

# "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.)

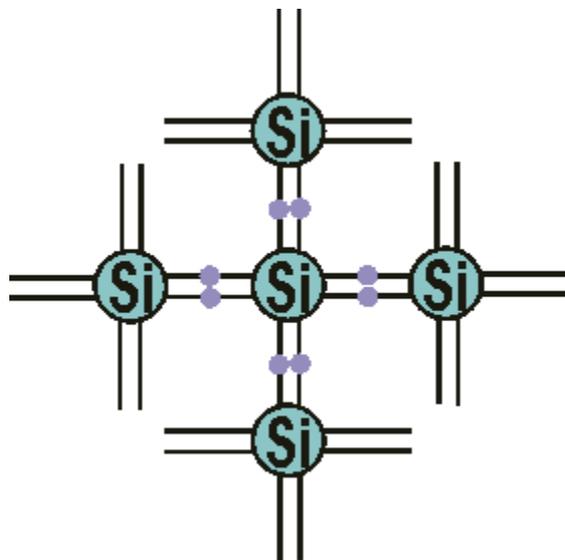
Принцип работы полупроводниковых приборов связан с тем, что в полупроводниках существует электропроводность двух типов - *электронная* и *дырочная*. Электронная электропроводность характерна для металлов и обусловлена перемещением *электронов проводимости*. При обычных рабочих температурах в полупроводниках 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

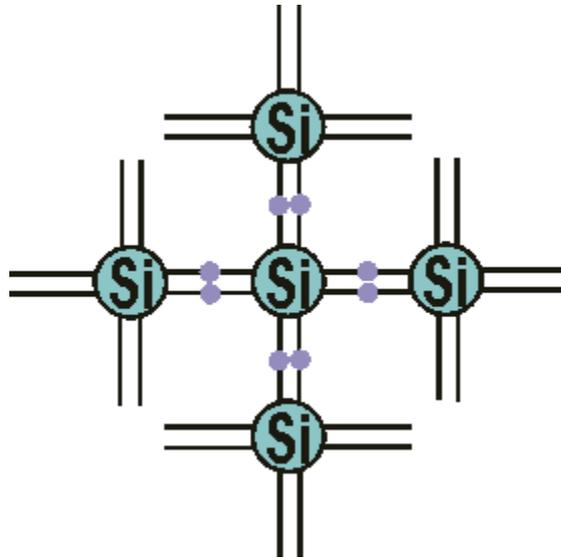
В атоме полупроводника под влиянием тепловых или других воздействий один из наиболее удаленных от ядра валентных электронов переходит в зону проводимости. Тогда атом будет иметь заряд, численно равный заряду электрона. Такой атом можно назвать положительным ионом, но надо иметь в виду, что при *ионной 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 назвали *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:



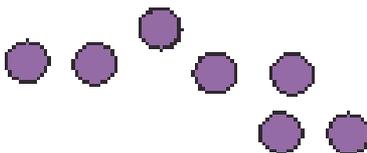
## Собственный полупроводник

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.



