

# ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ -

вещества, основным свойством которых является сильная электропроводность

По механизму образования свободных носителей заряда (с.н.з.)

I рода

Металлы и сплавы,  
электронная  
электропроводность

с.н.з. — электроны

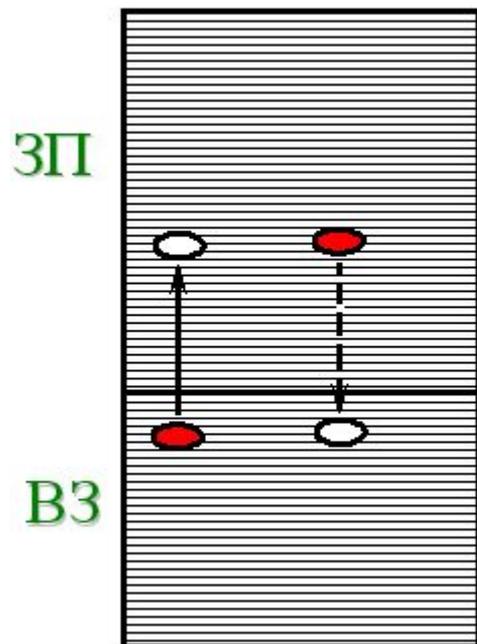
II рода

Водные растворы кислот,  
солей, щелочей -  
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

с.н.з. — ионы

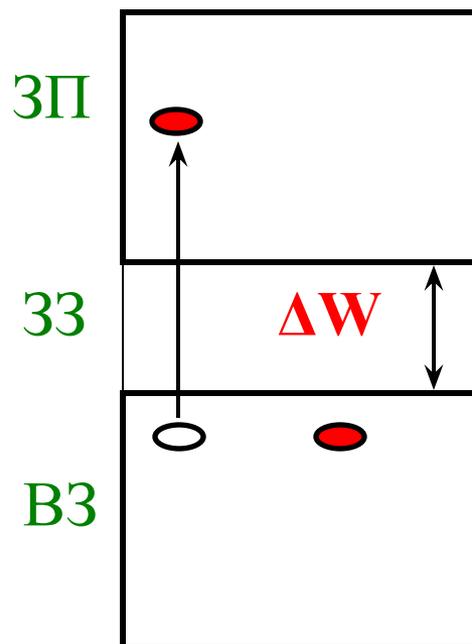
# ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



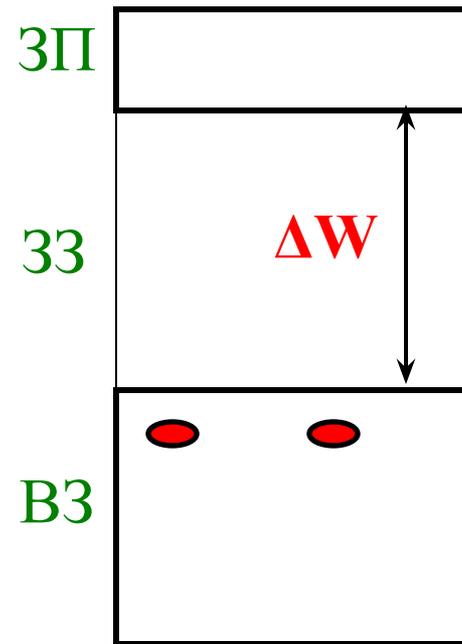
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



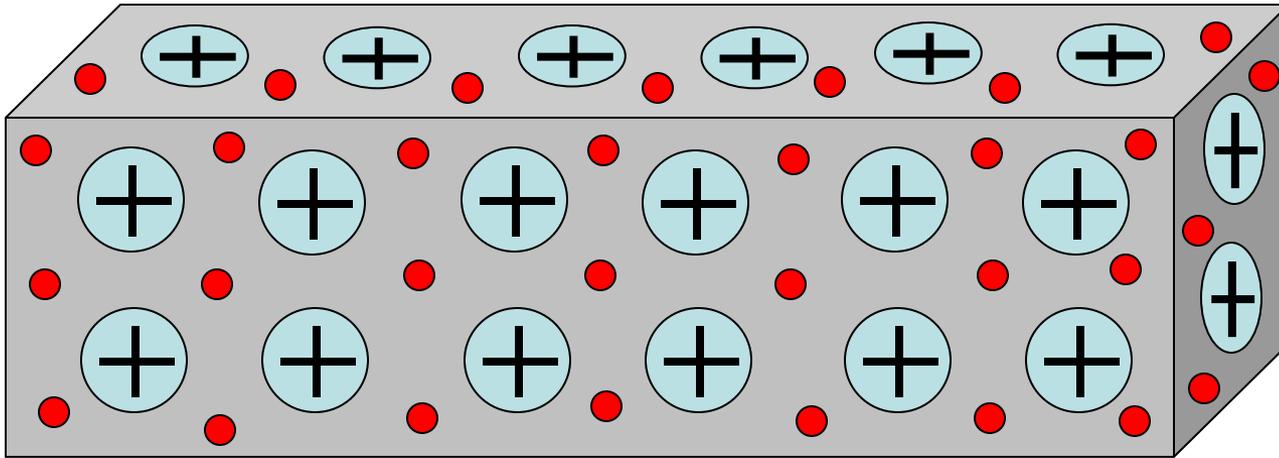
$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

$$\rho \sim 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho \sim 10^5 \div 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$\rho \sim 10^{-4} \div 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

# СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ



**Металлическая связь – взаимодействие между положительно заряженными ионами в узлах кристаллической решетки и коллективизированными электронами (электронным газом)**

$\lambda$  - длина свободного пробега с.н.з.,  
определяет подвижность  $\mu$  с.н.з.

$\Lambda$  - это расстояние, которое проходит электрон под действием внешнего электрического поля между двумя соударениями с ионами кристаллической решетки.

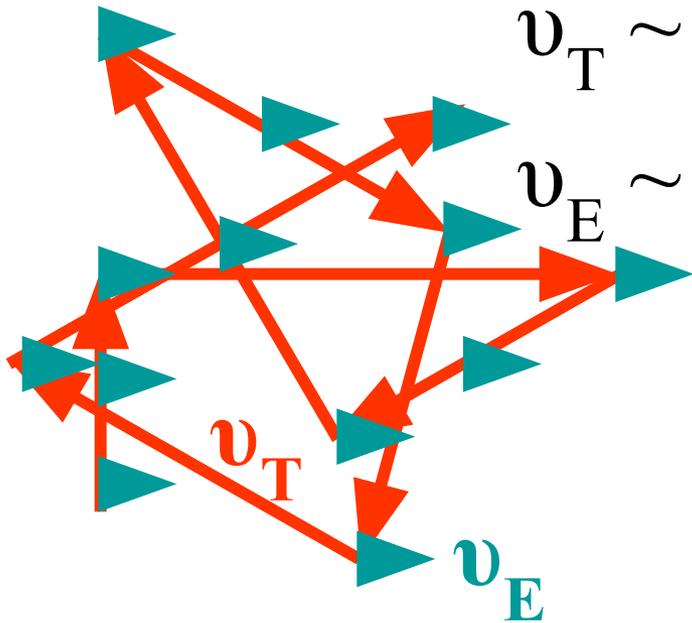
$\mu$  - показывает среднюю скорость, которую приобретает с.н.з. в единицу времени в электрическом поле  $E=1\text{В/м}$

$$F = qE$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \mathbf{v}_E \quad v_T \gg v_E$$

$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с,}$$

$$v_E \sim 10^{-3} \text{ м/с при } E=1 \text{ В/м}$$



$$\mathbf{v}_E = \mu \mathbf{E}$$

$\mu$  - подвижность [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ]

$$\mathbf{j} = qn\mathbf{v} = qn\mu\mathbf{E}$$

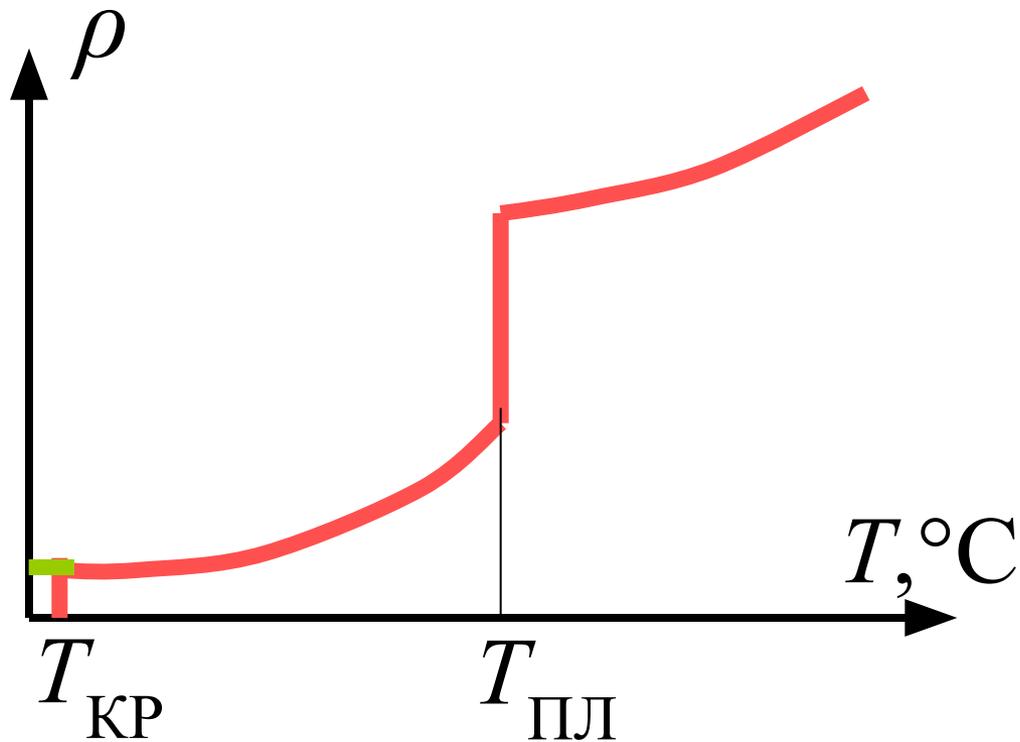
$\gamma = qn\mu$  удельная эл. проводимость  
[См/м]

$$\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E} = \mathbf{E}/\rho \quad \text{закон Ома,}$$

$\rho = 1/\gamma$  удельное эл. сопротивление  
[Ом·м],  $1\text{См} = 1\text{Ом}^{-1}$

$$R = \rho \cdot \ell / S \text{ [Ом]}, \quad \text{или} \quad \rho = R \cdot S / \ell$$

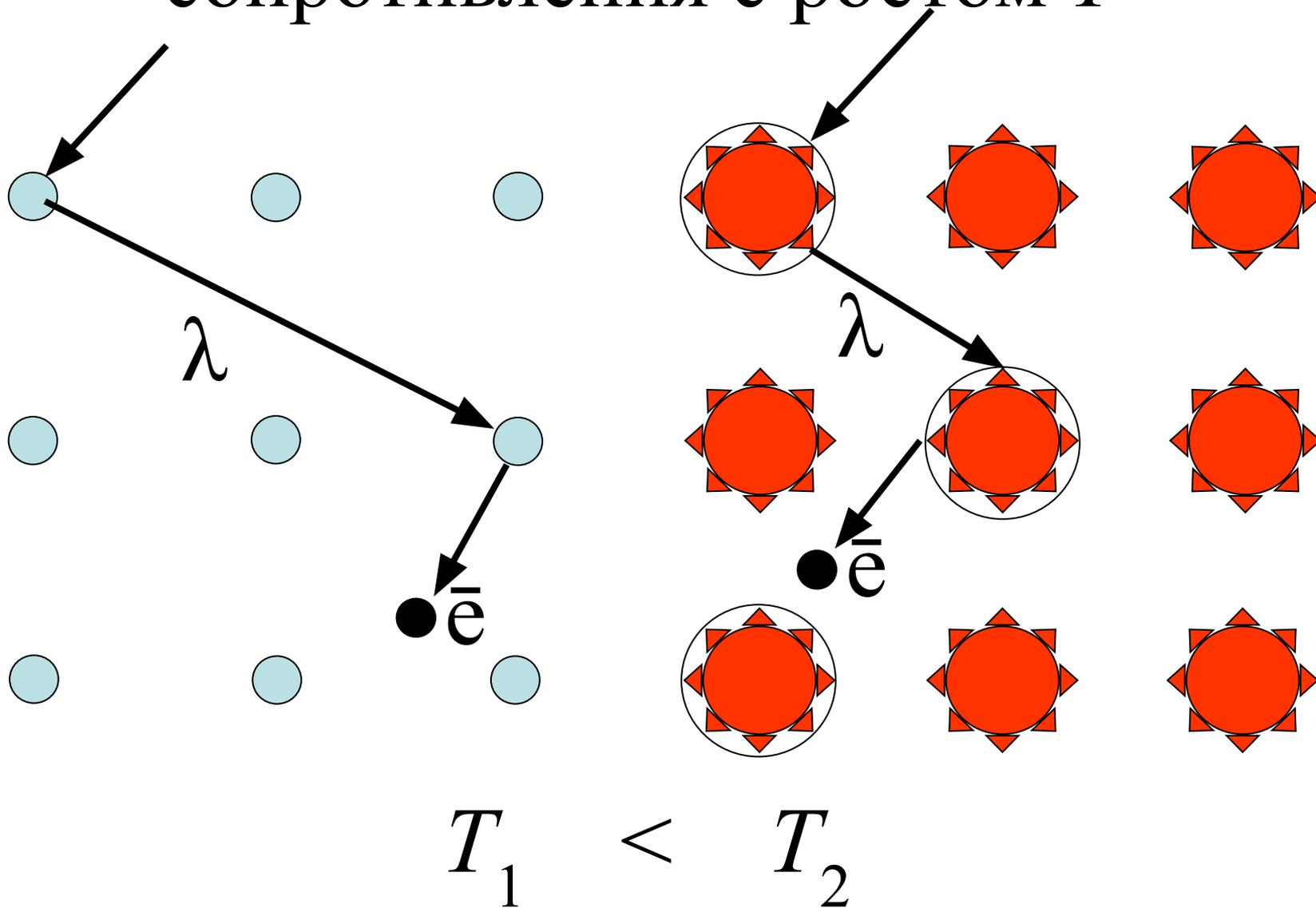
# Зависимость $\rho = f(T)$ для металлов и сплавов в широком интервале температур



В металлах  
концентрация  
с.н.з. = const !

$$\rho = \rho_{\text{ост}} + \rho_{\text{T}}$$

# Причины увеличения $\rho$ удельного сопротивления с ростом $T$



**Температурный коэффициент любой физической характеристики  $A$ :**

$$\text{ТК}_A = \frac{1}{A} \frac{dA}{dT}$$

**Температурный коэффициент удельного сопротивления**

$$\text{ТК}_\rho = \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

# КРИОПРОВОДИМОСТЬ

Явление сильного снижения  $\rho$  при  $T < -173^{\circ} \text{C}$ .

Обусловлено уменьшением рассеивания электронов за счет тепловых колебаний решетки. Сохраняется остаточный вклад в удельное сопротивление  $\rho_{\text{ост}}$ .

**КРИОПРОВОДНИКИ** - Cu, Al, Be

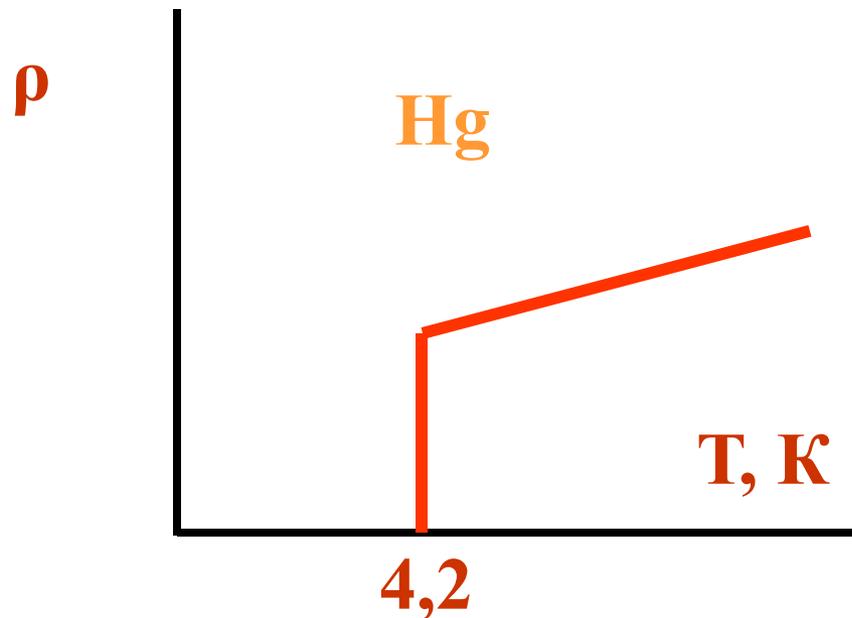
Требования к криопроводникам:

