

Литература:

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. - Ростов н/Д.: Феникс, 2005.
2. Пряшников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт., 2006.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Дрофа, 2006.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991.
5. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Высшая школа, 2004
6. Чижма С.Н. Основы схемотехники. - Омск: Апельсин, 2008.

В курсе **электротехники** изучаются свойства элементов, законы и методы расчета электрических линейных цепей, рассматриваются особенности трехфазных и нелинейных цепей, процессы в цепи при воздействии на нее изменяющихся напряжений, а также переходные процессы.

В курсе **электроники** даются сведения по устройству и применению полупроводниковых элементов в различных приборах.

Схемотехника — научно-техническое направление, охватывающее проблемы проектирования и исследования схем электронных устройств радиотехники и связи, вычислительной техники, автоматики и др. областей техники.

Электроника

Электроника представляет собой обширную область науки и техники, базирующуюся на изучении физических явлений **в полупроводниках**, диэлектриках, вакууме, газе, плазме и т.д., для создания на их основе разнообразных изделий с электронными компонентами.

Электроника вошла в самые различные сферы нашей деятельности, **область применения** различных электронных устройств просто огромна – от наручных электронных часов до телевизора и радиоприемника; от электронного зажигания в автомобилях до сложнейших автоматических технологических линий; от бытовых нагревательных приборов (микроволновые печи) до сверхмощных компьютеров.

С помощью специальных электронных устройств можно придать электродвигателям любые желаемые характеристики, обеспечить наиболее благоприятное протекание переходных процессов, преобразовать электрическую энергию из одного вида в другой и решать целый ряд таких задач, которые другими способами либо вообще не решаются, либо решаются со значительно большими затратами. Развитие электроники продолжается и в настоящее время.

Свободные носители электрического заряда

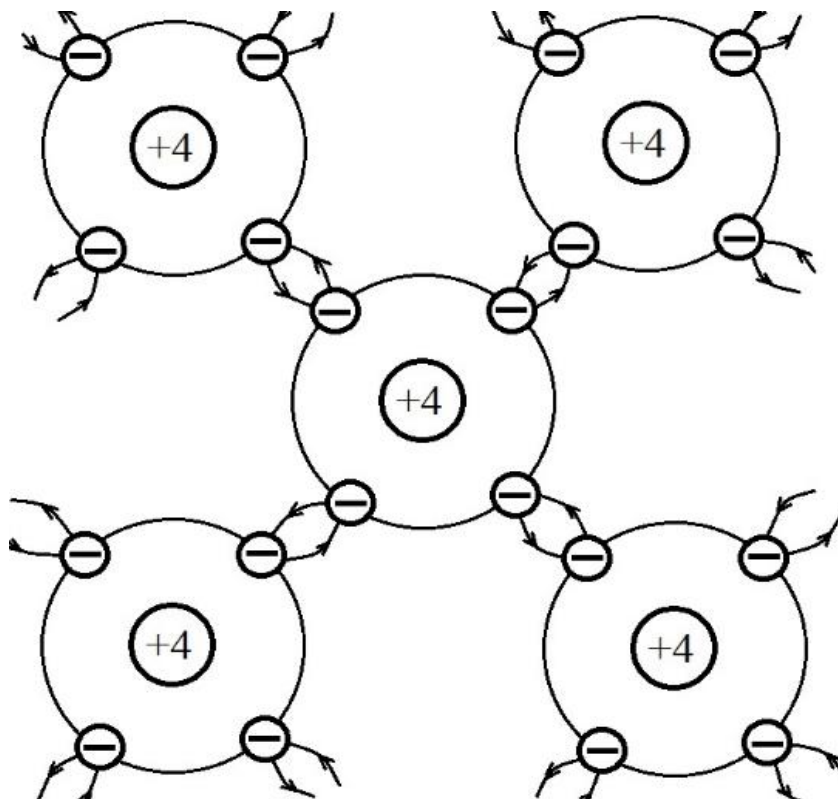
В твердых телах атомы вещества могут образовывать **кристаллическую решетку**, когда соседние атомы удерживаются межатомными силами на определенном расстоянии друг от друга в точках равновесия этих сил, называемых *узлами* кристаллической решетки. Под действием тепла атомы, не имея возможности перемещаться, совершают колебательные движения относительно положения равновесия. При поглощении энергии атомом какой-либо **электрон может** перейти на один из более высоких свободных уровней, либо вовсе может **покинуть атом, став свободным** носителем электрического заряда, а атом при этом превращается из нейтрального в положительно заряженный ион.

Способность твердого тела проводить ток под действием электрического поля зависит от наличия свободных носителей электрического заряда.

Рассмотрим **строение полупроводникового материала**, получившего наиболее широкое распространение в современной электронике.

Полупроводники и их свойства

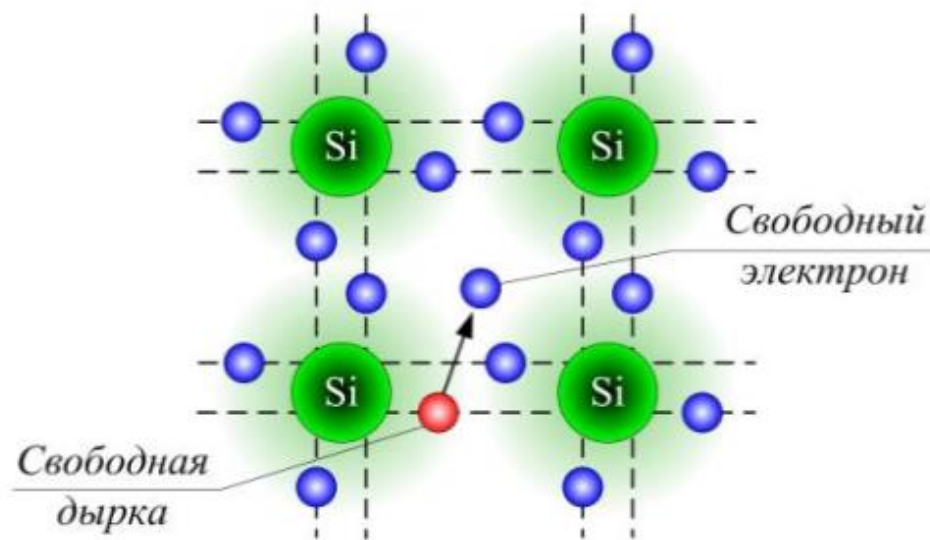
Полупроводниковые материалы занимают промежуточное положение между изоляторами и проводниками. К полупроводникам относятся элементы 4 группы периодической системы элементов Д.И.Менделеева, которые на внешней оболочке имеют 4 валентных электрона. Типичные полупроводники — германий (Ge) и кремний (Si).



В кристалле полупроводника атомы располагаются в узлах кристаллической решетки, а электроны наружной электронной оболочки образуют устойчивые **ковалентные связи**, когда каждая пара валентных электронов принадлежит одновременно двум соседним атомам и образует связывающую эти атомы силу. Так как у элементов 4 группы на наружной электронной оболочке располагаются по четыре валентных электрона, то в идеальном кристалле полупроводника при температуре абсолютного нуля все электроны прочно связаны со своими атомами, отсутствуют свободные носители заряда и кристалл полупроводника ведет себя как диэлектрик.

Полупроводники и их свойства

При температуре $T > 0\text{K}$ в результате увеличения амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки дополнительной энергии, поглощенной каким-либо электроном, может оказаться достаточно для разрыва ковалентной связи и перехода в зону проводимости, где **электрон становится свободным** носителем электрического заряда.



Одновременно с этим у того атома полупроводника, от которого отделился электрон, образуется **дырка**, которая представляет собой единичный положительный электрический заряд, способный перемещаться по всему объему полупроводника под действием электрических полей.

Таким образом, в идеальном кристалле полупроводника при нагревании могут образовываться пары носителей электрических зарядов «электрон – дырка», которые обуславливают появление собственной электрической проводимости полупроводника. Процесс образования пары «электрон – дырка» называют **генерацией свободных носителей заряда**.

Полупроводники и их свойства

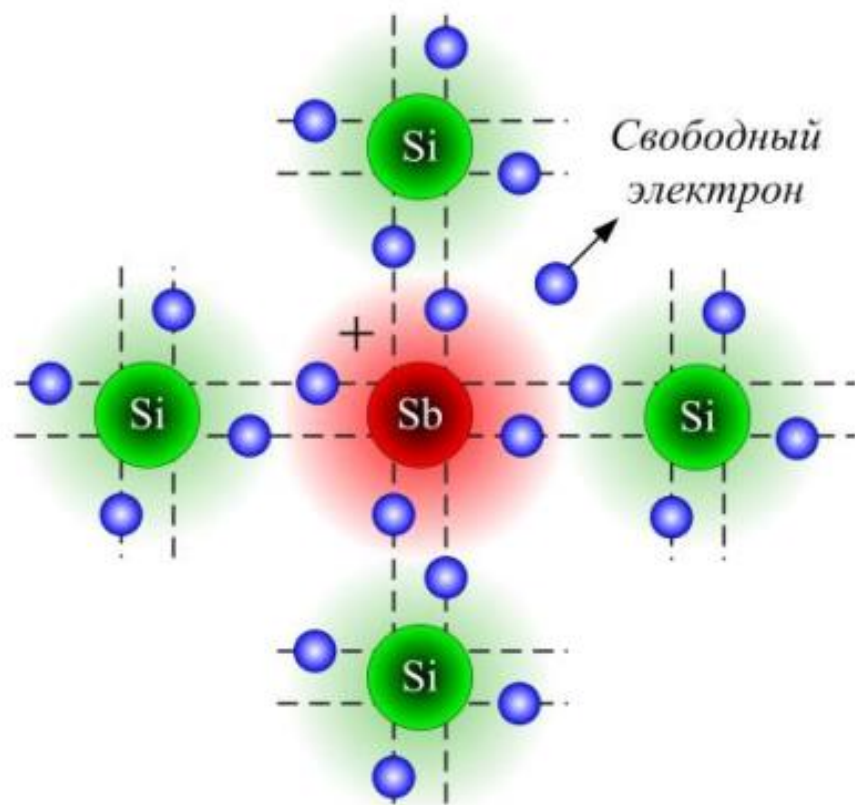
После своего образования пара «электрон – дырка» существует в течение некоторого времени, называемого **временем жизни** носителей электрического заряда. В течение этого промежутка времени носители участвуют в тепловом движении, взаимодействуют с электрическими и магнитными полями как единичные электрические заряды, перемещаются, а затем **рекомбинируют** (электрон восстанавливает ковалентную связь).

Сопротивление полупроводников сильно зависит от их **температуры**. При очень низкой температуре, близкой к абсолютному нулю (-273°C), они ведут себя по отношению к электрическому току как изоляторы (диэлектрики), потому что в них нет свободных носителей зарядов. Чем выше температура полупроводника, тем больше в нем свободных электронов и дырок. Поэтому сопротивление полупроводников с ростом температуры уменьшается, а электропроводность увеличивается.

В чистом полупроводнике число высвободившихся в каждый момент времени электронов равно числу образующихся дырок. Общее число их при комнатной температуре невелико, поэтому **собственная электропроводность** полупроводников мала.

Полупроводники и их свойства

Электропроводность полупроводников резко увеличивается при введении в них атомов некоторых других элементов. Такой процесс называется **легированием**, а соответствующие полупроводниковые материалы — **легированными**. В качестве легирующих примесей применяют элементы 3 и 5 групп периодической системы элементов Д.И.Менделеева.

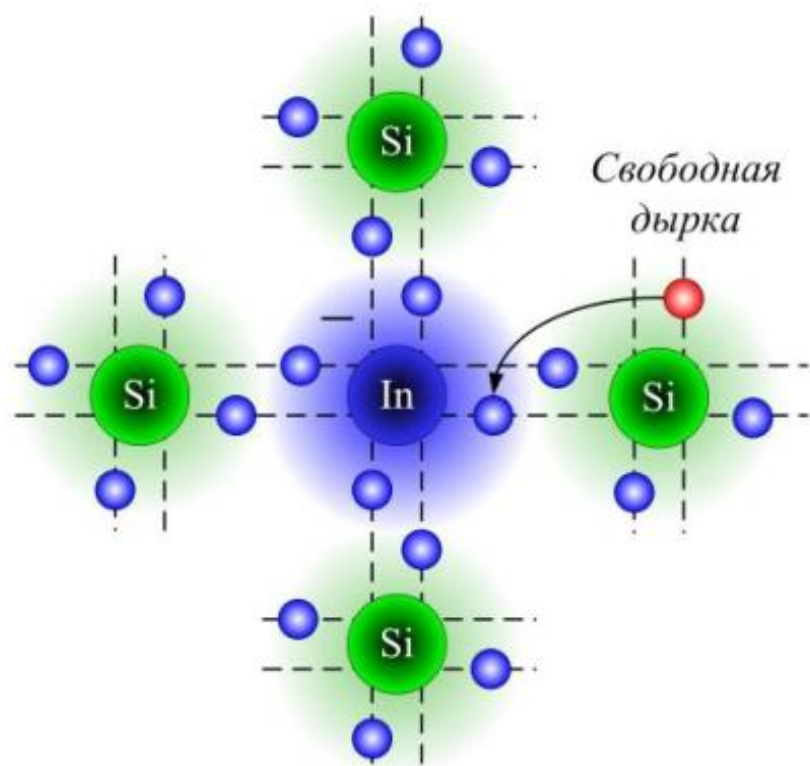


Элементы V группы (например, мышьяк As, фосфор P, сурьма Sb) имеют пять валентных электронов, поэтому при образовании валентных связей один электрон оказывается лишним. Такие полупроводники обладают электронной электропроводностью, т. к. в них основными носителями заряда являются электроны.

Они называются полупроводниками **n-типа**, а примесь, благодаря которой в полупроводнике оказался избыток электронов, называется **донорной**.

Полупроводники и их свойства

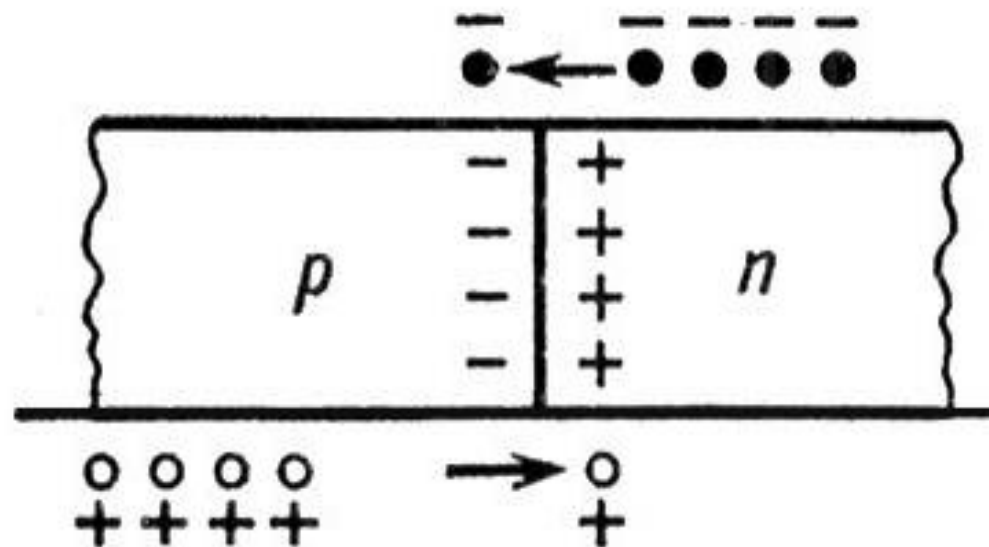
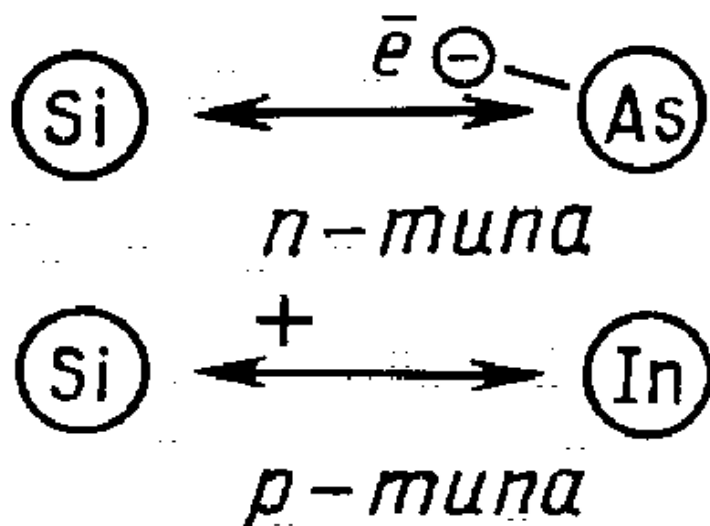
Электропроводность полупроводников резко увеличивается при введении в них атомов некоторых других элементов. В качестве легирующих примесей применяют элементы 3 и 5 групп периодической системы элементов Д.И.Менделеева.



Элементы **III** группы (например, индий In, бор B, алюминий Al) имеют три валентных электрона, поэтому при образовании валентных связей одна связь оказывается только с одним электроном. Такие полупроводники обладают дырочной электропроводностью, т. к. в них основными носителями заряда являются **дырки**. Под дыркой понимается место, не занятое электроном, которому присваивается положительный заряд.

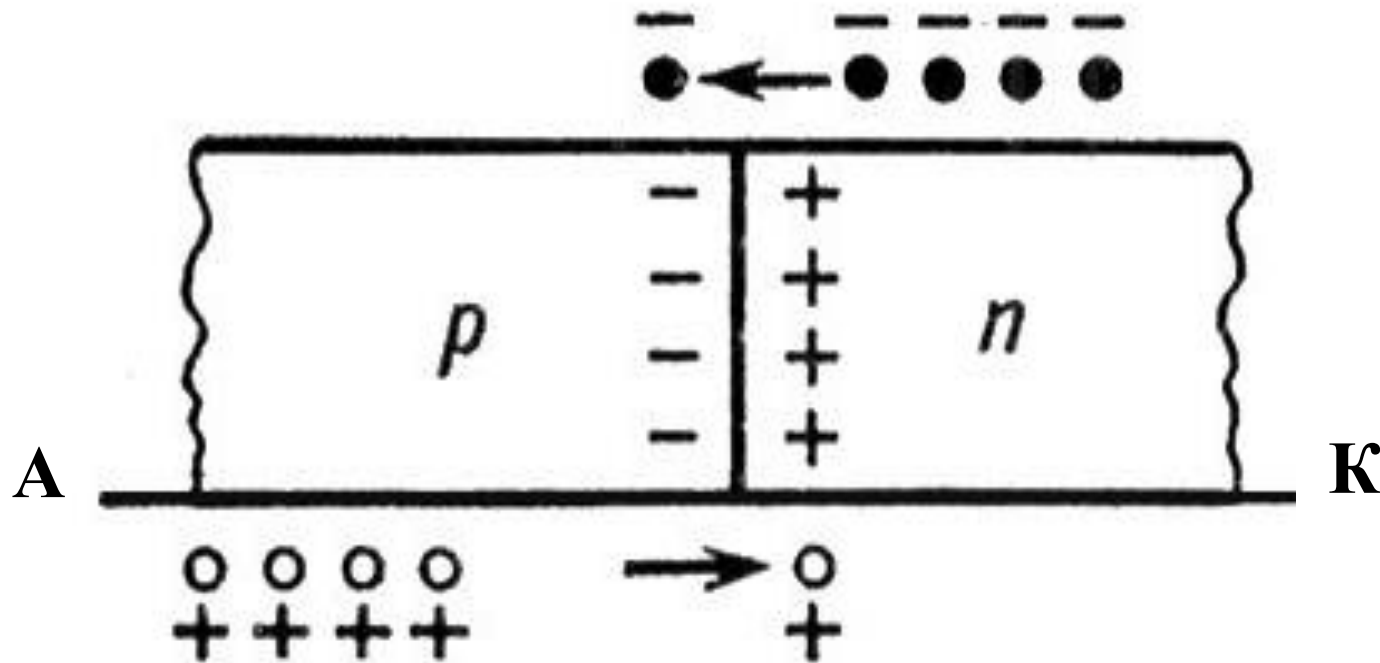
Такие полупроводники также называются полупроводниками **p-типа**, а примесь, благодаря которой в полупроводнике оказался недостаток электронов, называется **акцепторной**.

Полупроводники и их свойства



Если монокристалл полупроводника с одной стороны легировать примесью р-типа, а с другой – примесью n-типа, то между этими областями с различным типом проводимости образуется **р-n-переход**. Некоторые дырки диффундируют в область n, а свободные электроны – из области n в область p. В результате область p получает небольшой отрицательный заряд, а область n – положительный. В тонком слое между областями n и p свободные электроны и дырки рекомбинируют, поэтому этот слой имеет очень мало свободных носителей заряда – его называют **обедненным**. Он действует как потенциальный барьер, т.е. препятствует диффузии дырок и электронов, которые находятся в этом месте в состоянии динамического равновесия.

Полупроводники и их свойства



Если приложить внешнее напряжение к зажимам полупроводника таким образом, что точка А (анод) имеет положительный потенциал по отношению к точке К (катод), то будет наблюдаться уменьшение толщины обедненного слоя и, как следствие, снижение потенциального барьера, что способствует протеканию тока через р-п-переход. Этот ток называется **прямым**.

Полупроводники и их свойства

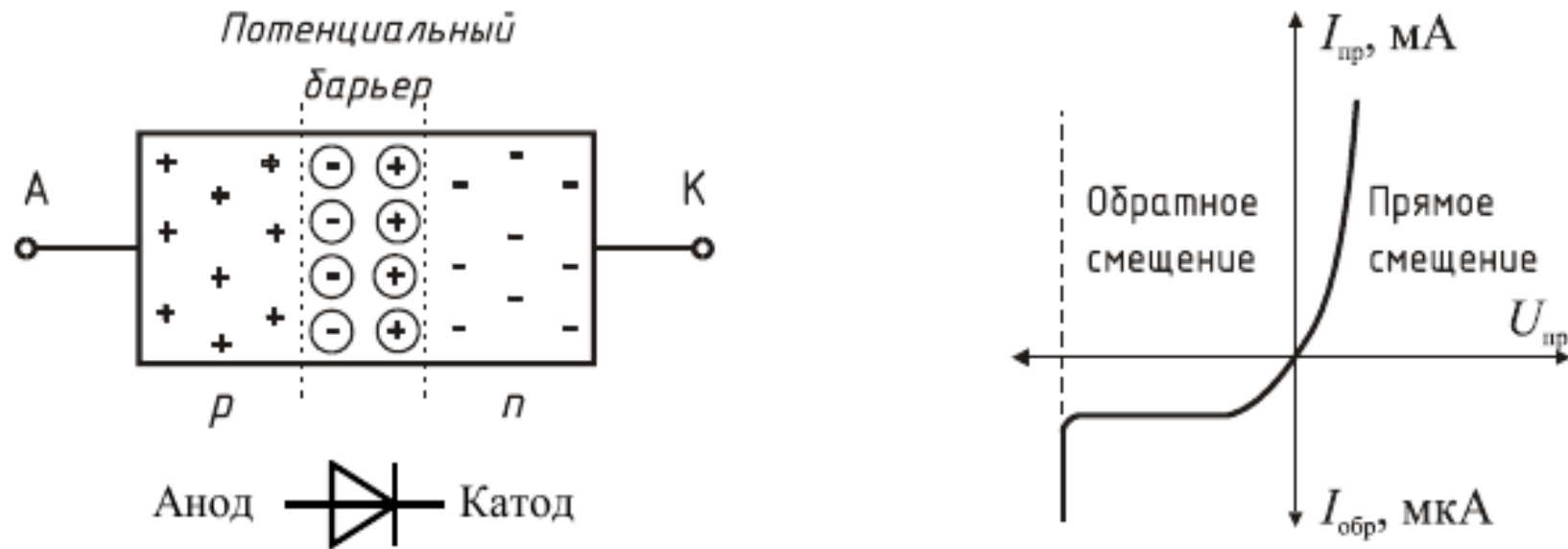


Рисунок 1 – p - n -переход и его вольт-амперная характеристика

С увеличением внешнего напряжения ток через переход возрастает по экспоненциальному закону до тех пор, пока внешнее напряжение не станет равным по величине потенциального барьера, т.е. результирующее напряжение на переходе станет равным нулю, что приведет к возрастанию тока, который ограничивается только сопротивлением полупроводникового материала.

