

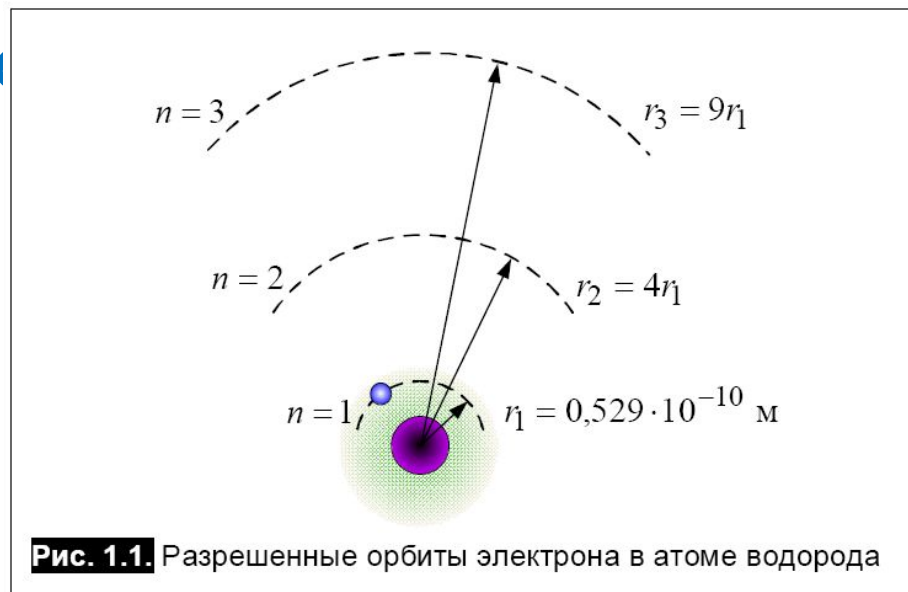
ЛЕКЦИЯ №4

Основы технических знаний

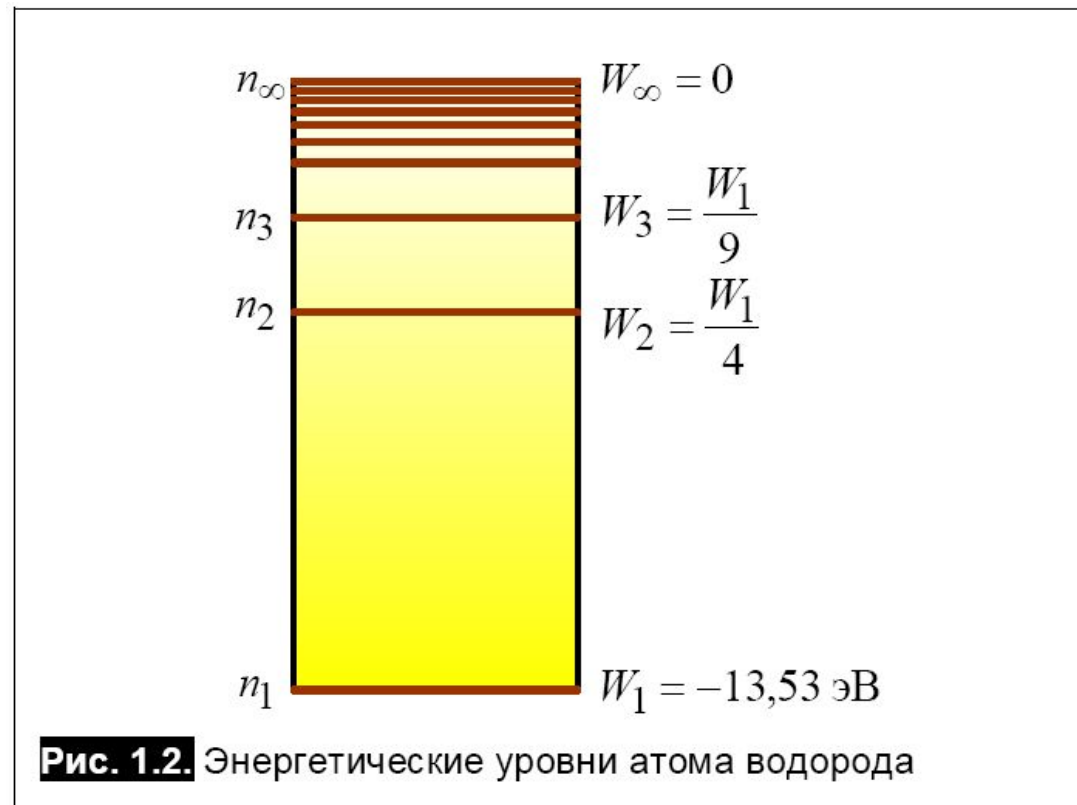
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
РАБОТЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ**

Энергетические уровни и зоны

- В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, может иметь только определенные **дискретные** или **квантованные значения энергии** и **дискретные значения орбитальной скорости**.
- Поэтому электрон может двигаться вокруг ядра только по определенным (разрешенным) орбитам.



- Каждой орбите соответствует строго определенная энергия электрона, или **энергетический уровень**.
- Энергетические уровни отделены друг от друга запрещенными интервалами.

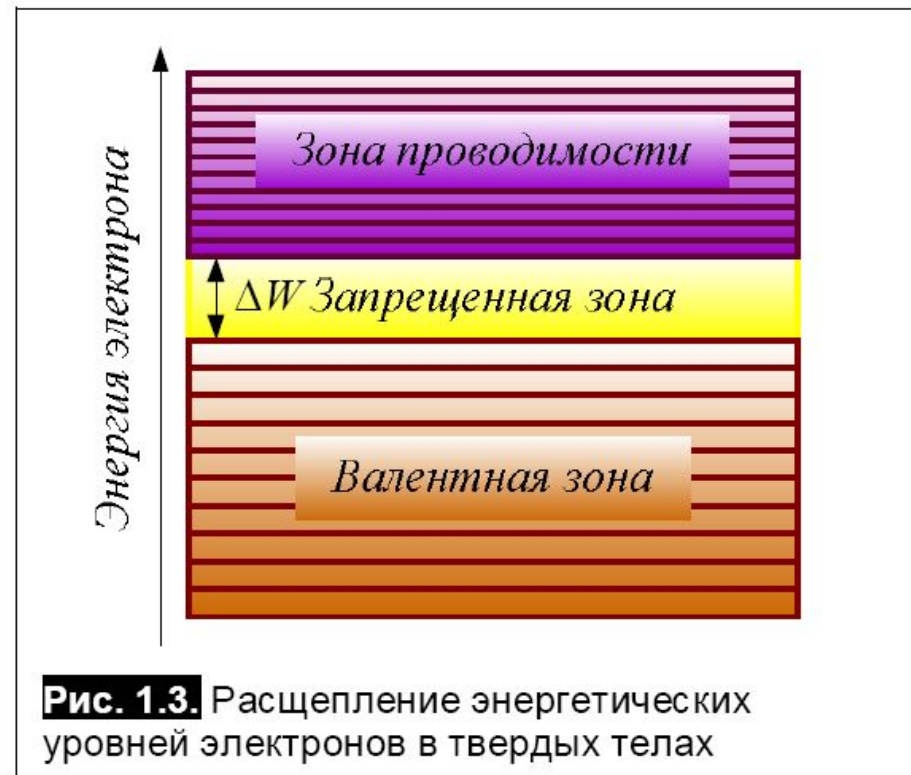


- Согласно *принципу Паули*
- на одном энергетическом уровне не может находиться более двух электронов.
- В невозбужденном состоянии электроны в атоме находятся на ближайших к ядру орбитах.
- При поглощении атомом энергии какой-либо электрон может перейти на более высокий свободный уровень, либо вовсе покинуть атом, став свободным носителем электрического заряда (атом превратится в положительно заряженный ион).

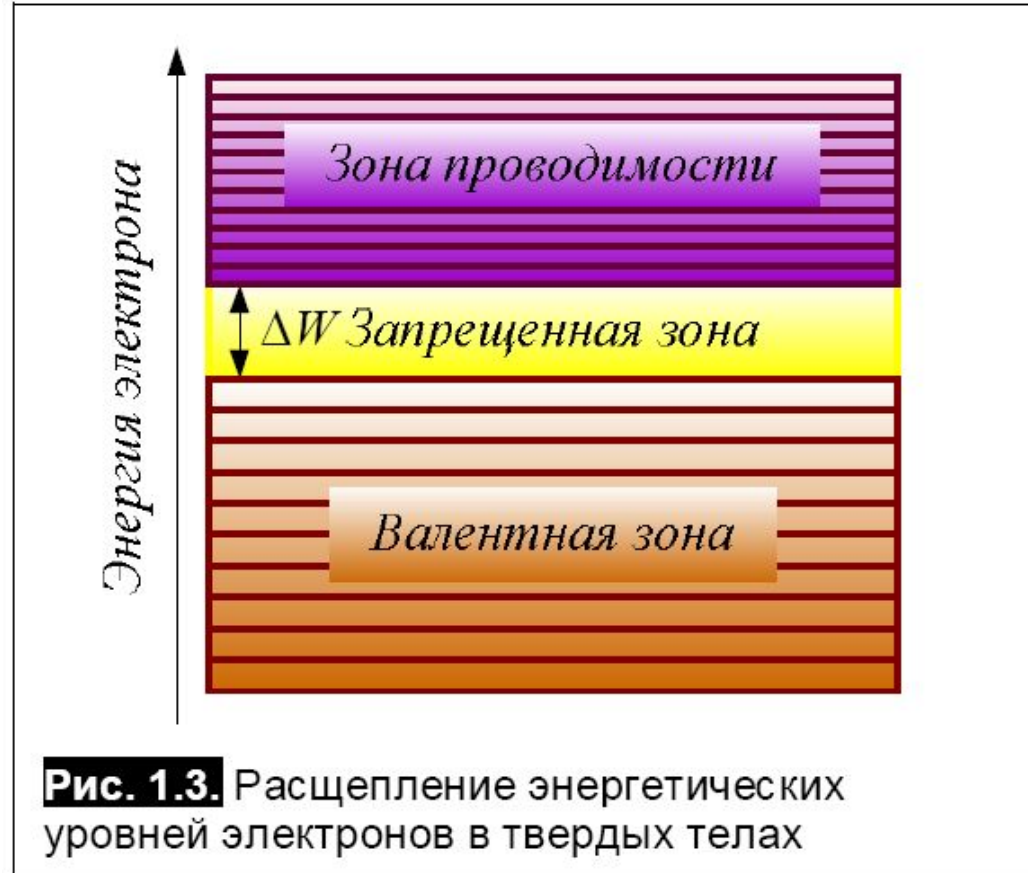
Проводники, полупроводники и диэлектрики

- В твердых телах атомы вещества могут образовывать правильную *кристаллическую решетку*.
- Соседние атомы удерживаются межатомными силами на определенном расстоянии друг от друга в точках равновесия этих сил - *узлах кристаллической решетки*.
- Под действием тепла атомы, совершают колебательные движения относительно положения равновесия.

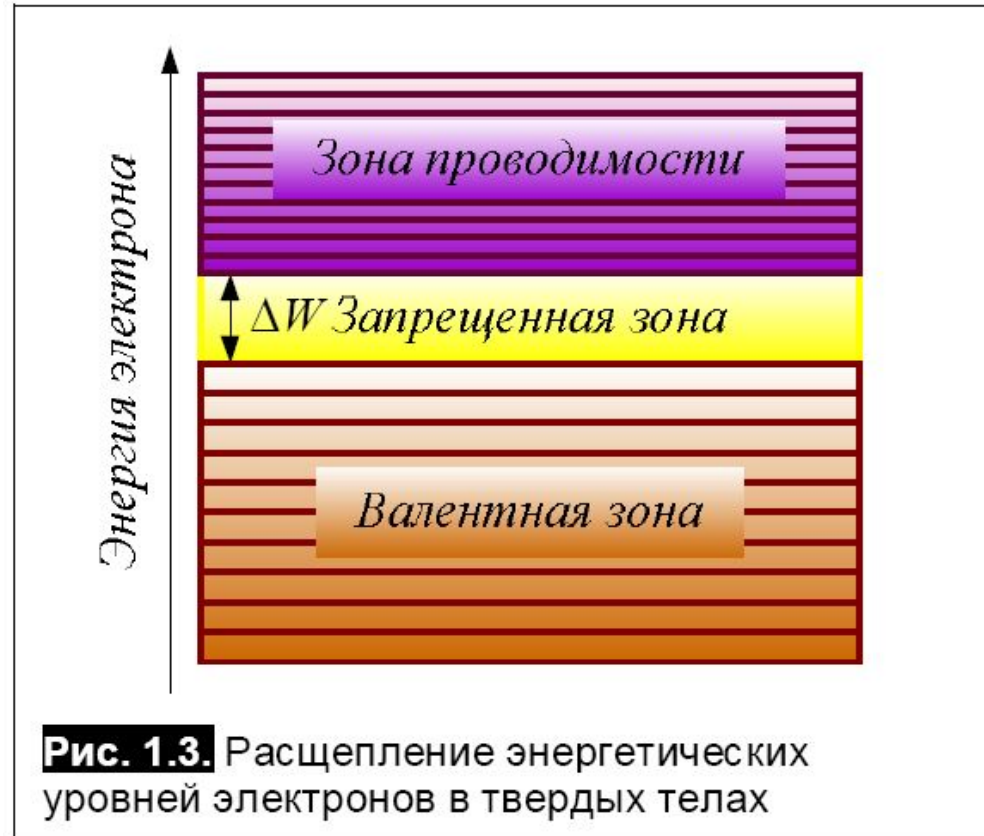
- Соседние атомы в твердых телах так близко находятся друг к другу, что их внешние электронные оболочки соприкасаются или перекрываются.
- В результате происходит расщепление энергетических уровней электронов на большое число близко расположенных уровней, образующих *энергетические зоны*.



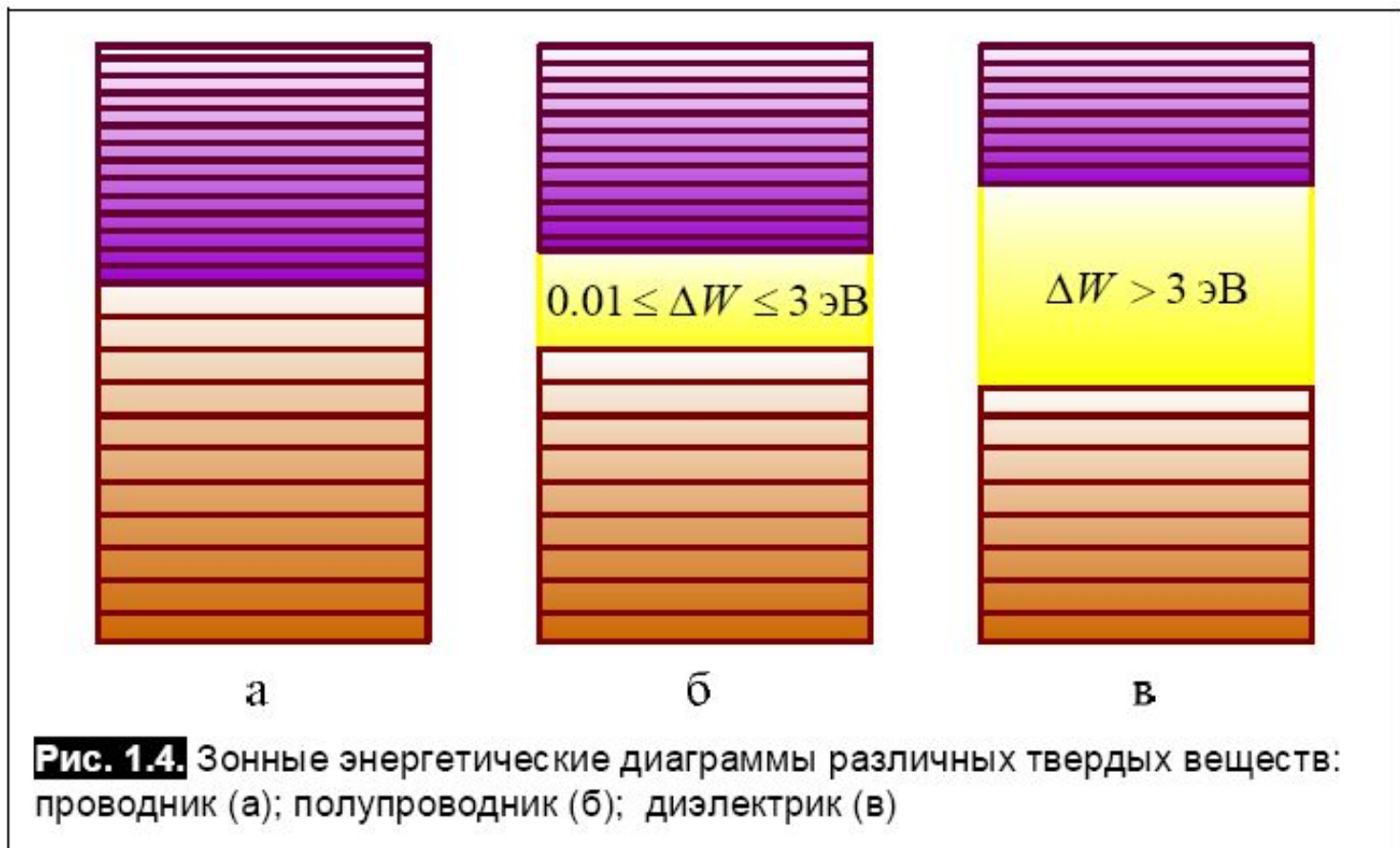
- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля все энергетические уровни заняты электронами, называется *валентной*.



- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля электроны отсутствуют, называется *зоной проводимости*.
- Между валентной зоной и зоной проводимости расположена *запрещенная зона*.



- Ширина запрещенной зоны является основным параметром, характеризующим свойства твердого тела.



Вещества с полупроводниковыми свойствами

- На фрагменте периодической таблицы элементы, образующие наиболее распространенные полупроводниковые материалы, выделены синим. Полупроводниками могут быть или отдельные элементы, например, кремний или германий, соединения, например, GaAs, InP и CdTe, или сплавы, как, например, $\text{Si}_x\text{Ge}_{(1-x)}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ где x - это доля элемента, изменяющаяся от 0 до 1.

							VIIIA
							² He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
		⁵ B 10.811	⁶ C 12.011	⁷ N 14.007	⁸ O 15.999	⁹ F 18.998	¹⁰ Ne 20.183
		¹³ Al 26.982	¹⁴ Si 28.086	¹⁵ P 30.974	¹⁶ S 32.064	¹⁷ Cl 35.453	¹⁸ Ar 39.948
IB	IIB						
²⁹ Cu 63.54	³⁰ Zn 65.37	³¹ Ga 69.72	³² Ge 72.59	³³ As 74.922	³⁴ Se 78.96	³⁵ Br 79.909	³⁶ Kr 83.80
⁴⁷ Ag 107.870	⁴⁸ Cd 112.40	⁴⁹ In 114.82	⁵⁰ Sn 118.69	⁵¹ Sb 121.75	⁵² Te 127.60	⁵³ I 126.904	⁵⁴ Xe 131.30
⁷⁹ Au 196.967	⁸⁰ Hg 200.59	⁸¹ Tl 204.37	⁸² Pb 207.19	⁸³ Bi 208.980	⁸⁴ Po (210)	⁸⁵ At (210)	⁸⁶ Rn (222)

- В полупроводниковой электронике широкое применение получили
- германий Ge ($\Delta W = 0,67$ эВ)
- и кремний Si ($\Delta W = 1,12$ эВ)(элементы 4-й группы периодической системы элементов Менделеева),
- а также арсенид галлия GaAs ($\Delta W = 1,43$ эВ).

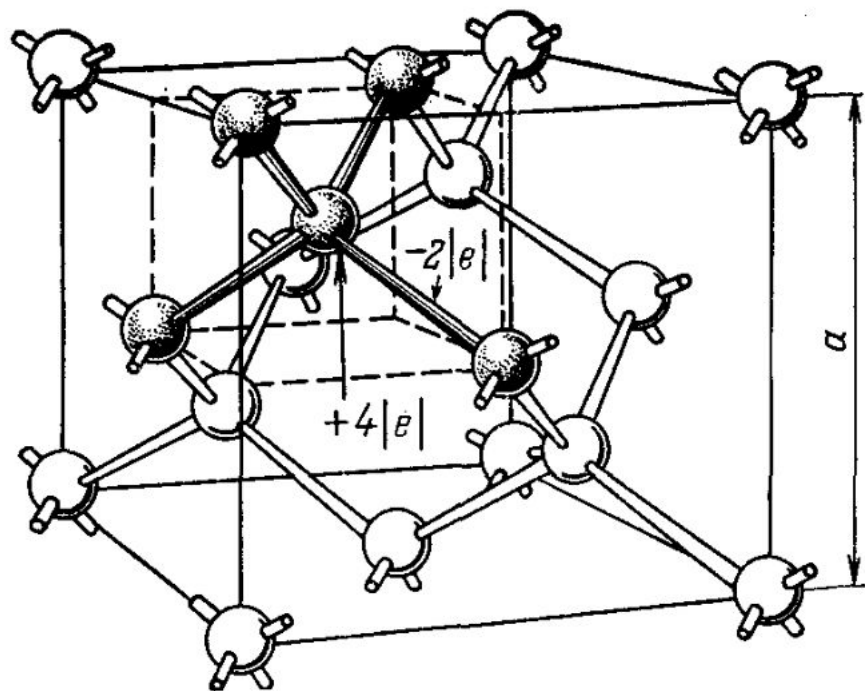
- Электроны в твердом теле могут совершать переходы внутри разрешенной зоны при наличии в ней свободных уровней, а также переходить из одной разрешенной зоны в другую.
- Для перехода электрона из низшей энергетической зоны в высшую требуется затратить энергию, равную ширине запрещенной зоны.
- Способность твердого тела проводить ток под действием электрического поля зависит от структуры энергетических зон и степени их заполнения электронами.

- В **металлах** зона проводимости частично заполнена.
- Концентрация свободных электронов в металлах практически не зависит от температуры.
- Зависимость электропроводности металлов от температуры обусловлена подвижностью электронов, которая уменьшается с увеличением температуры из-за увеличения амплитуды колебания атомов в кристаллической решетке, что влечет за собой уменьшение длины свободного пробега электрона.

- У **диэлектриков** и **полупроводников** при температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости совершенно пуста, поэтому эти вещества проводить ток не могут.
- Если этому веществу сообщить достаточное количество энергии, то электроны, могут преодолеть ширину запрещенной зоны и перейти в зону проводимости. В этом случае вещество приобретает некоторую электропроводность, которая возрастает с ростом температуры.