- минимальное содержание примесей;
- правильная (без дефектов) кристаллическая решетка

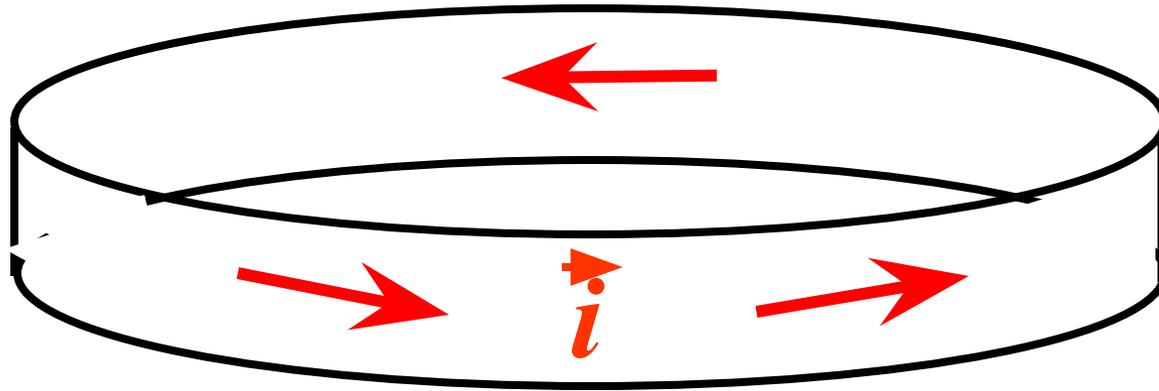
# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Явление **ИЗЧЕЗНОВЕНИЯ**  $\rho$  , т.е. появления бесконечной электропроводности при температурах близких к абсолютному нулю.

1911 год. Камерлинг - Оннес



Если в кольце из сплава  $Nb_3Sn$  путем электромагнитной индукции возбудить ток



он будет протекать примерно  $5 \cdot 10^4$  лет

Это соответствует величине  $\rho$  порядка  $10^{-26}$  Ом·м

# В объеме сверхпроводника **нет** магнитного поля

Сильное магнитное поле разрушает  
явление сверхпроводимости!!!

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

1. Сверхнизкие температуры  $T_i < T_{кр}$
2. Слабые магнитные поля  $H_i < H_{кр}$

Критические температуры  $T_{\text{КР}}$  перехода  
в сверхпроводящее состояние

$$Al = 1,19 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Cd = 0,56 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Sn = 3,722 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Zn = 0,875 \text{ } ^\circ\text{K}$$

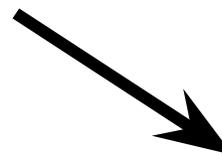
$$Nb_3Ge = 23,2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

# СВЕРХПРОВОДНИКИ



**I рода** переход в сверхпроводящее состояние при одном фиксированном значении  $H_{кр}$ .

Полное вытеснение магнитного поля из объема сверхпроводника

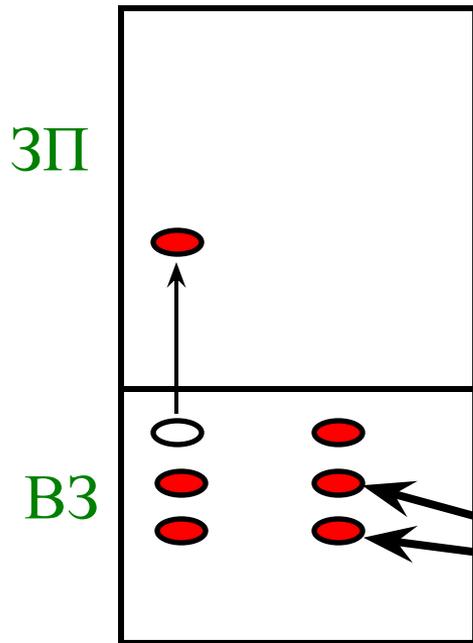


**II рода**

Характеризуются при переходе в сверхпроводящее состояние двумя значениями  $H_{кр1}$  и  $H_{кр2}$ .  
Между  $H_{кр1}$  и  $H_{кр2}$  наблюдается смешанное состояние проводимости и сверхпроводимости, а также частичное вытеснение магнитного поля из объема сверхпроводника

# ПРИРОДА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Согласно теориям Л.Купера, Д.Бардина, Дж.Шриффера



$$\Delta W = 0$$

При  $T \approx 0$  К меняется характер взаимодействия электронов между собой и атомной решеткой т.о., что становится возможным притягивание электронов с одинаковыми спинами и образование т.н. электронных (куперовских) пар.

