

## ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА (1)

*Твёрдое кристаллическое тело* рассматривается в **зонной теории твёрдых тел** как строго периодическая структура, в которой атомные ядра создают периодическое электрическое поле. Задача состоит в описании поведения электронов в этом поле.

Точное решение уравнения Шредингера для такой системы невозможно, и поэтому используют различные упрощающие **приближения**, позволяющие свести задачу многих тел к одноэлектронной задаче об одном электроне, движущемся в заданном внешнем поле.

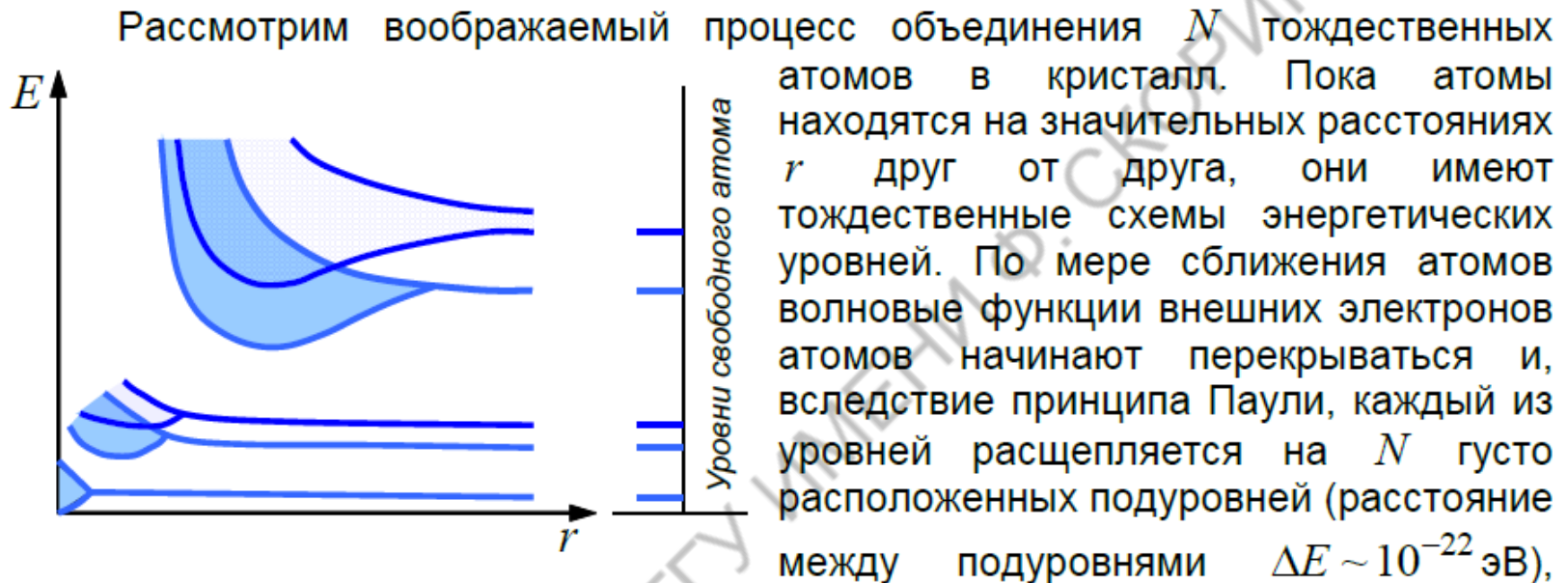
В основе зонной теории лежит так называемое **адиабатическое приближение**.

Квантово-механическая система разделяется на *тяжёлые* и *лёгкие* частицы – ядра и электроны. Поскольку массы и скорости этих частиц значительно различаются, можно считать, что движение электронов происходит в поле неподвижных ядер, а медленно движущиеся ядра находятся в усреднённом поле всех электронов. Принимая, что ядра в узлах кристаллической решётки неподвижны, *движение электрона рассматривается в постоянном периодическом поле ядер*.

Далее используется приближение **самосогласованного поля**. Взаимодействие данного электрона со всеми другими электронами заменяется действием на него стационарного электрического поля, обладающего периодичностью кристаллической решётки. Это поле создаётся *усреднённым в пространстве зарядом всех других электронов и всех ядер*.

