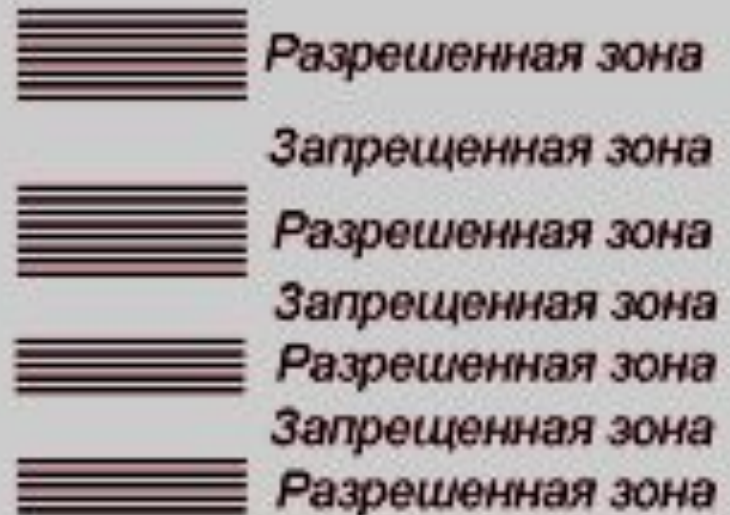


Энергетические зоны в кристаллах

Валентные электроны в кристалле движутся не свободно, а в периодическом поле решетки.

Спектр возможных значений энергии распадается на ряд чередующихся разрешенных и запрещенных зон. В пределах разрешенной зоны энергия изменяется квазинепрерывно, а значения энергии в запрещенных зонах не реализуются.

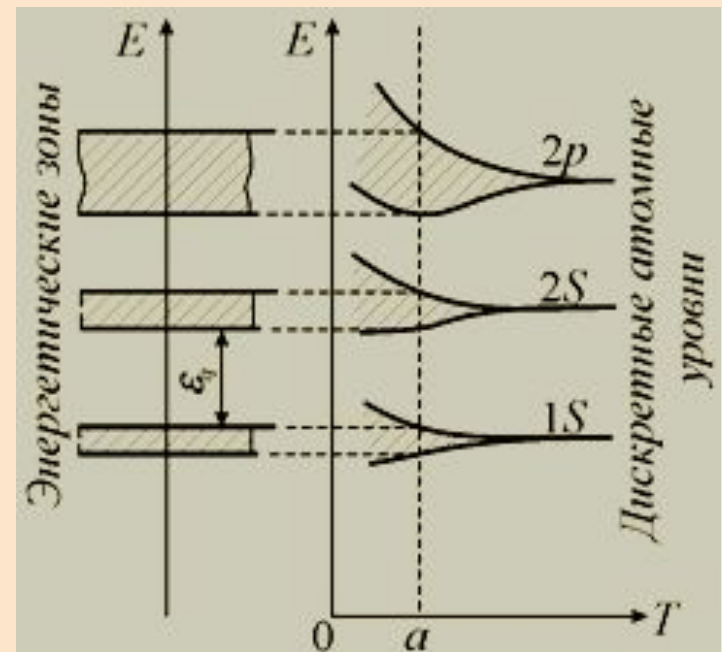
Энергия электронов в кристаллах изменяется квазинепрерывно, спектр разрешенных значений энергии состоит из множества близкорасположенных дискретных уровней.



Энергетические зоны в кристаллах

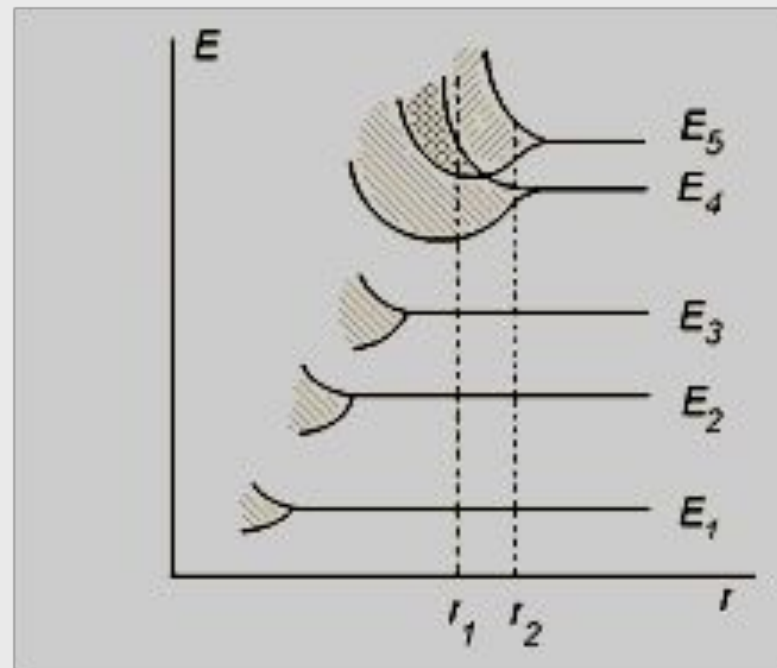
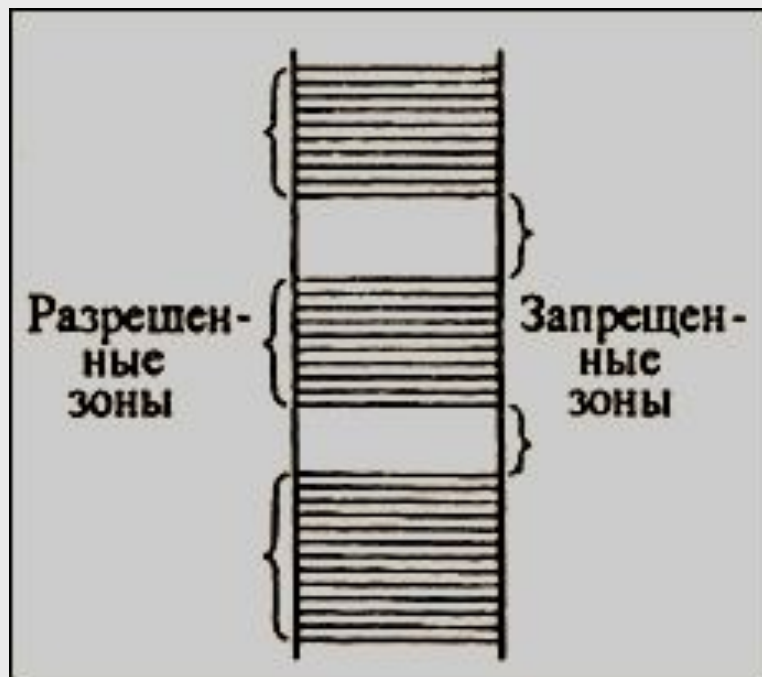
Происхождение зон: объединение атомов с одинаковыми уровнями энергии. При сближении возникает взаимодействие, \Rightarrow изменение положения уровней, из одного уровня в N атомах возникает N уровней близкорасположенных, но не совпадающих. \Rightarrow расщепление каждого уровня атома на N уровней, образующих полосу (зону).

Величина расщепления различна для каждого уровня атома. Сильнее расщепляются внешние уровни. Внутренние расщепляются мало.



Энергетические зоны в кристаллах

При расщеплении может произойти как перекрывание зон, образованных из разных уровней, так и может возникнуть запрещенная зона между ними. Все зависит от конкретных свойств атомов кристалла.



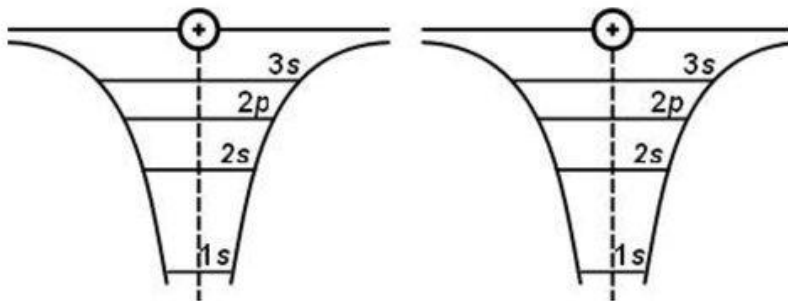
Энергетические зоны в кристаллах

Зонная структура энергетических уровней получается непосредственно из решения уравнения Шредингера в периодическом силовом поле решетки кристалла.

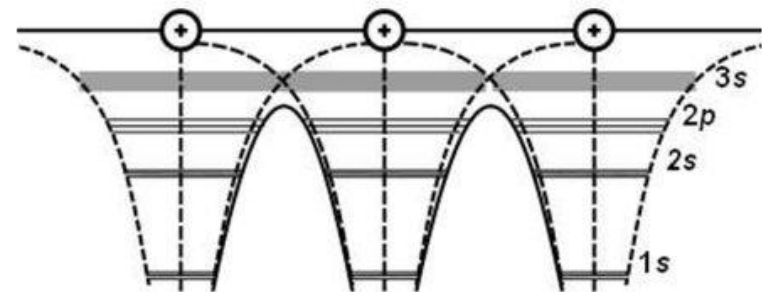
$$\text{Решение } \psi_k = u_k(r) \exp(ikr),$$

где u_k – периодическая функция, имеет период потенциала.

- Уровни в изолированном атоме

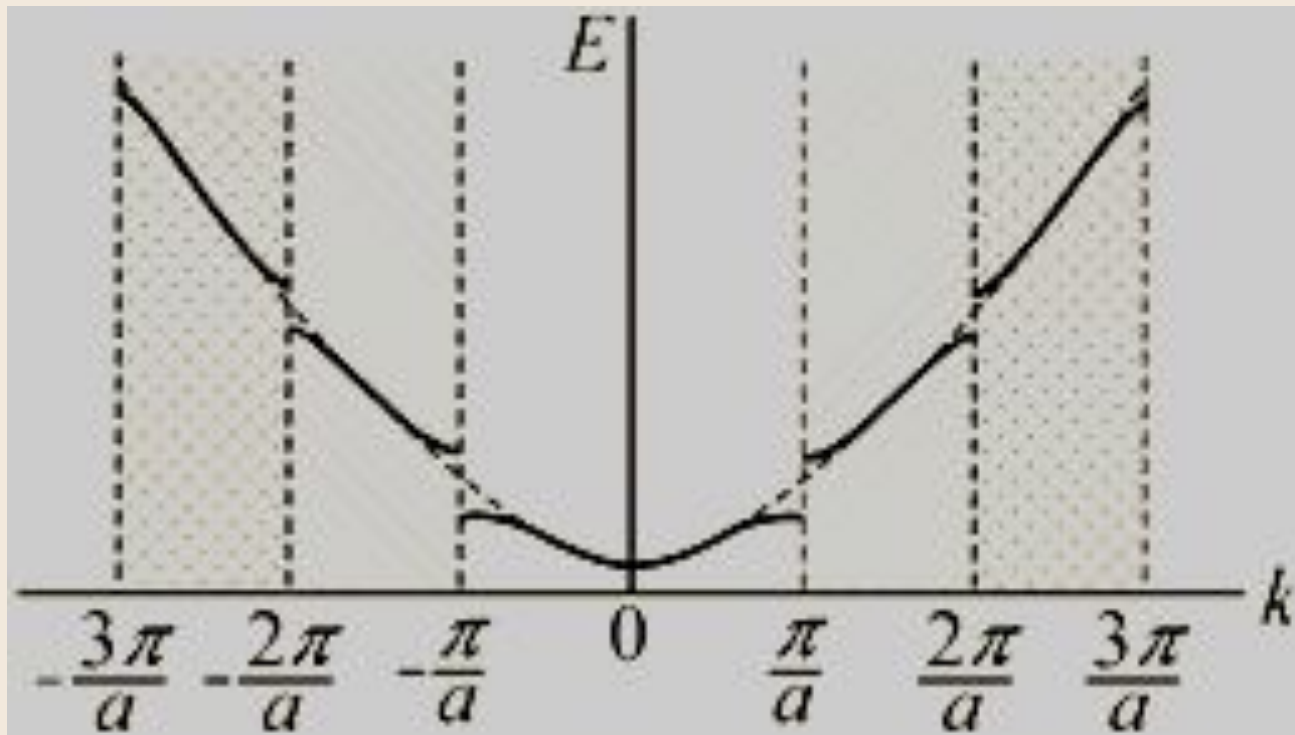


- Образование зон в твердом теле



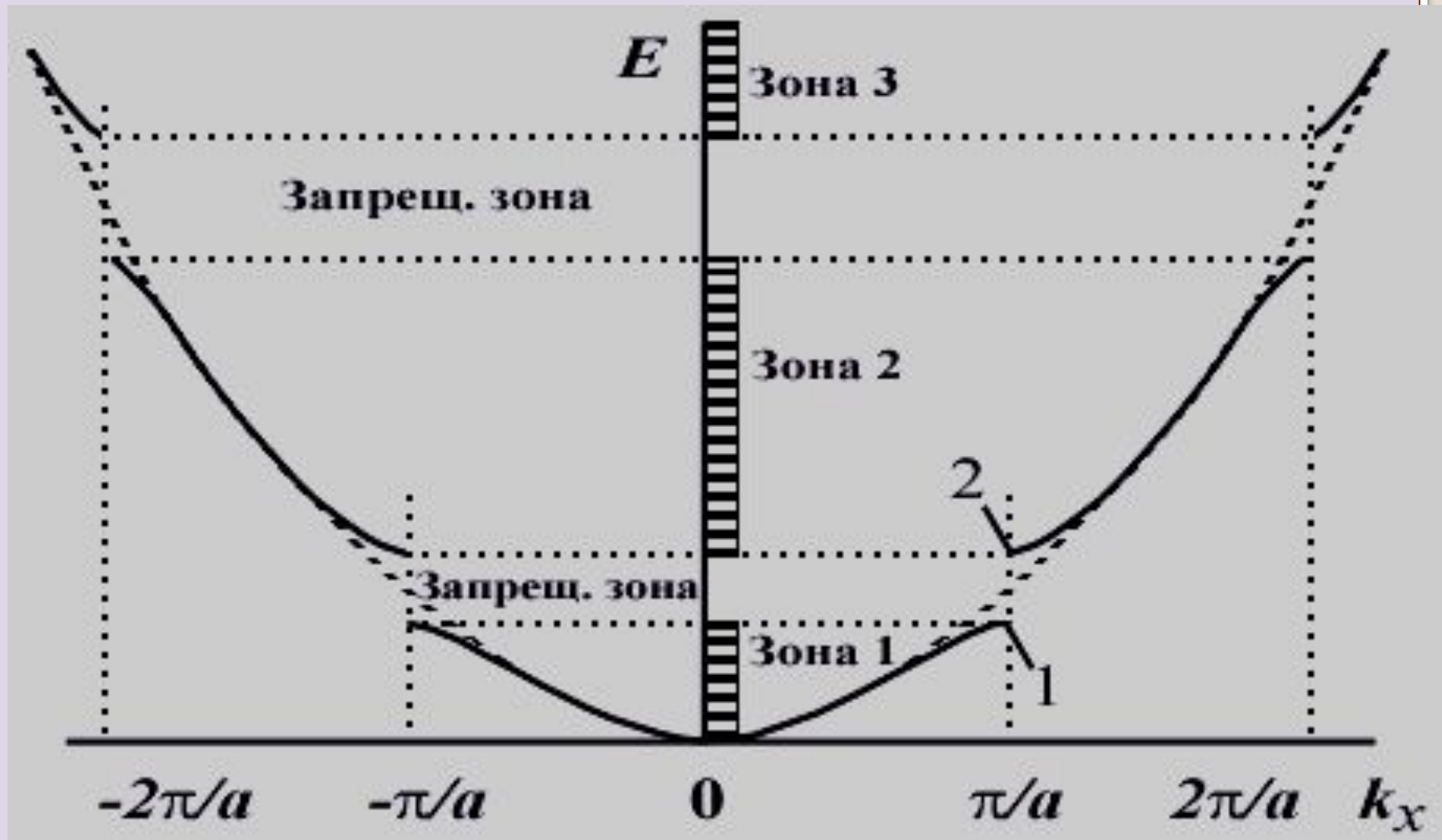
Энергетические зоны в кристаллах

Дисперсионная кривая – это график зависимости энергии частицы \mathcal{E}_k от модуля волнового вектора k . Для свободных электронов это парабола, (квазинепрерывная). В случае периодического поля – разрывная парабола.



