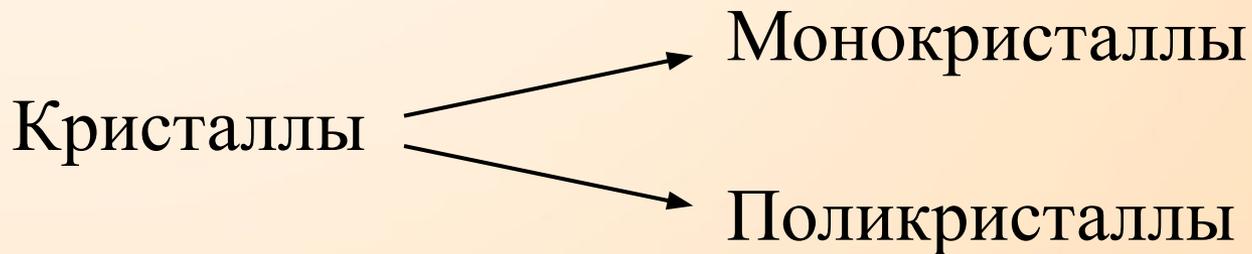


5. Элементы физики твердого тела.

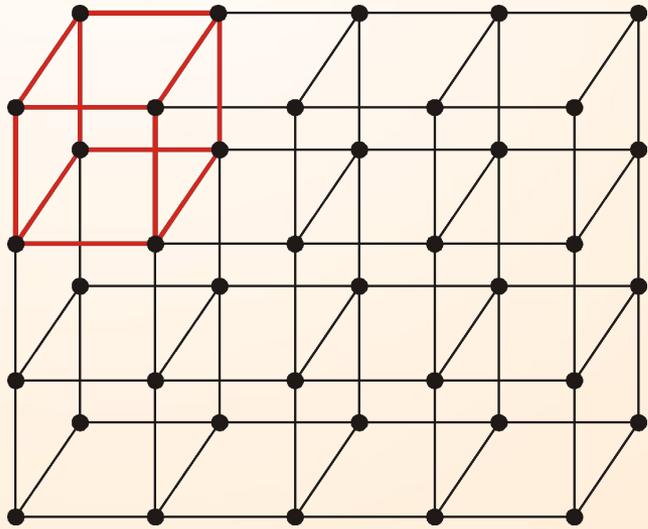
5.1. Периодическое строение кристаллов.

Характерная черта кристаллического состояния – *анизотропия* свойств, т.е. зависимость ряда физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления в кристалле.



В поликристаллах анизотропия наблюдается только в пределах отдельного кристаллика.

Атомы совершают тепловые колебания относительно положений равновесия (*узлов*), которые образуют *кристаллическую решетку*.



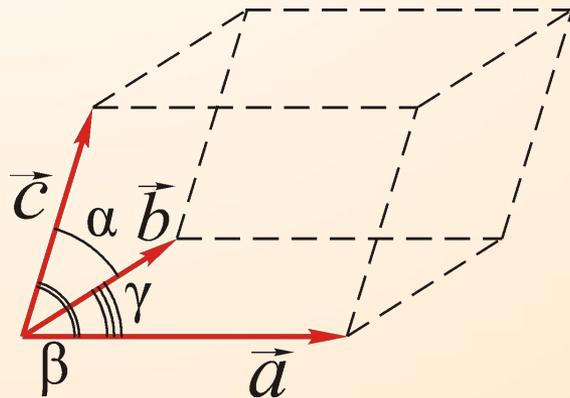
- Плоскости, содержащие узлы кристаллической решетки, называются *атомными плоскостями*.

- *Элементарная ячейка* – это наименьший параллелепипед, построенный в кристалле таким образом, что его вершинами являются узлы кристаллической решетки.

Положение любого узла определяется вектором:

$$\vec{r} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \quad (5.1)$$

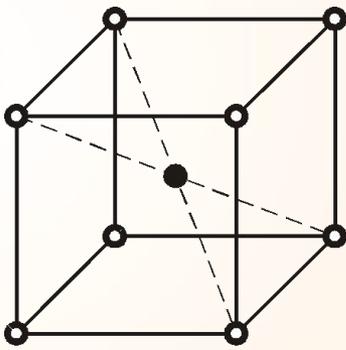
- $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ называются наименьшими **векторами трансляции**.



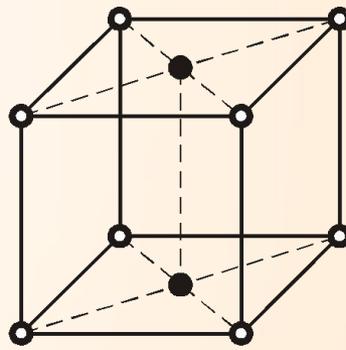
По степени симметрии все элементарные ячейки делятся на группы (**сингонии**).

$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ – кубическая сингония

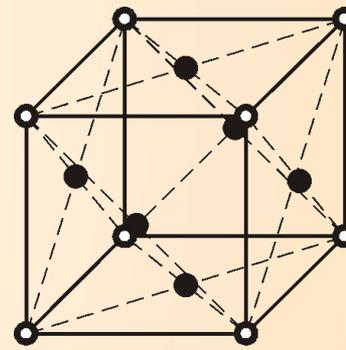
$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ – триклинная сингония



а)

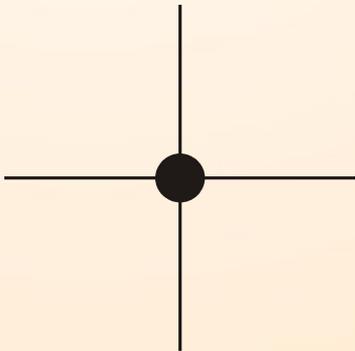


б)



в)

Число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку.



Простая кубическая ячейка

$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} = 1$$

Объемно-центрированная ячейка

$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot 1 = 2$$

Базоцентрированная ячейка

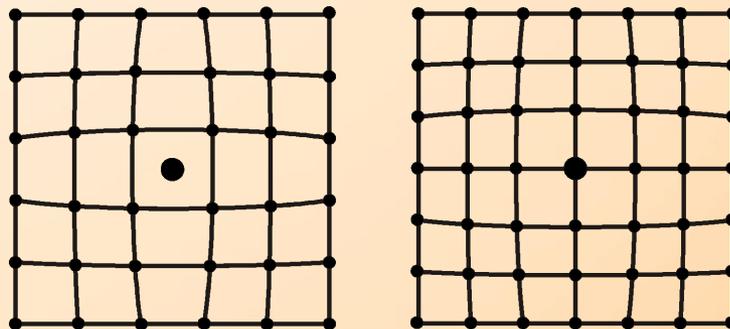
$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 2 \cdot \frac{1}{2} = 2$$

Гранецентрированная ячейка

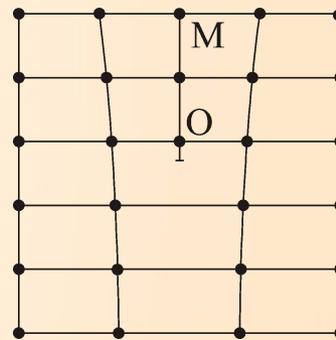
$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$$

Дефекты:

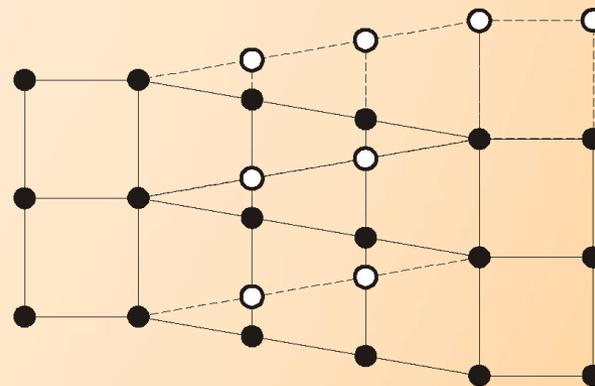
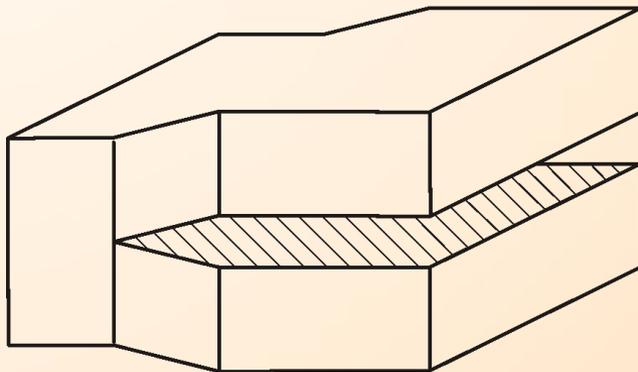
1. Точечные: примеси в узлах и междуузлиях, пустые узлы и т.п.