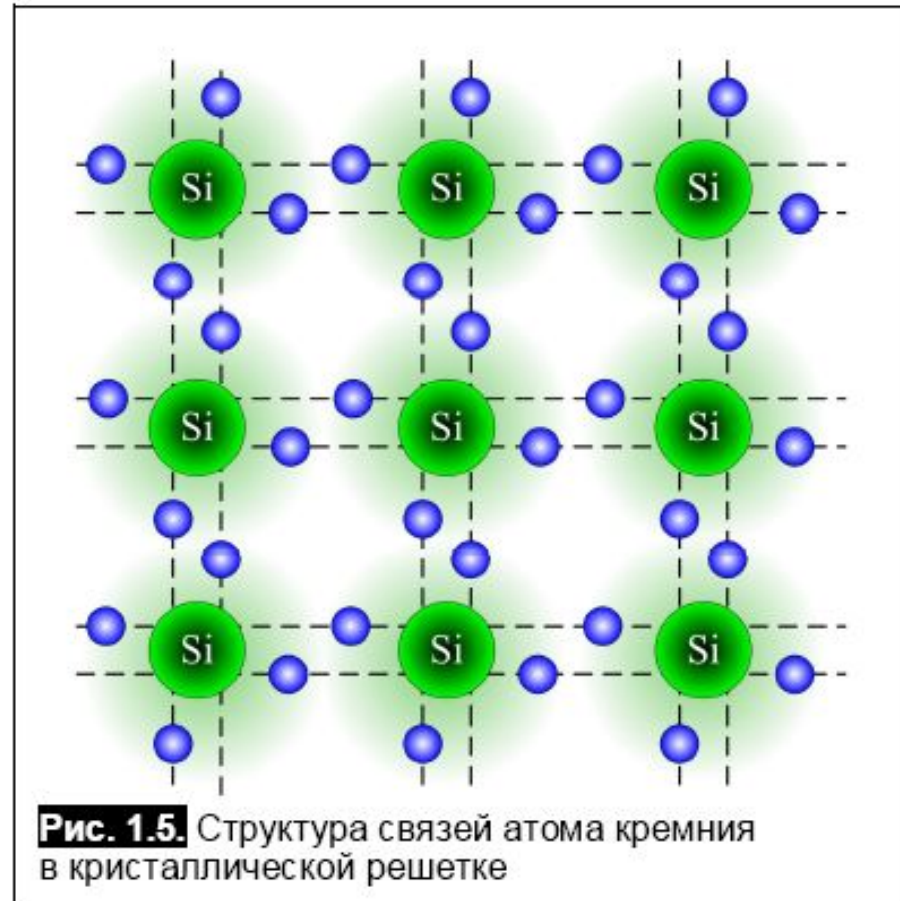
Собственная электропроводность полупроводников

- Атомы кремния (Si) 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.

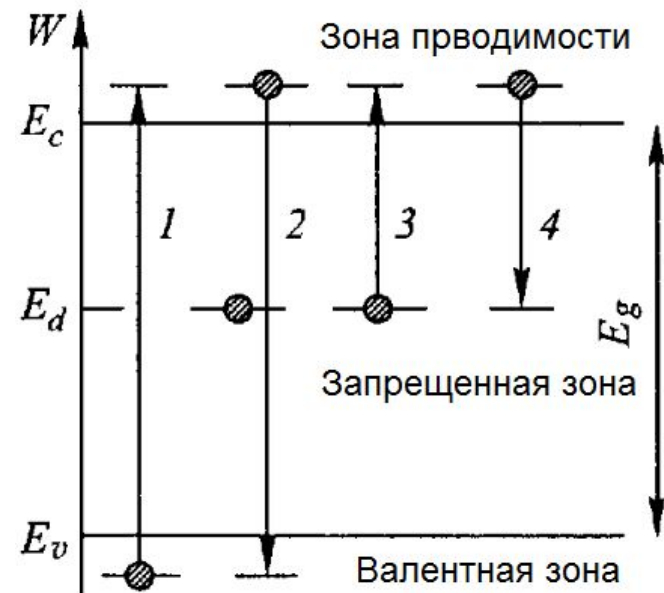


Кристаллическая решетка типа алмаза:
 a — постоянная решетки

- При температуре абсолютного нуля ($T=0K$) все энергетические состояния внутренних зон и валентная зона занята электронами полностью, а зона проводимости совершенно пуста.
- Поэтому в этих условиях кристалл полупроводника является практически диэлектриком.

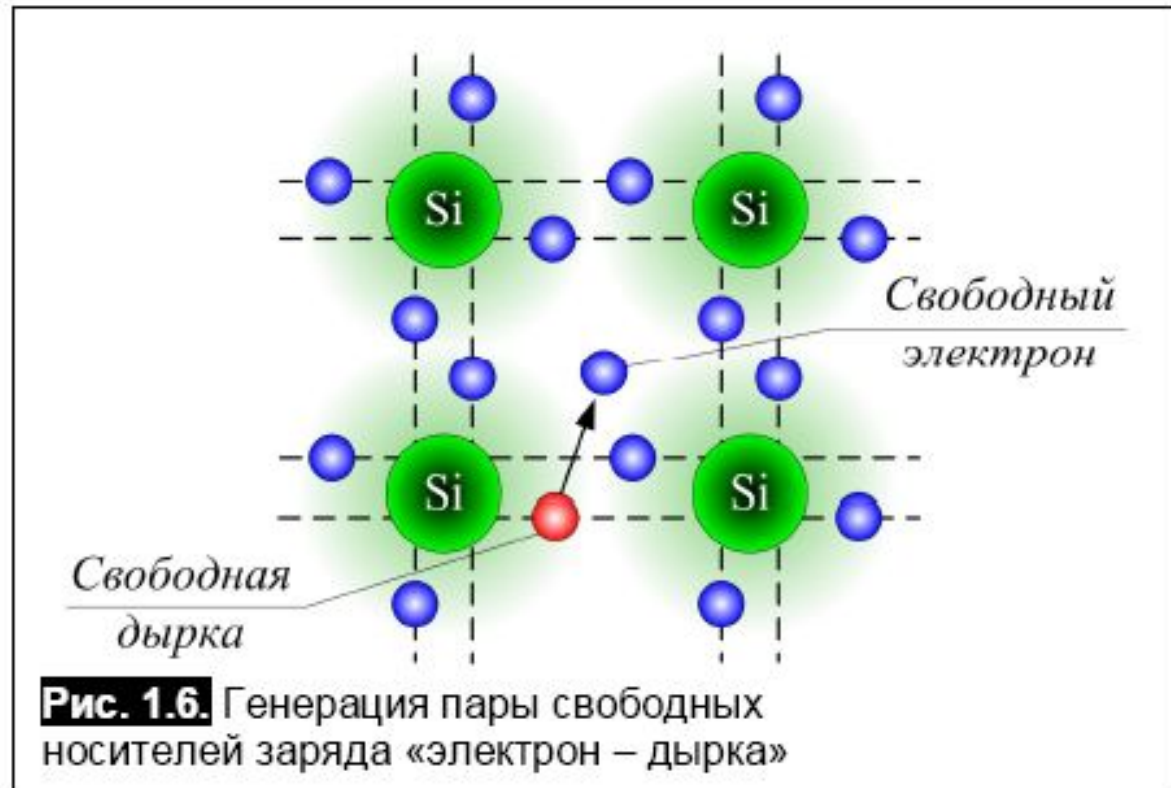
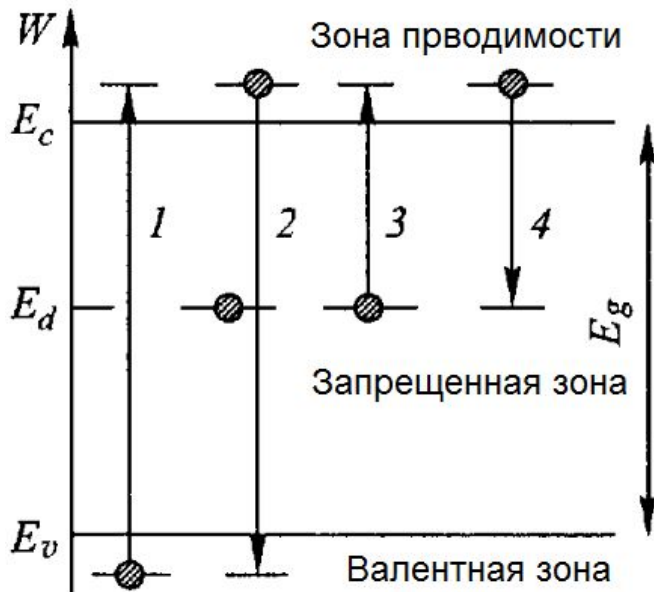


- При температуре $T > 0$ К дополнительной энергии, поглощенной каким-либо электроном, может оказаться достаточно для разрыва ковалентной связи и перехода в зону проводимости, где электрон становится свободным носителем электрического заряда (1).



- Электроны хаотически движутся внутри кристаллической решетки и представляют собой так называемый *электронный газ*.
- Электроны при своем движении сталкиваются с колеблющимися в узлах кристаллической решетки атомами, а в промежутках между столкновениями они движутся прямолинейно и равномерно.

- У атома полупроводника, от которого отделился электрон, возникает незаполненный энергетический уровень в валентной зоне, называемый *дыркой*.

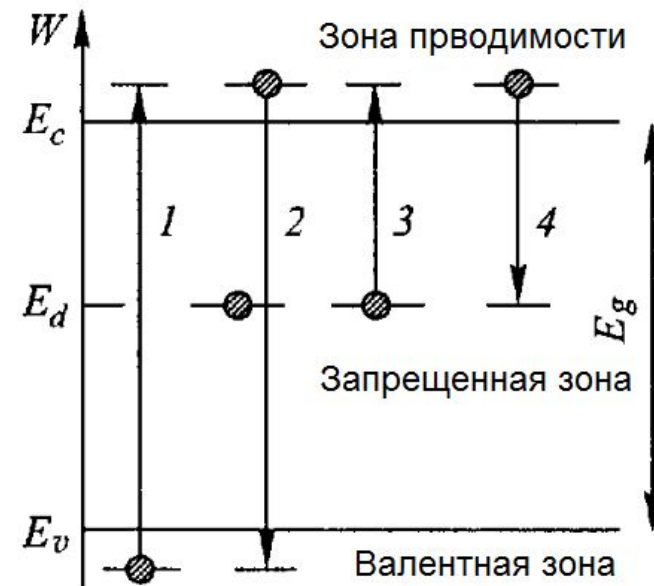


- Для простоты **дырку** рассматривают как
- единичный положительный электрический заряд.
- Дырка может перемещаться по всему объему полупроводника
- под действием электрических полей,
- в результате разности концентраций носителей заряда в различных зонах полупроводника,
- участвовать в тепловом движении.

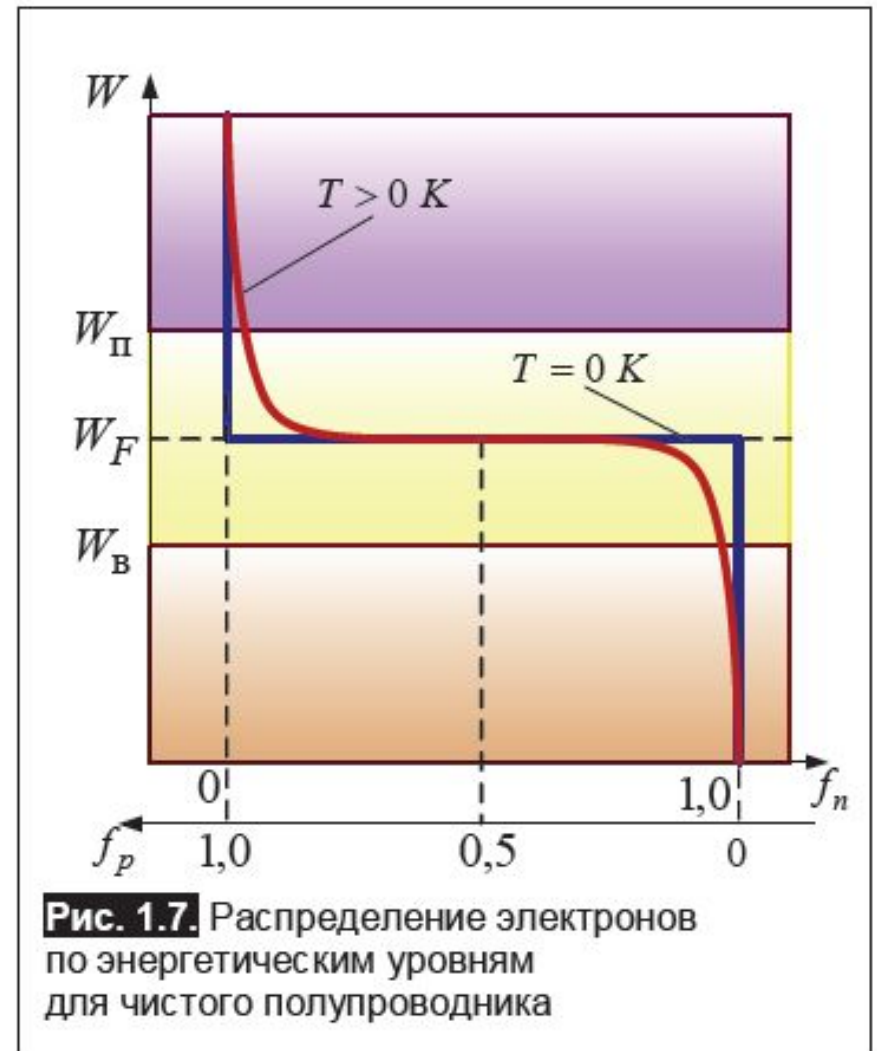
- Таким образом, в кристалле полупроводника при нагревании могут образовываться пары носителей электрических зарядов «электрон – дырка», которые обуславливают появление *собственной электрической проводимости* полупроводника.

- Процесс образования пары «электрон – дырка» называют *генерацией* свободных носителей заряда.
- После своего образования пара «электрон – дырка» существует в течение некоторого времени, называемого *временем жизни носителей* электрического заряда.

- В течение *времени жизни* носители
- участвуют в тепловом движении, взаимодействуют с электрическими и магнитными полями как единичные электрические заряды,
- перемещаются под действием градиента концентрации,
- а затем *рекомбинируют*, т. е. электрон восстанавливает ковалентную связь (2).



- При $T = 0 \text{ K}$ все энергетические уровни, находящиеся выше уровня Ферми, свободны.



- При $T > 0 \text{ K}$ увеличивается вероятность заполнения электроном энергетического уровня, расположенного выше уровня Ферми.
- Ступенчатый характер функции распределения сменяется на более плавный.

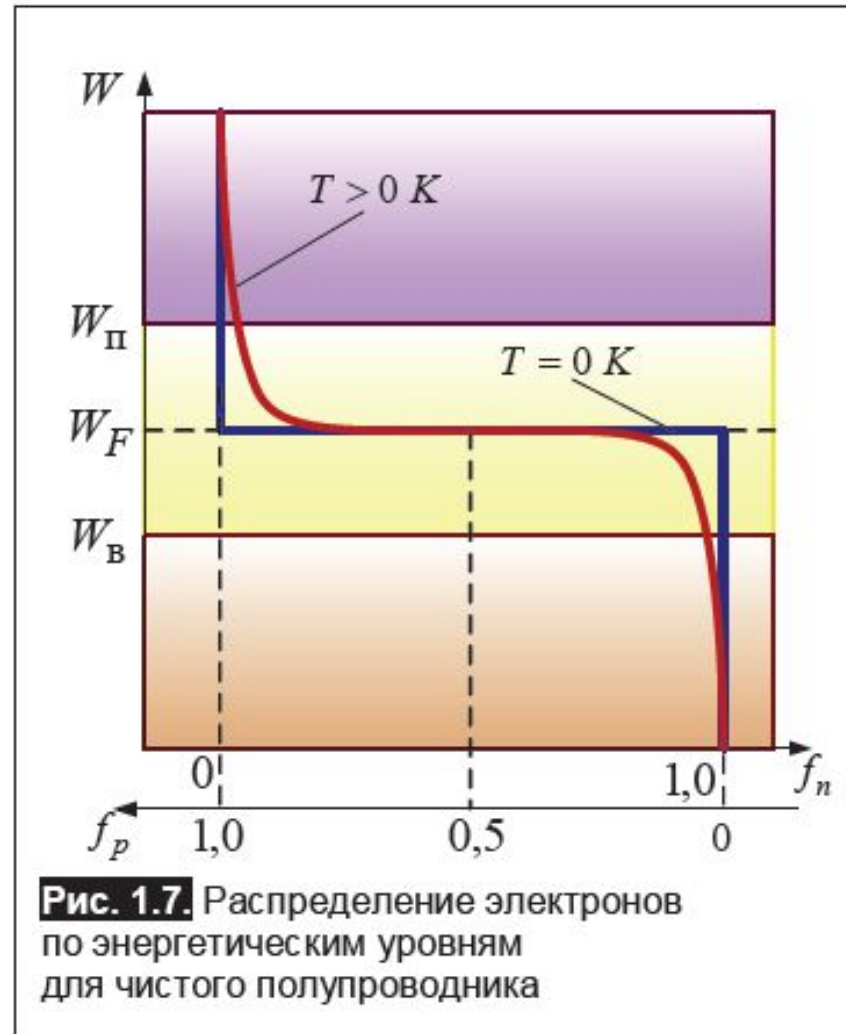


Рис. 1.7. Распределение электронов по энергетическим уровням для чистого полупроводника

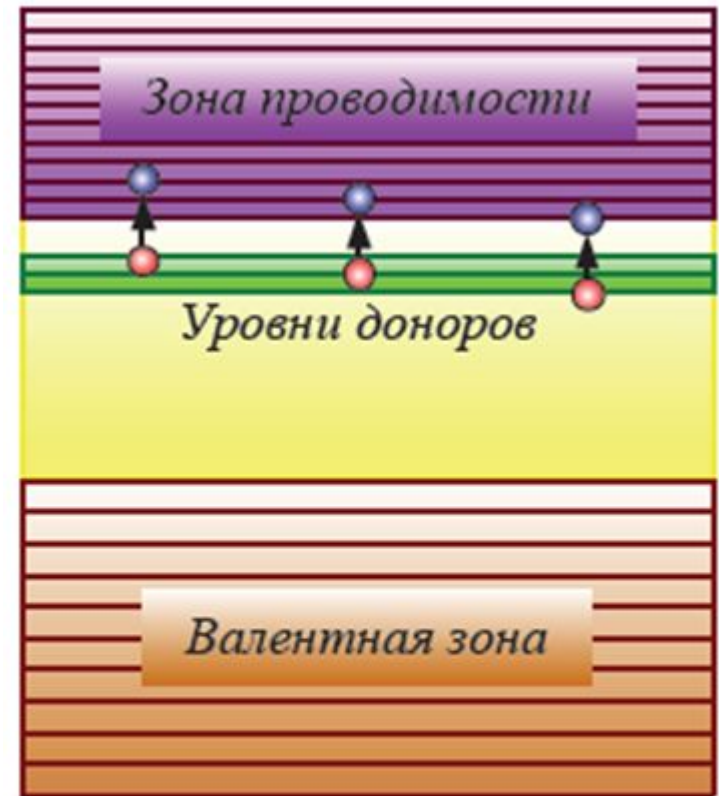
Примесная электропроводность полупроводников

- Электропроводность полупроводника может обуславливаться не только генерацией пар носителей «электрон – дырка» вследствие какого-либо энергетического воздействия, но и введением в структуру полупроводника определенных примесей.

- Примеси бывают
-
- 1) донорного типа,
- 2) акцепторного типа.

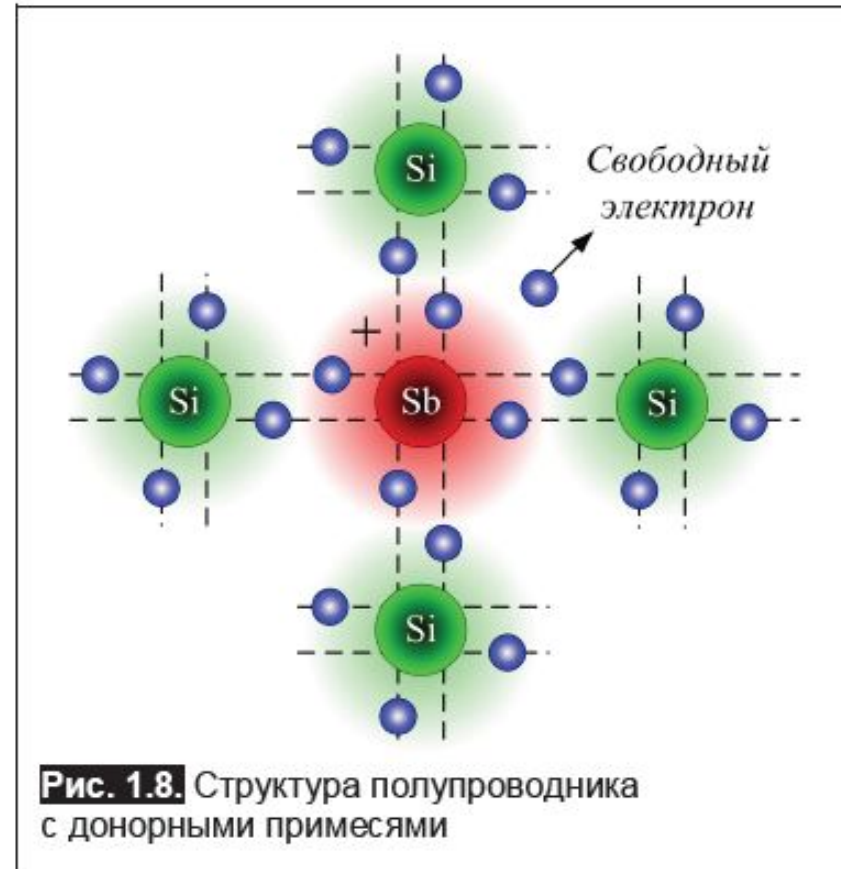
Донорные примеси

- *Донор* – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.

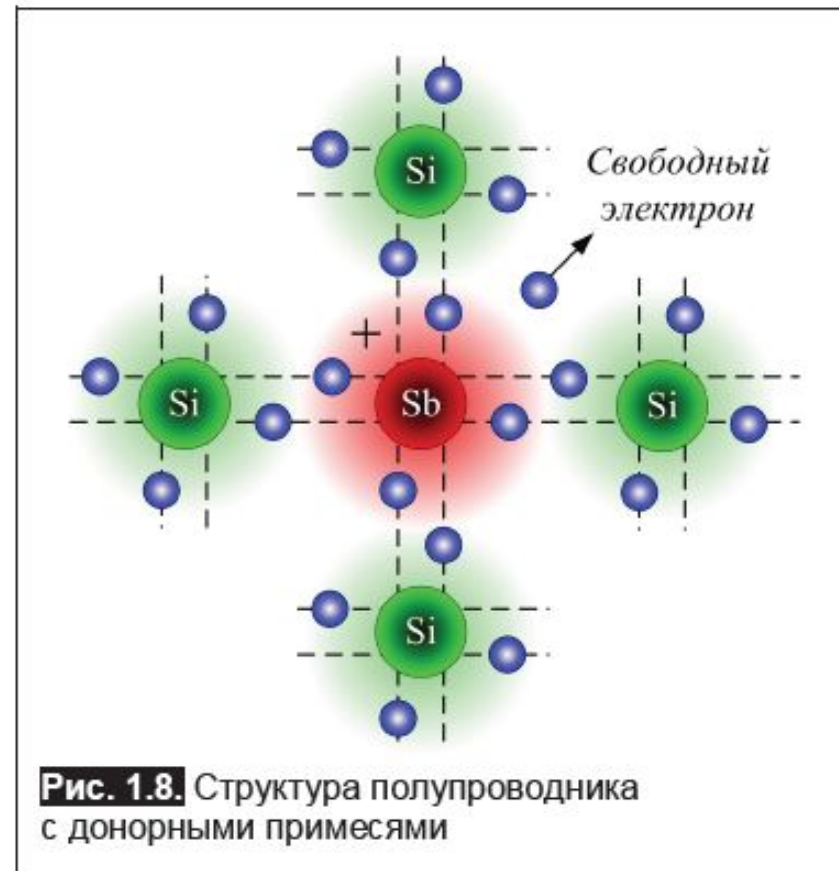


Зонная диаграмма полупроводника с донорными примесями

- Пример донорной примеси – сурьма (Sb) (элемент V группы таблицы Менделеева).
- У атома сурьмы на наружной электронной оболочке находятся **пять валентных электронов**.
- **Четыре** электрона устанавливают ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния,
- а **пятый** валентный электрон такой связи установить не может, так как в атомах кремния все свободные связи (уровни) уже заполнены.