Таким образом, в рамках зонной теории многоэлектронная задача сводится к задаче *движения одного электрона во внешнем периодическом поле* – усреднённом и согласованном поле всех ядер и электронов.

## ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА (2)



образующих **полосу** или **разрешённую энергетическую зону** (заштрихованы на рисунке). Волновые функции внутренних электронов либо совсем не перекрываются, либо перекрываются слабо, поэтому уровни внутренних электронов либо совсем не расщепляются, либо расщепляются слабо.

Разрешённые энергетические зоны разделены зонами запрещённых значений энергии, называемыми **запрещёнными энергетическими зонами**. В них электроны находиться не могут. Ширина зон (разрешённых и запрещённых) не зависит от размера кристалла. Разрешённые зоны тем шире, чем слабее связь валентных электронов с ядрами.

# МЕТАЛЛЫ, ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

В зонной теории твёрдого тела различия в электрических свойствах разных типов твёрдых тел объясняются: 1) шириной запрещённых энергетических зон и 2) различным заполнением разрешённых энергетических зон.

**Валентной зоной** называется зона, *полностью* заполненная электронами.

**Зоной проводимости** называется зона либо *частично* заполненная электронами, либо *свободная*.

## Металлы.

а) Если самая верхняя зона, содержащая электроны, заполнена лишь частично, то энергии теплового движения электронов ( $kT \sim 10^{-4}$  эВ) достаточно, чтобы электроны перешли на свободные уровни в зоне (стали свободными), обеспечивая проводимость металлов.

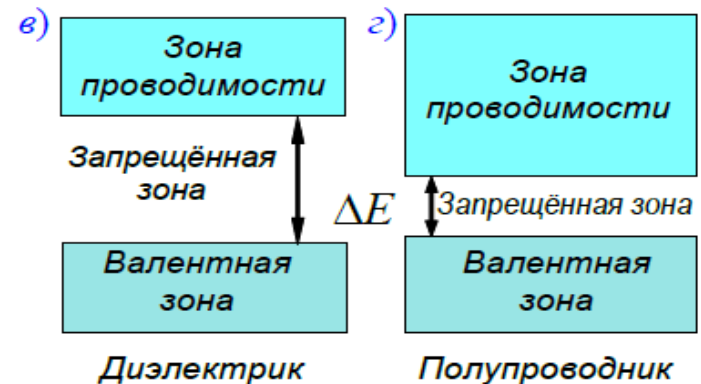
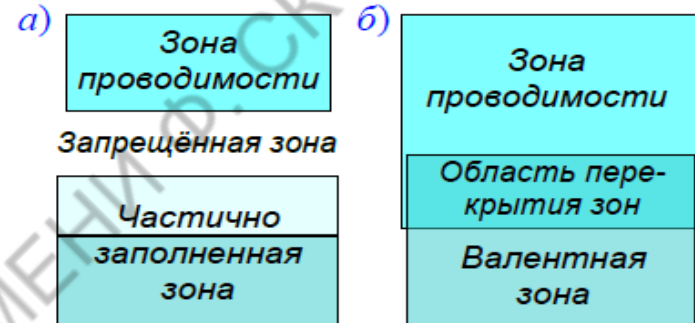
б) Если валентная зона перекрывается свободной зоной, то образуется **гибридная зона**, которая заполнена валентными электронами лишь частично, что также обеспечивает проводимость металлического типа.

## Диэлектрики и полупроводники.

В случае **диэлектрика** (см. рисунок (е)) ширина  $\Delta E$  запрещённой зоны несколько эВ; тепловое движение не может перебросить электроны из валентной зоны в зону проводимости.

В случае **полупроводника** (см. рисунок (з)) ширина  $\Delta E$  запрещённой зоны  $\sim 1$  эВ, поэтому такой переброс возможен

за счёт теплового возбуждения или за счёт внешнего источника, способного передать электронам энергию  $\Delta E$ .

