

"Полупроводниковые приборы"

Собственный полупроводник

Для изготовления полупроводников применяют в основном германий и кремний, а также некоторые соединения галлия, индия и пр.

Для полупроводников характерен отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления. При возрастании температуры сопротивление полупроводников уменьшается, а не увеличивается, как у большинства твердых проводников. Кроме того электрическое сопротивление полупроводников очень сильно зависит от количества примесей (и от веществ примесей тоже) таких внешних воздействий, как свет, электрическое поле, ионизирующее излучение и др. (на этом основан принцип действия фотодиодов, фототранзисторов, магнитоуправляемых приборов и др.)

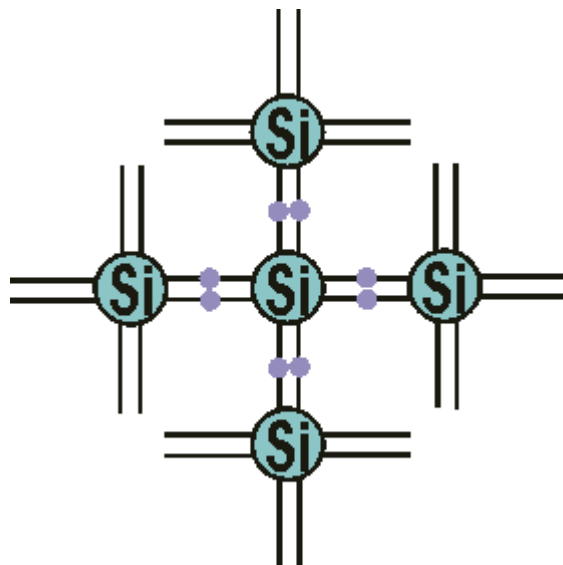
Принцип работы полупроводниковых приборов связан с тем, что в полупроводниках существует электропроводность двух типов - *электронная* и *дырочная*. Электронная электропроводность характерна для металлов и обусловлена перемещением *электронов проводимости*. При обычных рабочих температурах в полупроводниках всегда имеются электроны проводимости, которые очень слабо связаны с ядрами атомов и совершают беспорядочное тепловое движение (колебания) между атомами кристаллической решетки. Эти электроны под действием разности потенциалов могут начать двигаться в определенном направлении. Это движение и есть электрический ток.

Полупроводники обладают также дырочной электропроводностью, которая не наблюдается в металлах. Она является особенностью полупроводников, поэтому рассмотрим ее подробнее.

Собственный полупроводник

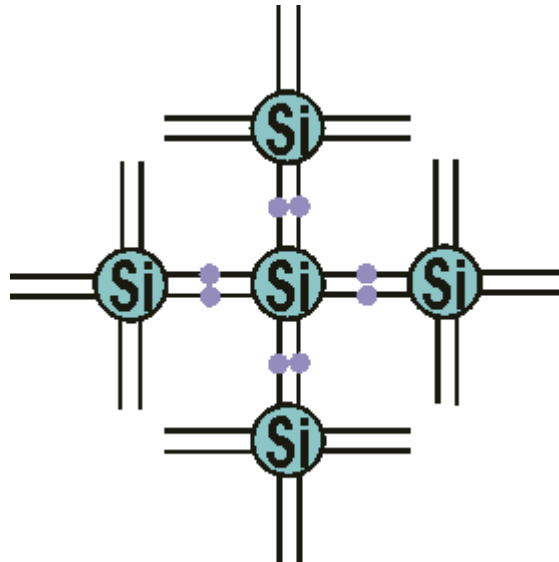
В атоме полупроводника под влиянием тепловых или других воздействий один из наиболее удаленных от ядра валентных электронов переходит в зону проводимости. Тогда атом будет иметь заряд, численно равный заряду электрона. Такой атом можно назвать положительным ионом, но надо иметь в виду, что при *ионной электропроводности*, например в электролитах, ток представляет собой движение ионов (ион означает путешественник), а при *дырочной электропроводности* механизм перемещения электрических зарядов совсем иной. В полупроводниках кристаллическая решетка достаточно прочна. Ее ионы не передвигаются, а остаются на своих местах.