Если полярность внешнего напряжения изменить **на обратное**, то величина потенциального барьера возрастает и основные носители окажутся заблокированными. В этих условиях, однако, через переход будет протекать незначительный ток, называемый **обратным током** или **током утечки**. При возрастании внешнего обратного напряжения этот ток остается постоянным, пока напряжение не достигнет точки пробоя. В этой точке при постоянном напряжении ток быстро возрастает. Ток утечки сильно зависит от температуры.

Полупроводники и их свойства

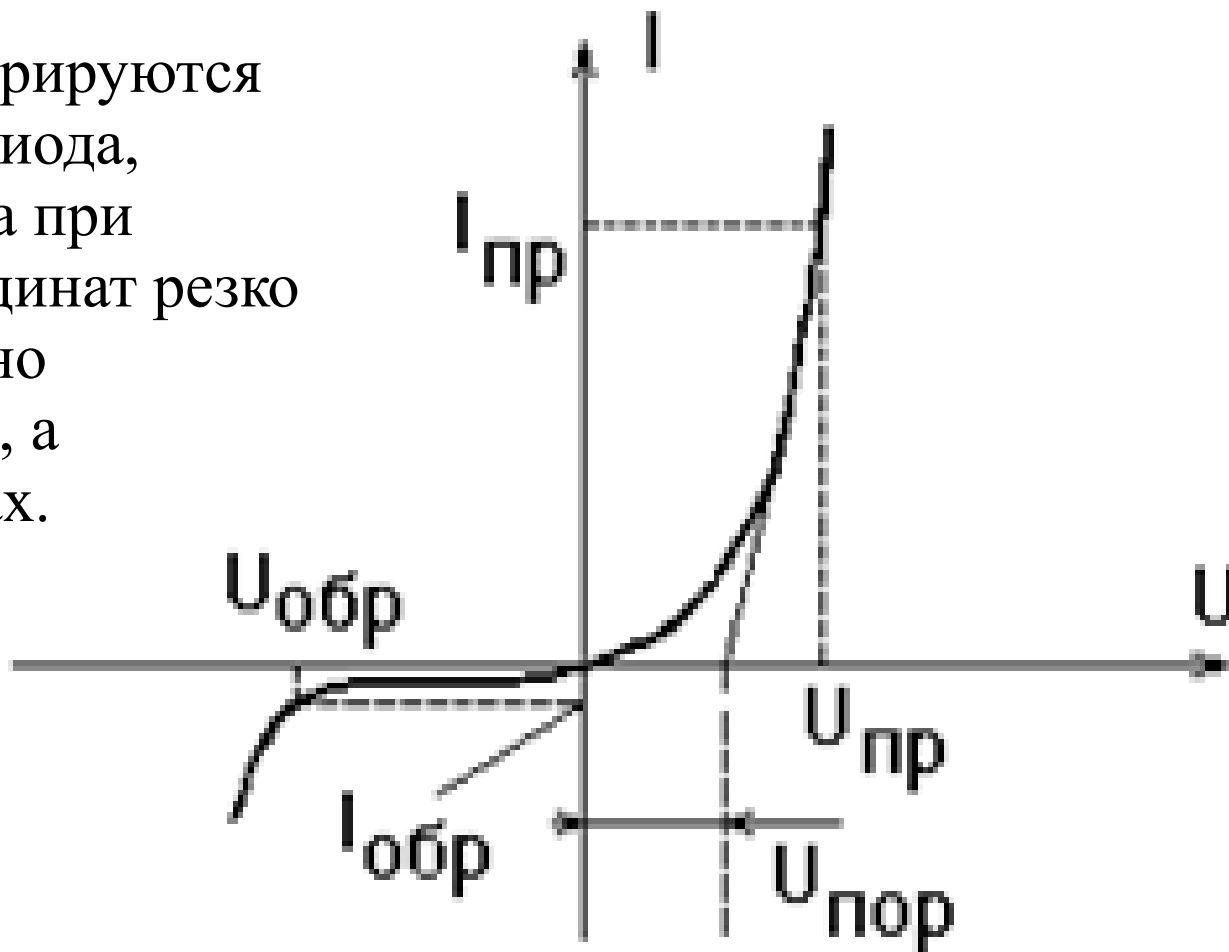
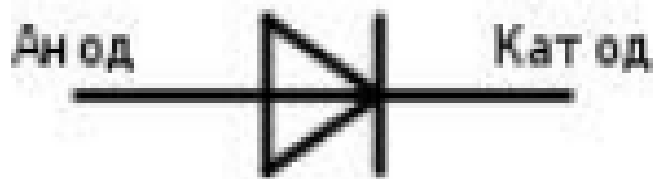
Основные причины возникновения тока утечки следующие:

а) образование неосновных носителей при нагревании, воздействии радиации и нарушениях структуры кристаллической решетки. В этих случаях образуются электронно-дырочные пары и носители заряда, которые являются неосновными, свободно проходят через p - n переход, смещенный в обратном направлении для основных носителей. Образование электронно-дырочных пар при нагревании является наиболее существенной причиной возрастания тока утечки;

б) поверхностные токи утечки являются существенным фактором только для кремниевых приборов, в которых тепловой ток утечки весьма незначителен. Поверхностный ток утечки часто обусловлен загрязнением поверхности и в конечном итоге снижает обратное сопротивление перехода.

Полупроводниковые диоды

Описанные явления иллюстрируются ВАХ полупроводникового диода, причем масштаб по оси тока при переходе через начало координат резко меняется: прямой ток обычно измеряется в миллиамперах, а обратный — в микроамперах.



В условном графическом обозначении полупроводникового диода треугольник является анодом, черточка — катодом. Прямой ток проходит тогда, когда анод имеет положительный потенциал относительно катода. Следовательно, треугольник можно рассматривать как острие стрелки, показывающей условное направление прямого тока. Именно в этом направлении при прямом токе движутся дырки, электроны же движутся в противоположном направлении.

Полупроводниковые диоды

В процессе подачи напряжения плюсом на р-полупроводник и минусом на n-полупроводник внешнее электрическое поле будет направлено против внутреннего электрического поля р-n-перехода и при достаточном напряжении электроны преодолеют р-n-переход, и в цепи диода появится электрический ток (**прямая проводимость**).

При подаче напряжения минусом на область с полупроводником р-типа и плюсом на область с полупроводником n-типа между двумя областями возникает область, которая не имеет свободных носителей электрического тока (**обратная проводимость**). Обратный ток полупроводникового диода не равен нулю, так как в обеих областях всегда есть неосновные носители заряда. Для этих носителей р-n-переход будет открыт.

Полупроводниковые диоды

Технологический процесс создания электронно-дырочного перехода может быть различным: сплавление (сплавные диоды), диффузия одного вещества в другое (диффузионные диоды), эпитаксия – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (эпитаксиальные диоды) и др. По конструкции электронно-дырочные переходы могут быть симметричными и несимметричными, резкими и плавными, плоскостными и точечными и др. Однако для всех типов переходов основным свойством является несимметричная электропроводность, при которой в одном направлении кристалл пропускает ток, а в другом – не пропускает. На практике находят применение точечные, плоскостные и диффузные диоды.

В зависимости от соотношений линейных размеров выпрямляющего p - n -перехода и характеристической длины различают плоскостные и точечные диоды.

Полупроводниковые диоды

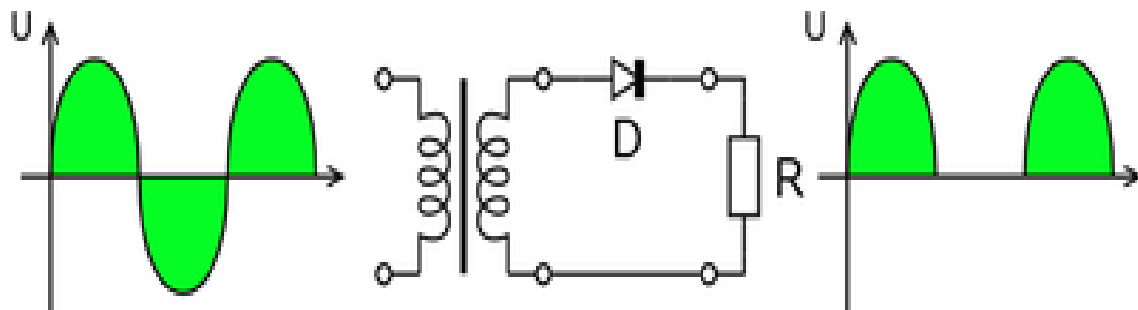
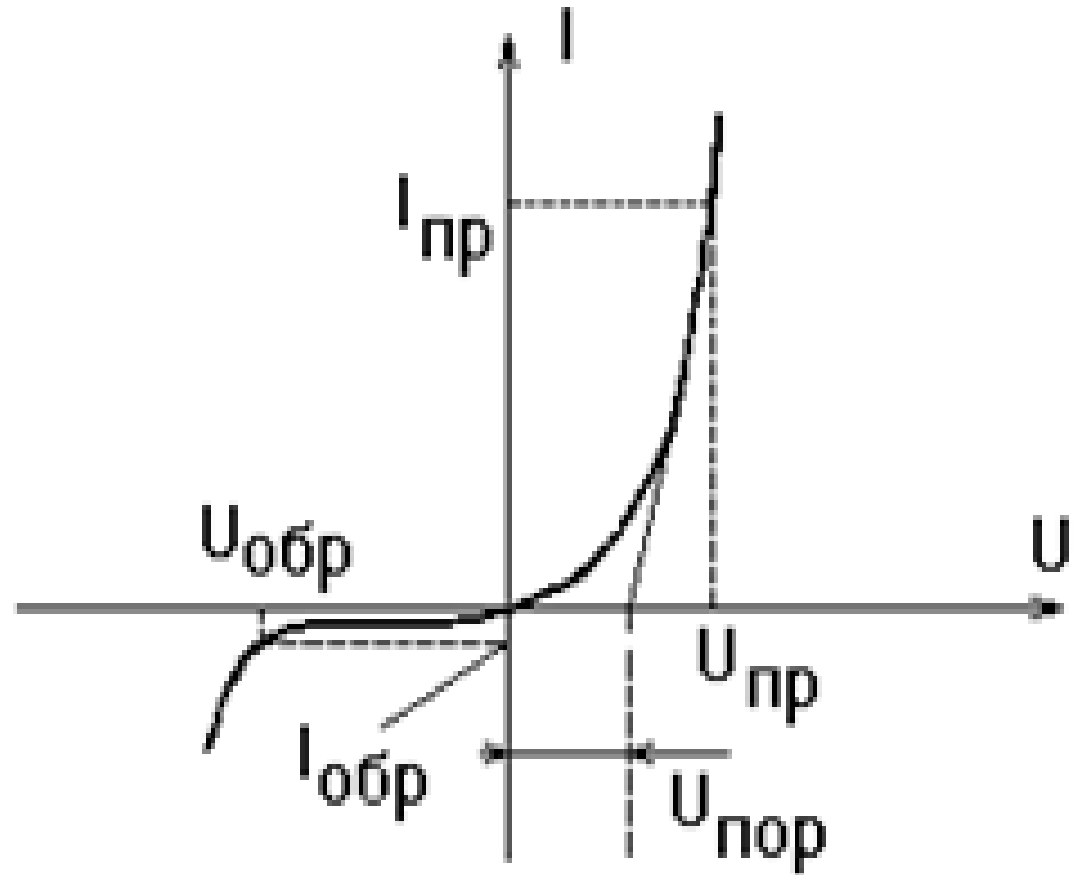
Точечный диод образуется в месте контакта небольшой пластины полупроводника и острия металлической проволоки. Линейные размеры перехода меньше его ширины. Благодаря малой площади диод обладает малой емкостью перехода (менее 1 пФ), относительно небольшим временем переключения (десятки наносекунд) и используется на любых частотах вплоть до СВЧ. Малая площадь перехода определяет также небольшой допустимый ток (до 20 мА). Точечные диоды обычно выполняются на основе германия.

Плоскостные сплавные диоды имеют плоский электрический переход, линейные размеры которого (определяющие его площадь) значительно больше ширины *p-n*-перехода. Это обуславливает бóльшую емкость (десятки пикофард), чем у точечных, и ограничивает использование по частоте (не выше десятков килогерц). Допустимый ток в плоскостных диодах находится в пределах от десятков миллиампер до сотен ампер.

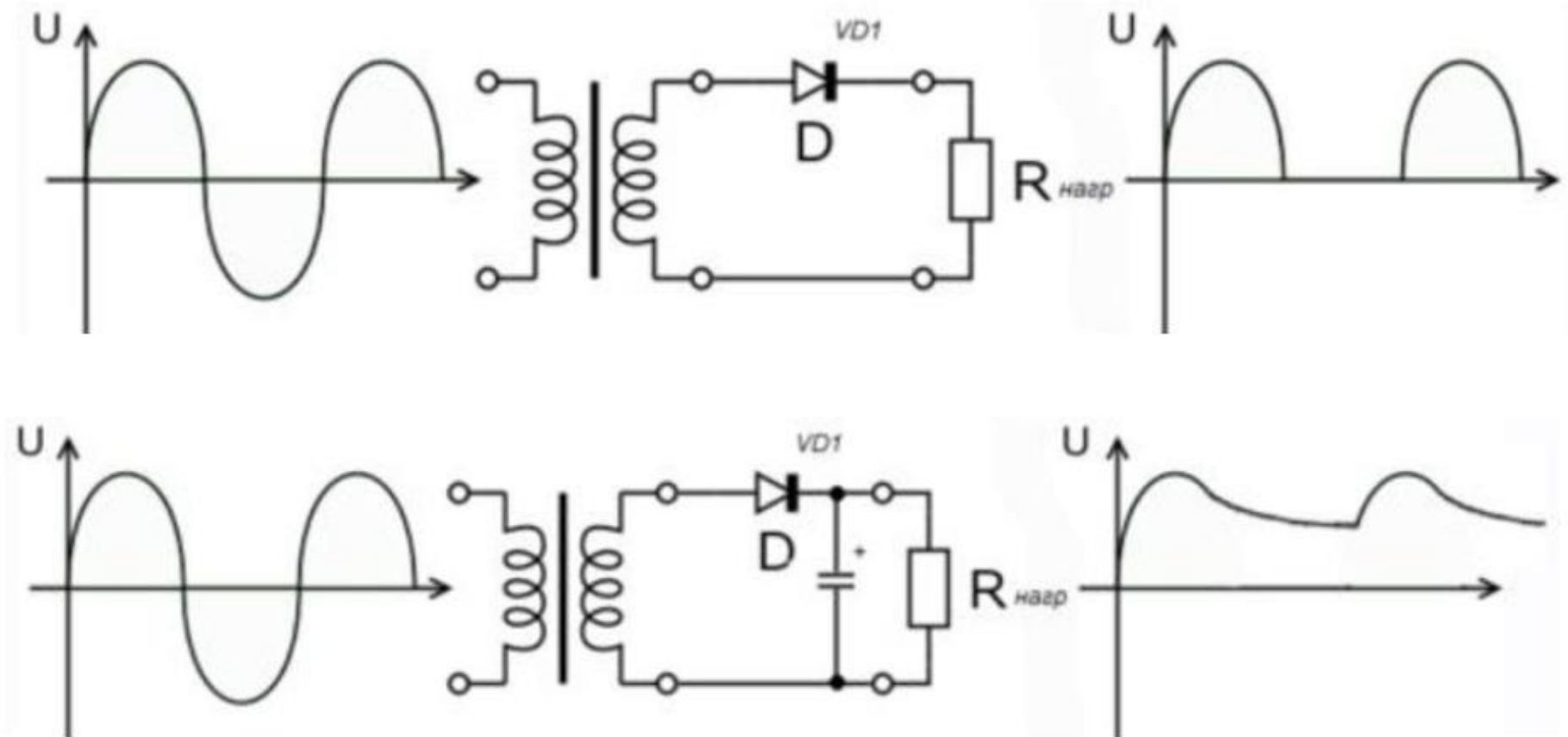
Диффузные диоды изготавливаются посредством диффузии в полупроводниковую пластину примеси, находящейся в газообразной, жидкой или твердой фазах. Имеют малую собственную емкость и малое значение постоянной времени (до наносекунд).

Полупроводниковые диоды

Таким образом, при подключении полупроводникового диода в прямом направлении через него протекает большой ток, а при обратном при $|U| < |U_{обр}|$ – ток, протекающий через р-п-переход, крайне мал. Это означает, что полупроводниковый диод **пропускает ток в прямом направлении (положительном) и не пропускает в обратном направлении (отрицательном)**, т.е. действует как **выпрямитель**.



Полупроводниковые диоды

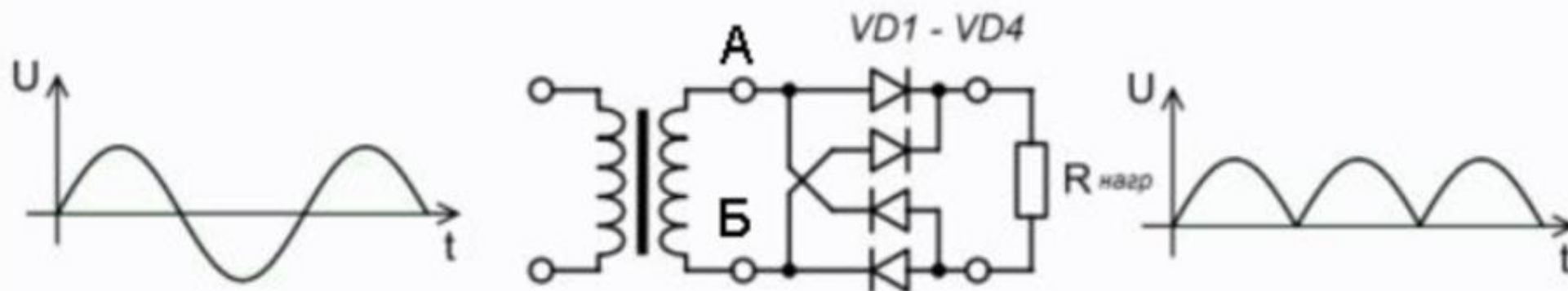


На схеме внизу представлен однополупериодный выпрямитель со сглаживающим конденсатором. Во время положительного импульса напряжение не только питает нагрузку, но и одновременно заряжает конденсатор. Когда импульс заканчивается, конденсатор отдает накопленную энергию, сглаживая скачки напряжения. Чем выше емкость конденсатора, тем больше энергии он сможет запасти, и тем больше напряжение будет походить на постоянное.

Диодный мост

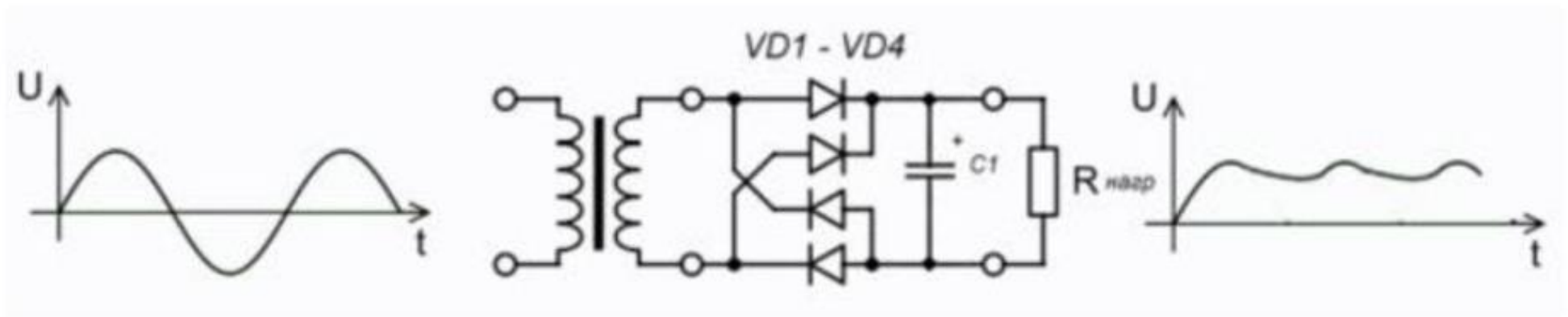
Несмотря на значительные успехи, достигнутые в преобразовании переменного тока в постоянный предыдущим экспериментом, результат ещё далек от идеала. Дело в том, что частота переменного тока довольно низкая (50 Гц), а навешивание сглаживающих конденсаторов имеет свои ограничения. Для того чтобы существенно улучшить форму выходного сигнала, нужно увеличить частоту.

Однако в розетках она строго фиксирована и не зависит от внешних факторов. Отрицательная полуволна напряжения срезается диодом. Поменять её полярность совсем несложно — достаточно лишь добавить несколько диодов, собрав мостовую схему. На рисунке представлен **двухполупериодный выпрямитель** на четырёх диодах, объясняющий то, как работает диодный мост.



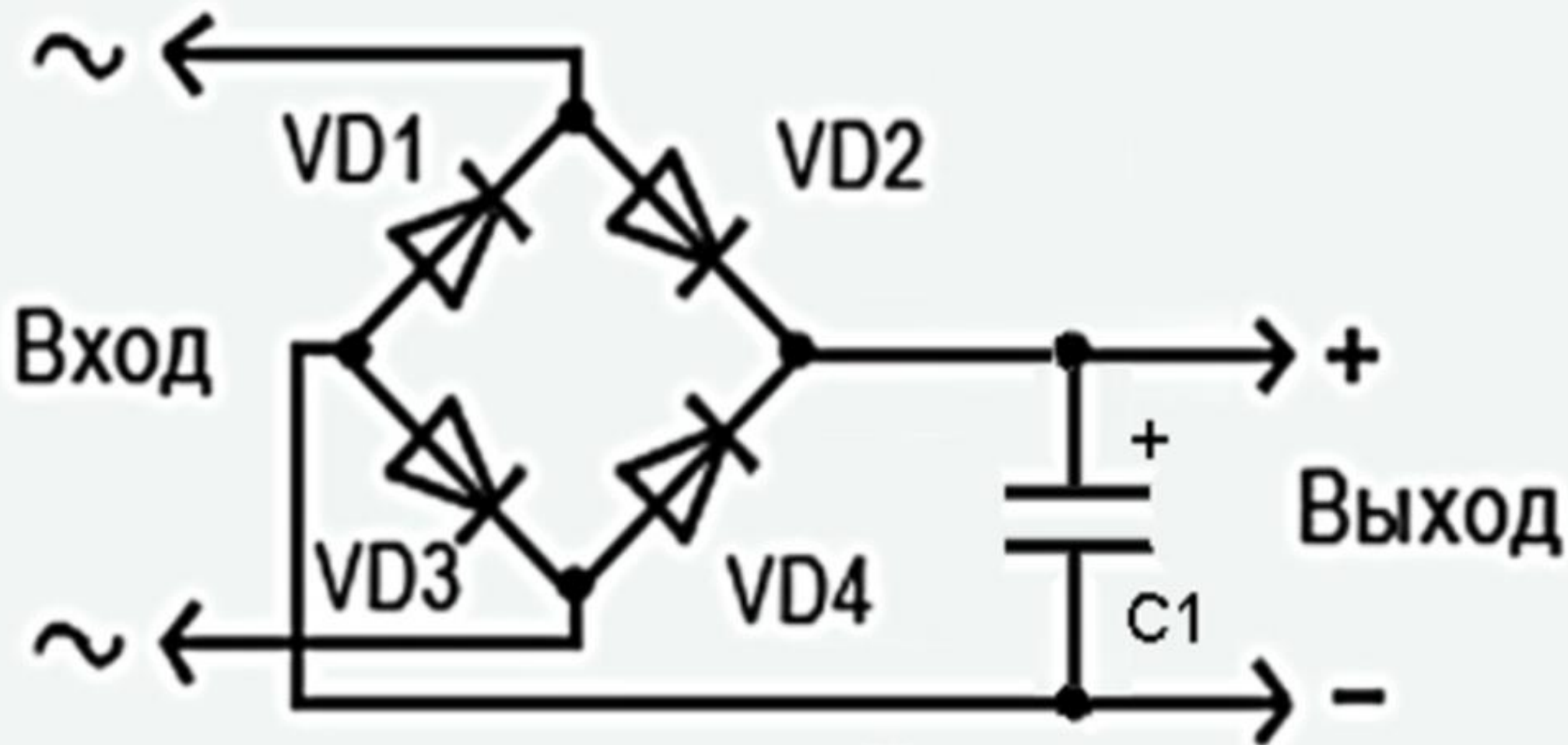
Диодный мост

При появлении положительной полуволны диоды VD2, VD3 окажутся включенными в прямом направлении и будут открыты. VD1, VD4 — закрыты. Половина свободно проходит к выходу выпрямителя. Когда напряжение сменит полярность, пары диодов поменяются местами — VD1 и VD4 откроются, VD2 и VD3 закроются. Отрицательная полуволна тоже пройдет к выходу, но поменяет полярность. В результате получится все то же импульсное однополярное напряжение, но частота его увеличится вдвое. Останется добавить сглаживающий конденсатор и посмотреть, что получится.