2. Линейные: дислокации.



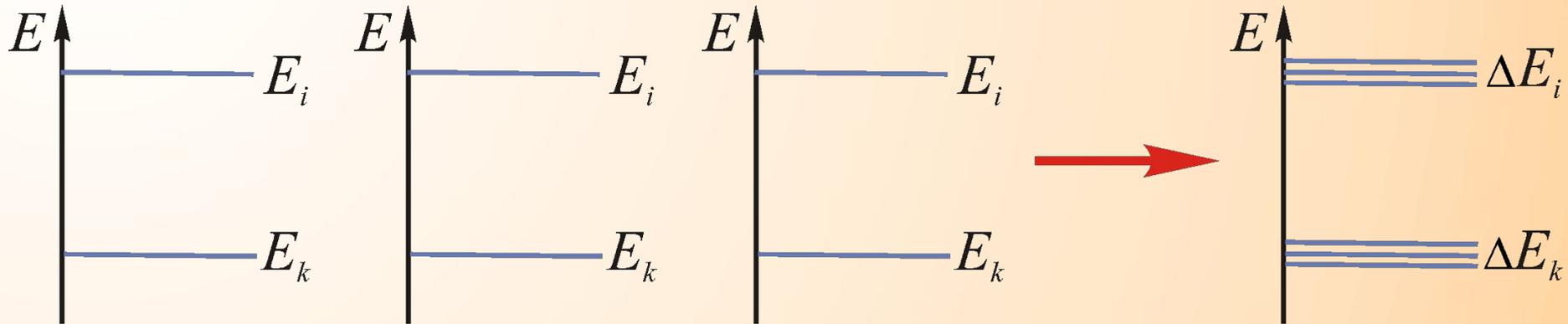
3. Плоские: винтовые дислокации, границы монокристалла, зерен.



4. Объемные: трещины полости.

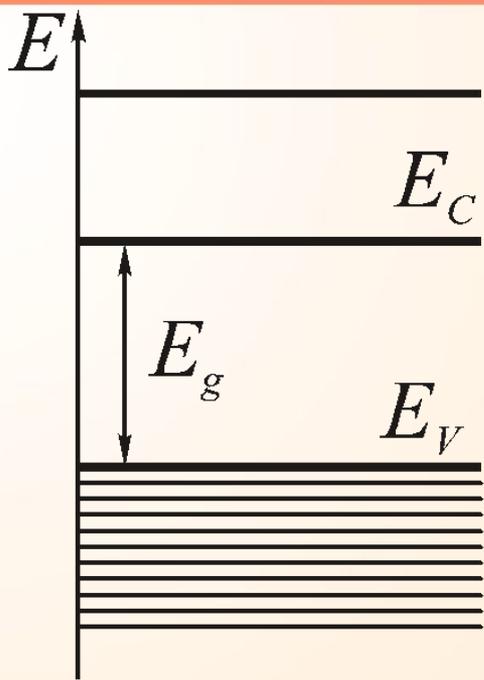
Структура кристаллической решетки определяет потенциальную энергию электронов в кристалле.

5.2. Понятие об энергетических зонах.

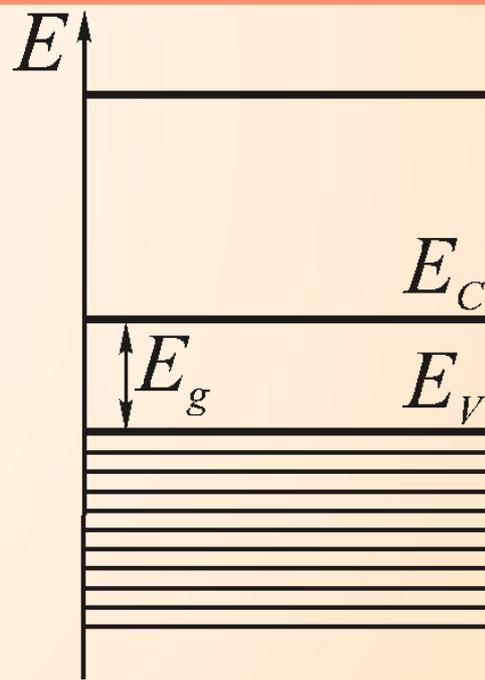


В зоне расстояние по энергии между уровнями порядка $1 \text{ эВ}/N$ ($N \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$), т.е. в пределах зоны энергия меняется *квазинепрерывно*.

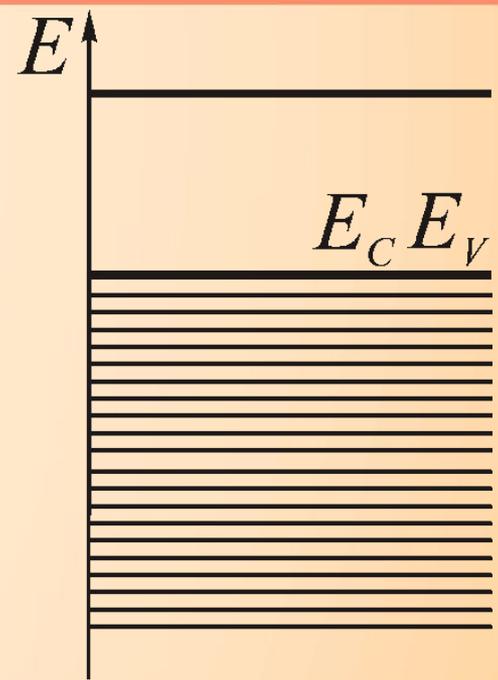
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U \psi = E \psi \quad (5.1)$$



диэлектрик



полупроводник

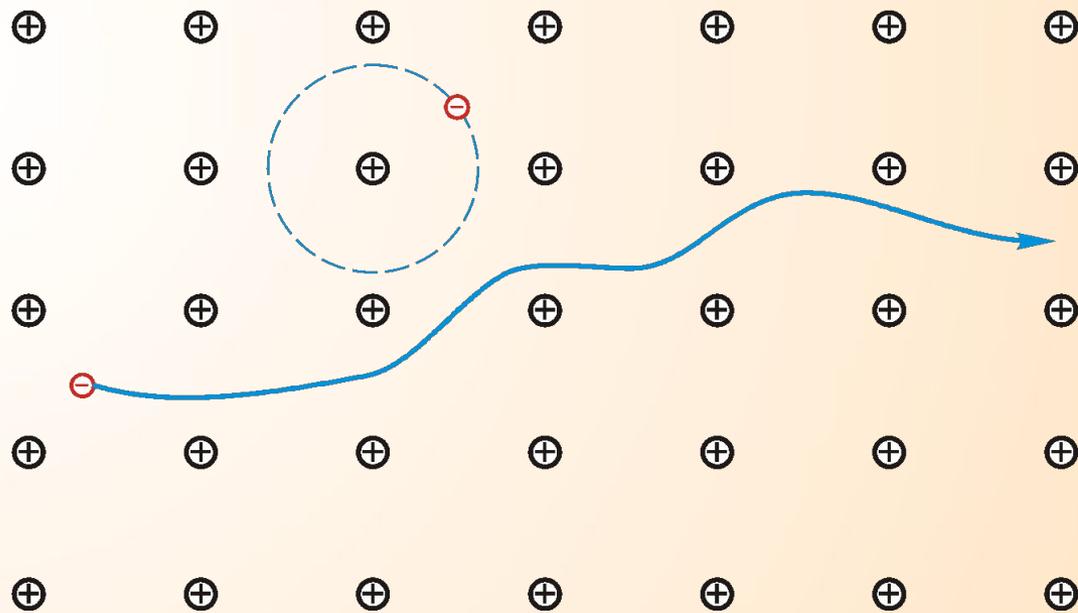


металл

Валентная зона – образована из уровней основных состояний ($n = 1$).