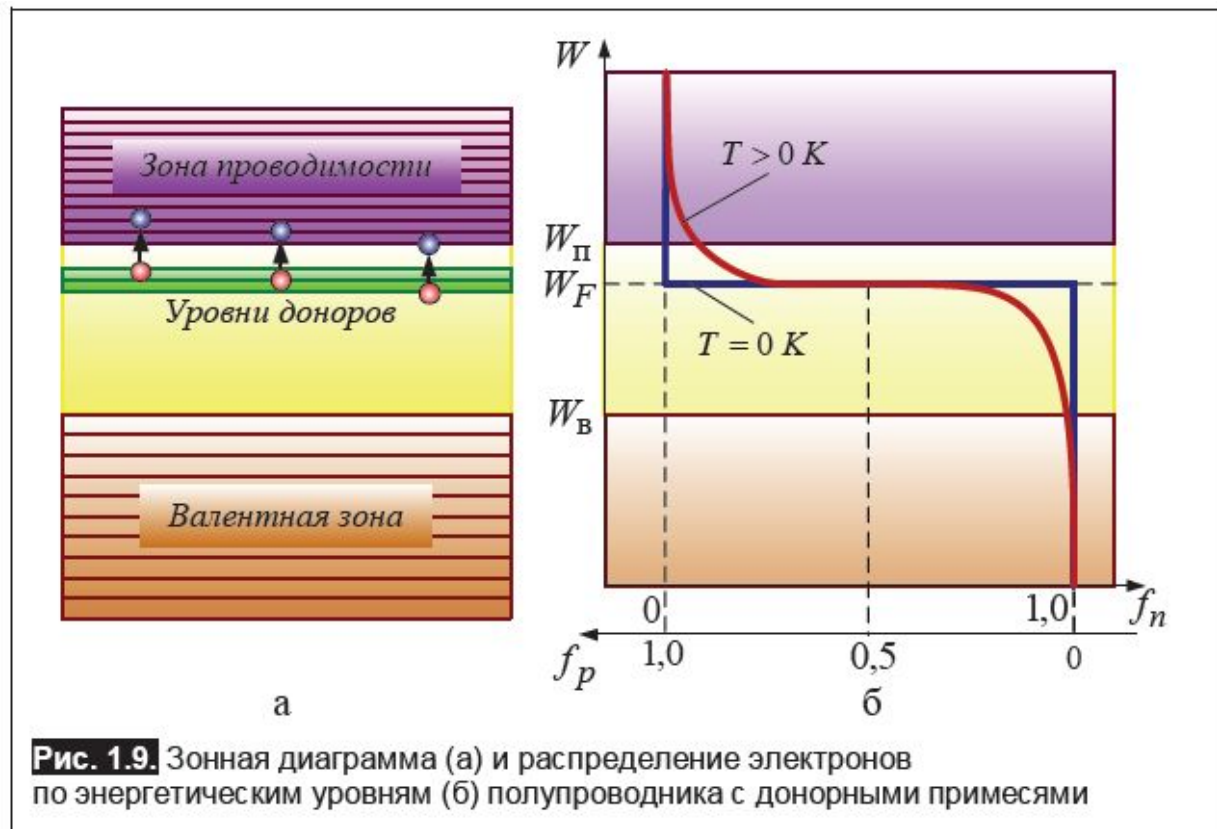
- Связь с ядром пятого электрона атома примеси слабее по сравнению с другими электронами.
- Под действием теплового колебания атомов кристаллической решетки связь этого электрона с атомом легко разрушается, и он переходит в зону проводимости, становясь при этом свободным носителем электрического заряда.



- Атом примеси, потеряв один электрон, становится положительно заряженным ионом с единичным положительным зарядом.
- Он не может перемещаться внутри кристалла, так как связан с соседними атомами полупроводника межатомными связями, и может лишь совершать колебательные движения около положения равновесия в узле кристаллической решетки.
- Электрическая нейтральность кристалла полупроводника не нарушается, так как заряд каждого электрона, перешедшего в зону проводимости, уравнивается положительно заряженным ионом примеси.

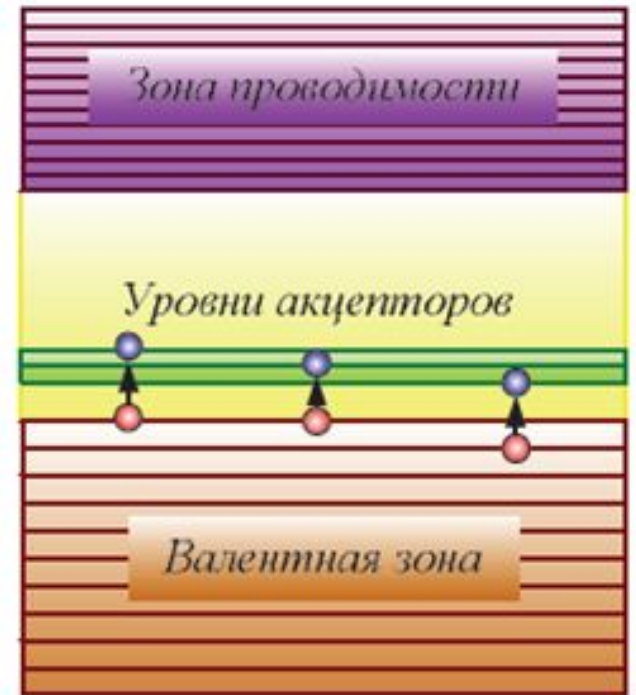
- Таким образом, полупроводник приобретает свойство примесной электропроводности, обусловленной наличием свободных электронов в зоне проводимости.
- Этот вид электропроводности называется *электронной* и обозначается буквой *n* (негативная, отрицательная проводимость), а полупроводники с таким типом проводимости называются *полупроводниками n-типа*.

- Уровень Ферми будет смещаться вверх, к границе зоны проводимости W_{Π} . Малейшее приращение энергии электрона приводит к его переходу в зону проводимости.



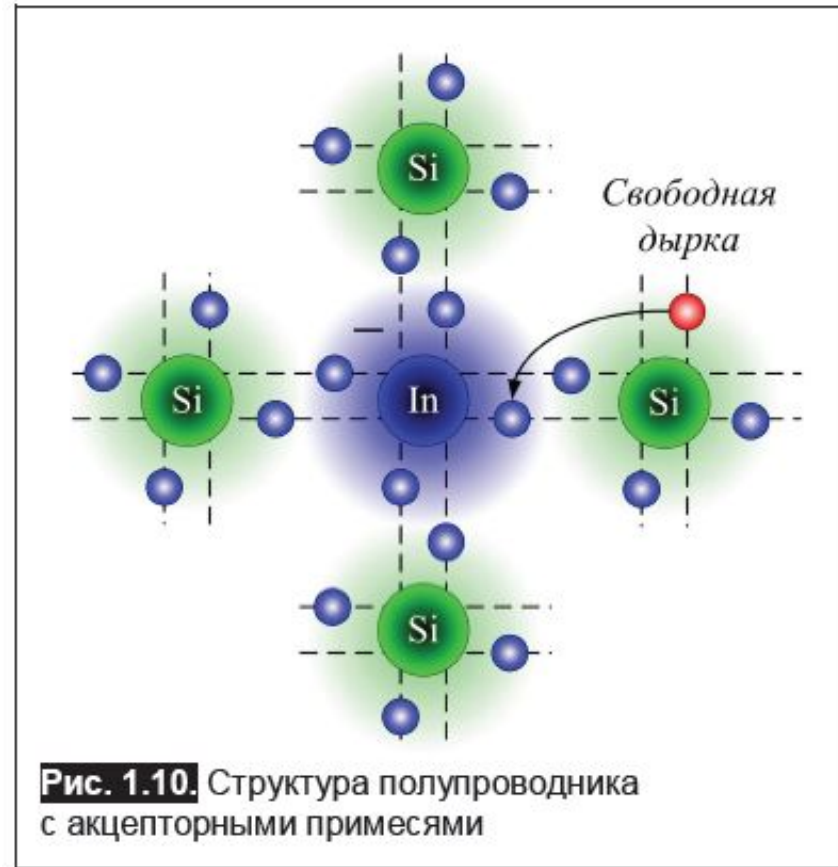
Акцепторные примеси

- *Акцептор* – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии и способный захватить электрон из валентной зоны в возбужденном состоянии.

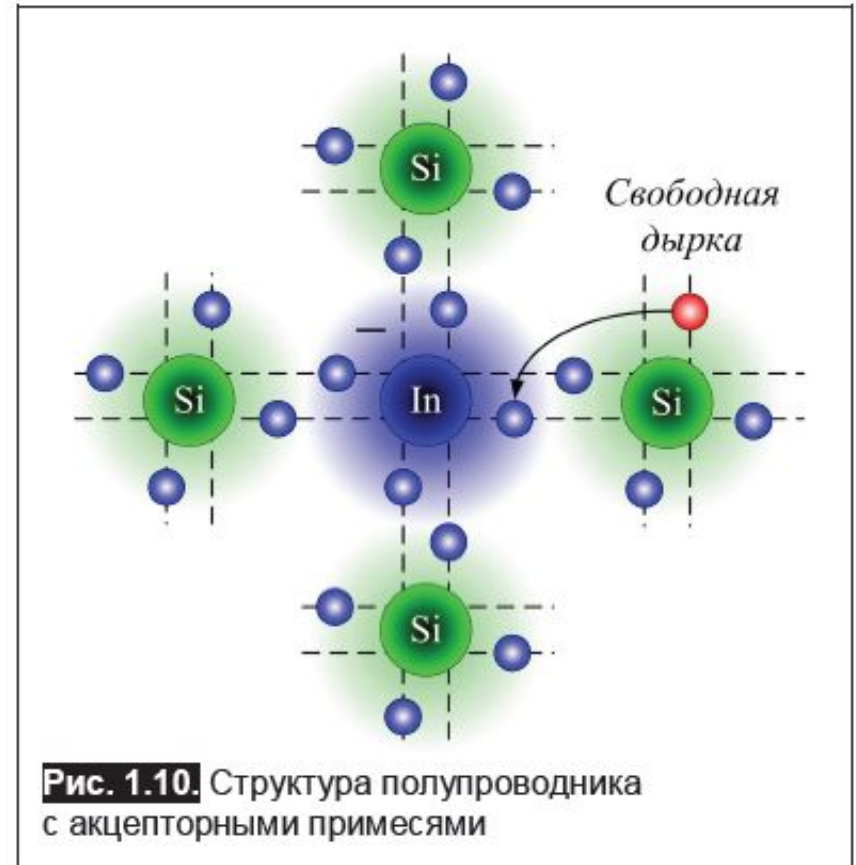


Зонная диаграмма
полупроводника
с акцепторными примесями

•Если в кристаллическую решетку полупроводника кремния ввести атомы примеси - индия (In) (элемент III группы таблицы Менделеева), имеющего на наружной электронной оболочке три валентных электрона, то эти три валентных электрона устанавливают прочные ковалентные связи с тремя соседними атомами кремния из четырех.



- Одна из связей остается не заполненной.
- Заполнение этой свободной связи может произойти за счет электрона, перешедшего к атому примеси от соседнего атома основного полупроводника при нарушении какой-либо связи.

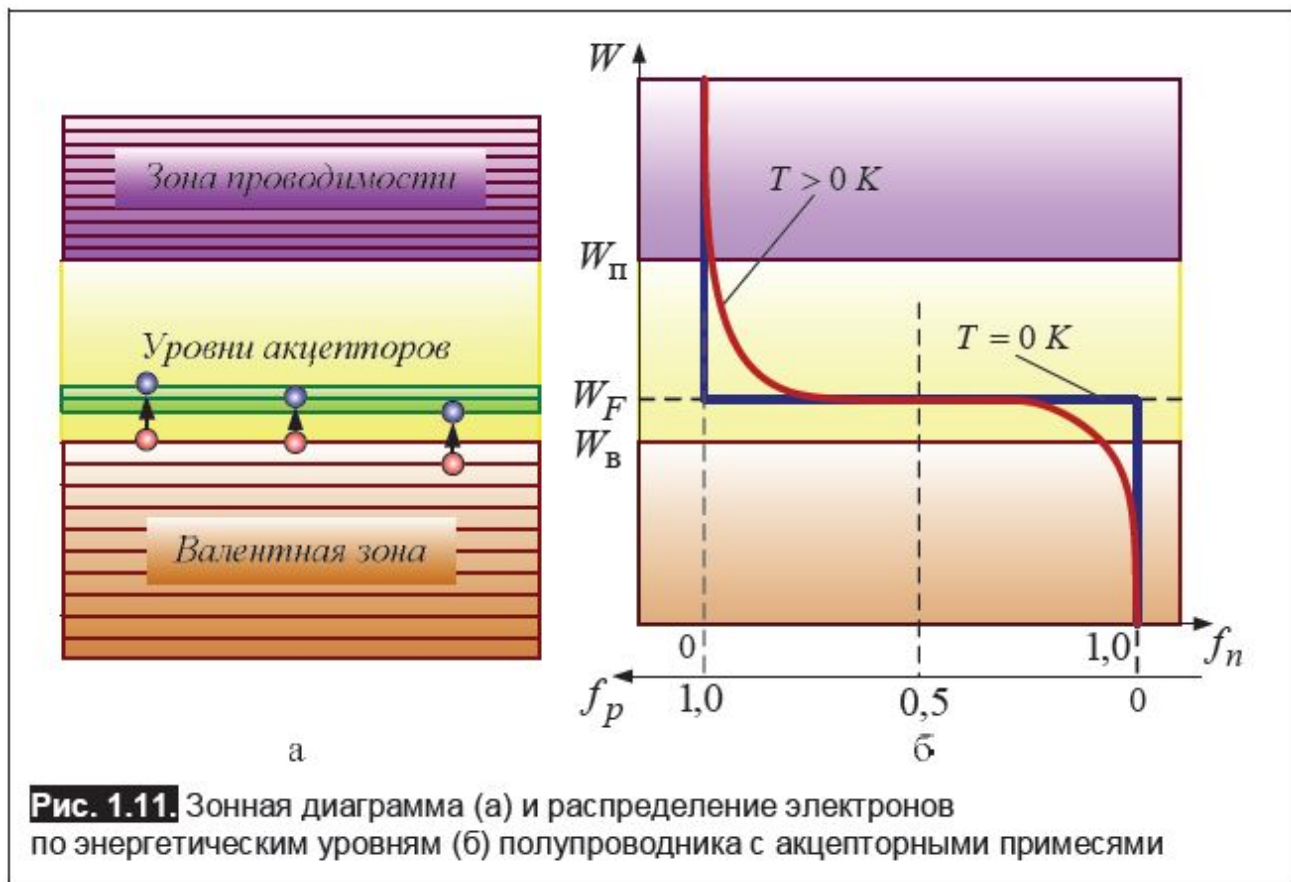


- Атом примеси, приобретая лишний электрон, становится отрицательно заряженным ионом, а дырка, образовавшаяся в атоме основного полупроводника, имея единичный положительный заряд, может перемещаться от одного атома полупроводника к другому внутри кристалла.

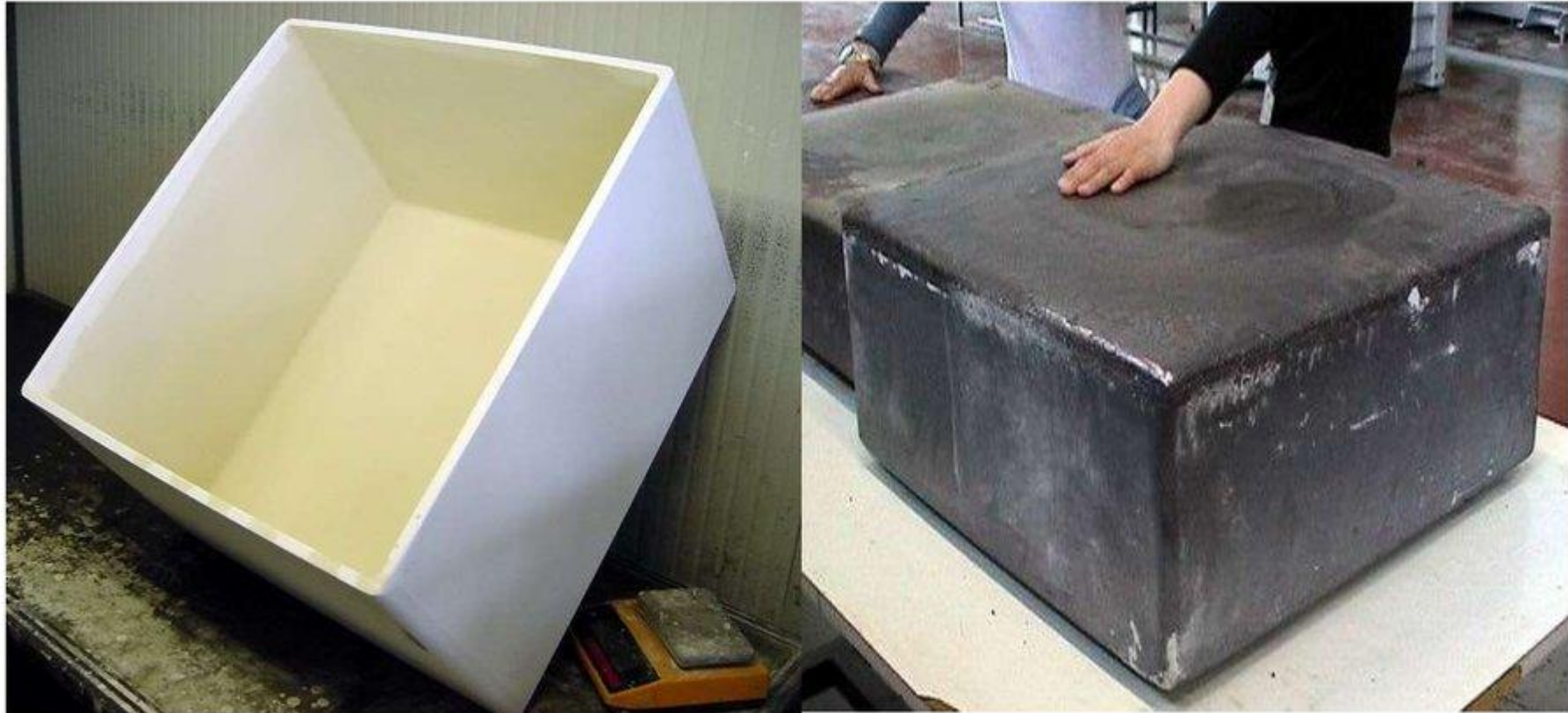
- Такой тип проводимости называется *дырочным* и обозначается буквой *p* (позитивный, положительный тип проводимости), а полупроводник называется полупроводником *p-типа*.

- Орицательно заряженные ионы акцепторной примеси в полупроводнике p -типа не могут перемещаться внутри кристалла, так как находятся в узлах кристаллической решетки и связаны межатомными связями с соседними атомами полупроводника.
- В целом полупроводниковый кристалл остается электрически нейтральным.