Куперовские пары образуются из электронов, расположенных ниже поверхности Ферми

Эти пары в состоянии сверхпроводимости обладают большой энергией связи, **перемещение электронов происходит без взаимодействия с атомами кристаллической решеткой!!!**

# **ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость**

**$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  –  $T_{\text{КР}}$  около 100 К!!!**

**В настоящее время известно 27 простых и более  
1000 сложных сверхпроводников.**

**Широко используется керамика на основе  
висмута.**

**Применение: создание сверхсильных магнитных  
полей, обмоток ЭМ с очень высоким КПД, кабели  
для мощных линий электропередач.**

# ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

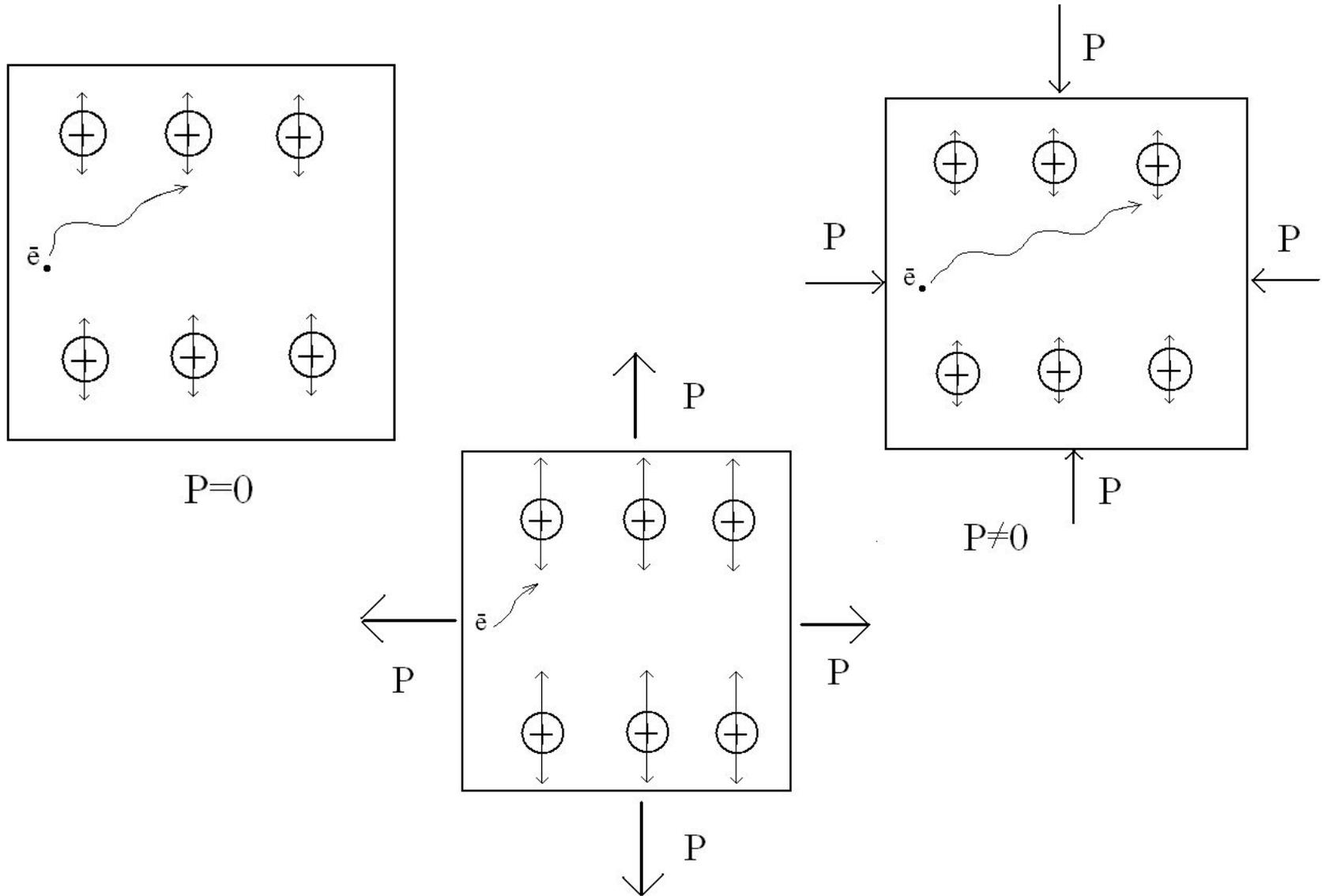
$$\rho = \rho_0 [1 \pm S \cdot \sigma]$$

«-» сжатие  
«+» растяжение

$S = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}$  – коэффициент удельного сопротивления по давлению

**Изменение  $\rho$  обусловлено изменением межатомного расстояния и подвижности с.н.з.**

# Всестороннее сжатие (растяжение)



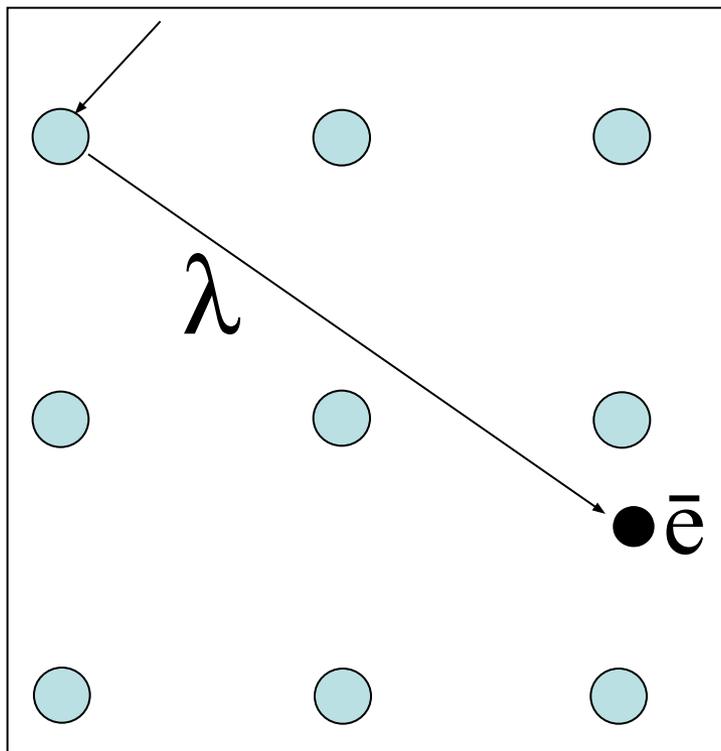
# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

