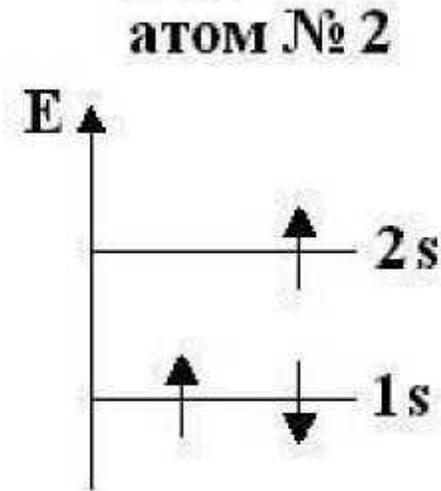
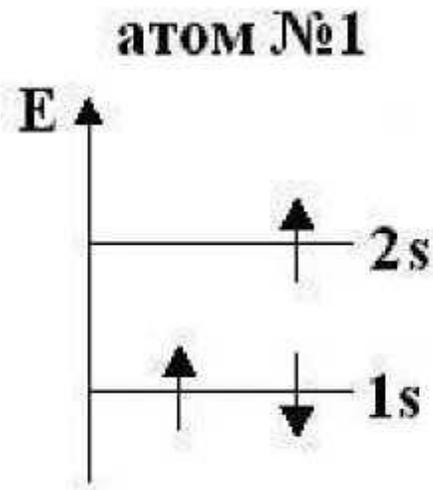


*Лекция 5*

**Элементы зонной теории  
твёрдого тела**

# Происхождение энергетических зон в кристаллах.

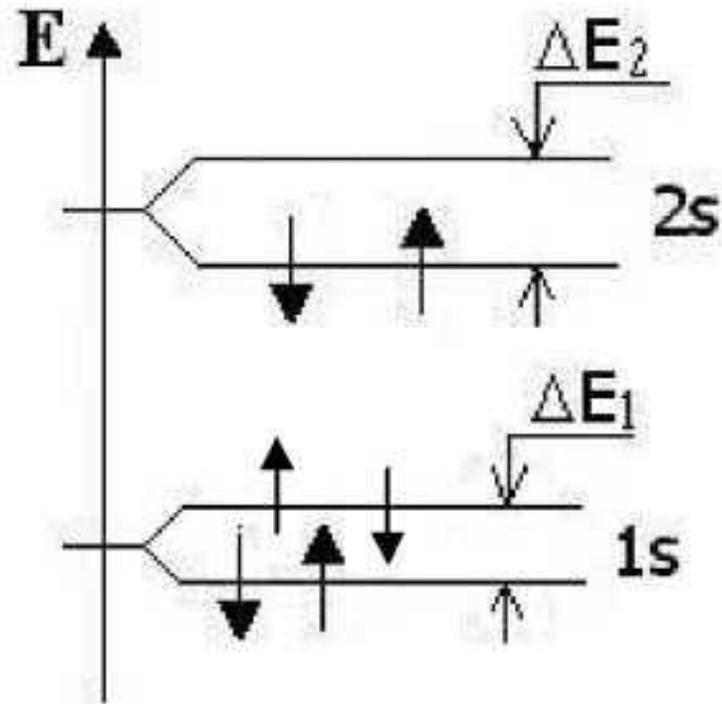
- Рассмотрим образование энергетических зон на примере воображаемого процесса образования кристалла лития.



если атомы расположены далеко друг от друга (изолированы)

# Энергетическая схема системы из двух атомов.

При сближении двух атомов энергетические уровни *расщепляются* на два подуровня.

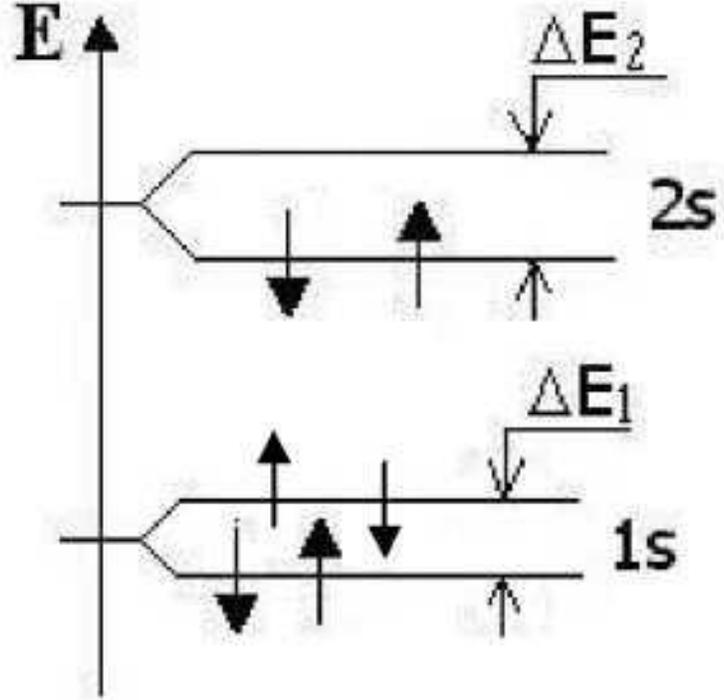


Расщепление обусловлено принципом Паули:  
в объединённой системе не может быть двух электронов в одинаковом состоянии