- Вероятность захвата электрона и перехода его в валентную зону возрастает в полупроводниках p -типа, поэтому уровень Ферми здесь смещается вниз, к границе валентной зоны

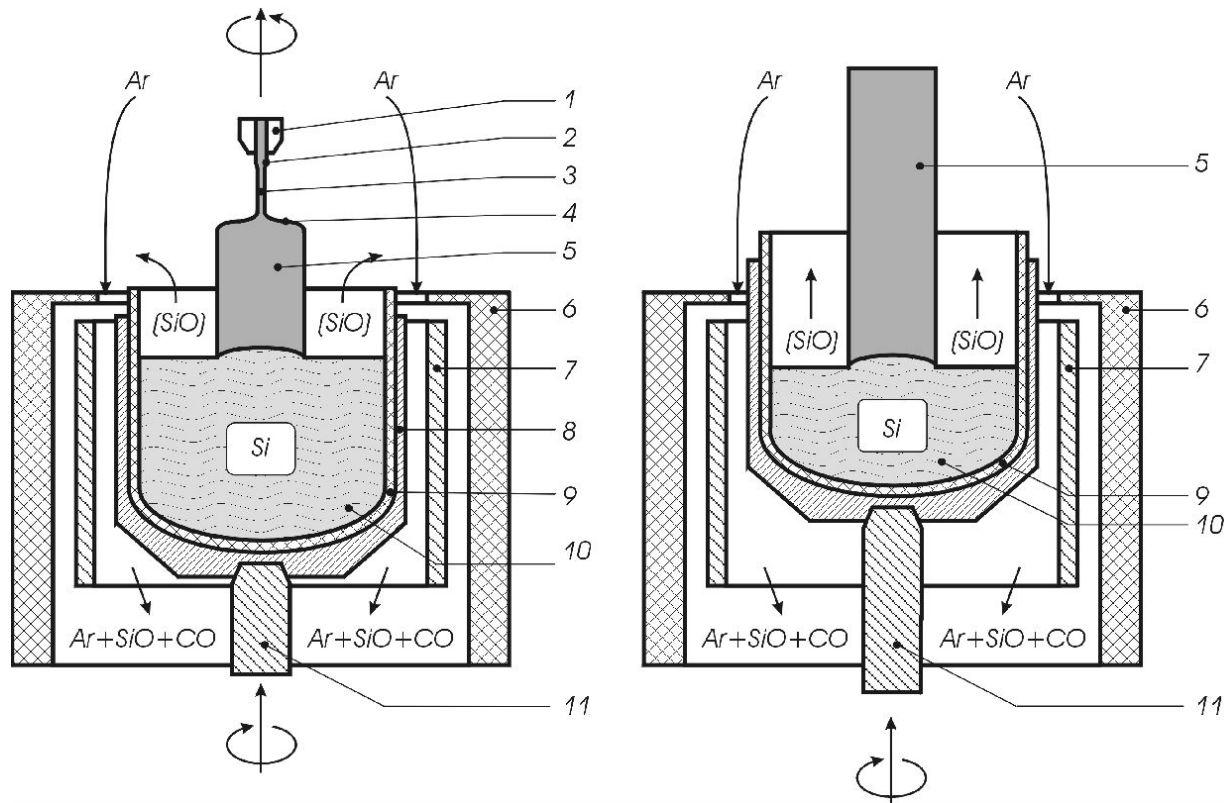


размеру слиток мультикристаллического кремния



Способы получения

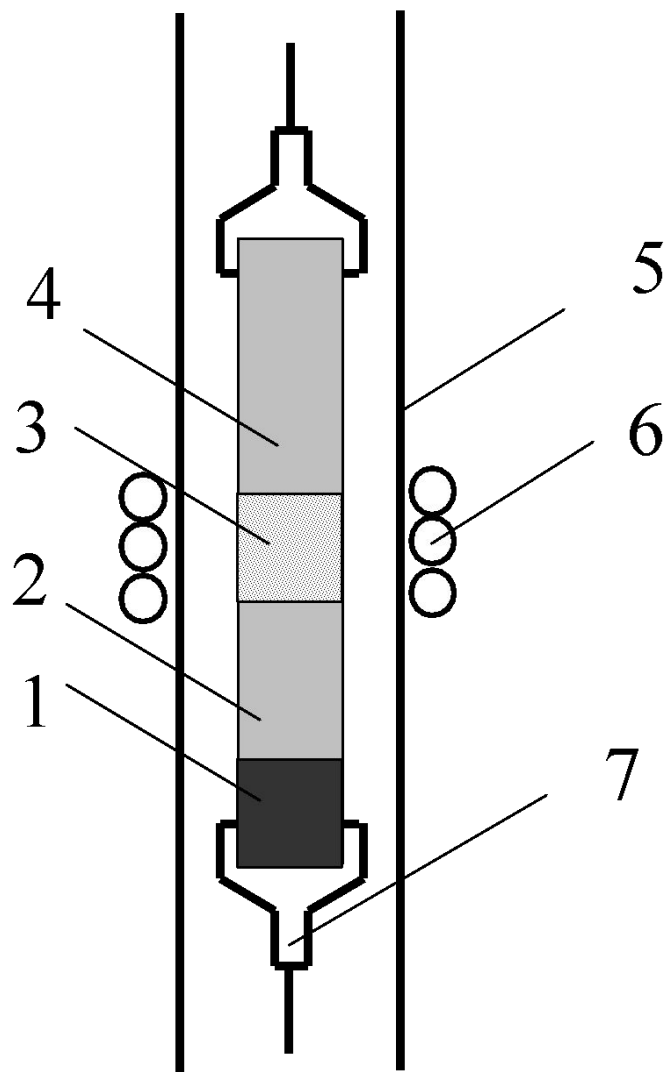
- 1. Метод Чохральского
- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}, T \sim 2000^\circ\text{C}$



Вид слитка после процесса выращивания



Метод бестигельной зонной плавки



1-затравка;

2- кристалл;

3- расплавленная зона;

4- исходный материал;

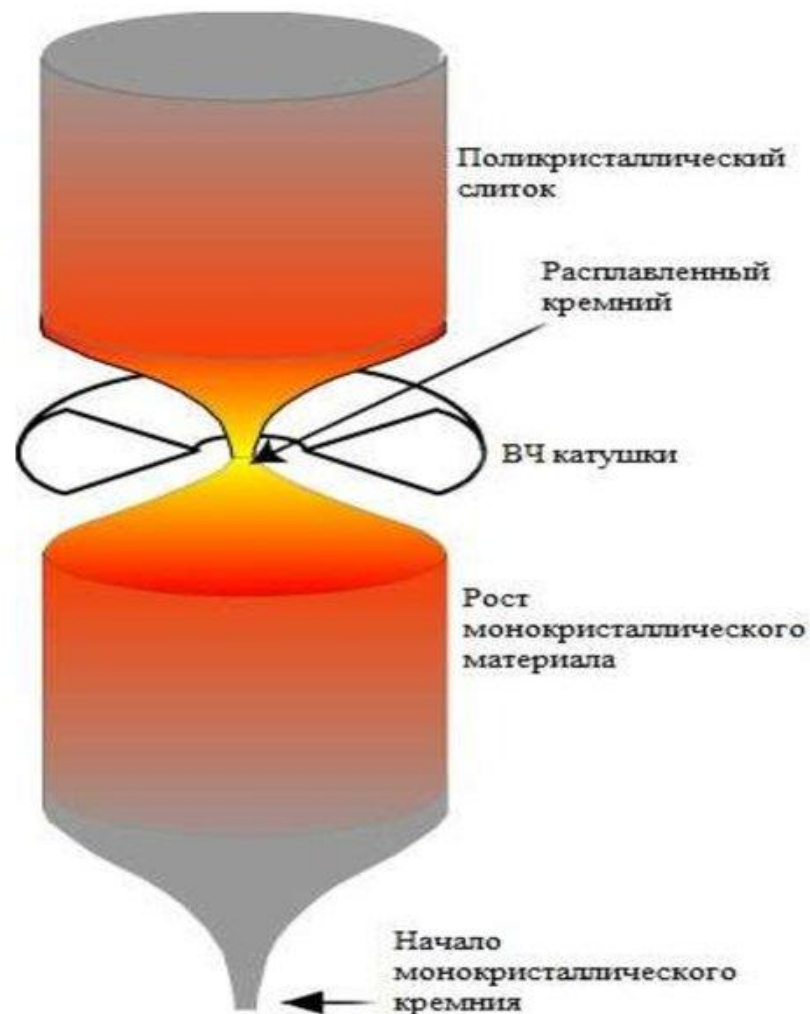
5- стенки герметичной камеры;

6- индуктор;

7- кристаллодержатель

Метод зонной плавки

- Суть метода зонной плавки заключается в том, что расплавленная область, получаемая методом индукционного высокочастотного нагрева, медленно движется вдоль всего кремниевого слитка.
- Примеси при этом не кристаллизуются, а стараются остаться в расплавленной области. Таким образом, после прохождения зоны расплава кристалл очищается от примесей.





- *Вид
монокристалла
Si диаметром
200 мм после
извлечения из
расплава*



200mm

450mm

Промышленная установка для полировки кремниевых подложек диаметром 300 мм



Сравнительные характеристики монокристаллического кремния, получаемого методом Чохральского и методом зонной плавки.

Характеристики	Метод Чохральского	Метод зонной плавки
Скорость роста, мм/мин	1 - 2	3 - 5
Наличие дислокаций	Да	Да
Наличие тигля	Да	Нет
Затраты на расходные материалы	Высокие	Низкие
Концентрация кислорода, ат/см ³	$\geq 1 \times 10^{18}$	$\leq 1 \times 10^{16}$
Концентрация углерода, ат/см ³	$\geq 1 \times 10^{17}$	$\leq 1 \times 10^{16}$
Содержание примесей металлов	Высокое	Низкое
Время жизни н.н.з., мкс	5 - 100	1000 - 20000
Диаметр слитка, мм	100 - 300	100 - 150
Форма используемого поликремния	Куски	Стержни без трещин

Применение кремния, полученного методом зонной плавки

- Как следует из таблицы, кремний, полученный методом зонной плавки, для производства солнечных элементов по качественным показателям (количеству примесей, времени жизни неосновных носителей заряда) превосходит кремний, получаемый по методу Чохральского.
- Однако, он значительно дороже и не находит широкого применения в производстве коммерческих СЭ. Кроме того, как отмечалось ранее (см. тема8), СЭ, изготовленные из кремния, полученного методом зонной плавки, отличаются меньшей радиационной стойкостью.

Выращивание слитков мультикристаллического кремния

- Выращивание слитков мультикристаллического кремния проводят методом направленной кристаллизации.
- Кремний с лигатурой бора плавят в большом кварцевом тигле и медленно остужают, начиная от дна тигля, получая большой прямоугольный слиток весом до 450 кг.
- Особенности конструкции печи, рисунок, позволяют слитку остывать медленно, приводя к образованию очень больших зерен (> 1 см).



Условные графические обозначения:

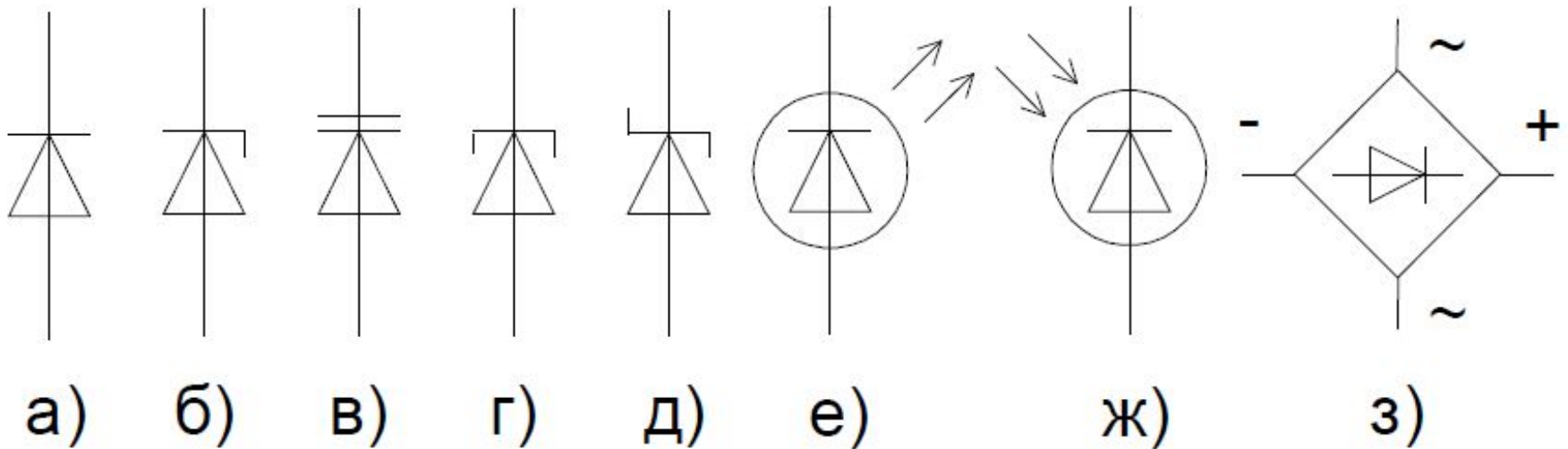


Рис. 27

- а) выпрямительные, высокочастотные, СВЧ, импульсные и диоды Ганна;
- б) стабилитроны;
- в) варикапы;
- г) тоннельные диоды;
- д) диоды Шоттки;
- е) светодиоды;
- ж) фотодиоды;
- з) выпрямительные блоки

Конструкция полупроводниковых диодов

Основой плоскостных и точечных диодов является кристалл полупроводника n-типа проводимости, который называется базой.

База припаивается к металлической пластинке, которая называется кристаллодержателем.

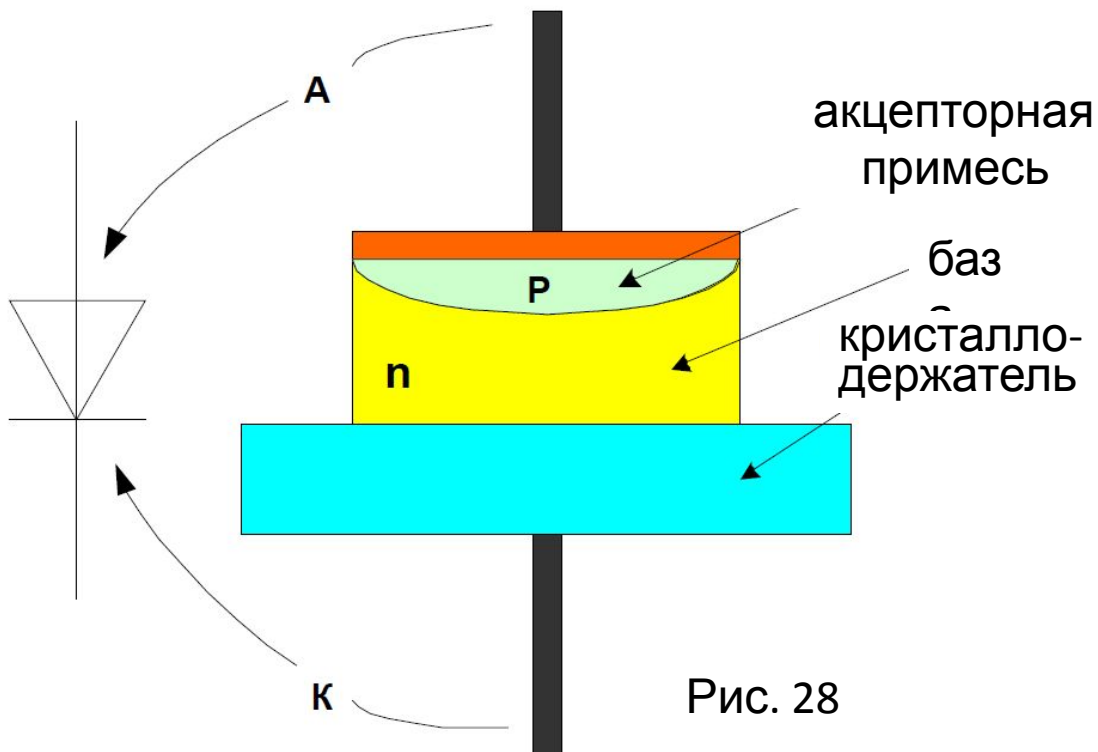


Рис. 28

Для плоскостного диода на базу накладывается материал акцепторной примеси и в вакуумной печи при высокой температуре (порядка 500 °С) происходит диффузия акцепторной примеси в базу диода, в результате чего образуется область р-типа проводимости и р-n переход большой плоскости (отсюда название).

Вывод от р-области называется анодом, а вывод от n-области – катодом (рис. 28).

Большая плоскость р-n перехода плоскостных диодов позволяет им работать при больших прямых токах, но за счёт большой барьерной ёмкости они будут низкочастотными.

Точечные диоды

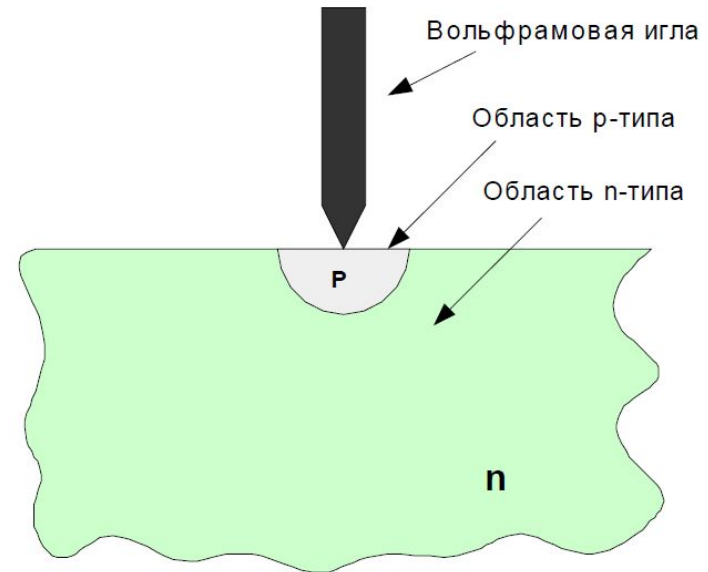
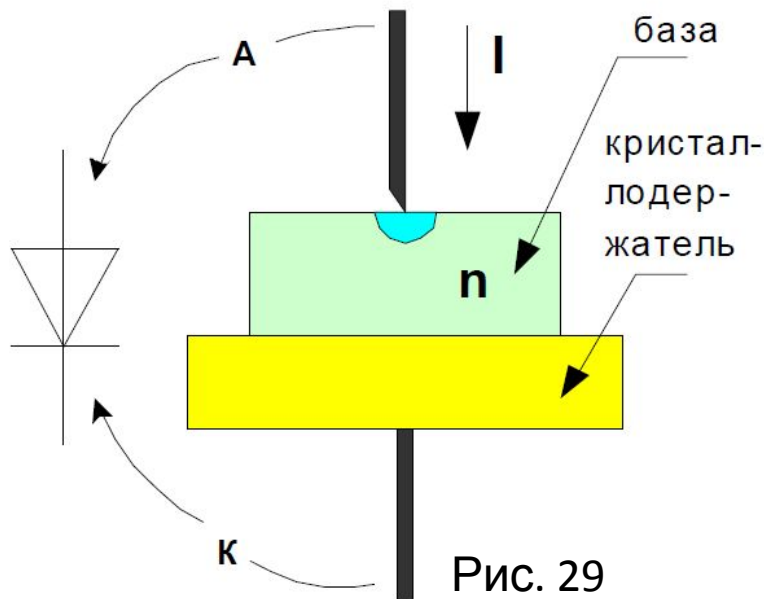


Рис. 30

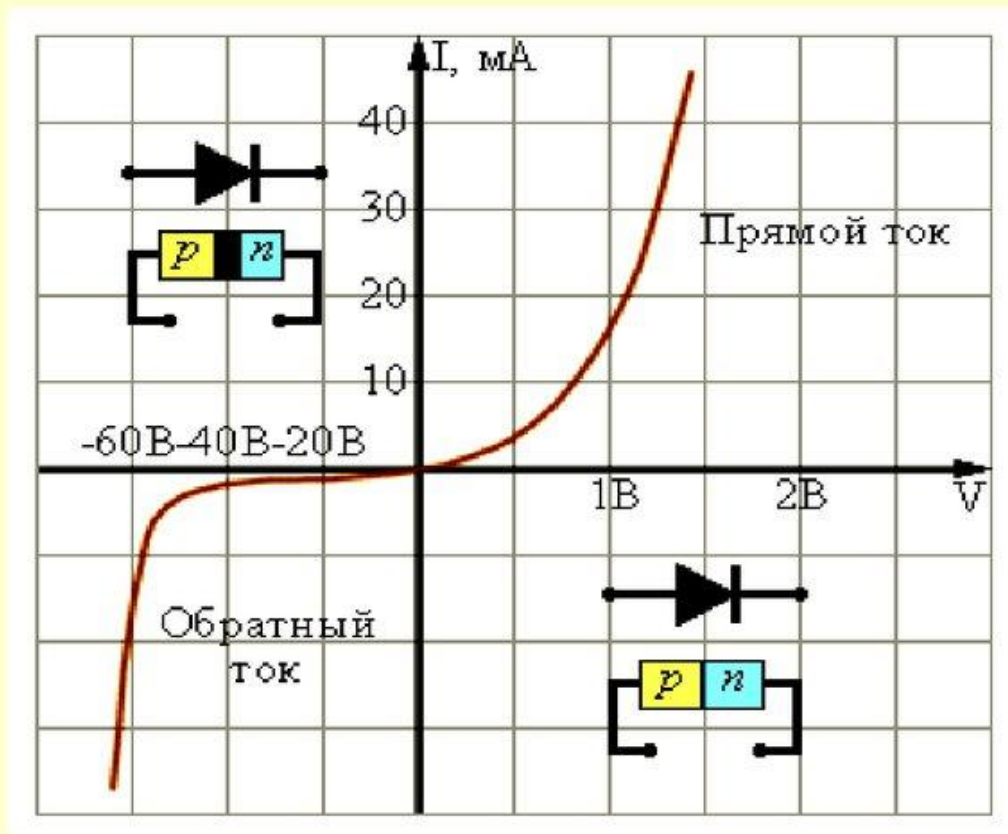
К базе точечного диода подводят вольфрамовую проволоку, легированную атомами акцепторной примеси, и через неё пропускают импульсы тока силой до 1А. В точке разогрева атомы акцепторной примеси переходят в базу, образуя р-область (рис. 30).

Получается р-п переход очень малой площади. За счёт этого точечные диоды будут высокочастотными, но могут работать лишь на малых прямых токах (десятки миллиампер).

Микросплавные диоды

Микросплавные диоды получают путём сплавления микрокристаллов полупроводников р- и n- типа проводимости. По своему характеру микросплавные диоды будут плоскостные, а по своим параметрам – точечные.

- Типичная вольт - амперная характеристика кремниевого диода



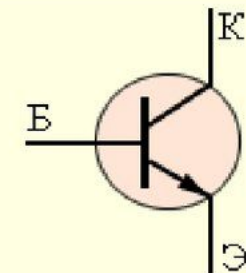
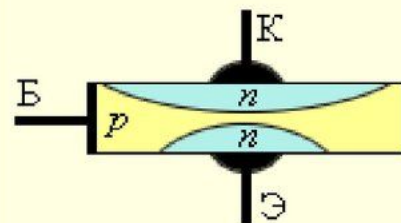
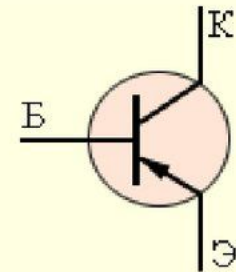
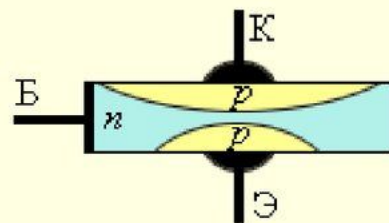
Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя n - p -переходами называются *транзисторами*.
- Транзисторы бывают двух типов: p - n - p -транзисторы и n - p - n -транзисторы.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- В транзисторе $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области – проводимостью n -типа.
- В транзисторе $p-n-p$ -типа всё наоборот.
- Пластинку транзистора называют *базой (Б)*, одну из областей с противоположным типом проводимости – *коллектором (К)*, а вторую – *эмиттером (Э)*.

Электронно-дырочный переход. Транзистор



Электрические переходы

- *Электрическим переходом* в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

- Различают следующие виды электрических переходов:
- *электронно-дырочный*, или *p–n-переход* – переход между двумя областями полупроводника, имеющими разный тип электропроводности;
- *переход металл – полупроводник* - переходы между двумя областями, если одна из них является металлом, а другая полупроводником *p*- или *n*-типа;
- переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;
- переходы между двумя полупроводниковыми материалами с различной шириной запрещенной зоны (*гетеропереходы*).