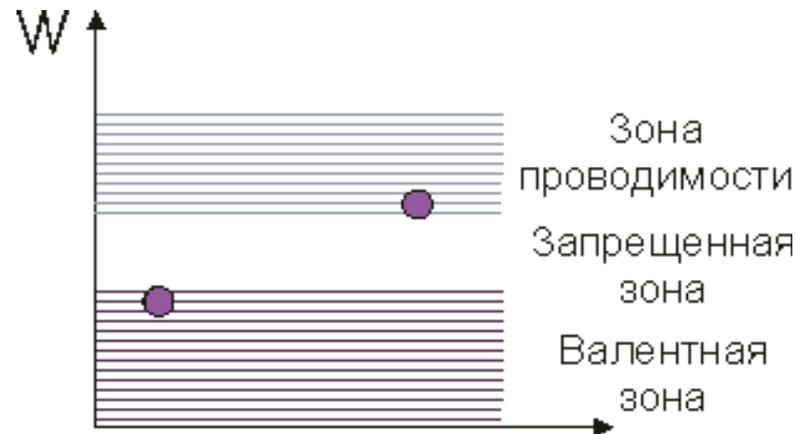
## Собственный полупроводник

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

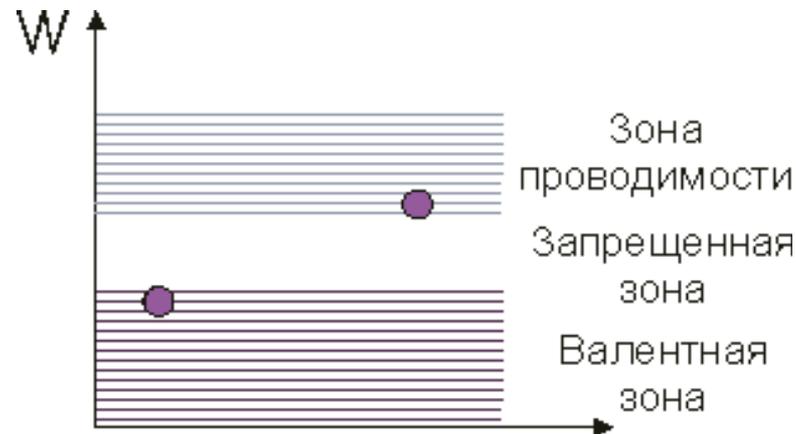
Электропроводность полупроводников наиболее правильно может быть объяснена их энергетической структурой (рисунок ниже). Как известно, ширина запрещенной зоны у полупроводников сравнительно невелика. При нагревании (или действии любой дополнительной энергии) электроны получают дополнительную энергию и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



## Собственный полупроводник

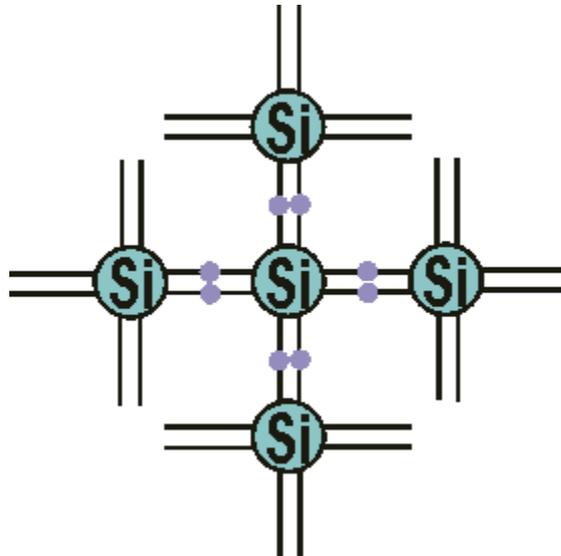
Каждый электрон, перешедший в зону проводимости, оставляет в валентной зоне дырку, т. е. в валентной зоне возникают дырки проводимости, число которых равно числу электронов, перешедших в зону проводимости. Следовательно, вместе с электронной создается дырочная электропроводность.

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

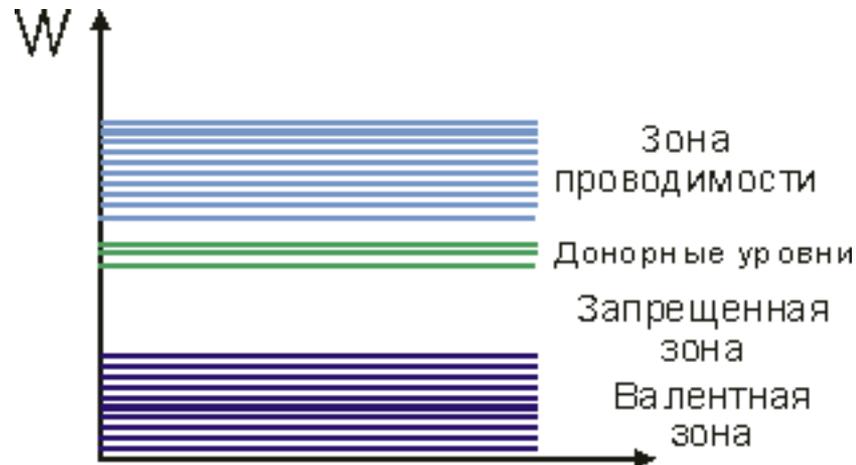
Если в полупроводник ввести примесь других веществ, то в дополнение к собственной появляется еще и *примесная электропроводность*, которая в зависимости от рода примеси может быть электронной или дырочной. Например, если к четырехвалентному кремнию добавить пентавалентную сурьму (Sb), то их атомы, взаимодействуя 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