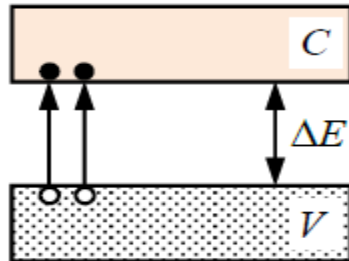




# СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниками являются твёрдые тела, которые при  $T = 0\text{ K}$  имеют *полностью занятую* электронами **валентную  $V$  зону**, отделённую от **зоны проводимости  $C$**  сравнительно узкой **запрещённой зоной**. Своим названием они обязаны тому, что их проводимость меньше электропроводности металлов и больше электропроводности диэлектриков.

Различают **собственные** и **примесные полупроводники**. Собственными полупроводниками являются химически чистые полупроводники (например, Ge, Se), а их проводимость называется **собственной проводимостью**.



При  $T = 0\text{ K}$  и отсутствии внешнего возбуждения собственные полупроводники ведут себя как диэлектрики. При повышении температуры электроны с верхних уровней **валентной зоны  $V$**  могут быть **переброшены** на нижние уровни **зоны проводимости  $C$** . При наложении на кристалл внешнего электрического поля они перемещаются против поля и создают электрический ток.

Проводимость, обусловленная электронами, называется **электронной проводимостью** или **проводимостью  $n$ -типа** (*negative*).

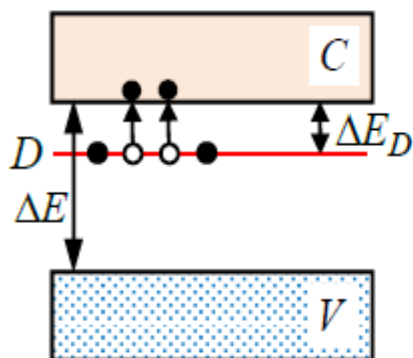
В результате переходов электронов в зону проводимости, в валентной зоне возникают **вакантные состояния**, получившие название **дырок** (*hole*, показаны на рисунке белыми кружками). Во внешнем поле на это вакантное место может переместиться соседний валентный электрон, при этом дырка "переместится" на его место. В результате дырка, так же как и перешедший в зону проводимости электрон, будет двигаться по кристаллу, но в направлении противоположном движению электрона. Формально это выглядит так, как если бы по кристаллу двигалась частица с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Проводимость собственных полупроводников, обусловленная квазичастицами – дырками, называется **дырочной проводимостью** или  **$p$ -проводимостью** (*positive*).

В **собственных полупроводниках** наблюдается, таким образом, **электронно-дырочный механизм** проводимости.

## ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (1)

Проводимость полупроводников, обусловленная примесями (атомы посторонних элементов), тепловыми (пустые узлы или атомы в междоузлии) и механическими (трещины, дислокации) дефектами, называется **примесной проводимостью**, а сами полупроводники – **примесными полупроводниками**.

Полупроводники называются **электронными** (или **полупроводниками *n*-типа**), если проводимость в них обеспечивается избыточными электронами примеси, валентность которой *на единицу больше валентности основных атомов*.



Например, пятивалентная примесь мышьяка (As) в матрице четырёхвалентного германия (Ge) искажает поле решётки, что приводит к появлению в запрещённой зоне энергетического уровня *D* валентных электронов мышьяка, называемого

**примесным уровнем**. В данном случае этот уровень располагается от дна зоны проводимости на расстоянии  $\Delta E_D = 0,013 \text{ эВ} < kT$ , поэтому уже при обычных температурах тепловая энергия достаточна для переброски электронов с примесного уровня в зону проводимости.

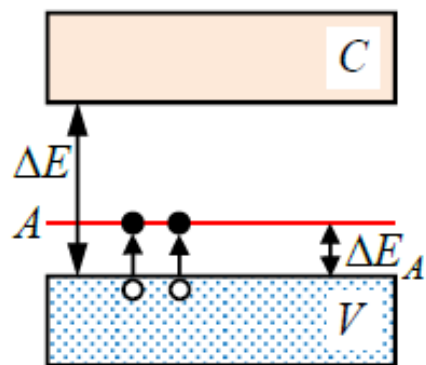
## ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (2)

Примеси, являющиеся источниками электронов называются **донорами**, а энергетические уровни этих примесей – **донорными уровнями**.

