Лекция 2
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- ***Краткие сведения из квантовой механики.*** *Электроны. Волны де Бройля. Соотношение неопределенности. Волновая функция.*

- ***Спектр электронных состояний атомов и кристаллов.*** *Частица в потенциальной яме. Спектр электронных состояний атомов. Квантовые числа. Электронные оболочки. Виды химической связи. Понятие о зонной структуре твердых тел. Принцип разделения веществ на проводники (металлы), полупроводники и изоляторы (диэлектрики).*

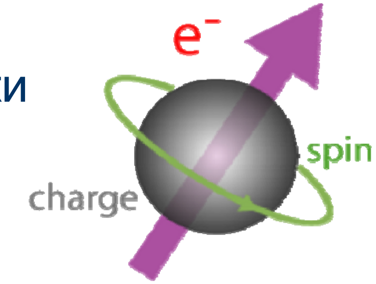
- ***Электропроводность твердых тел.*** *Модель электронного газа. Квантовая модель электропроводности. Трехмерный ящик. Энергия Ферми. Оценка числа состояний. Плотность энергетических состояний.*

- ***Распределение Ферми. Электроны и дырки.*** *Количество электронов в зоне проводимости. Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике. Уровень Ферми в беспримесном полупроводнике.*

- ***Собственная и примесная проводимость полупроводников.*** *Полупроводники n- и p-типа. Положение уровня Ферми в электрически нейтральном полупроводнике. Технологии легирования полупроводников.*

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

- Электрон – центральный объект квантовой механики
  имеет массу $m_e = 9.1 * 10^{-31}$ *кг*
  электрический заряд $e = 1.6 * 10^{-19}$ *Кл*



- В 1923 году де Бройль предположил: движение любой частицы с импульсом $\vec{p}$ описывается волновым процессом, длина волны которого


Луи де Бройль

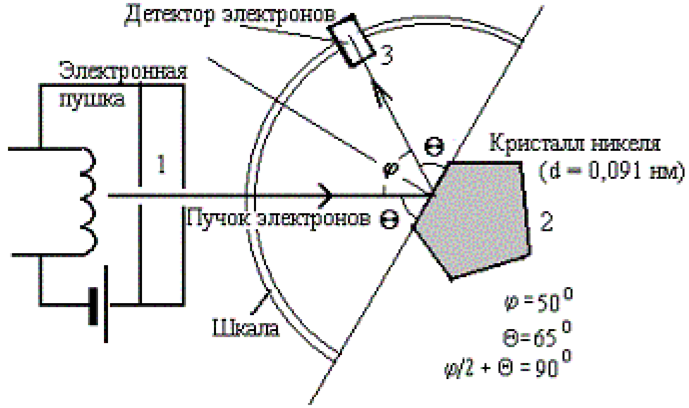
$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p}}$$ или $$\boxed{\lambdabar = \frac{\hbar}{p}}$$

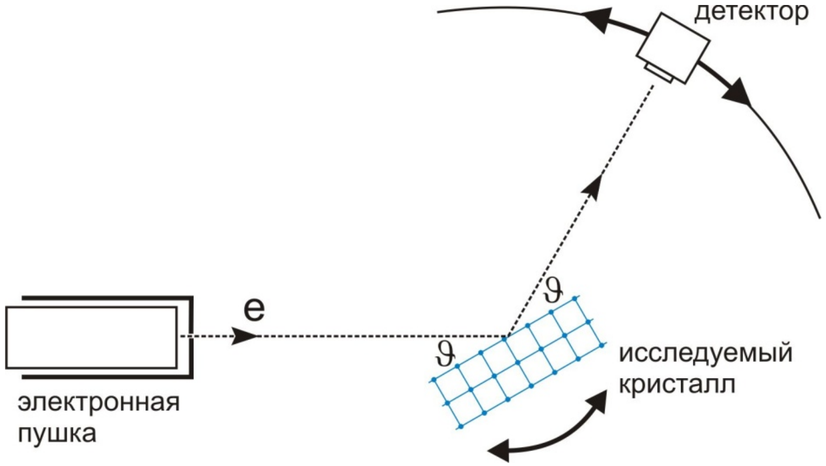
$$h = 6.62 * 10^{-34}\ Дж \cdot c$$

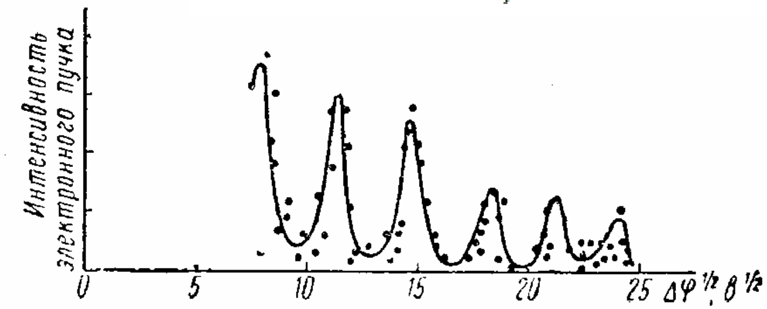
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.06 * 10^{-34}\ Дж \cdot c$$

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

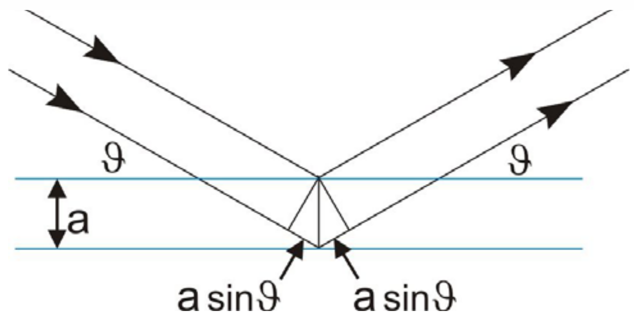
Гипотеза де Бройля о наличии волновых свойств у электрона была подтверждена в 1927 году в экспериментах **Дэвиссона - Джермера** по дифракции электронов на поверхности монокристаллов Ni.







$$a \cdot \sin\vartheta = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$



КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

- **Пример**. Пучок электронов с энергией 15 эВ падает на поверхность кристалла по нормали к его кристаллической плоскости и испытывает дифракцию. Угол первого дифракционного максимума составляет 30^0. Определить период кристаллической решетки .
- **Решение:**

$$2a \cdot \sin\vartheta = n \cdot \frac{\lambda}{2} = 1 \cdot \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_k}} \Rightarrow$$

$$a = \frac{h}{2\sin\vartheta\sqrt{2m_e E_k}} \Rightarrow \quad a = 3.2 * 10^{-10}\,м = 3.2\,\overset{o}{A}$$

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Вопрос. Может ли макроскопическая частица проявлять волновые (квантовые) свойства? Например, частица с массой 1 г и скоростью 1 м/с.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \approx 6.6 \cdot 10^{-31}\, м$$

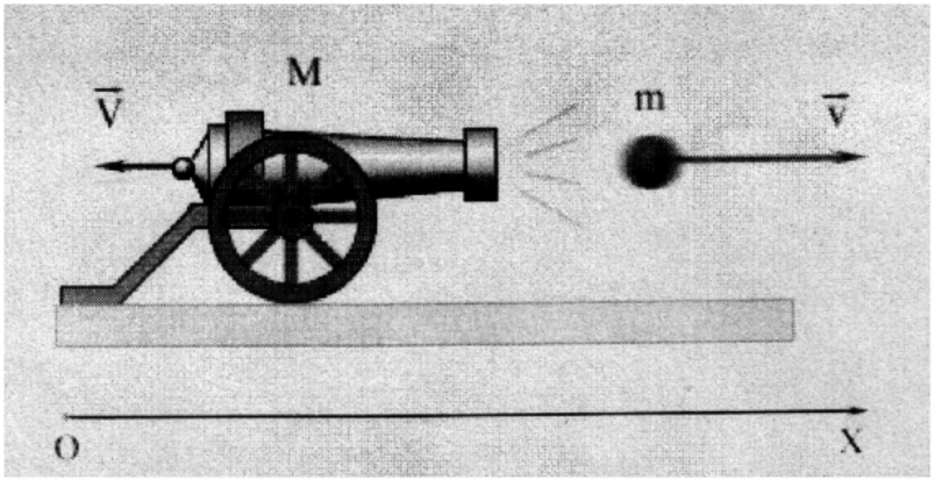
а, к примеру, размер протона всего 10^{-15}м.

А если?

10 кг

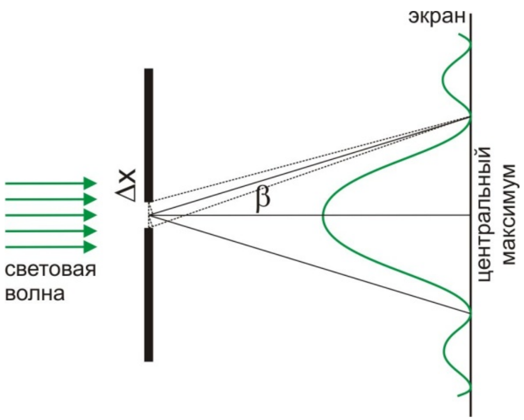
100 м/с

Тогда 10^{-37}м



КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

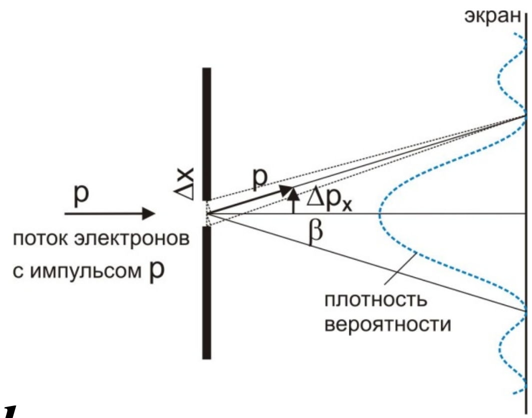
- Одним из парадоксальных проявлений волновых свойств микрочастиц является так называемое **соотношение неопределенности**.



$$\frac{\Delta x}{2}\cdot\sin\beta=\frac{\lambda}{2}$$

$$\sin\beta=\frac{\lambda}{\Delta x}$$

$$\lambda=\frac{h}{p}$$



$$\Delta p_x=2p_x=2p\frac{\lambda}{\Delta x}=\frac{2h}{\Delta x}\Rightarrow\ \Delta p_x\cdot\Delta x=2h$$

$$\boxed{\Delta p\cdot\Delta x\geq\frac{\hbar}{2},\qquad \Delta E\cdot\Delta t\geq\frac{\hbar}{2}}$$

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

- Каждой квантовомеханической системе можно поставить в соответствие волновую функцию

$$\Psi(x, y, z, t)$$

- Квадрат модуля представляет вероятность обнаружить частицу в некоторой точке в данный момент времени

$$\left|\Psi(x, y, z, t)\right|^2$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1$$

- Если система может находиться в каких-то нескольких состояниях, то ее общее состояние может описываться на основе суммы волновых функций, которыми характеризуется система.

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Пример. Свободная частица, о которой мы знаем, что она движется вдоль оси *x* и имеет импульс p_0. В соответствии с формулой де Бройля мы можем приписать ей вполне определенную длину волны:

$$p = p_0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_0 = \frac{h}{p_0}$$

Попробуем найти волновую функцию этой частицы. Поскольку это волна, то можно считать, что волновая функция должна изменятся по закону синуса или косинуса.

Если $\Psi = A \cdot \cos(k_0 x - \omega t)$, где $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = p_0/\hbar$

Тогда $|\Psi|^2 = A^2 \cos^2(k_0 x - \omega t)$ - распределение вероятности содержит нули, что не соответствует смыслу

Возьмем вид волновой функции

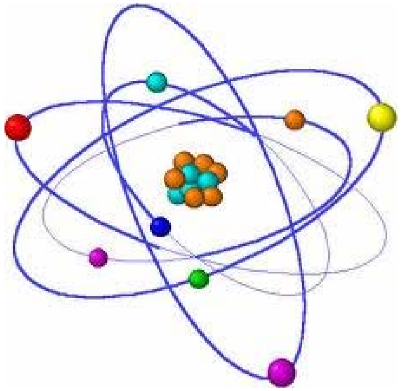
$$\Psi = Ae^{i(k_0 x - \omega t)}$$

тогда

$$|\Psi|^2 = \Psi^* \Psi = \left[A \cdot e^{i(k_0 x - \omega t)}\right] \cdot \left[A \cdot e^{-i(k_0 x - \omega t)}\right] = A^2$$

и обнаружить частицу можно в любой точке с равной вероятностью. Таким образом, мы построили волновую функцию свободной частицы

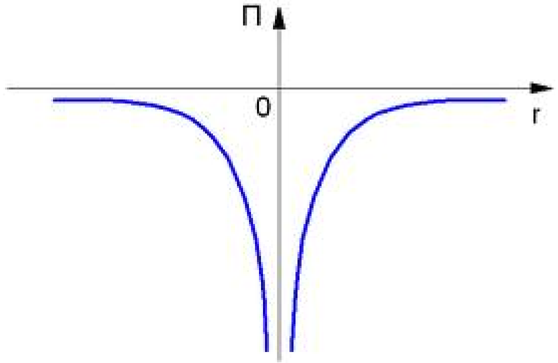
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ



- Важнейшим свойством атомов и молекул как квантовых систем, состоящих из связанных между собой микрочастиц, является то, что они могут принимать лишь определенные **разрешенные значения энергии.**

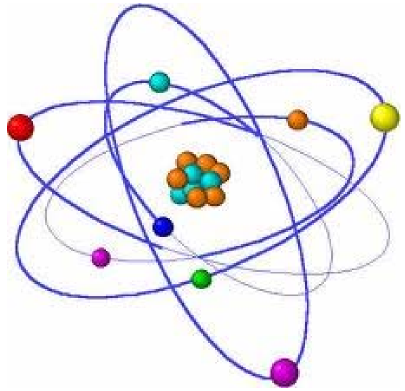
- **Частица в потенциальной яме**.

  Одномерная потенциальная яма (одномерный ящик с бесконечными стенками) является грубой, но наглядной моделью для понимания и описания основных закономерностей поведения электрона в атоме. Так же как и в атоме, электрон локализован в замкнутой области и не выходит за ее пределы, то есть, ящик с бесконечными стенками можно рассматривать как определенную упрощенную аналогию атомной системы.



СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- Важнейшим свойством атомов и молекул как квантовых систем, состоящих из связанных между собой микрочастиц, является то, что они могут принимать лишь определенные **разрешенные значения энергии.**

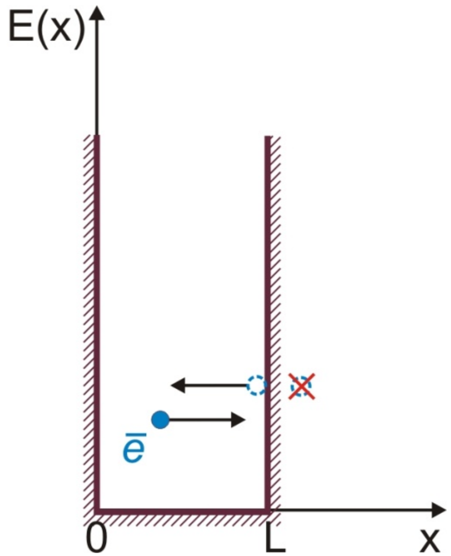


- **Частица в потенциальной яме**.
 Одномерная потенциальная яма (одномерный ящик с бесконечными стенками) является грубой, но наглядной моделью для понимания и описания основных закономерностей поведения электрона в атоме. Так же как и в атоме, электрон локализован в замкнутой области и не выходит за ее пределы, то есть, ящик с бесконечными стенками можно рассматривать как определенную упрощенную аналогию атомной системы.

СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- Частица в ящике не может покоиться (вследствие соотношения неопределенности), но может двигаться либо в одну, либо в противоположную сторону:

$$\Psi = \Psi_+ + \Psi_-$$



$$\Psi_+(x,t) = B \cdot e^{i(kx-\omega t)}$$

$$\Psi_-(x,t) = -B \cdot e^{i(-kx-\omega t)}$$

$$\Psi = \Psi_+ + \Psi_- = B \cdot e^{ikx-i\omega t} - B \cdot e^{-ikx-i\omega t} =$$

$$= 2iB \cdot e^{-i\omega t} \frac{e^{ikx} - e^{-ikx}}{2i} = 2iB \cdot \sin kx \cdot e^{-i\omega t}$$

$$2iB \cdot \sin kx = A \cdot \sin kx$$

$$\Psi(x) = \begin{cases} A \cdot \sin kx, & 0 \le x \le L \\ 0, & x \le 0, \quad x \ge L \end{cases}$$

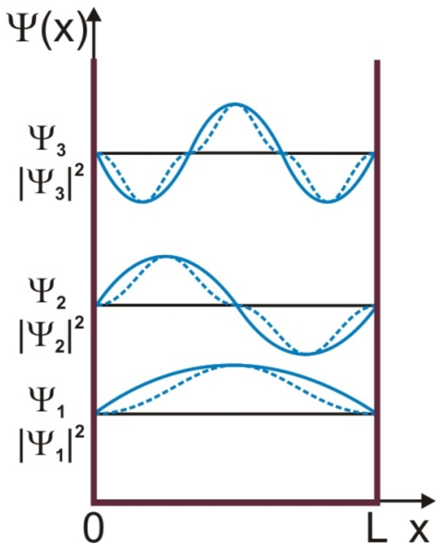
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

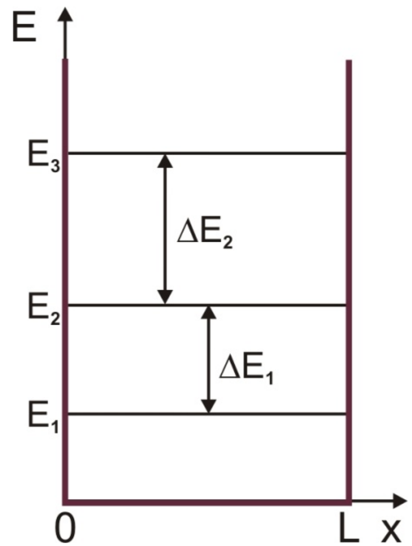
- Из условия непрерывности вблизи стенок $\sin kx = 0$

$$k \cdot L = \pi \cdot n, \Rightarrow k_n = \frac{n\pi}{L}, \quad где \quad n = 1, 2, \ldots$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{2\pi} = k_n \cdot \hbar$$

$$\boxed{p_n = \frac{\pi \cdot \hbar \cdot n}{L} \qquad E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m \cdot L^2} n^2}$$





СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- **Пример.**

$$L = 2\,\overset{o}{\mathrm{A}}$$

$$E_n \approx 1.5 \cdot 10^{-18}\,Дж \times n^2$$

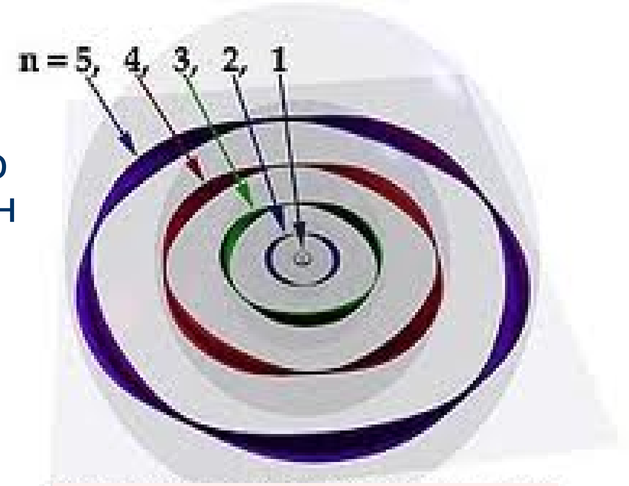
$$1эВ = 1.6 \cdot 10^{-19}\,Кл \times 1В = 1.6 \cdot 10^{-19}\,Дж$$

$$E_n \approx \ldots = 8.7эВ \cdot n^2$$

$$E_1 \approx 8.7эВ$$

$$E_2 \approx 35эВ$$

СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

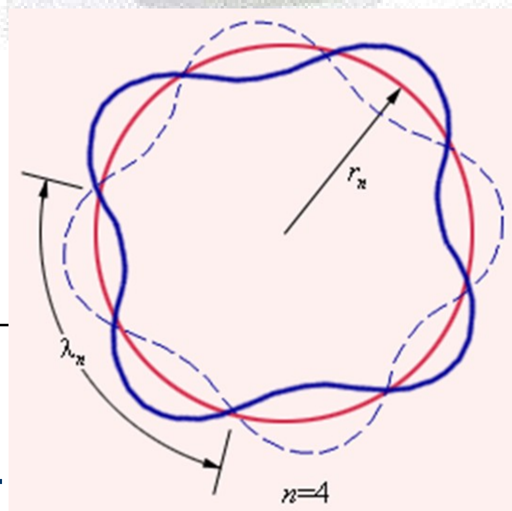


- ***Атом водорода:*** Движение электрона вокруг ядра происходит по строго определенным орбитам, так, что на длине орбиты укладывается целое число длин волн де Бройля:

$$2\pi r = n\lambda = n\frac{h}{p} = n\frac{h}{mv}, \quad n = 1, 2, 3\ldots$$

- Радиусы круговых орбит определяются из условия, что центробежная сила уравновешивается силой притяжения электрона к ядру

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad \varepsilon_0 = 8,85\cdot10^{-12}\,Ф/м, \quad \Rightarrow \quad r = \frac{n^2h^2\varepsilon_0}{\pi e^2 m}$$



- При ***n***=1 получаем ***r***=0,53·10^{-8}см – 1-й Боровский радиус.

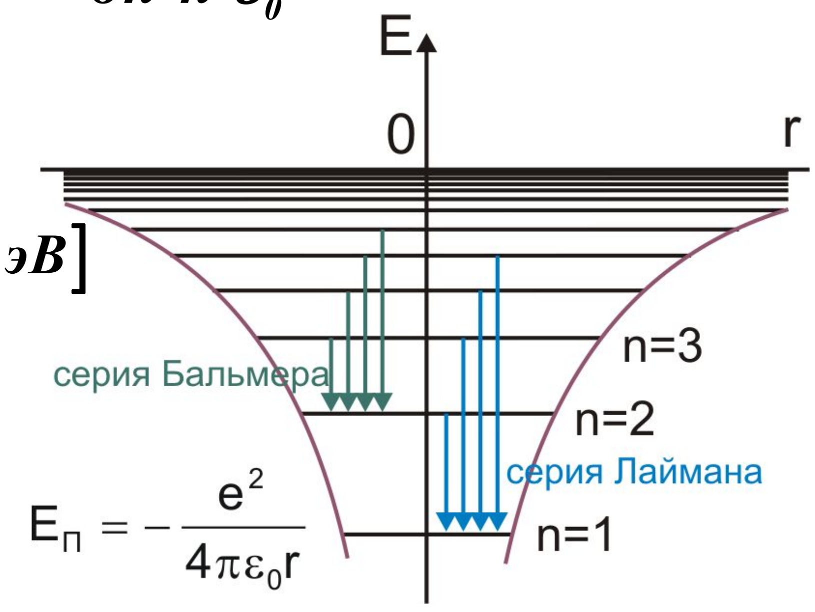
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- Найдем значения энергии атома водорода

$$E = E_K + E_П = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = -\frac{e^4 m}{8n^2h^2\varepsilon_0^2}$$

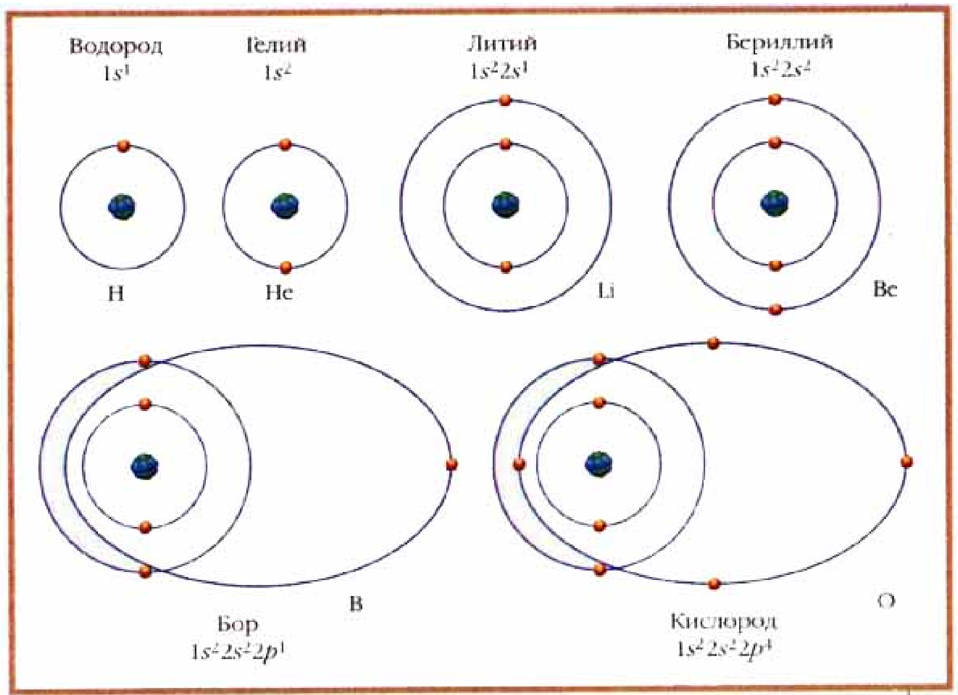
$$E_n = -\frac{e^4 m}{8n^2h^2\varepsilon_0^2} = -\frac{1}{n^2}\frac{e^4 m}{8h^2\varepsilon_0^2} =$$

$$= -\frac{21,72\cdot 10^{-19}}{n^2}[Дж] = -\frac{13,6}{n^2}[эВ]$$



СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

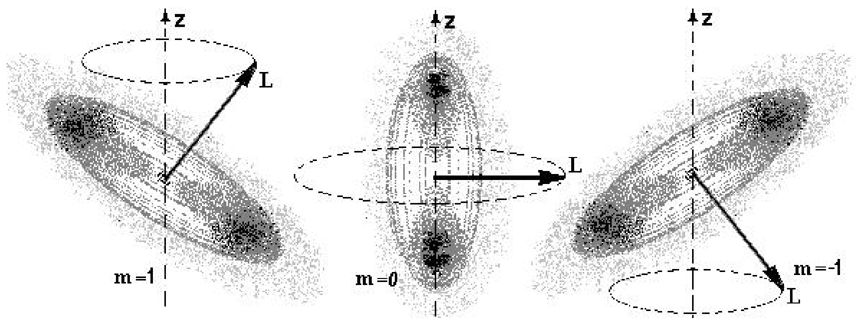
- ***Энергетические состояния электронов в многоэлектронных атомах***
- Характер квантования определяется видом потенциала взаимодействия.
- Орбиты электронов в многоэлектронном атоме могут быть круговыми или эллиптическими.
- Электроны стремятся занять по возможности наиболее низкие энергетические состояния.
- Принцип Паули: может быть не более двух электронов на одном энергетическом уровне
- Возможные энергетические состояния электронов в атоме характеризуются четырьмя квантовыми числами



СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- ***Квантовые числа***
- ***Главное квантовое число n (n=**1, 2, 3,..**)*** определяется радиусом круговой орбиты или величиной большой полуоси эллиптической орбиты. Чем больше ***n***, тем больше радиус. Состояния электрона, определяемые главным квантовым числом называют энергетическими уровнями.
- ***Орбитальное квантовое число l (l=0, 1, 2,…,n-1)*** определяет величину малой полуоси эллиптической орбиты. Значение ***l=0*** соответствует круговой орбите. Энергетические состояния, отвечающие различным ***l***, называются подуровнями. ***l=0 – s-***подуровень, ***l=1 – p-***подуровень, ***l=2 – d-***подуровень, ***l=3 – f-***подуровень и т.д.
- ***Магнитное квантовое число m (m=0, ±1, ±2,…, ±l)*** определяет пространственную ориентацию эллиптической орбиты. Каждому значению ***l*** соответствует ***2l+1*** возможная пространственная ориентация и соответствующее количество орбит.
- **Спиновое квантовое число *s (s = ±1/2)*** соответствует моменту количества движения электрона вокруг собственной оси. Вектор этого момента может быть параллелен или антипараллелен вектору орбитального момента.

Магнитное квантовое число m



СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- ***Электронные оболочки*.**

$n=1$: $1s^2$

$n=2$: $1s^2 2s^2 2p^6$

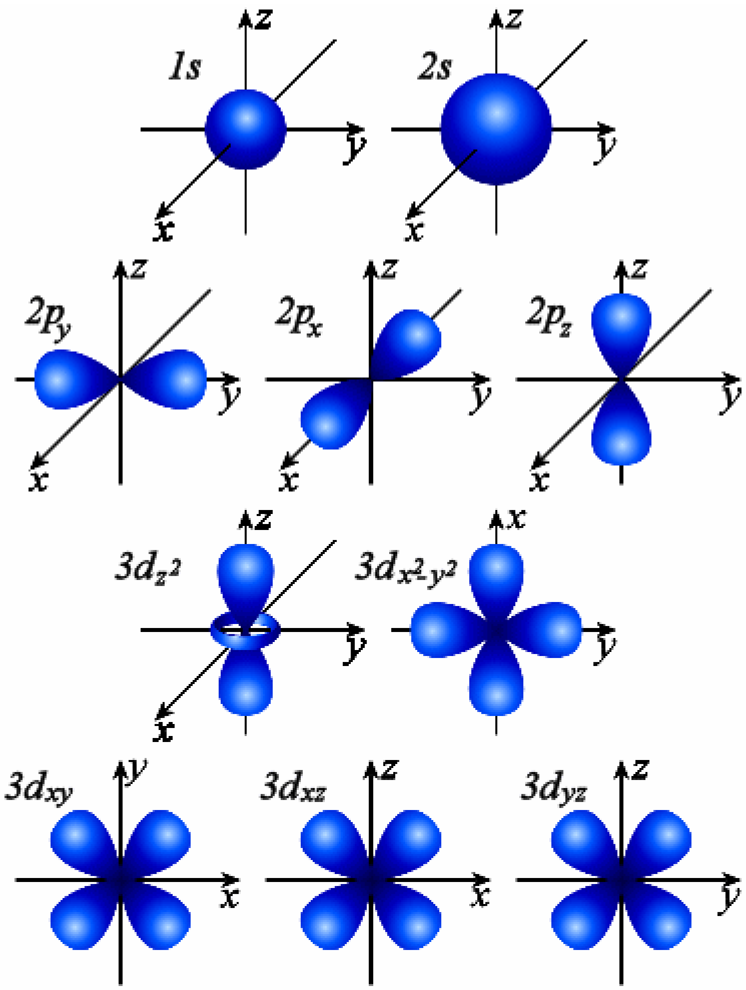
$n=3$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}$

$n=4$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{14}$

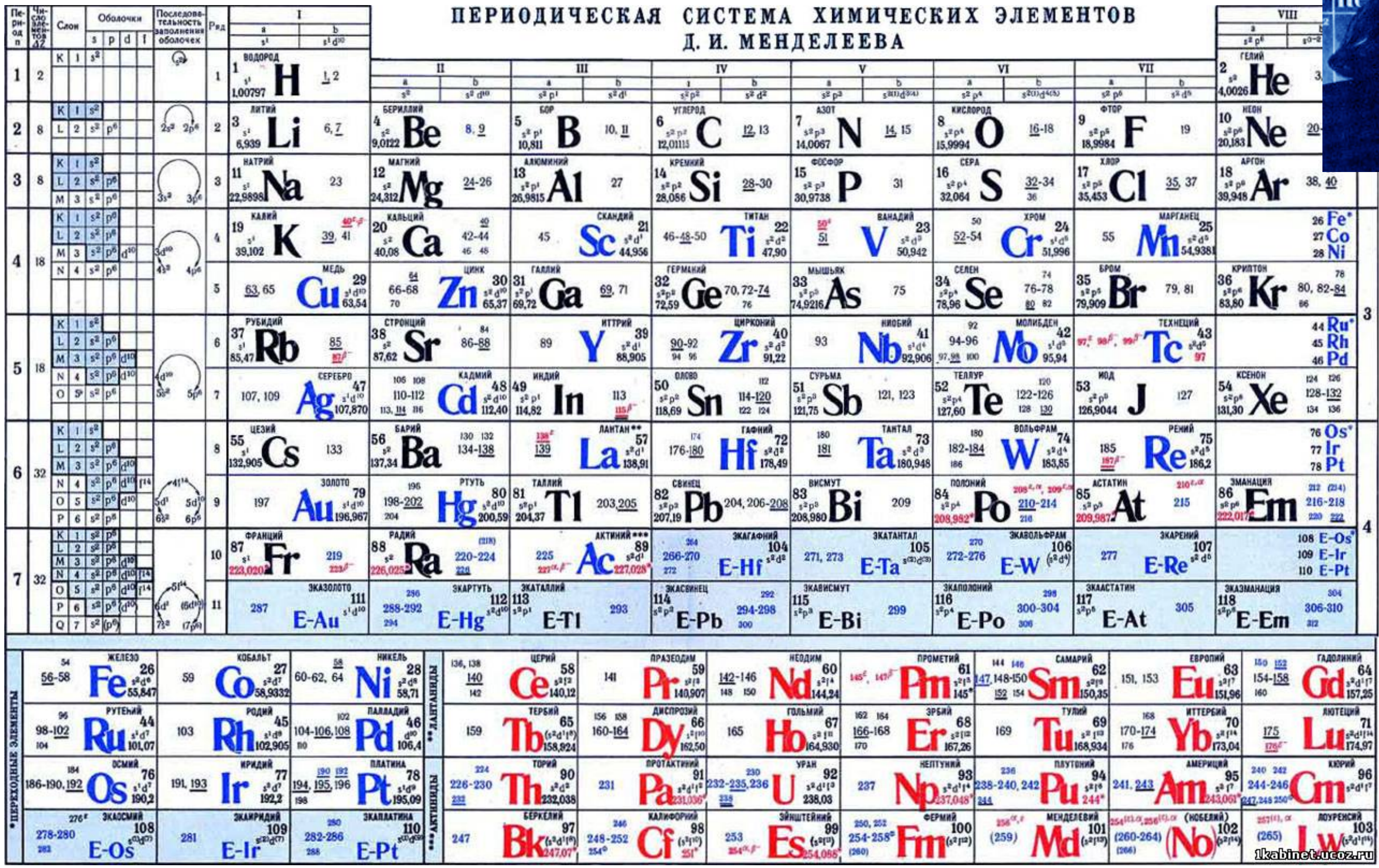
- **Последовательность заполнения оболочек:**

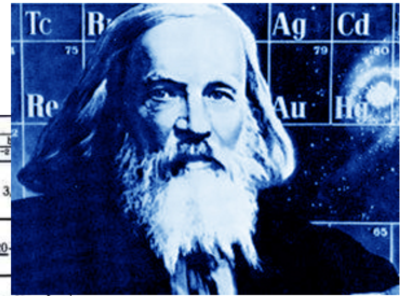
$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6 7s^2$

- *Углерод С: $1s^2 2s^2 2p^2$*
- *Кремний Si: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$*
- *Германий Ge: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$*



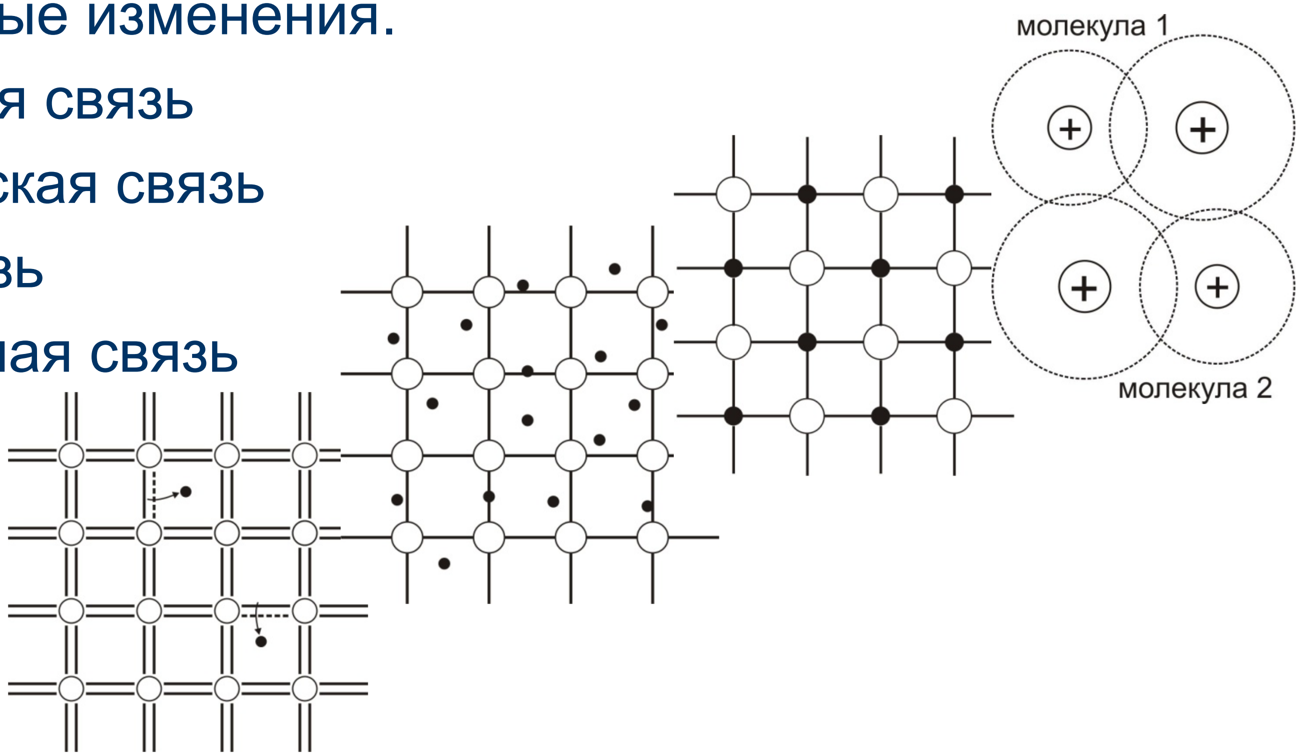
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ





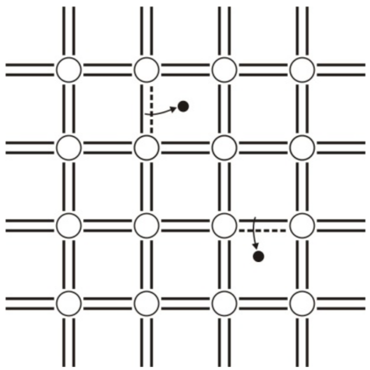
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

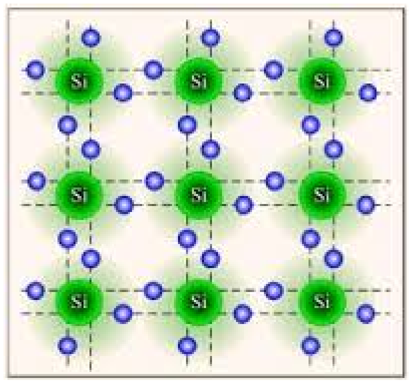
- При соединении атомов в молекулы и кристаллы структура энергетических уровней претерпевает кардинальные изменения.
- Ковалентная связь
- Металлическая связь
- Ионная связь
- Молекулярная связь

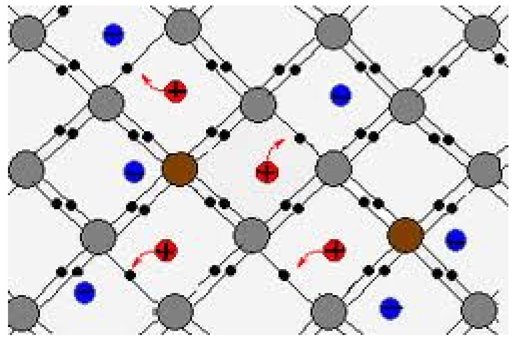


СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- При соединении атомов в молекулы и кристаллы структура энергетических уровней претерпевает кардинальные изменения.
- **Ковалентная связь в кристалле кремния**
- Металлическая связь
- Ионная связь
- Молекулярная связь

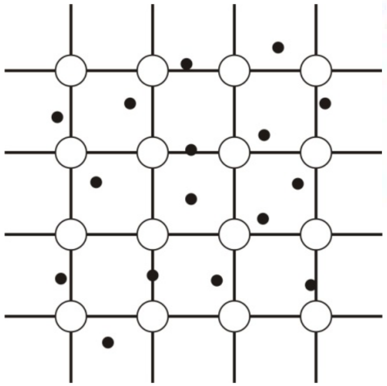


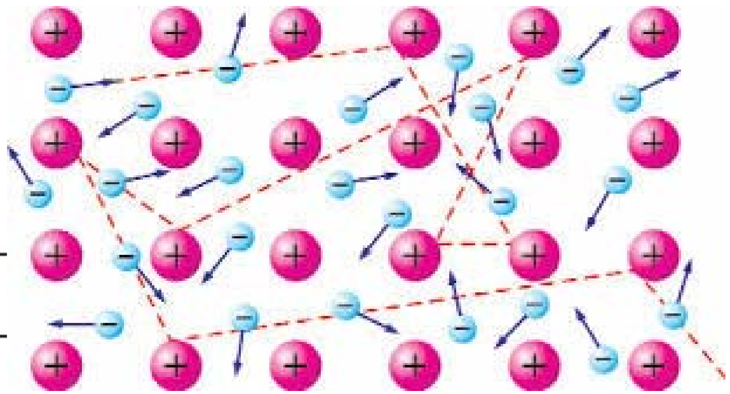




СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

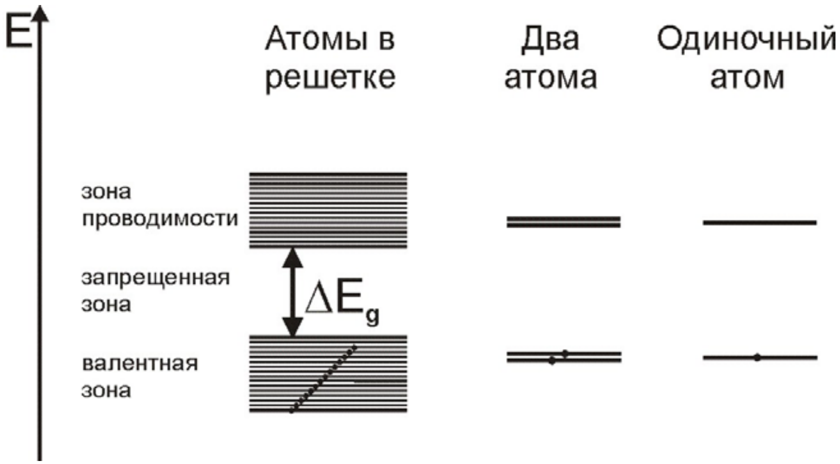
- При соединении атомов в молекулы и кристаллы структура энергетических уровней претерпевает кардинальные изменения.
- Ковалентная связь
- **Металлическая связь**
- Ионная связь
- Молекулярная связь





СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

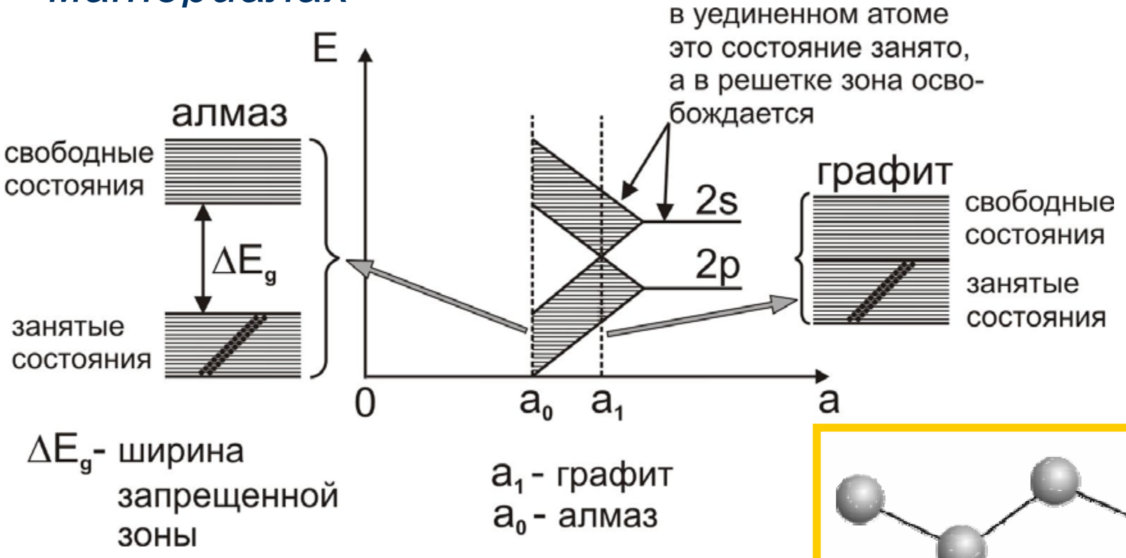
- ***Понятие о зонной структуре твердых тел***



- ***Обозначение степени заполнения энергетических зон***

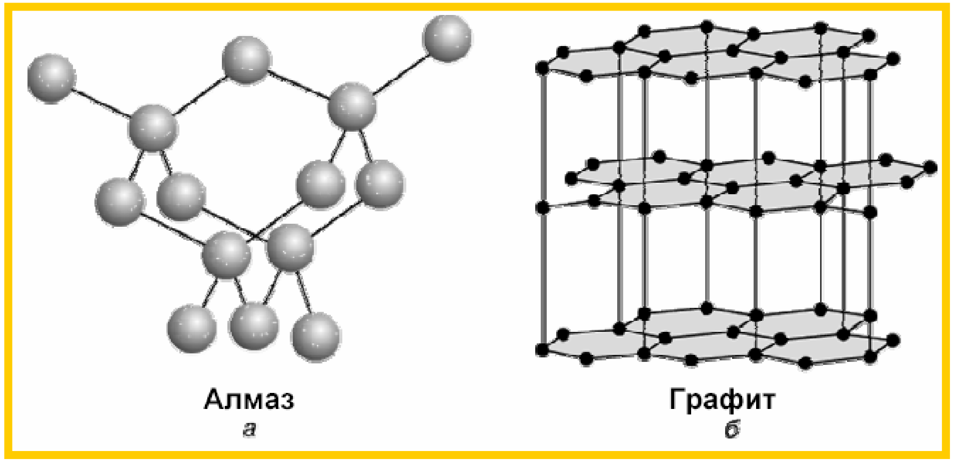
СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

- *Механизм образования энергетических зон в углеродных материалах*



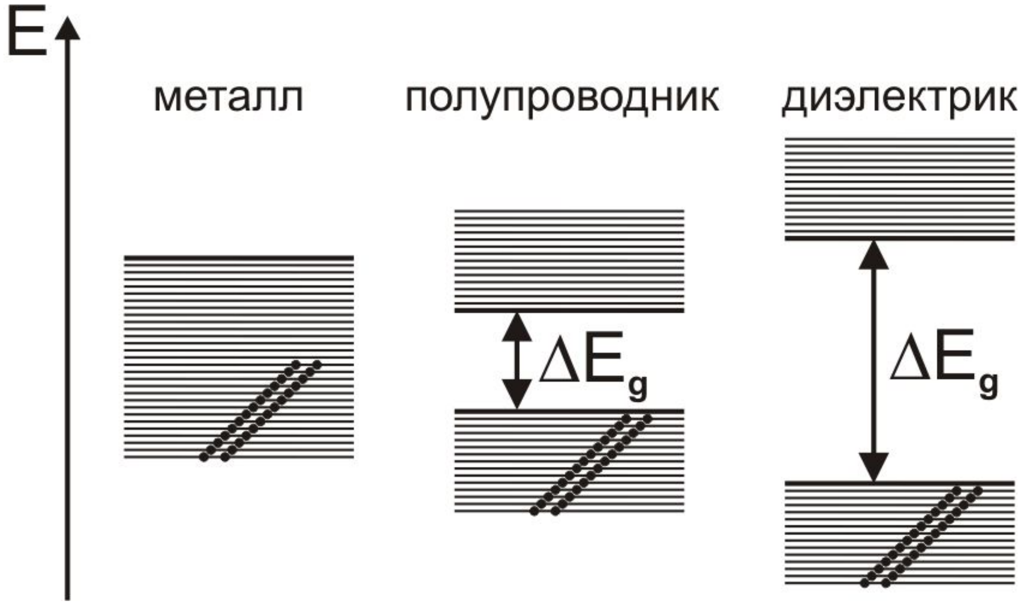
Ширина запрещенной зоны **Δ*Eg***:

Алмаз (**C**)	–	**5.3 эВ**
Кремний (**Si**)	–	**1.1 эВ**
Германий (**Ge**)	–	**0.72 эВ**



СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И КРИСТАЛЛОВ

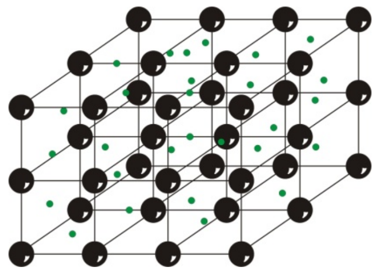
- ***Принцип разделения твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики***



В металле заполненные состояния граничат с незаполненными. В полупроводниках ширина запрещенной зоны 0,5-2,5 эВ, а в диэлектриках >5эВ.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

- Для описания движения электронов в твердом теле необходимо выбрать адекватную модель, по по возможности, не слишком сложную:
- ***Модель электронного газа***



Тепловое движение электронов

$$\frac{mv_T^2}{2} = \frac{3}{2}k_B T$$

$$v_T \sim 10^5 \, м/с \; при = 300\,K$$

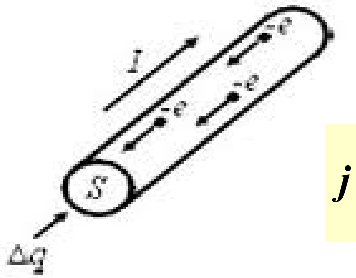
Распределение **Больцмана**

$$p(E) = Ae^{-\frac{E}{k_B T}}$$

Дрейф в электрическом поле

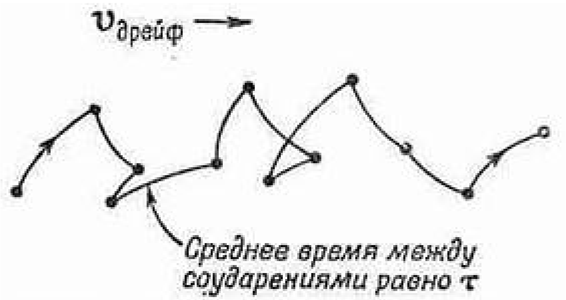
$$v_{Др} = \frac{1}{2}\frac{eE}{m}\tau = \frac{elE}{2mv_T}$$

$$\vec{j} = env_{Др} = \frac{e^2 nl}{mv_T}\vec{E} = \frac{1}{\rho}\vec{E}$$



$$j = \frac{I}{S} = \frac{1}{\rho}E = \frac{1}{\rho}\frac{U}{L} \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

Закон **Ома**



$$\tau = \frac{l}{v_T}$$

Удельная проводимость

$$\sigma = \frac{e^2 nl}{mv_T}$$

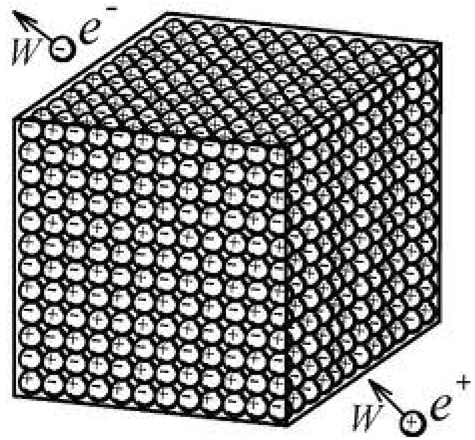
Удельное сопротивление

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

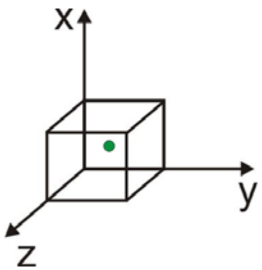
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

$$p_n = \frac{\pi\hbar n}{L}$$

- ***Квантовая модель электропроводности. Трехмерный ящик.***

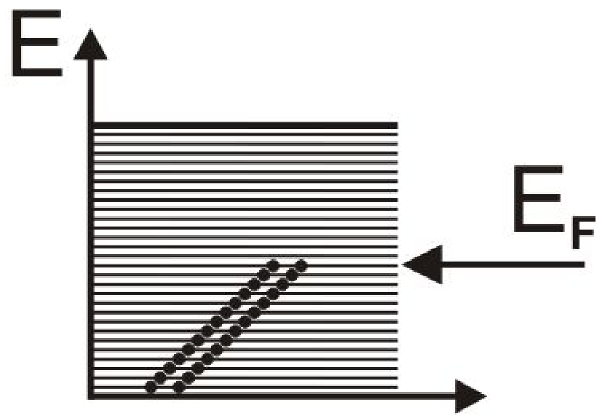


$$n_x = \frac{L}{\pi\hbar} p_{n_x}, \quad n_y = \frac{L}{\pi\hbar} p_{n_y}, \quad n_z = \frac{L}{\pi\hbar} p_{n_z}$$



$$p^2 = \frac{\pi^2\hbar^2}{L^2}\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right)$$

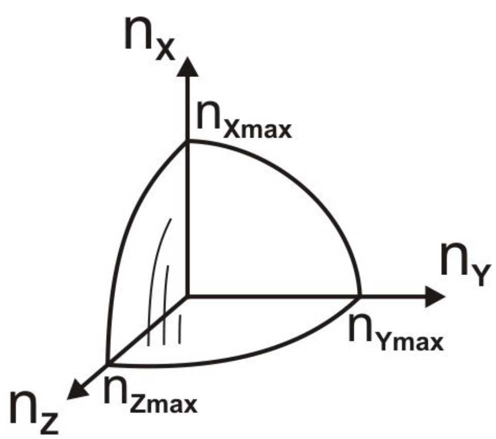
$$E^2 = \frac{p^2}{2m} = \frac{\pi^2\hbar^2}{2mL^2}\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right) \sim \frac{1}{L^2}$$



- **Энергия Ферми.** Уровень энергии E_F, до которого заполнены все электронные состояния, называется уровнем Ферми.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

- ***Оценка числа состояний***
  Максимальное возможное квантовое число определяется максимальным импульсом, то есть импульсом электрона на ***уровне Ферми***.



$$n_{\mathbf{x}\max} = n_{\mathbf{y}\max} = n_{\mathbf{z}\max} = \frac{L}{\pi\hbar} p_F$$

Полное число состояний

$$n_x^2 + n_x^2 + n_x^2 \le \frac{L^2}{\pi^2\hbar^2} p_F^2 \quad и \quad n_{x,y,z} \le \frac{L}{\pi\hbar} p_F$$

Это 1/8 от объема шара в пространстве квантовых чисел (сфера Ферми)

$$S = \frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3}\pi \frac{p_F^3 L^3}{\pi^3\hbar^3} = \frac{p_F^3 V}{6\pi^2\hbar^3}$$

С учетом принципа Паули $S = \dfrac{p_F^3 V}{3\pi^2\hbar^3}$

или, в расчете на единицу объема $N = \dfrac{S}{V} = \dfrac{p_F^3}{3\pi^2\hbar^3}$

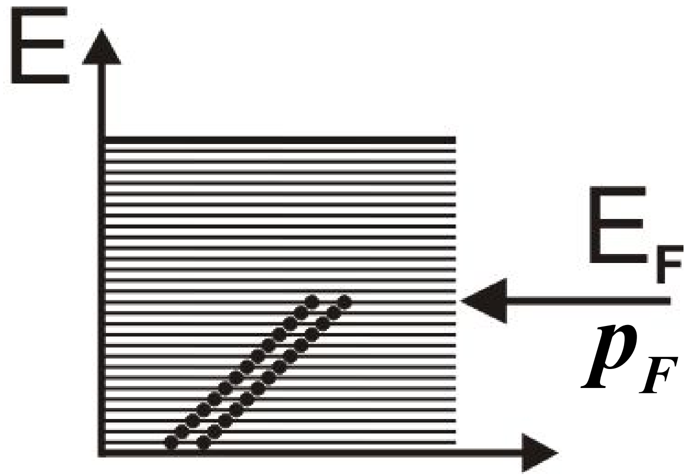
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