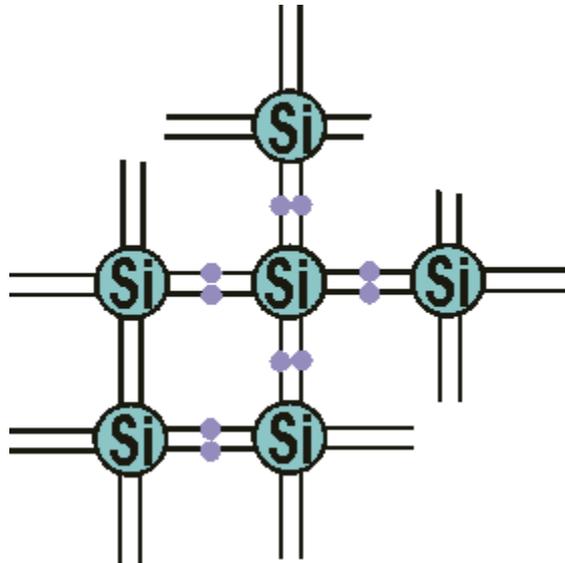
Полупроводники с преобладанием электронной электропроводности называются *электронными полупроводниками* или *полупроводниками n-типа*. Зонная диаграмма такого полупроводника показана на рисунке.

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

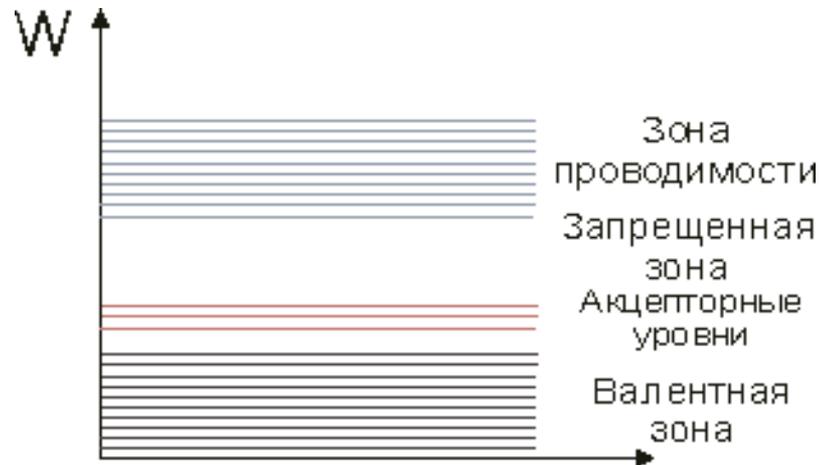
Если же в четырехвалентный кремний ввести примесь трехвалентного бора (В), то их атомы отнимают электроны от атомов кремния, оставляя у кремния дырки. Такие примеси называются *акцепторами*. Сами атомы акцептора заряжаются отрицательно. На рисунке - наглядно показано, как атом акцепторной примеси захватывает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



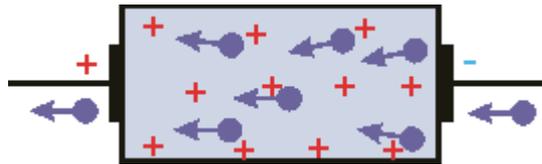
## Примесная электропроводность

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.

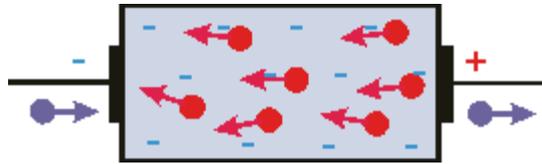
## Примесная электропроводность

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 плюсами и минусиками 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.