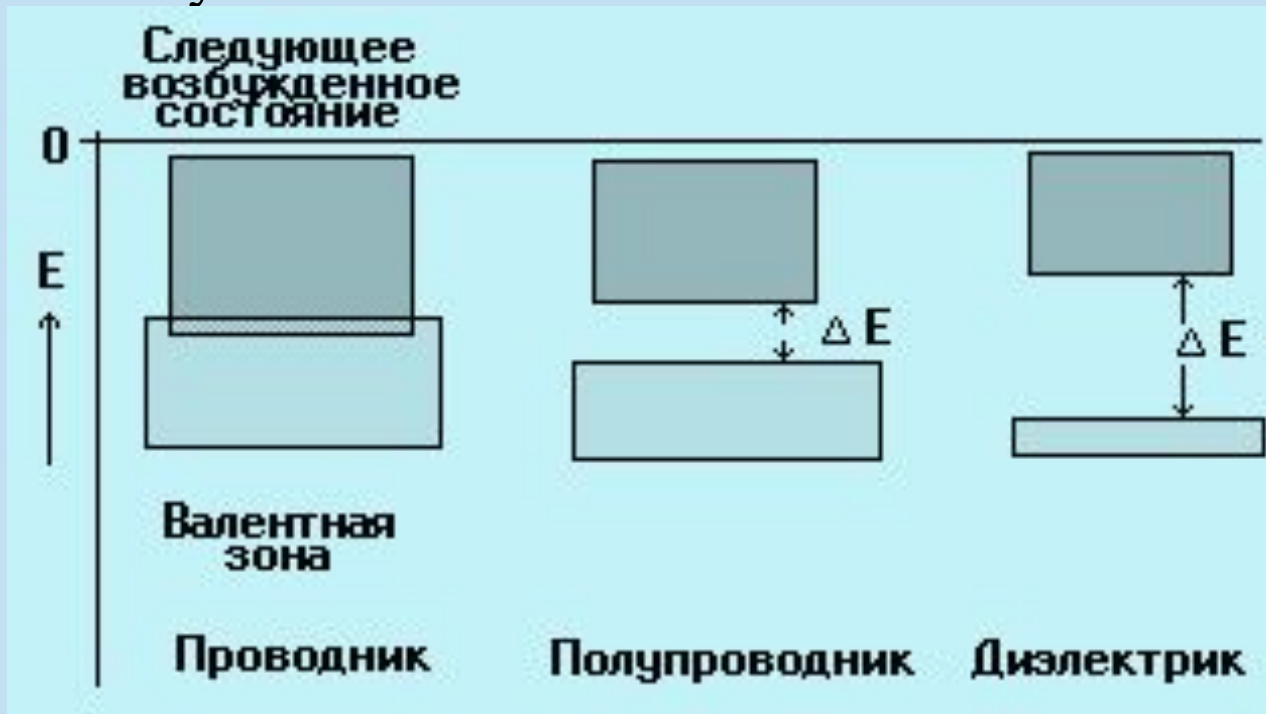
Энергетические зоны в кристаллах

Разрывы – это запрещенные зоны,



Энергетические зоны в кристаллах

Ширина зон не зависит от размеров кристалла, \Rightarrow чем больше атомов, тем теснее уровни. Ширина разрешенных зон \sim несколько эВ, \Rightarrow расстояния между уровнями $\sim 10^{-23}$ эВ. На каждом уровне два электрона. Каждый уровень отвечает определенному значению k .



Энергетические зоны в кристаллах

Зонная теория проводников, полупроводников и диэлектриков. Валентная зона – разрешенная зона, возникшая из уровня, где были валентные электроны. При абсолютном нуле электроны заполняют нижние уровни валентной зоны. Более высокие зоны свободны от электронов. В зависимости от заполнения валентной зоны и ширины запрещенной зоны возможны три случая.



а, диэлектрик

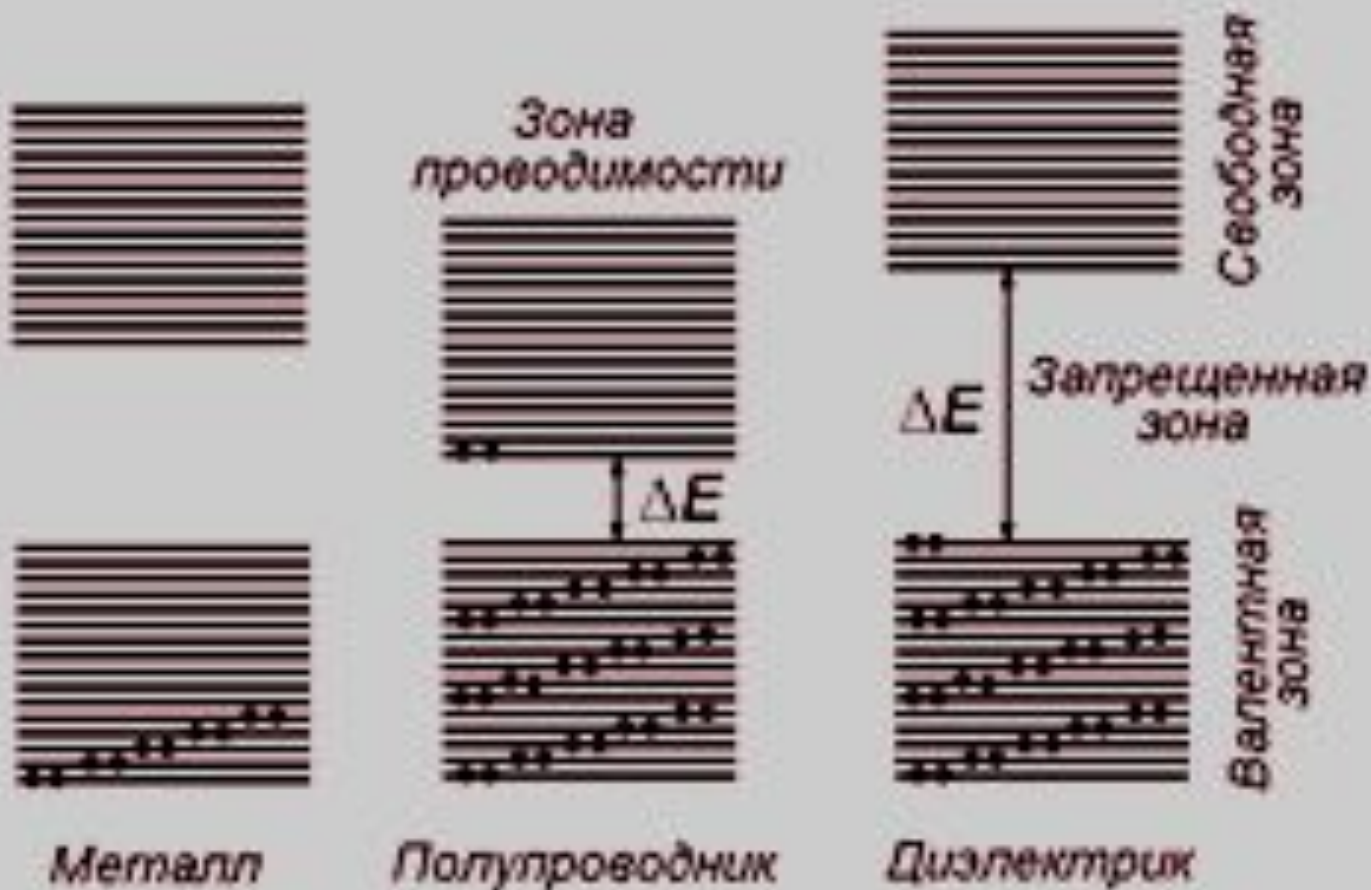


б, полупроводник



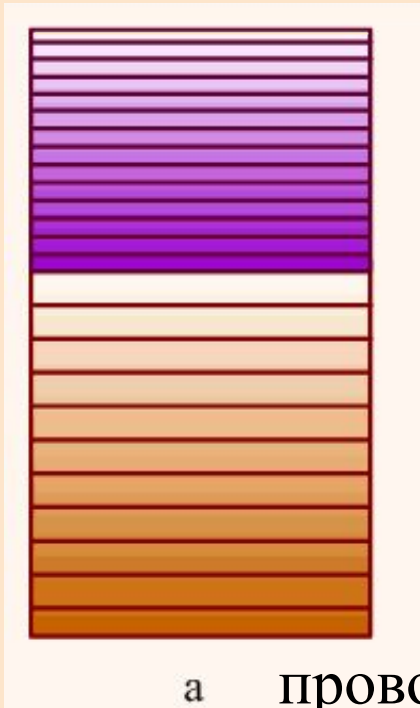
в, проводник

Энергетические зоны в кристаллах



Энергетические зоны в кристаллах

В первом случае электроны заполняют зону неполностью, \Rightarrow для перевода на более высокий уровень нужна совсем небольшая энергия ($\sim 10^{-23}$ эВ). Энергия 1 К ($\sim 10^{-4}$ эВ). \Rightarrow проводник (металл). Зона проводимости.

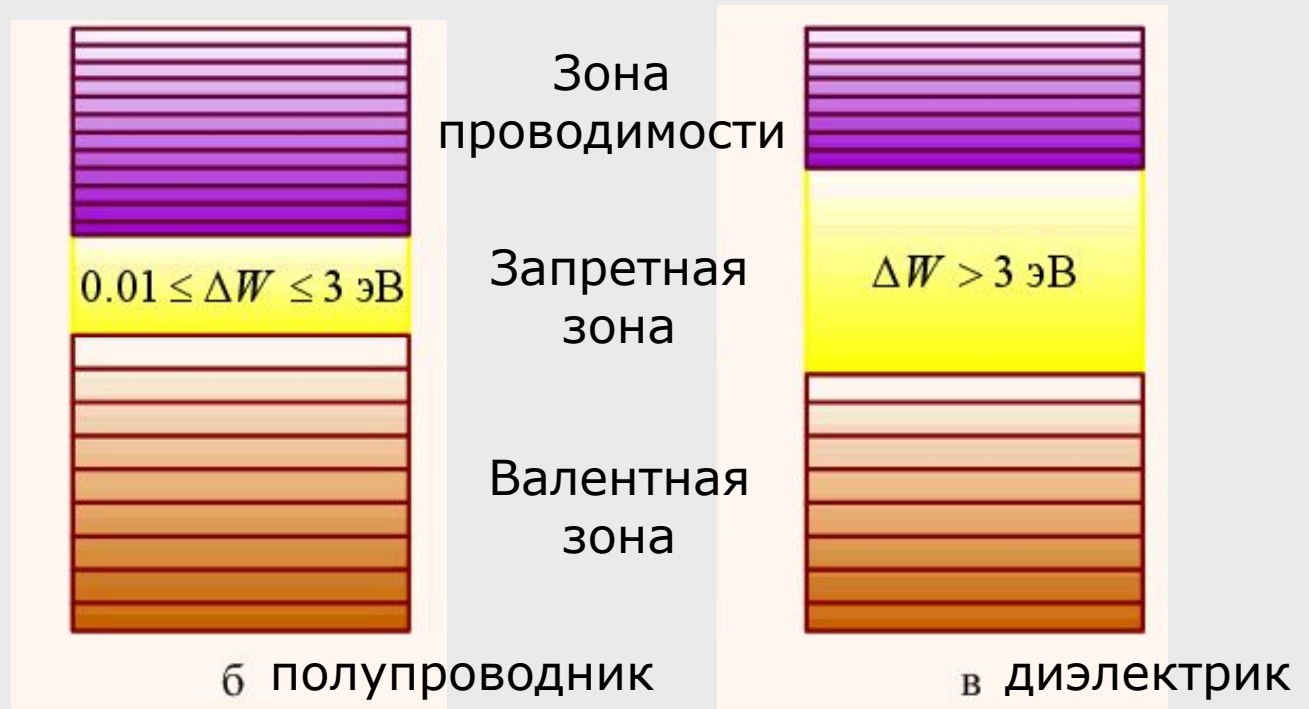


а проводник

Частичное заполнение валентной зоны: если на последнем уровне один электрон или имеет место перекрывание зон. В первом случае не хватает электронов, во втором – избыток уровней.

Энергетические зоны в кристаллах

Если валентная зона заполнена и имеется запрещенная зона ширины $\Delta\varepsilon_3 \Rightarrow$ свойства кристалла определяются шириной зоны $\Delta\varepsilon_3$. если она не велика, то достаточно энергии теплового движения, чтобы перевести часть электронов в зону проводимости. \Rightarrow полупроводники. Если $\Delta\varepsilon_3$ велика, \Rightarrow диэлектрики.



Электропроводность металлов

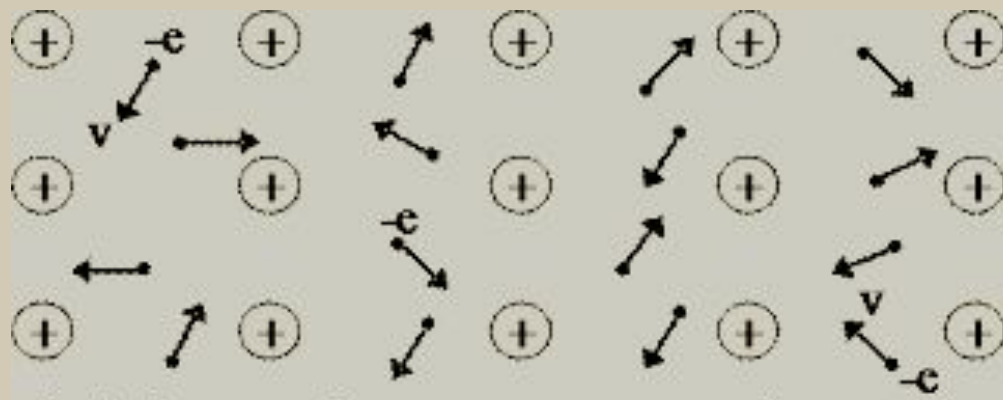
Квантовомеханический расчет показывает, что в случае идеальной кристаллической решетки электроны проводимости не испытывали бы в своем движении никакого сопротивления, и электропроводность металлов была бы бесконечно большой.

Нарушения строгой периодичности обусловлены наличием примесей и вакансий и тепловыми колебаниями решетки.

Сопротивление

возникает из-за

рассеяния электронов на атомах примеси и на фононах. Чем чище металл и ниже температура – тем меньше сопротивление.