Двухполупериодный выпрямитель со сглаживающим конденсатором на изображении показывает, что переменное напряжение преобразовано в постоянное с пульсациями, которые можно убрать с помощью фильтров. Такая схема, состоящая из четырех диодов, стала классической и получила название **диодного** или **выпрямительного моста**.

Диодный мост



Полупроводниковые диоды

Прямое и обратное сопротивление диода постоянному току (*статическое сопротивление*) выражается следующими соотношениями:

$$r_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} / I_{\text{пр}0}; \quad r_{\text{обр}} = U_{\text{обр}0} / I_{\text{обр}0}.$$

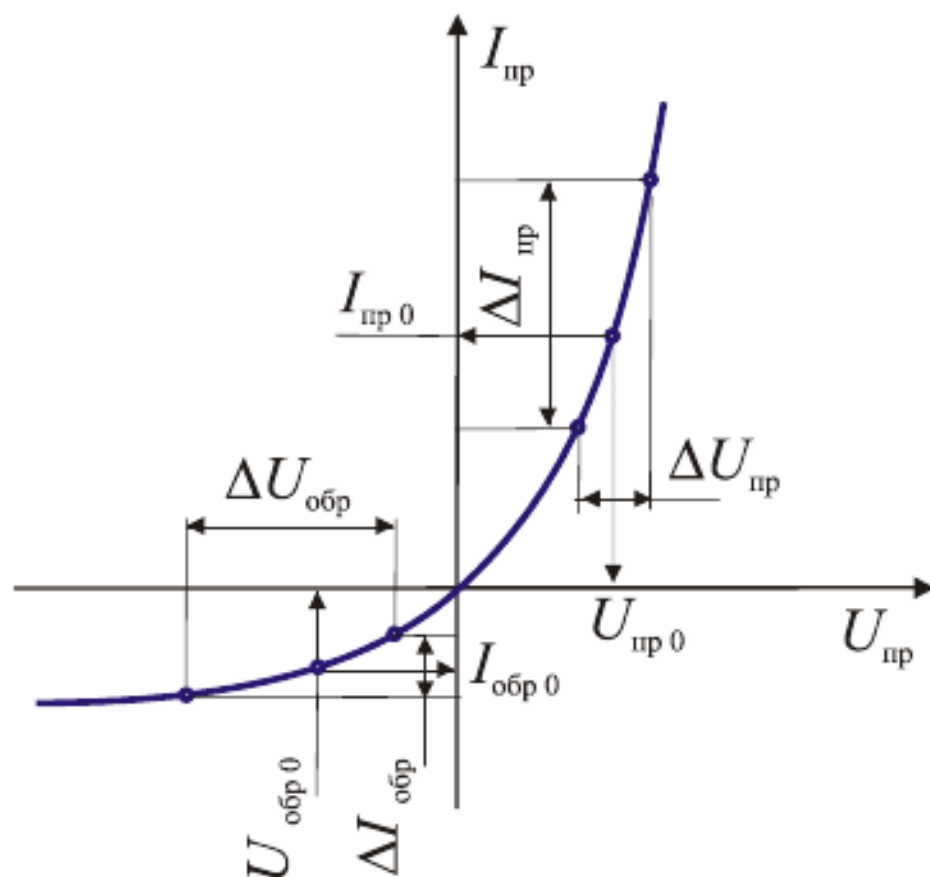


Рисунок — Определение статического и динамического сопротивлений по ВАХ

Прямое и обратное *дифференциальные* сопротивления (сопротивление по переменному току):

$$r_{\text{диф. пр}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}};$$

$$r_{\text{диф. обр}} = \Delta U_{\text{обр}} / \Delta I_{\text{обр}}.$$

В зависимости от того, на каком участке ВАХ расположена заданная рабочая точка, значение статического сопротивления может быть меньше, равно или больше значения динамического сопротивления. Статическое сопротивление диода всегда положительно, в то время как динамическое может быть и отрицательным.

Полупроводниковые диоды

Прямое и обратное сопротивление диода постоянному току (*статическое сопротивление*) выражается следующими соотношениями:

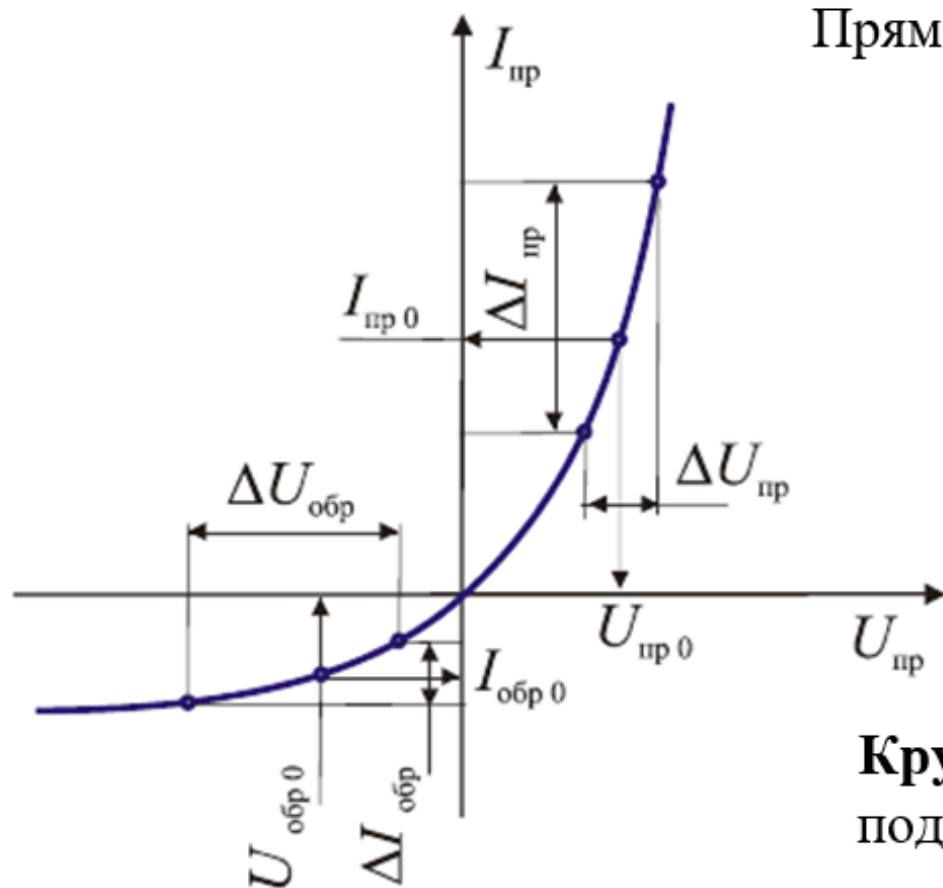
$$r_{\text{пр}} = U_{\text{пр } 0} / I_{\text{пр } 0}; \quad r_{\text{обр}} = U_{\text{обр } 0} / I_{\text{обр } 0}. \quad [\text{Ом}]$$

Прямая и обратная **проводимость** диода:

$$G_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{пр } 0}}{U_{\text{пр } 0}}; \quad G_{\text{обр}} = \frac{I_{\text{обр } 0}}{U_{\text{обр } 0}}. \quad [\text{См}]$$

Прямое и обратное *дифференциальные* сопротивления (сопротивление по переменному току):

$$r_{\text{диф. пр}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}; \quad r_{\text{диф. обр}} = \Delta U_{\text{обр}} / \Delta I_{\text{обр}}. \quad [\text{Ом}]$$



Крутизна ВАХ при прямом и обратном подключении диода:

$$S_{\text{пр}} = \frac{\Delta I_{\text{пр}}}{\Delta U_{\text{пр}}}; \quad S_{\text{обр}} = \frac{\Delta I_{\text{обр}}}{\Delta U_{\text{обр}}}. \quad [\text{См}]$$

Полупроводниковые диоды

На электропроводность полупроводников значительное влияние оказывает температура. При повышении температуры усиливается генерация пар носителей заряда, то есть увеличивается концентрация носителей и проводимость растет, поэтому свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры. Это показывают ВАХ, измеренные при различных температурах.

Прямой ток при нагреве диода растет не так быстро, как обратный. Это объясняется тем, что прямой ток возникает за счет примесной проводимости, а концентрация примесей не зависит от температуры.

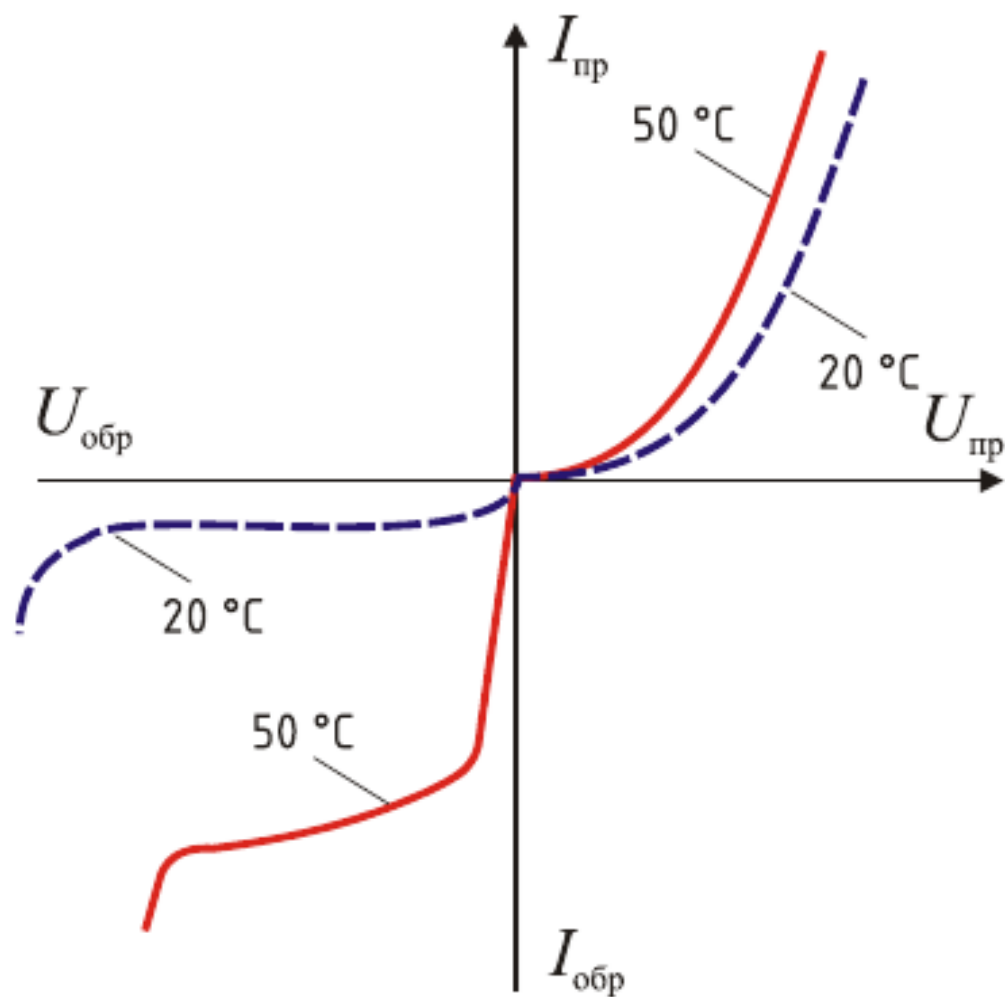
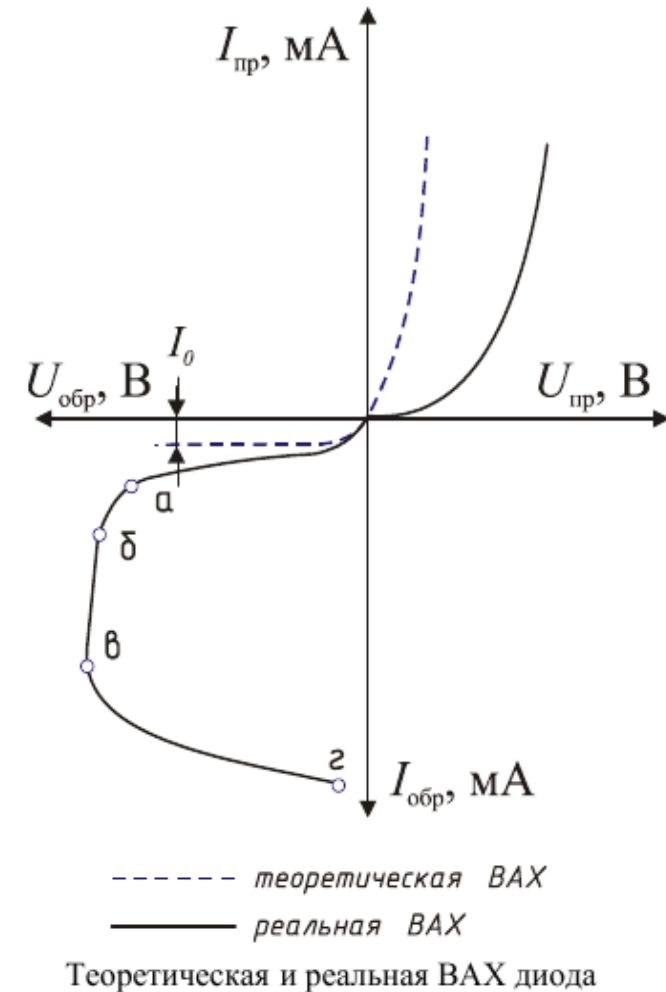


Рисунок — Влияние температуры на ВАХ

Полупроводниковые диоды

При некотором значении обратного напряжения возникает *пробой p - n -перехода*, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя резко уменьшается. Следует различать *электрический* и *тепловой пробой*. Электрический пробой (участок *абв*) является обратимым, то есть при этом пробое в переходе не происходит разрушение структуры полупроводника. При электрическом пробое обратный ток увеличивается при практически неизменном обратном напряжении и при уменьшении напряжения работоспособность диода восстанавливается. При тепловом пробое рост обратного тока сопровождается уменьшением напряжения.

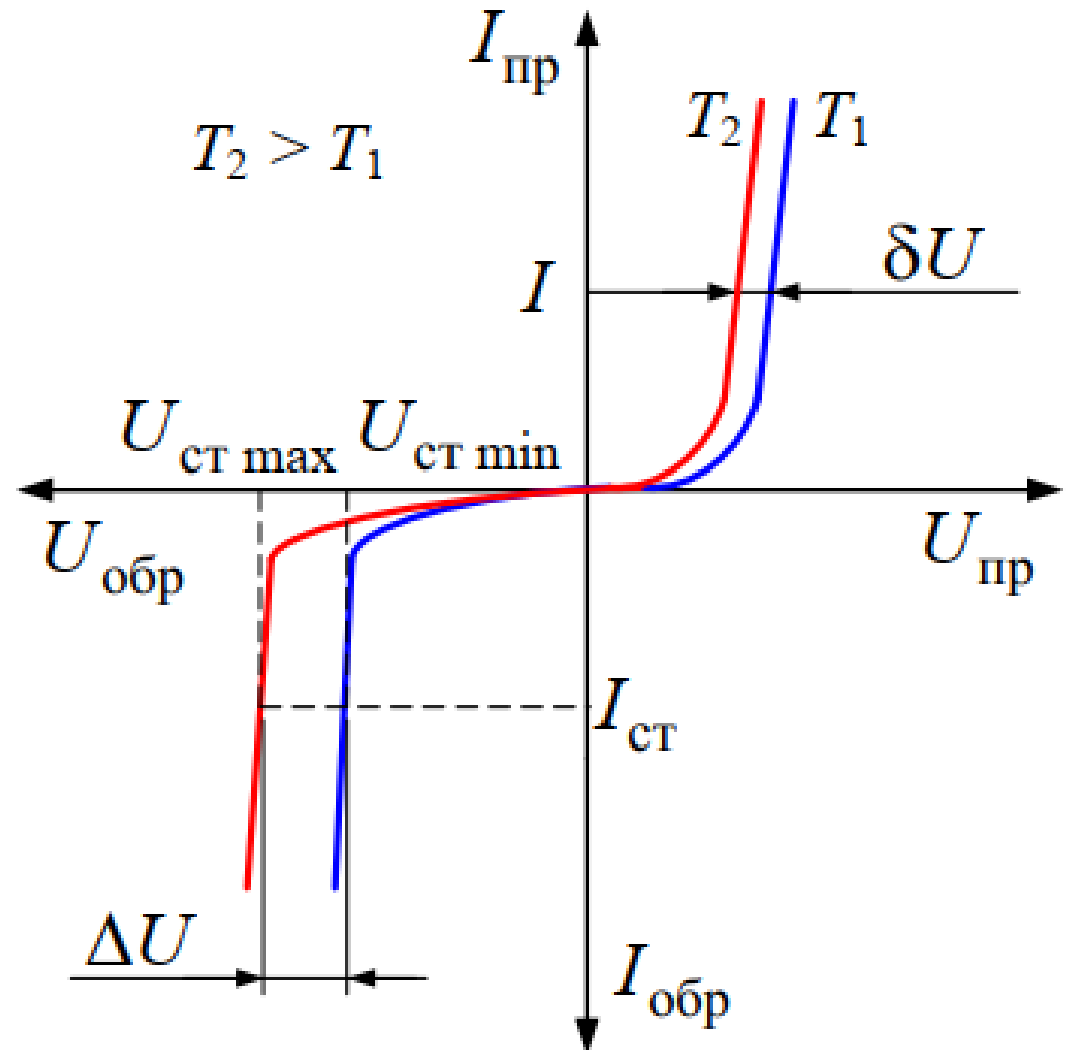
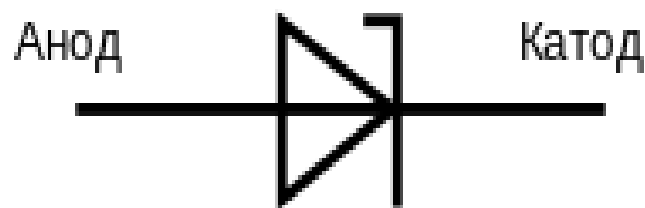
Области теплового пробоя соответствует участок *вг*. Тепловой пробой необратим, так как он сопровождается разрушением структуры вещества в месте p - n -перехода. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима p - n -перехода. Это означает, что количество теплоты, выделяющееся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количество теплоты, отводимое от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.



В режиме электрического пробоя работают специальные диоды – стабилитроны; для прочих видов диодов режим пробоя является аварийным. Если при пробое ток в цепи не ограничить, диод выходит из строя. В таких приборах при увеличении (по модулю) обратного напряжения практически сразу начинается тепловой пробой.

Стабилитроны

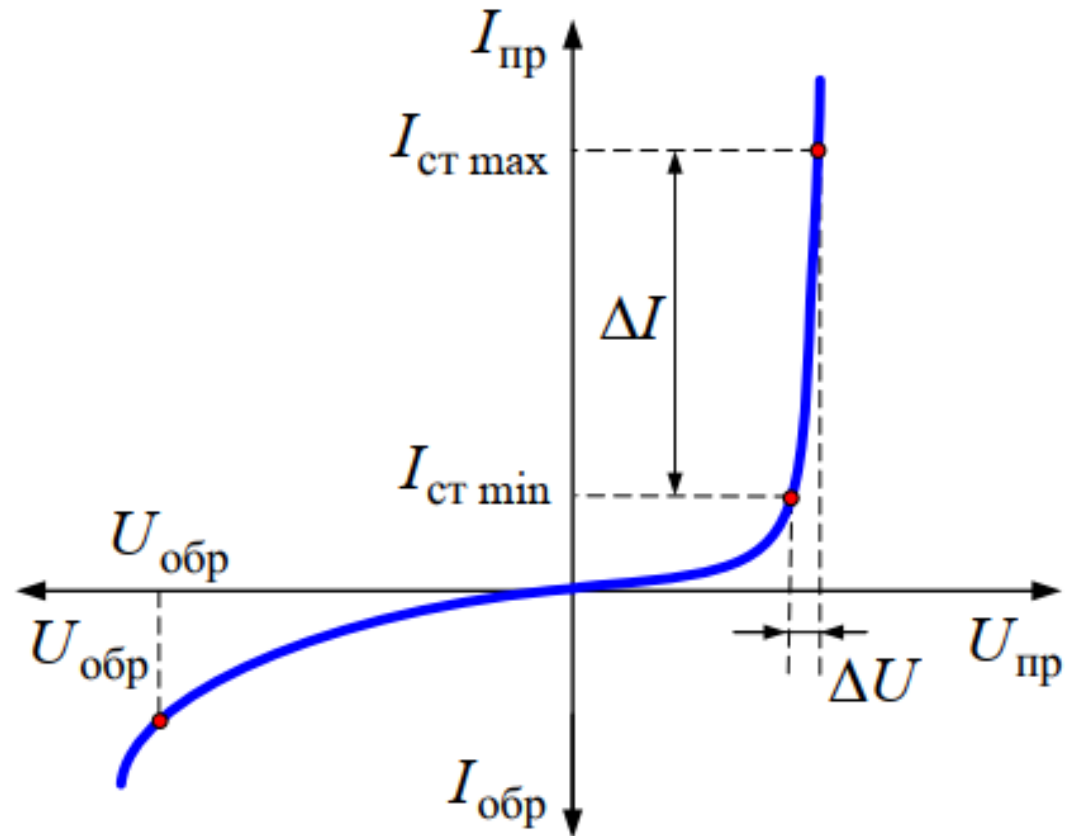
Стабилитроном называется полупроводниковый диод с точно заданным обратным пробивным напряжением, слабо зависящий от величины тока.



Стабисторы

Стабистор - это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения.

Стабилизацию постоянного напряжения можно также получить при использовании диода, включенного в прямом направлении, используя для этой цепи крутой участок прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ).



Полупроводниковые диоды

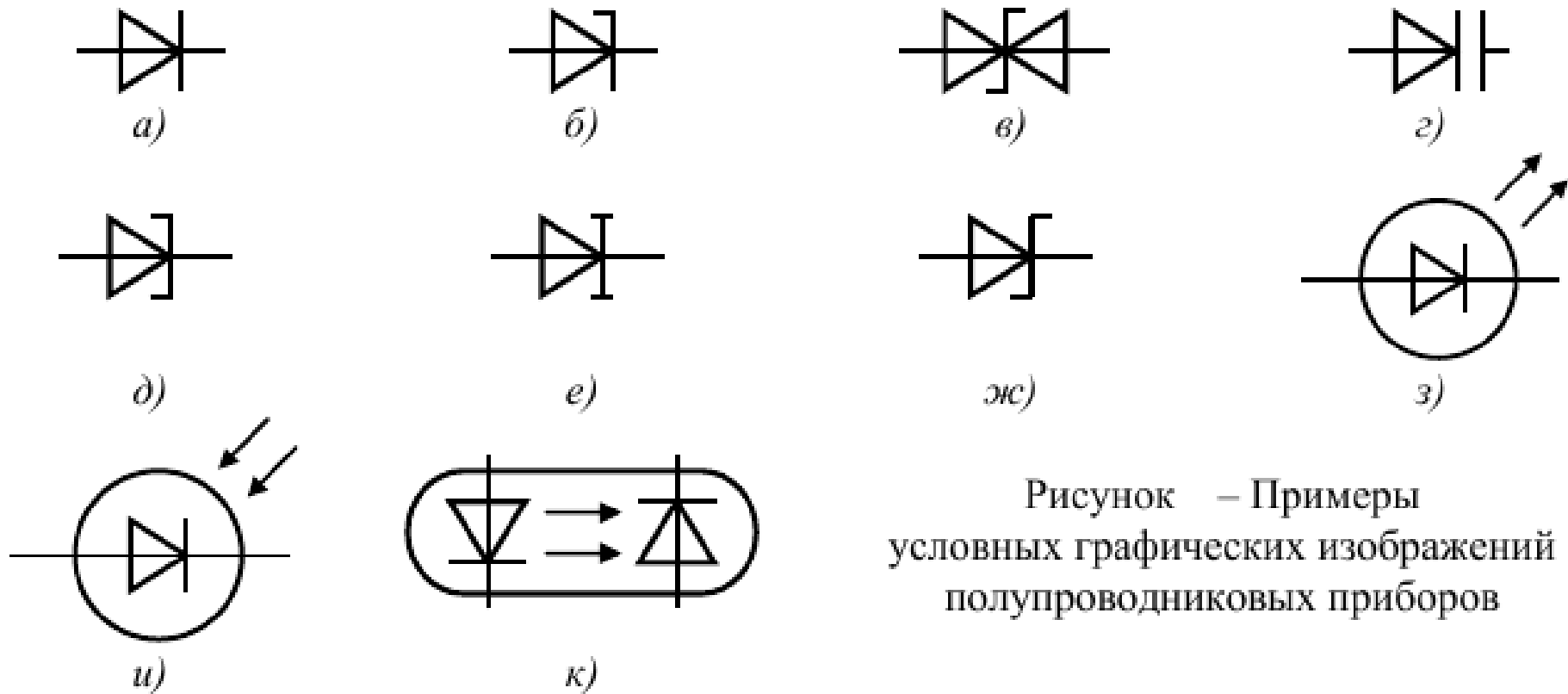


Рисунок – Примеры
условных графических изображений
полупроводниковых приборов

Полупроводниковыми стабилитронами (б) называются диоды, предназначенные для стабилизации напряжения.

В схемах двуполярной стабилизации напряжения применяется симметричный стабилитрон (в).

Варикапами (г) называются полупроводниковые диоды, в которых используется зависимость емкости p - n -перехода от обратного напряжения.

Варикап



Варикап — полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной емкости р-n перехода от обратного напряжения. Варикапы применяются в качестве элементов с электрически управляемой ёмкостью в схемах перестройки частоты колебательного контура, деления и умножения частоты, частотной модуляции, управляемых фазовращателей и др.

При отсутствии внешнего напряжения в р-n-переходе существуют потенциальный барьер и внутреннее электрическое поле. Если к диоду приложить обратное напряжение, то высота этого потенциального барьера увеличится. Внешнее обратное напряжение отталкивает электроны в глубь n-области, в результате чего происходит расширение обеднённой области р-n-перехода, которую можно представить как простейший плоский конденсатор, в котором обкладками служат границы области. В таком случае, в соответствии с формулой для ёмкости плоского конденсатора, с ростом расстояния между обкладками (вызванной ростом значения обратного напряжения) ёмкость р-n-перехода будет уменьшаться. Это уменьшение ограничено лишь толщиной базы, далее которой переход расширяться не может. По достижении этого минимума с ростом обратного напряжения ёмкость не изменяется.

Полупроводниковые диоды

Варикапами (ϱ) называются полупроводниковые диоды, в которых используется зависимость емкости p - n -перехода от обратного напряжения.



Рисунок 8 – Вольт-фарадная характеристика варикапа



ϱ)



δ)

Основной характеристикой варикапа служит вольт-фарадная характеристика (рисунок 8) – зависимость емкости варикапа от значения приложенного обратного напряжения.

К *туннельным* относят диоды, у которых за счет туннельного эффекта на прямой ветви ВАХ (рисунок 9, область 1) существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением (область 2). В области 3 ВАХ прибор полностью выходит из пробоя и ведет себя как обычный диод. Условное графическое обозначение представлено на рисунке δ . По своему назначению туннельные диоды подразделяют на *усилительные, генераторные, переключающие*.

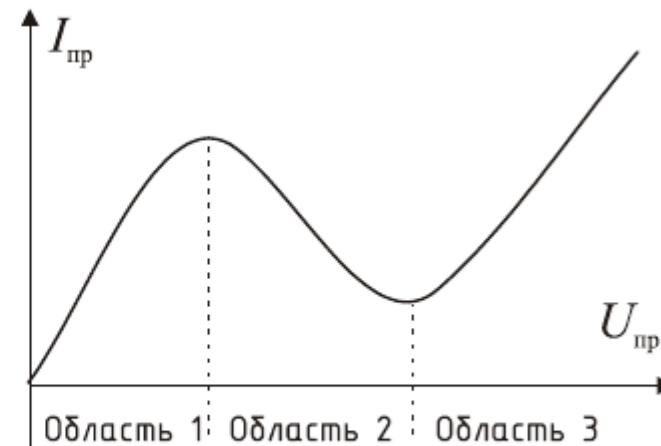


Рисунок 9 – ВАХ туннельного диода

Обращенными (рисунок *е*) называют полупроводниковые диоды, в которых вследствие туннельного эффекта проводимость при обратном напряжении значительно больше, чем при прямом. ВАХ обращенного диода представлена на рисунке 10.

Излучающие диоды (рисунок *з*) – полупроводниковые диоды, излучающие из *p-n*-перехода кванты энергии. По характеристике излучения делятся на две группы: с излучением в видимой области спектра – *светодиоды*; диоды с излучением в инфракрасной области спектра, получившие название *ИК-диоды*.

Фотодиоды (рисунок *и*) – полупроводниковые диоды, принцип действия которых основан на использовании внутреннего фотоэффекта – генерации в полупроводнике под действием квантов света свободных носителей заряда.

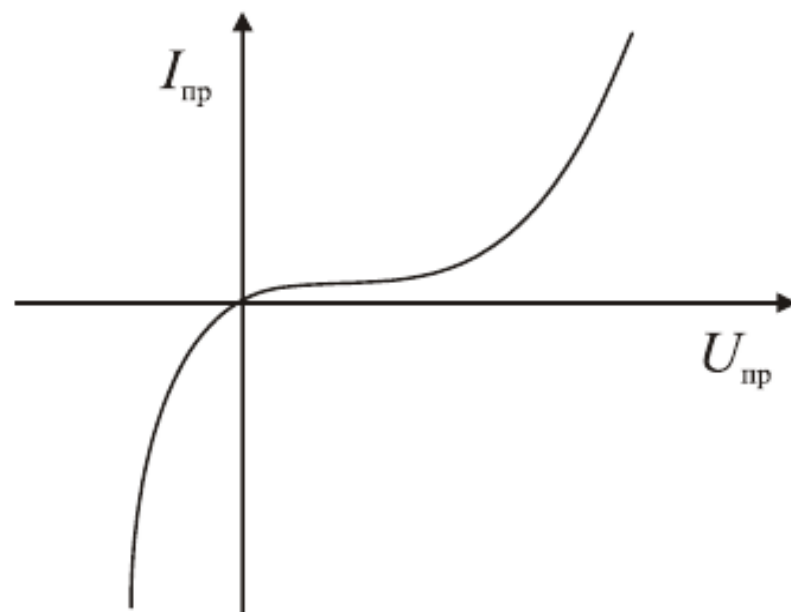
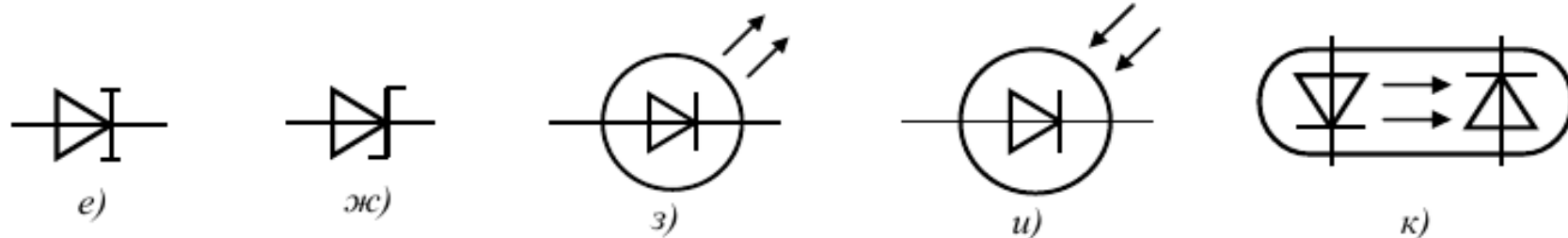


Рисунок 10 – ВАХ обращенного диода

Оптрон (*оптопара*) – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенные в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически или одновременно обеими связями (рисунок *к*).



Система обозначениях диодов

Для маркировки полупроводниковых диодов используется буквенно-цифровая система условных обозначений.

Первый элемент – буква или цифра, характеризует используемый материал: Г(1) – германий (Ge); К(2) – кремний (Si); А(3) – галлий (Ga) и его соединения; И(4) – индий (In) и его соединения.

Второй элемент – буква, характеризует функциональное назначение диода: Д – выпрямительный; В – варикап; И – туннельный и обращенный; С – стабилитрон и стабистор; Л – излучающий светодиод.

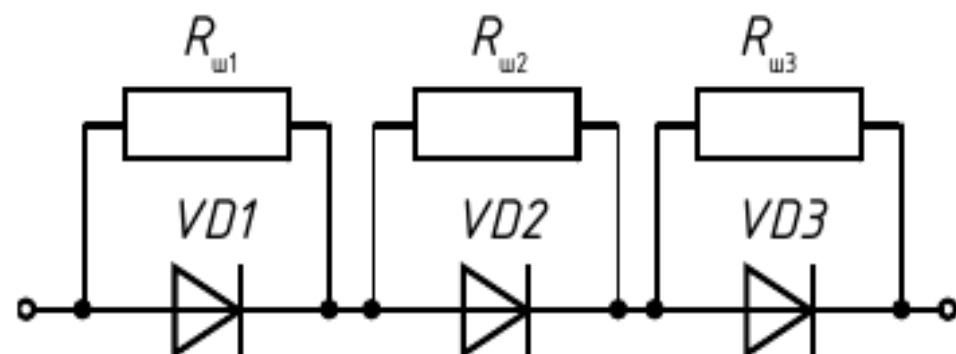
Третий элемент – цифра, характеризует назначение диода и содержит информацию о специальных параметрах диода. Например, для диодов группы Д: 1 – выпрямительные маломощные (ток до 300 мА); 2 – выпрямительные средней мощности (ток до 10 А); 3 – диоды большой мощности (ток свыше 10 А); 4–9 – диоды импульсные с различным временем восстановления.

Четвертый элемент (2–3 цифры) – порядковый номер разработки (для стабилитрона – напряжение стабилизации в десятых долях вольта).

Пятый элемент – буква, характеризует группу диодов с различными параметрами.

Последовательное и параллельное соединения

При выпрямлении более высокого, чем предельное для одиночного диода, напряжения можно соединить диоды последовательно, чтобы обратное напряжение на каждом диоде не превышало предельного. Но вследствие разброса обратных сопротивлений у различных экземпляров диодов одного и того же типа на отдельных диодах обратное напряжение может оказаться выше предельного, что повлечет пробой диодов.



Для того чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами (рисунок). Сопротивления $R_{ш}$ резисторов должны быть одинаковы и значительно

Рисунок – Последовательное соединение диодов

меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов. Однако $R_{ш}$ не должно быть слишком малым, чтобы чрезмерно не возрос ток при обратном напряжении, то есть чтобы не ухудшилось выпрямление.

Параллельное соединение диодов (рисунок) применяют в том случае, когда нужно получить прямой ток, бóльший предельного тока одного диода. Но если диоды одного типа просто соединить параллельно, то вследствие неодинаковости вольт-амперных характеристик они окажутся различно нагруженными и в некоторых ток будет больше предельного. Различие в прямом токе у однотипных диодов может составлять десятки процентов.

Практически редко включают параллельно больше трех диодов. Уравнительные резисторы с сопротивлением в десятые доли или единицы ом обычно подбирают экспериментально до получения в рабочем режиме одинаковых токов в диодах. Иногда включают уравнительные резисторы с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением R_y . Но в этом случае происходит дополнительное падение напряжения на R_y , превышающее в несколько раз прямое напряжение диодов, и КПД, конечно, снижается. Если нежелательно включать уравнительные резисторы, то надо подобрать диоды с примерно одинаковыми характеристиками. Однако рекомендуется по возможности не прибегать к параллельному соединению диодов.

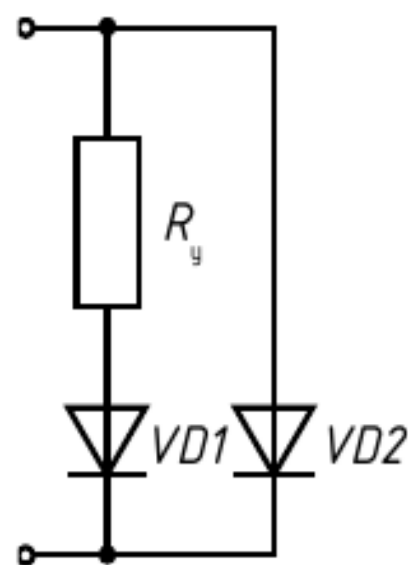


Рисунок – Параллельное
соединение диодов

Транзисторы

Транзистор — это компонент электрической цепи из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, способный от небольшого входного сигнала управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов. В настоящее время транзистор является основой схемотехники подавляющего большинства электронных устройств и интегральных микросхем.

Различают два вида транзисторов: **униполярные (полевые)** и **биполярные**.

В **биполярных** транзисторах носителями зарядов являются и электроны, и дырки, т.е. частицы с электрическим зарядом обоих знаков. Биполярный транзистор управляется изменением тока.

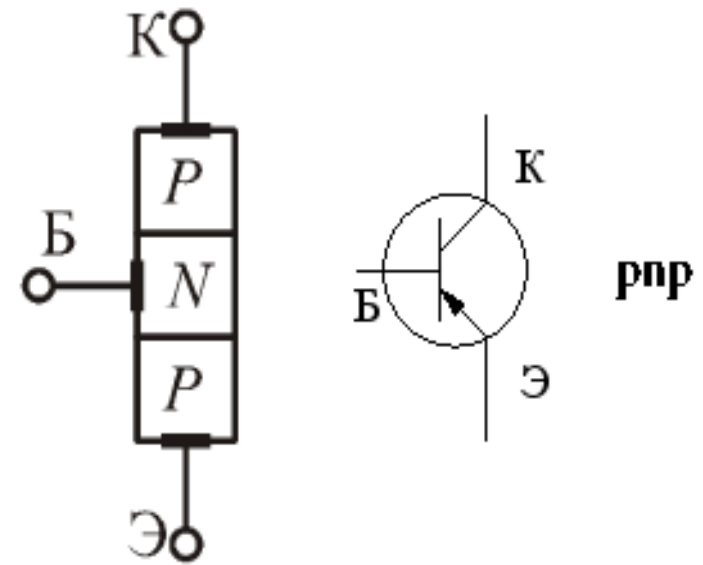
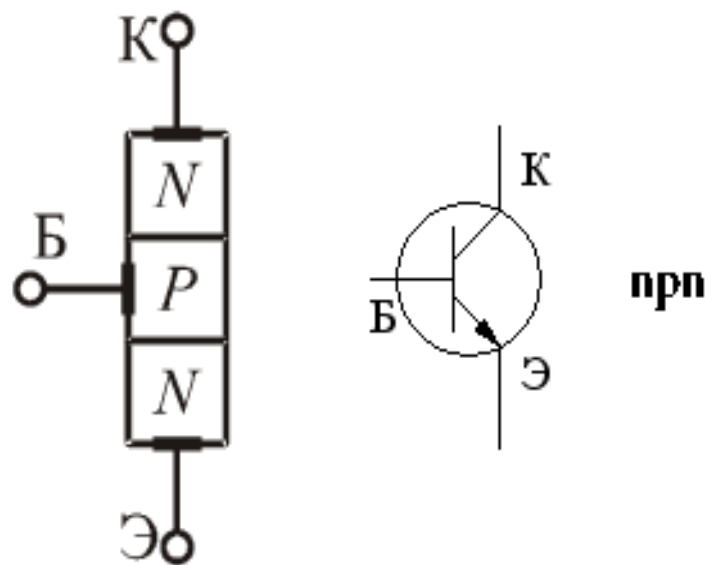
В **униполярных (полевых)** транзисторах основными носителями заряда могут быть частицы только какого-либо одного знака, т.е. либо электроны, либо дырки. Полевой транзистор, в отличие от биполярного, управляется напряжением, а не током.

В настоящее время в аналоговой технике доминируют биполярные транзисторы. В цифровой технике, в составе микросхем (логика, память, процессоры, компьютеры, цифровая связь и т.п.), напротив, биполярные транзисторы почти полностью вытеснены полевыми.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – трёхполюсный полупроводниковый прибор с двумя p – n -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

В зависимости от последовательности чередования n - и p -областей различают транзисторы n – p – n - и p – n – p -типов. На практике используются транзисторы обоих типов; принцип действия их одинаков. Основными носителями заряда в транзисторе n – p – n -типа являются электроны, а в p – n – p -транзисторе – дырки. Так как в кремнии электроны обладают большей подвижностью, чем дырки, то чаще используют транзисторы n – p – n -типа.



Биполярные транзисторы

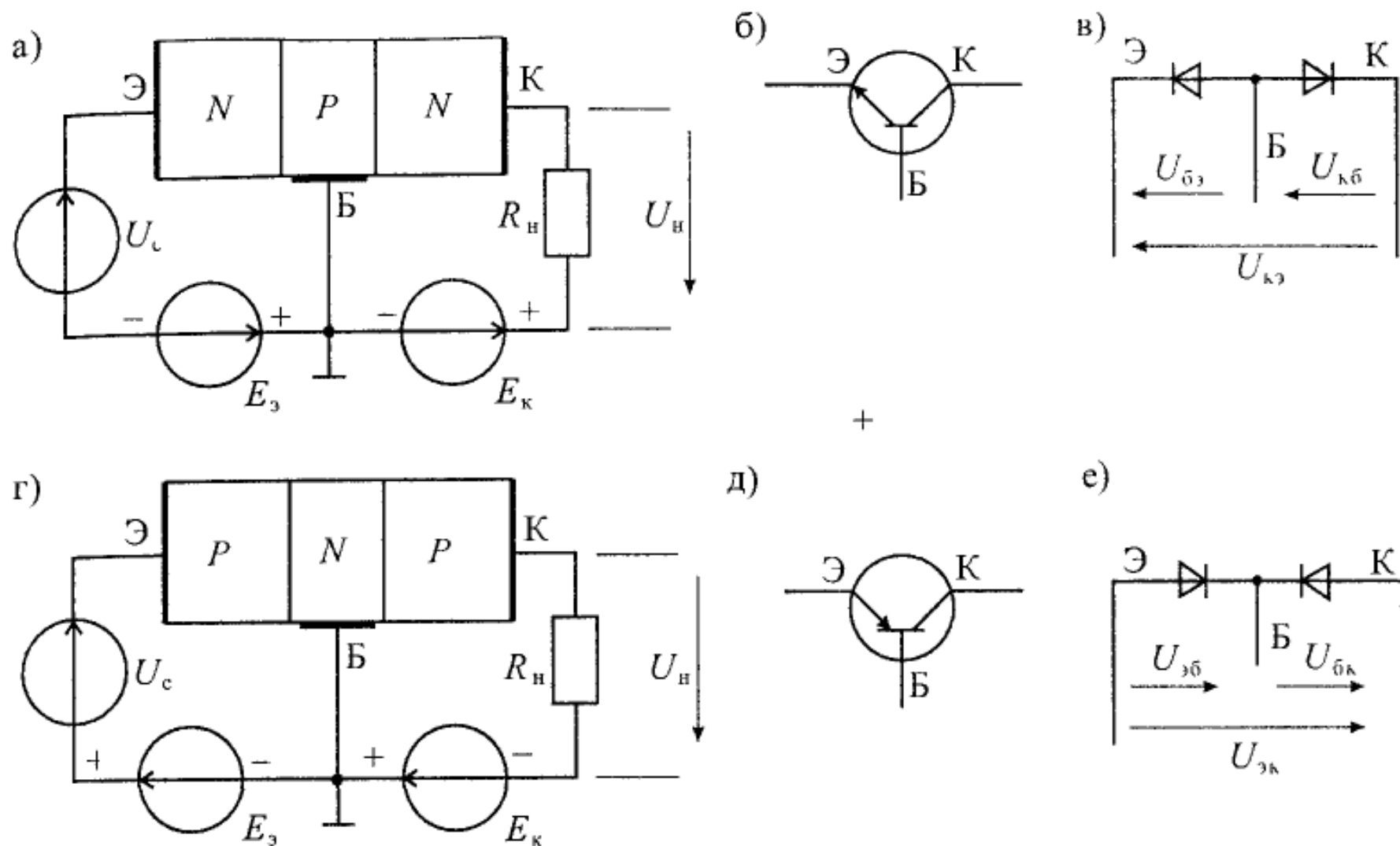
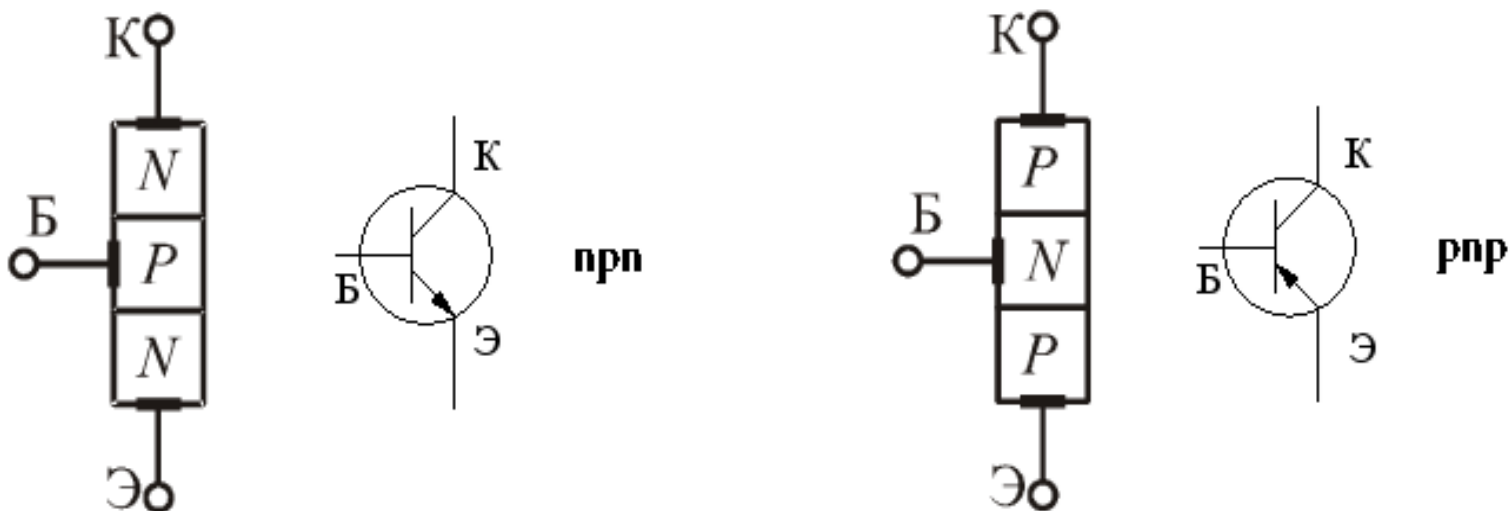


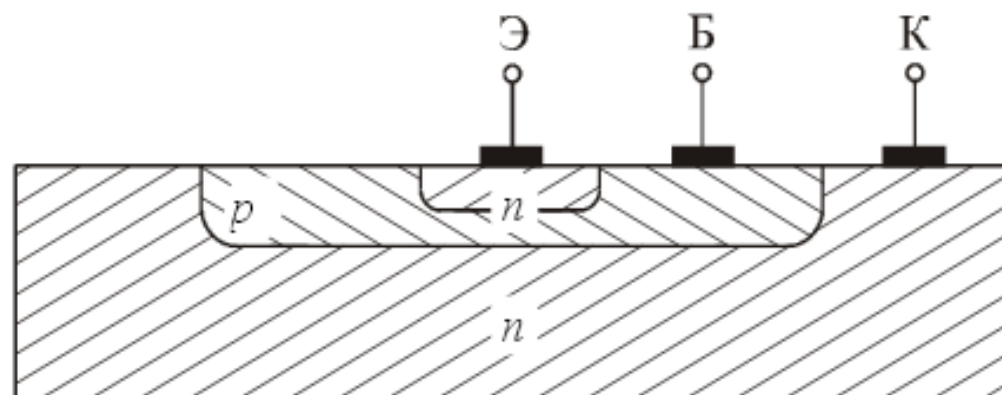
Рис. Устройство *n-p-n*-транзистора (а), его схематическое изображение (б) и схема замещения (в).
Устройство *p-n-p*-транзистора (г), его схематическое изображение (д) и схема замещения (е)

Биполярные транзисторы



Центральная область транзистора, называемая *базой*, заключена между *коллектором* и *эмиттером*. Толщина базы мала и не превышает нескольких микрон. Переход между базой и эмиттером называется *эмиттерным*, а между базой и коллектором – *коллекторным*.