Таким образом, в полупроводниках *n*-типа (донорная примесь) реализуется **электронный механизм** проводимости.

Полупроводники называются **дырочными** (или **полупроводниками *p*-типа**), если проводимость в них обеспечивается дырками, вследствие введения примеси, валентность которой *на единицу меньше валентности основных атомов*.

Например, введение трёхвалентной примеси бора (В) в матрицу



четырёхвалентного германия (Ge) приводит к появлению в запрещённой зоне примесного энергетического уровня *A*, не занятого электронами. В данном случае этот уровень располагается от верхнего края валентной зоны на расстоянии  $\Delta E_A = 0,08$  эВ. Электроны из валентной зоны могут переходить на примесный уровень, локализуясь на атомах бора. Образовавшиеся в валентной зоне дырки становятся носителями тока.

Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны, называются **акцепторами**, а энергетические уровни этих примесей – **акцепторными уровнями**. В полупроводниках *p*-типа (акцепторная примесь) реализуется **дырочный механизм** проводимости.

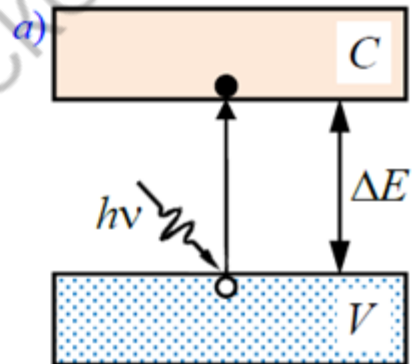
Таким образом, в отличие от собственной проводимости, **примесная проводимость обусловлена носителями одного знака**.



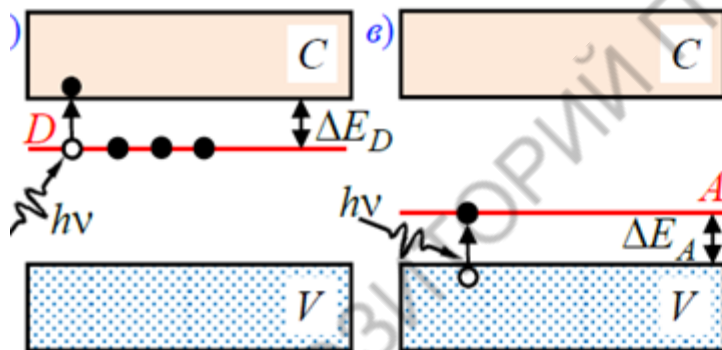
# ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (1)

Фотопроводимость полупроводников – увеличение электропроводности полупроводников под действием электромагнитного излучения – может быть связана со свойствами как основного вещества, так и содержащихся в нем примесей.

**Собственная фотопроводимость.** Если энергия фотонов больше ширины запрещённой зоны ( $h\nu \geq \Delta E$ ), электроны могут быть переброшены из валентной зоны в зону проводимости (рис. (а)), что приведёт к появлению добавочных (неравновесных) электронов (в зоне проводимости) и дырок (в валентной зоне). Собственная фотопроводимость обусловлена как электронами, так и дырками.



**Примесная фотопроводимость.** Если полупроводник содержит примеси, то фотопроводимость может возникать **и при  $h\nu < \Delta E$** : при донорной примеси фотон должен обладать энергией  $h\nu \geq \Delta E_D$ , при акцепторной примеси  $h\nu \geq \Delta E_A$ . При поглощении света примесными центрами происходит переход электронов с донорных уровней



в зону проводимости в случае полупроводника *n*-типа (рис. (б)) или из валентной зоны на акцепторные уровни в случае полупроводника *p*-типа (рис. (в)).

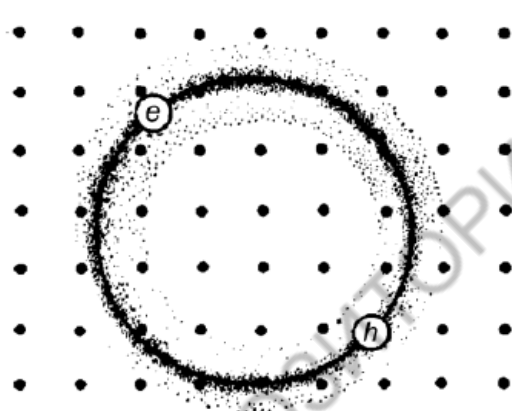
## ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (2)

*Примесная фотопроводимость* для полупроводников *n*-типа – чисто электронная, для полупроводников *p*-типа – чисто дырочная.