Уровни расщепляются независимо от того, заняты они или свободны в изолированном атоме

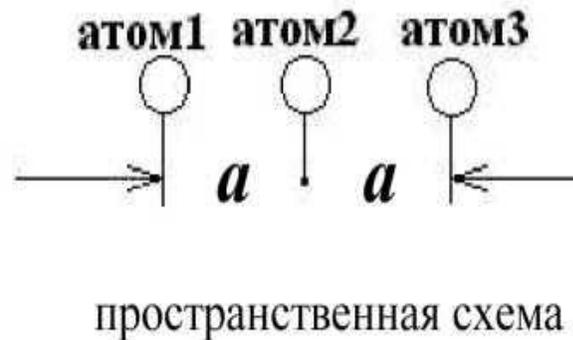
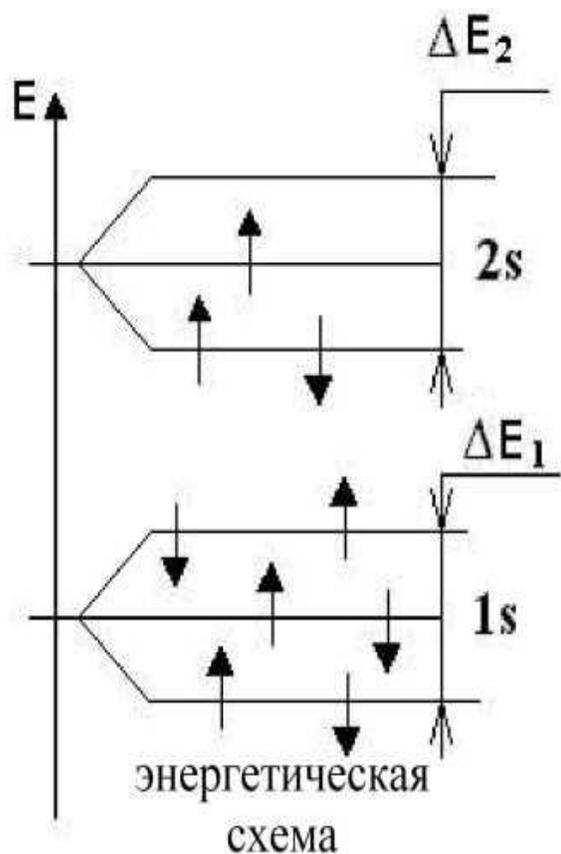
1. соседние зоны могут перекрывать  
ся

2. зоны не перекрываются, разделяясь запрещённой зоной



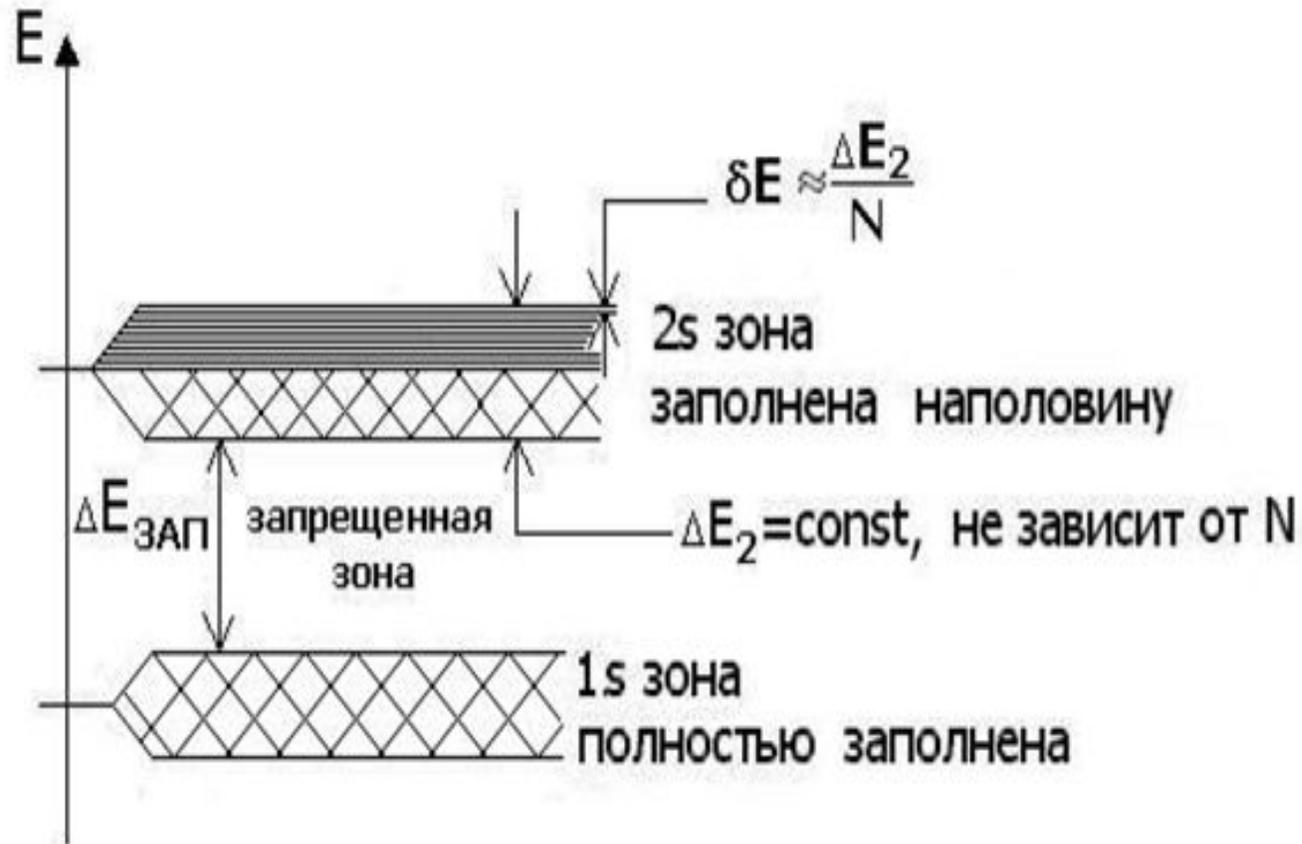
- Величина расщепления уровней  $\Delta E$  зависит от расстояния между атомами.
- **При сближении атомов  $\Delta E$  растет.**
- $\Delta E_1 < \Delta E_2$ , так как в состоянии 1s электроны сильнее связаны с ядром, чем в состоянии 2s.