Отсутствие электрона в атоме полупроводника условно называли *дыркой*. Следует иметь в виду, что *дырка* - это не частица, а освободившееся после электрона место. Дырка ведет себя как элементарный положительный заряд. На рисунке показано образование дырки:



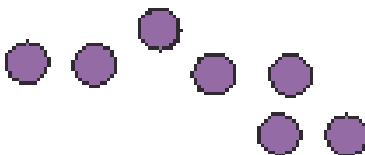
Собственный полупроводник

Как видно из рисунка, один из электронов, участвующих в ковалентной связи, получив дополнительную энергию, становится электроном проводимости, т. е. свободным носителем заряда, и может перемещаться в кристаллической решетке. А его прежнее место теперь свободно. Вот этот красный кружочек и есть дырка, то бишь освободившееся от электрона место.



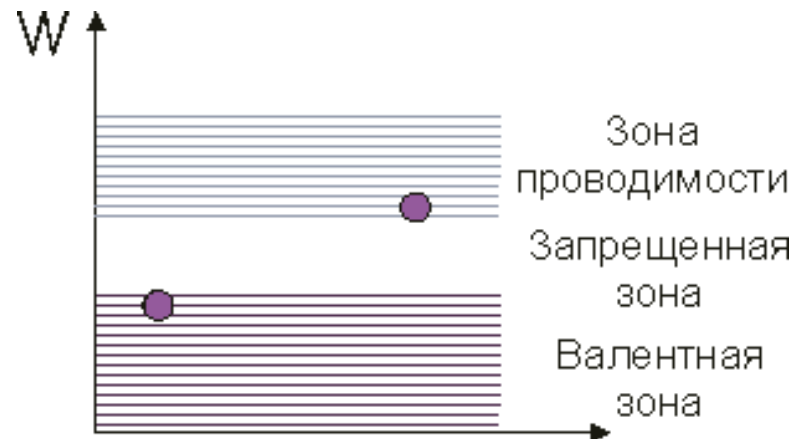
Собственный полупроводник

Возникает вопрос, если дырка не частица, как же она перемещается? Очень просто. При дырочной электропроводности под влиянием приложенной разности потенциалов перемещаются дырки, что эквивалентно перемещению положительных зарядов. А перемещение происходит следующим образом. Допустим, какой то электрон получил дополнительную энергию и ушел из атома. Появилась дырка. Поскольку заряд дырки положительный, он может притянуть к себе ближайший электрон. Если в полупроводнике действует электрическое поле (разность потенциалов), то это поле стремится двигать электроны в направлении от отрицательного заряда к положительному. Электрон заполняет первую дырку, а на месте, откуда он ушел образовалась другая дырка, в которую поле передвигает другой ближайший электрон. Вторая дырка заполняется и образовывается третья дырка, т. е. весь этот процесс эквивалентен перемещению дырки, хотя на самом деле перемещаются электроны, но более ограниченно, чем при электронной электропроводности. Электроны переходят из данных атомов только в соседние. Результатом этого является перемещение дырок в направлении, противоположном перемещению электронов. Более наглядно это поясняет рисунок:



Собственный полупроводник

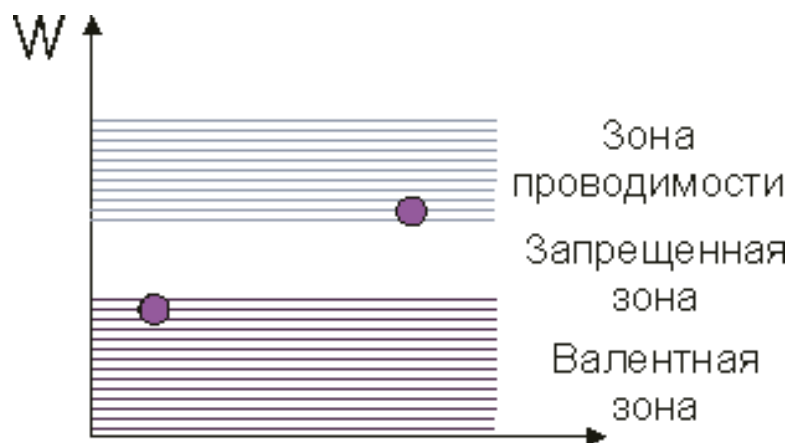
Электропроводность полупроводников наиболее правильно может быть объяснена их энергетической структурой (рисунок ниже). Как известно, ширина запрещенной зоны у полупроводников сравнительно невелика. При нагревании (или действии любой дополнительной энергии) электроны получают дополнительную энергию и уходят в зону проводимости, т. е. становятся электронами проводимости. Это хорошо видно на рисунке:



Собственный полупроводник

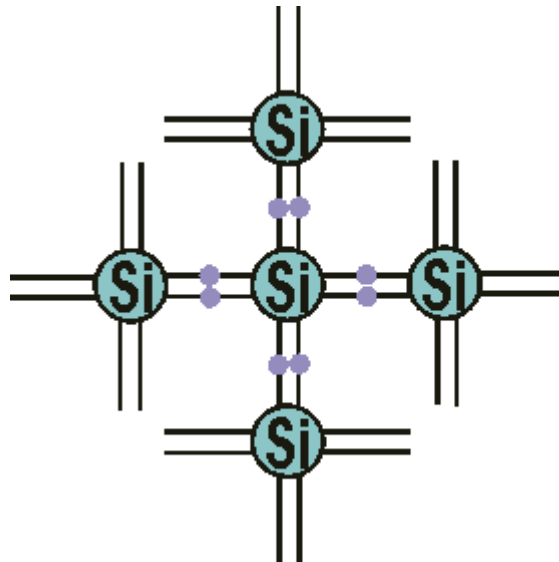
Каждый электрон, перешедший в зону проводимости, оставляет в валентной зоне дырку, т. е. в валентной зоне возникают дырки проводимости, число которых равно числу электронов, перешедших в зону проводимости. Следовательно, вместе с электронной создается дырочная электропроводность.

Электроны и дырки, которые могут перемещаться, а потому создавать электропроводность, называются *подвижными носителями заряда* или просто *носителями заряда*. Весь этот процесс принято называть *генерация пар носителей заряда*, т. е. возникают *пары электрон проводимости-дырка проводимости*.



Примесная электропроводность

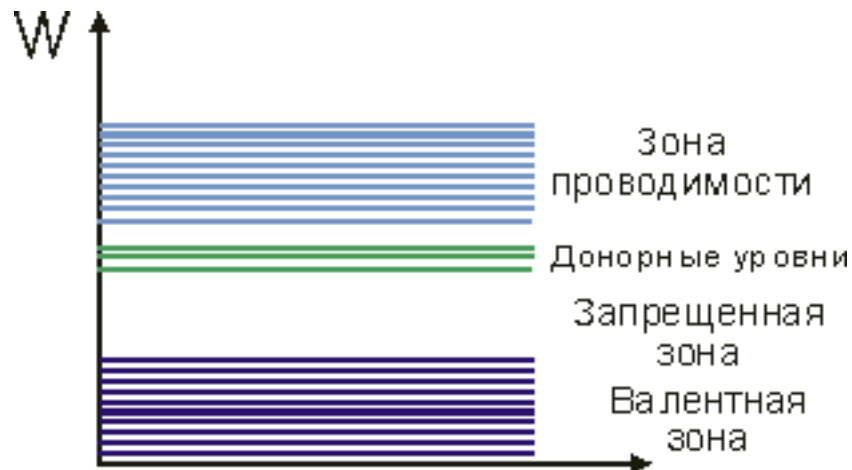
Если в полупроводник ввести примесь других веществ, то в дополнение к собственной появляется еще и *примесная электропроводность*, которая в зависимости от рода примеси может быть электронной или дырочной. Например, если к четырехвалентному кремнию добавить пентавалентную сурьму (Sb), то их атомы, взаимодействуя с атомами кремния только четырьмя своими электронами, пятый отдадут в зону проводимости. В результате добавляется некоторое число электронов проводимости. Сам атом примеси при отдаче электрона становится положительным ионом. Примеси, атомы которых отдают электроны, называются *донорами*. На рисунке наглядно показано, как происходит этот процесс:



Примесная электропроводность

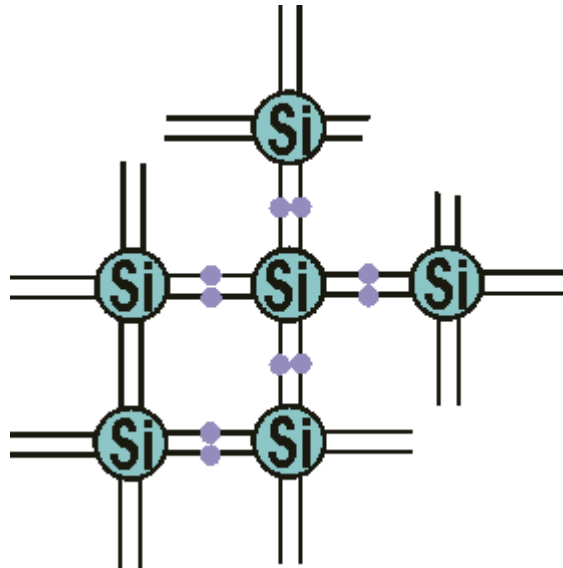
Полупроводники с преобладанием электронной электропроводности называются *электронными полупроводниками* или *полупроводниками n-типа*. Зонная диаграмма такого полупроводника показана на рисунке.

Энергетические уровни донора расположены немного ниже зоны проводимости, и таким образом в этой зоне появляется дополнительное число электронов, равное числу атомов донора. В самих атомах донора при этом дырки не образуются.



Примесная электропроводность

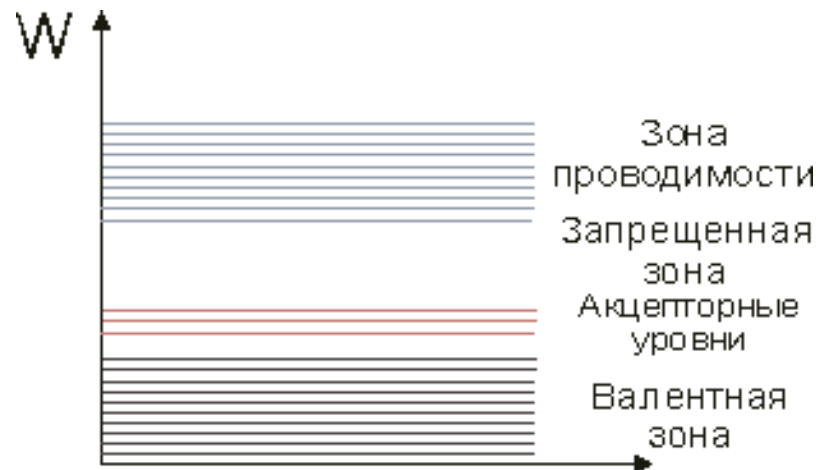
Если же в четырехвалентный кремний ввести примесь трехвалентного бора (В), то их атомы отнимают электроны от атомов кремния, оставляя у кремния дырки. Такие примеси называются *акцепторами*. Сами атомы акцептора заряжаются отрицательно. На рисунке - наглядно показано, как атом акцепторной примеси захватывает электрон соседнего атома кремния, оставляя там дырку:



Примесная электропроводность

Полупроводники с преобладанием примесной электропроводности называются *дырочными полупроводниками* или *полупроводниками p-типа*. Зонная диаграмма такого полупроводника показана на рисунке.

Как видно, энергетические уровни акцепторов располагаются немного выше валентной зоны. На эти уровни легко переходят электроны из валентной зоны, в которой при этом возникают дырки.



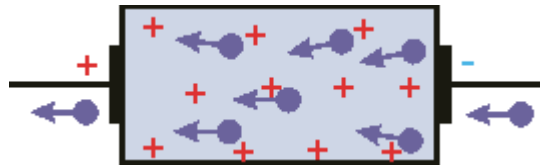
Примесная электропроводность

Чтобы примесная электропроводность преобладала над собственной, концентрация атомов донорной примеси N_D или акцепторной N_A должна превышать концентрацию собственных носителей заряда. Носители заряда, концентрация которых в данном полупроводнике преобладает, называются *основными*. Например, ими являются электроны в полупроводнике n -типа. *Неосновными* называются носители, концентрация которых меньше, чем основных. Концентрация неосновных носителей в примесном полупроводнике уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается концентрация основных носителей. Интересно, что концентрация примеси всего лишь 0,0001% (один атом примеси на четыре с лишним миллиона атомов германия (или кремния)) увеличивает концентрацию основных носителей заряда в 1000 раз и соответственно увеличивается проводимость.

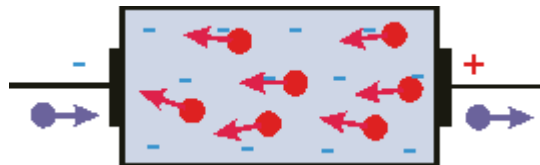
Примесная электропроводность

Рассмотрим прохождение тока через полупроводники с разным типом проводимости, для упрощения пренебрежем током основных носителей. На рисунке представлены условные изображения прохождения тока через полупроводники с электронной и дырочной электропроводностью.

На рисунке плюсики и минусики обозначены заряженные атомы кристаллической решетки. Электроны соответственно темные, дырки красные кружочки со стрелочками. Под действием ЭДС источника в проводах, соединяющих полупроводник n-типа с источником, и в самом полупроводнике движутся электроны проводимости. В соединительных проводах полупроводника p-типа по прежнему движутся электроны, а в самом полупроводнике ток следует рассматривать как движение дырок.



Электроны с отрицательного полюса поступают в полупроводник и заполняют пришедшие сюда дырки. К положительному полюсу приходят электроны из соседних частей полупроводника, и в этих частях образуются дырки, которые перемещаются от правого края к левому.

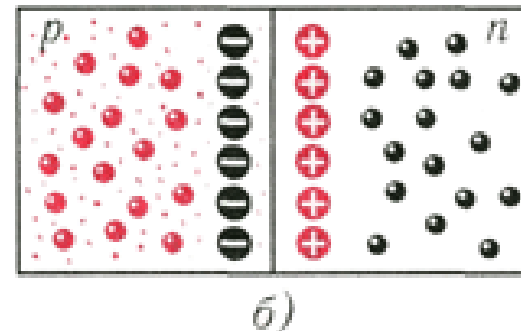
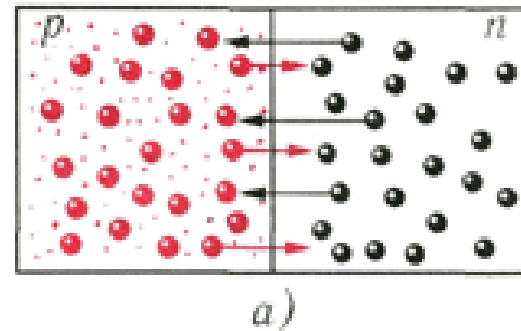


Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный переход (сокращенно n — p -переход) является основным элементом большинства полупроводниковых приборов. Он образуется в полупроводниковом кристалле, в котором имеется контакт между областью с электронной проводимостью и областью с дырочной проводимостью. Электронно-дырочный переход и образуется на границе этих областей.

Рассмотрим явления, происходящие в кристалле с p — n -переходом

В отсутствие электрического поля свободные электроны и дырки хаотично движутся по кристаллу. В результате такого движения свободные электроны могут сами по себе перейти через p — n -переход в дырочную область, а дырки — в электронную. Посмотрим, что при этом произойдет. Электроны, переходя из области n в область p , уносят с собой свой отрицательный заряд из области n . Следовательно, в кристалле область n после ухода электронов зарядится положительно, а область p — наоборот, зарядится отрицательно, так как электроны принесут ей свой отрицательный заряд.



Электронно-дырочный переход

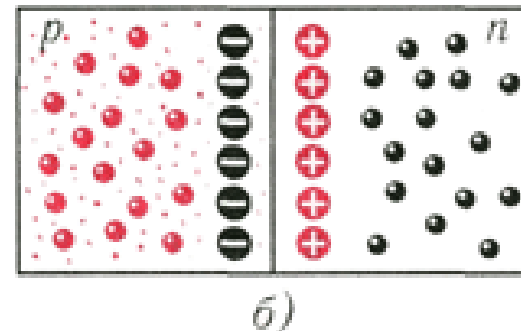
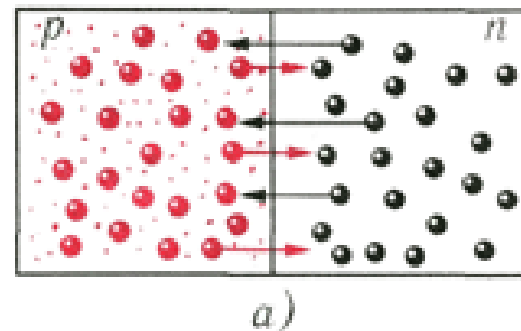
Электронно-дырочный переход (сокращенно n — p -переход) является основным элементом большинства полупроводниковых приборов. Он образуется в полупроводниковом кристалле, в котором имеется контакт между областью с электронной проводимостью и областью с дырочной проводимостью. Электронно-дырочный переход и образуется на границе этих областей.

Рассмотрим явления, происходящие в кристалле с p - n —переходом

Не остаются в долгу и дырки. Диффундируя в электронную область, они несут ей свой положительный заряд, а в дырочной области в результате их ухода возрастает отрицательный заряд.

Таким образом, в результате диффузии электронов в дырочную область и дырок в электронную пограничная область кристалла электризуется.

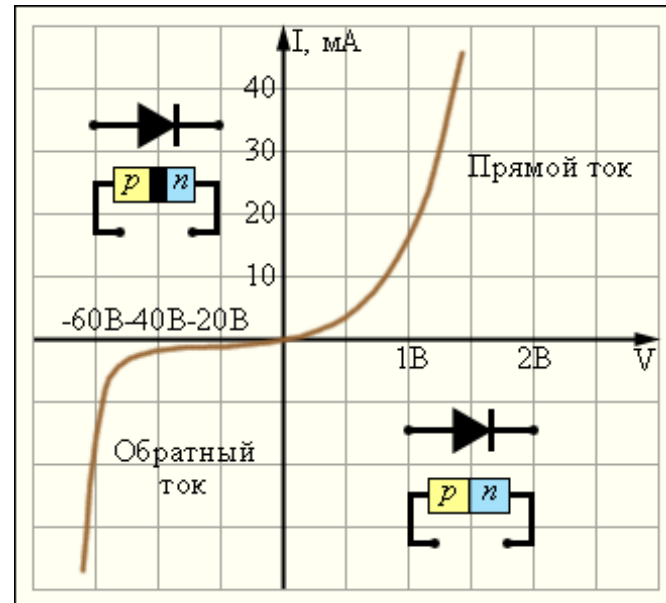
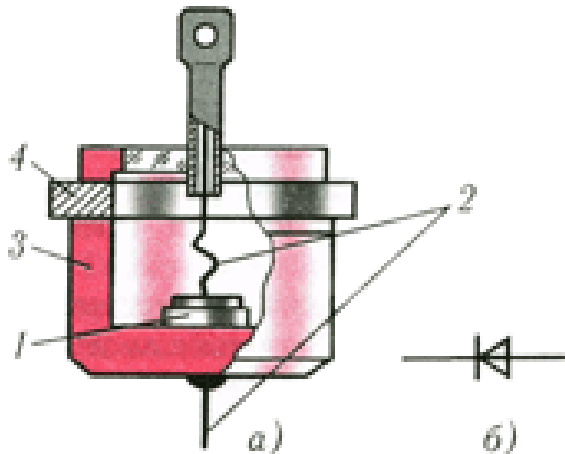
На границе между областями возникает электрическое поле, получившее название поля электронно-дырочного перехода, которое начинает противодействовать дальнейшей диффузии зарядов, т. е. дырок и свободных электронов. Такое поле часто называют запирающим полем.



Полупроводниковый диод и его применение

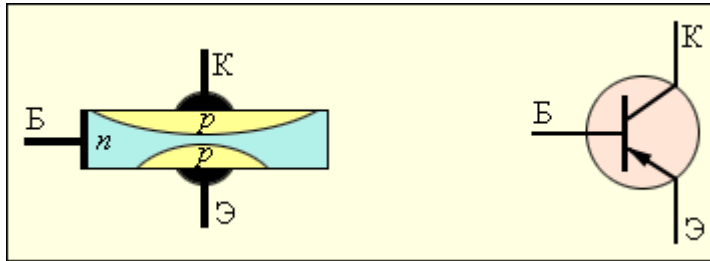
Полупроводниковым диодом называют устройство, содержащее полупроводниковый кристалл с электронно-дырочным переходом. Такой диод имеет два вывода для включения в цепь.