**Таким образом**, если  $h\nu \geq \Delta E$  для собственных полупроводников, и  $h\nu \geq \Delta E_n$  для примесных полупроводников, то в полупроводнике возбуждается фотопроводимость (здесь  $\Delta E_n$  – энергия активации примесных атомов).

Отсюда можно определить **красную границу фотопроводимости** – максимальную длину волны, при которой ещё фотопроводимость возбуждается:  $\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E}$ ,  $\lambda_0 = \frac{ch}{\Delta E_n}$  для собственных и примесных полупроводников, соответственно.

Наряду с поглощением, приводящим к появлению фотопроводимости, может иметь место поглощение света с образованием **экситонов**, которое не



приводит к фотопроводимости. **Экситон** – это квазичастица, представляющая собой связанную пару электрон–дырка, которая может свободно перемещаться в кристалле. Экситоны возбуждаются фотонами с энергиями меньшими энергии запрещённой зоны и могут быть наглядно представлены в виде модели спаренных электрона (*e*) и дырки (*h*), движущихся вокруг общего центра масс, которым не хватило энергии, чтобы оторваться друг от друга (так называемый *экситон Ванье-Мотта*). В целом экситон электрически нейтрален, поэтому экситонное поглощение света не приводит к увеличению фотопроводимости.



## ЛЮМИНИСЦЕНЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (1)

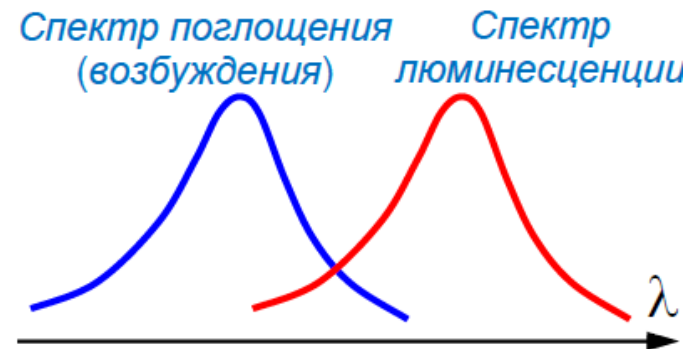
**Люминесценцией** называется излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, бóльшую периода световых колебаний.

Вещества, способные под действием различного рода возбуждений светиться, называются **люминофорами**.

В зависимости от *способов* возбуждения различают: **фотолюминесценцию** (под действием света), **рентгенолюминесценцию** (под действием рентгеновского излучения), **катодолюминесценцию** (под действием электронов), **радиолюминесценцию** (при возбуждении ядерным излучением, например  $\gamma$ -излучением, нейтронами, протонами), **хемилюминесценцию** (при химических превращениях), **триболюминесценцию** (при растирании или раскалывании некоторых кристаллов).

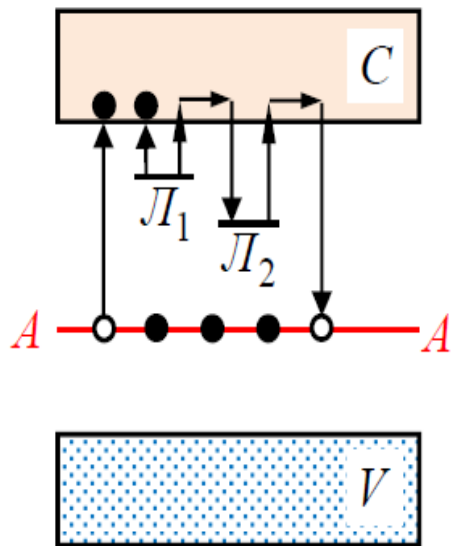
По *длительности* свечения условно различают: **флуоресценцию** ( $t \leq 10^{-8}$  с) и **фосфоресценцию** – свечение, продолжающееся заметный промежуток времени после прекращения возбуждения.