# Энергетическая схема системы из трёх атомов.



- Постоянная кристаллической решетки  $a$  – не изменяется
- Величина расщепления ( $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$ ) не изменяются
- Третий энергетический уровень расположился **между** двумя крайними.

# Энергетическая схема системы, состоящей из $N$ атомов лития



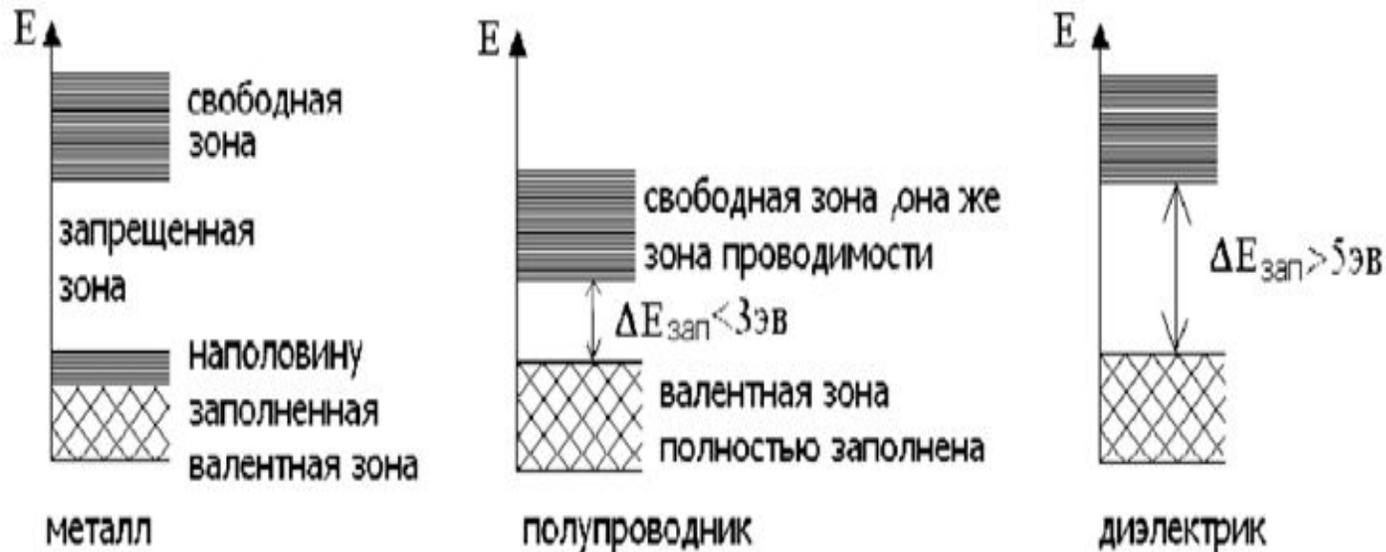
**Валентной зоной**  
называется зона,  
получившаяся из  
последнего  
занятого уровня  
изолированного  
атома

•  $\Delta E \sim 1 \text{ эВ}$

•  $\delta E = \Delta E / N \sim 10^{-23} \text{ эВ}$ .

## Зонная теория позволяет объяснить с единой точки зрения существование металлов, полупроводников и диэлектриков

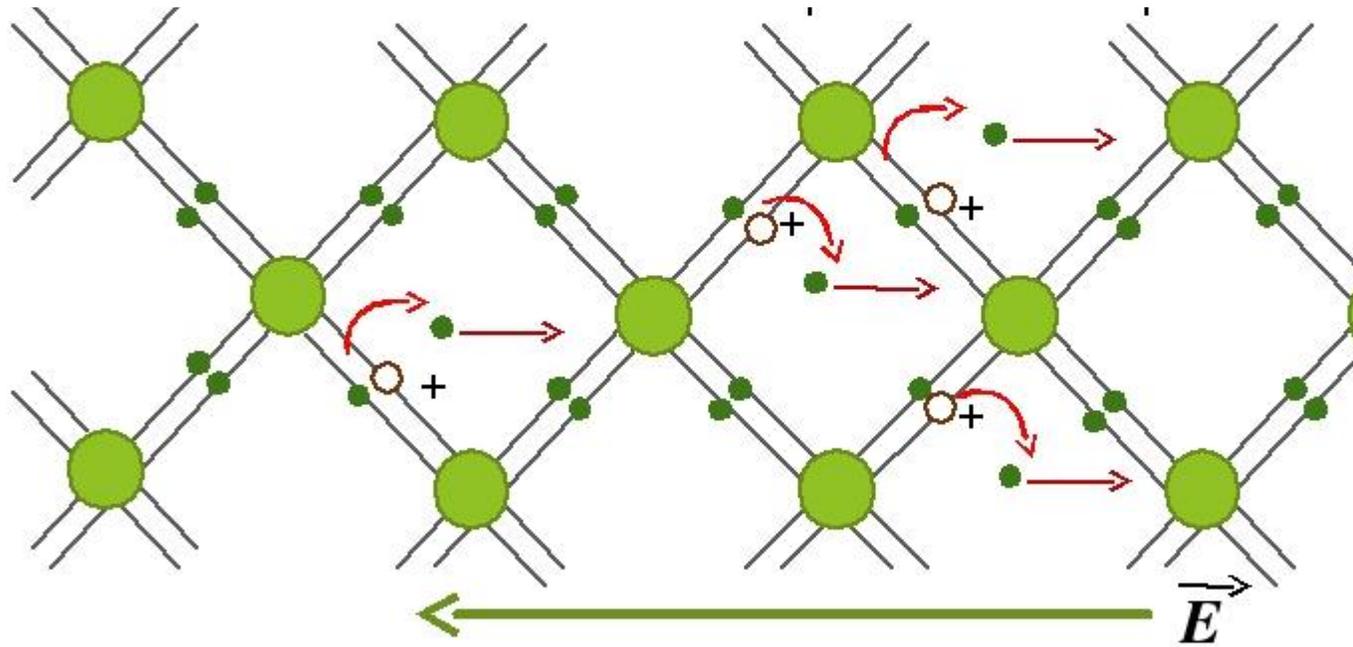
В зависимости от степени заполнения зон электронами и от ширины запрещённой зоны возможны случаи:



- Электроны, переброшенные внешним воздействием в свободную зону, называют **электронами проводимости**, а свободная зона называется **зоной проводимости**.

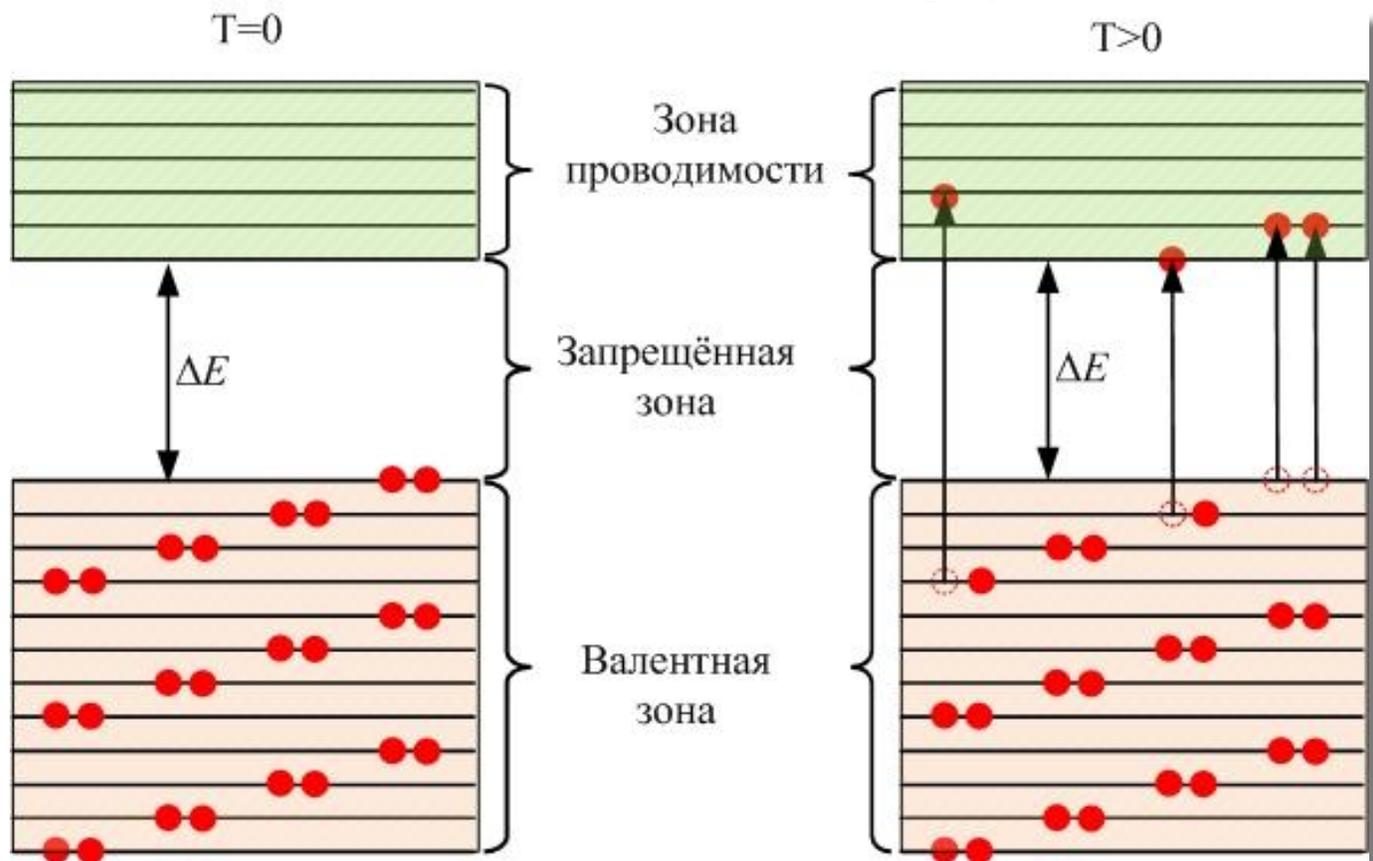
# Собственная проводимость полупроводников

Собственные полупроводники – химически чистые, без примесей



- Ширина запрещенной зоны у германия 0,66 эВ,
- у кремния - 1, эВ (при  $T = 300 \text{ K}$ )

## Собственная проводимость полупроводников

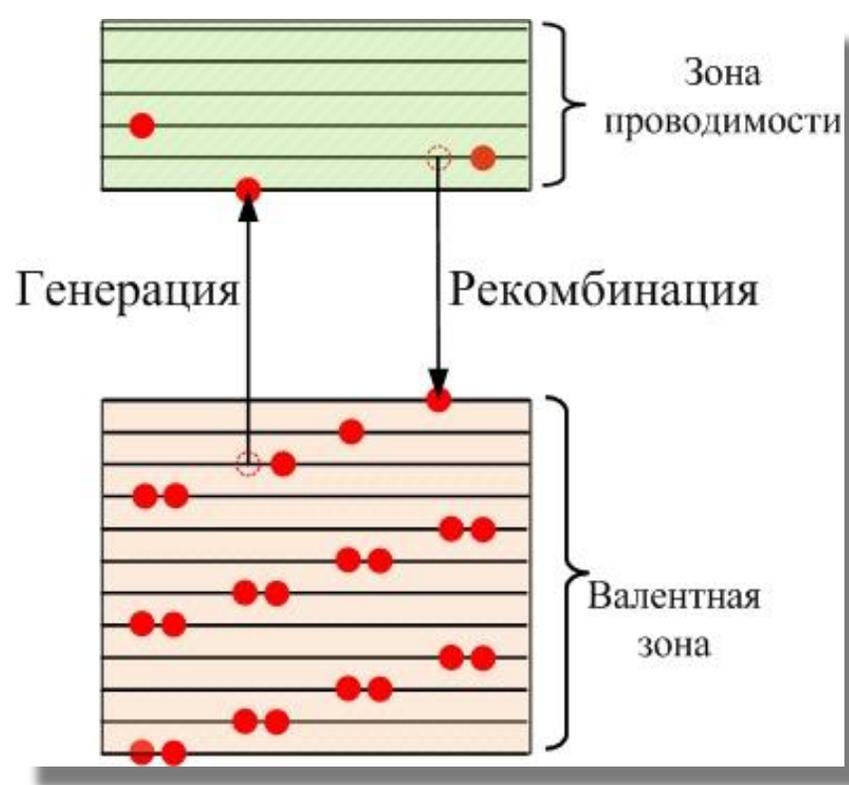


При  $T>0$  электроны с верхних уровней валентной зоны переходят на нижние уровни зоны проводимости

В валентной зоне возникают вакансии – дырки  
Дырка – это отсутствие электрона, разорванная ковалентная связь

В собственном полупроводнике действует два механизма проводимости: дырочный и электронный

Концентрация дырок равна концентрации электронов:  $n_p = n_n$

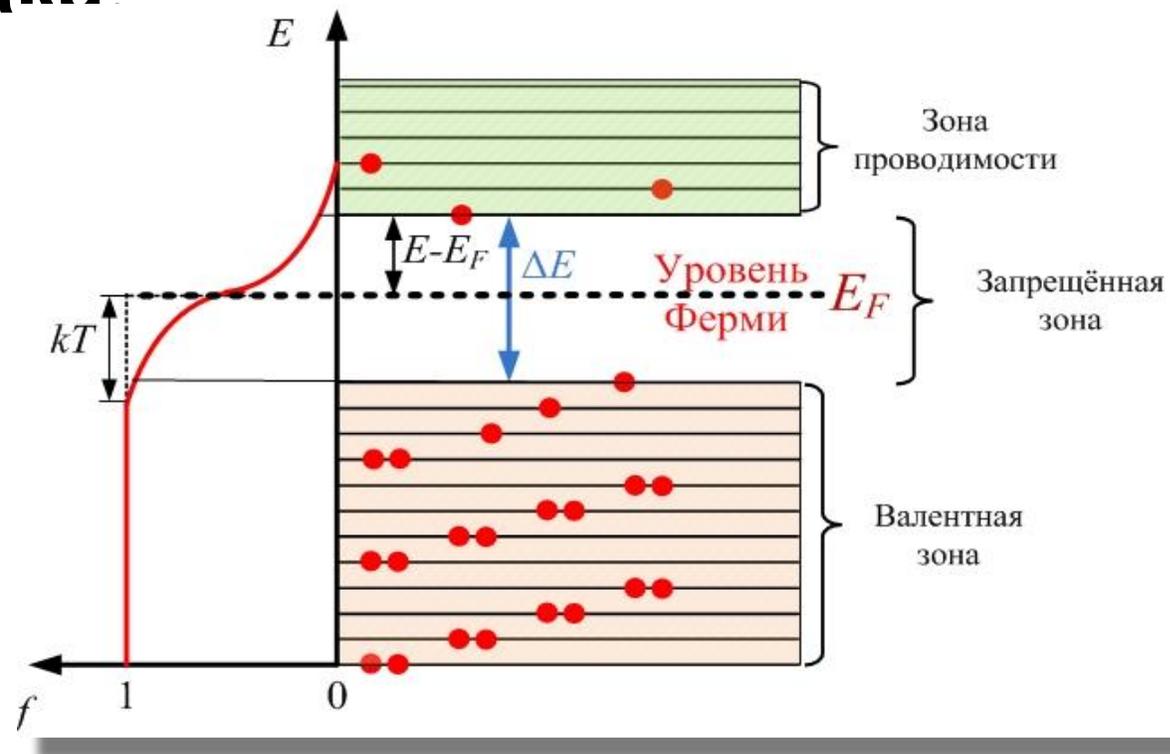


**В полупроводнике существует динамическое равновесие между двумя процессами:**  
**Генерация свободных электронов и дырок под действием теплового движения;**  
**Рекомбинация, при которой дырки и электроны, встретившись, взаимно уничтожаются как свободные носители заряда**

- Проводимость, возникающая за счет переходов под действием температуры электронов идеального кристалла полупроводника из валентной зоны в свободную (зону проводимости), называется **собственной проводимостью** полупроводника.
- С ростом температуры растет равновесное число электронов в зоне проводимости и число дырок в валентной зоне.
- Следовательно, удельная проводимость полупроводников будет расти с температурой.

**Распределение электронов по уровням зоны проводимости и валентной зоны описывается функцией Ферми-Дирака:**

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$



$E_F$  – энергия Ферми (энергия уровня, вероятность заполнения которого равна 0.5)