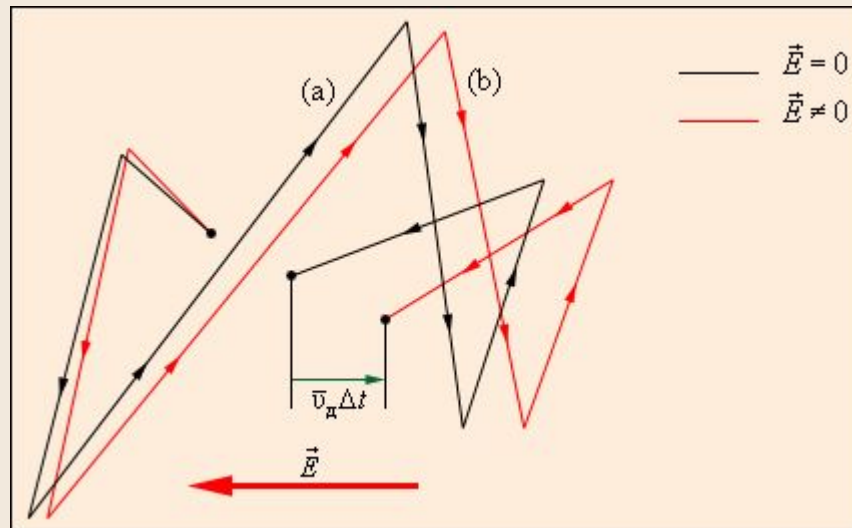
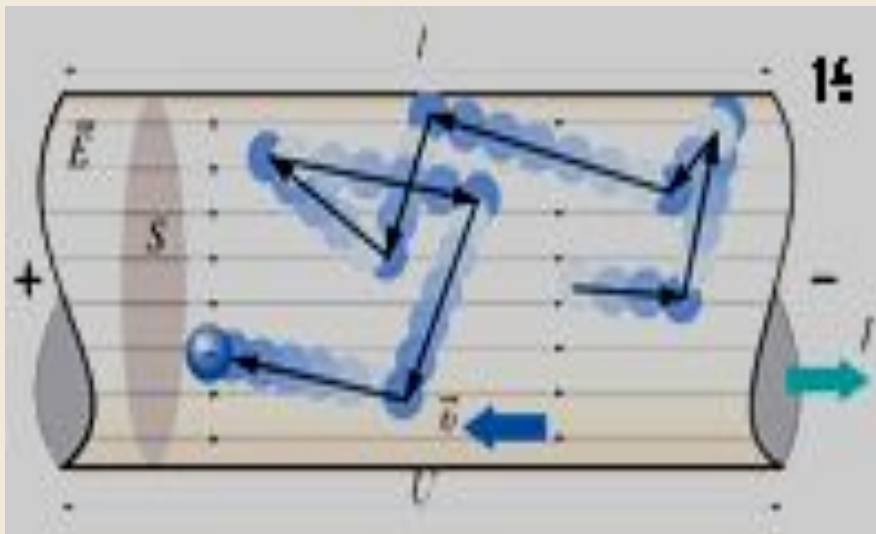
Электропроводность металлов

Удельное сопротивление металлов

$$\rho = \rho_{\text{колеб}} + \rho_{\text{прим}}$$

$\rho_{\text{колеб}}$ уменьшается с понижением температуры и обращается в ноль при $T = 0$.

$\rho_{\text{прим}}$ образует остаточное сопротивление металла.

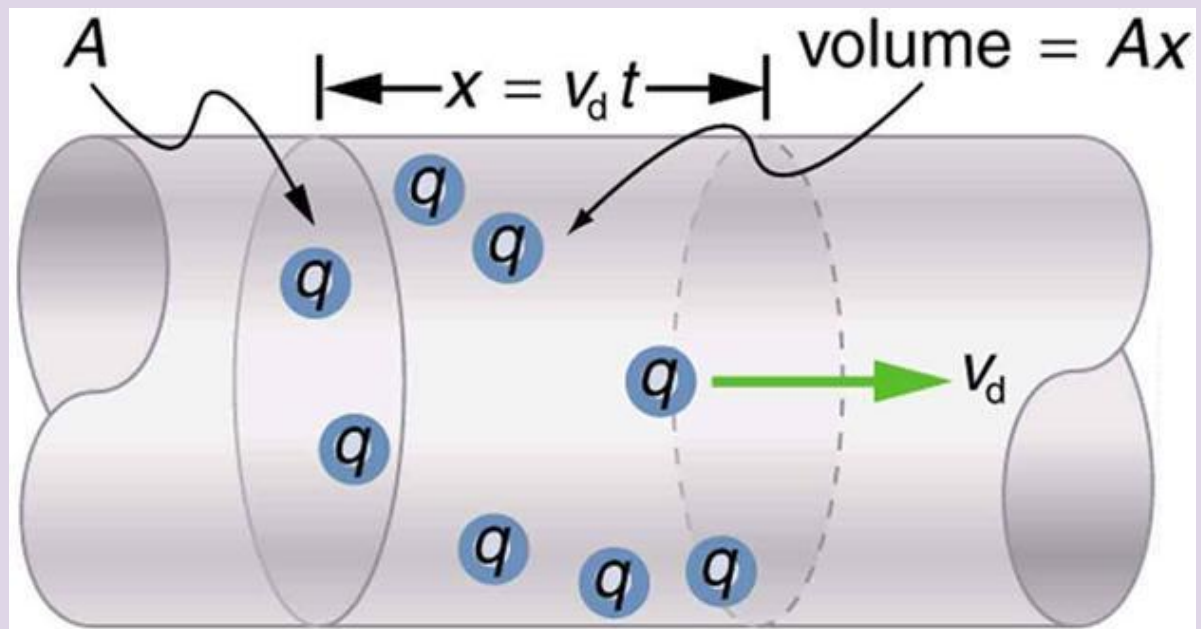


Электропроводность металлов

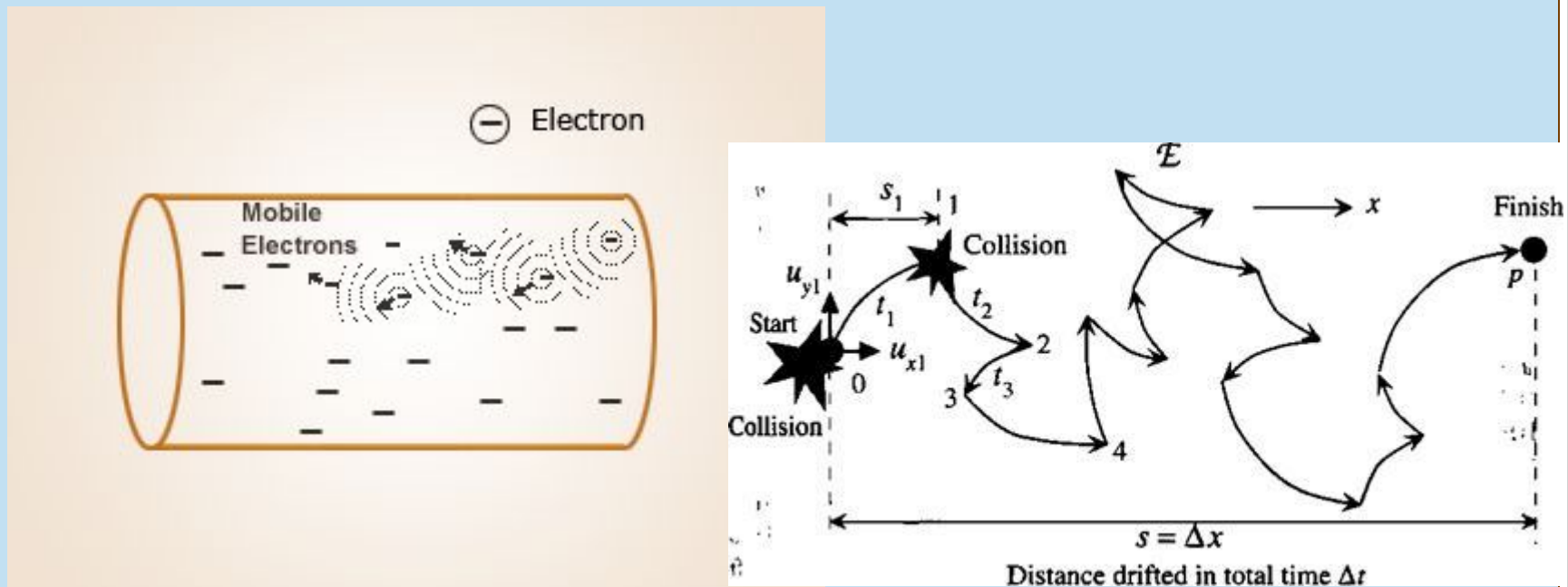
Скорость дрейфа

$$V_{др} = \Sigma V_i / n,$$

в отсутствии внешнего поля $V_{др} = 0$ и ток в металле отсутствует.



Электропроводность металлов



Согласно закону Ома $V_{\partial p} \sim \bar{e}E \Rightarrow F_{mp} = -rV_{\partial p}$

Уравнение движения: $m^* \frac{dV_{\partial p}}{dt} = -eE - rV_{\partial p}$

m^* – эффективная масса

Электропроводность металлов

Закон убывания $V_{\partial p}$ после выключения поля:

$$m^* \frac{dV_{\partial p}}{dt} + rV_{\partial p} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$V_{\partial p}(t) = V_{\partial p}(0) \exp\left(-\frac{r}{m^*} t\right)$$

$$\tau = \frac{m^*}{r} \quad \text{– время релаксации.}$$

Время релаксации характеризует процесс установления равновесия между электронами и решеткой.

Электропроводность металлов

$$\Rightarrow F_{mp} = \frac{m^*}{\tau} V_{dp}$$

и устанавливается значение V_{dp} из равенства

$$-\bar{e}E - \frac{m^*}{\tau} V_{dp} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{dp} = -\frac{\bar{e}E}{m^*} \tau$$

Установившееся значение плотности тока $j = -\bar{e}nV_{dp}$

$$j = -\frac{\bar{e}E}{m^*} \tau (-\bar{e})n \quad \frac{n\bar{e}^2\tau}{m^*} E \quad \sigma = \frac{n\bar{e}^2\tau}{m^*}$$

Электропроводность металлов

классическое значение:

$$\sigma = \frac{n\bar{e}^2\tau'}{2m}$$

(τ' – среднее время свободного пробега).

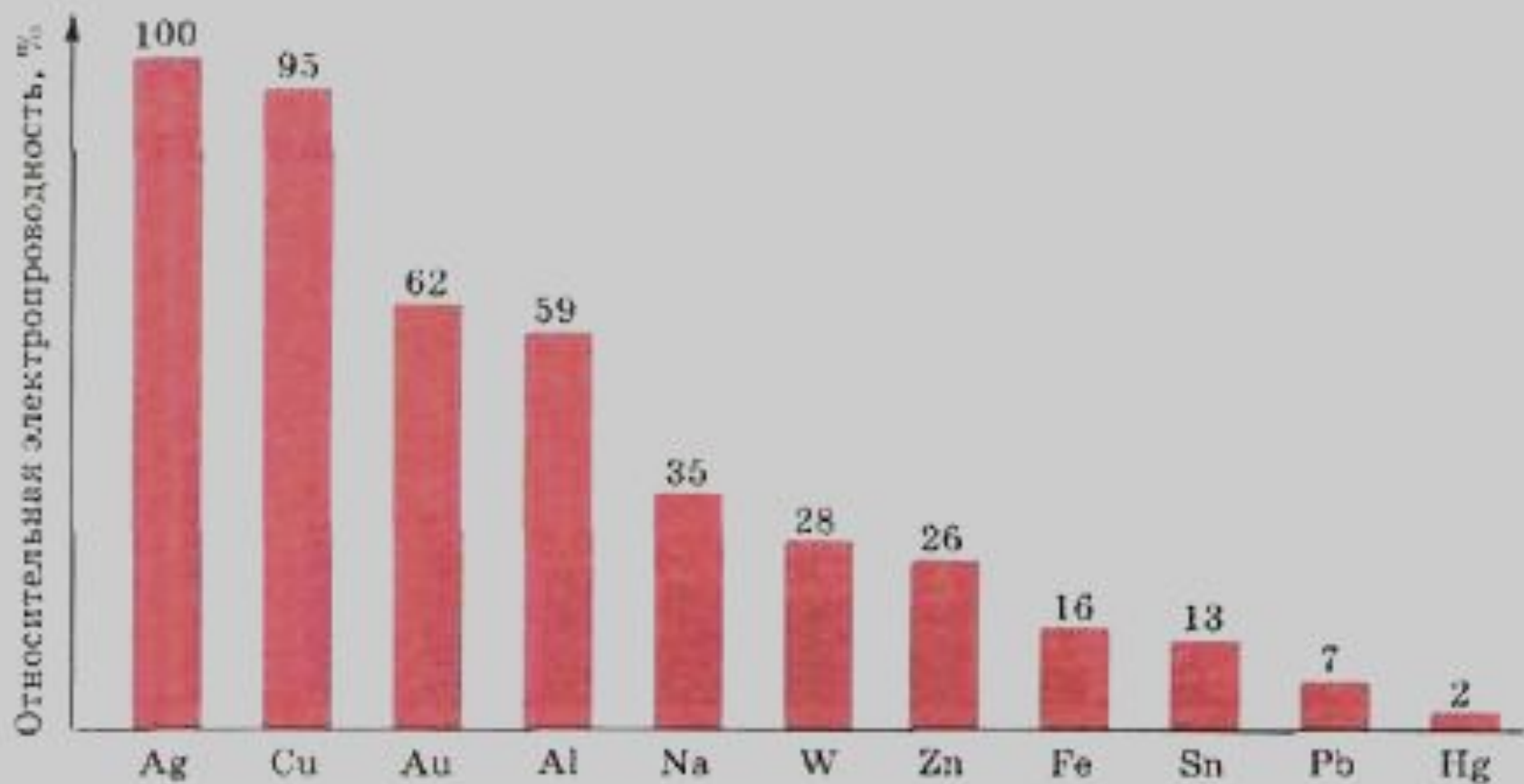
σ – меняется с температурой по закону $\sim T^{-1}$,

согласно с опытом,

классическая теория дает $\sim T^{-1/2}$.

Вклад дают только электроны,
состояния вблизи уровня Ферми.

Электропроводность металлов



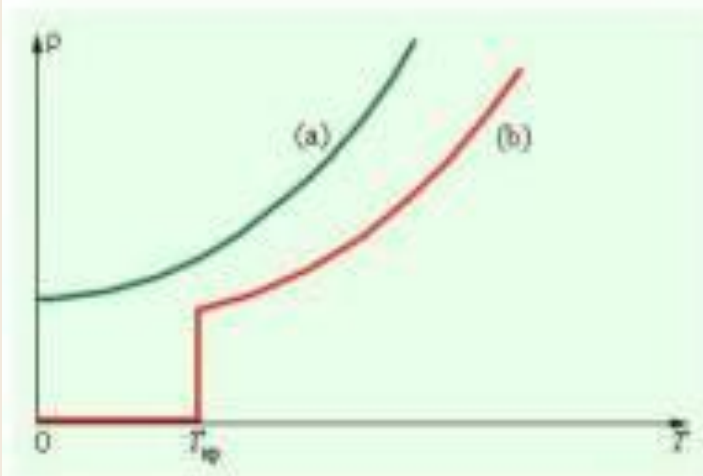
Электропроводность полупроводников

Полупроводники занимают промежуточное положение по электропроводимости, которая растет с повышением температуры.