Структура реального транзистора несимметрична (рис.). Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем эмиттерного.



Биполярные транзисторы

Каждый из p – n -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора:

- 1) *активный (усиления)*. Эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) *отсечки*. Оба перехода смещены в обратном направлении;
- 3) *насыщения*. Оба перехода смещены в прямом направлении;
- 4) *инверсный*. Эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

Рассмотрим подробнее каждый из режимов работы транзистора на примере прибора n – p – n -типа.

Биполярные транзисторы

Активный режим. Так как эмиттерный переход смещён в прямом направлении, происходит инжекция носителей из эмиттера в базу. Поскольку область эмиттера легирована сильнее, чем область базы, поток электронов преобладает над потоком дырок. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Коллекторный переход смещён в обратном направлении, поэтому электроны, достигшие коллекторного перехода, втягиваются полем перехода в коллектор. Происходит *экстракция* электронов в коллектор.

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны соотношениями:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\text{з}}; \quad I_{\text{з}} = I_{\kappa} + I_{\text{б}}.$$

Множитель α называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*.

У интегральных транзисторов $\alpha = 0.99\text{--}0.995$.

$$I_{\kappa} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\text{б}} = \beta I_{\text{б}}.$$

Множитель β называют *коэффициентом усиления тока базы*. Так как величина α близка к 1, то β может принимать большие значения. Для интегральных $n\text{--}p\text{--}n$ -транзисторов оно составляет от 50 до 200.

Биполярные транзисторы

Таким образом, работа биполярного транзистора в активном режиме основана на сочетании процессов инжекции носителей через один переход и собирания их на другом переходе. Концентрация примесей в эмиттере значительно больше, чем в базе и коллекторе. Поэтому электронная составляющая тока $n-p-n$ -транзистора является преобладающей. В активном режиме ток коллектора управляется током эмиттера (или напряжением эмиттерного перехода) и почти не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поскольку последний смещен в обратном направлении. Активный режим является основным, если транзистор используется для усиления сигналов.

Биполярные транзисторы

Режим отсечки. Инжекция основных носителей в область базы наблюдается в том случае, если эмиттерный переход смещён в прямом направлении. Если напряжение $U_{бэ}$ меньше пороговой величины (0.6 В для кремниевых транзисторов), заметной инжекции носителей в базу не наблюдается. При этом $I_э = I_б = 0$. Следовательно, ток коллектора также равен нулю. Таким образом, для режима отсечки справедливы условия: $U_{бэ} < 0.6$ В или $I_б = 0$.

Режим насыщения. Если оба перехода смещены в прямом направлении, носители инжектируются в базу как из эмиттера, так и из коллектора. В этом режиме ток коллектора не зависит от тока базы. Коллекторный переход отпирается, если напряжение коллектор-база $U_{кб} < -0.4$ В. При этом напряжение коллектор-эмиттер не превышает напряжение насыщения: $U_{кэ} \leq U_{кэ\text{нас}}$. Значение $U_{кэ\text{нас}}$ находится в пределах 0,2–0,3 В.

Режимы отсечки и насыщения биполярных транзисторов являются основными, когда они работают в ключевых и логических схемах.

Биполярные транзисторы

Инверсный режим. Биполярный транзистор является симметричным прибором в том смысле, что область полупроводника с одним типом проводимости располагается между двумя областями с другим типом проводимости. Поэтому транзистор можно включить так, что коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. При этом эмиттер играет роль коллектора, а коллектор – эмиттера. Такой режим работы биполярного транзистора называют *инверсным*. Однако коллектор и эмиттер изготавливают неодинаковыми, с тем, чтобы наибольшее усиление достигалось в активном режиме. В инверсном режиме усиление транзистора невелико. Такой режим используют в некоторых цифровых схемах.

Биполярные транзисторы

Транзистор, в схему включают так, что один из его выводов является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод является общим, различают **три схемы подключения биполярного транзистора**:

- с общей базой (ОБ),
- с общим коллектором (ОК),
- с общим эмиттером (ОЭ).

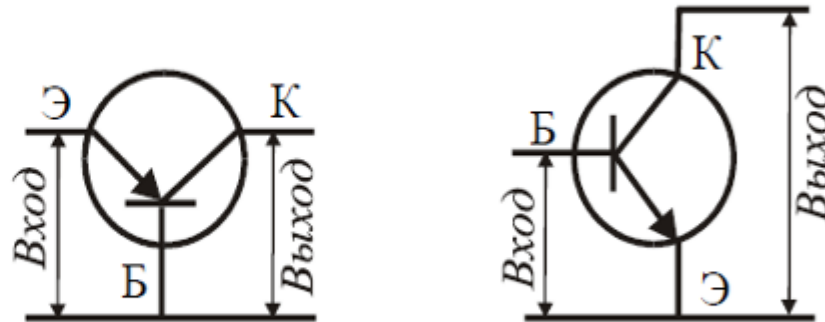


Схема включения транзистора с **общей базой** характеризуется усилением по напряжению, отсутствием усиления по току, малым входным сопротивлением и большим выходным сопротивлением. Такая схема включения не дает значительного усиления, но обладает хорошими частотными и температурными свойствами.

Схема включения транзистора с **общим коллектором** характеризуется усилением по току, отсутствием усиления по напряжению, большим входным сопротивлением и малым выходным сопротивлением. Такая схема чаще называется эмиттерным повторителем, т. к. коэффициент усиления по току почти такой же, как и в схеме с ОЭ.

Наибольшее распространение получила схема включения с **общим эмиттером**. В схеме включения транзистора с общим эмиттером обеспечивается усиление по напряжению, по току, по мощности. Такая схема имеет средние значения входного и выходного сопротивления по сравнению со схемами включения с общей базой и общим коллектором. К достоинствам схемы с ОЭ можно отнести удобство питания ее от одного источника, поскольку на базу и коллектор подаются питающие напряжения одного знака. К недостаткам относят худшие частотные и температурные свойства (например, в сравнении со схемой с ОБ). С повышением частоты усиление в схеме с ОЭ снижается.

Биполярные транзисторы

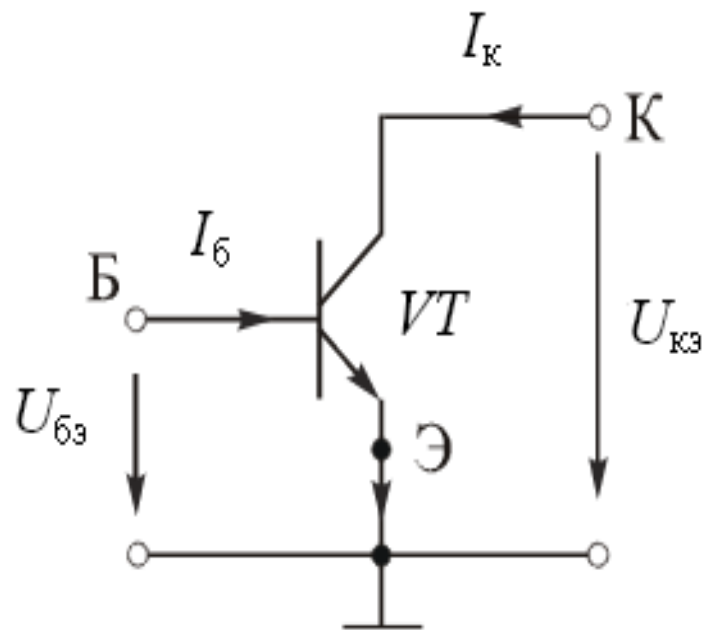
При любой схеме включения транзистора, полярность включения источников питания должна быть выбрана такой, чтоб эмиттерный переход (переход Э-Б) был включен в прямом направлении, т.е. отрицательный зажим источника питания надо присоединить к области *n*, а положительный — к области *p*. Таким же образом коллекторный переход (Б-К) должен быть смещен в обратном направлении. Это означает, что коллектор *p-n-p*-транзистора присоединяется к отрицательному зажиму источника питания, а коллектор *n-p-n*-транзистора - к положительному.

Сравнительные характеристики схем на биполярных транзисторах приведены в таблице:

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
Коэффициент усиления по току	Десятки-сотни	Немного меньше 1	Десятки-сотни
Коэффициент усиления по напряжению	Десятки-сотни	Десятки-сотни	Немного меньше 1
Коэффициент усиления по мощности	Сотни - десятки тысяч	Десятки-сотни	Десятки-сотни
Входное сопротивление	Сотни Ом - единицы кОм	Единицы-десятки Ом	Десятки - сотни кОм
Выходное сопротивление	Единицы - десятки кОм	Сотни кОм - единицы МОм	Сотни Ом - единицы кОм

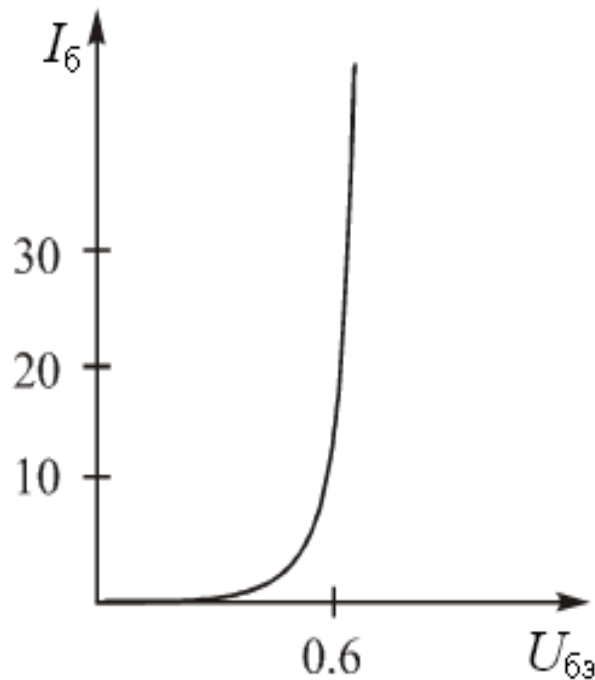
Биполярные транзисторы

Рассмотрим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис.). Название «схема с общим эмиттером» объясняется тем, что эмиттер является общим для входной и выходной цепей. Входными величинами являются напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ и ток базы $I_б$, а выходными – напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ и ток коллектора $I_к$.



Рассмотрим вольт-амперные характеристики биполярного транзистора и укажем на них области отсечки, насыщения и усиления.

Биполярные транзисторы



Входная характеристика биполярного транзистора – это зависимость тока базы $I_б$ от напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$:

$$I_б = f(U_{бэ}) \Big|_{U_{кэ} = \text{const}}.$$

Входная характеристика кремниевого биполярного транзистора показана на рис. Если эмиттерный переход смещён в прямом направлении, то входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода.

Биполярные транзисторы

Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{кз}$ при фиксированном токе базы:

$$I_K = f(U_{кз}) | I_6 = \text{const}.$$

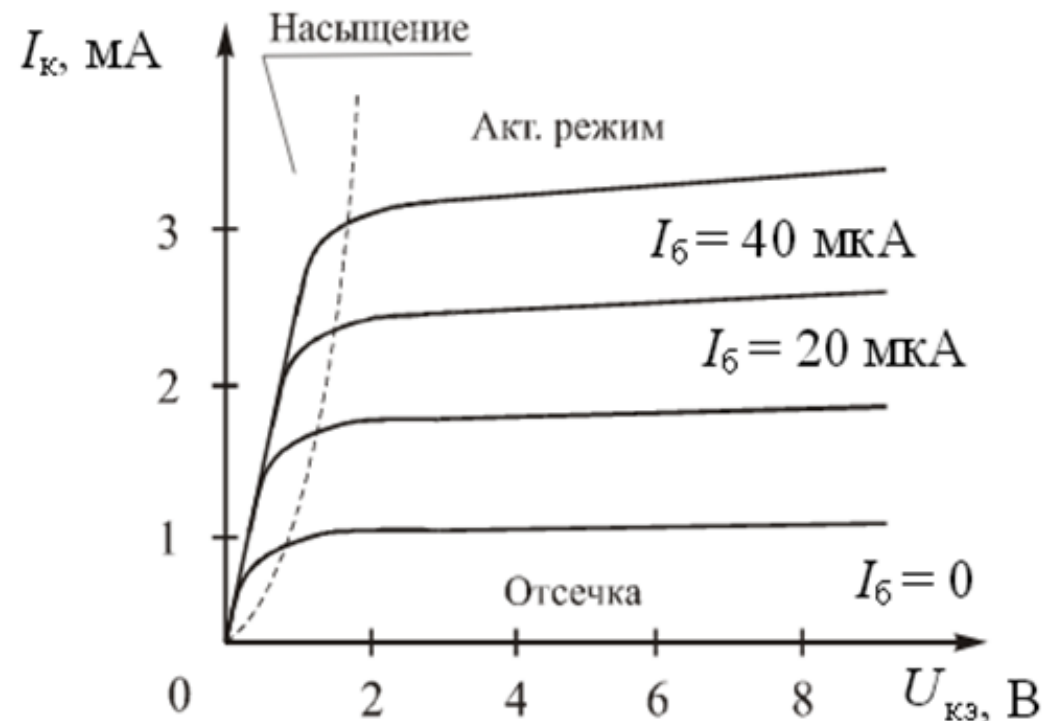
Выходная характеристика показана на рис.

Область отсечки лежит ниже кривой $I_6 = 0$.

В области насыщения величина напряжения

$U_{кз}$ столь мала, что становится недостаточной для создания обратного смещения на коллекторном переходе.

В режиме насыщения ток коллектора не зависит от тока базы и все ветви выходной характеристики сливаются в одну.

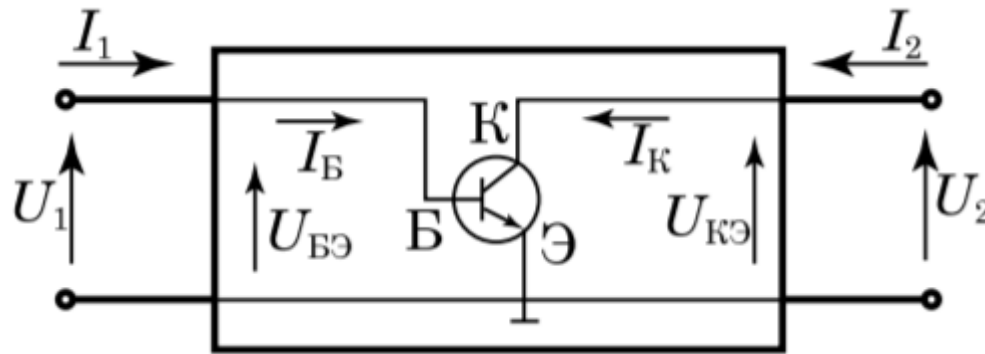


Биполярные транзисторы

В активной области ток коллектора очень слабо зависит от напряжения коллектор-эмиттер и пропорционален току базы, а ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что коллекторный переход смещён в обратном направлении. Таким образом, в активном режиме биполярный транзистор ведёт себя как источник тока, управляемый током базы.

Транзистор как четырехполюсник

При расчете электрических цепей биполярный транзистор можно представить в виде четырехполюсника:

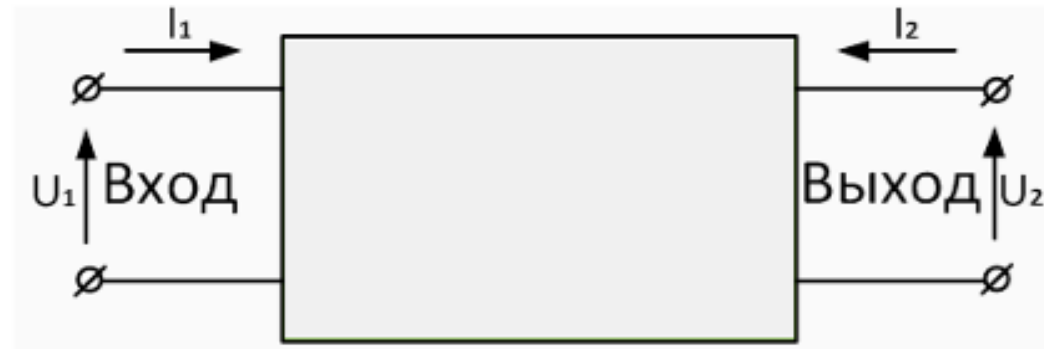


Для расчёта четырехполюсников применяются Z-параметры (имеют размерность сопротивления), Y-параметры (размерность проводимости) и h-параметры (смешанная размерность).

При расчёте усилителей на биполярных транзисторах наибольшее распространение получили **h-параметры**, связывающие токи и напряжения с помощью следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$$

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}I_2$$



$$I_2 = h_{21}U_1 + h_{22}U_2.$$

Значения коэффициентов в уравнениях для h-параметров имеют следующий вид:

- $h_{11} = U_1/I_1$ при $U_2 = 0$ – **входное сопротивление** при коротком замыкании на выходе;
- $h_{22} = I_2/U_2$ при $I_1 = 0$ – **выходная проводимость** при холостом ходе во входной цепи;
- $h_{12} = U_1/U_2$ при $I_1 = 0$ – **коэффициент обратной связи** при холостом ходе во входной цепи;
- $h_{21} = I_2/I_1$ при $U_2 = 0$ – **коэффициент передачи тока** при коротком замыкании на выходе.

Транзистор как четырехполюсник

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$$

Поскольку для усилителя входными и выходными сигналами являются приращения соответствующих токов и напряжений, запишем эту систему уравнений в следующем виде:

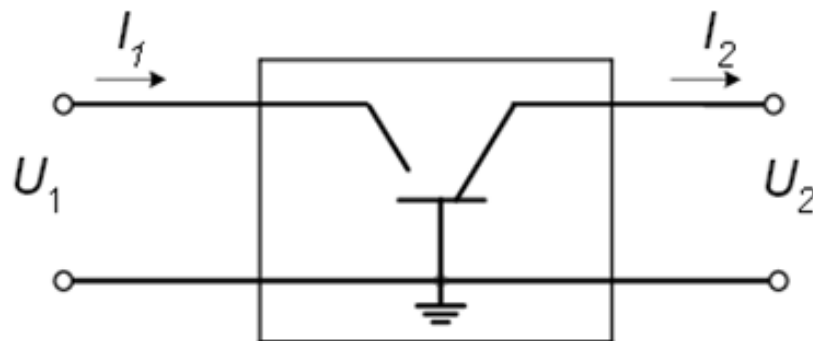
$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2 \end{cases}$$

Приравнивая к нулю ΔI_1 (режим холостого хода на входе) и ΔU_2 (режим короткого замыкания на выходе) мы сможем рассчитать h-параметры:

$$\begin{aligned} h_{12} &= \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}, & h_{22} &= \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}, \\ h_{11} &= \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}, & h_{21} &= \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что если изменение величины равно нулю, то эта величина не изменяется, т.е. параметры h_{12} и h_{22} рассчитываются при постоянном значении тока на входе ($I_1 = \text{const}$), а параметры h_{11} и h_{21} – при постоянном значении напряжения на выходе ($U_2 = \text{const}$).

Транзистор в виде
активного четырехполюсника:



Физический смысл h-параметров:

1. h_{11} – сопротивление транзистора на входных зажимах по переменной составляющей тока, Ом, определяется в режиме К.З. со стороны выхода:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \quad (\text{при } U_2 = \text{const});$$

2. h_{22} – проводимость транзистора на выходных зажимах транзистора, См, определяется в режиме Х.Х. со стороны входа:

$$h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2 \quad (\text{при } I_1 = \text{const});$$

3. h_{21} – коэффициент передачи тока со входа на выход, определяется в режиме К.З. со стороны выхода:

$$(h_{2106} \approx \alpha; h_{2103} \approx \beta); \quad h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1 \quad (\text{при } U_2 = \text{const});$$

4. h_{12} – коэффициент внутренней обратной связи, показывает, какая часть выходного напряжения через элемент внутренней связи попадает на вход (определяется в режиме Х.Х. со стороны входа и обычно $h_{12} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$):

$$h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2 \quad (\text{при } I_1 = \text{const}).$$

Биполярные транзисторы

h -параметры позволяют в расчетах использовать обобщенную схему замещения транзистора.

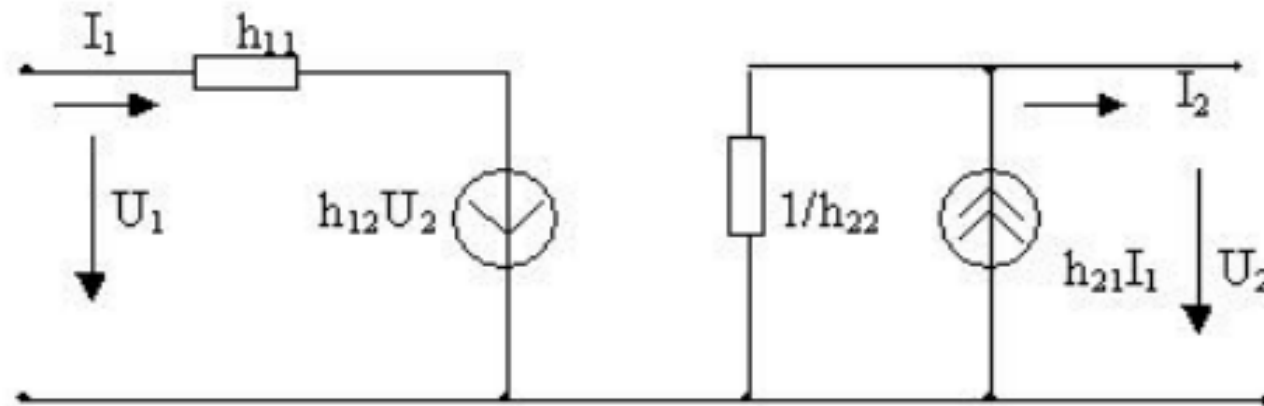


Рис. 1. Обобщенная схема замещения биполярного транзистора

Упрощенные (пренебрегаем h_{12}) схемы замещения транзисторов для h -параметров будут иметь вид, представленный на рис. 2.

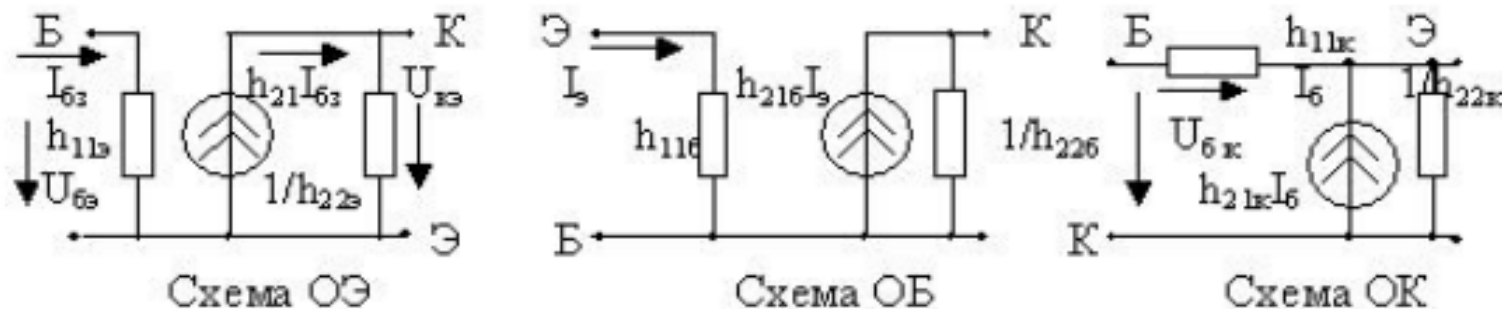
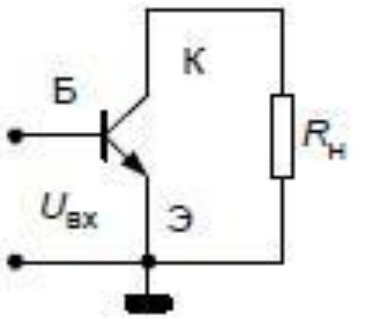
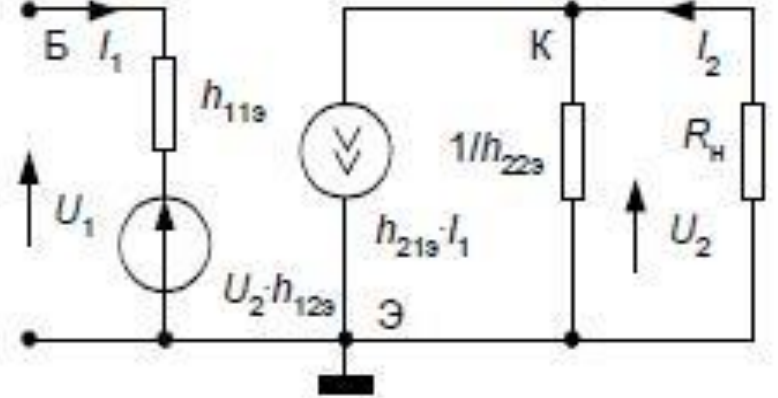
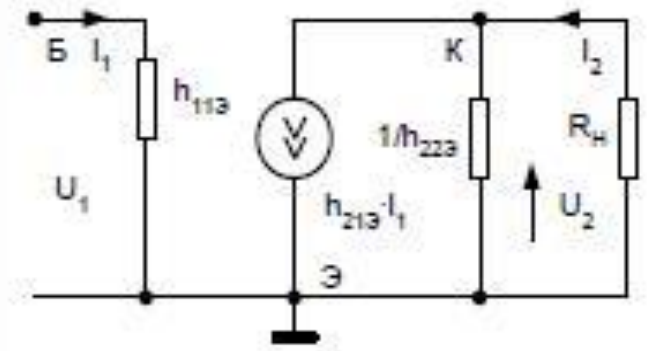
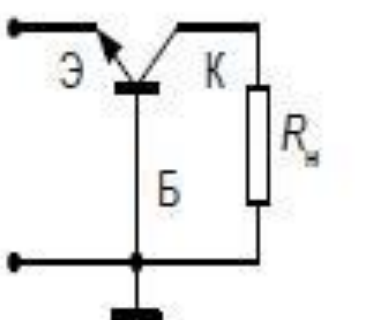
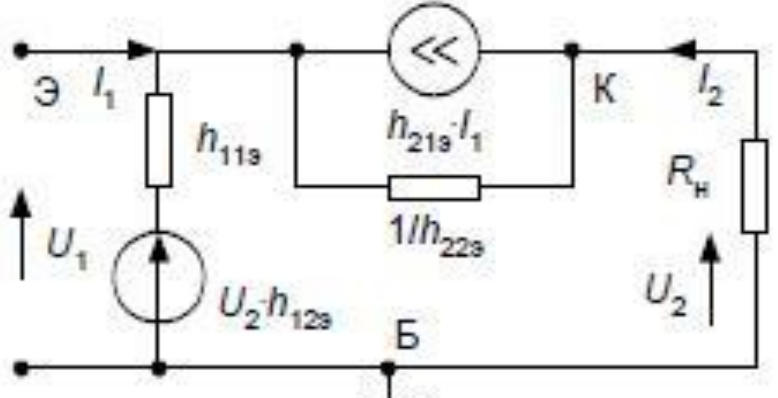
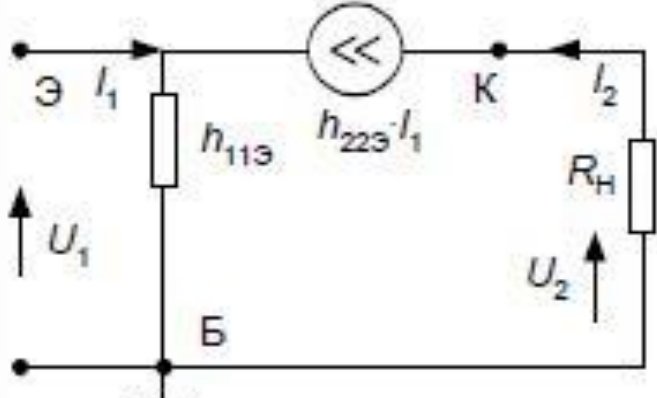
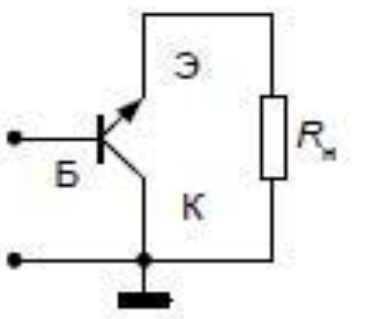
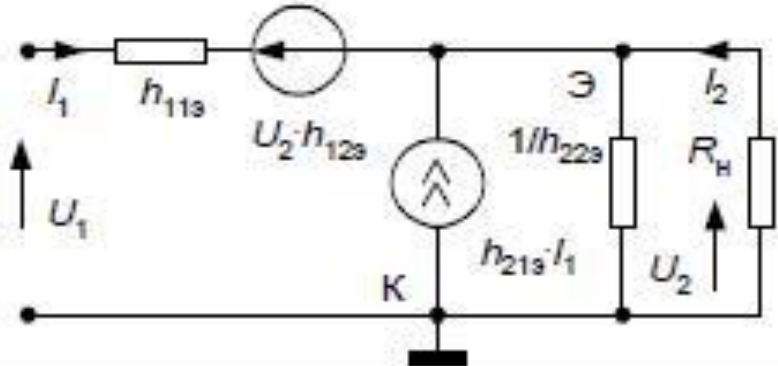
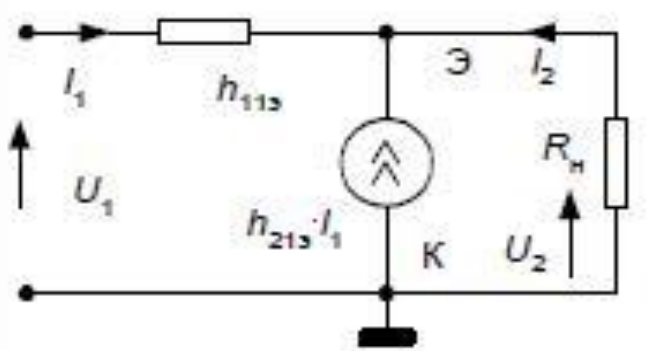


Рис. 2. Схемы замещения транзисторов в h -параметрах

Биполярные транзисторы

Переход от h -параметров схемы с общим эмиттером к h -параметрам схемы с общей базой или с общим коллектором можно осуществить по следующим формулам:

h -параметры схемы с общим эмиттером	h -параметры схемы с общей базой	h -параметры схемы с общим коллектором
$h_{11э}$	$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 - h_{22э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{11к} = h_{11э}$
$h_{12э}$	$h_{12б} = \frac{\Delta h_э - h_{12э}}{1 + h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{12к} = 1 - h_{12э}$
$h_{21э}$	$h_{21б} = \frac{-(h_{21э} + \Delta h_э)}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{21к} = -(1 + h_{21э})$
$h_{22э}$	$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{22к} = h_{22э}$
$\Delta h_э = h_{11э} \cdot h_{22э} - h_{12э} \cdot h_{21э}$		

<p>Схема включения транзистора</p>	<p>Эквивалентная электрическая схема (h-модель)</p>	<p>Упрощенная эквивалентная электрическая схема</p>
		
		
		

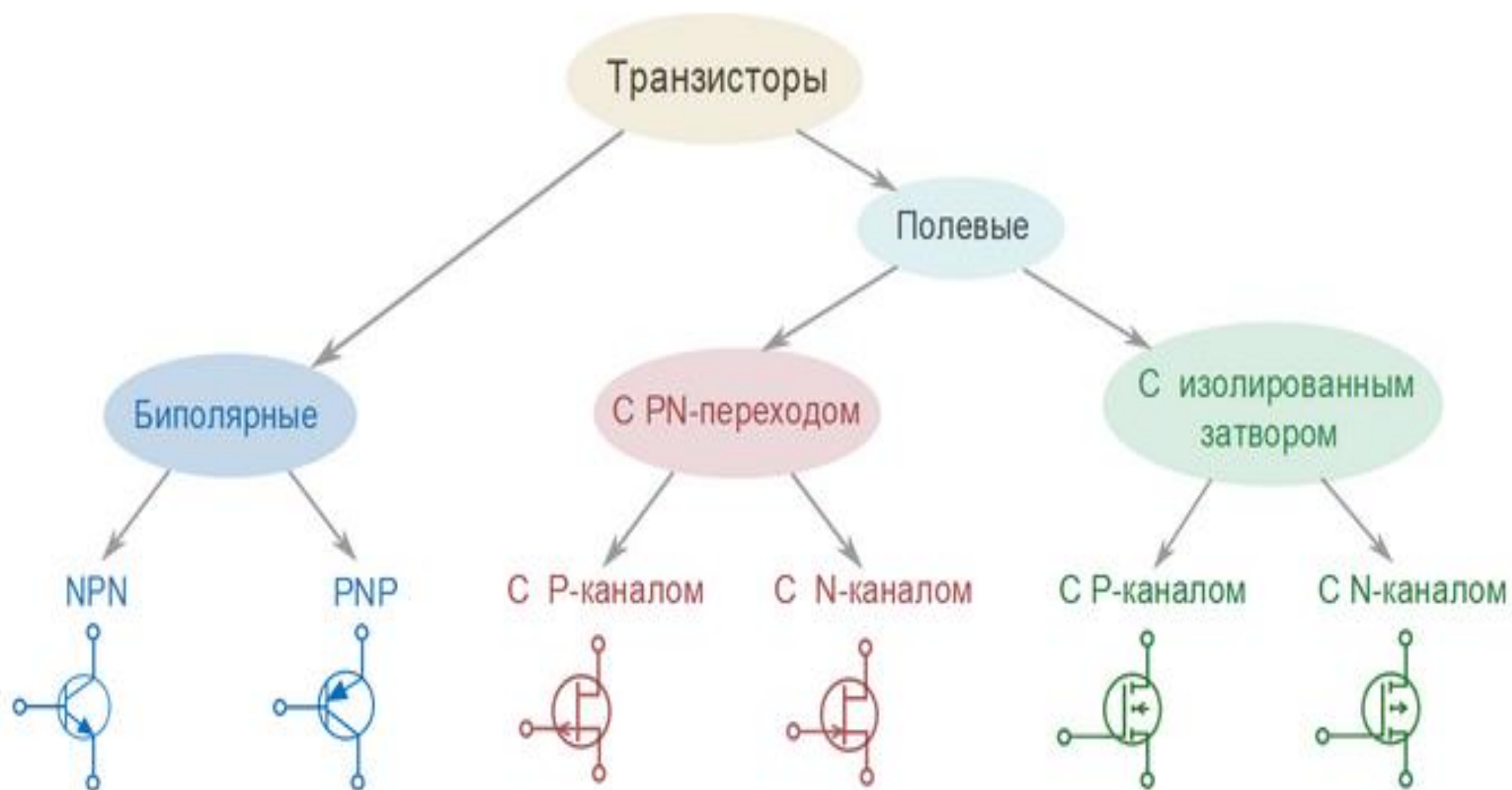
Биполярные транзисторы

На сегодняшний день биполярные транзисторы получили самое широкое распространение в аналоговой электронике. Чаще всего их используют в качестве усилителей в дискретных цепях (схемах, состоящих из отдельных электронных компонентов).

Также нередко отдельные биполярные транзисторы используются совместно с интегральными (состоящими из многих компонентов на одном кристалле полупроводника) аналоговыми и цифровыми микросхемами. В этом возникает необходимость, например, когда нужно усилить слабый сигнал на выходе из интегральной схемы, обычно не располагающей высокой мощностью.



В области цифровой электроники, полевые транзисторы практически полностью вытеснили биполярные благодаря многократному превосходству в экономичности. Внутри архитектуры логики процессоров, памяти, и других различных цифровых микросхем, находятся сотни миллионов, и даже миллиарды полевых транзисторов, играющих роль электронных переключателей.

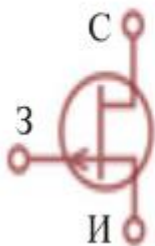


Полевые транзисторы

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. В отличие от биполярного ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей.

Электроды полевого транзистора называют *истоком* (И), *стоком* (С) и *затвором* (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. От напряжения между затвором и истоком зависит проводимость канала, следовательно, и величина тока. Таким образом, полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор-исток. Если амплитуда изменения управляющего сигнала достаточно велика, сопротивление канала может изменяться в очень больших пределах. В этом случае полевой транзистор можно использовать в качестве электронного ключа.

С Р-каналом



С N-каналом



С Р-каналом



С N-каналом



Полевые транзисторы

По конструкции полевые транзисторы можно разбить на две группы:

- с управляющим p – n -переходом;
- с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

Транзисторы второго вида называют МДП-транзисторами (металл – диэлектрик – полупроводник). В большинстве случаев диэлектриком является двуокись кремния SiO_2 , поэтому обычно используется название МОП-транзисторы (металл – окисел – полупроводник). В современных МОП-транзисторах для изготовления затвора часто используется поликристаллический кремний. Однако название МОП-транзистор используют и для таких приборов.

Проводимость канала полевого транзистора может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то транзистор называют n -канальным. Транзисторы с каналами, имеющими дырочную проводимость, называют p -канальными. В МОП- транзисторах канал может быть обеднён носителями или обогащён ими. Таким образом, понятие «полевой транзистор» объединяет шесть различных видов полупроводниковых приборов.

Полевые транзисторы

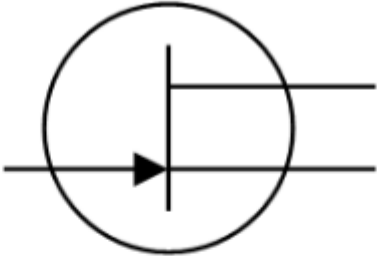
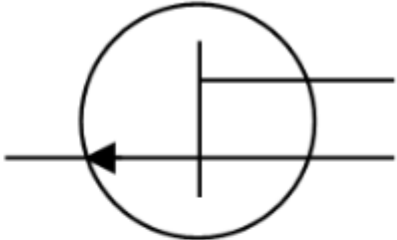
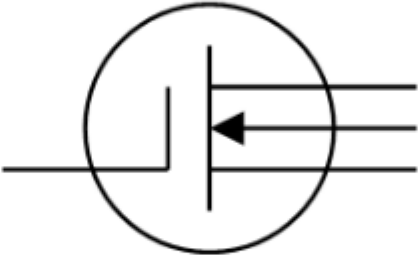
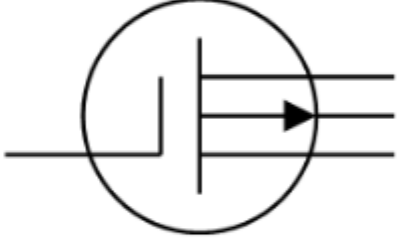
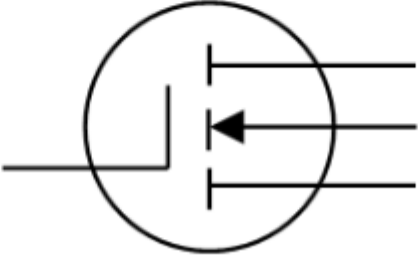
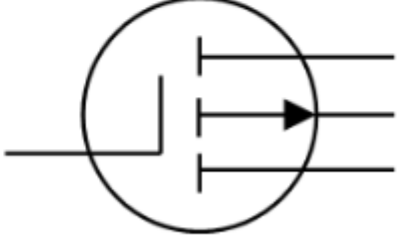
	<i>n</i> -типа	<i>p</i> -типа
Транзистор с управляющим $p - n$ переходом		
МДП-транзистор с встроенным каналом		
МДП-транзистор с индуцированным каналом		

Рис. Условные графические обозначения полевых транзисторов

Полевые транзисторы

МОП-транзисторы находят широкое применение в современной электронике. В ряде областей, в том числе в цифровой электронике, они почти полностью вытеснили биполярные транзисторы. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление и обеспечивают малое потребление энергии. Во-вторых, МОП-транзисторы занимают на кристалле интегральной схемы значительно меньшую площадь, чем биполярные. Поэтому плотность компоновки элементов в МОП-интегральных схемах значительно выше. В-третьих, технологии производства интегральных схем на МОП-транзисторах требуют меньшего числа операций, чем технологии изготовления ИС на биполярных транзисторах.

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

Структура полевого транзистора с каналом n -типа показана на рис. 1, а. На рис. 1, б приведено его условное графическое обозначение.

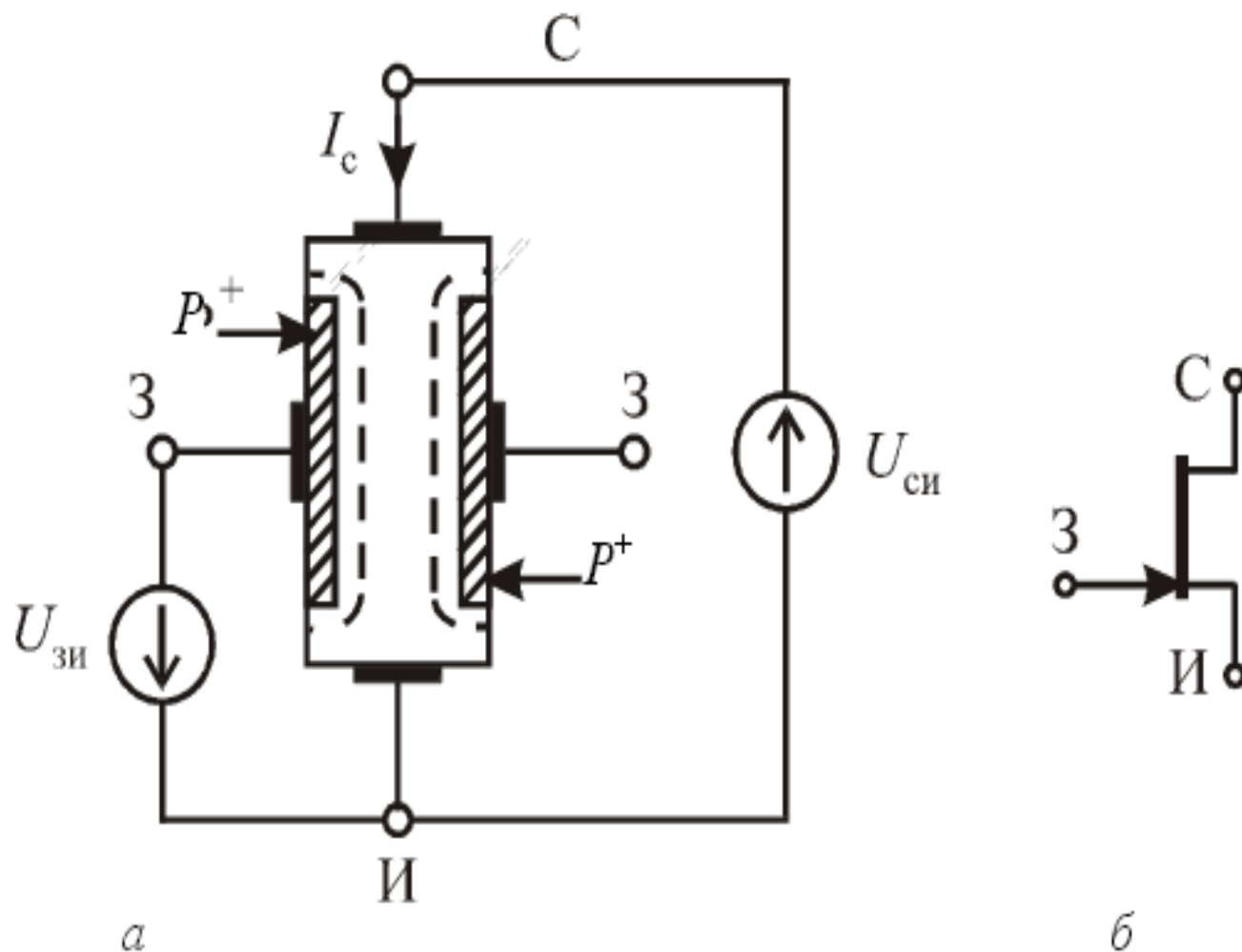


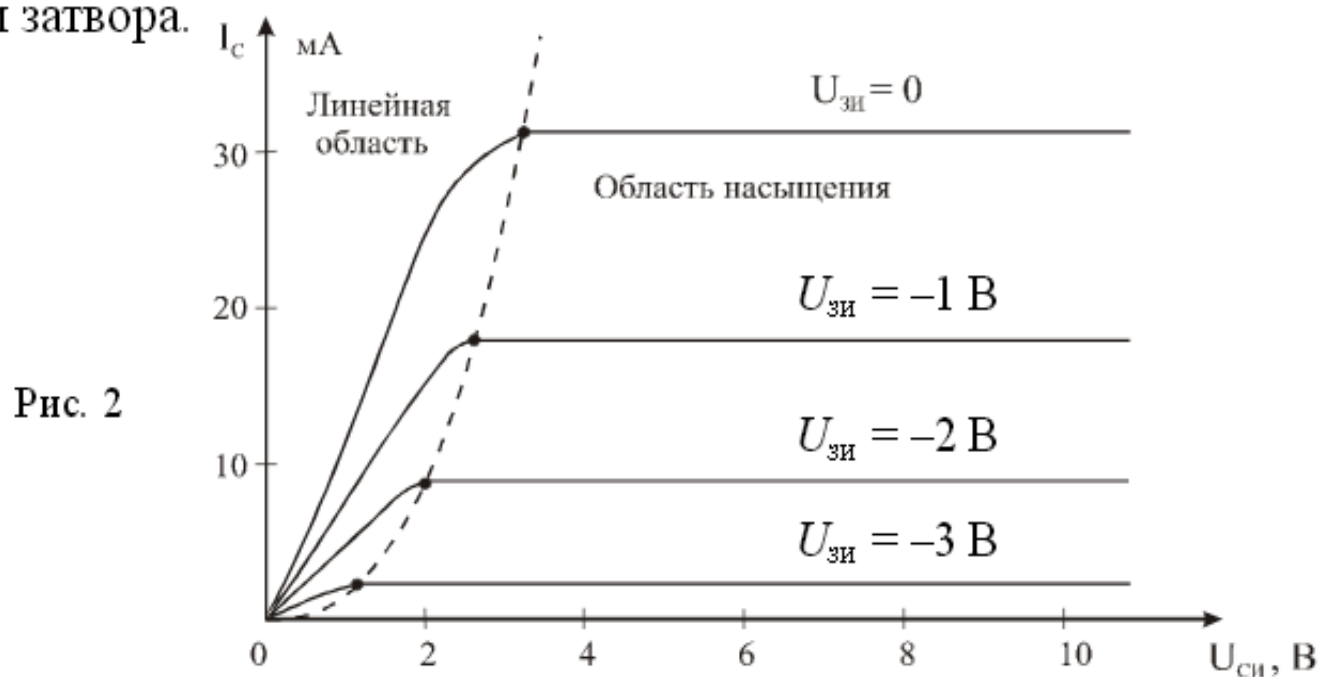
Рис. 1

Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

Канал между стоком и истоком формируется из слабо обогащённого полупроводника n -типа. Две области затвора содержат сильно обогащённый полупроводник p -типа. Принцип действия полевого транзистора с управляющим p - n -переходом основан на изменении проводимости канала за счёт изменения его поперечного сечения. Между стоком и истоком включается напряжение такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n -типа) перемещались от истока к стоку. Между затвором и истоком включено отрицательное управляющее напряжение, которое запирает p - n -переход. Чем больше это напряжение, тем шире запирающий слой и уже канал. С уменьшением поперечного сечения канала его сопротивление увеличивается, а ток в цепи сток – исток уменьшается. Это позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвор-исток $U_{зи}$. При некоторой величине напряжения затвор-исток запирающий слой полностью перекрывает канал, что приводит к уменьшению проводимости канала. Напряжение $U_{зи}$, при котором перекрывается канал, называют *напряжением отсечки* и обозначают $U_{отс}$. Для n -канального полевого транзистора напряжение отсечки отрицательно.