Электронно-дырочный переход

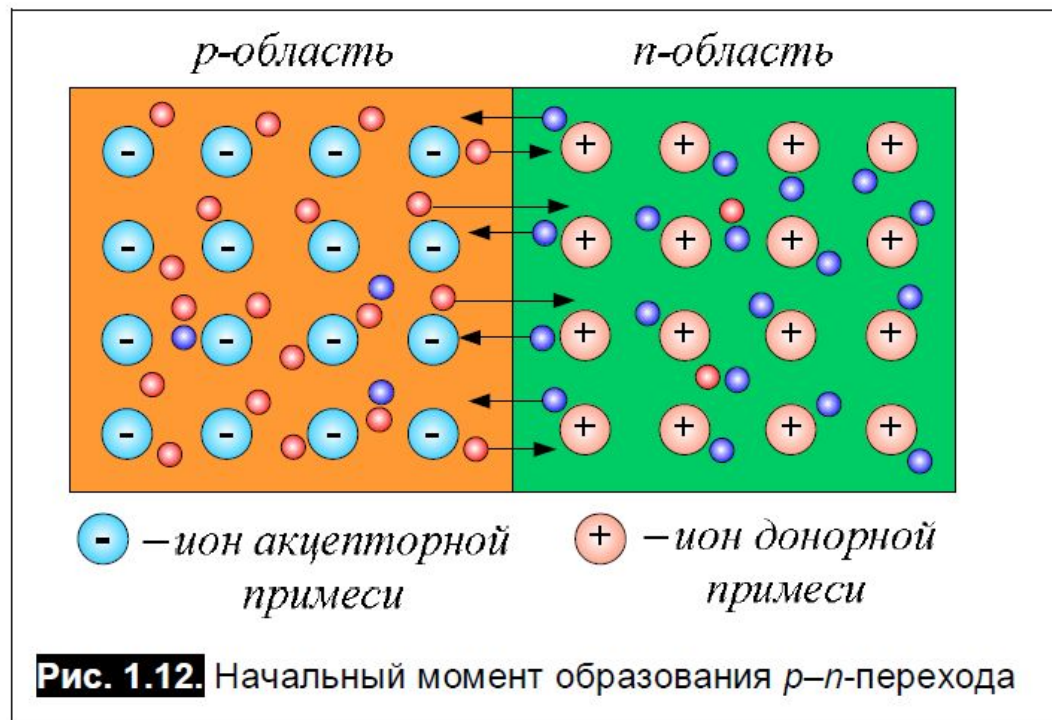
- Граница между двумя областями монокристалла полупроводника, одна из которых имеет электропроводность типа p , а другая – типа n называется **электронно-дырочным переходом (n-p переходом)** .
- Концентрации основных носителей заряда в областях p и n могут быть равными или существенно отличаться.

- p - n -переход, у которого концентрации дырок и электронов практически равны $N_{\text{акц}} = N_{\text{дон}}$, называют *симметричным*.
- Если концентрации основных носителей заряда различны ($N_{\text{акц}} \gg N_{\text{дон}}$ или $N_{\text{акц}} \ll N_{\text{дон}}$) и отличаются в 100...1000 раз, то такие переходы называют *несимметричными*.
- Несимметричные p - n -переходы используются шире, чем симметричные.

Несимметричный p - n -переход

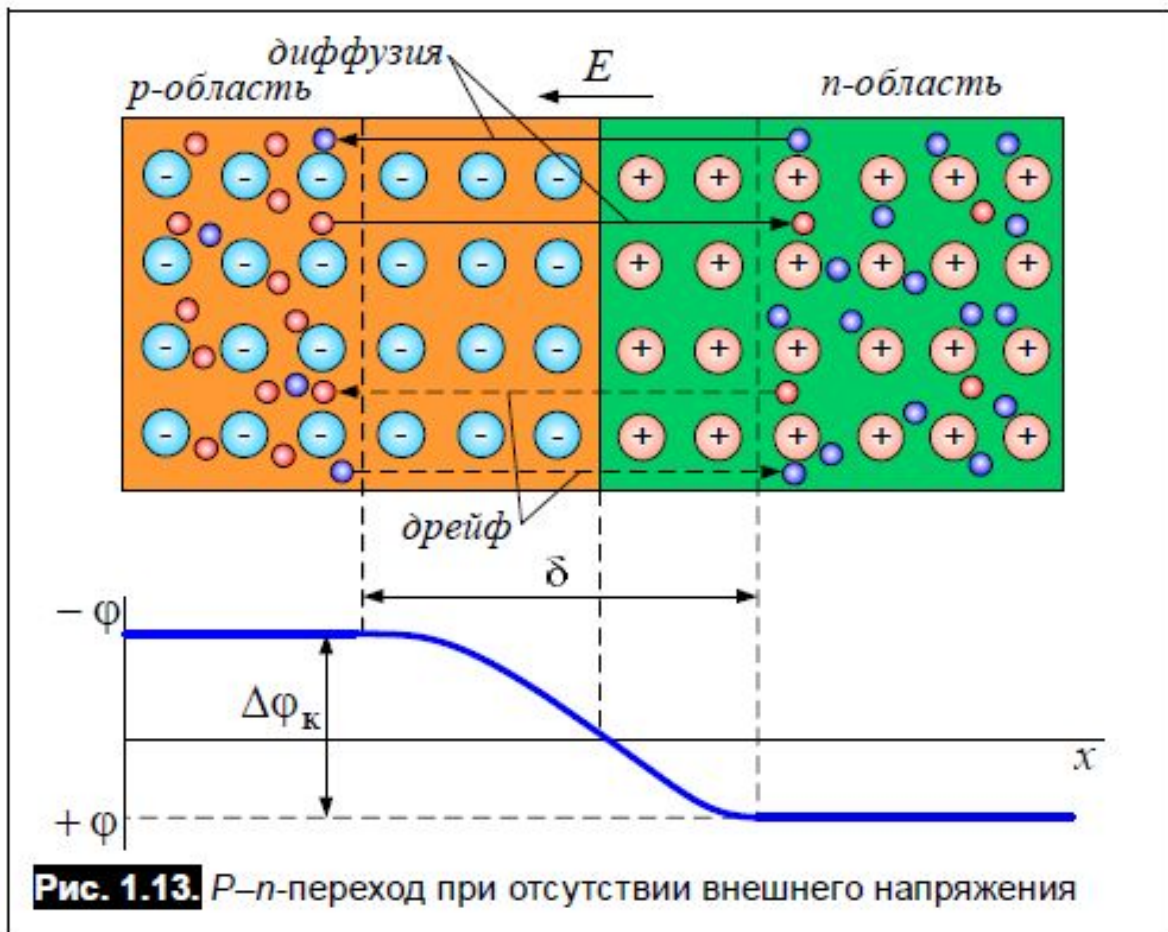
- Каждой дырке в области p соответствует отрицательно неподвижный заряженный ион акцепторной примеси,

в области n каждому свободному электрону соответствует положительно заряженный ион донорной примеси, весь монокристалл остается электрически нейтральным.



- Свободные носители электрических зарядов **под действием градиента концентрации** начинают перемещаться из мест с большой концентрацией в места с меньшей концентрацией.

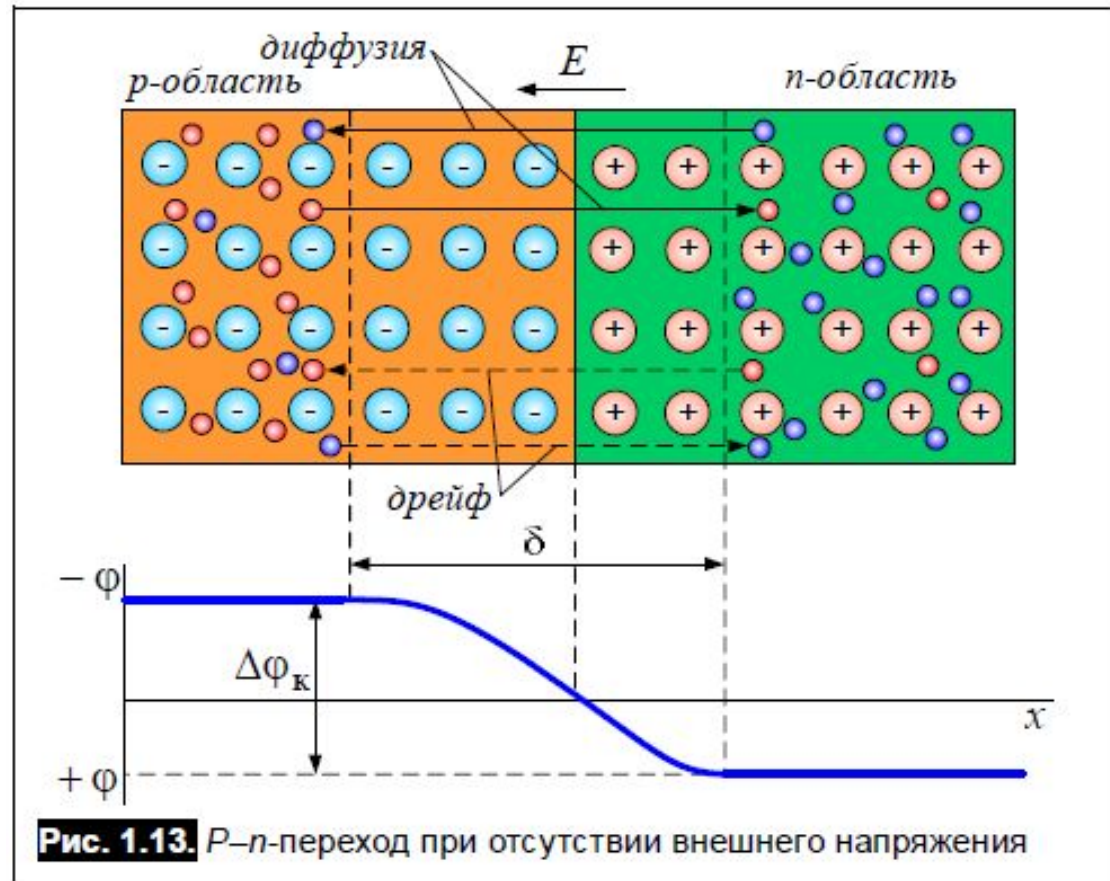
Это направленное навстречу друг другу перемещение электрических зарядов образует **диффузионный ток** p - n -перехода $I_{\text{диф}} = I_{\text{осн}}$.



- Как только дырка из области p перейдет в область n , она оказывается в окружении электронов, являющихся основными носителями электрических зарядов в области n .
- Велика вероятность того, что какой-либо электрон заполнит свободный уровень в дырке и произойдет явление рекомбинации, в результате которой останется электрически нейтральный атом полупроводника.

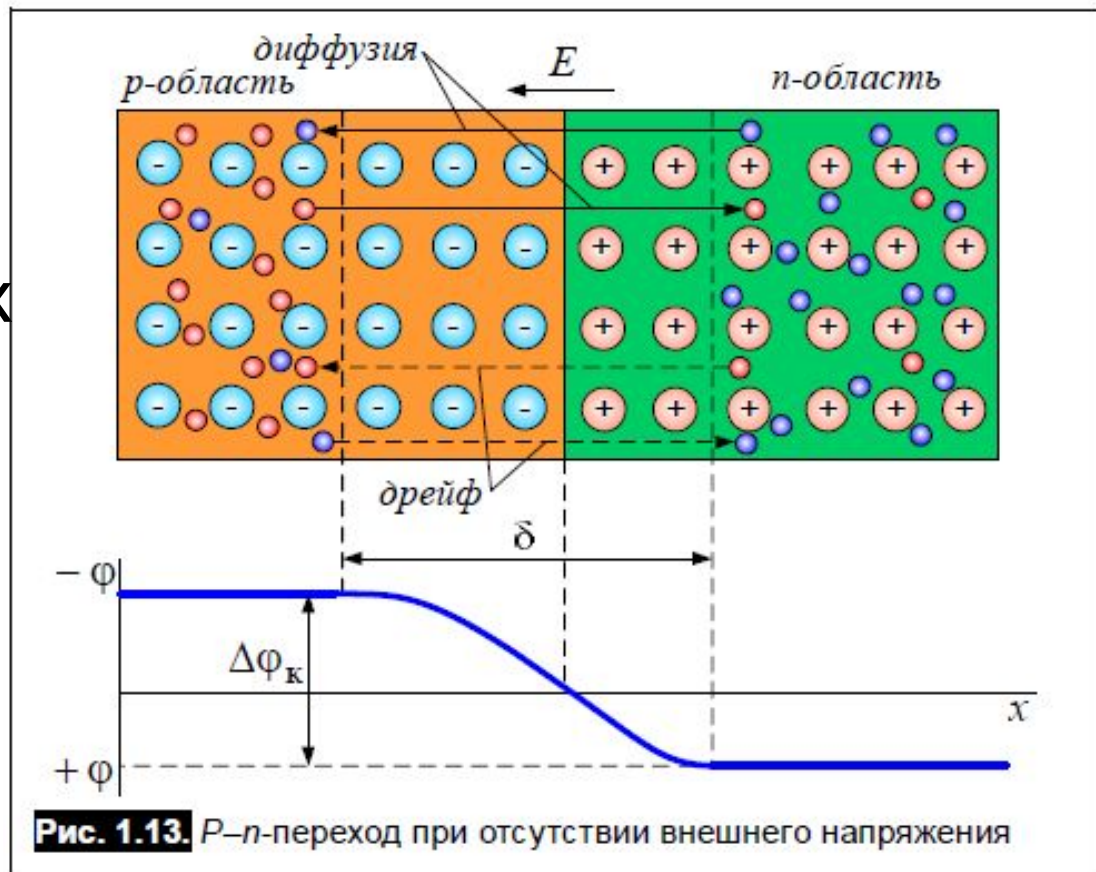
- После рекомбинации дырки и электрона электрические заряды неподвижных ионов примесей остались не скомпенсированными.

Вблизи границы раздела образуется слой пространственных зарядов.



- Между этими зарядами возникает электрическое поле с напряжённостью E , которое называют *полем потенциального барьера*,

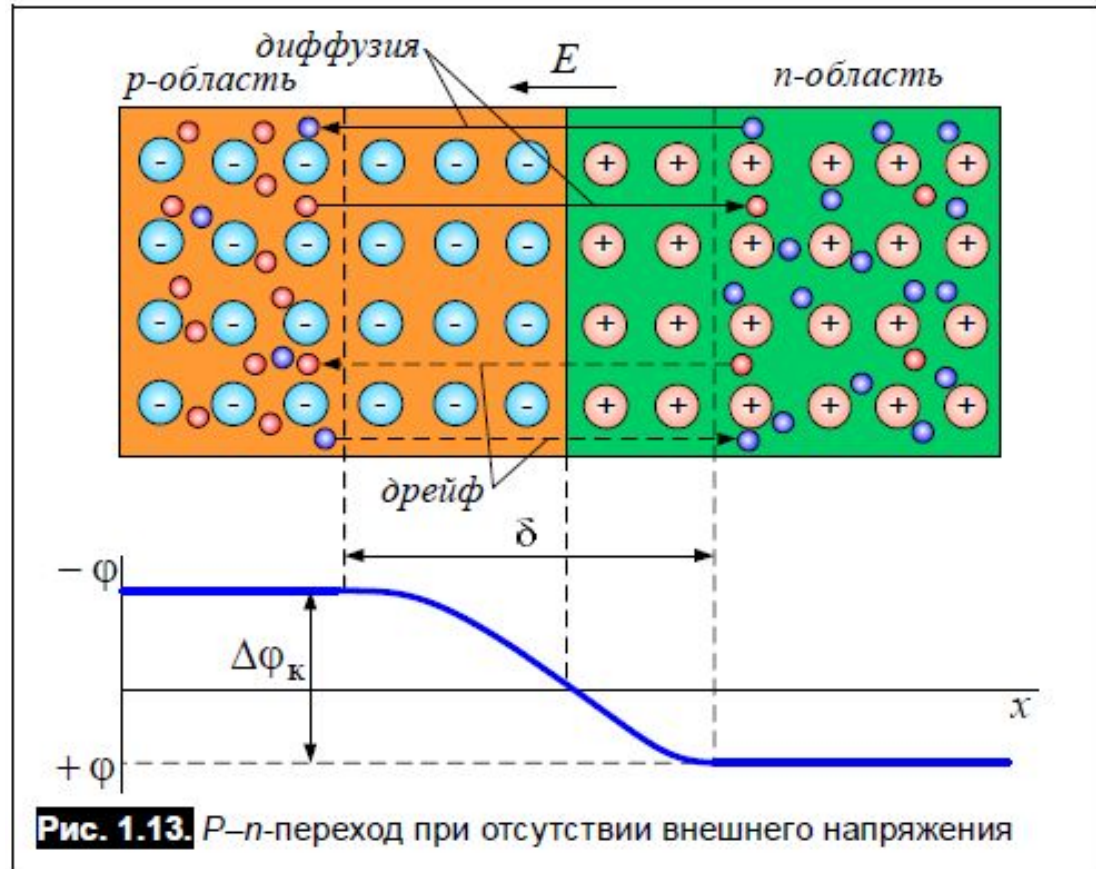
а разность потенциалов на границе раздела двух зон, обуславливающих это поле, называют *контактной разностью потенциалов* $\Delta\varphi_K$.



- Это электрическое поле начинает действовать на подвижные носители электрических зарядов.
- Таким образом, в узкой области δ , образуется слой, где практически отсутствуют свободные носители электрических зарядов и вследствие этого обладающий высоким сопротивлением - *запирающий слой*.

- Движение неосновных носителей через p - n -переход под действием электрического поля потенциального барьера обуславливает составляющую дрейфового тока

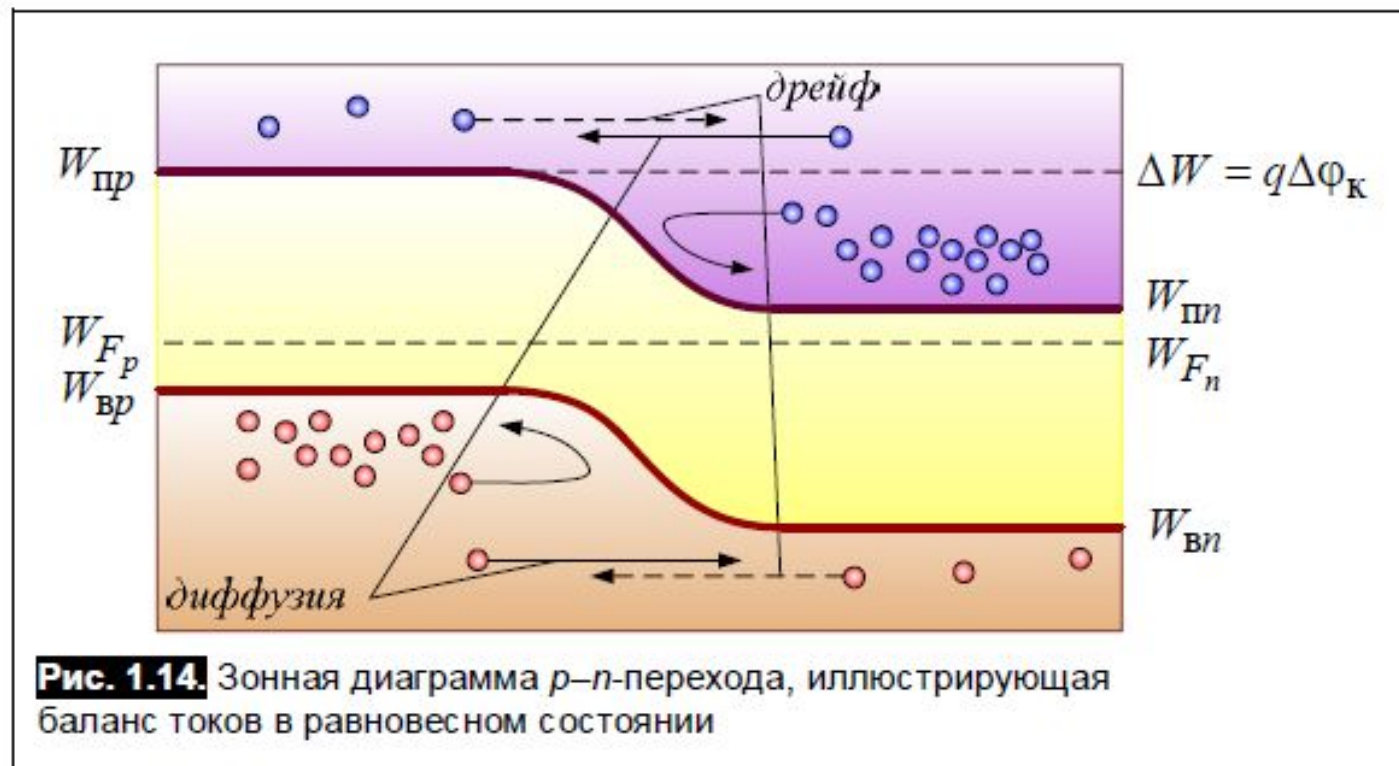
$$I_{др} = I_{неосн}$$



- При отсутствии внешнего электрического поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей электрических зарядов, то есть между диффузионной и дрейфовой составляющими тока p - n -перехода, поскольку эти составляющие направлены навстречу друг другу

- $I_{\text{диф}} = I_{\text{др}}$.

- При отсутствии внешнего электрического поля и при условии динамического равновесия в кристалле полупроводника устанавливается единый уровень Ферми для обеих областей проводимости.

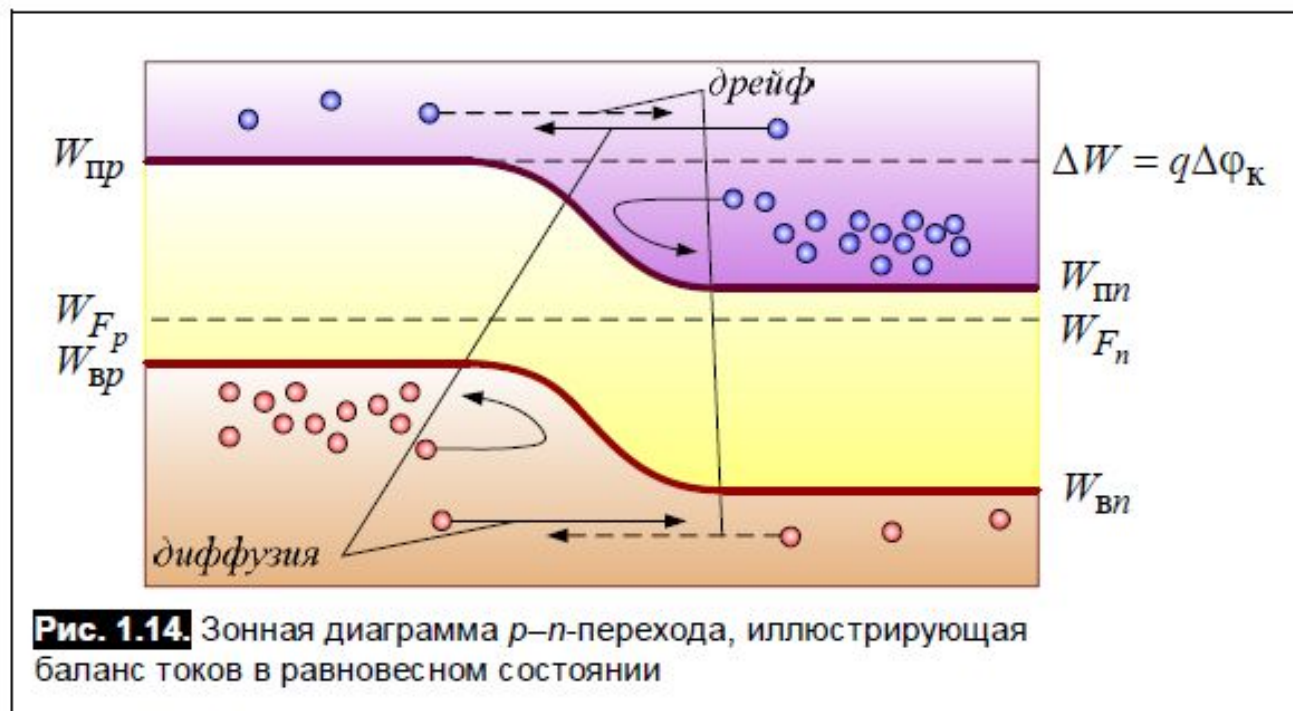


- поскольку в полупроводниках p -типа уровень Ферми смещается к потолку валентной зоны $W_{вр}$, а в полупроводниках n -типа – ко дну зоны проводимости $W_{пн}$, то на ширине p - n -перехода δ диаграмма энергетических зон искривляется и образуется потенциальный барьер:

$$\Delta\varphi_{к} = \frac{\Delta W}{q},$$

- где ΔW – энергетический барьер, который необходимо преодолеть электрону в области n , чтобы он мог перейти в область p , или аналогично для дырки в области p , чтобы она могла перейти в область n .