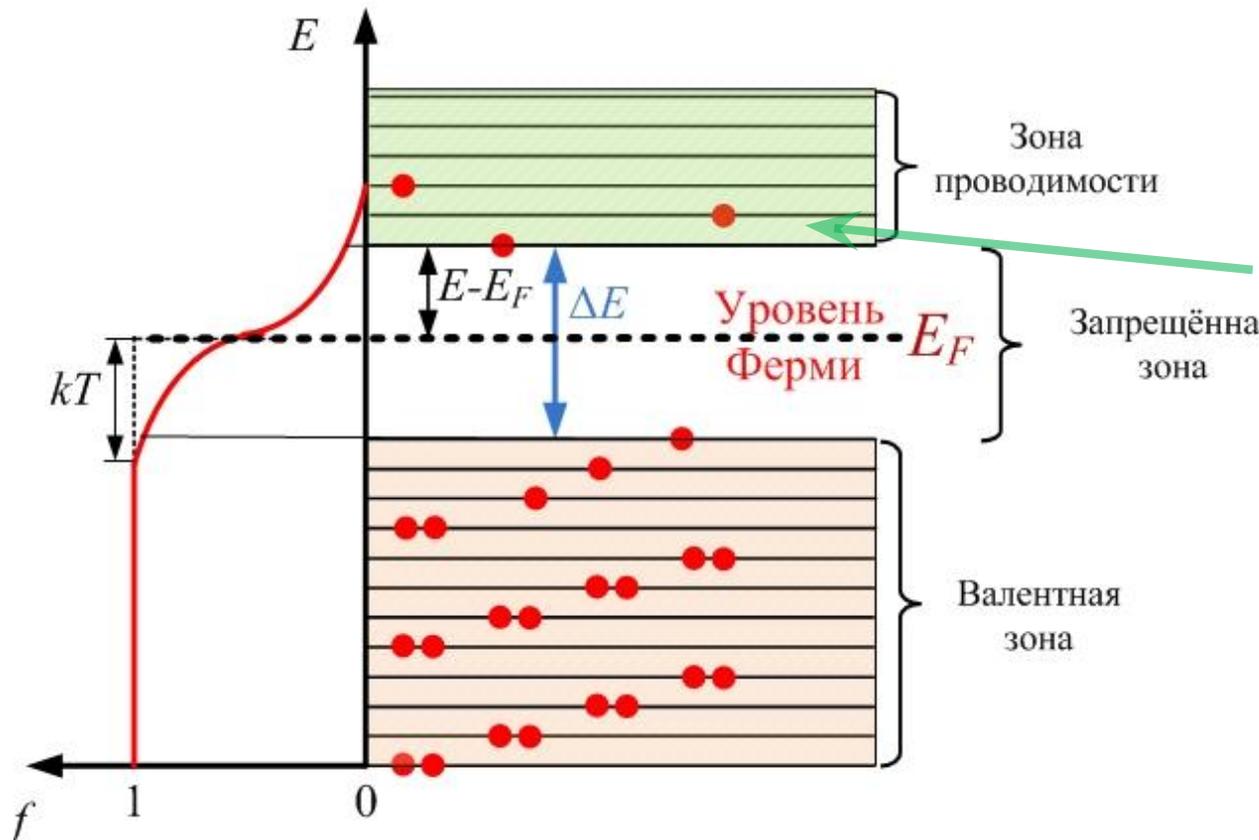
Для полупроводника уровень Ферми лежит в середине запрещённой зоны

При обычных (комнатных) температурах энергия теплового возбуждения много меньше ширины  $\Delta E$  запрещённой зоны ( $\Delta E \sim 1$  эВ):

$$kT \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 300\text{К} \approx 4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \approx 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

$$kT \ll \Delta E$$

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$$



Электроны находятся в зоне проводимости практически у её дна

$$E - E_F = \frac{\Delta E}{2}$$

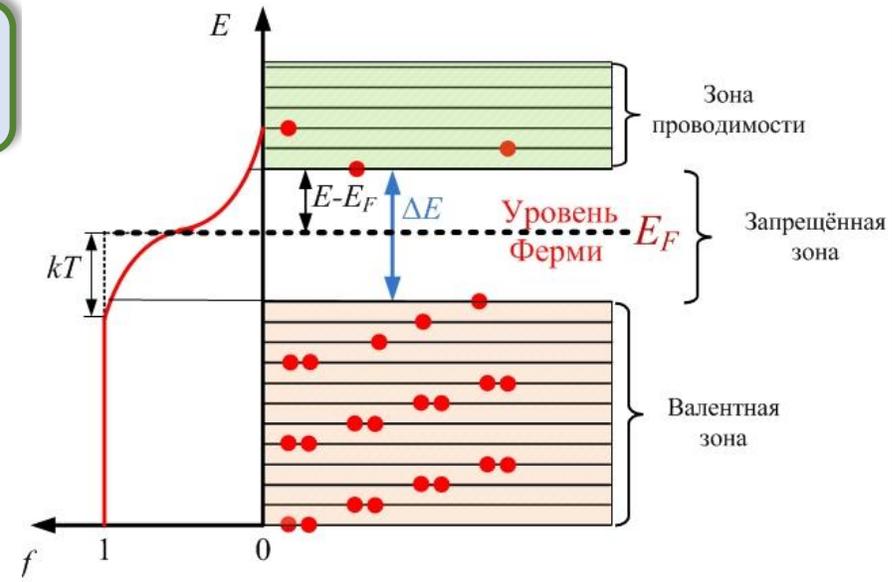
$$E - E_F \gg kT$$

## Зависимость проводимости полупроводников от температуры

$$E - E_F = \frac{\Delta E}{2}$$

$$\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) = \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) \gg 1$$

$$kT \ll \Delta E$$



$$\exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) + 1 = \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$$