На рисунке а) показан разрез полупроводникового диода. Его основными частями являются: полупроводниковый кристалл 1 с р—n-переходом, выводы от кристалла 2, кожух 3 и радиатор для отвода тепла 4. Основное свойство диода заключается в его односторонней проводимости. Обозначение полупроводникового диода на электрических схемах показано на рисунке б). Полупроводниковые диоды наиболее часто применяются для выпрямления переменного тока. Ниже приведена вольт-амперная характеристика диода.

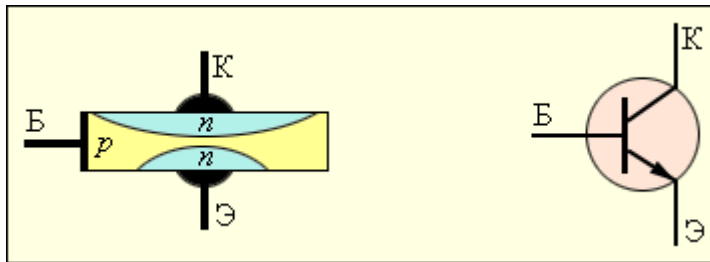


Транзистор и его применение

Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя n - p -переходами называются транзисторами. Название происходит от сочетания английских слов: transfer – переносить и resistor – сопротивление. Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний. Транзисторы бывают двух типов: p - n - p -транзисторы и n - p - n -транзисторы. Например, германиевый транзистор p - n - p -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, то есть из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, то есть области с дырочной проводимостью.



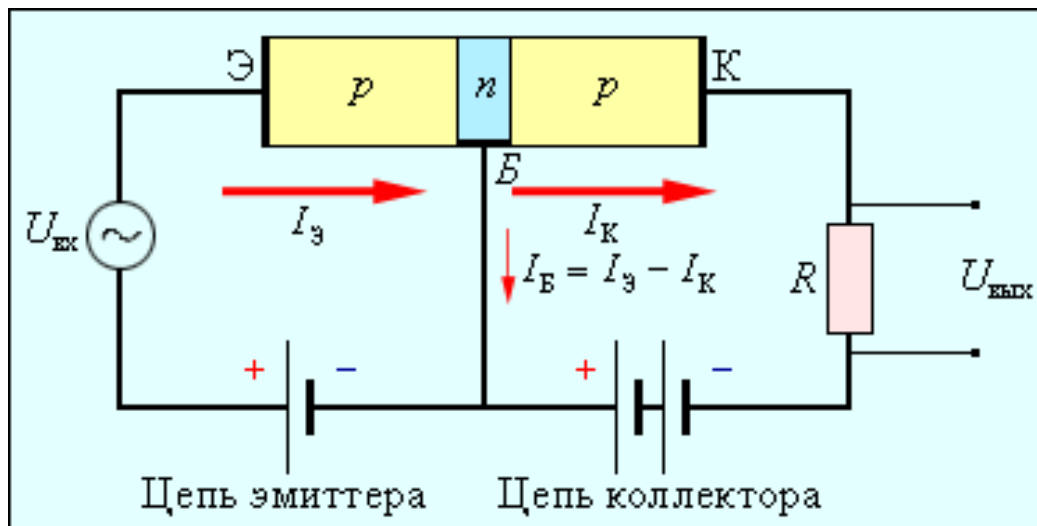
В транзисторе n - p - n -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области – проводимостью n -типа.



Транзистор и его применение

Пластинку транзистора называют базой (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости – коллектором (К), а вторую – эмиттером (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор. Оба n - p -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока.