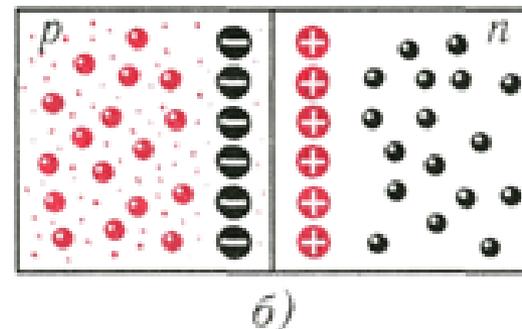
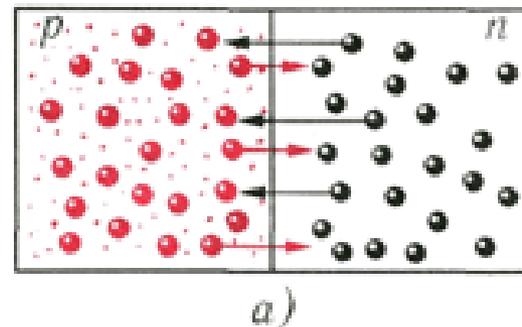


## Электронно-дырочный переход

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

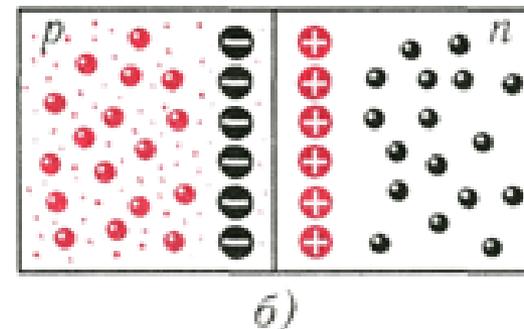
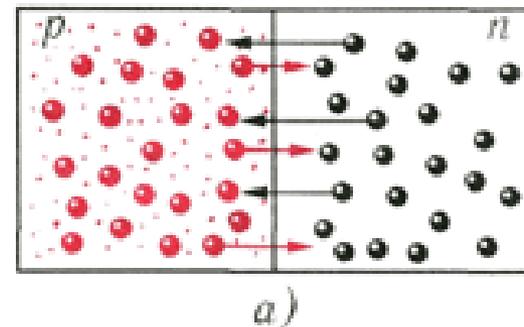
Электронно-дырочный переход (сокращенно  $n$ — $p$ -переход) является основным элементом большинства полупроводниковых приборов. Он образуется в полупроводниковом кристалле, в котором имеется контакт между областью с электронной проводимостью и областью с дырочной проводимостью. Электронно-дырочный переход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

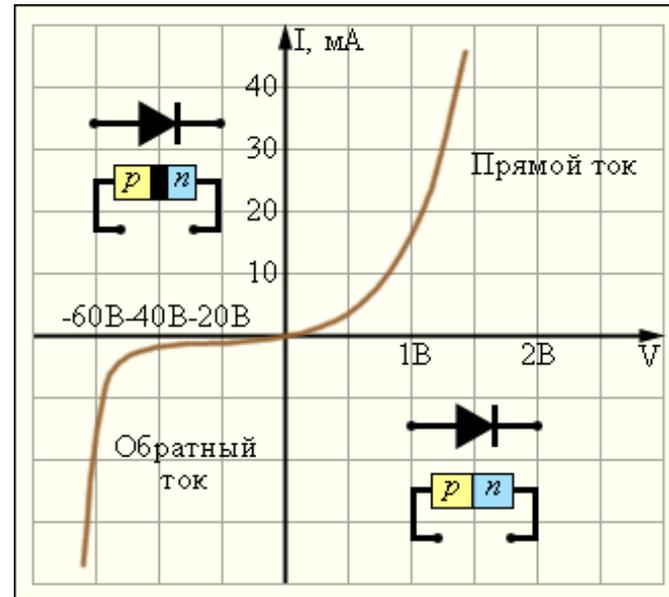
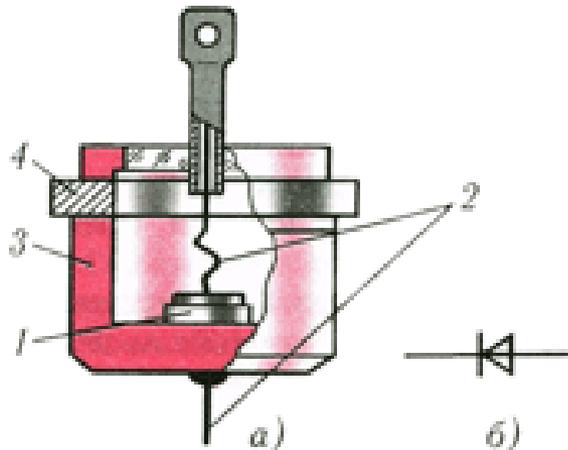
На границе между областями возникает электрическое поле, получившее название поля электронно-дырочного перехода, которое начинает противодействовать дальнейшей диффузии зарядов, т. е. дырок и свободных электронов. Такое поле часто называют запирающим полем.