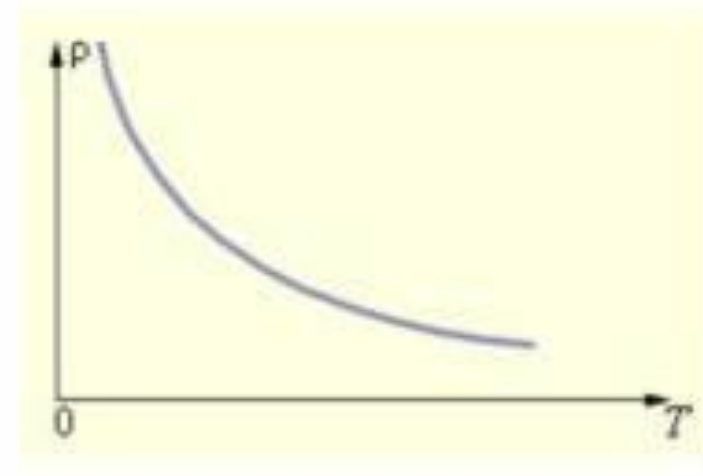
B БОР	C УГЛЕРОД	N АЗОТ	O КИСЛОРОД	F ФТОР	Ne НЕОН
Al АЛЮМИНИЙ	Si КРЕМНИЙ	P ФОСФОР	S СЕРА	Cl ХЛОР	Ar АРГОН
Ga ГАЛЛИЙ	Ge ГЕРМАНИЙ	As МЫШЬЯК	Se СЕЛЕН	Br БРОМ	Kr КРИПТОН
In ИНДИЙ	Sn ОЛОВО	Sb СУРЬМА	Te ТЕЛЛУР	I ИОД	Xe КСЕНОН
Tl ТАЛЛИЙ	Pb СВИНЕЦ	Bi ВИСМУТ	Po ПОЛОНИЙ	At АСТАТ	Rn РАДОН

МЕТАЛЛЫ ПОЛУМЕТАЛЛЫ НЕМЕТАЛЛЫ

Металл

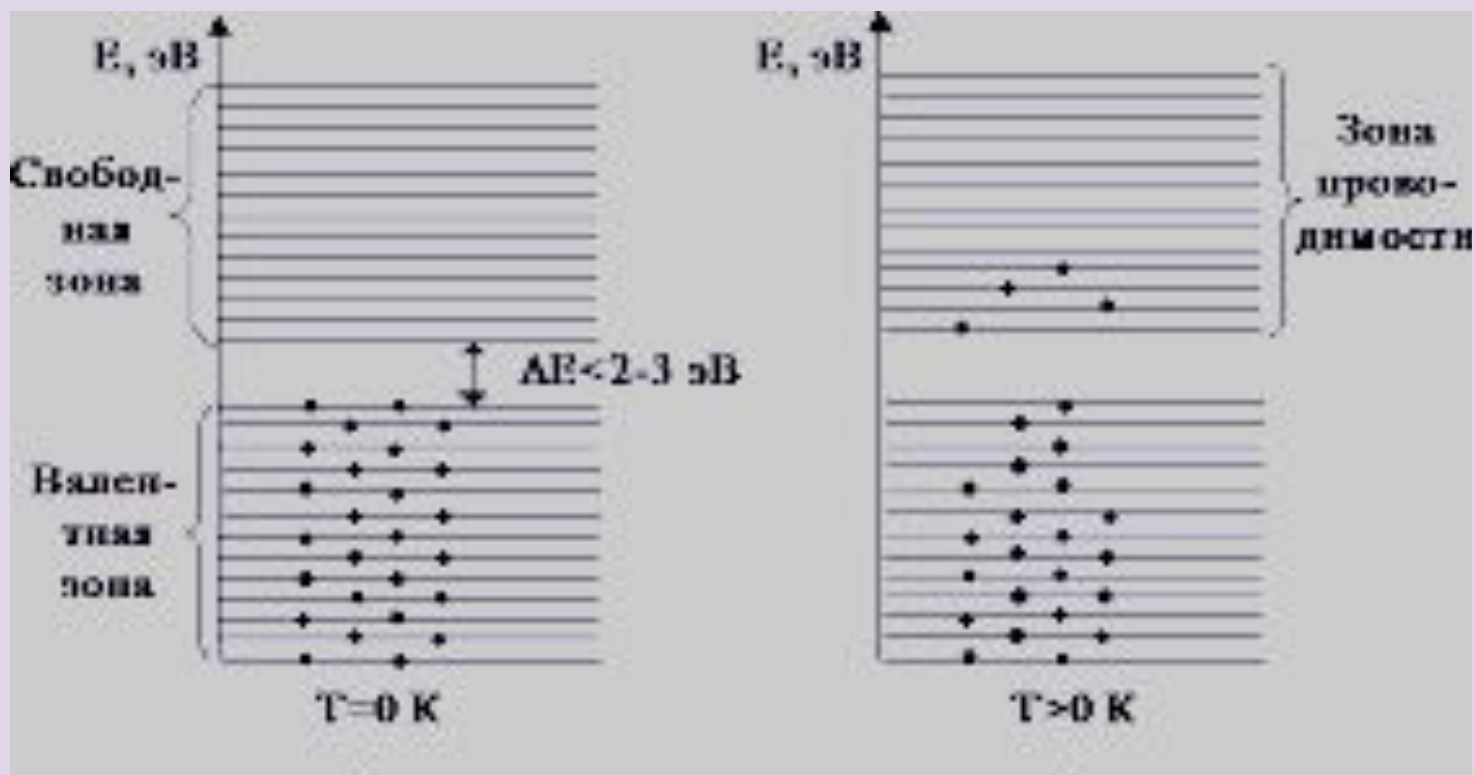


Чистый полупроводник

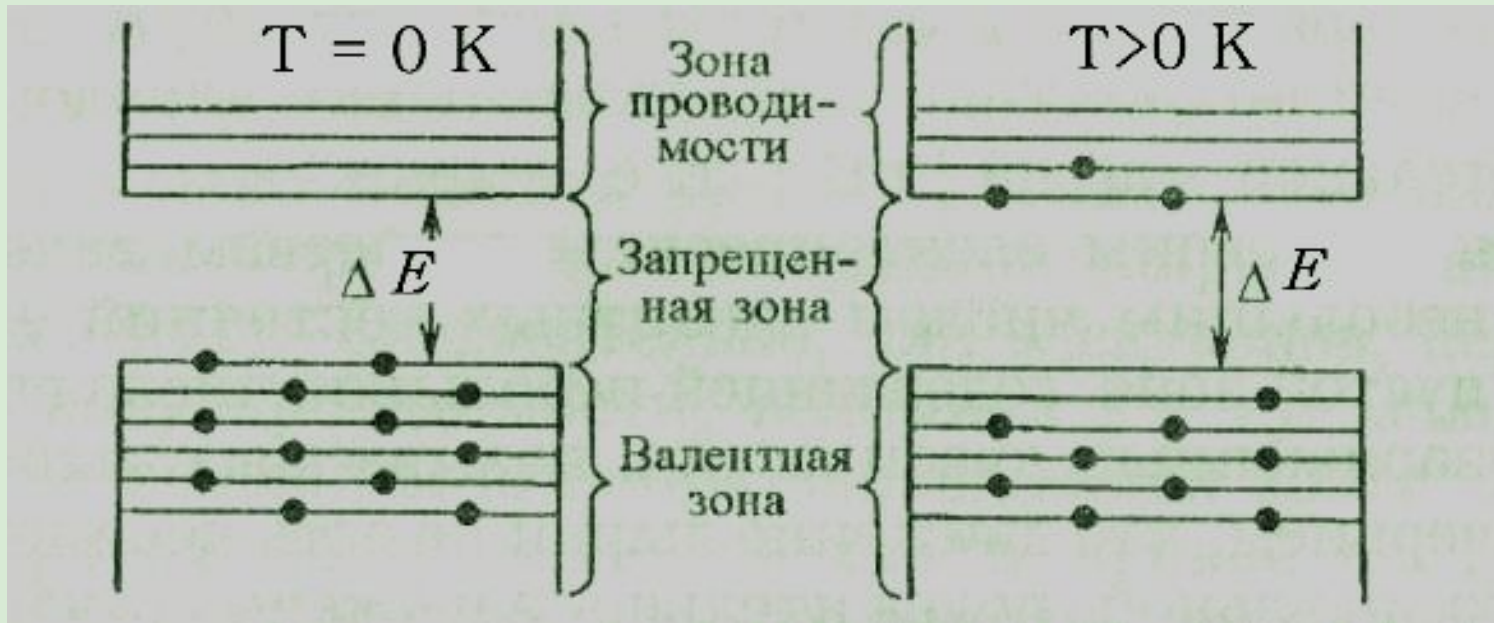


Электропроводность полупроводников

Собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости, а в валентной зоне освобождаются места, которые называются дырками. При абсолютном нуле полупроводники ведут себя как диэлектрики.



Электропроводность полупроводников



При наличии вакантных уровней поведение электронов валентной зоны может быть представлено как движение положительно заряженных квазичастиц – дырок. Т.к. проводимость равна нулю,

$$\Rightarrow V_{др} = \sum V_i / n = 0, \text{ или } \sum V_i + V_k = 0, \Rightarrow \sum V_i = -V_k \Rightarrow$$

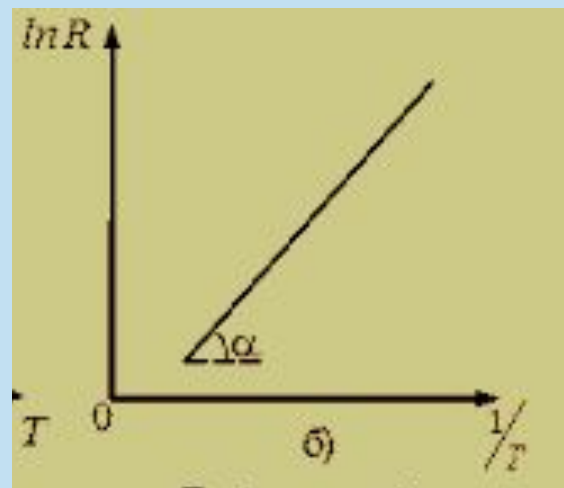
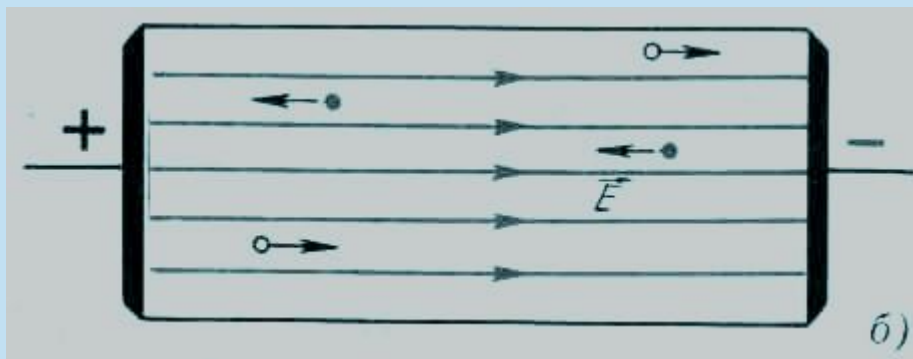
Электропроводность полупроводников

Если отсутствует k -й электрон, то все остальные электроны создают ток

$$(-\bar{e}_k)(-V_k) = \bar{e}_k V_k,$$

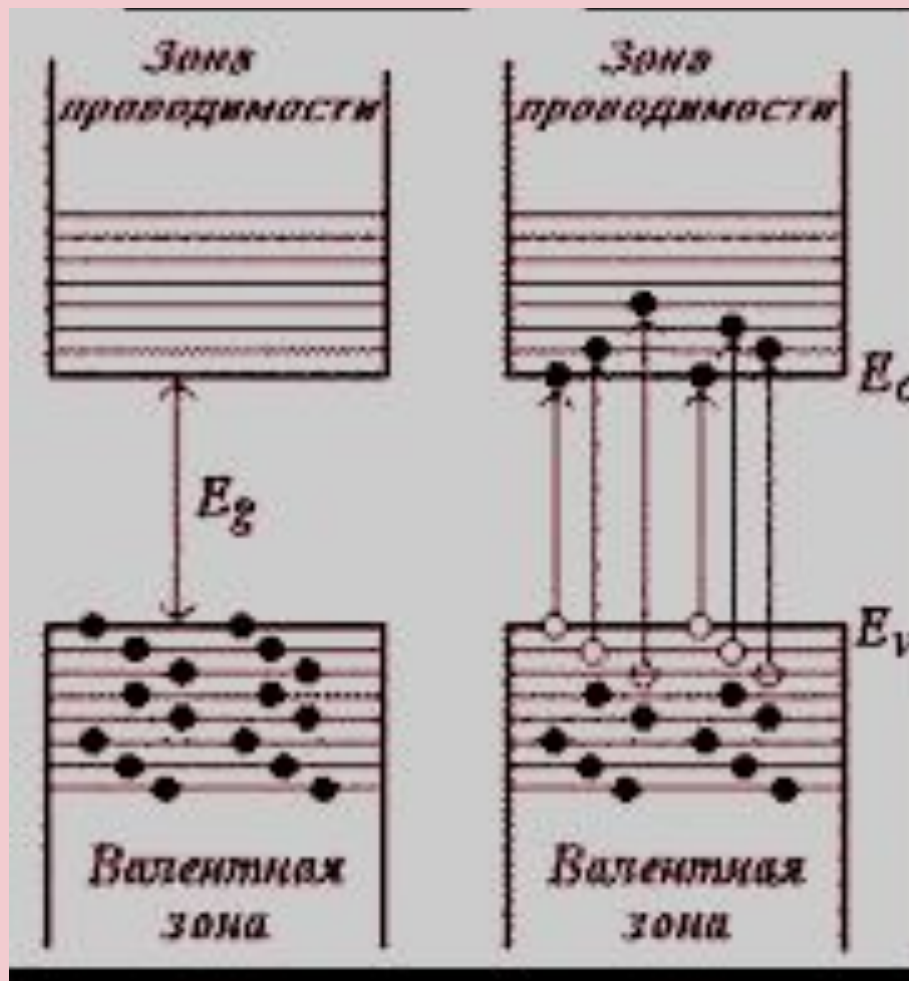
- эквивалентный току, который создавала бы частица с зарядом $+\bar{e}$ и имеющая скорость отсутствующего электрона, т.е. дырка.

⇒ по своим электрическим свойствам валентная зона с небольшим числом вакантных состояний эквивалентна пустой зоне, содержащей небольшое число положительно заряженных квазичастиц, называемых дырками.



Электропроводность полупроводников

При этом движение дырки не является перемещением реальной положительно заряженной частицы, а отображает характер движения всей многоэлектронной системы в полупроводнике.



Электропроводность полупроводников

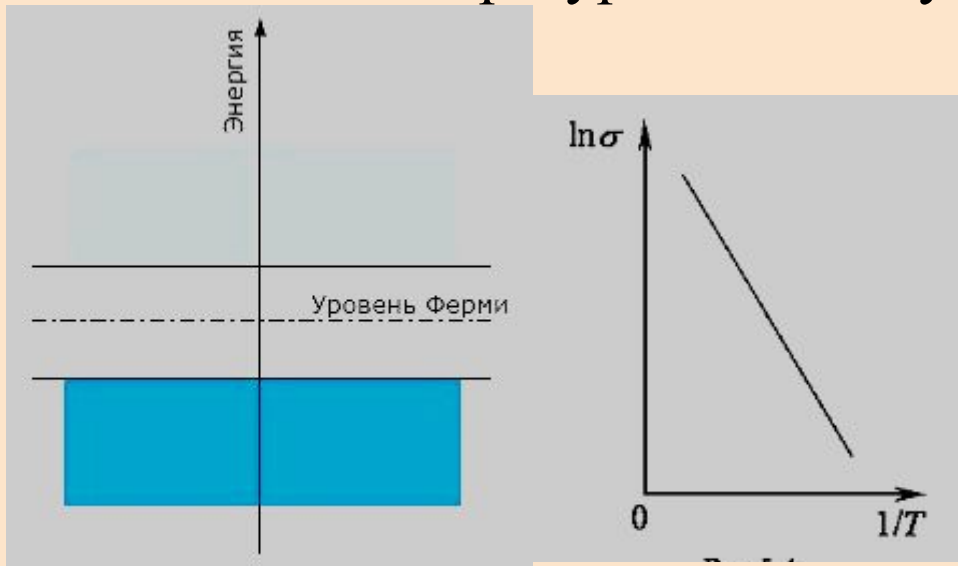
У собственных полупроводников уровень Ферми лежит в середине запрещенной зоны.

(с незначительным отклонением $\sim T$). \Rightarrow

$\varepsilon - \varepsilon_F$ для перешедших электронов $\sim \Delta\varepsilon/2 \Rightarrow$

вероятность ее заполнения $f(\varepsilon) \sim \exp(\Delta\varepsilon/2kT) \Rightarrow$

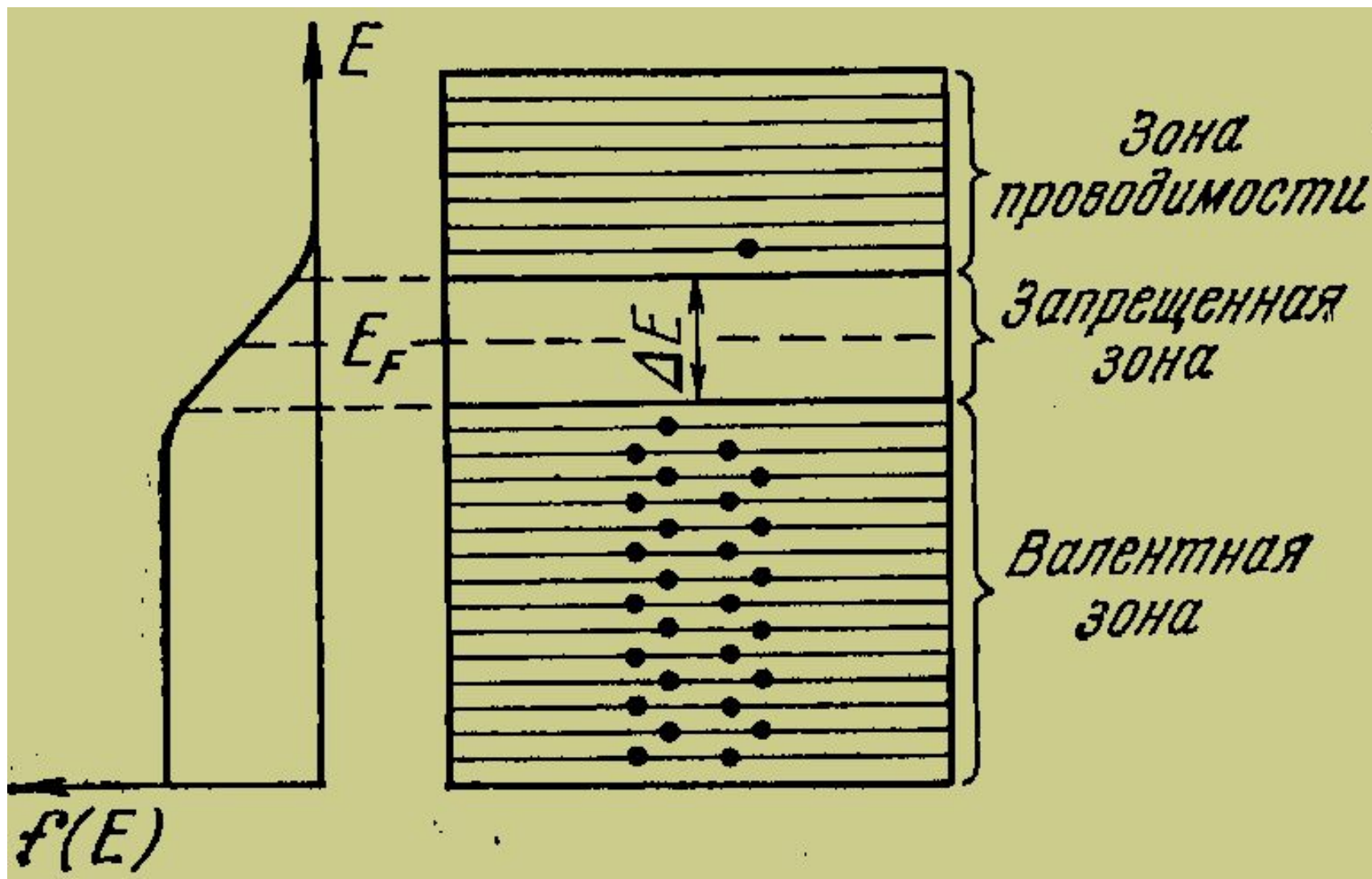
электропроводность собственных полупроводников растет с повышением температуры по закону:



$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{2kT}\right)$$

$$\sigma_0 = \text{const}$$

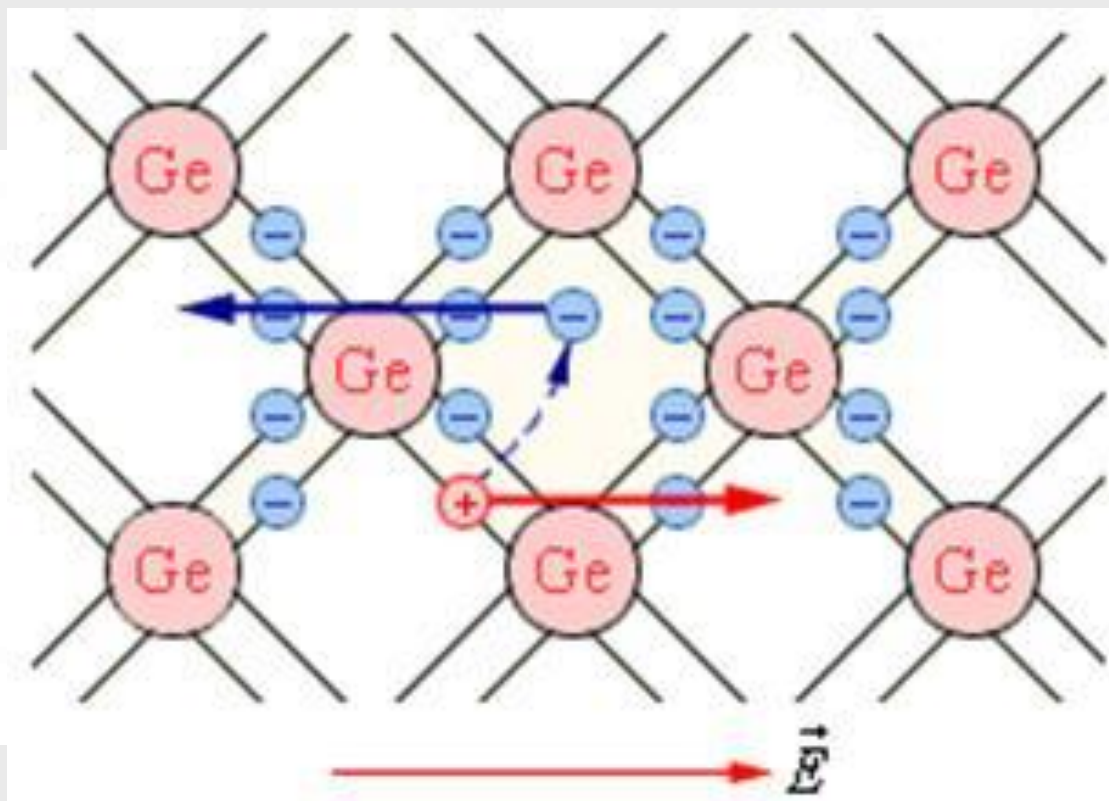
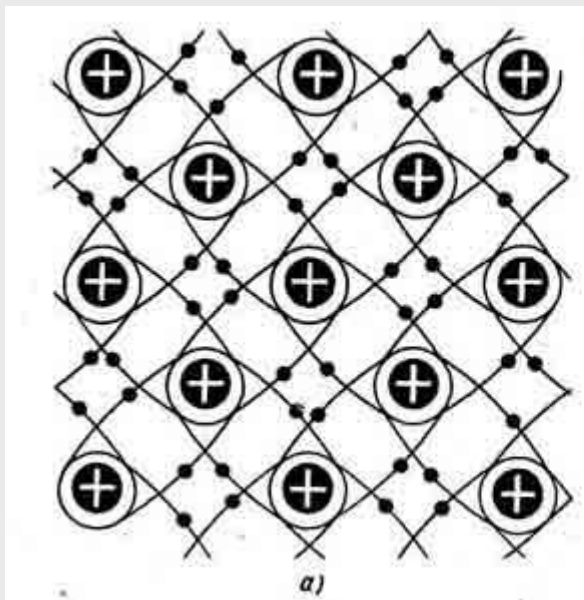
Электропроводность полупроводников



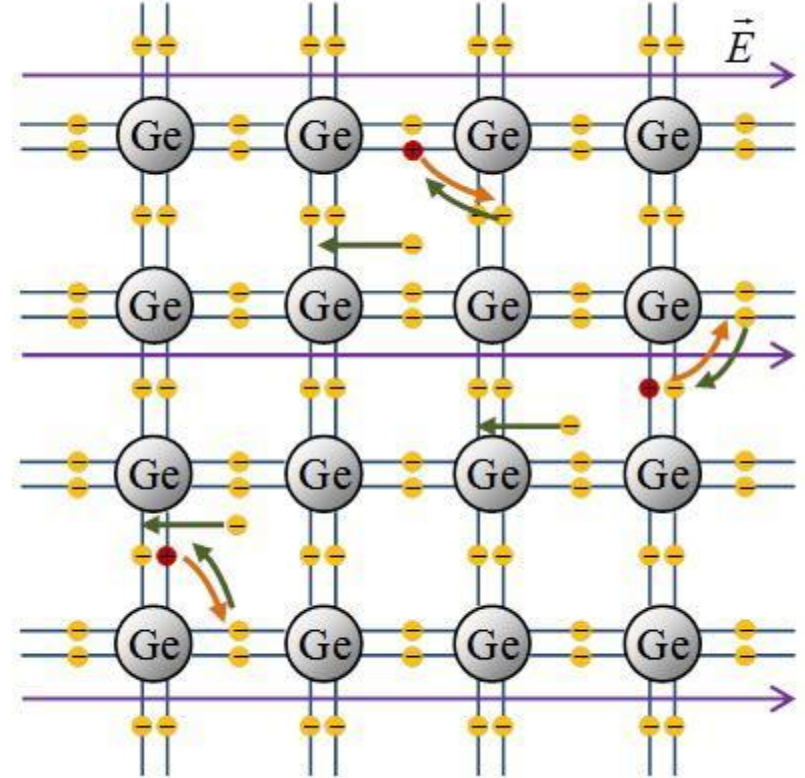
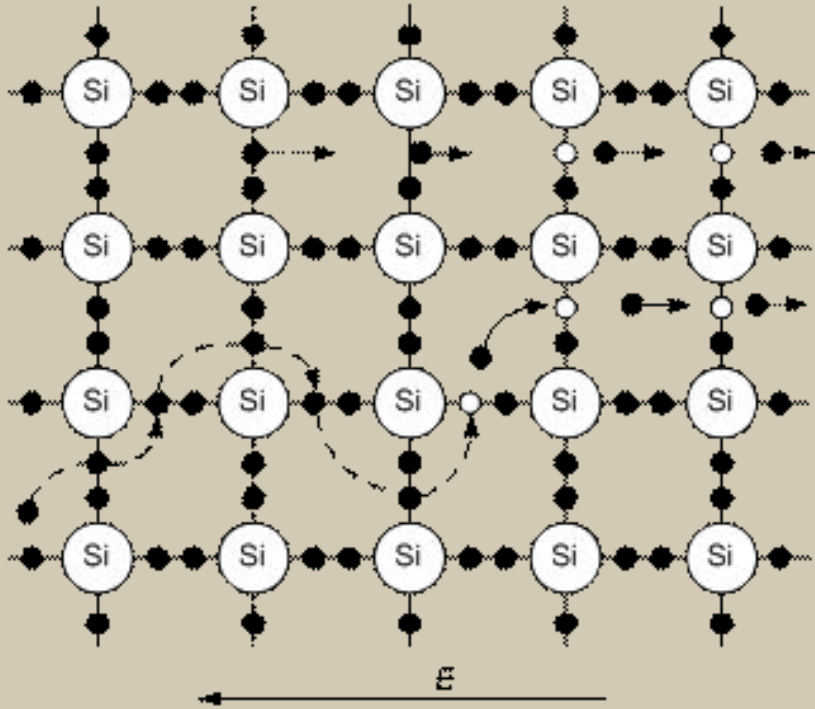
Электропроводность полупроводников

Типичные полупроводники: кремний, германий, (четвертая группа, структура алмаза, четыре ковалентные связи).

Тепловое движение \Rightarrow образование свободных электронов и дырок.

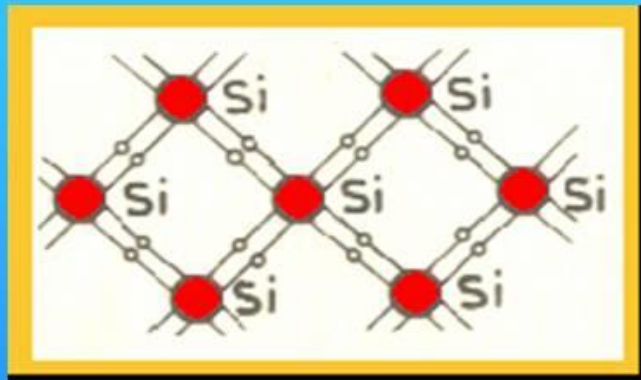


Электропроводность полупроводников

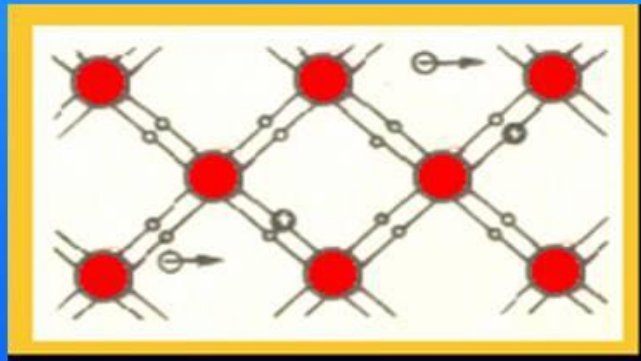


Собственная проводимость

Si



- Электронная проводимость – электроны (n – типа)



- Дырочная – вакантное место электрона – дырка (p – типа)

Электропроводность полупроводников

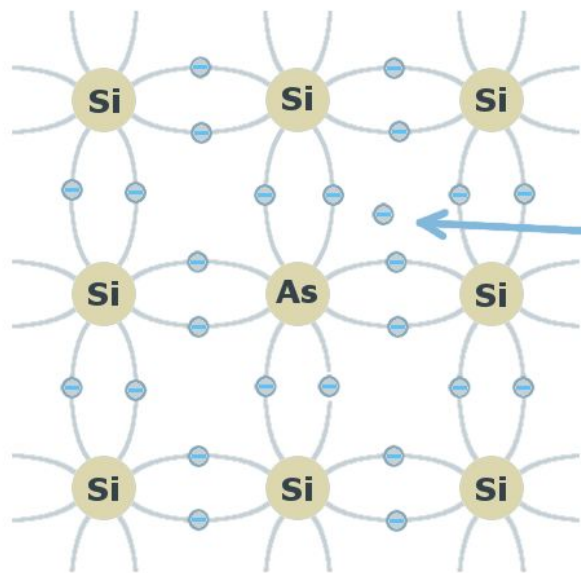
При встрече электрона и дырки они рекомбинируют \Rightarrow выделение энергии, электрон и дырка исчезают (переход электрона из зоны проводимости в валентную зону). Каждой температуре соответствует своя равновесная концентрация носителей т.к. рождение пары более вероятно при более высокой температуре, а вероятность рекомбинации пропорциональна их количеству.



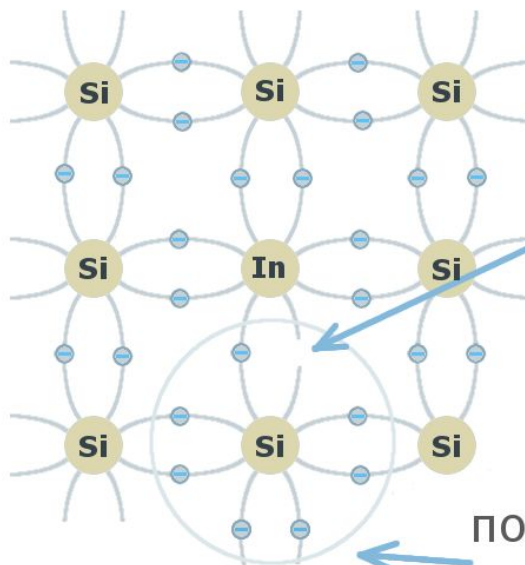
Электропроводность полупроводников

Примесная проводимость возникает, если некоторые атомы в кристалле заменить на атомы примеси, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов (**Sb** или **In** в решетке **Ge**). В первом случае возникает избыток электронов \Rightarrow ***n*** – проводимость (донорная примесь), во втором образуются дырки, ***p*** – проводимость (акцепторная примесь)



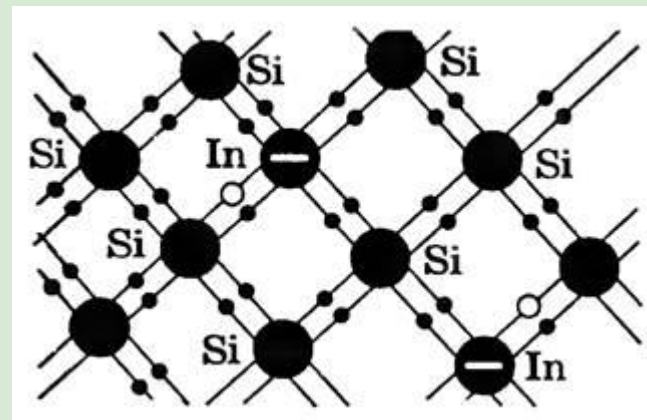
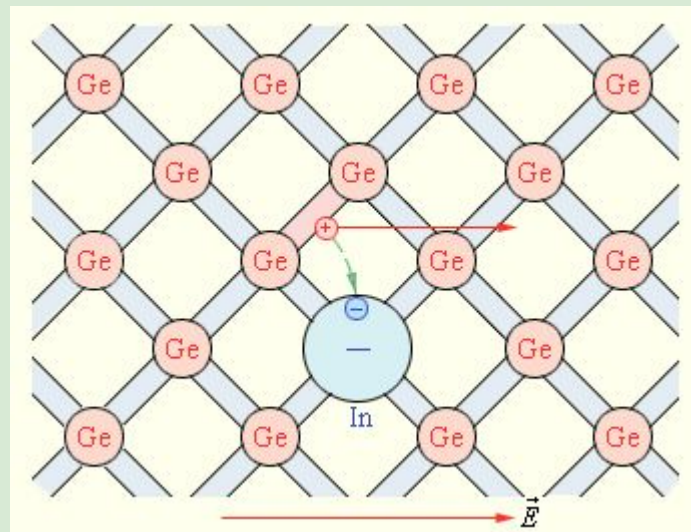


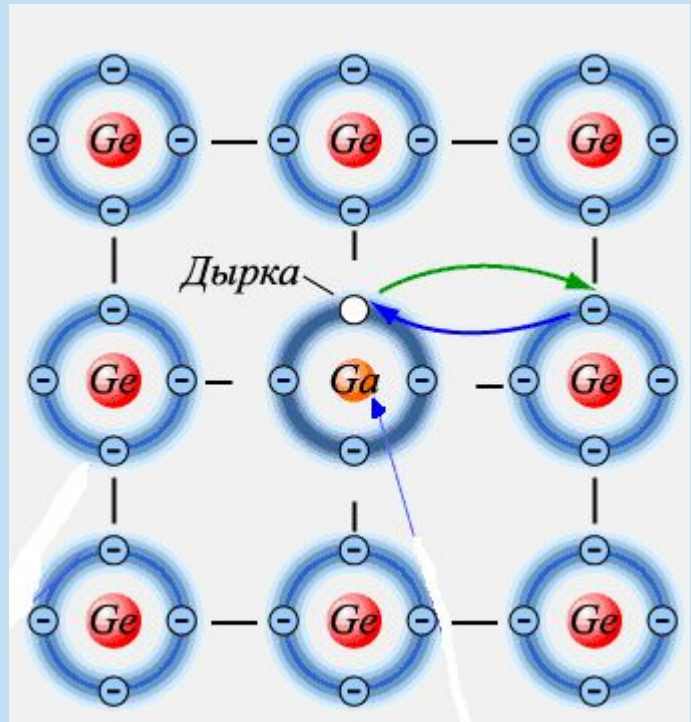
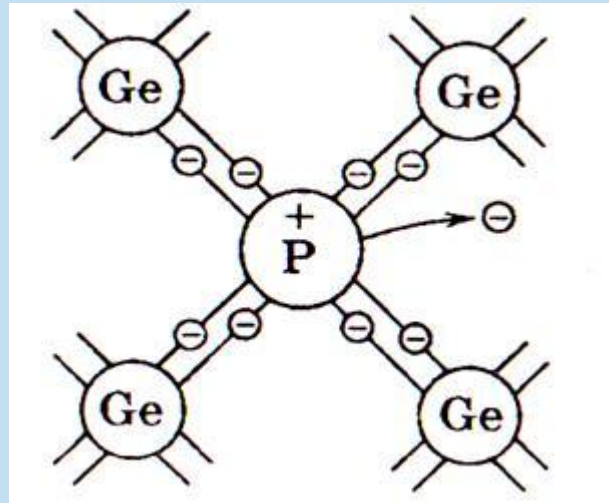
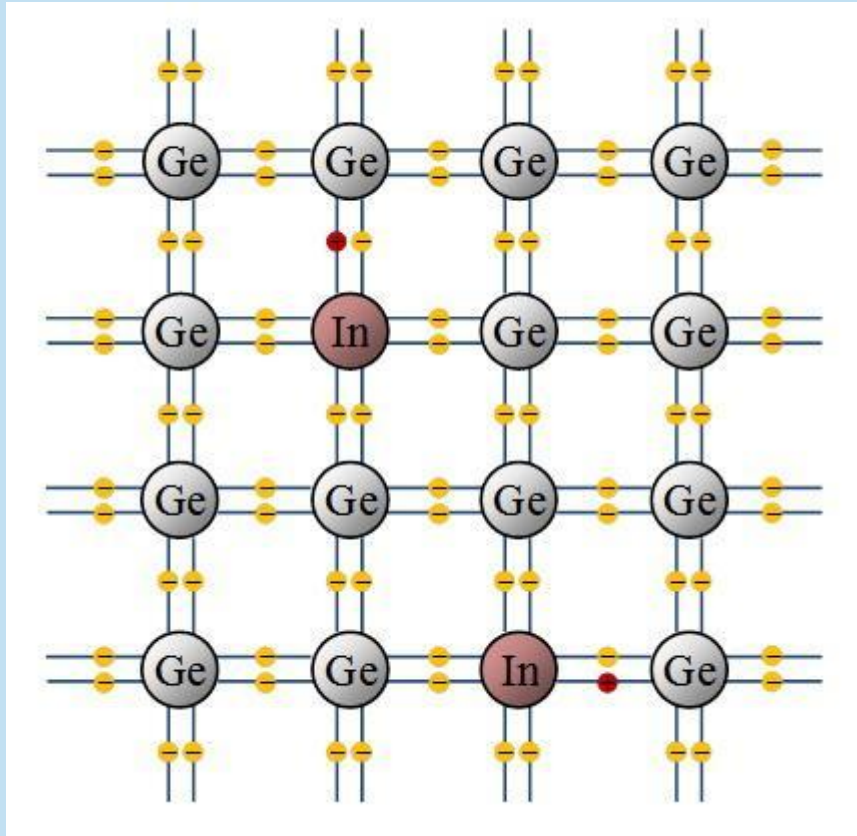
слабо
связанный
электрон



дырка

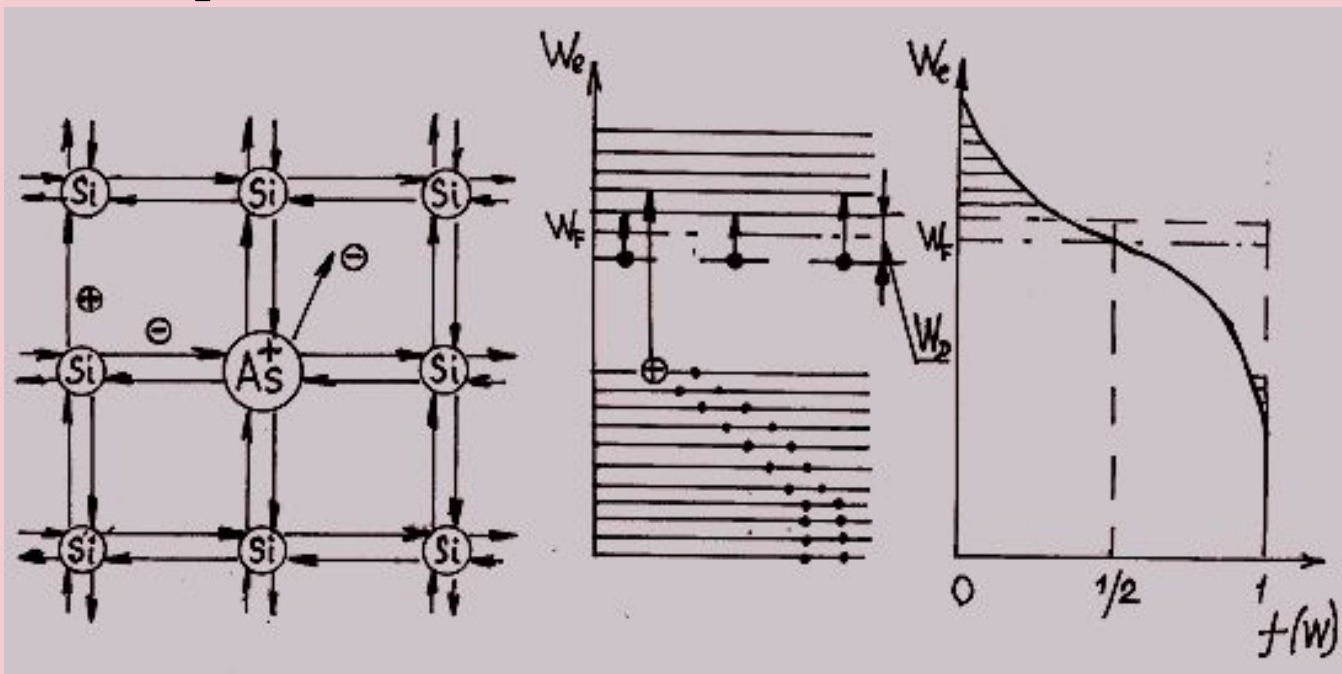
положительный
ион





Электропроводность полупроводников

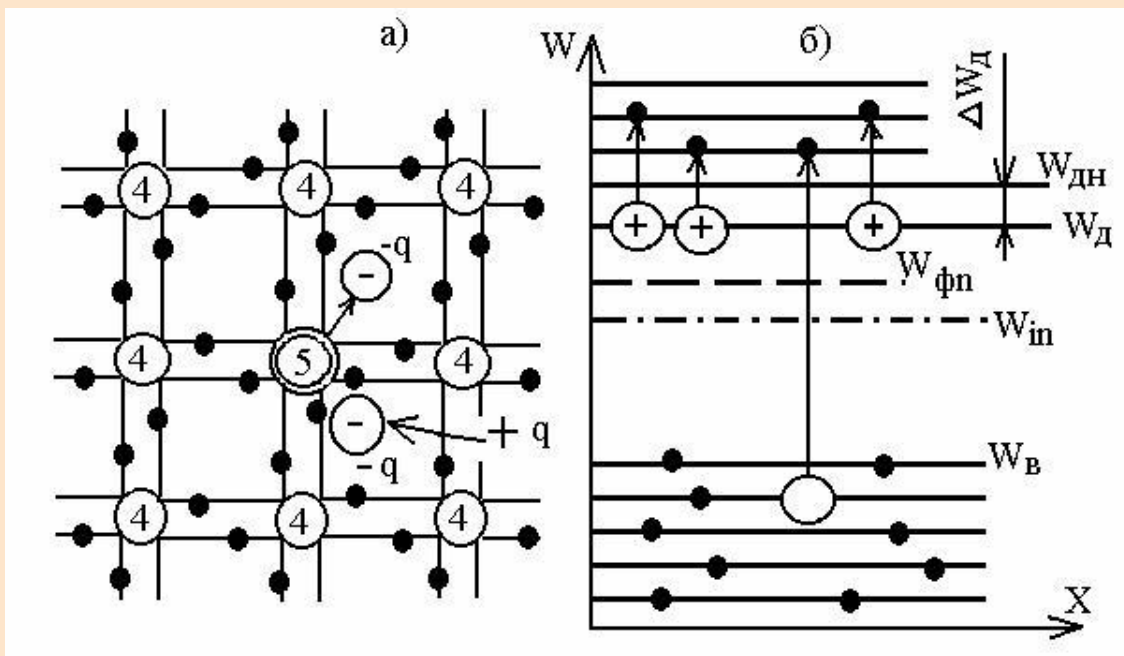
Примеси искажают поле решетки \Rightarrow возникновение примесных уровней, расположенных в запрещенной зоне. Уровень Ферми в полупроводниках n – типа располагается в верхней части запрещенной зоны, а в полупроводниках p – типа в нижней части. При повышении температуры уровень Ферми смещается к середине запрещенной зоны.



Электропроводность полупроводников

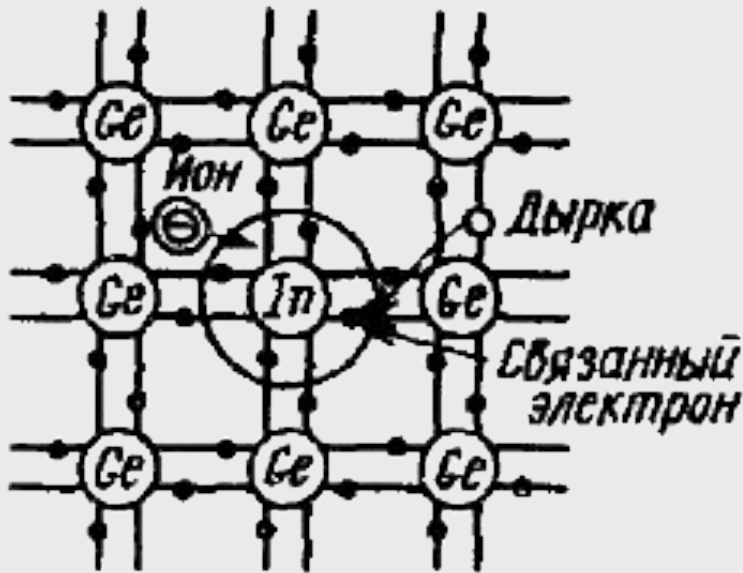
Если пятый валентный электрон прочно связан атомом, то донорные уровни расположены недалеко от потолка валентной зоны, не оказывая заметного влияния на электрические свойства кристалла. Если связь электрона с атомом слабая, то донорные уровни расположены недалеко от дна зоны проводимости (расстояние существенно меньше ширины запрещенной зоны).

⇒ легкий переход в зону проводимости при обычных температурах

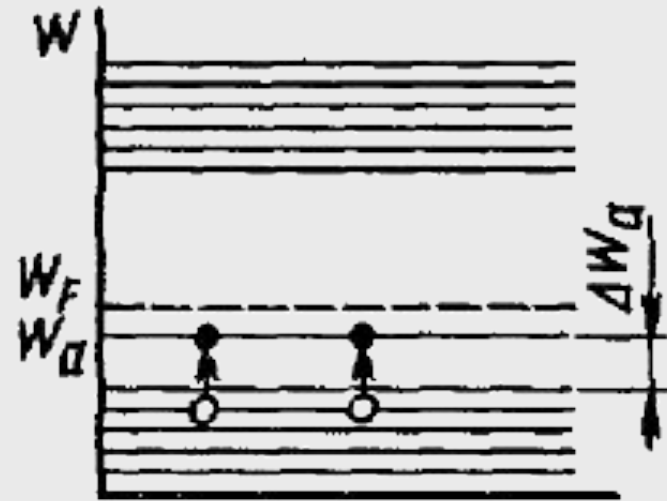


Электропроводность полупроводников

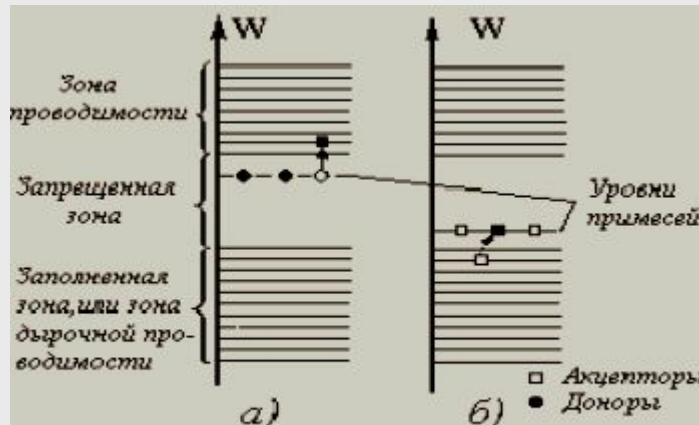
Аналогично с акцепторными уровнями.



a)

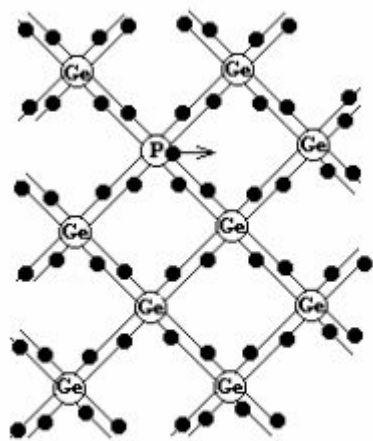


б)

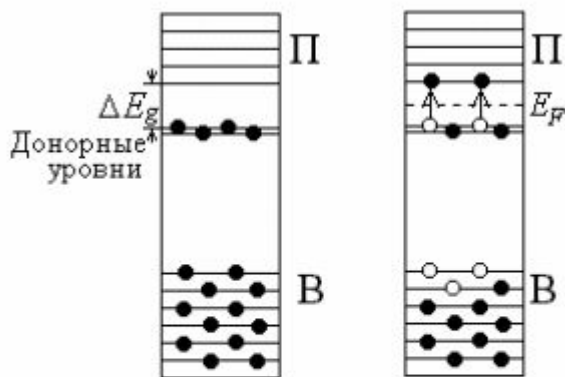


a)

б)



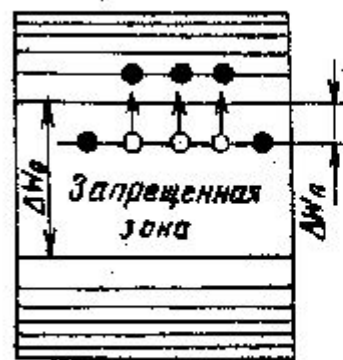
а



б

в

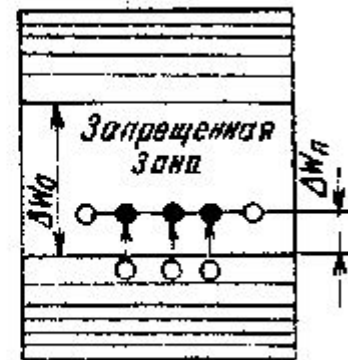
Зона проводимости



Валентная зона

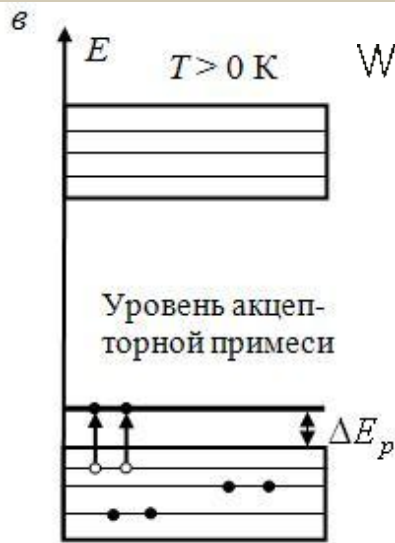
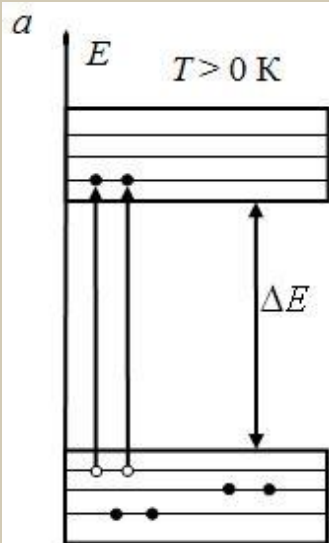
а)

Зона проводимости



Валентная зона

б)



W



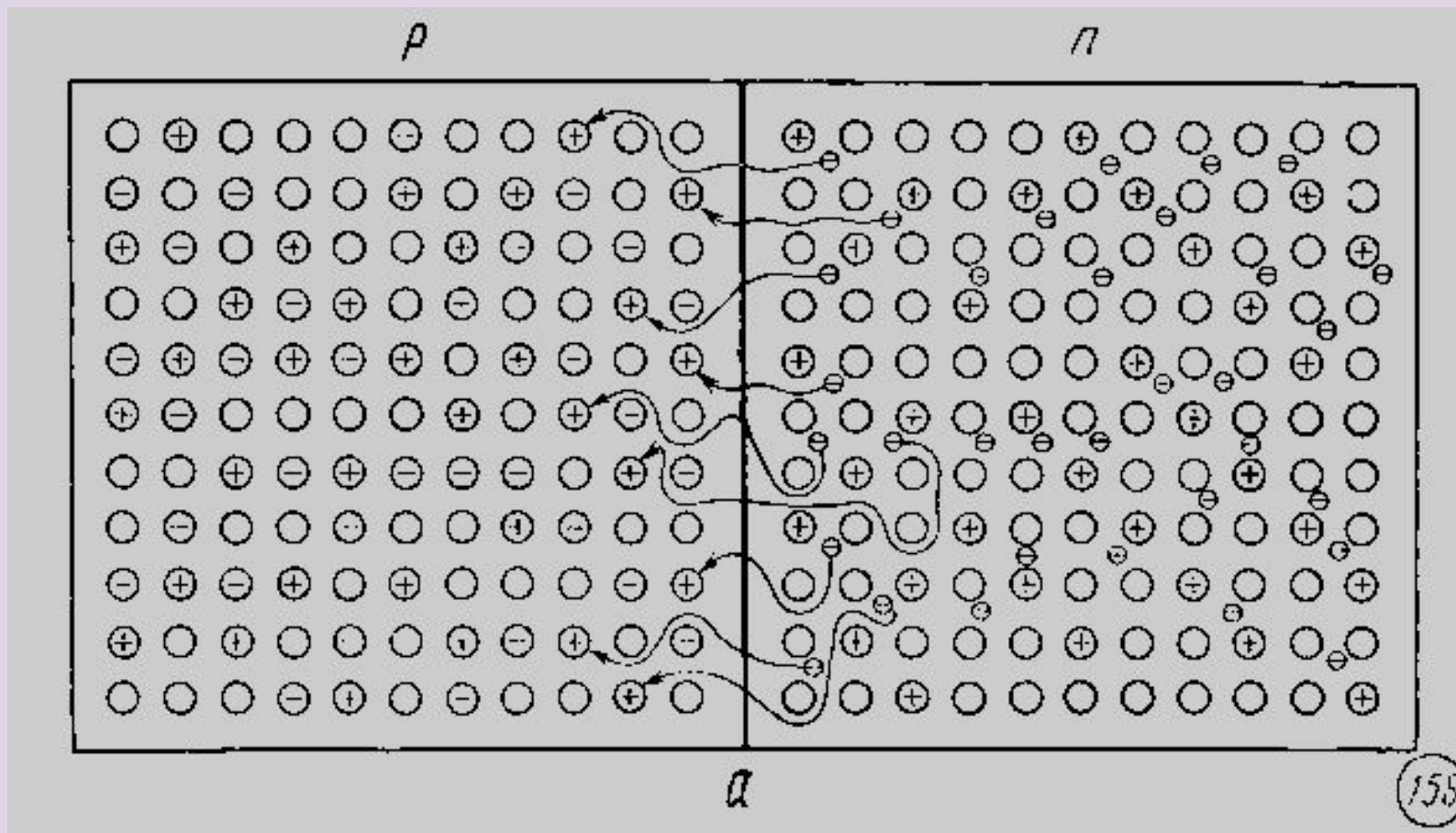
Электропроводность полупроводников

При повышении температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения, т.е. освобождаются все донорные или акцепторные уровни. В то же время все большую роль начинает играть собственная проводимость.

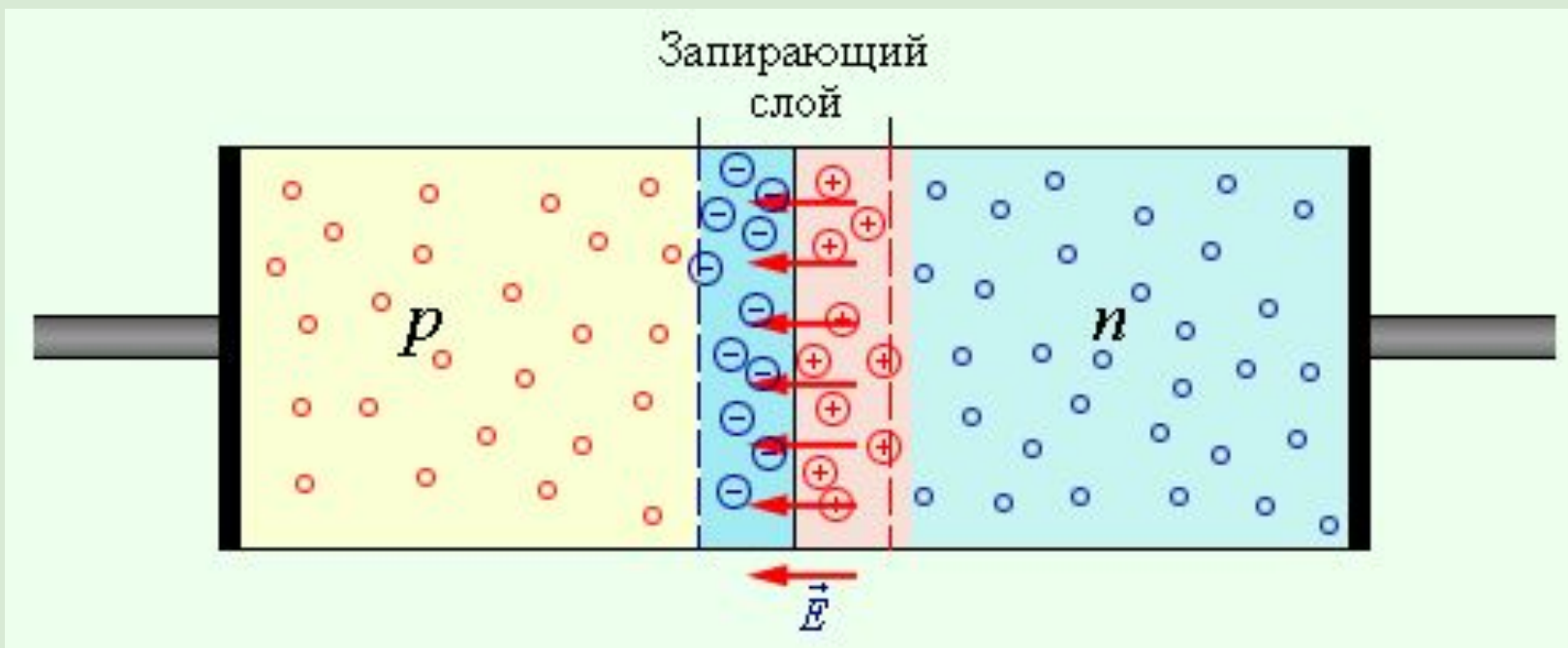
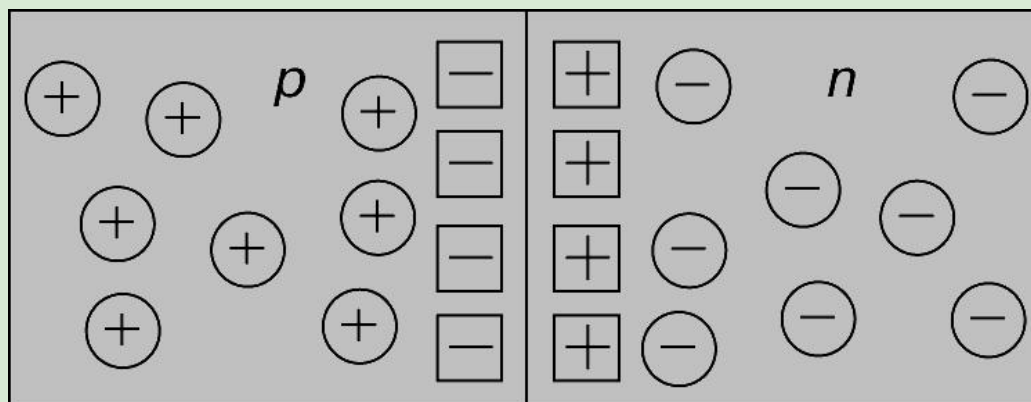


Электропроводность полупроводников

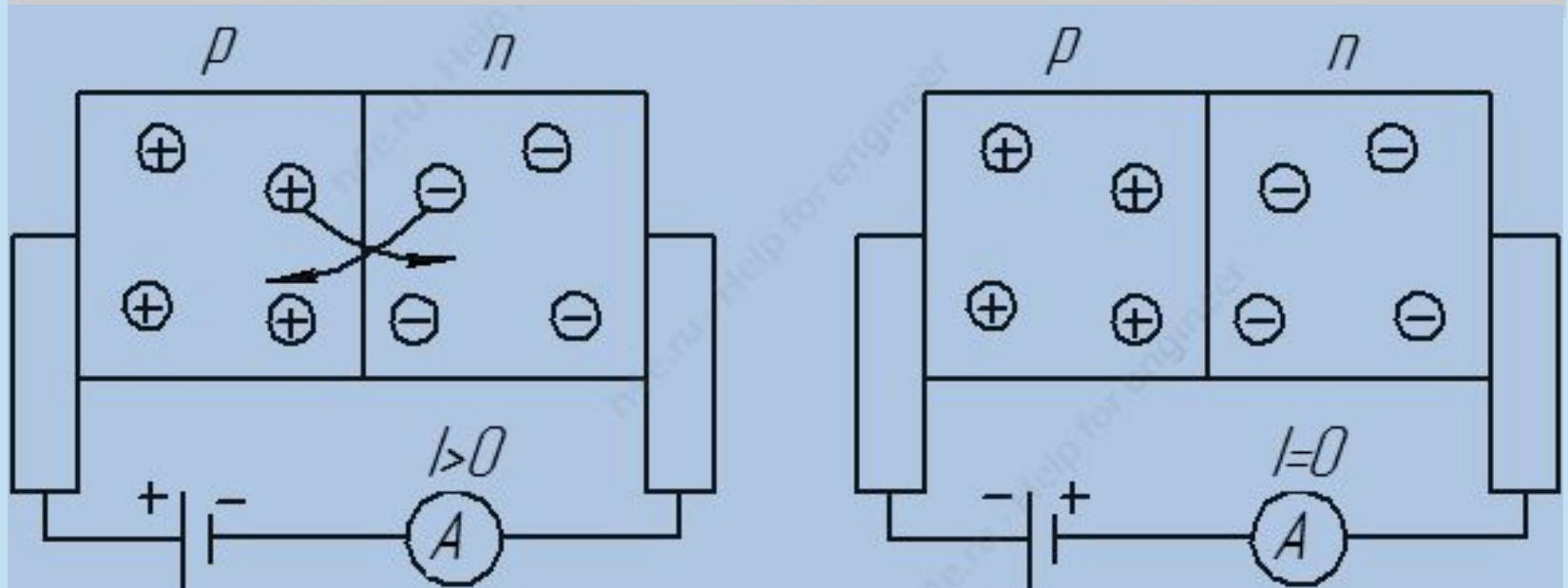
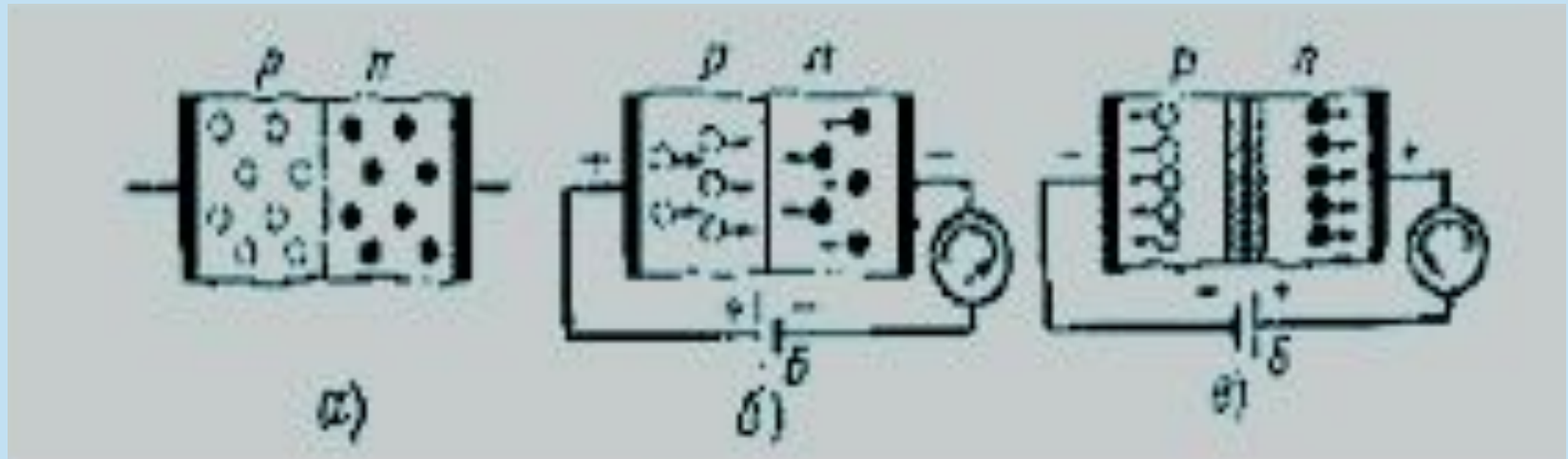
Применение: $n - p$ переход, диоды, триоды.



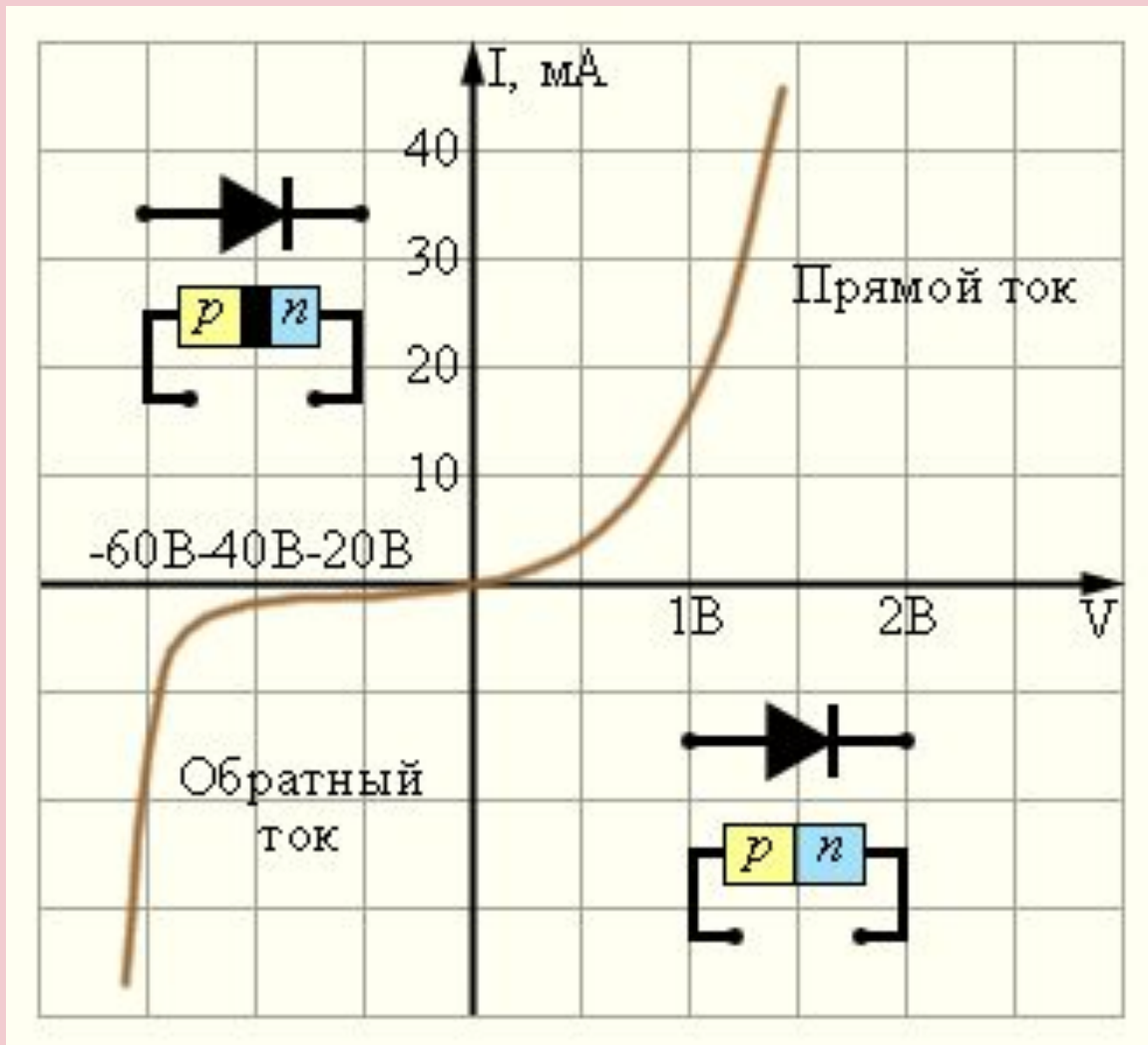
Электропроводность полупроводников



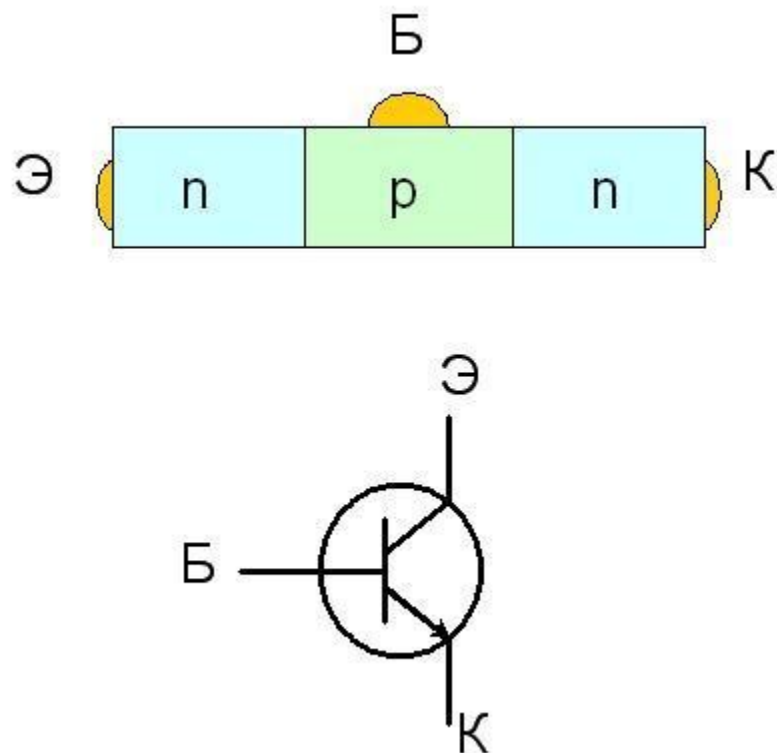
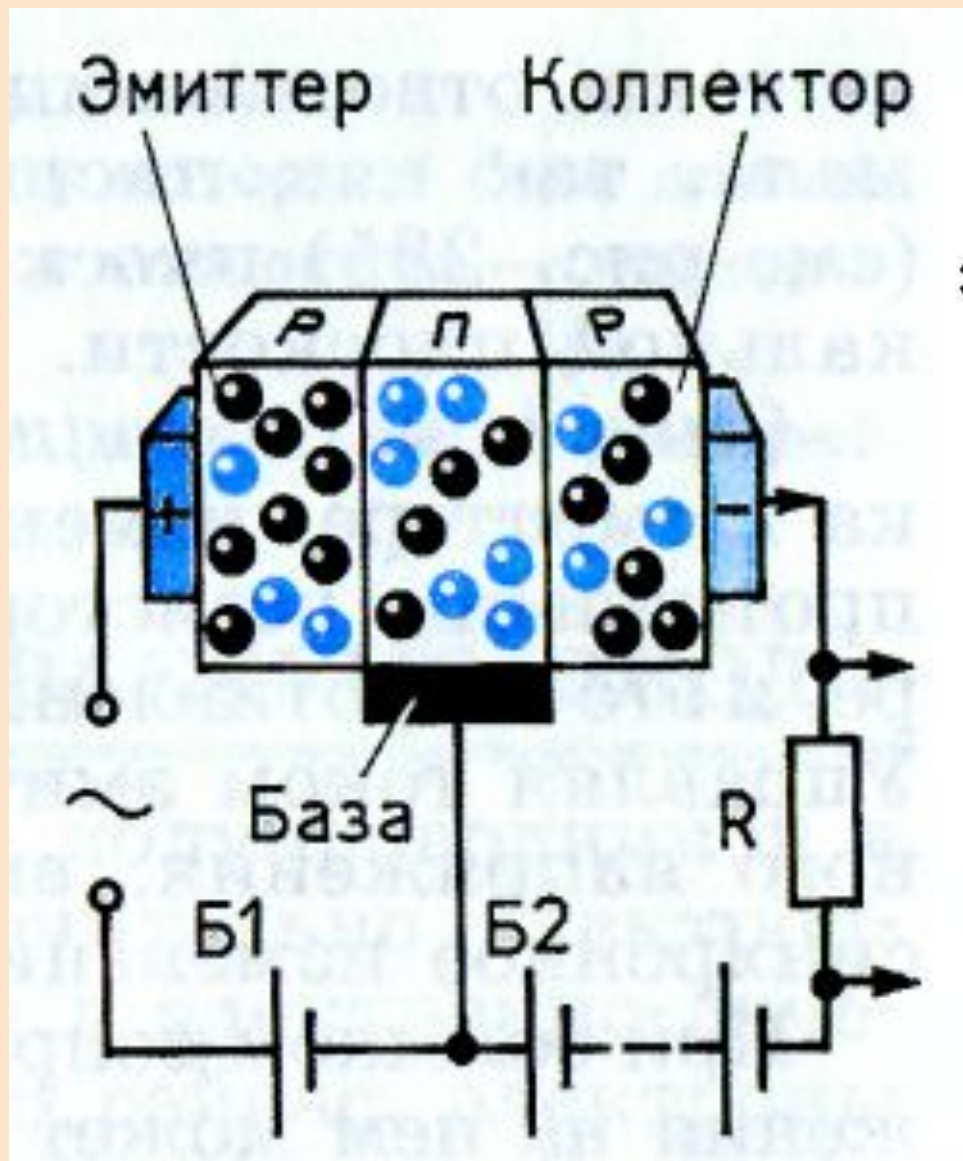
Электропроводность полупроводников



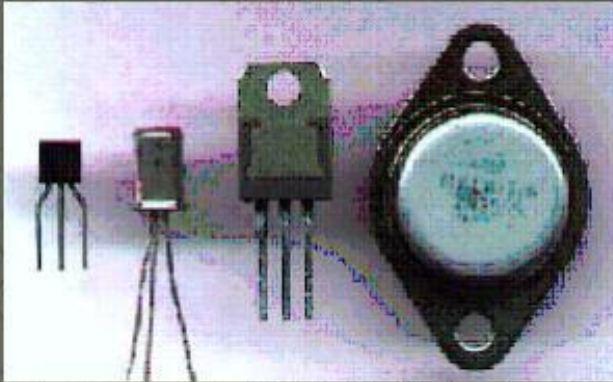
Электропроводность полупроводников



Электропроводность полупроводников



Транзистор



Транзистор — трёхполюсный полупроводниковый электронный прибор, изменяющий своё сопротивление при приложении напряжения на управляющий электрод, что позволяет управлять мощной цепью слабым сигналом. Благодаря этому свойству, транзистор применяется для усиления, коммутации и преобразования электрических сигналов.

Транзисторы — основа всех современных электронных устройств, они применяются практически во всех современных бытовых приборах. Сейчас большая часть транзисторов используется в составе интегральных микросхем. Интегральная микросхема может содержать миллионы транзисторов на одном кристалле полупроводника (в основном кремния).

Электрический ток в полупроводниках