Уже в первых количественных исследованиях люминесценции было сформулировано **правило Стокса**: длина волны люминесцентного излучения всегда больше длины волны света, возбудившего его.



## ЛЮМИНИСЦЕНЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (2)

Твёрдые тела, представляющие собой эффективно люминесцирующие искусственно приготовленные кристаллы с чужеродными примесями, получили название **кристаллофосфоров**.



На примере кристаллофосфоров рассмотрим механизмы возникновения фосфоресценции с точки зрения зонной теории твёрдых тел. Между валентной зоной и зоной проводимости кристаллофосфора располагаются примесные уровни активатора  $A$ . Для возникновения длительного свечения кристаллофосфор должен содержать центры захвата, или ловушки для электронов ( $L_1$ ,  $L_2$ ). Длительность процесса миграции электрона до момента рекомбинации его с ионом активатора определяется

временем пребывания электронов в ловушках.

# КОНТАКТ ЭЛЕКТРОННОГО И ДЫРОЧНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВ (*p-n*-переход)

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную проводимость, называется **электронно-дырочным переходом** (или *p-n*-переходом).

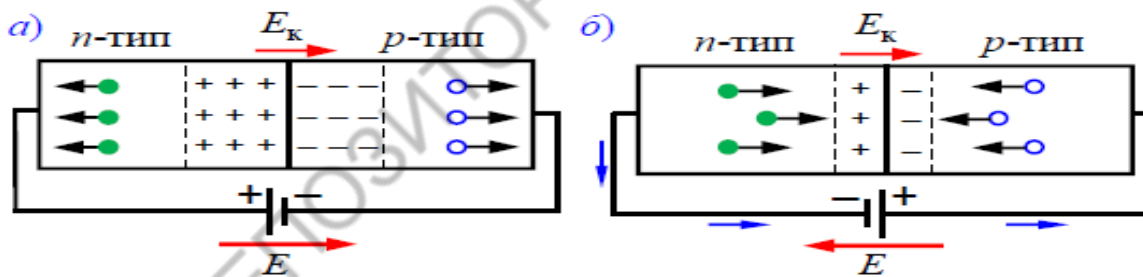
*p-n*-Переход обычно создаётся при специальной обработке кристаллов, например, при выдержке плотно прижатых кристаллов германия (*n*-типа) и индия при 500°C в вакууме (а) атомы индия диффундируют на некоторую глубину в германий, образуя промежуточный слой германия, обогащённого индием, проводимость которого *p*-типа (б).



Электронны из *n*-полупроводника, где их концентрация выше, будут диффундировать в *p*-полупроводник. Диффузия дырок происходит в обратном направлении. В *n*-полупроводнике из-за ухода электронов вблизи границы остаётся нескомпенсированный **положительный объёмный заряд** неподвижных ионизованных донорных атомов. В *p*-полупроводнике из-за ухода дырок вблизи границы образуется **отрицательный объёмный заряд** неподвижных ионизованных акцепторов. Эти объёмные заряды создают **запирающий равновесный контактный слой**, препятствующий дальнейшему переходу электронов и дырок.



Сопротивление запирающего слоя можно изменить с помощью **внешнего** электрического поля. Если направление внешнего поля  $\vec{E}$  совпадает с направлением  $\vec{E}_K$  поля контактного слоя (а), то запирающий слой расширяется,



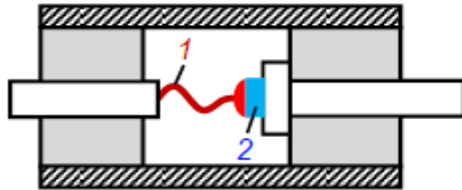
и его сопротивление возрастает – такое направление называется **запирающим (обратным)**. Если направление внешнего поля противоположно полю контактного слоя (б), то перемещение электронов и дырок приведёт к сужению контактного слоя, и его сопротивление уменьшится – такое направление называется **пропускным (прямым)**.

положно полю контактного слоя (б), то перемещение электронов и дырок приведёт к сужению контактного слоя, и его сопротивление уменьшится – такое направление называется **пропускным (прямым)**.



# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТРИОДЫ (ТРАНЗИСТОРЫ) (1)

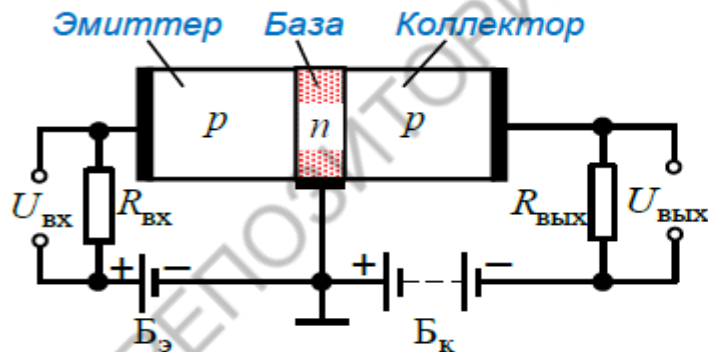
**Односторонняя (вентильная) проводимость  $p$ - $n$ -перехода** используется в **полупроводниковых диодах**, содержащих один  $p$ - $n$ -переход. По конструкции они делятся на **точечные** и **плоскостные**.



В **точечных диодах**  $p$ - $n$ -переход образуется в точке касания **металлического контакта 1** и **полупроводника 2** (например, в точечном германиевом диоде диффузия алюминия в  $n$ -германий образует в германии  $p$ -слой). Технология изготовления германиевого **плоскостного диода** описана выше.

$p$ - $n$ -Переходы обладают не только прекрасными выпрямляющими свойствами, но могут быть использованы также для усиления, а если в схему ввести обратную связь, то и для генерации электрических колебаний. Приборы, предназначенные для этих целей, получили название полупроводниковых триодов или **транзисторов**. Изобретение в 1949 г. транзисторов считается самым значительным изобретением XX века. За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта У.Шокли, Дж.Бардину и У.Браттейну в 1956 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

Транзисторы могут быть типа  $n$ - $p$ - $n$  и типа  $p$ - $n$ - $p$  в зависимости от чередования областей с различной проводимостью. *Для примера* рассмотрим



триод типа  $p$ - $n$ - $p$ . Рабочие "электроды" триода, которыми являются база (средняя часть транзистора), эмиттер и коллектор (прилегающие к базе с обеих сторон области с иным типом проводимости), включаются в схему с помощью невыпрямляющих контактов – металлических проводников. Между эмиттером и базой прикладывается

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТРИОДЫ (ТРАНЗИСТОРЫ) (2)

постоянное смещающее напряжение в прямом направлении, а между базой и коллектором – постоянное смещающее напряжение в обратном направлении. Усиливается переменное напряжение подаётся на входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$ , а усиленное – снимается с выходного сопротивления  $R_{\text{ВЫХ}}$ .

Протекание тока в цепи эмиттера обусловлено в основном движением дырок (они являются основными носителями тока) и сопровождается их "впрыскиванием" – *инжекцией* – в область базы. Проникшие в базу дырки диффундируют по направлению к коллектору, причём при небольшой толщине базы значительная часть инжектированных дырок достигает коллектора. Здесь дырки захватываются полем, действующим внутри перехода (притягиваются к отрицательно заряженному коллектору), вследствие чего изменяется ток коллектора. Следовательно, всякое изменение тока в цепи эмиттера вызывает изменение тока в цепи коллектора.

Прикладывая между эмиттером и базой переменное напряжение, получим в цепи коллектора переменный ток, а на выходном сопротивлении – переменное напряжение. Величина *усиления* зависит от свойств *p-n*-переходов, нагрузочных сопротивлений и напряжения батареи  $B_K$ . Обычно  $R_{\text{ВЫХ}} \gg R_{\text{ВХ}}$ , поэтому  $U_{\text{ВЫХ}} \gg U_{\text{ВХ}}$  (усиление может достигать 10 000). Так как мощность переменного тока, выделяемая в  $R_{\text{ВЫХ}}$ , может быть больше, чем расходуемая в цепи эмиттера, то транзистор даёт и *усиление мощности*.