# Полупроводниковый диод и его применение

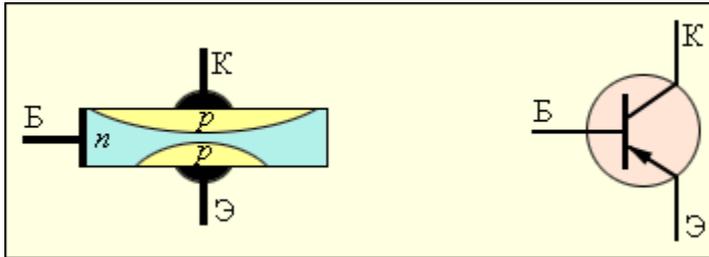
Полупроводниковым диодом называют устройство, содержащее полупроводниковый кристалл с электронно-дырочным переходом. Такой диод имеет два вывода для включения в цепь.

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.

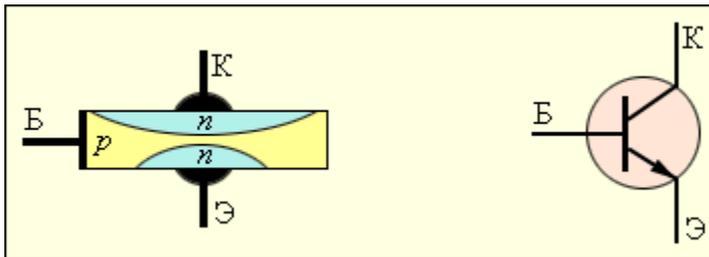


## Транзистор и его применение

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.



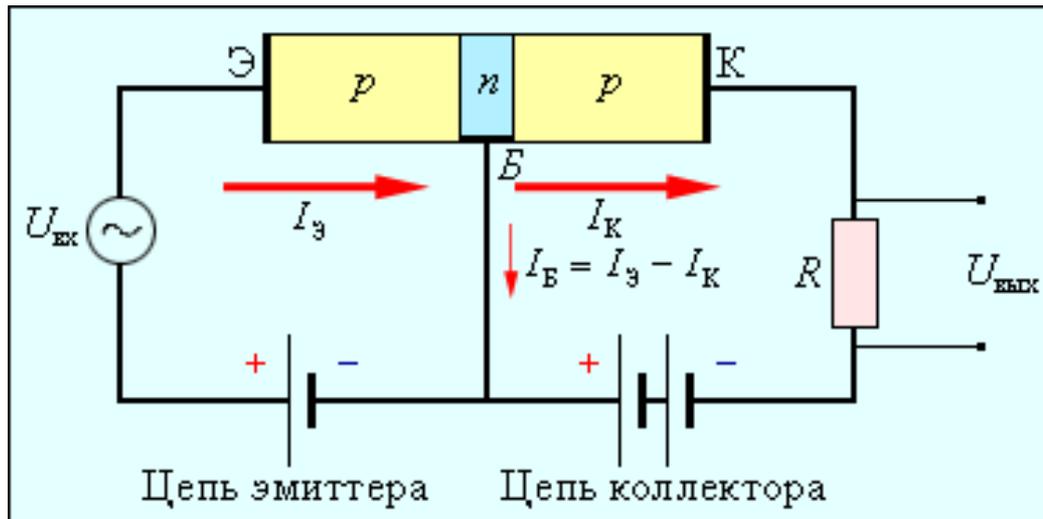
В транзисторе  $n$ - $p$ - $n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью  $p$ -типа, а созданные на ней две области – проводимостью  $n$ -типа.