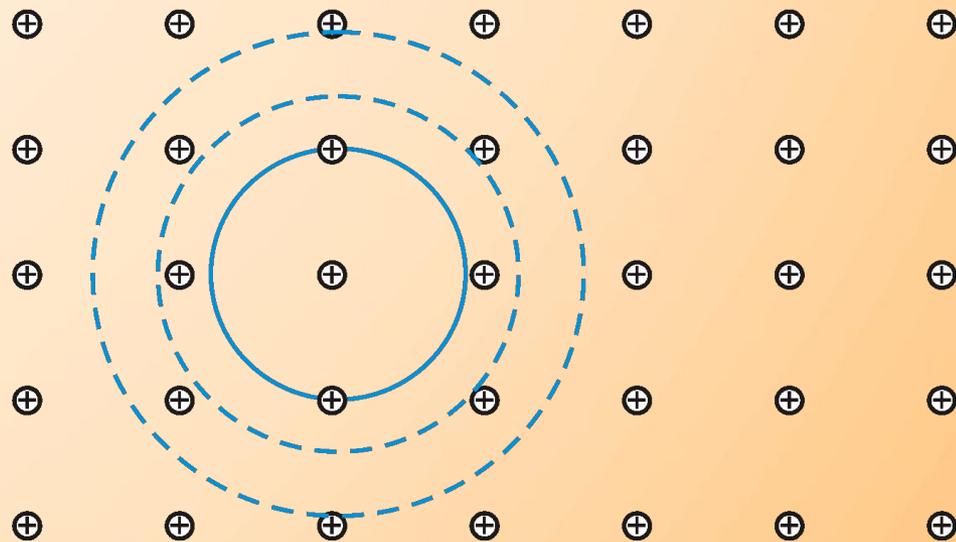
Зона проводимости – образована из уровней возбужденных состояний ($n \geq 2$).

Между валентной зоной и зоной проводимости находится **запрещенная зона**.

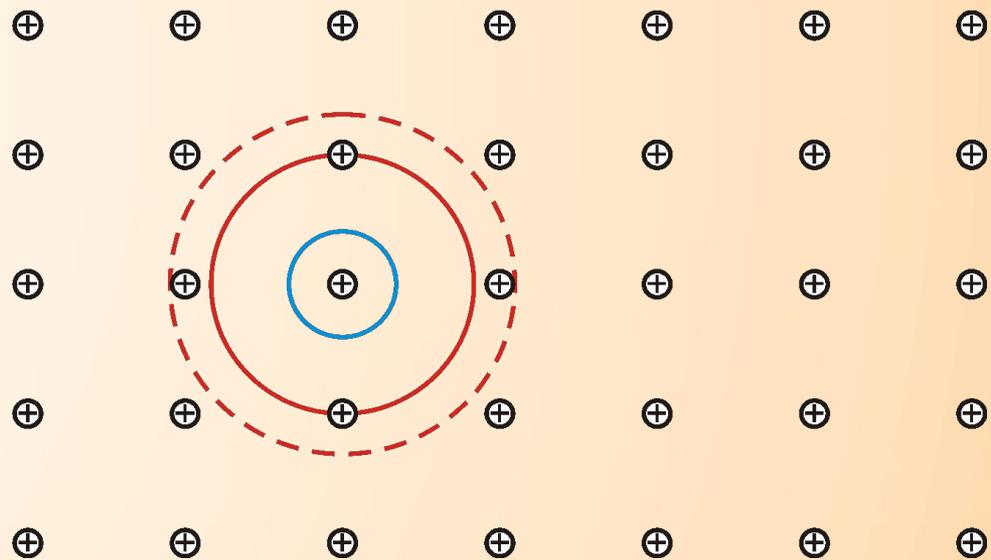


Электроны зоны проводимости называются *свободными*.

Металлы:



Полупроводники:



$E_g > 2$ эВ – диэлектрик, $E_g < 2$ эВ – полупроводник.

5.3. Понятие о квантовых статистиках.

Два процесса: *генерация* и *рекомбинация* носителей.

Генерация: в результате теплового движения некоторые атомы оказываются в возбужденном состоянии, в электроны – в зоне проводимости.

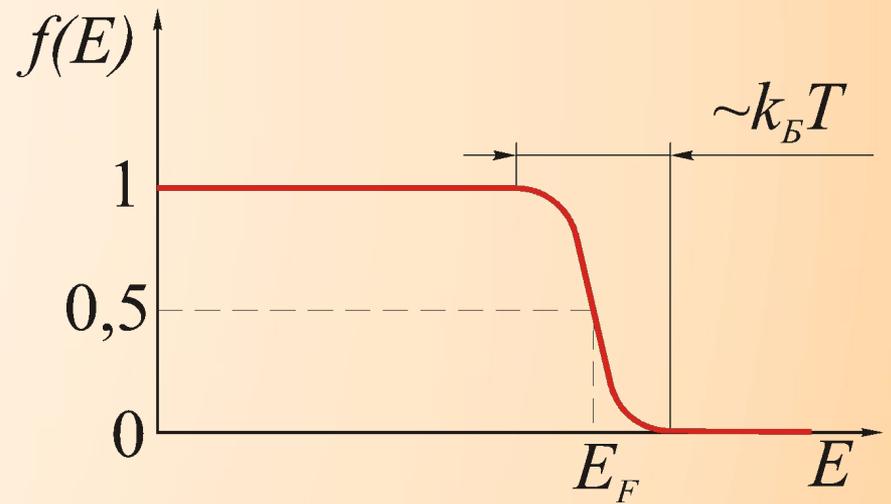
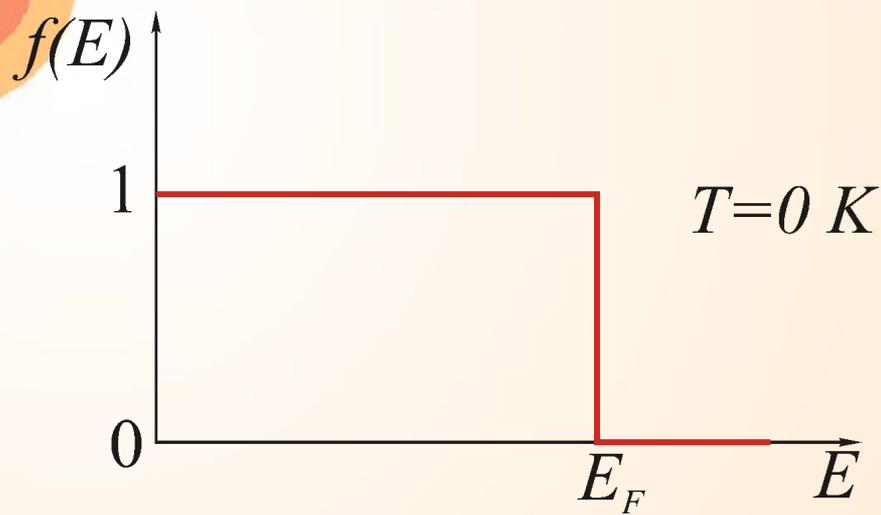
Рекомбинация: атом переходит в основное состояние, электрон оказывается в валентной зоне, передав энергию третьей частице.

- **Функция распределения $f(E)$** выражает вероятность того, что электроны имеют энергию E .

Статистика Ферми – Дирака:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} \quad (5.2)$$

E_F – энергия (уровень) Ферми.



- Энергия Ферми – это такое значение энергии, вероятность состояния электрона с которой равна 0,5.

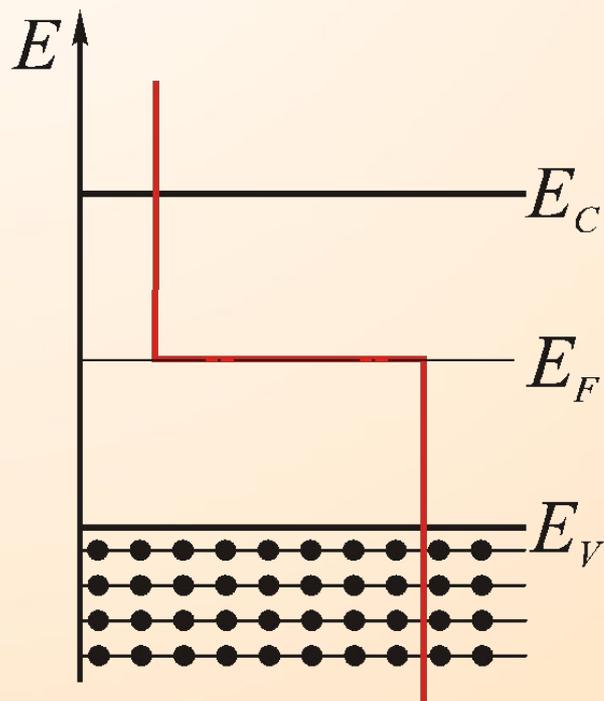
В чистых полупроводниках ($n = 10^{12} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$) доля занятых состояний в зоне проводимости ничтожно мала:

$$f \ll 1 \quad \text{и} \quad 1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}} \gg 1$$

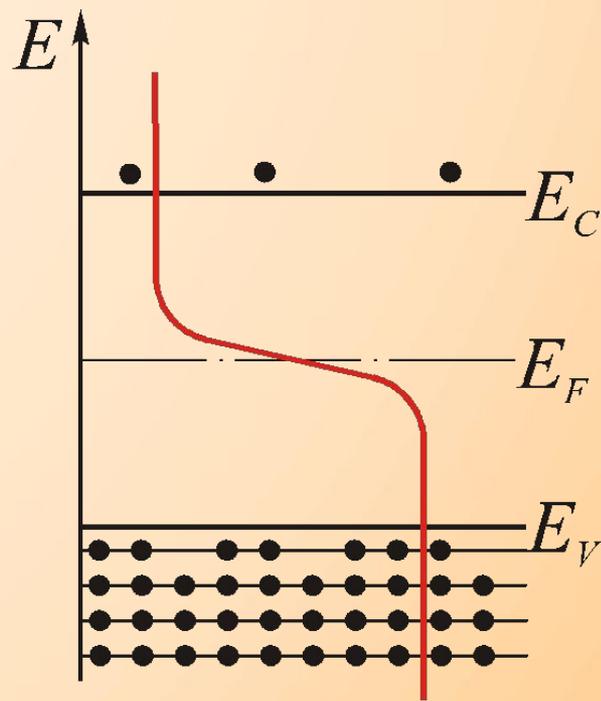
Распределение *Максвелла – Больцмана*:

$$f(E) \approx e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} \quad (5.3)$$

Вырожденное (5.2) и *невырожденное* (5.3) состояние.



$T = 0 K$



$T > 0 K$

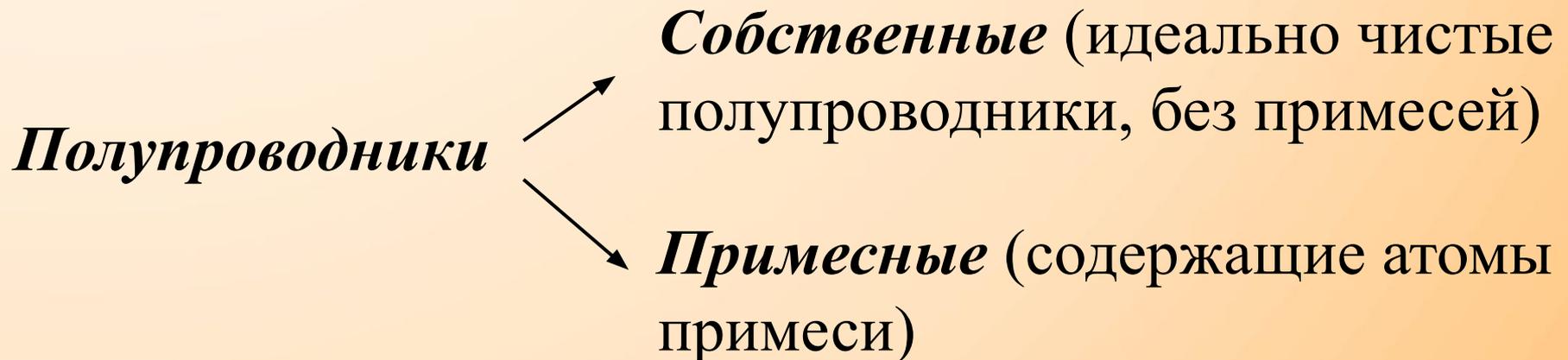
Пример

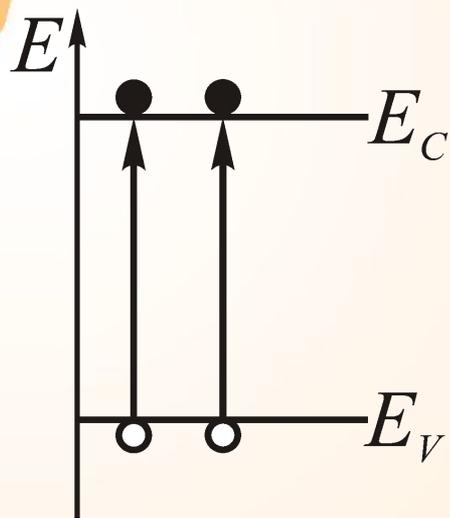
$$T = 300 \text{ К}$$

$$\text{Ge: } E_g = 0,66 \text{ эВ}, \quad E_F = 0,33 \text{ эВ}, \quad k_B T = 0,026 \text{ эВ}, \\ f = 3 \cdot 10^{-6}$$

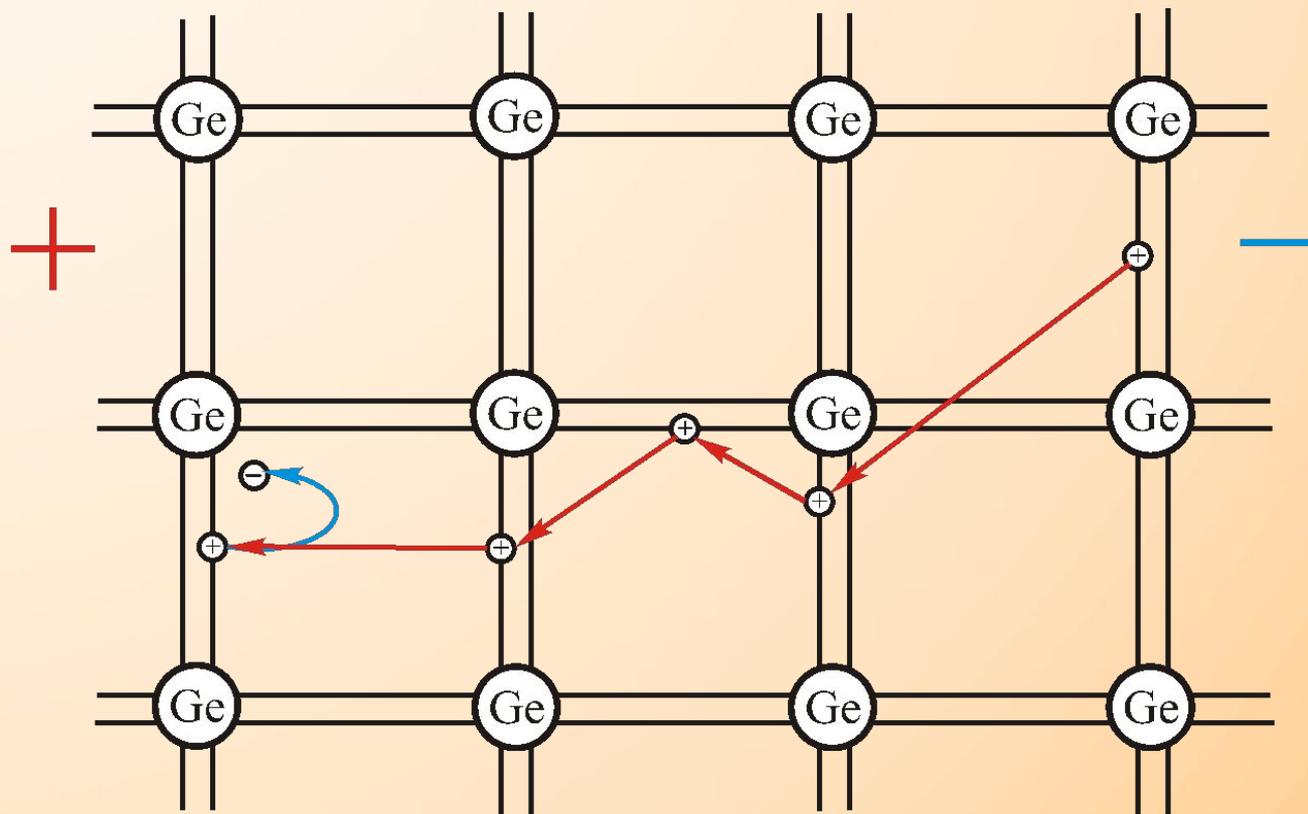
$$\text{Диэлектрик: } E_g = 6,6 \text{ эВ}, \quad E_F = 3,3 \text{ эВ}, \quad e^{10} = 2 \cdot 10^4 \\ f = 3 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 10^4$$

5.4. Собственная и примесная проводимость.





Электронны полностью заполненной зоны не являются свободными.



$$n = p = n_i$$

Проводимость собственного полупроводника:

$$\sigma = e \cdot n_i \cdot (u_n + u_p) \quad (5.4)$$

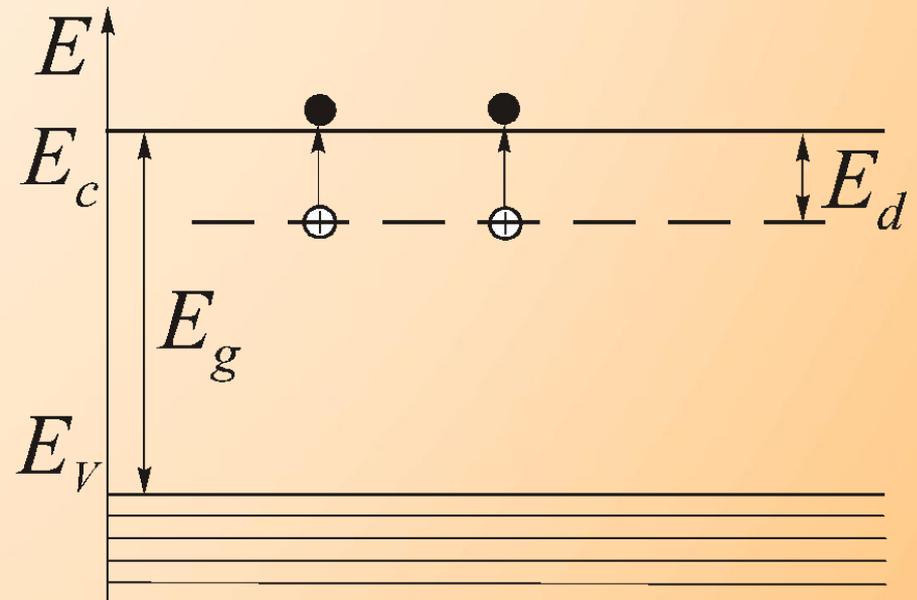
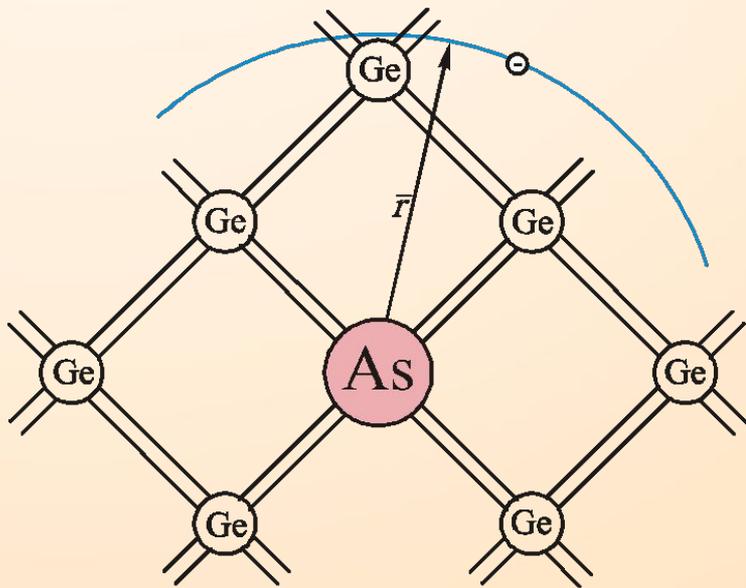
- **Подвижностью** частицы называется физическая величина, равная скорости v , приобретенной частицей в электрическом поле единичной напряженности ($E = 1$ В/м).

$$u = \frac{v}{E} \quad (5.5)$$

$$E_F = E_g / 2 \quad \Rightarrow \quad n_i = k \cdot e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (5.6)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_g / 2k_B T) \quad (5.7)$$

Примесные полупроводники получают добавлением в собственный примеси III или V группы таблицы Менделеева.



Примесь V группы называют *донором*, а полупроводник с такой примесью – *электронным, донорным* или *n – типа*.

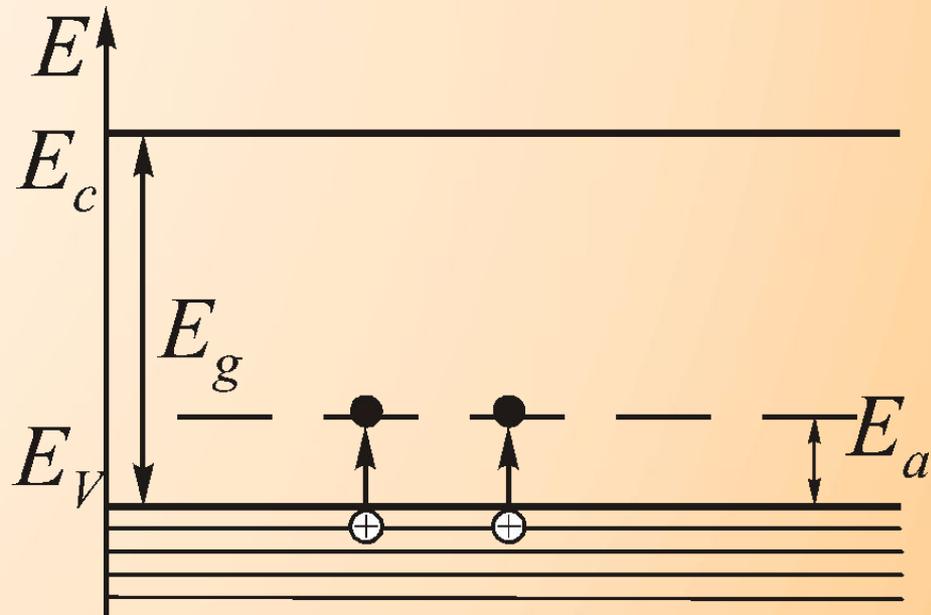
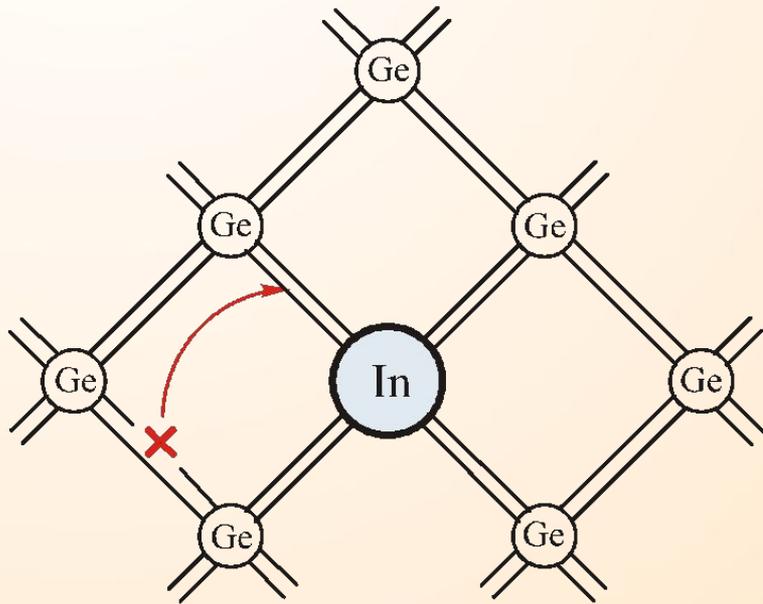
Электроны – *основные* носители, дырки – *неосновные* ($n > p$).

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (5.8)$$

$$\sigma = e(n \cdot u_n + p \cdot u_p) \quad (5.9)$$

$$n \gg p \Rightarrow \sigma = e \cdot n \cdot u_n \quad (5.10)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_d / 2k_B T) \quad (5.11)$$



● Примесь III группы называют **акцептором**, а полупроводник с такой примесью – **дырочным, акцепторным** или **p – типа**.

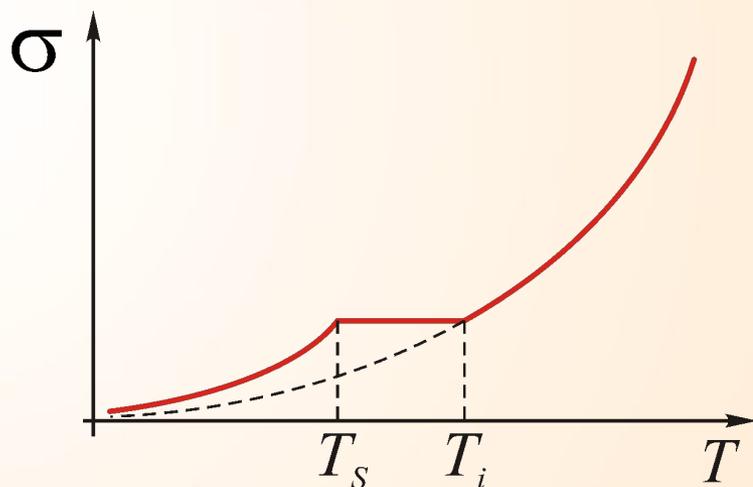
Дырки– *основные* носители, электроны – *неосновные* ($p > n$).

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (5.12)$$

$$\sigma = e(n \cdot u_n + p \cdot u_p) \quad (5.13)$$

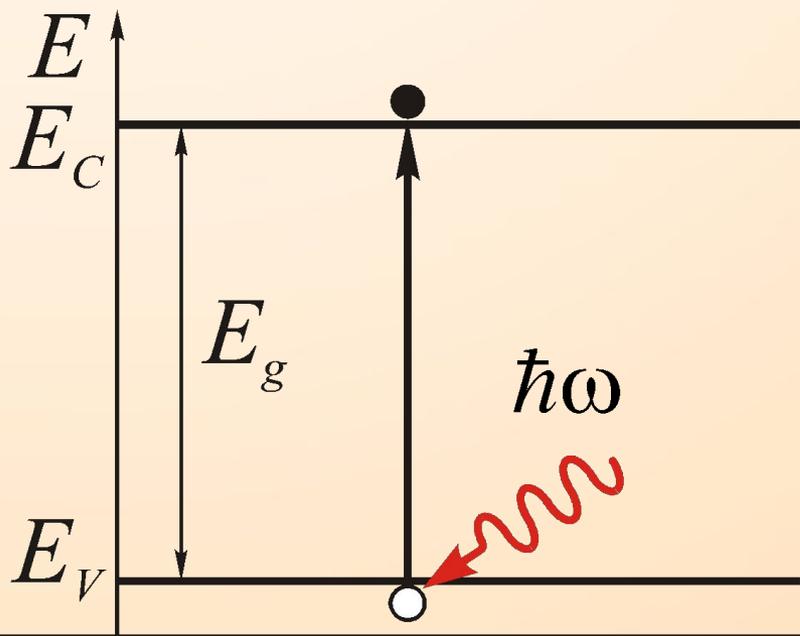
$$p \gg n \Rightarrow \sigma = e \cdot p \cdot u_p \quad (5.14)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_a / 2k_B T) \quad (5.15)$$



5.5. Внутренний фотоэффект.

Все процессы происходят внутри полупроводника.



$$\hbar\omega \geq E_g$$

Плотность потока фотонов
 $\approx 10^{13} \div 10^{18}$ фотонов/см²·с

- **Внутренним фотоэффектом** называется процесс внутреннего возбуждения полупроводника, проявляющегося в увеличении его проводимости под действием света.

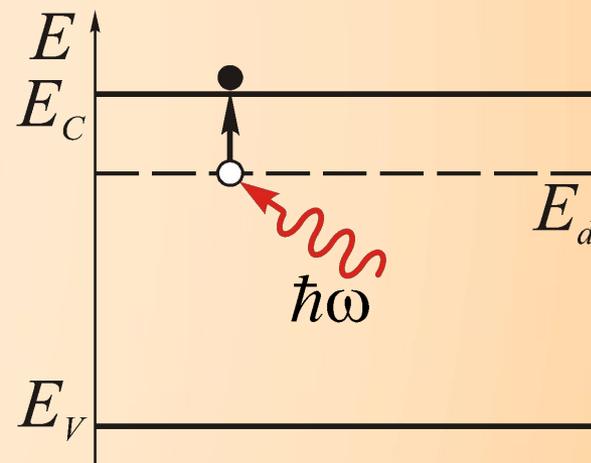
Красная граница:

$$\omega_0 = \frac{E_g}{\hbar} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} = \frac{hc}{E_g} \quad (5.16)$$

Примесные полупроводники:

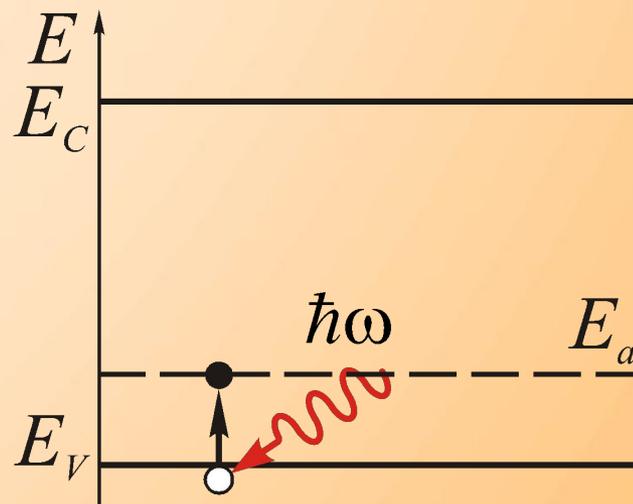
$$\hbar\omega \geq E_d \quad \text{или} \quad E_a$$

Донорный полупроводник:



$$\omega_0 = \frac{E_d}{\hbar} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} = \frac{hc}{E_d} \quad (5.17)$$

Акцепторный полупроводник:



$$\omega_0 = \frac{E_a}{\hbar} \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} = \frac{hc}{E_a} \quad (5.18)$$

• **Фототоком** называется разность токов через освещенное ($i_{\text{св}}$) и неосвещенное ($i_{\text{т}}$) фотосопротивление.

$$i_{\text{ф}} = i_{\text{св}} - i_{\text{т}}$$

• **Вольт-амперной характеристикой** называется зависимость фототока через фотосопротивление от приложенного к нему напряжения при постоянной освещенности.

• **Световой характеристикой** называется зависимость фототока от освещенности фотосопротивления при постоянном приложенном к нему напряжении.

Задача 5.1.

Как изменится удельное сопротивление образца из чистого арсенида галлия при нагреве его от комнатной температуры до 400 К?

Дано:

$$E_g = 1,43 \text{ эВ}$$

$$T_1 = 293 \text{ К}$$

$$T_2 = 400 \text{ К}$$

$$\rho_2/\rho_1 - ?$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-E_g/2k_B T}$$

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-E_g/2k_B T_1}$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 \cdot e^{-E_g/2k_B T_2}$$

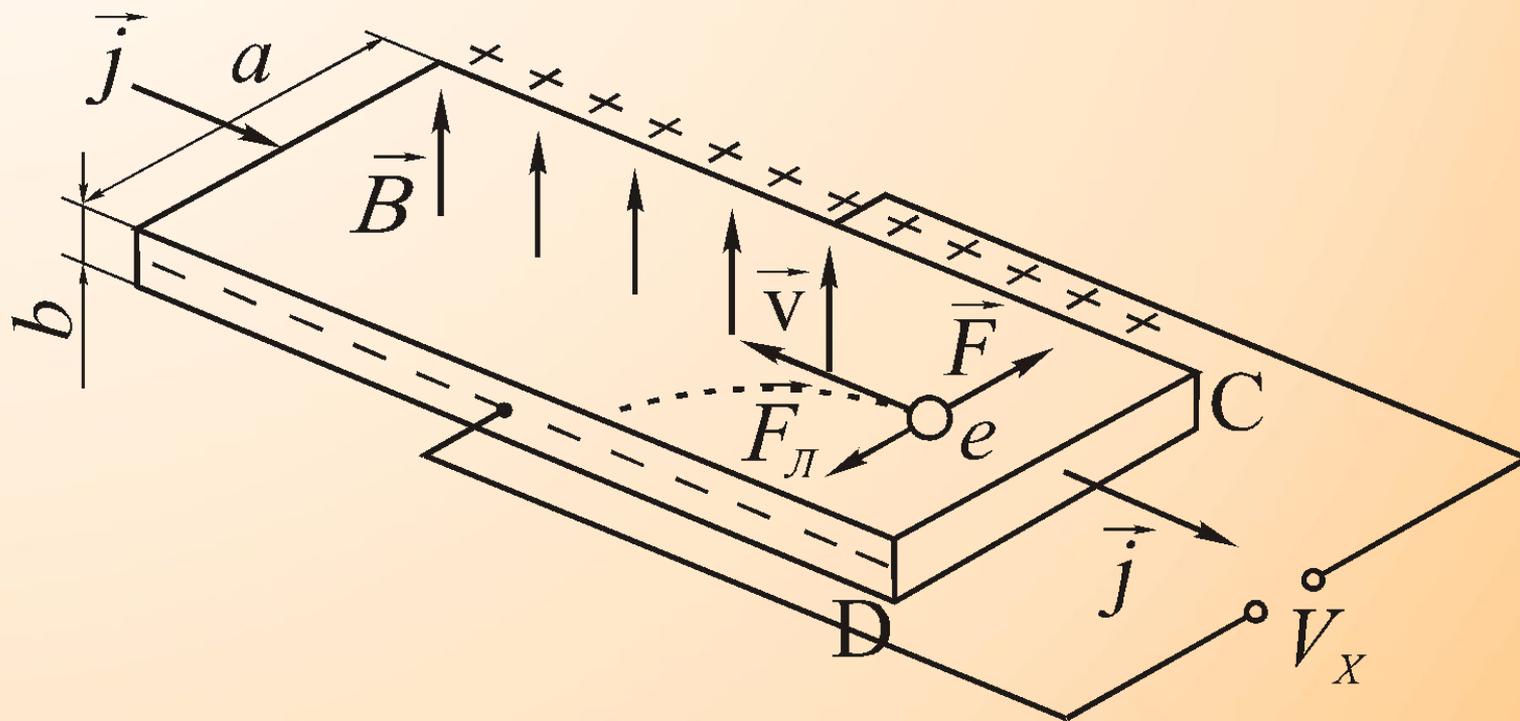
$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{-E_g/2k_B T_1}}{\sigma_0 \cdot e^{-E_g/2k_B T_2}} = e^{\frac{E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} =$$

$$= e^{\frac{1,431,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}} \left(\frac{1}{400 \text{ К}} - \frac{1}{293 \text{ К}} \right)} = e^{-7,5} = \underline{5,6 \cdot 10^{-4}}$$

5.6. Эффект Холла.

Эффектом Холла называется возникновение в полупроводниковой или металлической пластине, помещенной в скрещенные электрическое и магнитное поле, поперечной разности потенциалов.



$$V_x = R_x \cdot j \cdot B \cdot a \quad (5.19)$$

R_x – постоянная Холла.

Для металлов:

$$R_x = \frac{1}{en} \quad (5.20)$$

Для полупроводников:

$$R_x = \frac{1}{e} \cdot \frac{u_p^2 \cdot p - u_n^2 \cdot n}{(u_p \cdot p + u_n \cdot n)^2} \quad (5.21)$$

Задача 5.2.

Удельное сопротивление кремния p -типа равно 10^{-2} Ом·м. Определить концентрацию дырок и их подвижность. Принять постоянную Холла равной $4 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл.

Дано:

$$\rho = 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R_x = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

$$p - ? \quad u_p - ?$$

$$R_x = \frac{1}{e} \cdot \frac{u_p^2 \cdot p - u_n^2 \cdot n}{(u_p \cdot p + u_n \cdot n)^2} =$$

$$= \frac{1}{e} \cdot \frac{u_p^2 \cdot p}{(u_p \cdot p)^2} = \frac{1}{ep}$$

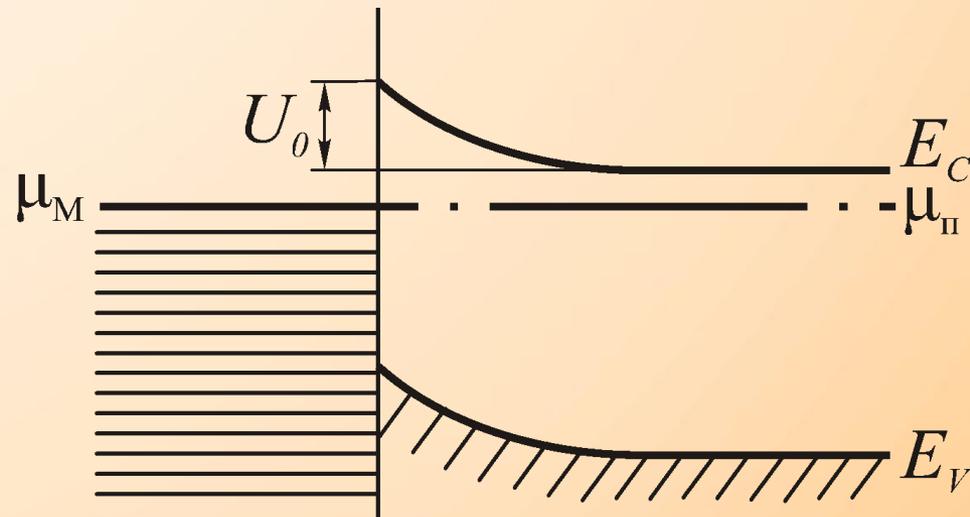
$$p = \frac{1}{eR_x} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}} = \underline{1,56 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}}$$

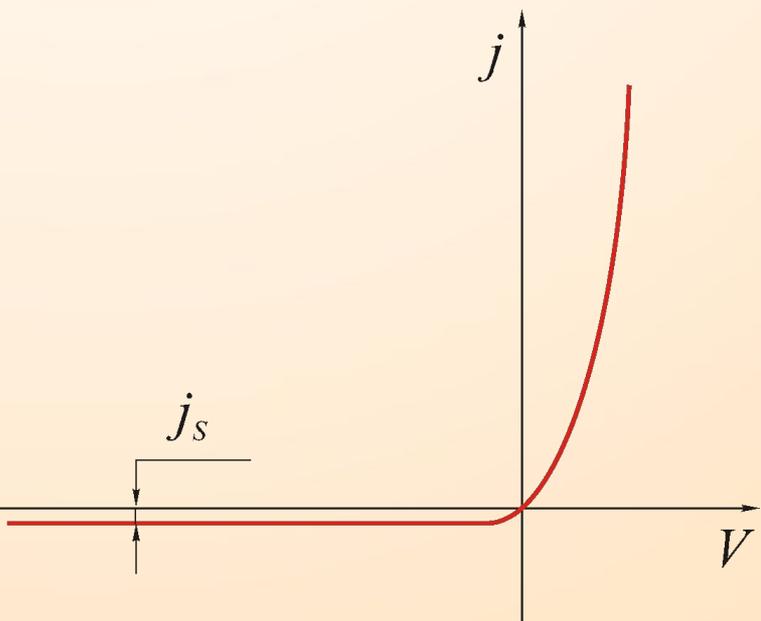
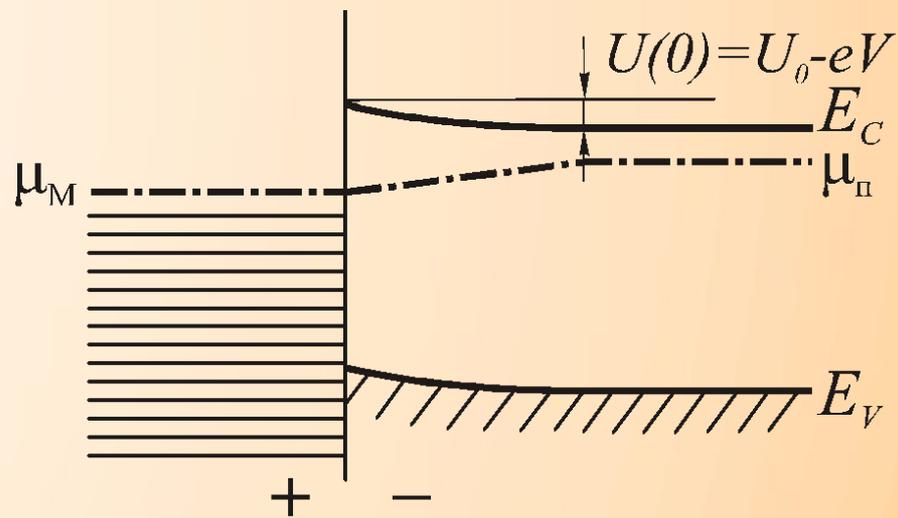
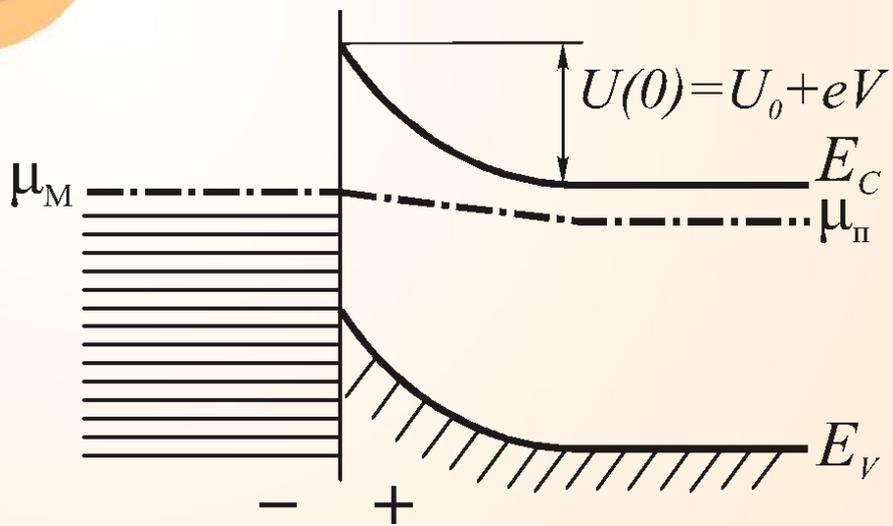
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e \cdot p \cdot u_p}$$