- *Импульс электрона на уровне Ферми*

$$p_F = \left(3\pi^2\hbar^3 N\right)^{1/3}$$

- *Энергия Ферми*

$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m}\left(3\pi^2 N\right)^{2/3}$$



- Плотность энергетических состояний: количество частиц с энергией в интервале вблизи уровня Ферми: $(E, E+\Delta E)$

$$dN = d\left(\frac{1}{3\pi^2}\left(\frac{2mE}{\hbar^2}\right)^{3/2}\right) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2}\frac{m^{3/2}}{\hbar^3}E^{1/2}dE$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

- Плотность состояний с энергией ***E*** недалеко от уровня Ферми E_F:

$$N(E) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{m^{3/2}}{\hbar^3} E^{1/2}$$

- **Распределение Ферми**

  не все ***N(E)*** заполнены, нужно знать вероятность заполнения ***f(E),*** чтобы определить число носителей заряда

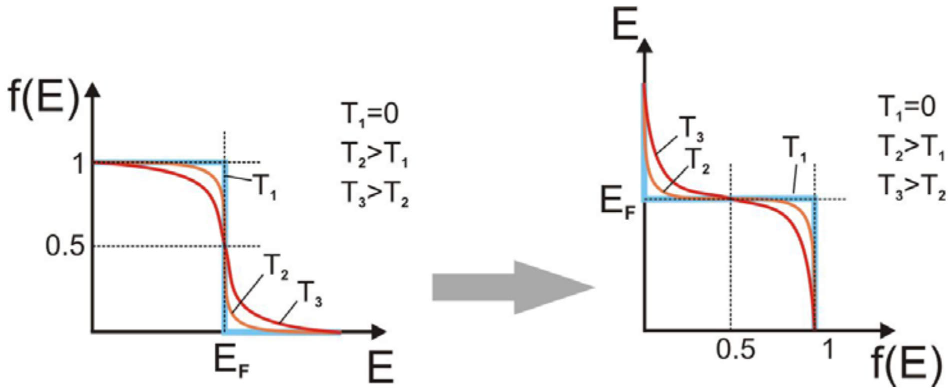
$$n(E) = N(E) \cdot f(E),$$ **концентрация электронов** $$n = \int_0^\infty n(E)\,dE$$

Для **фермионов** (частиц со спином 1/2):

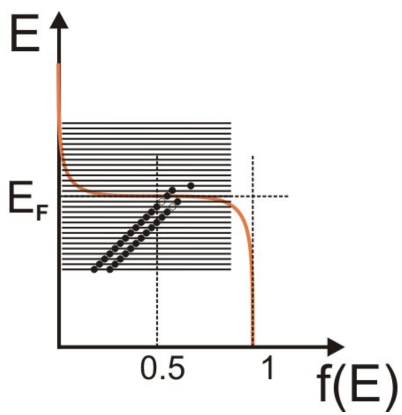
$$\boxed{f_F(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B T}}}}$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

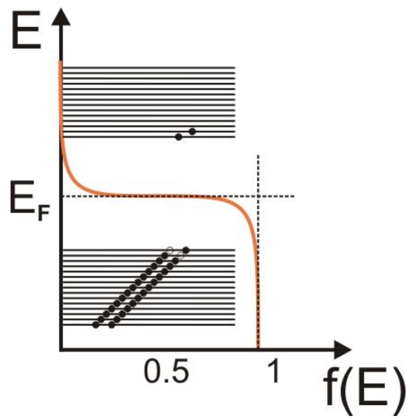
- Графический вид **распределения Ферми**



Уровень Ферми **в металле**

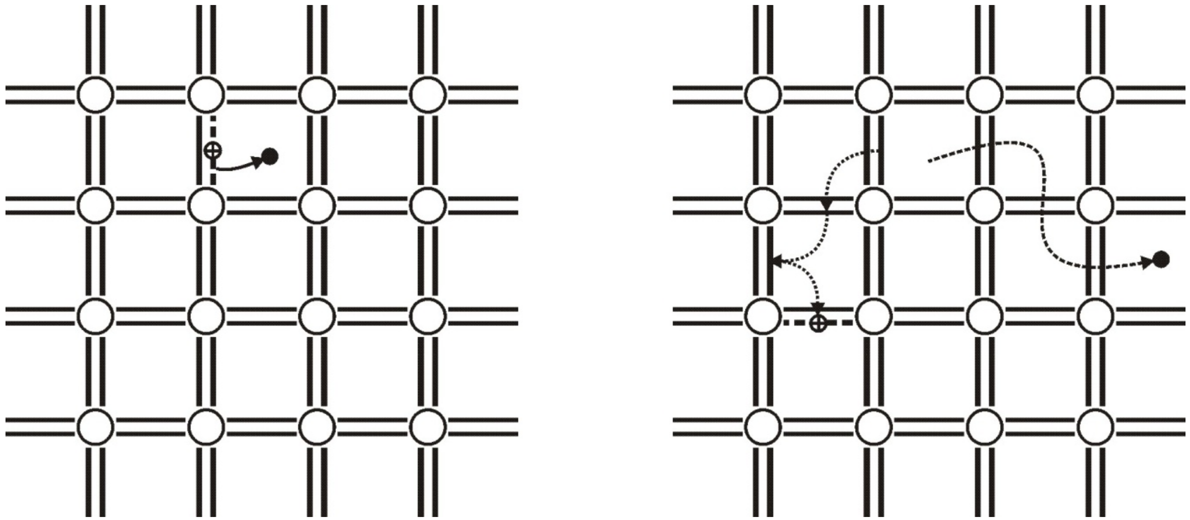


Уровень Ферми **в полупроводнике**



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

•*Электроны и дырки*



Количество электронов и дырок в чистом, беспримесном и бездефектном полупроводнике очень мало, единицы на 10^{10}-10^{14} атомов. С увеличением температуры количество электронов и дырок быстро растет. Увеличить количество электронов и дырок можно целенаправленно, с помощью легирования.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

- ***Количество электронов в зоне проводимости полупроводника***

$$n = \int_0^\infty n(E)dE = \int_0^\infty N(E)\cdot f(E)dE,$$

$$\text{при } E_C - E_F, E_F - E_V >> k_B T \Rightarrow f_F(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}} \sim e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$$

$$N(E) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2}\frac{m_n^{*3/2}}{\hbar^3}E^{1/2}$$

$$n = \int_{E_g}^\infty \frac{\sqrt{2}}{\pi^2}\frac{m_n^{*3/2}}{\hbar^3}(E - E_C)^{1/2} e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} dE$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

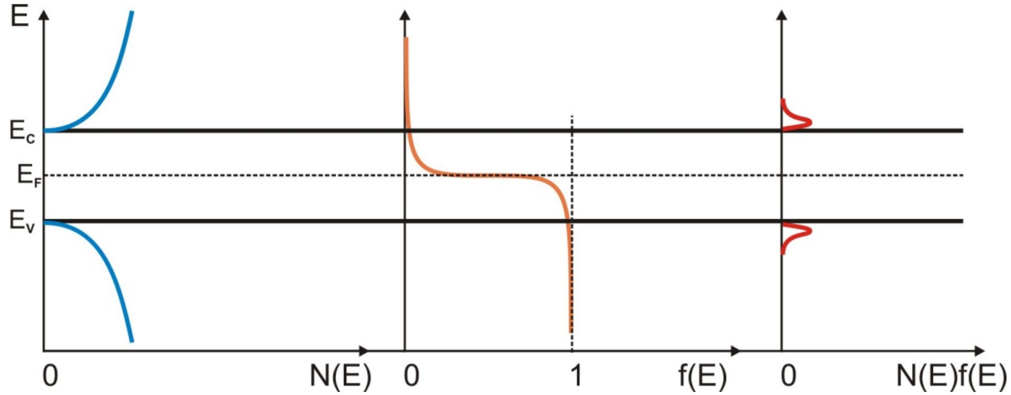
- ***Количество электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне полупроводника***

$$n = N_C\, e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}},$$

$$где\ N_C = 2\frac{m_n^{*3/2}\left(k_B T\right)^{3/2}}{2\sqrt{2}\pi^{3/2}\hbar^3} e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$

$$p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

$$где\ N_V = 2\frac{m_p^{*3/2}\left(k_B T\right)^{3/2}}{2\sqrt{2}\pi^{3/2}\hbar^3} e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$



$$np = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}} =$$

$$N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_V}{k_B T}} =$$

$$N_C N_V e^{-\frac{E_G}{k_B T}}$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

- ***Собственная концентрация носителей заряда в беспримесном (истинном) полупроводнике***

$$n = p = n_i \quad \text{и} \quad n_i^2 = np \approx N_C N_V e^{-\frac{E_G}{k_B T}} \approx N_C^2 e^{-\frac{E_G}{k_B T}}$$

$$\boxed{n_i \approx N_C e^{-\frac{E_G}{2k_B T}}}$$

- ***Уровень Ферми в беспримесном полупроводнике***

$$f(E_C) = 1 - f(E_V)$$

$$\frac{1}{1+e^{\frac{E_C-E_F}{k_B T}}} = 1 - \frac{1}{1+e^{\frac{E_V-E_F}{k_B T}}} = \frac{e^{\frac{E_V-E_F}{k_B T}}}{1+e^{\frac{E_V-E_F}{k_B T}}}$$

$$1 + e^{\frac{E_V-E_F}{k_B T}} = e^{\frac{E_V-E_F}{k_B T}} + e^{\frac{E_V+E_C-2E_F}{k_B T}}$$

