0. На выходе триггера остается высокое или низкое напряжение до тех пор, пока на вход не будет подан пусковой сигнал.

Существует несколько типов триггеров.

RS-триггер образован двумя перекрестно связанными элементами ИЛИ-НЕ или И-НЕ.





RS-триггер имеет два выхода  $Q$  и  $\bar{Q}$  и два управляющих входа:  $R$  (Reset - сброс) и  $S$  (Set - установка). На выходах триггера уровни всегда противоположны (дополняющие уровни): если  $Q = 1$ , то  $\bar{Q} = 0$ , и наоборот.

Для того чтобы понять работу цепи, предположим что выход  $Q$ , вход  $R$  и вход  $S$  имеют низкий уровень. Низкий уровень выхода  $Q$  подается на один из входов элемента 2. На входе  $S$  также низкий уровень. На выходе элемента 2 высокий уровень. Этот высокий уровень подается на вход элемента 1, удерживая его выход на низком уровне. Когда на выходе  $Q$  появляется низкий уровень, говорят, что триггер в исходном состоянии (RESET). Он остается в этом состоянии неопределенно долго, до тех пор, пока на вход  $S$  элемента 2 не будет подан высокий уровень. Когда на вход  $S$  элемента 2 будет подан высокий уровень, на выходе элемента 2 появится низкий уровень, а этот выход связан со входом элемента 1. Поскольку на входе  $R$  элемента 1 низкий уровень, на его выходе  $Q$  низкий уровень изменится на высокий. Этот высокий уровень подается на вход элемента 2, обеспечивая на выходе  $\bar{Q}$  низкий уровень. Когда на выходе  $Q$  высокий уровень, говорят, что триггер в единичном (SET) состоянии. Он остается в этом состоянии до тех пор, пока на вход  $R$  не будет подан высокий уровень, переводящий триггер в исходное состояние.

«Недопустимое», или «неразрешенное», условие имеет место, когда одновременно на оба входа,  $R$  и  $S$ , подается высокий уровень. В этом случае выходы  $Q$  и  $\bar{Q}$  пытаются перейти в низкое состояние, но  $Q$  и  $\bar{Q}$  не могут быть одновременно в одинаковом состоянии без нарушения работы триггера. При одновременном отключении высокого уровня со входов  $R$  и  $S$  оба выхода пытаются перейти в состояние с высоким уровнем. Поскольку всегда логические элементы немного отличаются друг от друга, то один из них перейдет в состояние с высоким уровнем. Это заставит другой элемент перейти в состояние с низким уровнем. В этом случае имеет место непредсказуемый режим работы и, следовательно, состояние выходов триггера не может быть определено.

Таблица - таблица истинности для работы RS-триггера.

Таблица 5

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	Без изменений	Без изменений
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

На рисунке изображено упрощенное схематическое обозначение RS-триггера.