- Высота потенциального барьера зависит от концентрации примесей, так как при ее изменении изменяется уровень Ферми, смещаясь от середины запрещенной зоны к верхней или нижней ее границе.

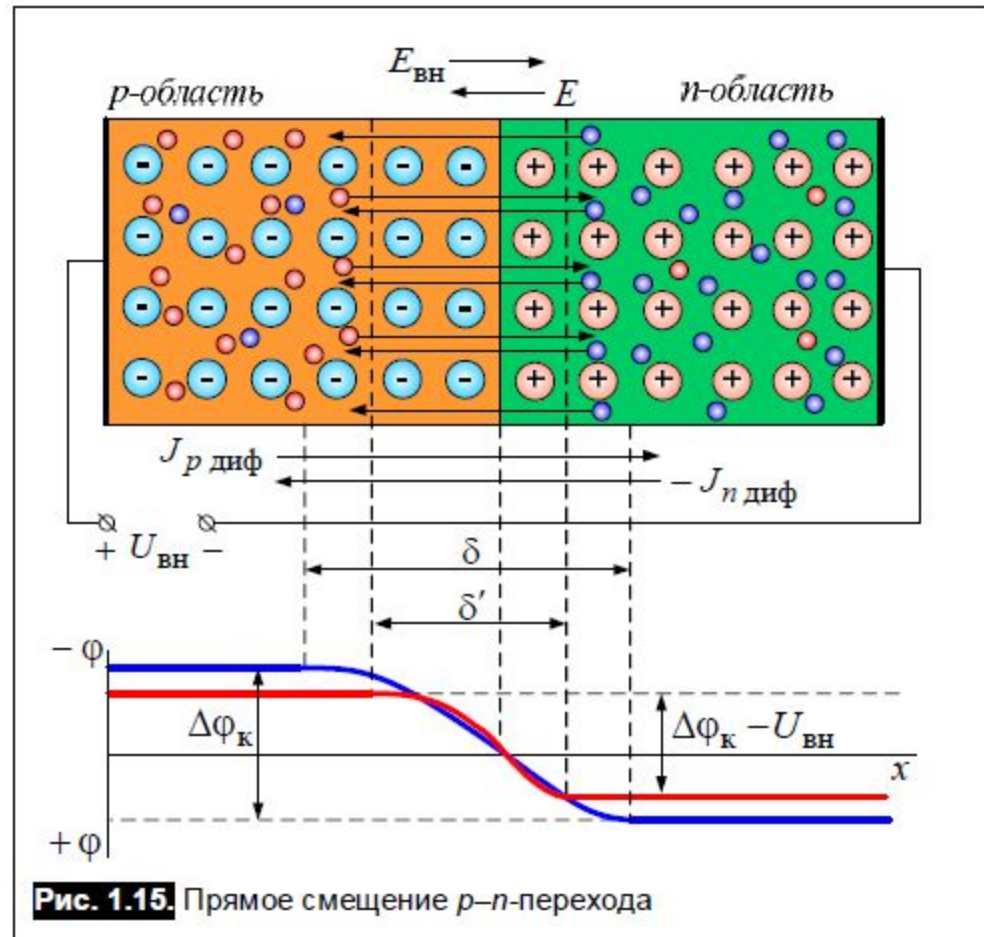


Вентильное свойство $p-n$ -перехода

- $P-n$ -переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется *вентильным*, а прибор, обладающий таким свойством, называется *электрическим вентилем*.

Прямое включение p - n -перехода

- Рассмотрим p - n -переход, к которому подключен внешний источник напряжения $U_{\text{вн}}$,
- « + » к области p -типа, « - » к области n -типа.
- Такое подключение называют **прямым включением p - n -перехода** (или **прямым смещением p - n -перехода**).



- Напряженность электрического поля внешнего источника $E_{\text{вн}}$ будет направлена навстречу напряженности поля потенциального барьера E и, следовательно, приведет к снижению результирующей напряженности $E_{\text{рез}}$:

$$E_{\text{рез}} = E - E_{\text{вн}} .$$

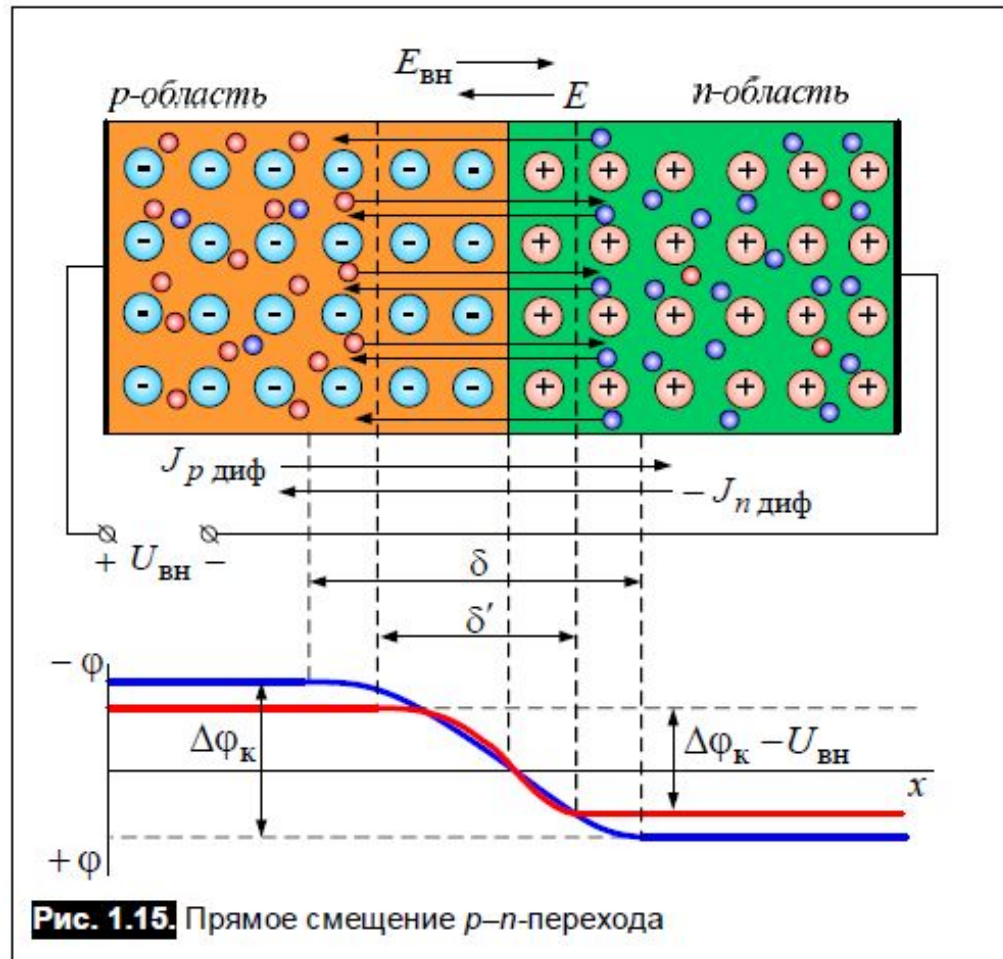


Рис. 1.15. Прямое смещение p - n -перехода

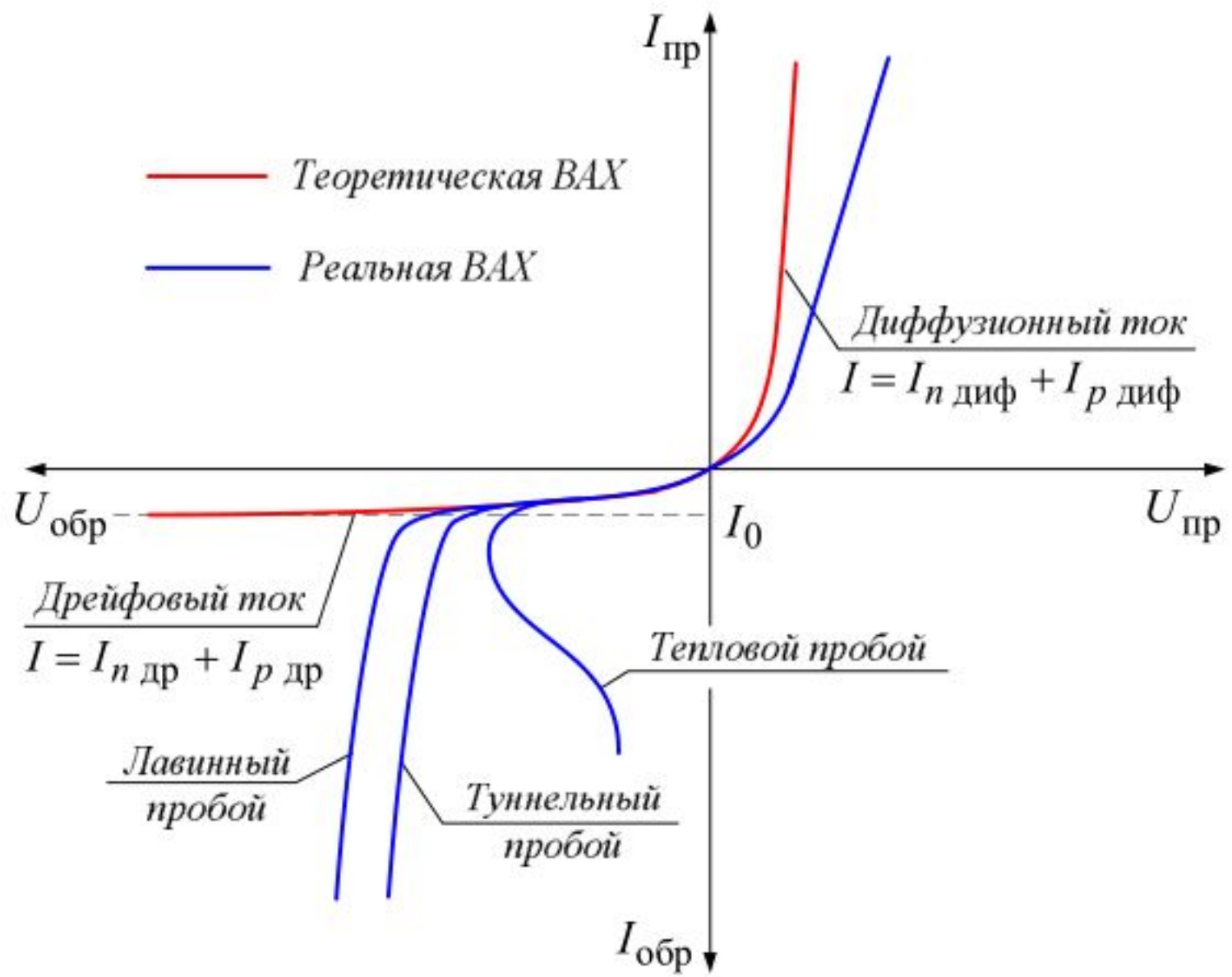


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

- Высота потенциального барьера снизится,
- увеличится количество основных носителей, диффундирующих через границу раздела в соседнюю область, образующих *прямой ток p-n-перехода*
 - $I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} \cong I_{\text{диф}} = I_{\text{осн.}}$
- Вследствие уменьшения тормозящего действия поля потенциального барьера на основные носители, ширина запирающего слоя δ уменьшается ($\delta' < \delta$) (уменьшается его сопротивление).

- При увеличении внешнего напряжения прямой ток $p-n$ -перехода возрастает.
- Основные носители после перехода границы раздела становятся неосновными в противоположной области полупроводника и, углубившись в нее, рекомбинируют с основными носителями этой области.
- Пока подключен внешний источник, ток через переход поддерживается непрерывным поступлением электронов из внешней цепи в n -область и уходом их из p -области во внешнюю цепь, благодаря чему восстанавливается концентрация дырок в p -области.

- Введение носителей заряда через $p-n$ -переход при понижении высоты потенциального барьера в область полупроводника, где эти носители являются неосновными, называют **инжекцией носителей заряда**.
- При протекании прямого тока из дырочной области p в электронную область n инжектируются дырки, а из электронной области в дырочную – электроны.

- Инжектирующий слой с относительно малым удельным сопротивлением называют **эмиттером**;
- слой, в который происходит инжекция неосновных для него носителей заряда, – **базой**.

При прямом смещении p - n -перехода потенциальный барьер понижается и через переход протекает относительно большой диффузионный ток.

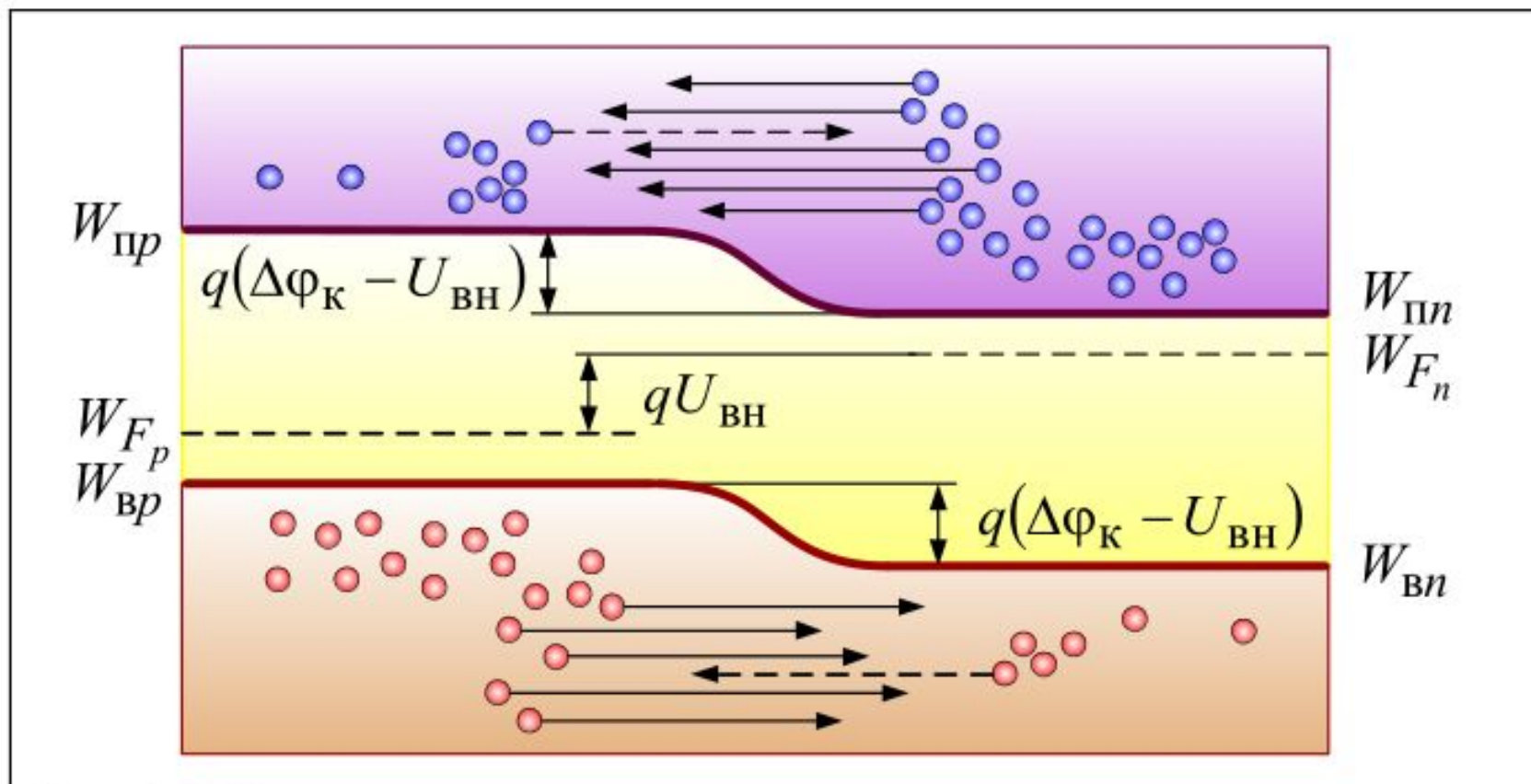
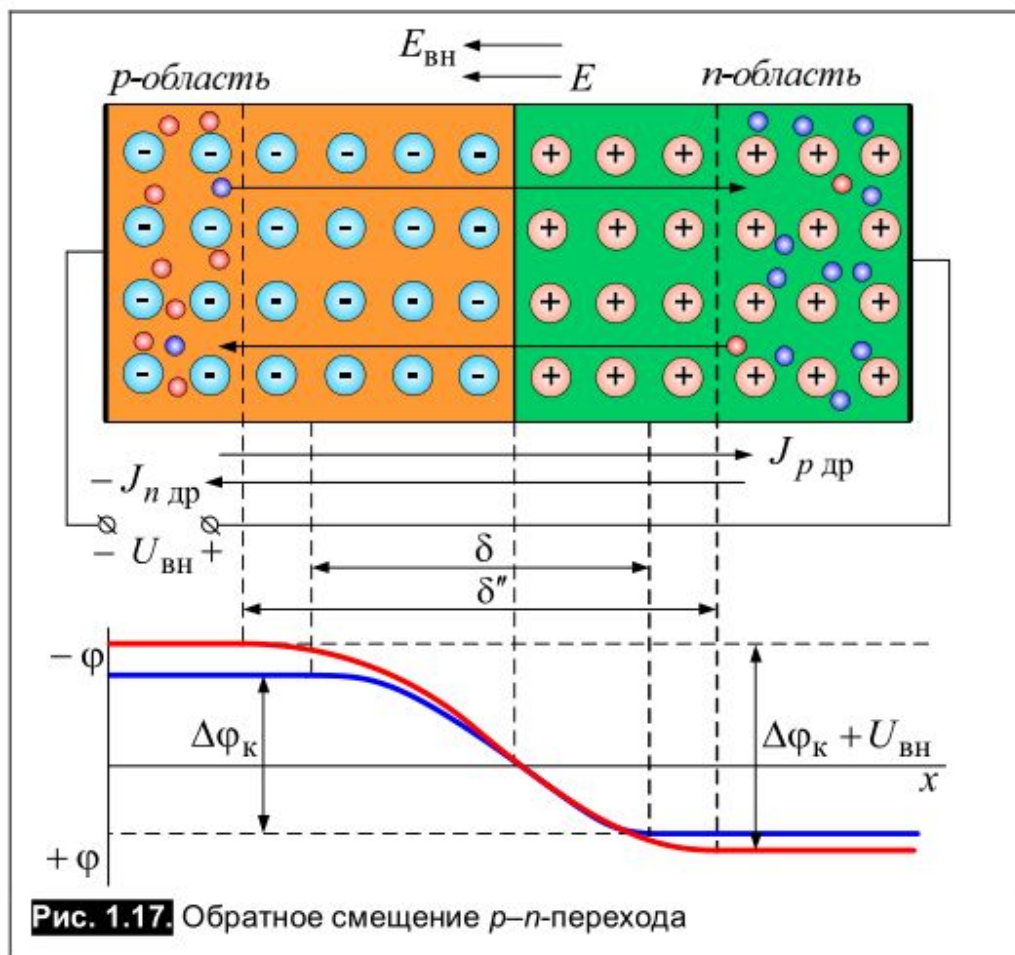


Рис. 1.16. Зонная диаграмма прямого смещения p - n -перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов

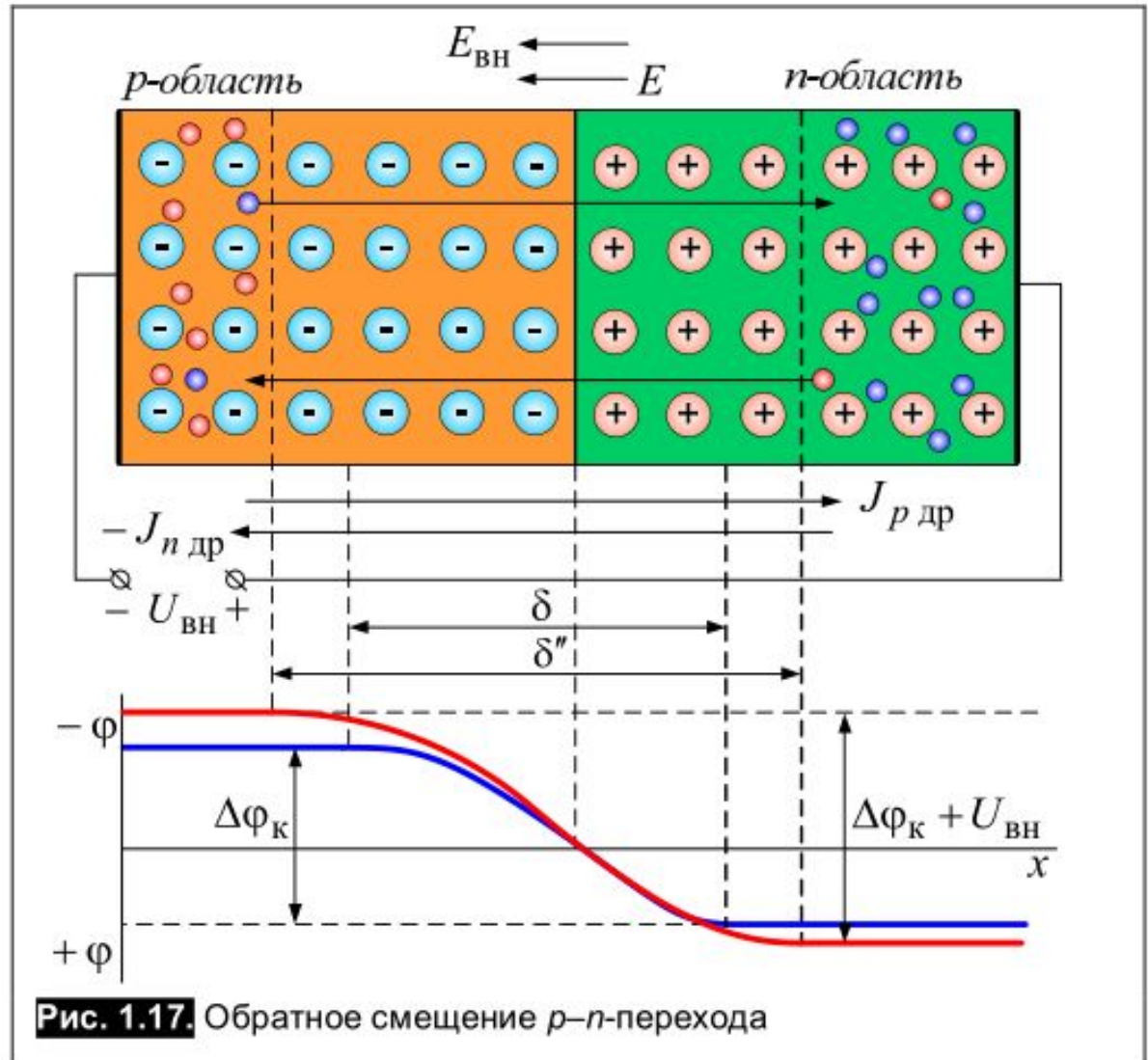
Обратное включение p - n -перехода

- Если к p - n -переходу подключить внешний источник с противоположной полярностью
- «-» к области p -типа, «+» к области n -типа, то такое подключение называют **обратным включением p - n -перехода** (или **обратным смещением p - n -перехода**).