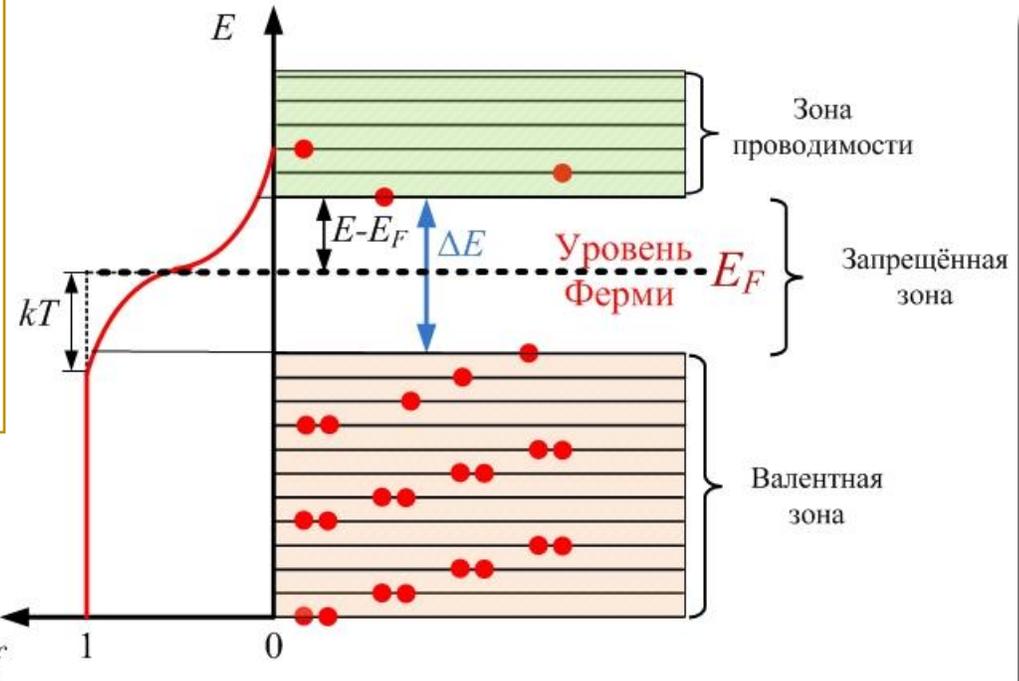
$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \equiv e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

## Зависимость проводимости Полупроводников от температуры

Концентрация  $n_n$  свободных электронов в зоне проводимости пропорциональна функции распределения  $f$  – вероятности заполнения уровней

$$n_n = n_p \sim f(E) = e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Это – классическое больцмановское распределение  
Электронный газ в полупроводнике – классический,  
невырожденный



## Зависимость проводимости полупроводников от температуры

Ток в чистом полупроводнике складывается из тока электронов и дырок

Удельная электропроводимость пропорциональна концентрации  $n$  свободных носителей и их подвижности  $u$

$$\gamma = e \cdot n \cdot (u_n + u_p)$$

слабо зависит от температуры

$$n_n = n_p \sim f(E) = e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

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

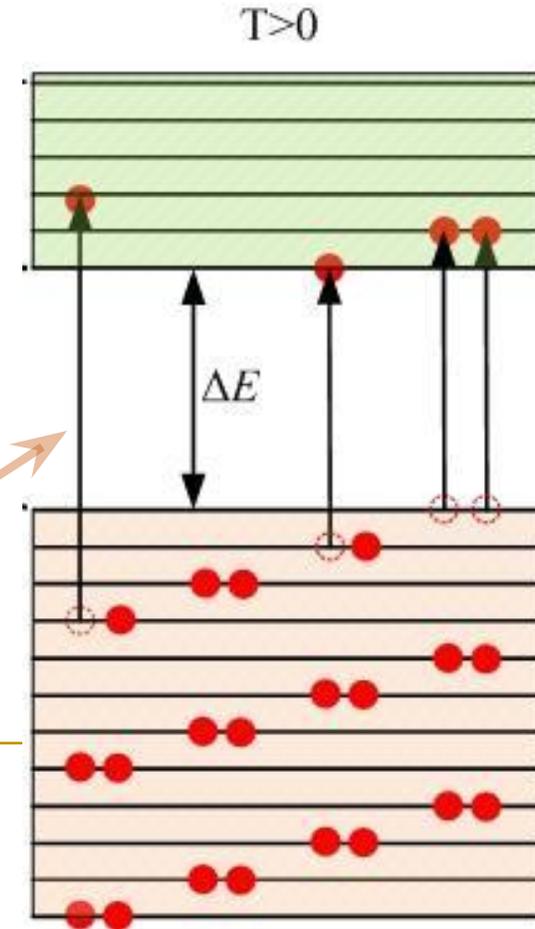
$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

## Зависимость проводимости полупроводников от температуры

$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$$

Сопротивление полупроводника с повышением температуры сильно уменьшается за счёт увеличения концентрации свободных носителей тока – дырок и электронов – при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости



$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

**Сильная температурная зависимость сопротивления полупроводников используется в термисторах – полупроводниковых приборах для измерения температуры**

**Преимущества :**

- **точность;**
- **малые размеры и как следствие, малая теплоёмкость; в результате чего быстро устанавливается тепловое равновесие**