Значительное увеличение  $\rho$  наблюдается при сплавлении двух металлов при образовании общей кристаллической решетки, когда атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого – т.н. **твердые растворы**

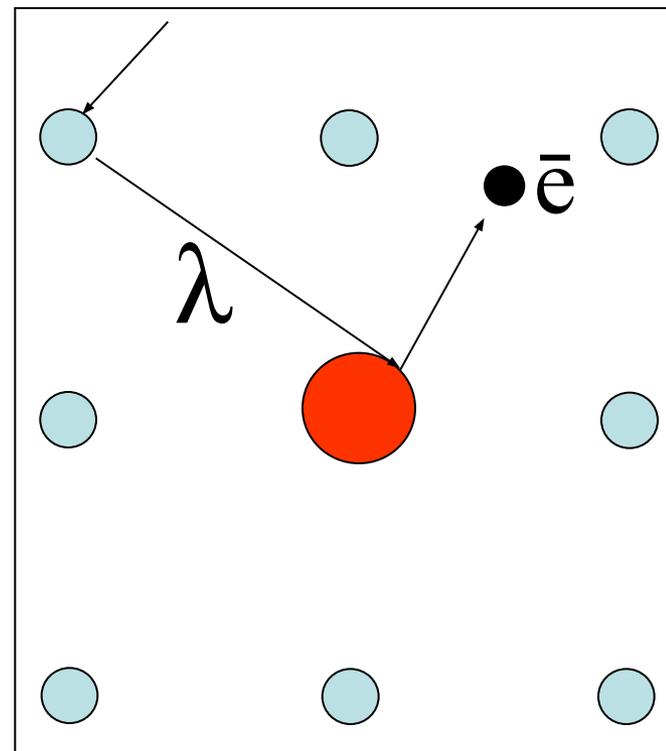
Происходит снижение подвижности с.н.з.