## 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 p–p-перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока.

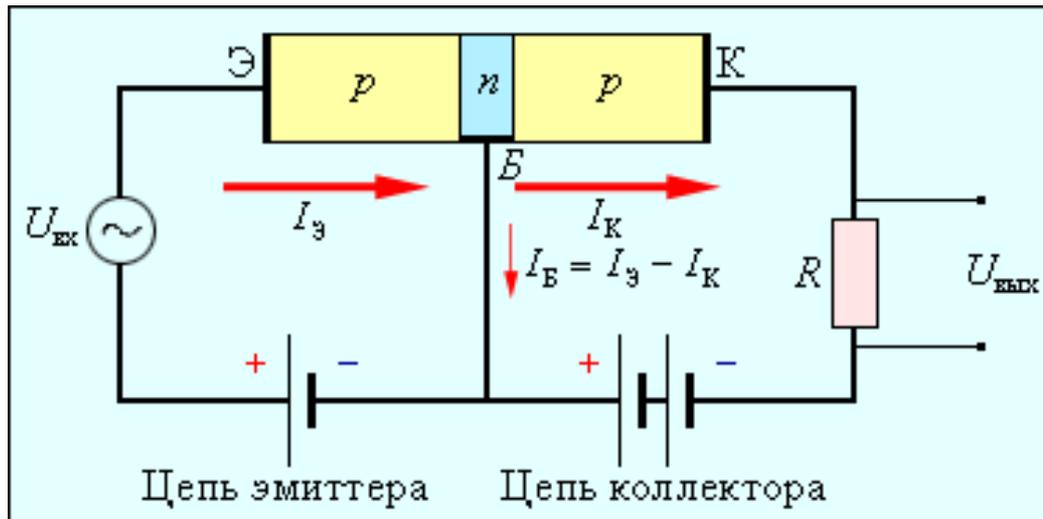
На рисунке показано включение в цепь транзистора p–n–p-структуры. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора).



## Транзистор и его применение

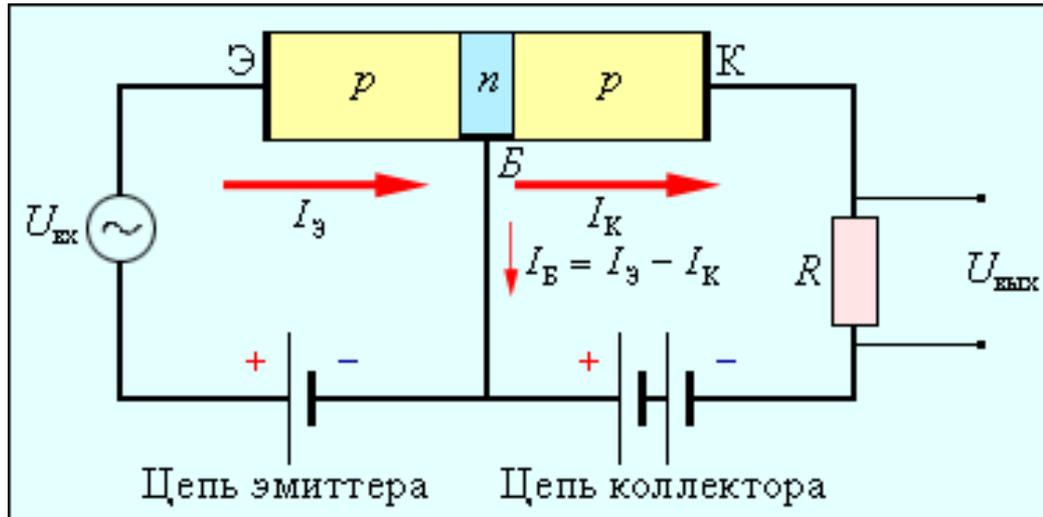
При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток  $I_э$ . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера,  $n$ - $p$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, 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 см<sup>2</sup> 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.