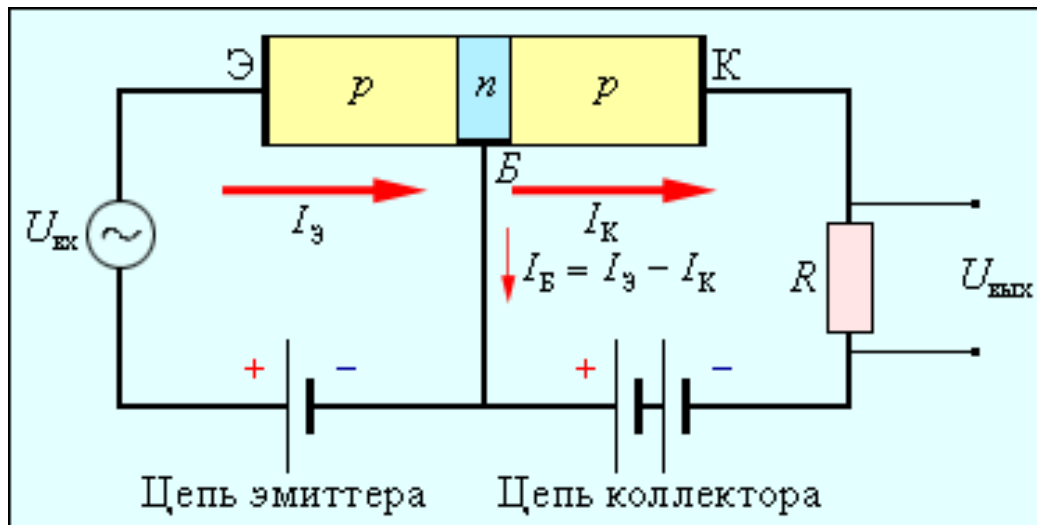
На рисунке показано включение в цепь транзистора p - n - p -структуры. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора).



Транзистор и его применение

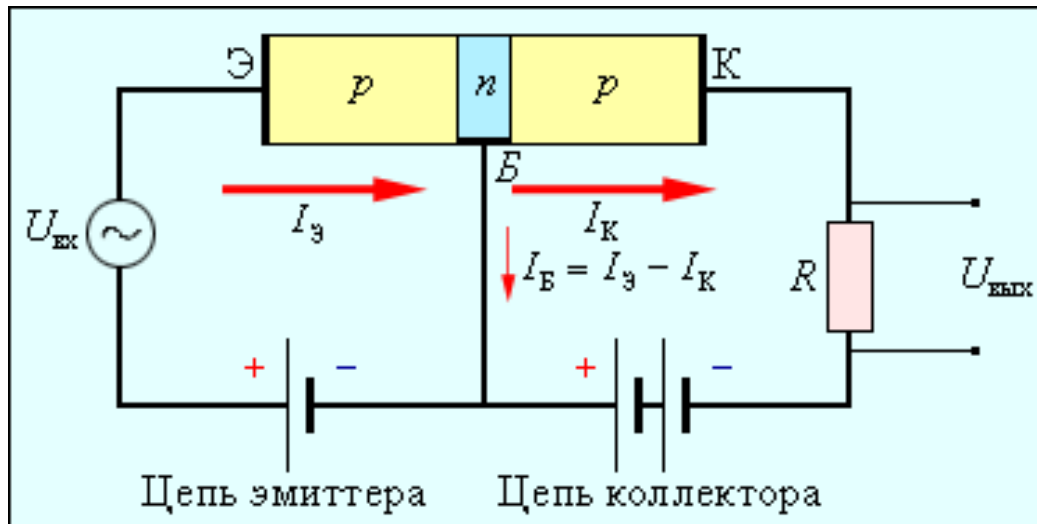
При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток $I_э$. Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, n - p -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток $I_к$. Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения, то на резисторе R , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Следовательно, транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.



Транзистор и его применение

Однако, такая схема усилителя на транзисторе является неэффективной, так как в ней отсутствует усиление сигнала по току, и через источники входного сигнала протекает весь ток эмиттера $I_э$. В реальных схемах усилителей на транзисторах источник переменного напряжения включают так, чтобы через него протекал только небольшой ток базы $I_б = I_э - I_к$. Малые изменения тока базы вызывают значительные изменения тока коллектора. Усиление по току в таких схемах может составлять несколько сотен.



Транзистор и его применение

В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. – размером в несколько микрометров. Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие *микроэлектроники*, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов – сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером в 1 см² может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов.

Применение микросхем привело к революционным изменениям во многих областях современной электронной техники. Это особенно ярко проявилось в области электронной вычислительной техники. На смену громоздким ЭВМ, содержащим десятки тысяч электронных ламп и занимавшим целые здания, пришли персональные компьютеры.