**В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!**

$\rho$  сплавов как правило выше, чем  
 $\rho$  чистых металлов



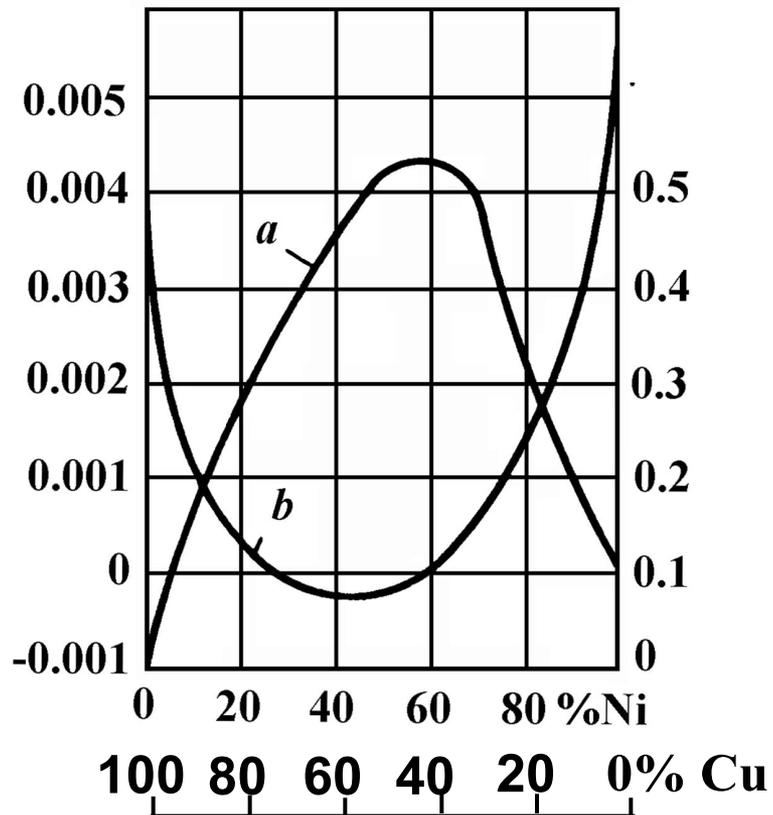
Чистый металл



Сплав

# Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава $NiCu$

$TK\rho, K^{-1}$        $\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$

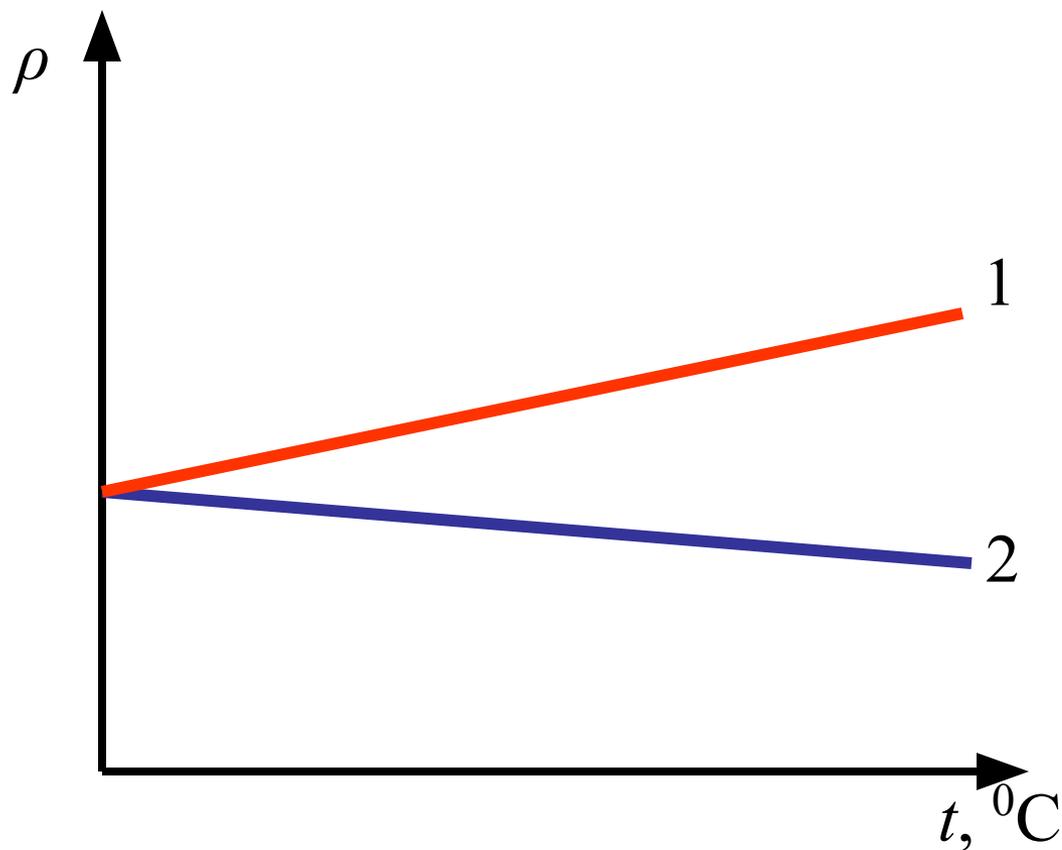


$a$  — зависимость  $\rho$

$b$  — зависимость  $TK\rho$

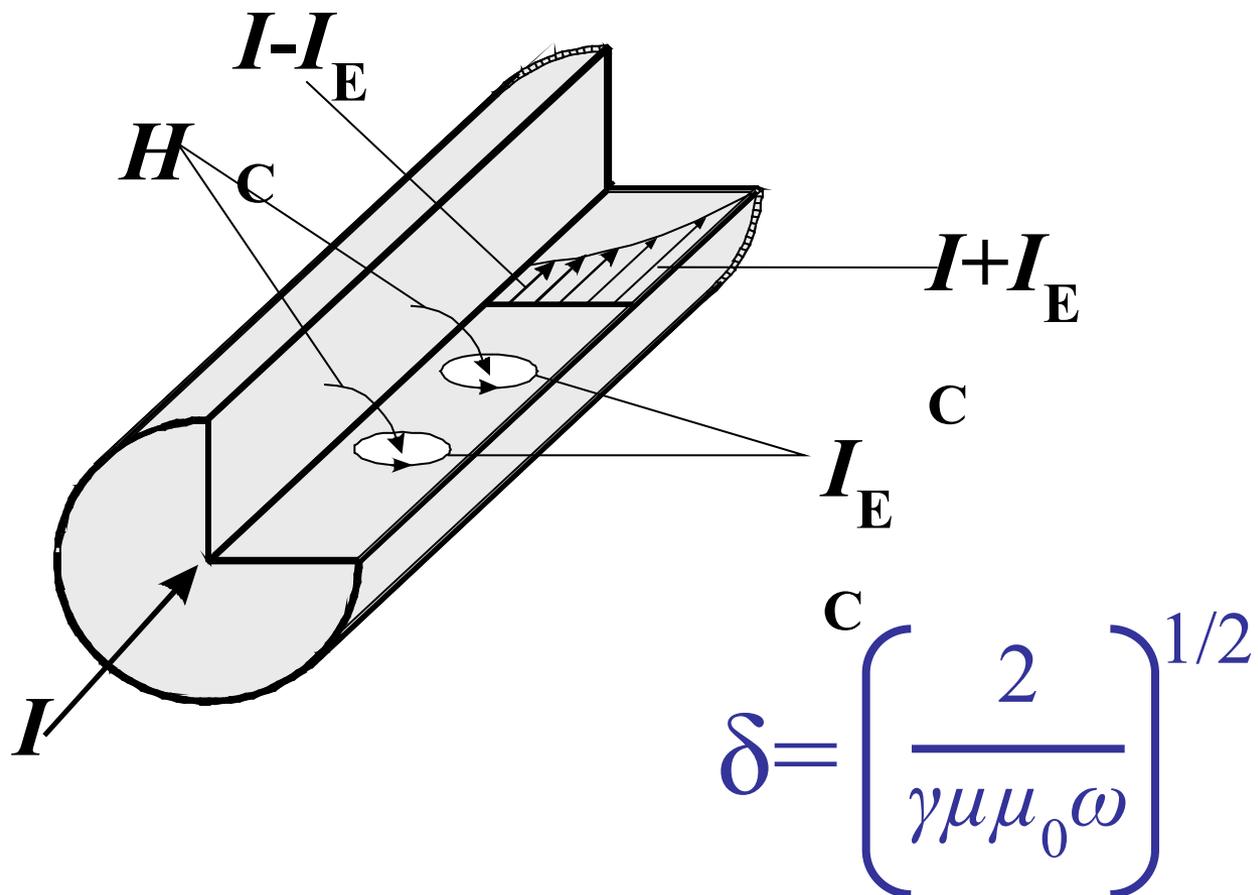
от концентрации

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ



В РЯДЕ СЛУЧАЕВ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ У СПЛАВОВ **МОЖЕТ УВЕЛИЧИВАТЬСЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ С.Н.З.**, ЧТО КОМПЕНСИРУЕТ ПОТЕРЮ ПОДВИЖНОСТИ, ИНОГДА ПРИВОДЯ К ПРЕИМУЩЕСТВЕННОМУ РОСТУ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ (кривая 2)