- Напряженность электрического поля источника E_{BH} будет направлена в ту же сторону, что и напряженность электрического поля E потенциального барьера;
- высота потенциального барьера возрастает, а ток диффузии основных носителей практически становится равным нулю.

Ширина запирающего слоя δ увеличивается ($\delta'' > \delta$), а его сопротивление резко возрастает.



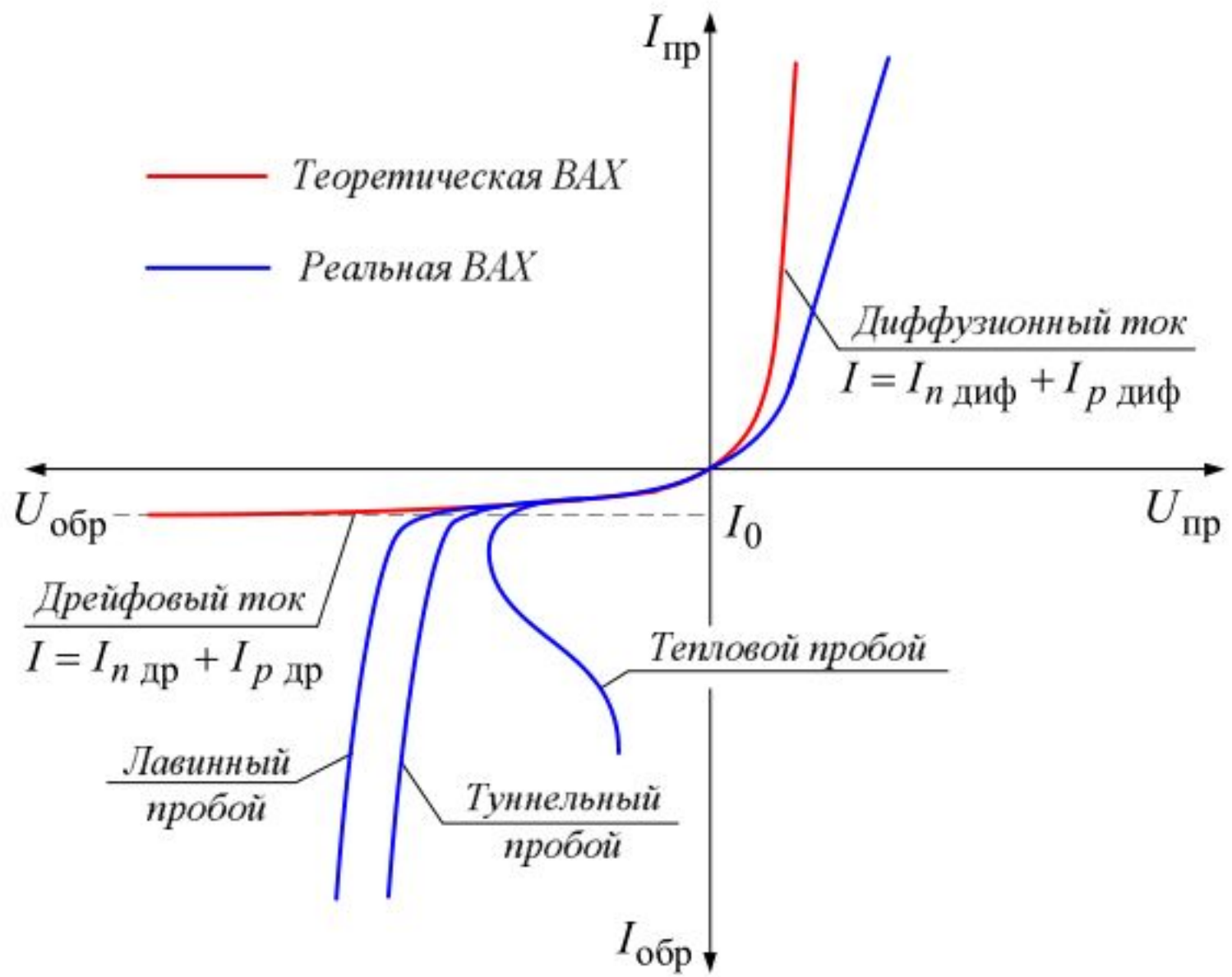
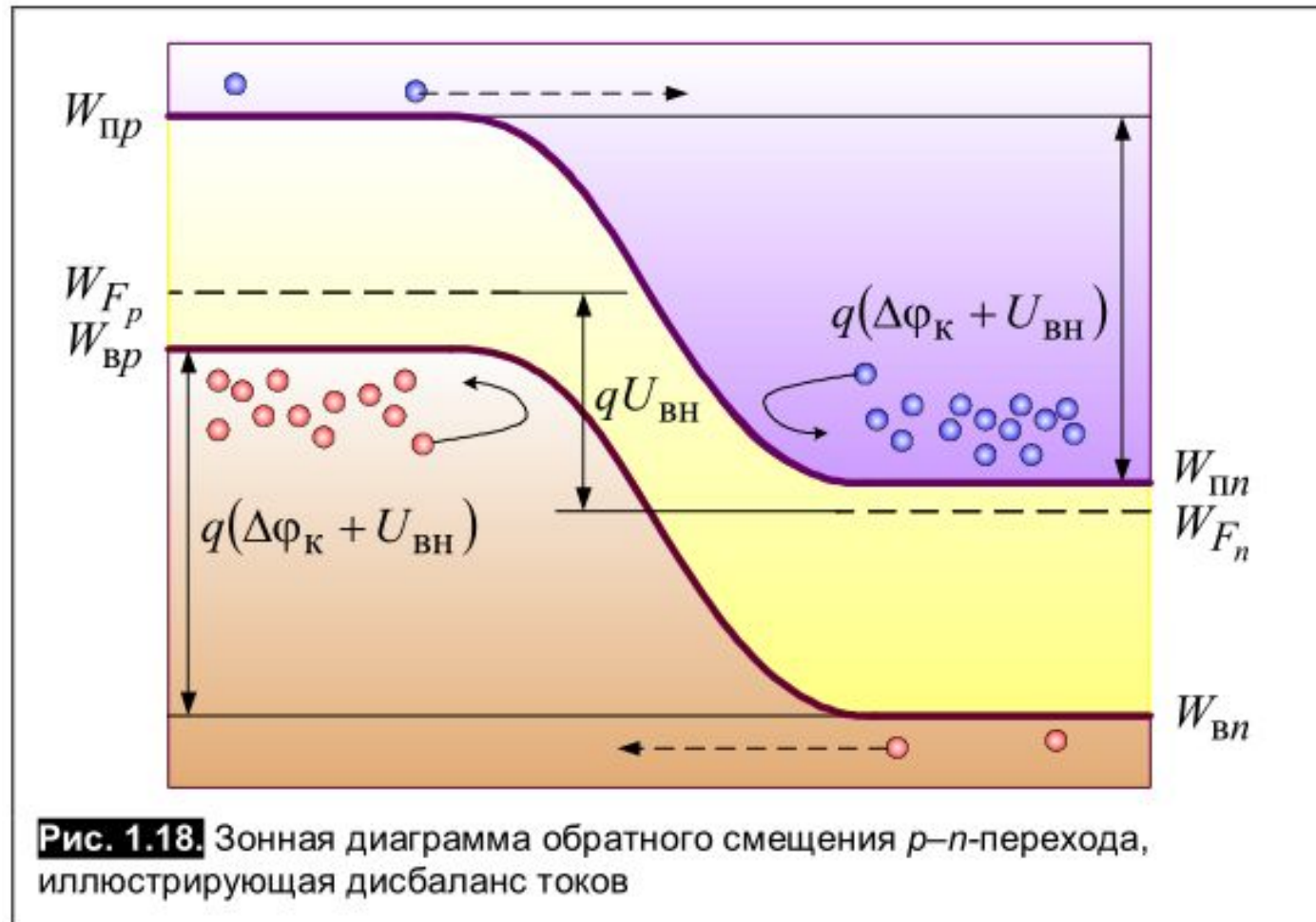


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

- Через p – n -переход будет протекать очень маленький ток, обусловленный перебро́сом суммарным электрическим полем на границе раздела, неосновных носителей
- Процесс перебро́са неосновных носителей заряда называется **экстракцией**.
- Этот ток имеет дрейфовую природу и называется **обратным током p – n -перехода**

- $$I_{\text{обр}} = I_{\text{др}} - I_{\text{диф}} \cong I_{\text{др}} = I_{\text{неосн.}}$$

При обратном смещении p - n -перехода потенциальный барьер повышается, диффузионный ток уменьшается до нуля и через переход протекает малый по величине дрейфовый ток.



Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

- Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода – это зависимость тока через $p-n$ -переход от величины приложенного к нему напряжения.
- Общий ток через $p-n$ -переход определяется суммой четырех слагаемых:

$$I_{p-n} = I_{n \text{ диф}} + I_{p \text{ диф}} - I_{n \text{ др}} - I_{p \text{ др}}$$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

где U - напряжение на p - n -переходе; I_0 - обратный (или тепловой) ток, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

- При прямом напряжении внешнего источника ($U > 0$) экспоненциальный член быстро возрастает, что приводит к быстрому росту прямого тока, который в основном определяется диффузионной составляющей.
- При обратном напряжении внешнего источника ($U < 0$) экспоненциальный член много меньше единицы и ток р–n-перехода практически равен обратному току I_0 , определяемому, в основном, дрейфовой составляющей.

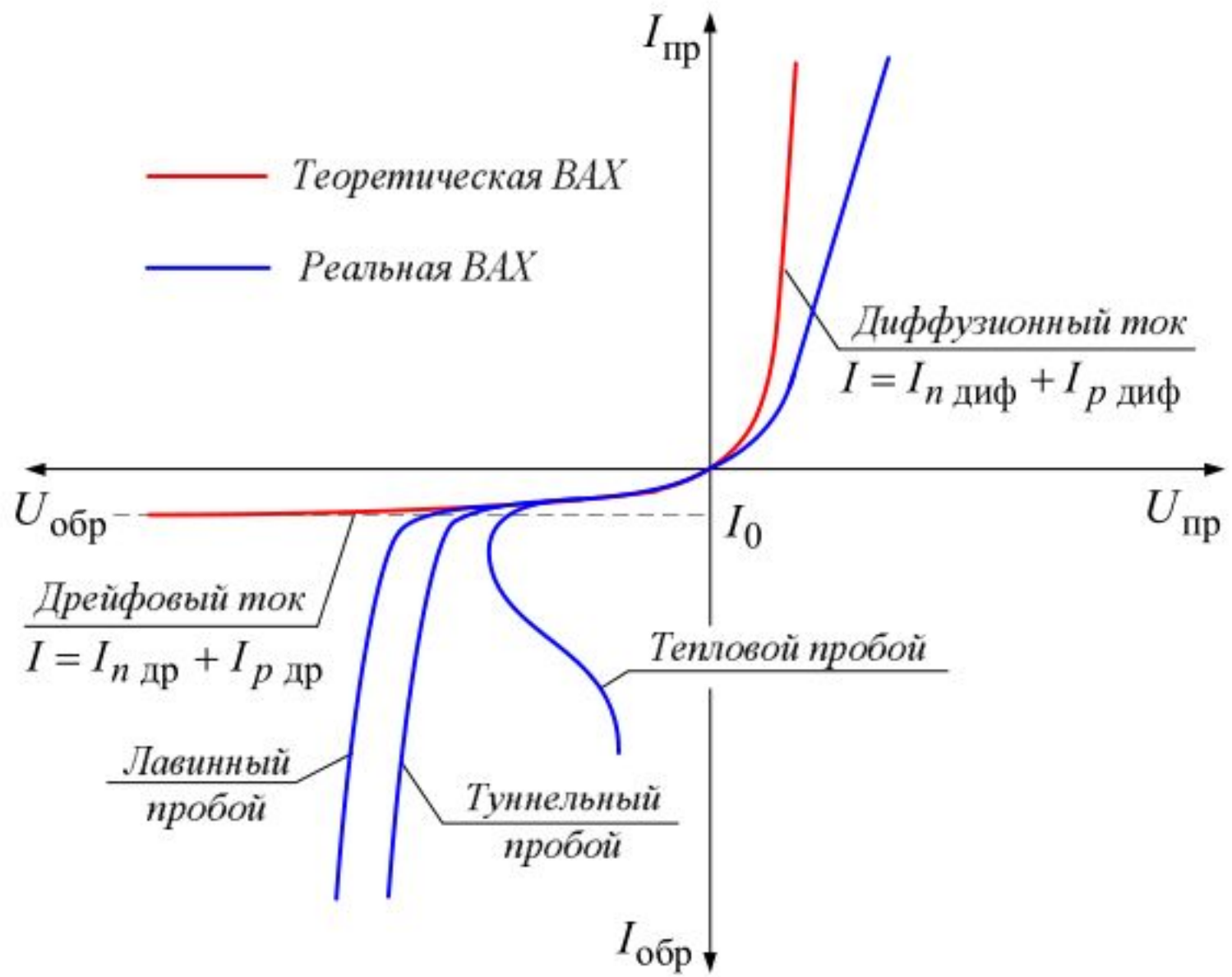


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

- При увеличении прямого напряжения ток $p-n$ -перехода в прямом направлении вначале возрастает относительно медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока, что приводит к дополнительному нагреванию полупроводниковой структуры.

- Если количество выделяемого при этом тепла будет превышать количество тепла, то могут произойти в полупроводниковой структуре необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки.

- При увеличении обратного напряжения, приложенного к $p-n$ -переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как увеличение обратного напряжения приводит лишь к увеличению скорости дрейфа неосновных носителей без изменения их количества.
- Такое положение будет сохраняться до величины обратного напряжения, при котором начинается интенсивный рост обратного тока – так называемый *пробой $p-n$ -перехода*.

Виды пробоев $p-n$ -перехода

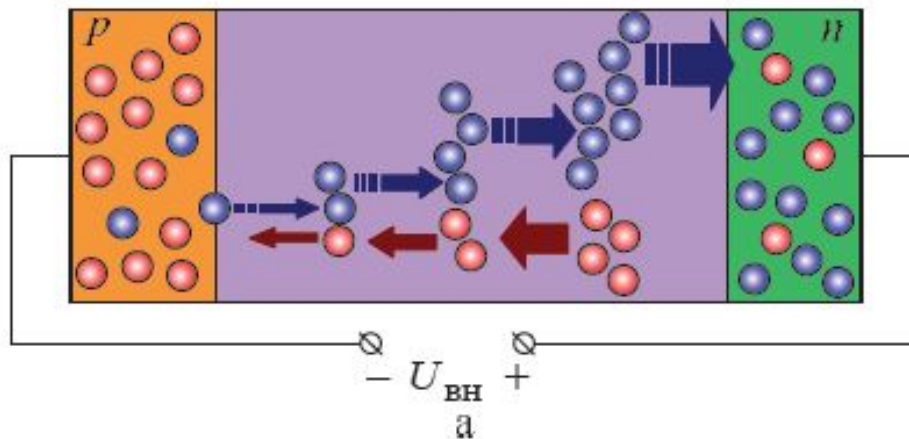
- Возможны обратимые и необратимые пробойи.
- Обратимый пробой – это пробой, после которого $p-n$ -переход сохраняет работоспособность.
- Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

- Существуют четыре типа пробоя:
- лавинный,
- туннельный,
- тепловой,
- поверхностный.

- *Лавинный и туннельный* пробой объединяются под названием – *электрический пробой*, который является **обратимым**.
- К **необратимым** относят *тепловой и поверхностный*.

- *Лавинный пробой* свойственен полупроводникам, со значительной толщиной $p-n$ -перехода, образованных слаболегированными полупроводниками.
- Пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью $E \gg (8 \dots 12) \times 10^4$ В/см.
- В лавинном пробое основная роль принадлежит неосновным носителям, образующимся под действием тепла в $p-n$ -переходе.

- Эти носители испытывают со стороны электрического поля $p-n$ -перехода ускоряющее действие и могут разогнаться до такой скорости, что их кинетической энергии может оказаться достаточно, чтобы при соударении с атомом полупроводника ионизировать его, т.е. «выбить» один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару «электрон –дырка».



Происходит резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

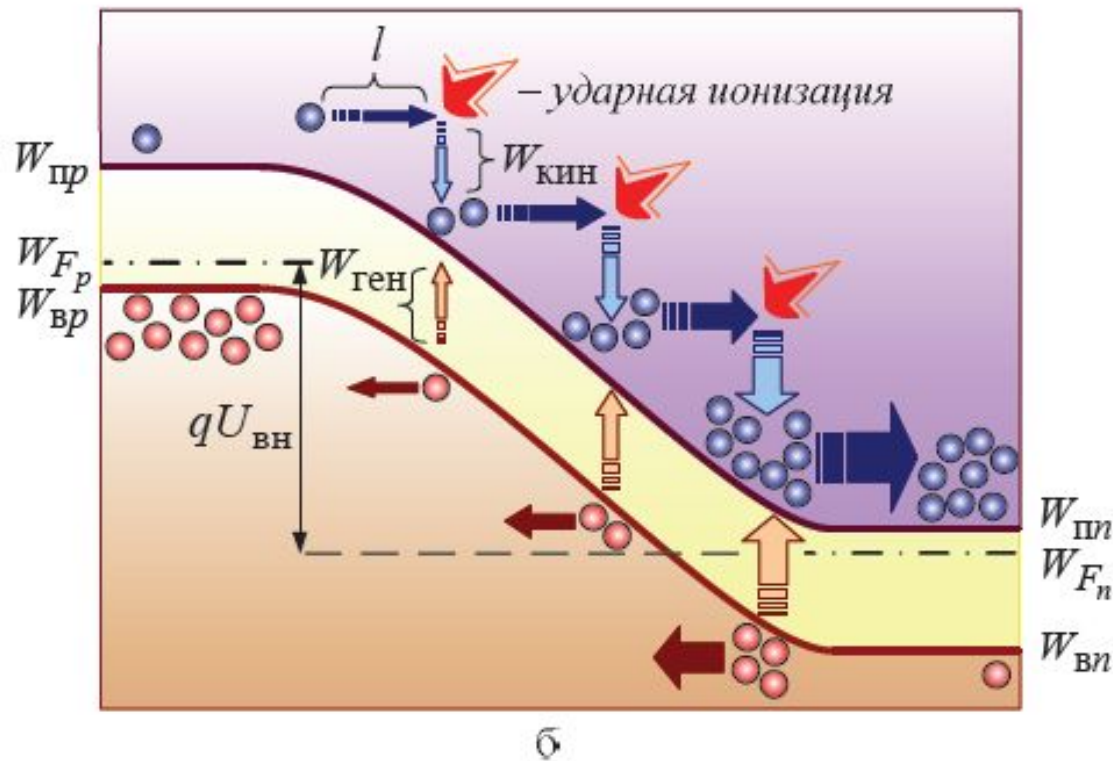


Рис. 1.20. Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в p - n -переходе: распределение токов (а); зонная диаграмма (б), иллюстрирующая лавинное умножение при обратном смещении перехода

- *Туннельный пробой* происходит в очень тонких $p-n$ -переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей $N \gg 10^{19} \text{ см}^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля.

- Высокое значение напряженности электрического поля, воздействуя на атомы кристаллической решетки, повышает энергию валентных электронов и приводит к их туннельному «просачиванию» сквозь «тонкий» энергетический барьер из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Причем «просачивание» происходит без изменения энергии носителей заряда.

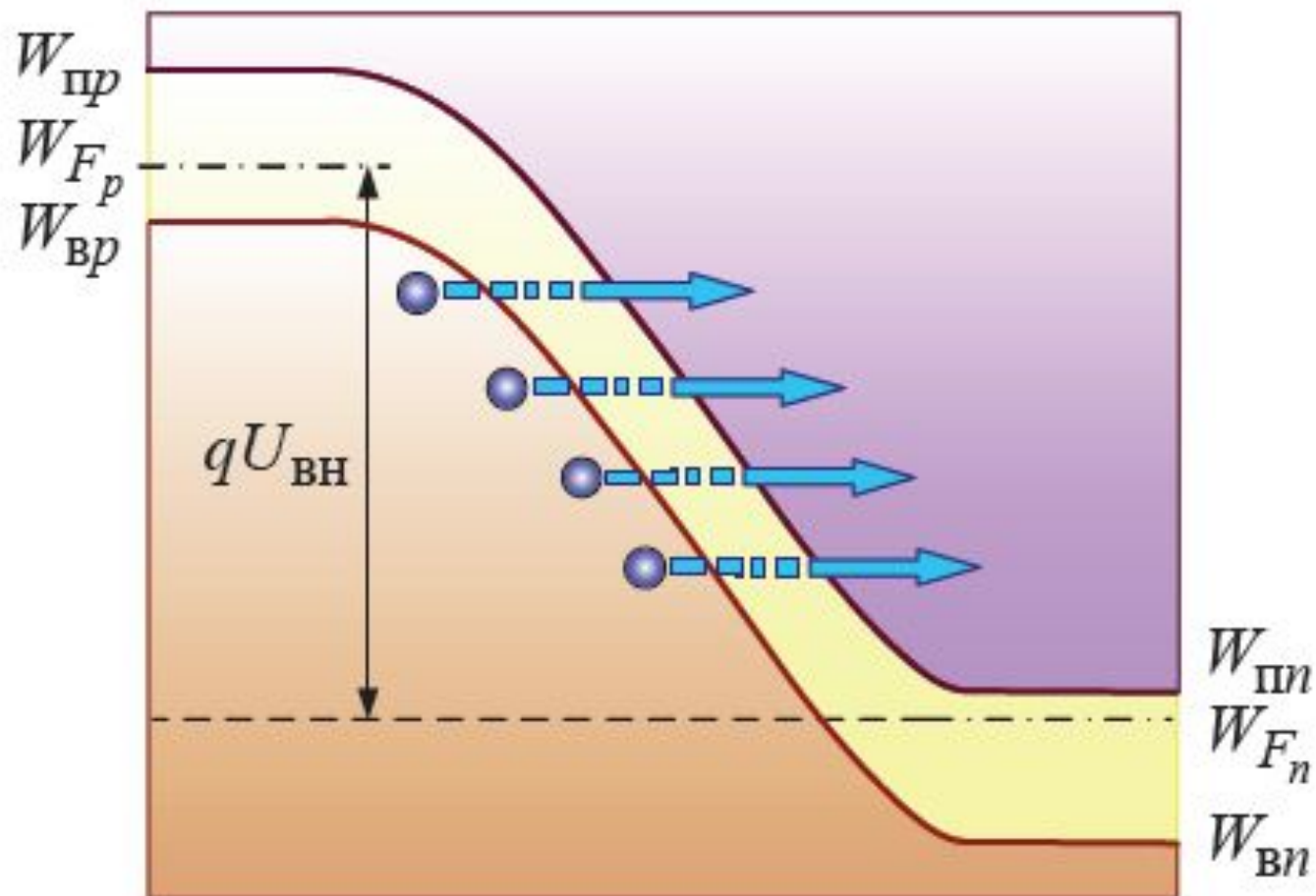


Рис. 1.21. Зонная диаграмма, иллюстрирующая туннельный пробой p - n -перехода при обратном смещении

- Если обратный ток при обоих видах электрического пробоя не превысит максимально допустимого значения, при котором произойдет перегрев и разрушение кристаллической структуры полупроводника, то они являются обратимыми и могут быть воспроизведены многократно.