$$u_p = \frac{1}{e \cdot p \cdot \rho} = \frac{R_x}{\rho} = \frac{4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{М}^3}{\text{А} \cdot \text{с}}}{10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{М}} = 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{М}^2}{\text{А} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с}} = \underline{4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{М}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}}$$

5.7. Контакт металла с полупроводником.

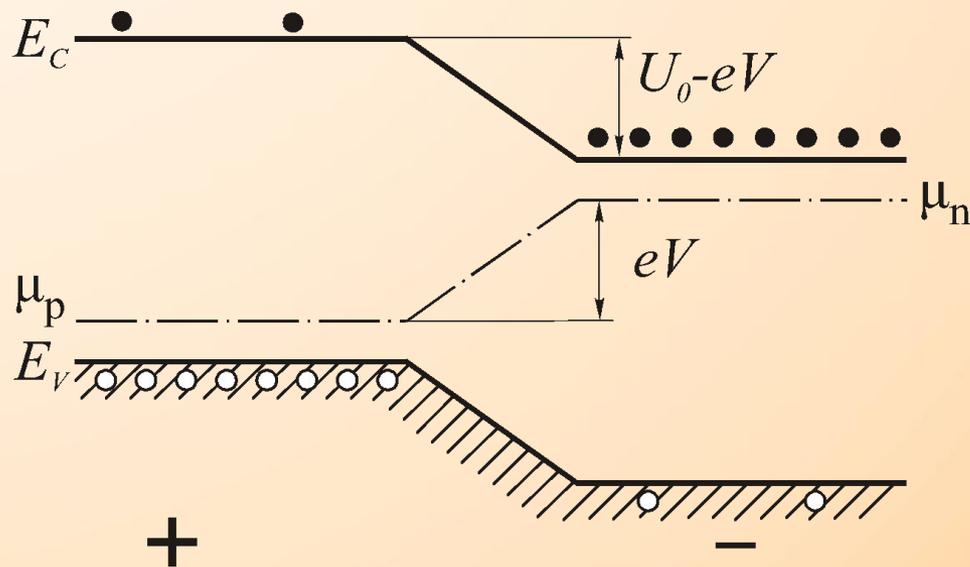
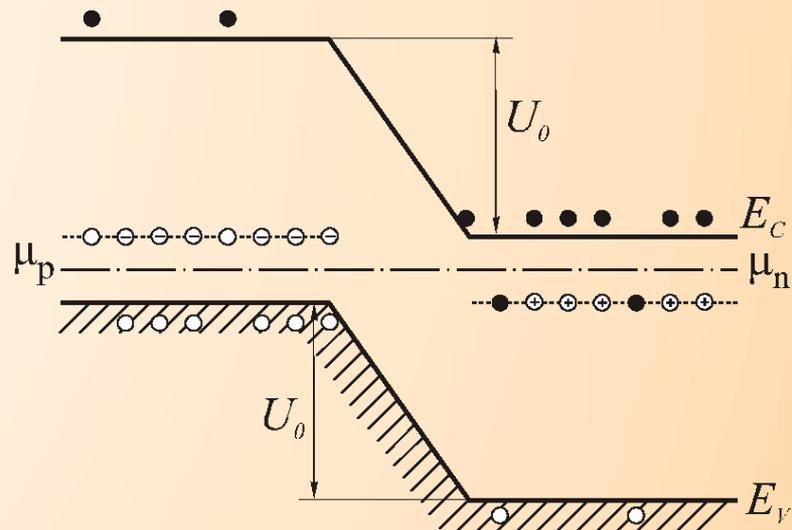
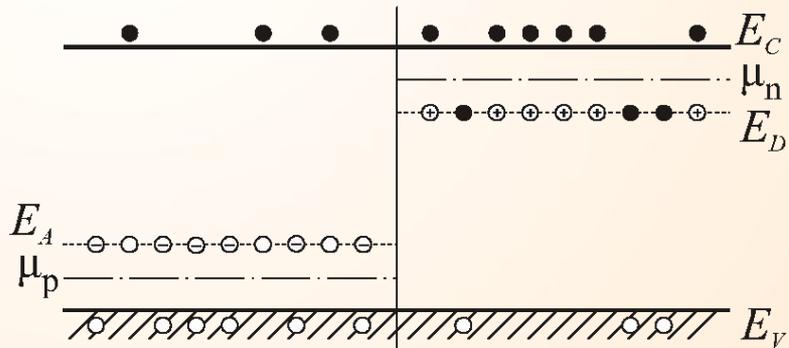
Если $A_M > A_{\text{ПП}}$

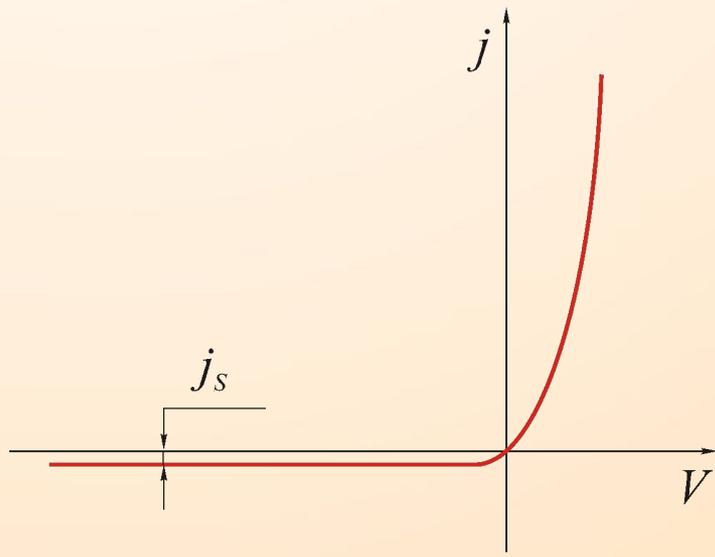
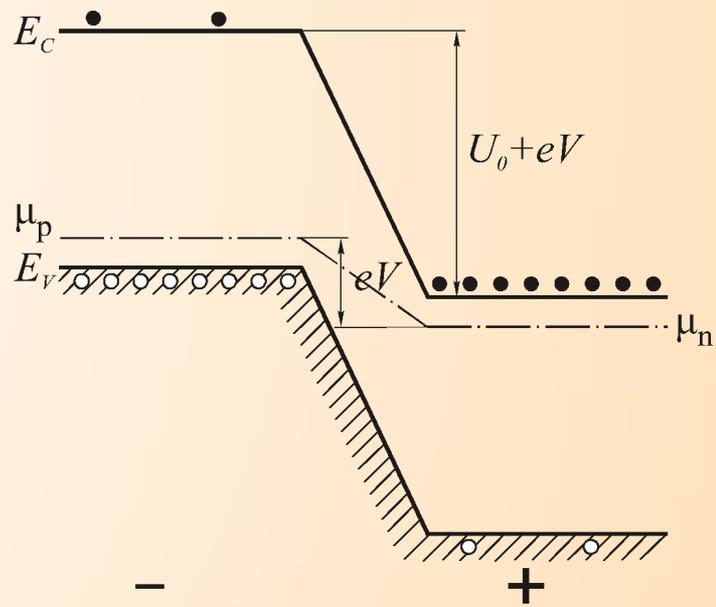




$$j = j_S \left(e^{\pm \frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (5.22)$$

5.8. $p - n$ - переход.





$$j = j_s \left(e^{\pm \frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (5.23)$$