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

Рассмотрим вольт-амперные характеристики ПТ. Входные характеристики у полевых транзисторов отсутствуют, так как входной ток равен нулю. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа показаны на рис. 2. На выходной характеристике можно выделить три области – отсечки, линейную (триодную) и насыщения. В линейной области ВАХ представляют прямые, наклон которых зависит от напряжения затвор-исток $U_{зи}$. Минимальное сопротивление канала достигается, когда напряжение $U_{зи} = 0$, так как проводящая часть канала в этом случае имеет наибольшее сечение. Таким образом, в линейной области полевой транзистор можно использовать как резистор, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.



Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения сток-исток $U_{си}$ область перекрытия канала вблизи стока расширяется и сопротивление канала увеличивается.

В области насыщения полевой транзистор удобно моделировать передаточной характеристикой – зависимостью тока стока I_c от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ при постоянном напряжении сток-исток:

$$I_c = f(U_{зи}) \big|_{U_{си} = \text{const}}.$$

Передаточная характеристика n -канального полевого транзистора с управляющим p – n -переходом показана на рис. 3.

При нулевом напряжении на затворе ток стока имеет максимальное значение, которое называют *начальным* $I_{снач}$. При увеличении напряжения затвор-исток ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

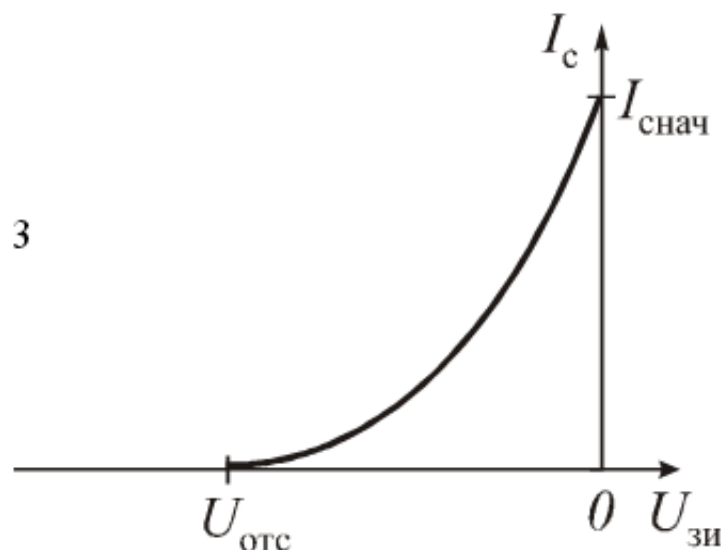
В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения сток-исток $U_{си}$ область перекрытия канала вблизи стока расширяется и сопротивление канала увеличивается.

В области насыщения полевой транзистор удобно моделировать передаточной характеристикой – зависимостью тока стока I_c от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ при постоянном напряжении сток-исток: $I_c = f(U_{зи}) | U_{си} = \text{const}$.

Передаточная характеристика n -канального полевого транзистора с управляющим p – n -переходом показана на рис. 3.

При нулевом напряжении на затворе ток стока имеет максимальное значение, которое называют *начальным* $I_{снач}$. При увеличении напряжения затвор-исток ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Рис. 3



Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

Режим отсечки:

$$U_{зи} \leq U_{отс}, I_c = 0.$$

Линейный режим:

$$U_{отс} \leq U_{зи} \leq 0, U_{си} \leq U_{зи} - U_{отс}.$$

ВАХ полевого транзистора на участке, соответствующем линейному режиму, аппроксимируется выражением

$$I_c = I_{снач} \left[2 \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right) \left(\frac{U_{си}}{-U_{отс}} \right) - \left(\frac{U_{си}}{U_{отс}} \right)^2 \right].$$

Режим насыщения:

$$U_{отс} \leq U_{зи} \leq 0, U_{си} \geq U_{зи} - U_{отс},$$

$$I_c = I_{снач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^2.$$

Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом

Поведение p -канальных полевых транзисторов описывается такими же уравнениями. Следует учесть только, что для p -канальных ПТ напряжения имеют другую полярность, т. е. $U_{отс} > 0$, а $U_{си} < 0$.

Важным параметром полевого транзистора является *крутизна характеристики*, определяемая как отношение приращения тока стока ΔI_c к приращению напряжения затвор-исток $\Delta U_{зи}$:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{dI_c}{dU_{зи}}.$$

Крутизна полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом может изменяться от 1–2 мА/В у маломощных приборов до единиц А/В у силовых транзисторов. Максимальное значение крутизна имеет при $U_{зи} = 0$. С увеличением напряжения на затворе крутизна уменьшается и при $U_{зи} = U_{отс}$ становится равной нулю.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Другим типом транзистора с изолированным затвором является *МОП-транзистор с индуцированным каналом*. Структура транзистора с индуцированным каналом *n*-типа показана на рис. 4, а. На рис. 4, б приведено его условное графическое обозначение.

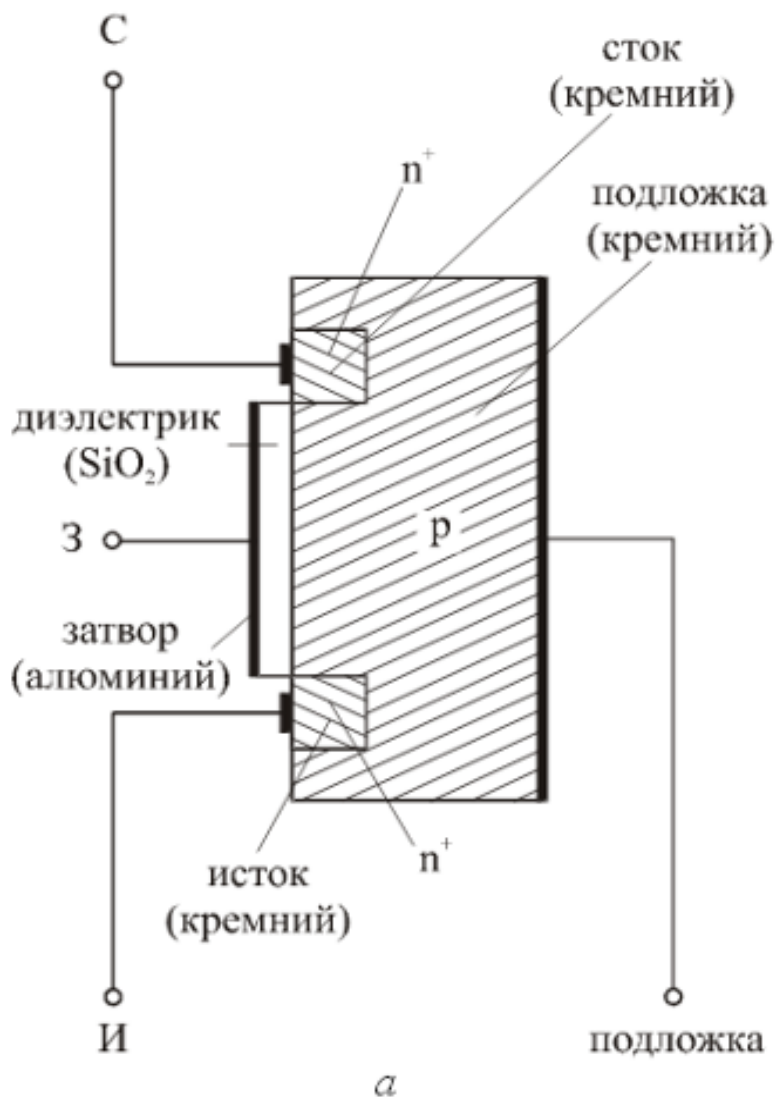
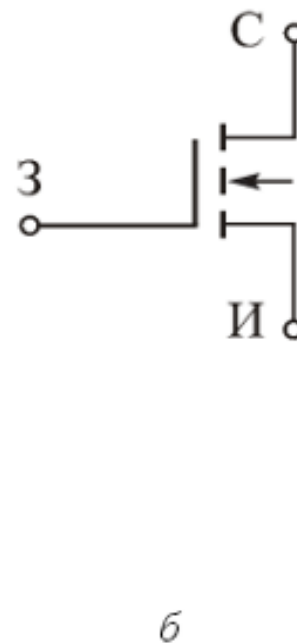
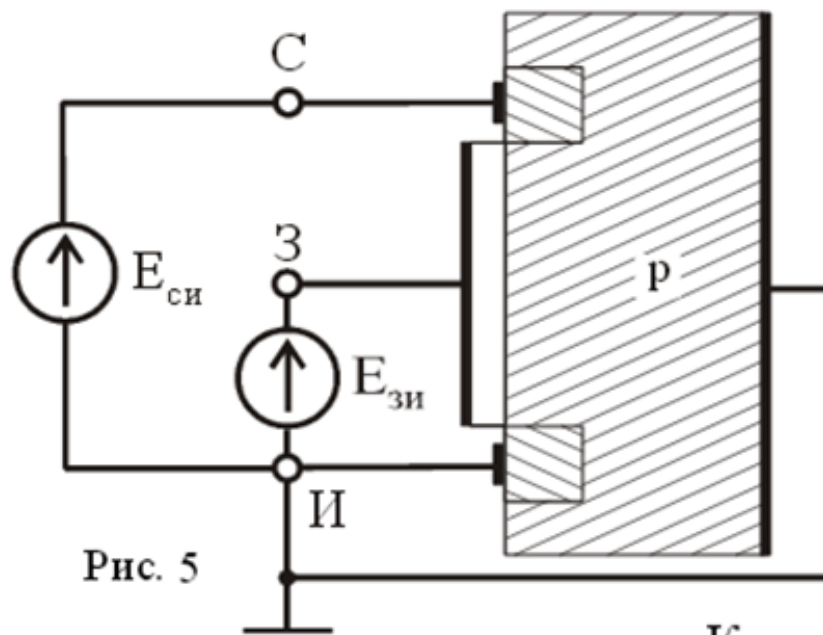


Рис. 4



МОП-транзисторы с индуцированным каналом



Канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. При нулевом напряжении канал отсутствует. При этом между стоком и истоком включены два обратнo смещенных p - n -перехода. Один p - n -переход образуется на границе между подложкой и стоком, а другой – между подложкой и истоком. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе сопротивление между стоком и истоком очень велико, ток стока ничтожно мал и транзистор находится в состоянии отсечки.

Если между затвором и истоком включен источник напряжения (рис. 5), то электрическое поле затвора выталкивает дырки из приповерхностного слоя подложки и притягивает в этот слой электроны. В результате в области подложки, примыкающей к диэлектрику, образуется проводящий канал n -типа. Такой канал называют *индуцированным*. С увеличением положительного напряжения затвор-исток $U_{зи}$ растет концентрация электронов в канале, следовательно, увеличивается его проводимость.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Если между стоком и истоком приложено положительное напряжение, в индуцированном канале возникает ток стока. Его величина зависит как от напряжения $U_{зи}$, так и от напряжения сток-исток $U_{си}$. Напряжение затвора, при котором появляется заметный ток стока, называют *пороговым* и обозначают U_0 . Пороговое напряжение МОП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа положительно. Его величина зависит от технологии изготовления и составляет для современных интегральных МОП-транзисторов 0.5–1.0 В.

Чем больше напряжение затвор-исток превышает пороговое, тем большее количество электронов втягивается в канал, увеличивая его проводимость. Если при этом напряжение сток-исток невелико, проводимость канала пропорциональна разности $U_{зи} - U_0$.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Если напряжение сток-исток превышает *напряжение насыщения* $U_{\text{нас}} = U_{\text{зи}} - U_0$, транзистор переходит в режим насыщения и рост тока прекращается. Объясняется это тем, что напряжение между затвором и поверхностью канала уменьшается в направлении стока. Вблизи истока оно равно $U_{\text{зи}}$, а в окрестности стока – разности $U_{\text{зи}} - U_{\text{си}}$. Поэтому при увеличении напряжения $U_{\text{си}}$ сечение канала уменьшается по направлению к стоку, а его сопротивление увеличивается. При значениях $U_{\text{си}}$, превышающих *напряжение насыщения*, канал перекрывается и ток стока остается практически неизменным. Очевидно, что каждому значению $U_{\text{зи}} > U_0$ соответствует свое значение *напряжения насыщения*.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Семейство выходных характеристик транзистора с индуцированным каналом показано на рис. 6. На выходных характеристиках можно выделить линейную (триодную) область, области насыщения и отсечки. Граница между линейной областью и областью насыщения показана на рис. 6 пунктиром.

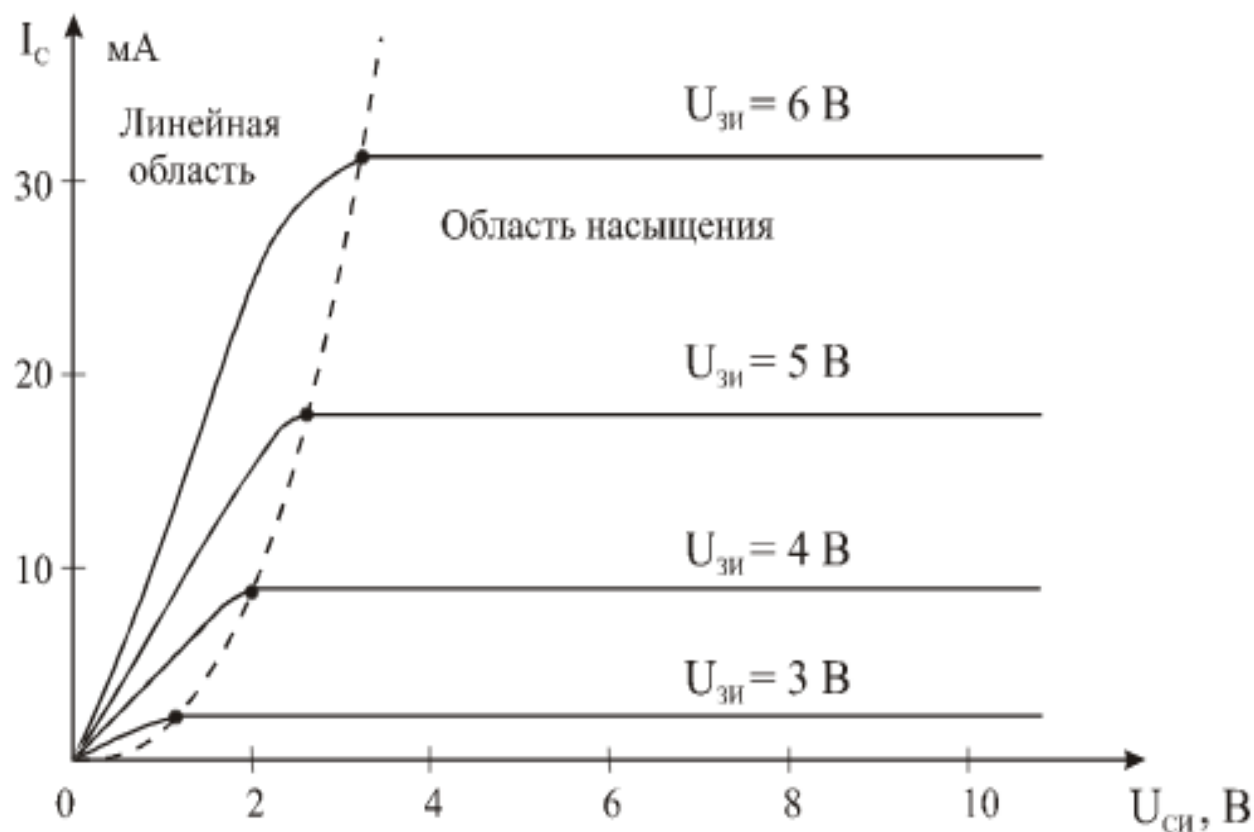


Рис. 6

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

В режиме отсечки $U_{зи} < U_0$, $I_c = 0$. Область отсечки расположена ниже ветви выходной характеристики, соответствующей напряжению $U_{зи} = U_0$.

В линейном (триодном) режиме $U_{зи} > U_0$, а напряжение сток-исток не превышает напряжение насыщения $U_{си} \leq U_{нас} = U_{зи} - U_0$.

Режим насыщения МОП-транзистора с индуцированным каналом возникает, когда $U_{зи} > U_0$, а напряжение сток-исток превышает напряжение насыщения

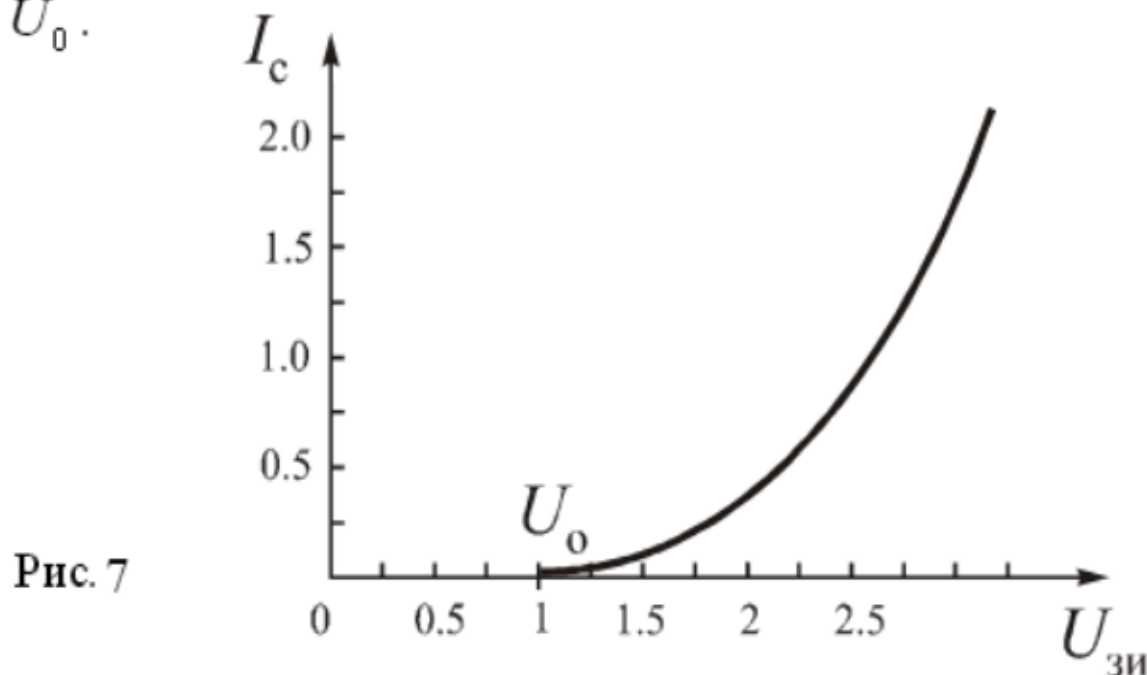
$$U_{си} \geq U_{нас} = U_{зи} - U_0.$$

В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально, т. е. ток стока практически не зависит от напряжения $U_{си}$. Таким образом, в режиме насыщения канал МОП-транзистора имеет высокое сопротивление, а транзистор эквивалентен источнику тока, управляемому напряжением затвор-исток.

Область насыщения является рабочей, если транзистор используется для усиления сигналов. Области отсечки и линейная используются, когда транзистор работает в режиме ключа.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Передаточная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом показана на рис. 7. При нулевом напряжении на затворе ток стока равен нулю. Заметный ток появляется тогда, когда напряжение затвора превысит пороговое значение U_0 .



Геометрические размеры канала являются важными параметрами МОП-транзистора, определяющими его электрические характеристики. От размеров канала зависит площадь, которую занимает транзистор на кристалле интегральной схемы. Длина канала современных интегральных МОП-транзисторов составляет 0.06–1 мкм, а ширина – 0.2–100 мкм. Толщина диэлектрика, изолирующего затвор от канала, равна 0.002–0.05 мкм.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

МОП-транзисторы с индуцированным каналом являются доминирующими элементами современных сверхбольших интегральных схем (СБИС). Технологии изготовления СБИС принято характеризовать минимальной длиной канала L_{\min} . Стандартными являются технологии, обеспечивающие $L_{\min} < 0.1$ мкм

Впечатляющей является динамика снижения минимальной длины канала МОП-транзисторов: 1.5 мкм – в 1985 году (процессор Intel 286), 1.0 мкм в 1989 (Intel 386), 0.8 мкм – в 1991 (Intel 486), 0.25 мкм – в 1998 (Pentium II), 0.18 мкм – в 1999 (Pentium III), 0.13 мкм – в 2002, 0.065 мкм – в 2006 г.

В 2016 году американские ученые создали (в лаборатории энергетики США) самый маленький в мире работающий транзистор размером порядка 1 нм.

Уменьшение геометрических размеров МОП-транзисторов сопровождается снижением рабочих напряжений. Это вызвано следующими причинами. Во-первых, при уменьшении размеров канала уменьшается и толщина диэлектрика, изолирующего затвор от канала. Для исключения вероятности пробоя величину порогового напряжения U_0 снижают. Во-вторых, мощность, потребляемая транзистором, пропорциональна квадрату питающего напряжения. Поэтому величина напряжения питания современных СБИС уменьшается быстрее, чем пороговые напряжения.

Полевые транзисторы с индуцированным каналом

В современной интегральной схемотехнике широко используют полевые транзисторы с каналами обоих типов проводимости. У p -канального МОП-транзистора подложка имеет электронную проводимость, а области стока и истока – дырочную. У таких транзисторов пороговое и рабочие напряжения имеют обратную полярность по сравнению с n -канальным:

$$U_0 < 0, U_{зи} < 0, U_{си} < 0.$$

Электронные схемы, в которых используется сочетание МОП-транзисторов с каналами n - и p -типов, называют *комплементарными* (КМОП). Хотя технология изготовления КМОП-структур сложнее, чем цепей, содержащих только n -канальные транзисторы, наличие транзисторов с каналами разных типов предоставляет разработчикам интегральных схем дополнительные возможности. В настоящее время комплементарные структуры стали преобладающими как в цифровых, так и аналоговых интегральных схемах.

Полевые транзисторы с встроенным каналом

Структура МОП-транзистора с встроенным каналом n -типа показана на рис. 8, *а*. На рис. 8, *б* приведено его условное графическое обозначение. Подложка (кристалл кремния p -типа) служит для создания на ней канала n -типа. У МОП-транзисторов имеется дополнительный вывод от подложки. Металлический затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика. Области стока и истока легированы сильнее, чем канал, и обозначены n^+ .

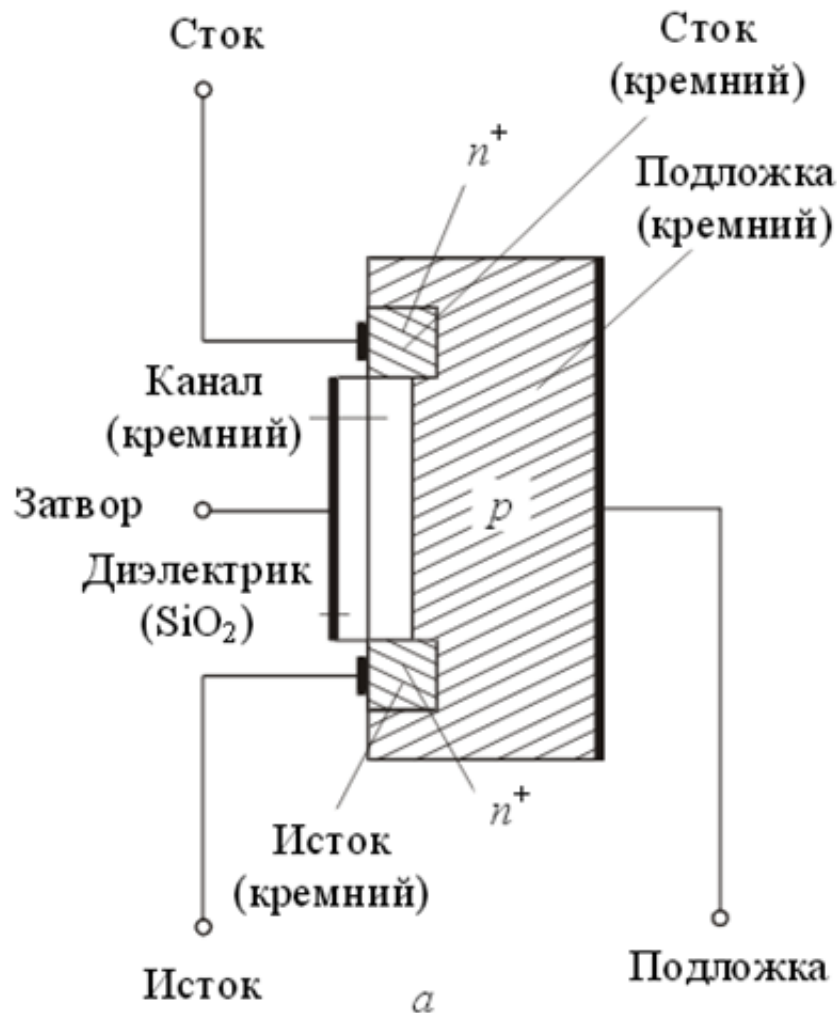
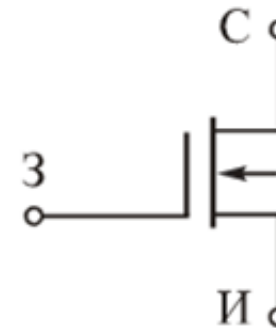


Рис. 8



б

Полевые транзисторы с встроенным каналом

В качестве диэлектрика используется слой двуокиси кремния толщиной 0.002–0.05 мкм, выращиваемый на поверхности кремния n -типа.