# Скин-эффект



# ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

При соприкосновении двух различных металлов  $A$  и  $B$ , между ними возникает *контактная разность потенциалов*, обусловленная различием значений работы выхода электронов и концентрации свободных электронов соприкасающихся металлов



## термоЭДС

$$U = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}$$

$n_A$  и  $n_B$  – концентрации свободных электронов в металлах  $A$  и  $B$

$$K = (k/e) \ln(n_A/n_B), \quad U = K \Delta T$$

$K$  – коэффициент термоЭДС

Это явление используется при изготовлении термопар (для измерения температур), термогенераторов и термохолодильников

# Конструкции термопар

1. Платина-Платинородий	до	1600 °С
2. Хромель-Алюмель	до	1000 °С
3. Железо-Константан		
Железо-Копель	до	600 °С
Хромель-Копель		
4. Медь-Константан	до	350 °С
Медь-Копель		
5. Железо-Золото	до	(10÷100) °К

- Копель (44%Ni+56%Cu)
- Алюмель (95%Ni+Al; Si; Mn)
- Хромель (90%Ni+10%Cr)
- Платиnorodий (90%Pt+10%Rh)

# Таблица значений $K$ [мкВ/град] относительно $Pt$ при $0^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
 Bi & - 65.0 & (Fe\text{--конст.}) & = \\
 Fe & + 16.0 & & = (Fe\text{--}Pt) - (\text{конст.}\text{--}Pt) = \\
 Cu & + 7.4 & & = +16,0 - (-34,4) = 50,4
 \end{aligned}$$

$$Ni - 16.4$$

$$Sb + 47.0$$

$$\text{Константан} - 34.4$$

$$Cu(60\%)Ni(40\%)$$

**Знак** показывает направление термотока: в нагретом спае ток течет от меньшего  $K$  к большему (напр. в  $Fe$ -конст. от конст. к  $Fe$ )

В полупроводниках термоЭДС значительно сильнее, так как концентрация с.н.з. сильнее зависит от температуры.

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Тепло в металлах передается в основном теми же свободными электронами, которые определяют электропроводность

## Закон ВИДЕМАНА-ФРАНЦА-ЛОРЕНЦА

$$\frac{\lambda}{\gamma} = L_0 \cdot T$$

где  $T$  - абсолютная температура,  $K$ ;  
 $L_0$  - число Лоренца, равное

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k}{e^2}$$

$k$  – постоянная Больцмана;  
 $e$  – заряд электрона.

# Механические свойства проводников

- предел прочности при растяжении  $\sigma_p$ ;
- относительное удлинение при растяжении;
  - твердость;
  - хрупкость.

## Температурный коэффициент линейного расширения

$$TK_{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dT} \quad [K^{-1}]$$

# Классификация проводников по области применения

## 1. Металлы и сплавы с высокой удельной электропроводностью

*Cu*  $\rho=0.01724$  мкОм·м

*Бронзы* *Cu*+легирующая примесь  
( до 10% *Sn*, *Si*, *P*, *Be*, *Cr*, *Mg*, *Ca* и др.)

*Латуни* сплав *Cu* с *Zn*

*Al*  $\rho=0,026$  мкОм·м  
легче *Cu* в 3,5 раза

*Au*  $\rho=0.024$  мкОм·м

*Ag*  $\rho=0.016$  мкОм·м

*Pt*  $\rho=0.105$  мкОм·м

*Fe* (*сталь*)  $\rho=0.098$  мкОм·м

*Pd*  $\rho=0.110$  мкОм·м

## 2. Металлы и сплавы с высоким удельным сопротивлением

**Манганин:**  $Cu-85\%$  ;  $Mn-12\%$  ;  $Ni-3\%$

$$\rho = 0,42 \div 0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м} \quad \text{TK}\rho = (6 \div 50) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

**Константан:**  $Cu-60\%$  ;  $Ni-40\%$

$$\rho = 0,48 \div 0,52 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м} \quad \text{TK}\rho = (5 \div 25) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

**Нихромы:**  $\rho = 1,0 \div 1,5 \text{ мк}\cdot\text{Омм}$

$(60-80)\% Ni + (15-20)\% Cr + Fe$  (до 10%)

**Фехрали**  $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$

$(20 \div 40)\% Fe + (60 \div 70)\% Cr + (5 \div 10)\% Al$

**Хромали**  $\rho = 1,1 \div 1,5 \text{ Мк}\cdot\text{Ом}\cdot\text{м}$

$(5 \div 10)\% Al$ , ост.  $Cr$

### 3. Металлы и сплавы специального назначения

Материалы для термопар

Тензометрические сплавы

Контактные материалы

скользящие, разрывные контакты

Припои

мягкие, низкотемпературные, твёрдые

# Сплав Вуда

50%Bi; 25%Pb

12,5%Sn; 12,5% Cd

$$t_{\text{пл}} = 60,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$