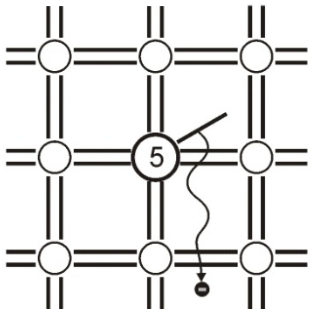
$$\boxed{E_F = \frac{E_V + E_C}{2}}$$

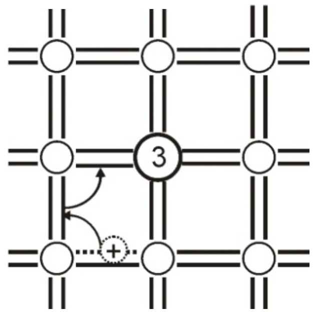
СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Собственная и примесная проводимость

При комнатной температуре в кремнии (Si) $n_i \sim 10^9 см^{-3}$ и $n_i \sim 10^{13} см^{-3}$ в германии (Ge). Эти концентрации незначительны по сравнению с концентрацией атомов полупроводника $\sim 10^{23} см^{-3}$

$$\boxed{N_D, N_A \sim 10^{15} ... 10^{19}\, cm^{-3} >> n_i \left(10^9 ... 10^{13}\, cm^{-3}\right)}$$





$$n_n = N_D + p_n, \quad n_n \cdot p_n = n_i^2, \quad n_n \gg p_n, \quad n_n \approx N_D$$

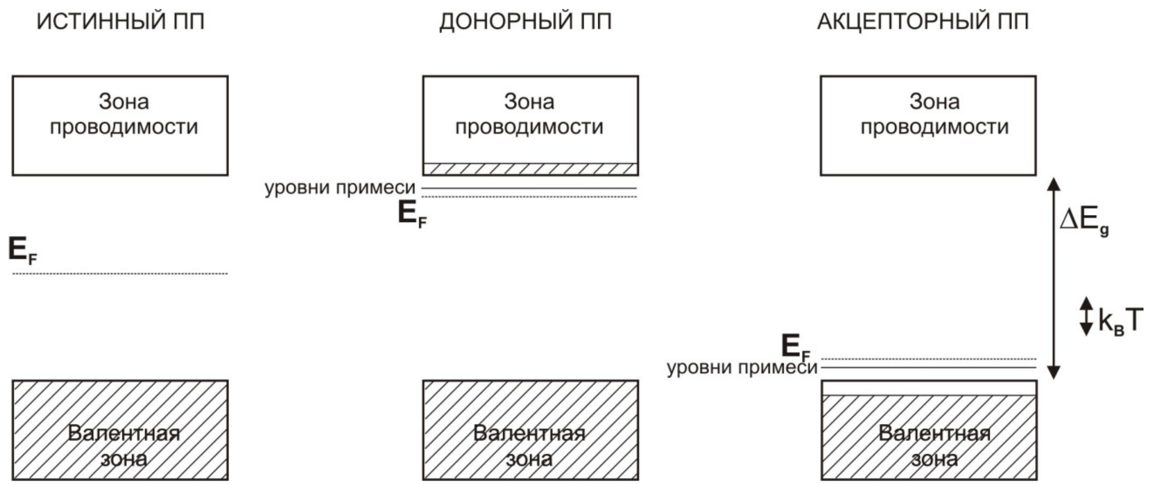
$$p_p = N_A + n_p, \quad p_p \cdot n_p = n_i^2, \quad p_p \gg n_p, \quad p_p \approx N_A$$

СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- ***Положение уровня Ферми в электрически нейтральном и легированном полупроводнике***

$$E_F \approx \frac{E_C + E_V}{2} + k_B T \cdot ln\frac{n_n}{n_i} \approx$$

$$\approx \frac{E_g}{2} + k_B T \cdot ln\frac{n_n}{n_i}$$



$$E_F \approx \frac{E_g}{2} + k_B T \cdot ln\frac{N_D}{n_i}$$

$$E_F \approx \frac{E_g}{2} - k_B T \cdot ln\frac{p_n}{n_i}$$

$$n_n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$

$$p_n = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

$$\frac{n_n}{p_n} = \frac{N_C}{N_V} e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} e^{\frac{E_F - E_V}{k_B T}} \approx e^{-\frac{E_C - E_V - 2E_F}{k_B T}}$$

$$n_n \approx N_D \qquad p_p \approx N_A$$

$$E_F \approx \frac{E_g}{2} - k_B T \cdot ln\frac{p_p}{n_i}$$

$$E_F \approx \frac{E_g}{2} - k_B T \cdot ln\frac{N_A}{n_i}$$

$$E_F \approx \frac{E_g}{2} + k_B T \cdot ln\frac{n_p}{n_i}$$

СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- ***Технологии легирования полупроводников***

Высокотемпературная диффузия: легирующая примесь приводится в соприкосновение с поверхностью монокристалла кремния. Монокристалл разогревается, и атомы примеси проникают внутрь монокристалла, замещая атомы кремния в решетке.

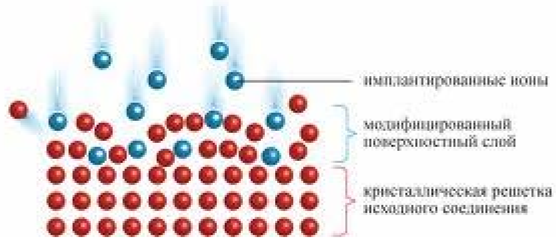
Ионная имплантация (ионное внедрение, ионное легирование): процесс введения примесных атомов в твердое тело путем бомбардировки его поверхности ускоренными ионами.

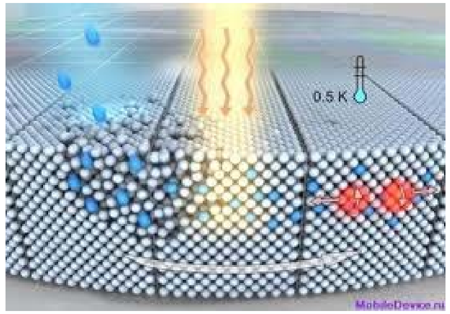
Радиационно-стимулированная диффузия: бомбардировка кристалла легкими ионами, энергия которых передается атомам подложки. Вследствие этого наблюдается смещение атомов в междоузельное пространство и образуются вакансии. В определенных условиях вакансии могут мигрировать в кристалле, меняясь положением в решетке с соседними атомами основного кристалла или атомами примеси.

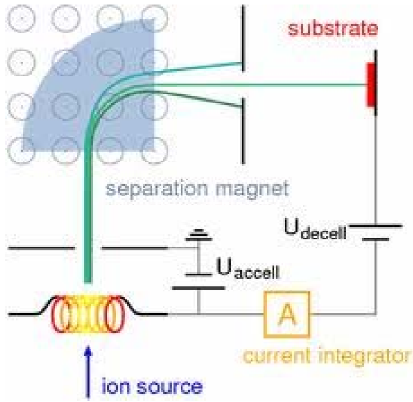
Лазерный отжиг. В процессе легирования лазерное излучение используется как для непосредственного селективного легирования, так и для отжига пластин после проведения ионной имплантации, а также диффузии, эпитаксиального наращивания и т.д.

СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- ***Технологии легирования полупроводников***







ПЛАН СЛЕДУЮЩЕЙ ЛЕКЦИИ

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

- ***Свободные носители заряда в металлах и полупроводниках.*** *Полупроводники в микроэлектронике. Носители заряда в полупроводнике. Дрейфовый ток. Диффузионный ток. Закон Ома. Уравнение непрерывности*
- ***Электронно-дырочные переходы и их характеристики.*** *Контактные явления на границе двух полупроводников. Электронно-дырочный переход. Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя. Высота потенциального барьера. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p-n-переходе. Вольт-амперная характеристика. Полупроводниковые диоды. Дифференциальное сопротивление p-n-переходов. Барьерная емкость p-n-перехода. Диффузионная емкость p-n-перехода.*
- ***Полупроводниковые диоды****. Быстродействие полупроводниковых диодов. Виды полупроводниковых диодов.*
- ***Контакт металл - полупроводник.*** *Диоды Шоттки. Омические контакты.*
- *Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Простейшие* ***оптоэлектронные*** *устройства*

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

- ***Движение свободных носителей заряда в металлах и полупроводниках.*** *Полупроводники в микроэлектронике. Носители заряда в полупроводнике. Дрейфовый ток. Диффузионный ток. Закон Ома. Уравнение непрерывности*

- ***Электронно-дырочные переходы и их характеристики.*** *Контактные явления на границе двух полупроводников. Электронно-дырочный переход. Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя. Высота потенциального барьера. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p-n-переходе. Вольт-амперная характеристика. Полупроводниковый диод. Дифференциальное сопротивление p-n-переходов. Барьерная емкость p-n-перехода. Диффузионная емкость p-n-перехода.*

- ***Полупроводниковые диоды****. Быстродействие полупроводниковых диодов. Виды полупроводниковых диодов.*

- ***Контакт металл - полупроводник.*** *Диоды Шоттки. Омические контакты.*

- ***Оптоэлектроника.*** *Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Простейшие оптоэлектронные устройства*