При подаче отрицательного напряжения на затвор металлический электрод затвора заряжается отрицательно. У прилегающей к диэлектрику поверхности канала образуется обедненный слой. Ширина обедненного слоя зависит от напряжения $U_{\text{зи}}$. Такой режим работы МОП-транзистора, когда концентрация носителей в канале меньше равновесной, называют *режимом обеднения*. При некоторой величине отрицательного напряжения $U_{\text{зи}}$ канал полностью перекрывается обедненным слоем и ток прекращается. Это напряжение называют *напряжением отсечки* МОП-транзистора с встроенным каналом и обозначают $U_{\text{отс}}$.

Ток МОП-транзистора с встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеет ненулевое значение, называемое *начальным* $I_{\text{снач}}$. Если $U_{\text{зи}} > 0$, число электронов в канале увеличивается. Это приводит к увеличению проводимости канала. Такой режим работы транзистора с встроенным каналом, при котором концентрация носителей в канале больше равновесной, называют *режимом обогащения*.

Полевые транзисторы с встроенным каналом

Таким образом, МОП-транзистор с встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, при положительном напряжении $U_{зи}$. Выходные характеристики МОП-транзистора с встроенным каналом n -типа показаны на рис. 9.

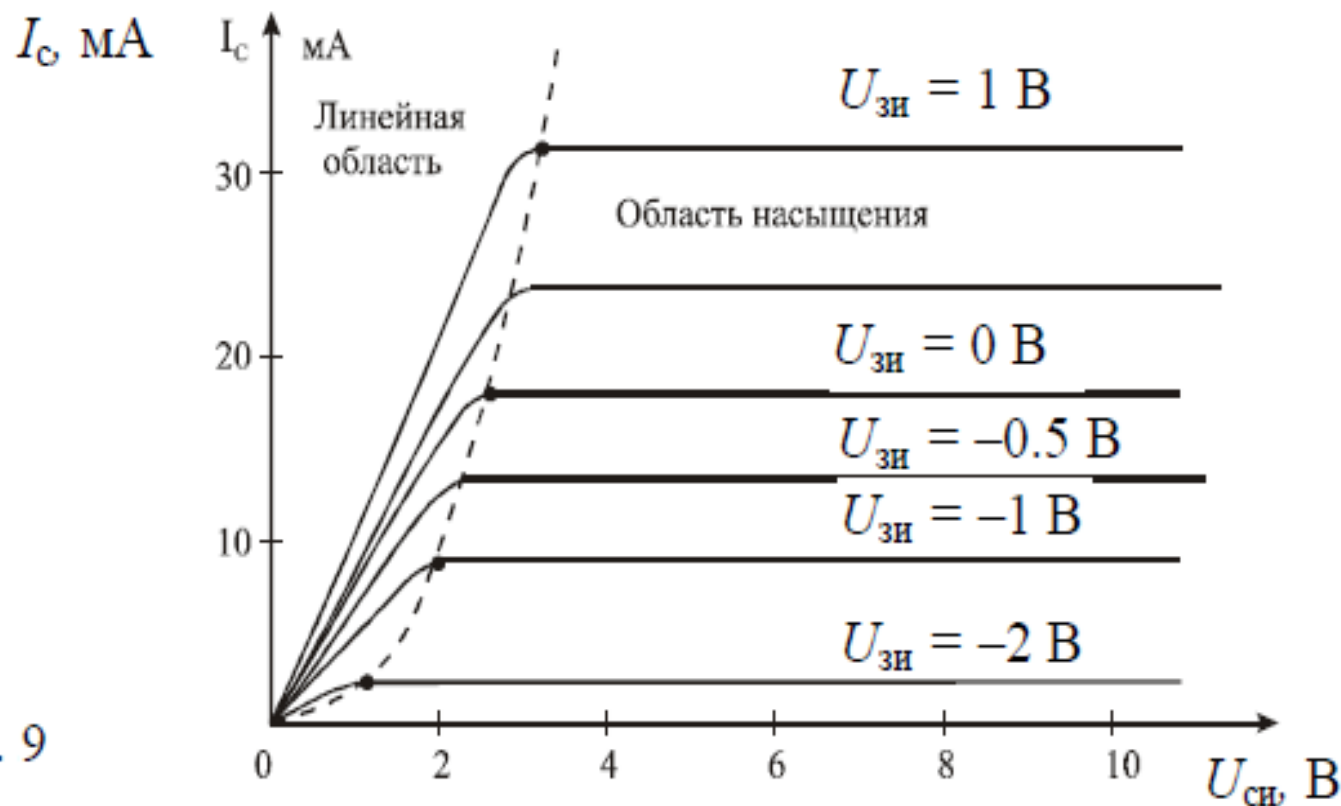


Рис. 9

Полевые транзисторы с встроенным каналом

Передаточная характеристика МОП-транзистора с встроенным каналом показана на рис. 10.

Начальное значение тока стока МОП-транзистора с встроенным каналом определяется выражением

$$I_{с\text{нач}} = \mu C_0 \frac{W}{L} U_0^2.$$

Здесь μ – приповерхностная подвижность носителей, C_0 – удельная емкость затвор-канал. Длина канала L равна расстоянию между областями стока и истока, а ширина W – протяженности этих областей.

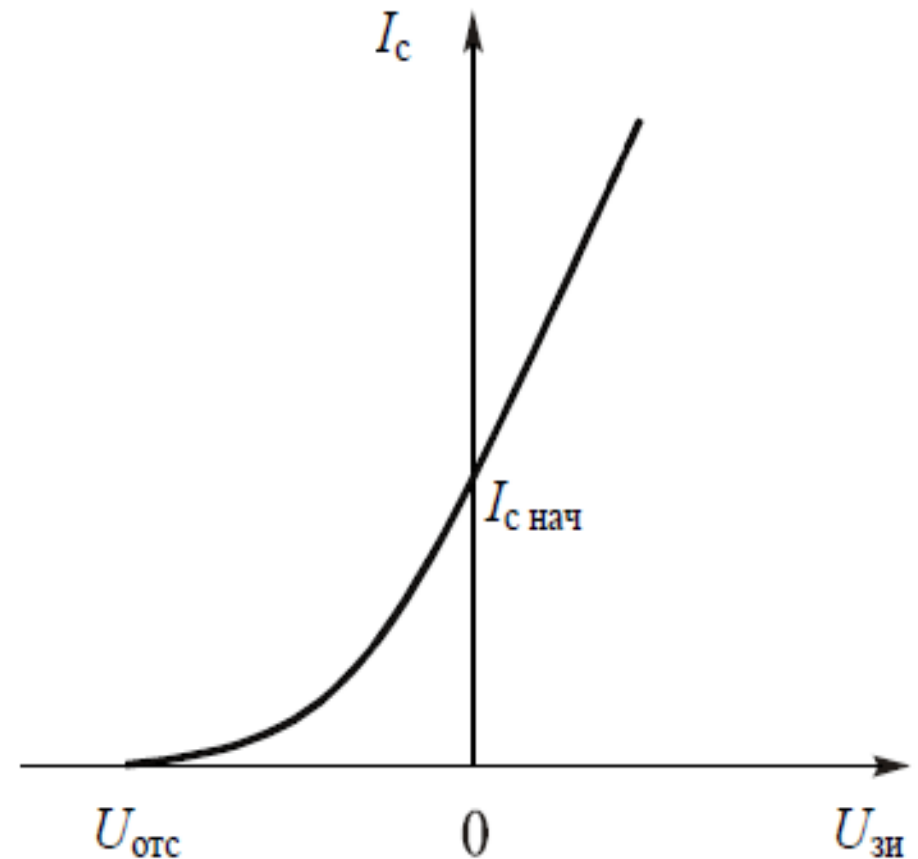


Рис. 10

Полевой транзистор как четырехполюсник

При расчёте электрических цепей полевой транзистор можно представить в виде четырехполюсника и описывать с помощью **Y-параметров**.



Значения коэффициентов в уравнениях Y-параметров имеют следующий вид:

$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1}$ при $U_2 = 0$ – **входная проводимость** при коротком замыкании на выходе;

$Y_{12} = \frac{I_1}{U_2}$ при $U_1 = 0$ – **проводимость обратной передачи** при коротком замыкании на входе;

$Y_{21} = \frac{I_2}{U_1}$ при $U_2 = 0$ – **проводимость прямой передачи** при коротком замыкании на выходе;

$Y_{22} = \frac{I_2}{U_2}$ при $U_1 = 0$ – **выходная проводимость** при коротком замыкании на входе.

Полевой транзистор как четырехполюсник

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2; \\ I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2. \end{cases}$$

Поскольку для усилителя входными и выходными сигналами являются приращения соответствующих токов и напряжений, запишем эту систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta I_1 = Y_{11}\Delta U_1 + Y_{12}\Delta U_2; \\ \Delta I_2 = Y_{21}\Delta U_1 + Y_{22}\Delta U_2. \end{cases}$$

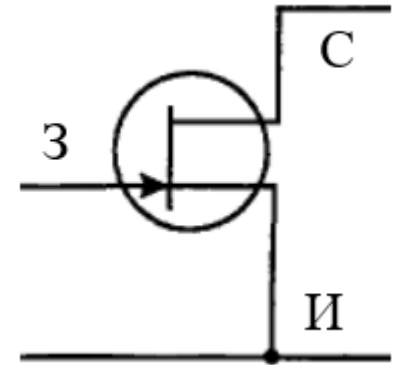
Приравнивая к нулю ΔU_1 (режим короткого замыкания на входе) и ΔU_2 (режим короткого замыкания на выходе) можно рассчитать Y -параметры:

$$Y_{12} = \left. \frac{\Delta I_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta U_1=0}, \quad Y_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta U_1=0},$$
$$Y_{11} = \left. \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1} \right|_{\Delta U_2=0}, \quad Y_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} \right|_{\Delta U_2=0}.$$

Параметры Y_{12} и Y_{22} рассчитываются при постоянном значении напряжения на входе ($U_1 = \text{const}$), а параметры Y_{11} и Y_{21} — при постоянном значении напряжения на выходе ($U_2 = \text{const}$).

Полевой транзистор как четырехполюсник

$$Y_{12} = \left. \frac{\Delta I_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta U_1=0}, \quad Y_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta U_1=0},$$
$$Y_{11} = \left. \frac{\Delta I_1}{\Delta U_1} \right|_{\Delta U_2=0}, \quad Y_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_1} \right|_{\Delta U_2=0}.$$



Полевой транзистор обычно подключается по схеме с общим истоком (ОИ), для которой Y -параметры рассчитываются следующим образом:

$Y_{11} = \frac{\Delta I_3}{\Delta U_{3И}}$ при $U_{СИ} = \text{const}$ – **проводимость утечки** входного затвора при коротком замыкании на выходе;

$Y_{12} = \frac{\Delta I_3}{\Delta U_{СИ}}$ при $U_{3И} = \text{const}$ – **проводимость обратной передачи** при коротком замыкании на входе;

$Y_{21} = \frac{\Delta I_С}{\Delta U_{3И}} = S$ при $U_{СИ} = \text{const}$ – **крутизна** полевого транзистора при коротком замыкании на выходе;

$Y_{22} = \frac{\Delta I_С}{\Delta U_{СИ}}$ при $U_{3И} = \text{const}$ – **выходная проводимость** при коротком замыкании на входе.

Полевой транзистор как четырехполюсник

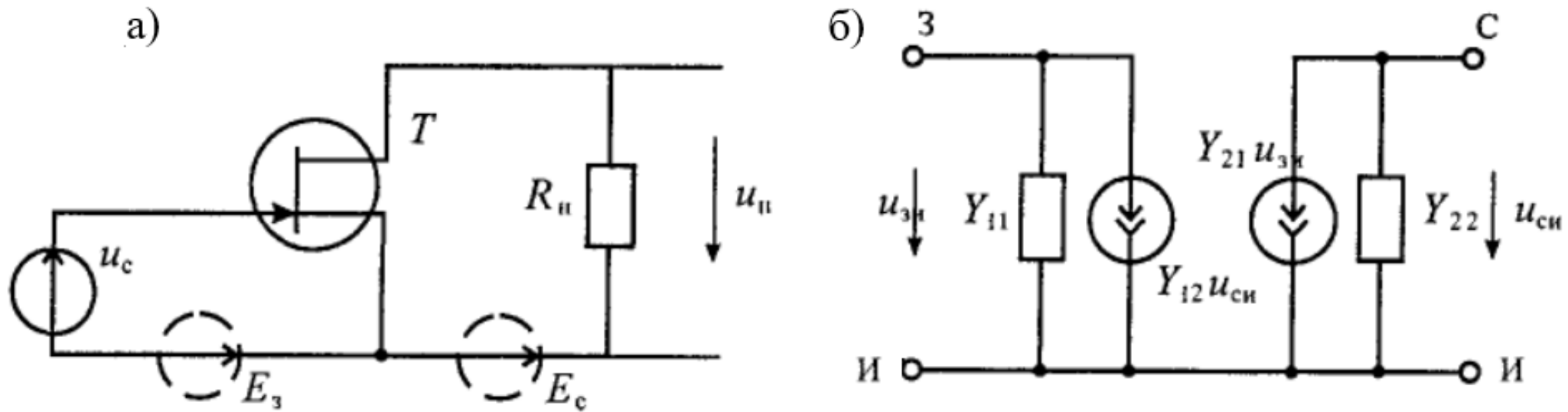


Рис. Схема усилителя на полевом транзисторе, подключенном по схеме с общим истоком (а), и схема замещения этого полевого транзистора в Y-параметрах (б).

Отметим, что в справочниках по полевым транзисторам обычно приводятся не все, а только некоторые из рассмотренных характеристик. Всегда приводится значение крутизны S , вместо входной проводимости иногда приводятся ток утечки затвора и входная емкость, а вместо проводимости обратной передачи в большинстве случаев приводится так называемая проходная емкость $C_{зс}$, т. е. емкость с затвора на сток (или на канал). Для мощных полевых транзисторов, работающих в ключевом режиме, обычно приводится значение сопротивления открытого канала, максимальный ток стока и предельное напряжение на стоке.

Полевой транзистор как четырехполюсник

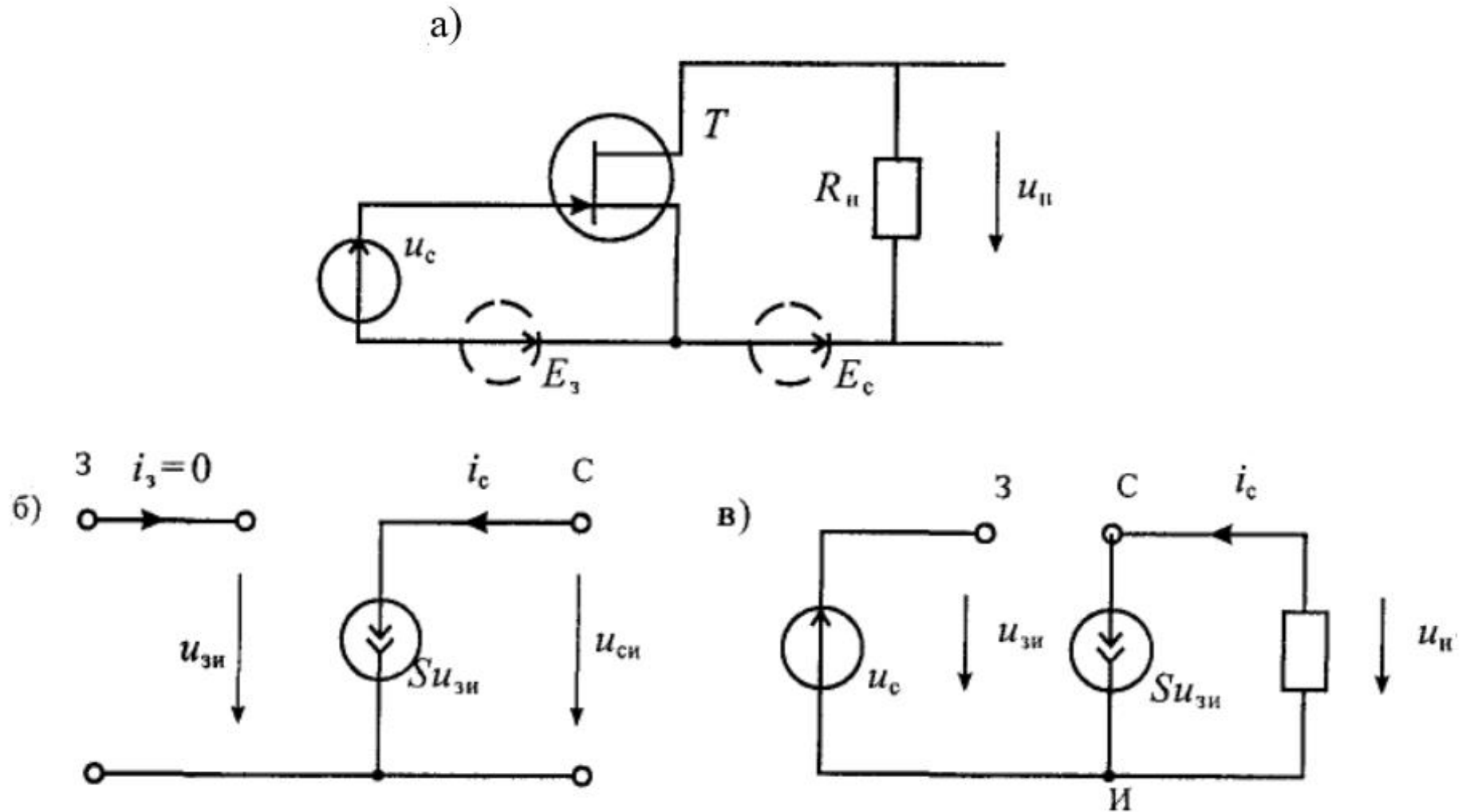


Рис. Схема усилителя на полевом транзисторе (а),
простейшая схема замещения полевого транзистора (б)
и упрощенная эквивалентная схема электрической цепи усилителя.

Рис. (б) и (в) получаются при предположении, что $Y_{11} = Y_{12} = Y_{22} = 0$.

Полевые транзисторы

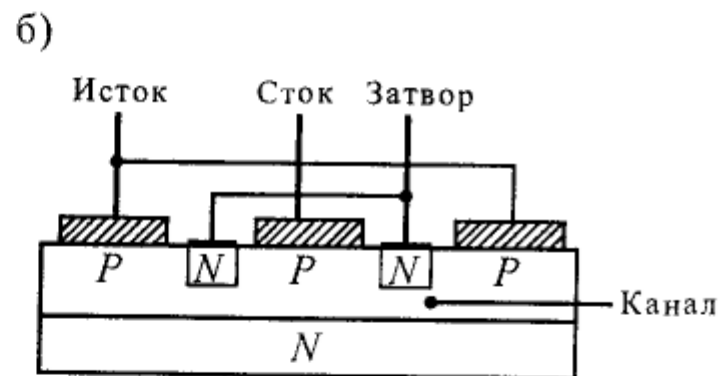
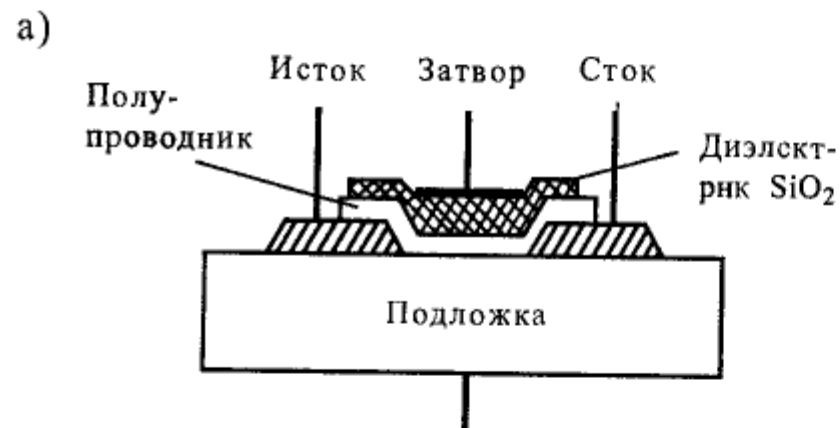
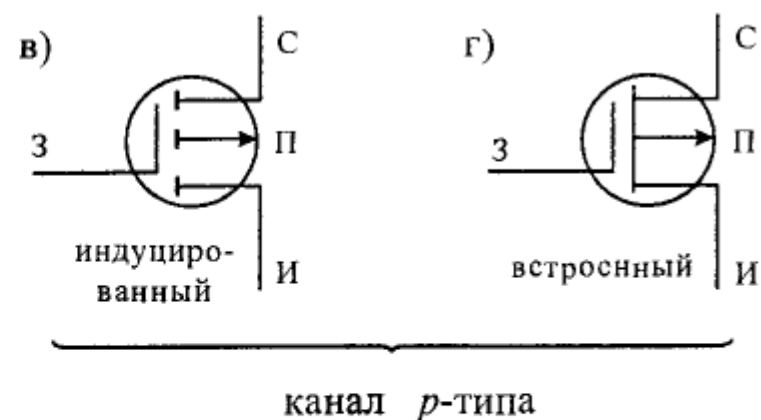
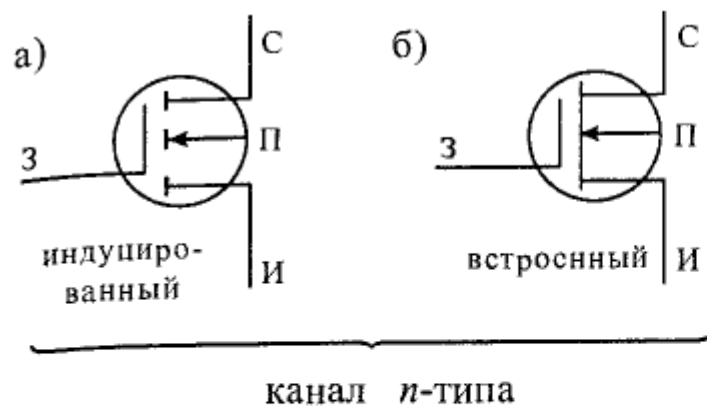
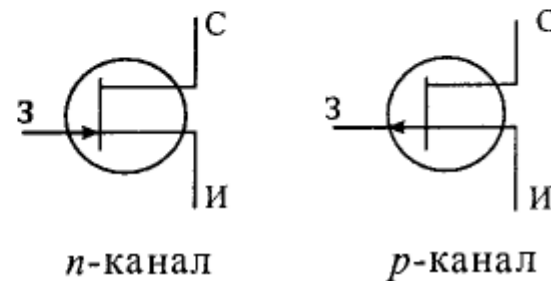


Рис. Устройство униполярного транзистора с изолированным затвором (а) и с управляющим *p-n*-переходом (б)



Полевые транзисторы

Практическое применение полевых транзисторов ограничивают следующие их **недостатки**:

- **Важнейший минус** — это **повышенная чувствительность к статическому электричеству**. Тонкий слой оксида кремния легко повреждается электростатическими зарядами, поэтому МОП-транзисторы могут выйти из строя даже при прикосновении к прибору наэлектризованными руками. Современные устройства практически лишены этого недостатка благодаря корпусам, способным минимизировать воздействие статики. Также в них могут интегрироваться защитные устройства по типу стабилитронов.
- **Появление неустойчивости работы** при напряжении перегрузки.
- **Разрушение структуры**, начиная от температуры $+150^{\circ}\text{C}$. У биполярных транзисторов критической является более высокая температура $+200^{\circ}\text{C}$.