- *Тепловым* называется пробой $p-n$ -перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла.
- С увеличением обратного напряжения и тока возрастает тепловая мощность, выделяющаяся в $p-n$ -переходе, и, соответственно, температура кристаллической структуры.

- Под действием тепла усиливаются колебания атомов кристалла и ослабевают связь валентных электронов с ними, возрастает вероятность перехода их в зону проводимости и образования дополнительных пар носителей «электрон – дырка».

- Если электрическая мощность в $p-n$ -переходе превысит максимально допустимое значение, то процесс термогенерации лавинообразно нарастает, в кристалле происходит необратимая перестройка структуры и $p-n$ -переход разрушается.

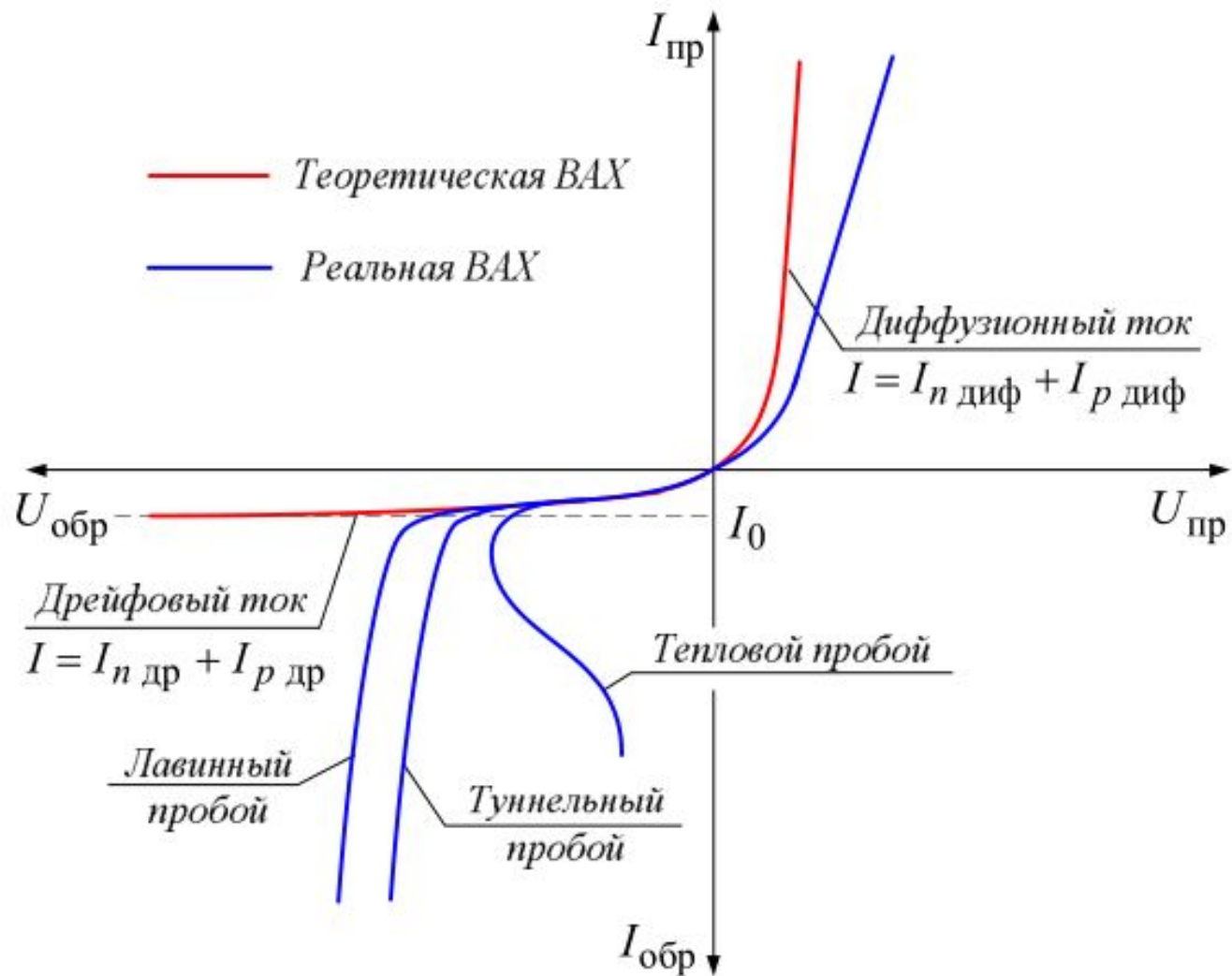


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

Ёмкость $p-n$ -перехода

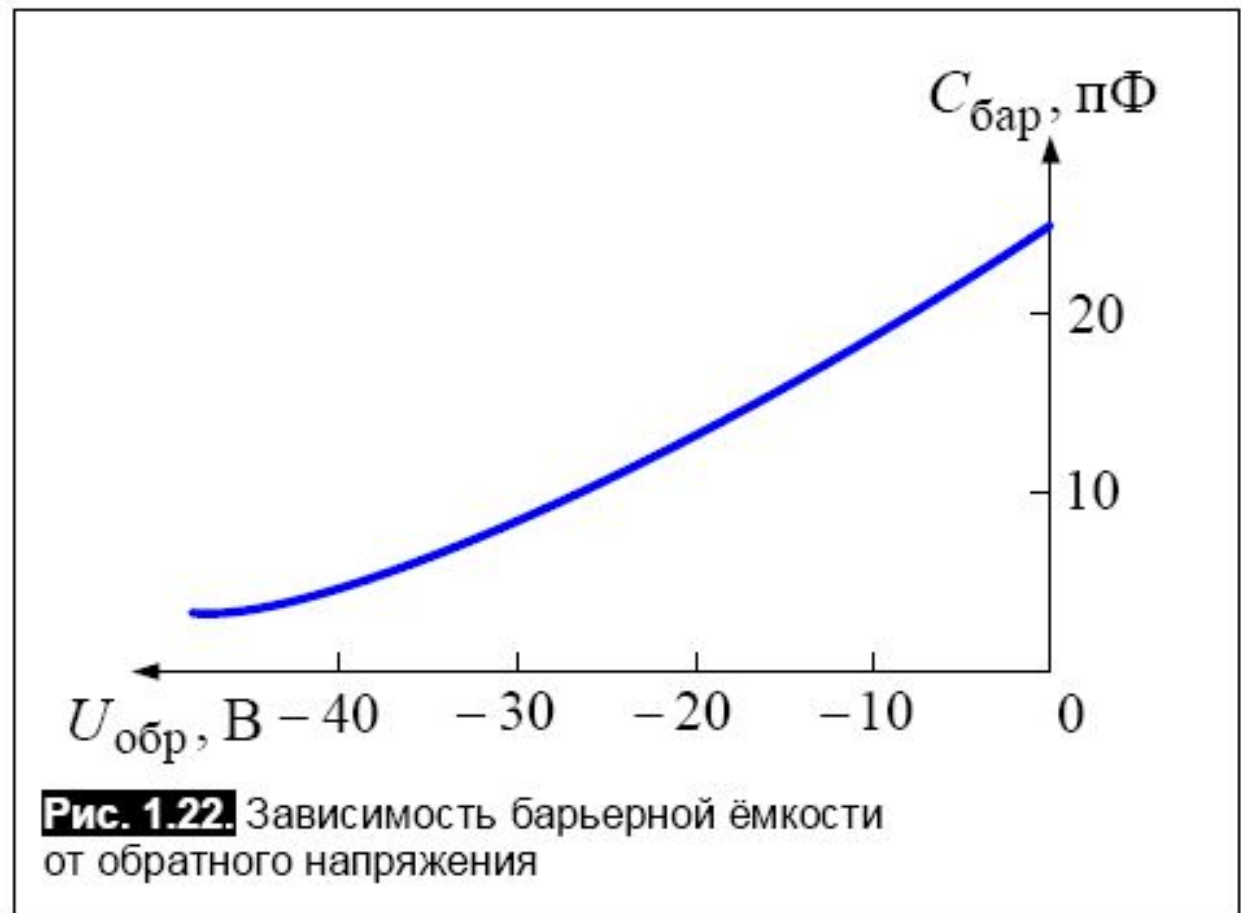
- Изменение внешнего напряжения на $p-n$ -переходе приводит к изменению ширины обедненного слоя и, соответственно, накопленного в нем электрического заряда
- Исходя из этого $p-n$ -переход ведет себя подобно конденсатору, ёмкость которого определяется как отношение изменения накопленного в $p-n$ -переходе заряда к обусловившему это изменение приложенному внешнему напряжению.

- Различают *барьерную* (или зарядную) и *диффузионную ёмкость* p - n -перехода.
- Барьерная ёмкость соответствует обратновключенному p - n -переходу, который рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями:

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь p – n -перехода; δ – ширина обеднённого слоя.

- При возрастании обратного напряжения ширина перехода увеличивается и ёмкость $C_{\text{бар}}$ уменьшается.



- Диффузионная ёмкость характеризует накопление подвижных носителей заряда в n - и p -областях при прямом напряжении на переходе.
- Она практически существует только при прямом напряжении, когда носители заряда диффундируют (инжектируют) в большом количестве через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n - и p -областях.

- Ёмкость $C_{\text{диф}}$ представляет собой отношение зарядов к разности потенциалов:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\Delta Q_{\text{диф}}}{\Delta U_{\text{пр}}} .$$

- Диффузионная ёмкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удастся, т.к. она шунтируется малым прямым сопротивлением $p-n$ -перехода.
- Таким образом, $p-n$ -переход можно использовать в качестве **конденсатора переменной емкости**, управляемого величиной и знаком приложенного напряжения.

Контакт «металл – полупроводник»

- Контакт «металл – полупроводник» возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n - или p - типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_M и из полупроводника A_P .

- Под *работой выхода электрона* понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона.
- Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

- В результате диффузии электронов и перераспределения зарядов нарушается электрическая нейтральность прилегающих к границе раздела областей, возникает контактное электрическое поле и контактная разность потенциалов

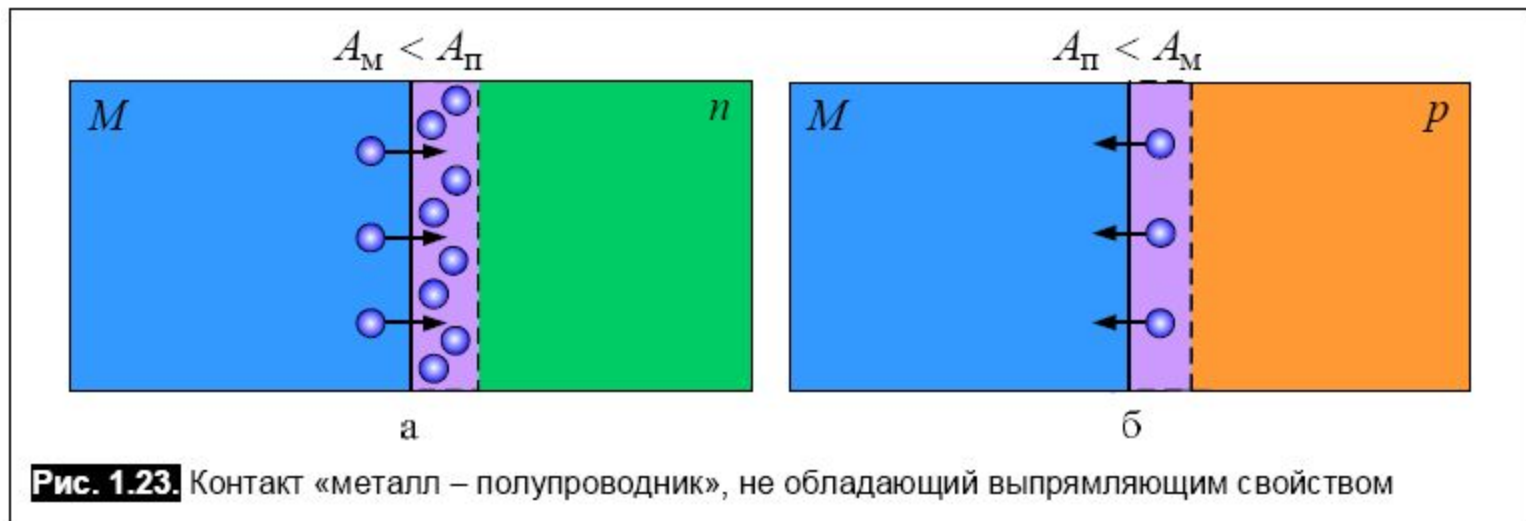
$$\varphi_{\text{КОНТ}} = \frac{(A_{\text{М}} - A_{\text{П}})}{q}.$$

- Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл –полупроводник», называется *переходом Шоттки*, по имени немецкого ученого В. Шоттки, который первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик таких переходов.

- Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике.
- Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.

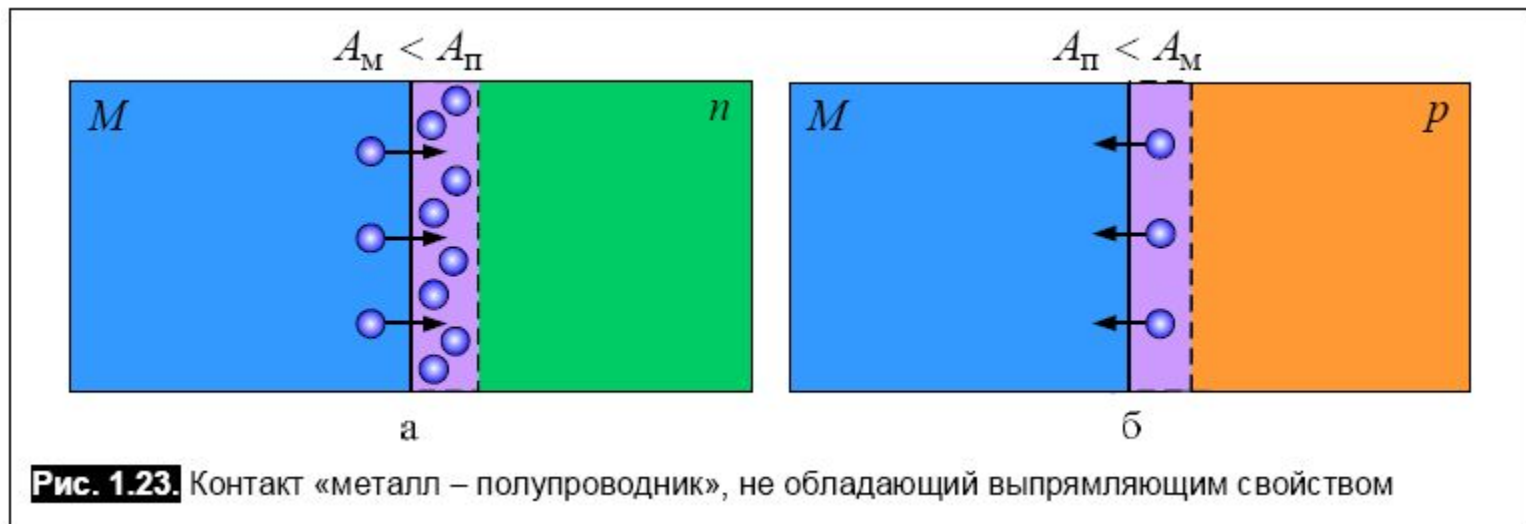
- В зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать обеднённый, инверсный или обогащённый слой носителями электрических зарядов.

- 1. $A_M < A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). В данном случае будет преобладать выход электронов из металла (M) в полупроводник, поэтому в слое полупроводника около границы раздела накапливаются основные носители (электроны), и этот слой становится обогащенным, т.е. имеющим повышенную концентрацию электронов.

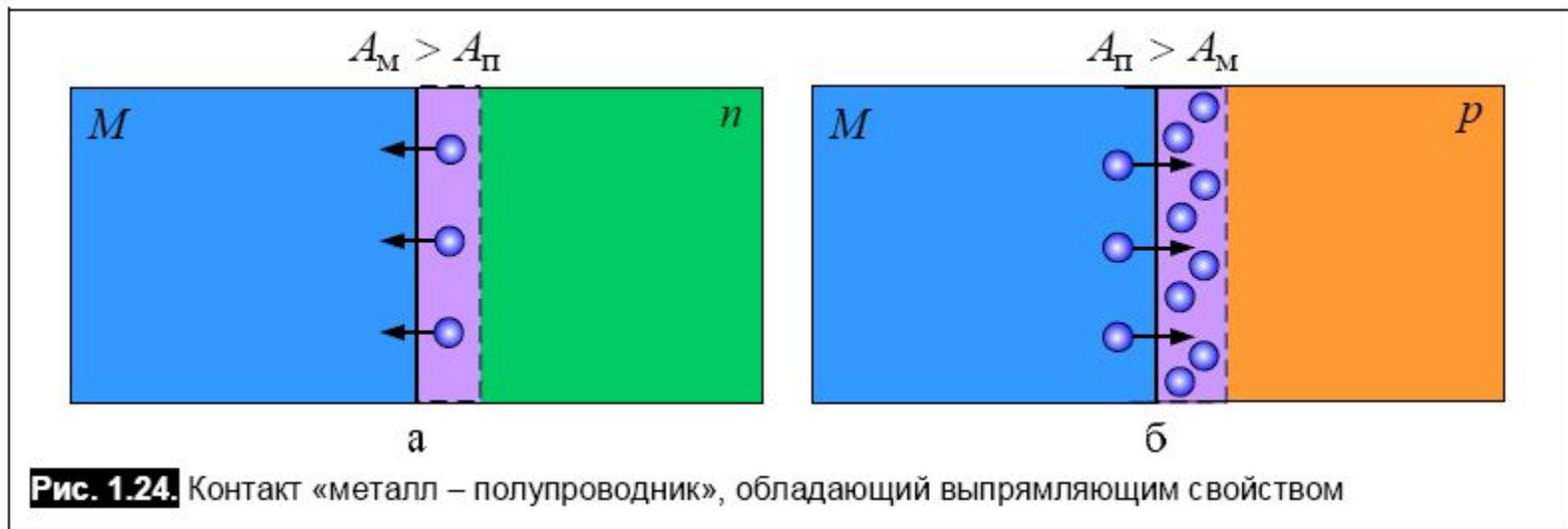


- Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющим свойством. Его иначе называют *невыпрямляющим переходом*.

- 2. $A_{\text{п}} < A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа (б). В этом случае будет преобладать выход электронов из полупроводника в металл, при этом в приграничном слое также образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход также не обладает выпрямляющим свойством.

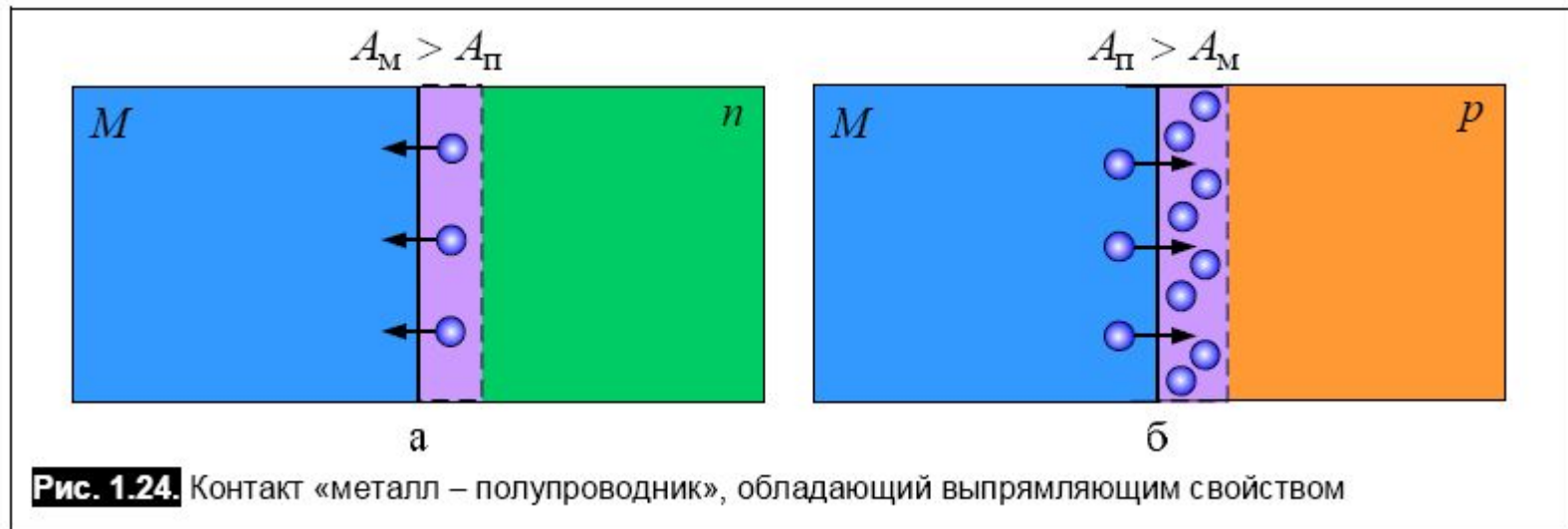


- 3. $A_M > A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). При таких условиях электроны будут переходить из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и имеющая большое сопротивление.



- Создается сравнительно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно зависеть от полярности приложенного напряжения.
- Если $A_p \gg A_m$, то возможно образование инверсного слоя (p -типа). Такой контакт обладает выпрямляющим свойством.

- 4. $A_{\text{п}} > A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа (б). Контакт, образованный при таких условиях обладает выпрямляющим свойством, как и предыдущий.



Свойства омических переходов

- Основное назначение омических переходов – электрическое соединение полупроводника с металлическими токоведущими частями полупроводникового прибора.
- Омический переход имеет меньшее отрицательное влияние на параметры и характеристики полупроводникового прибора, если выполняются следующие условия: