

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

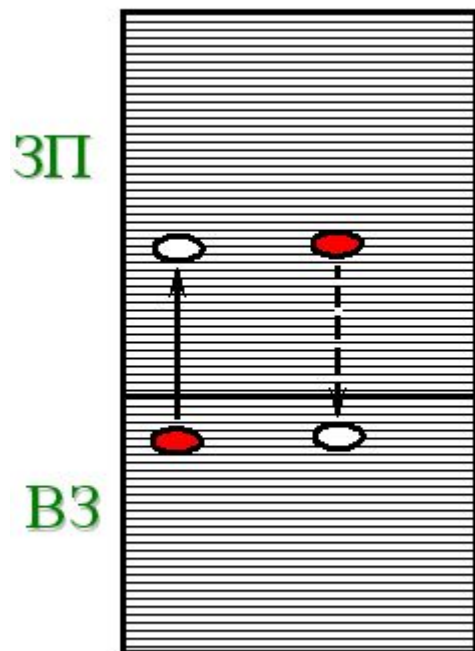
II рода

Водные растворы кислот,
солей, щелочей -
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

с.н.з. — ионы

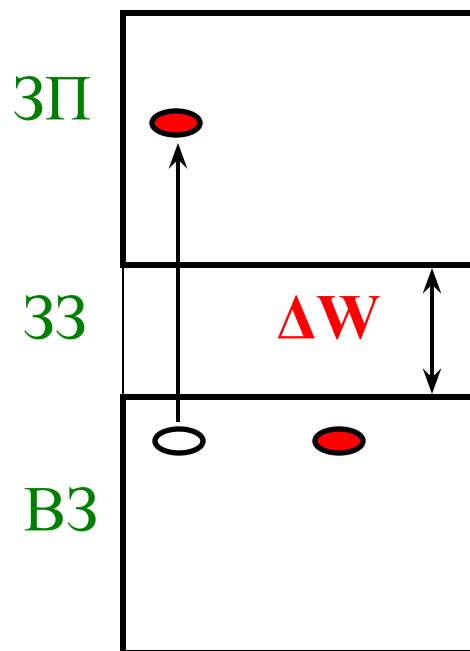
ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



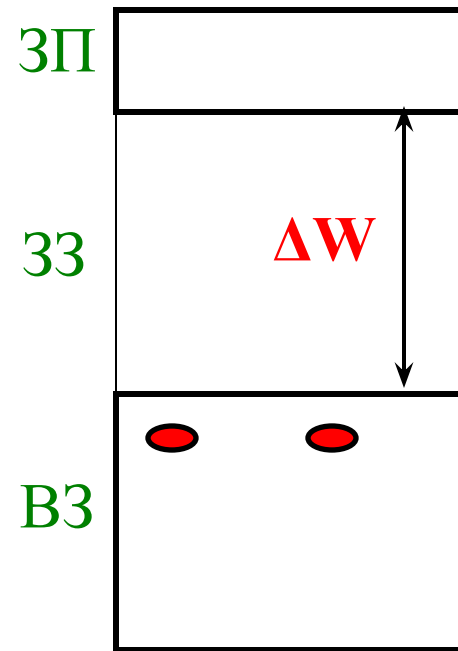
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



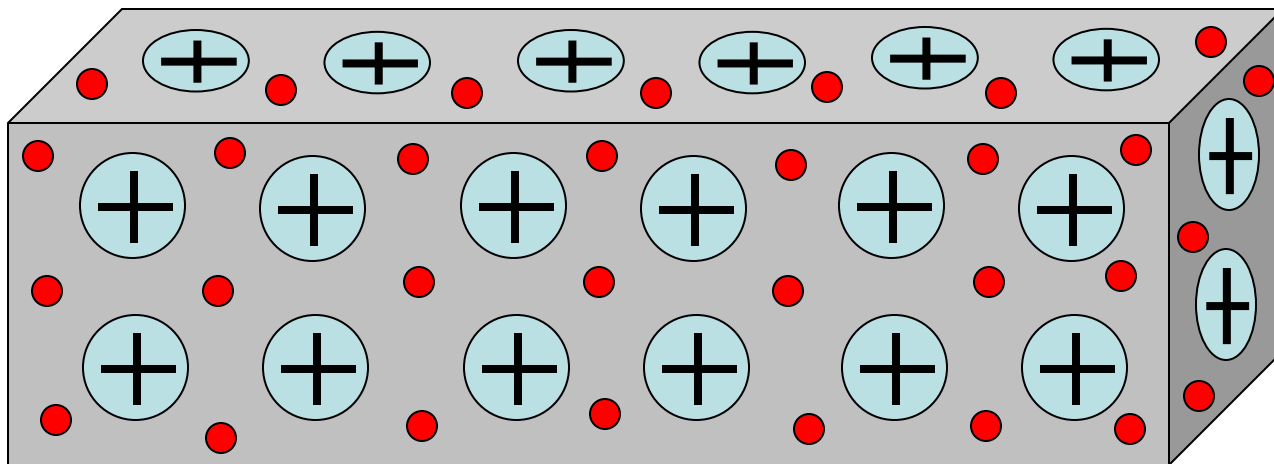
$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

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

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

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

СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ



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

λ - длина свободного пробега с.н.з.,
определяет подвижность μ с.н.з.

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

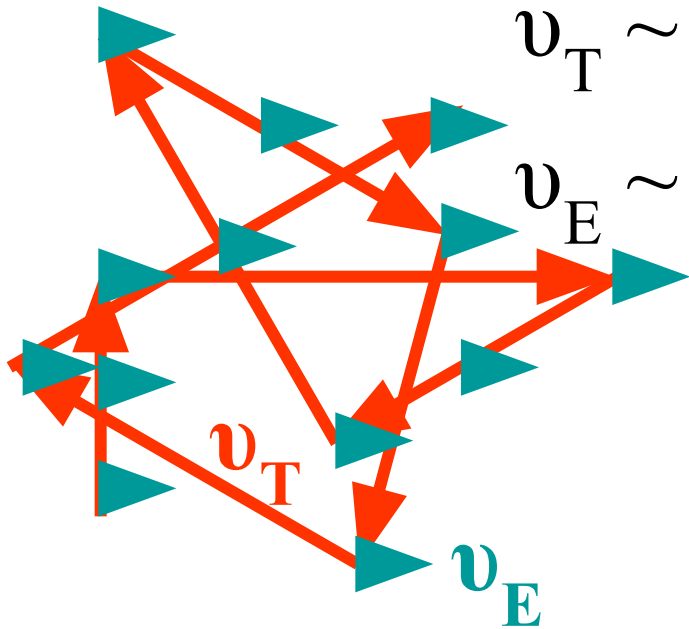
μ - показывает среднюю скорость, которую приобретает с.н.з. в единицу времени в электрическом поле $E=1\text{В/м}$

$$F = qE$$

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

$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с,}$$

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



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

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

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

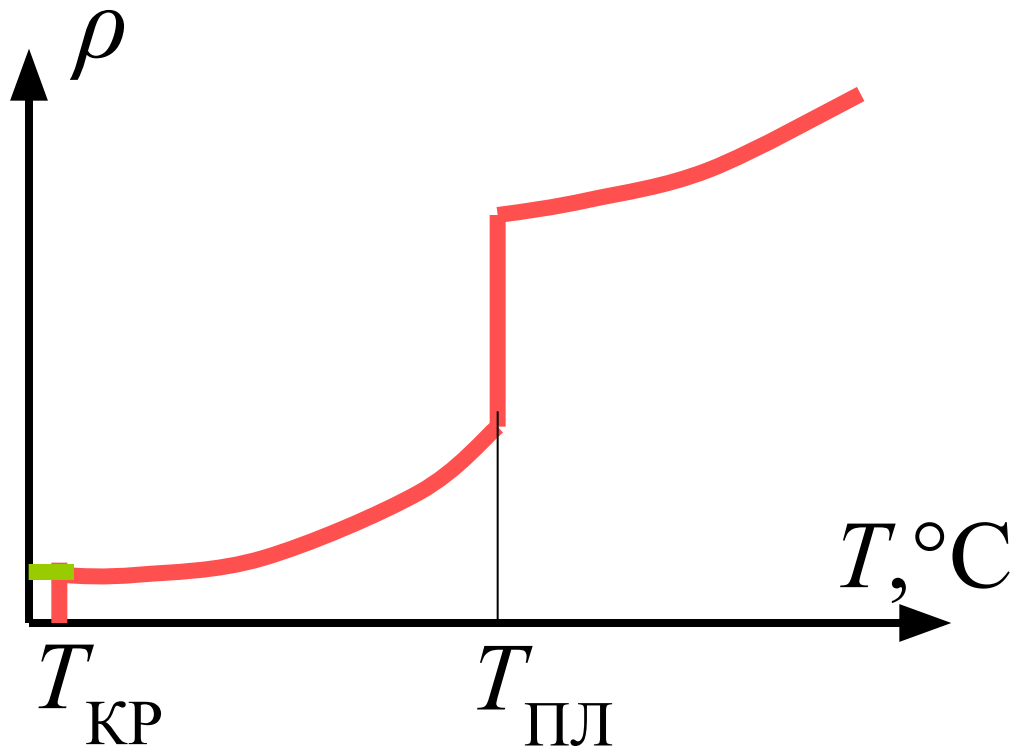
$\gamma = qn\mu$ удельная эл. проводимость
[См/м]

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

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

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

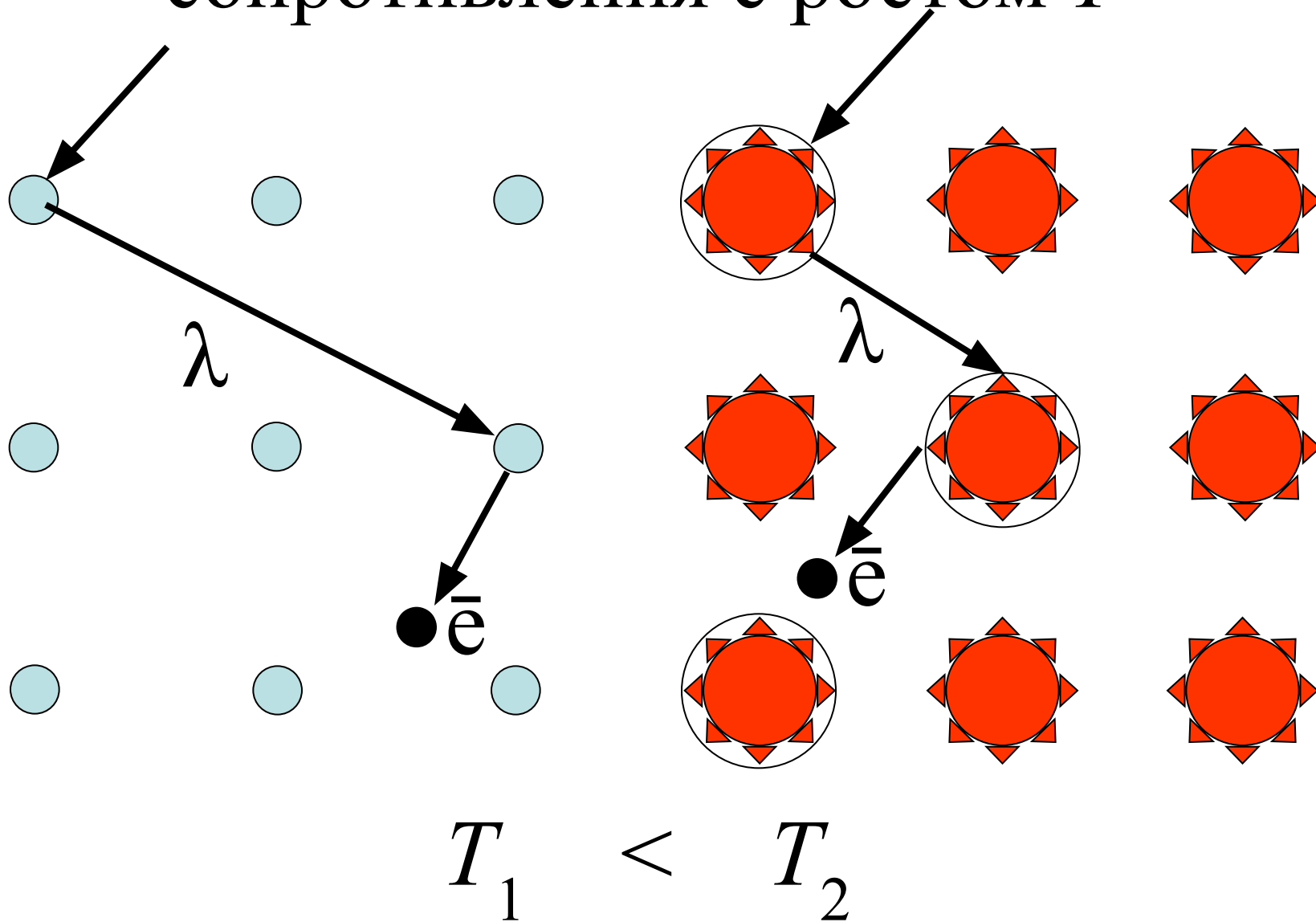
Зависимость $\rho = f(T)$ для металлов и сплавов в широком интервале температур



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

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

Причины увеличения ρ 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 ρ 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

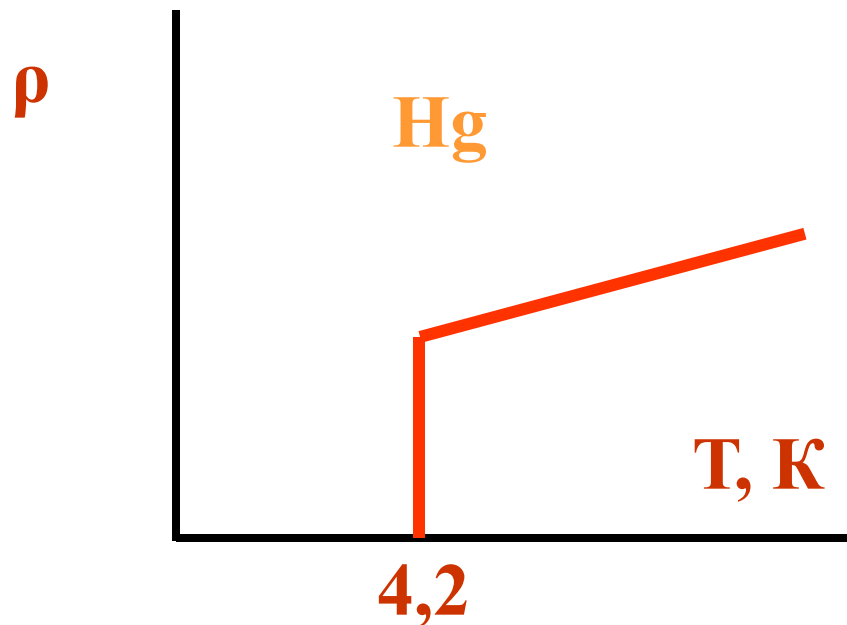
Требования к криопроводникам:

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

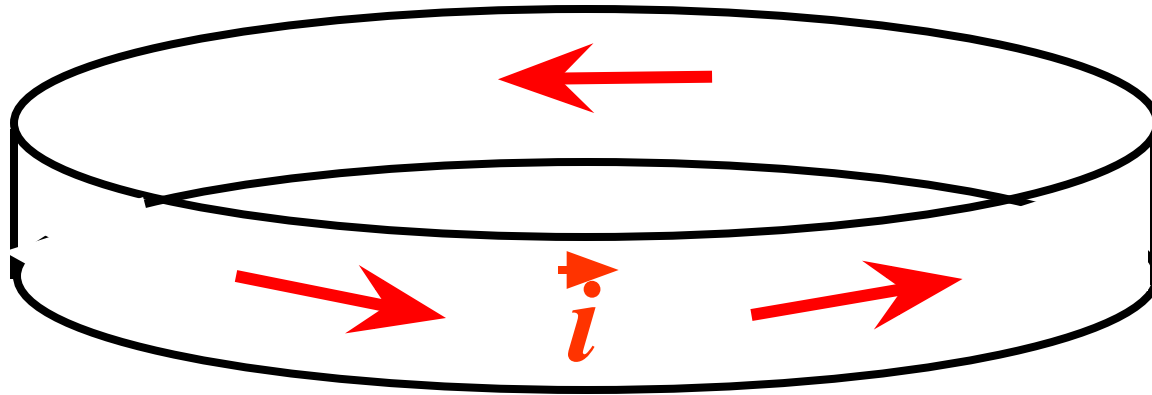
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Явление **ИЗЧЕЗНОВЕНИЯ** ρ , 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 ρ 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

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

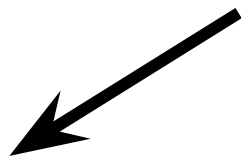
$$Cd = 0,56 \text{ }^\circ\text{K}$$

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

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

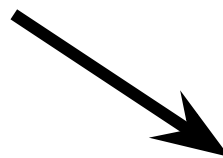
$$Nb_3Ge = 23,2 \text{ }^\circ\text{K}$$

СВЕРХПРОВОДНИКИ



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

Полное вытеснение магнитного поля из объема сверхпроводника

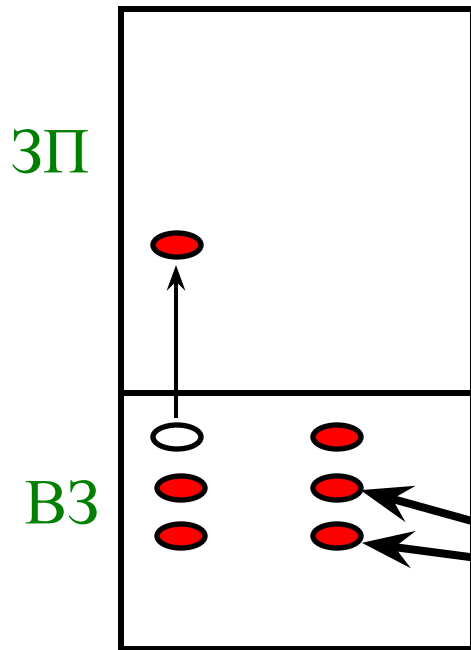


II рода

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

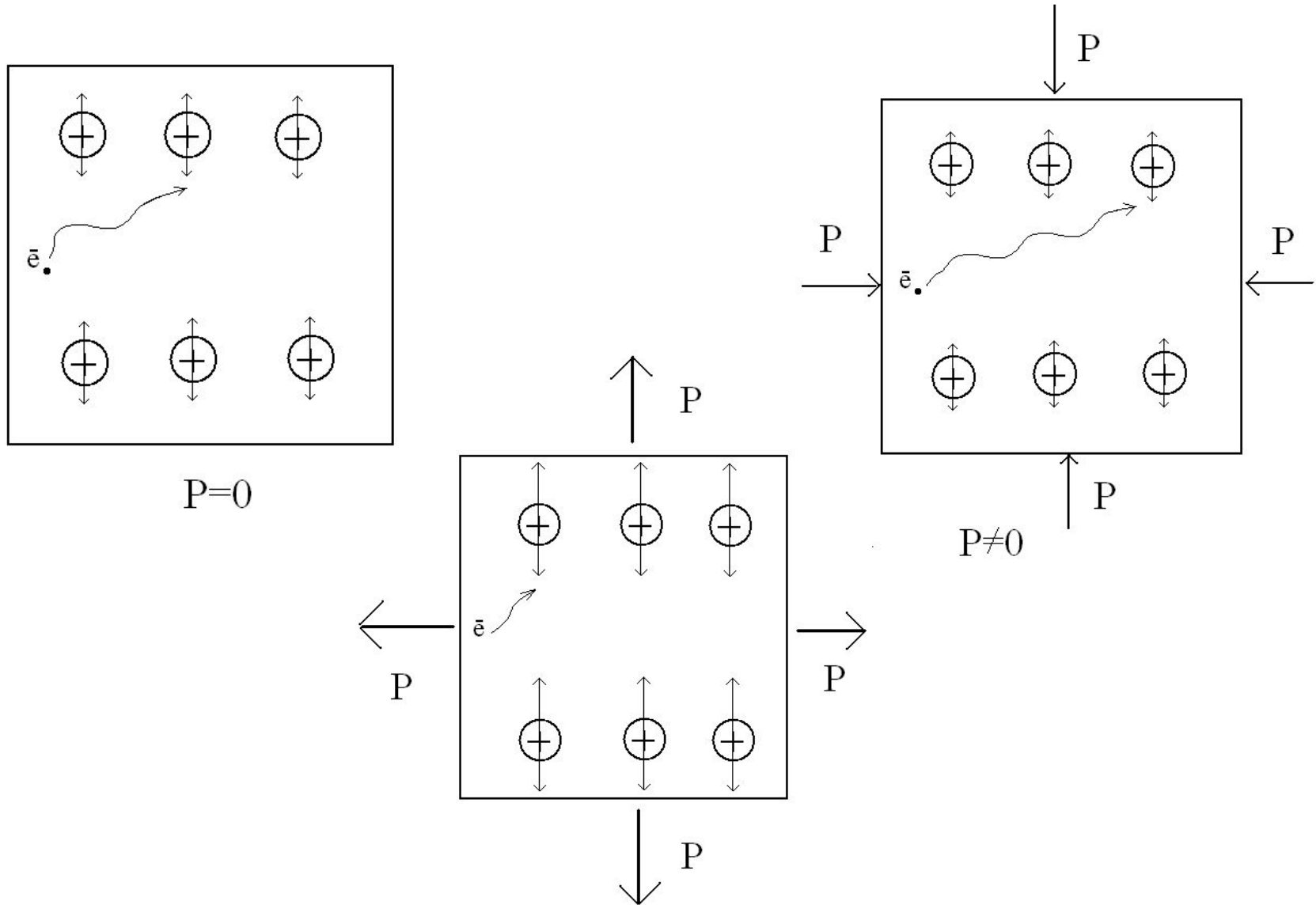
$$\rho = \rho_0 [1 \pm S \cdot \sigma]$$

«-» сжатие
«+» растяжение

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

Изменение ρ обусловлено изменением межатомного расстояния и подвижности с.н.з.

Всестороннее сжатие (растяжение)



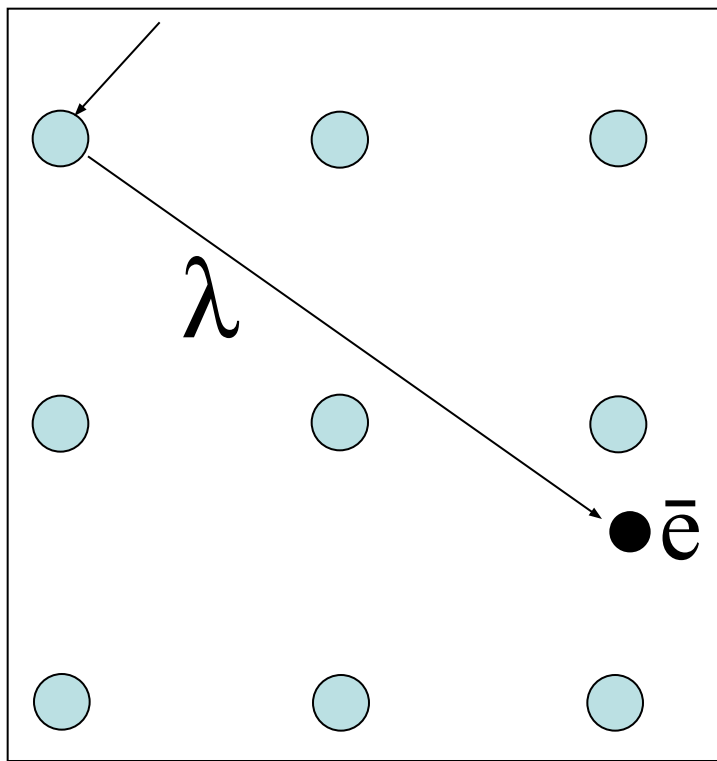
УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

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

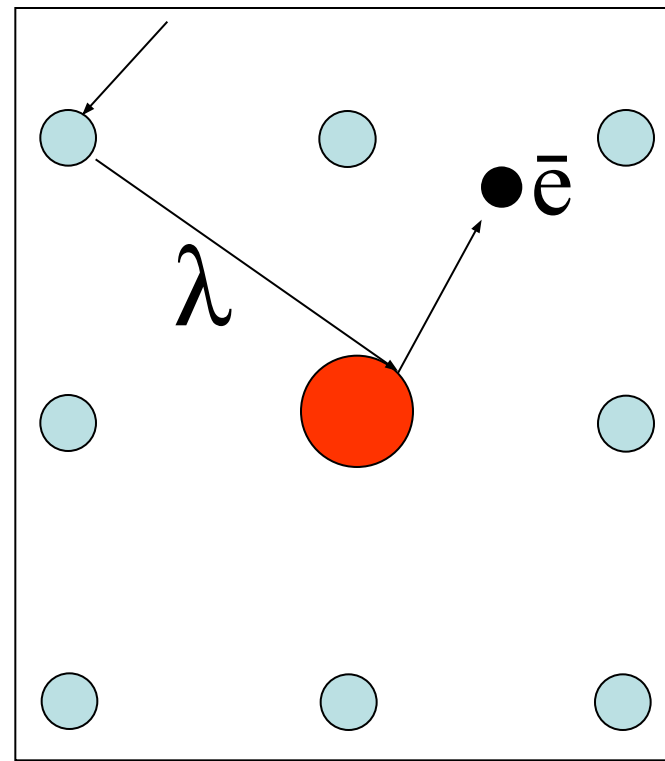
Происходит снижение подвижности с.н.з.

В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!

ρ сплавов как правило выше, чем
 ρ чистых металлов



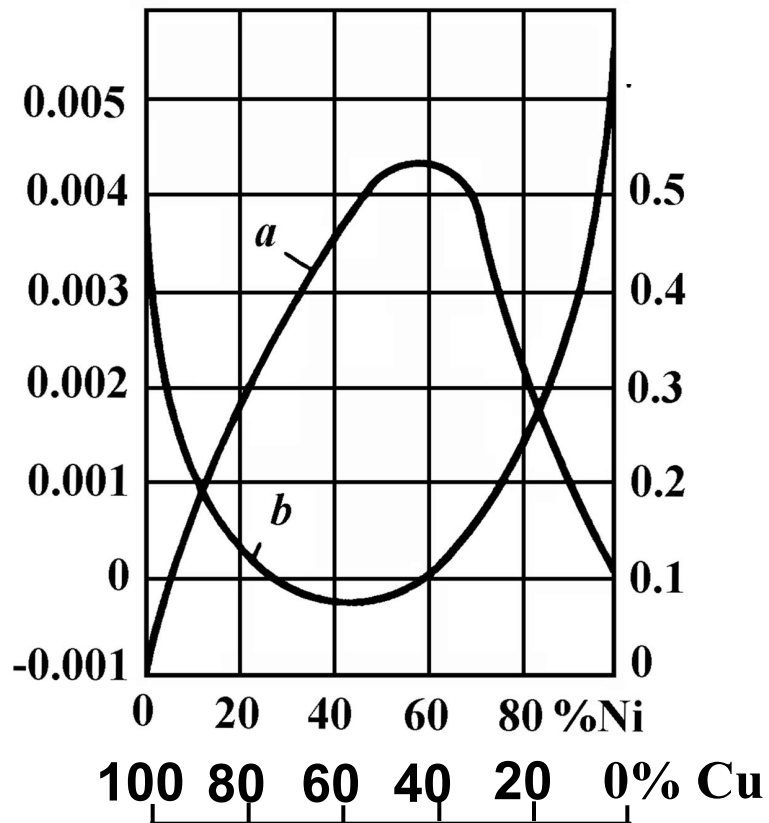
Чистый металл



Сплав

Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава $NiCu$

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

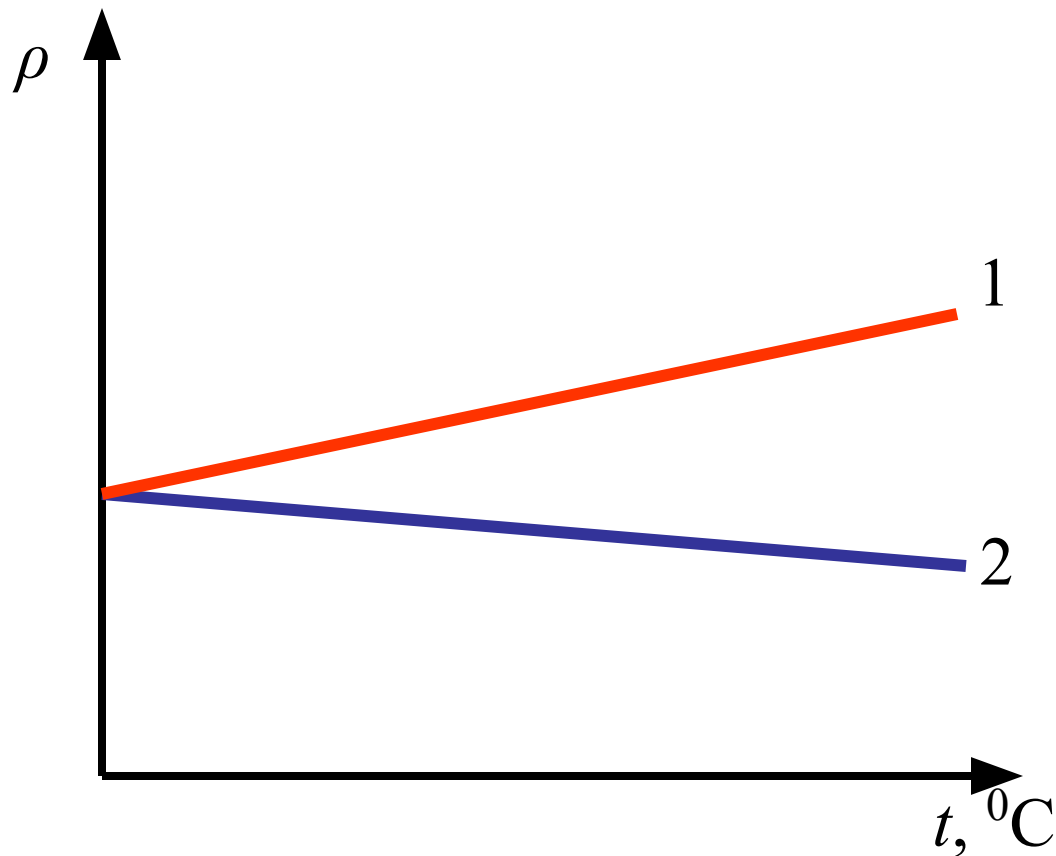


a — зависимость ρ

b — зависимость $TK\rho$

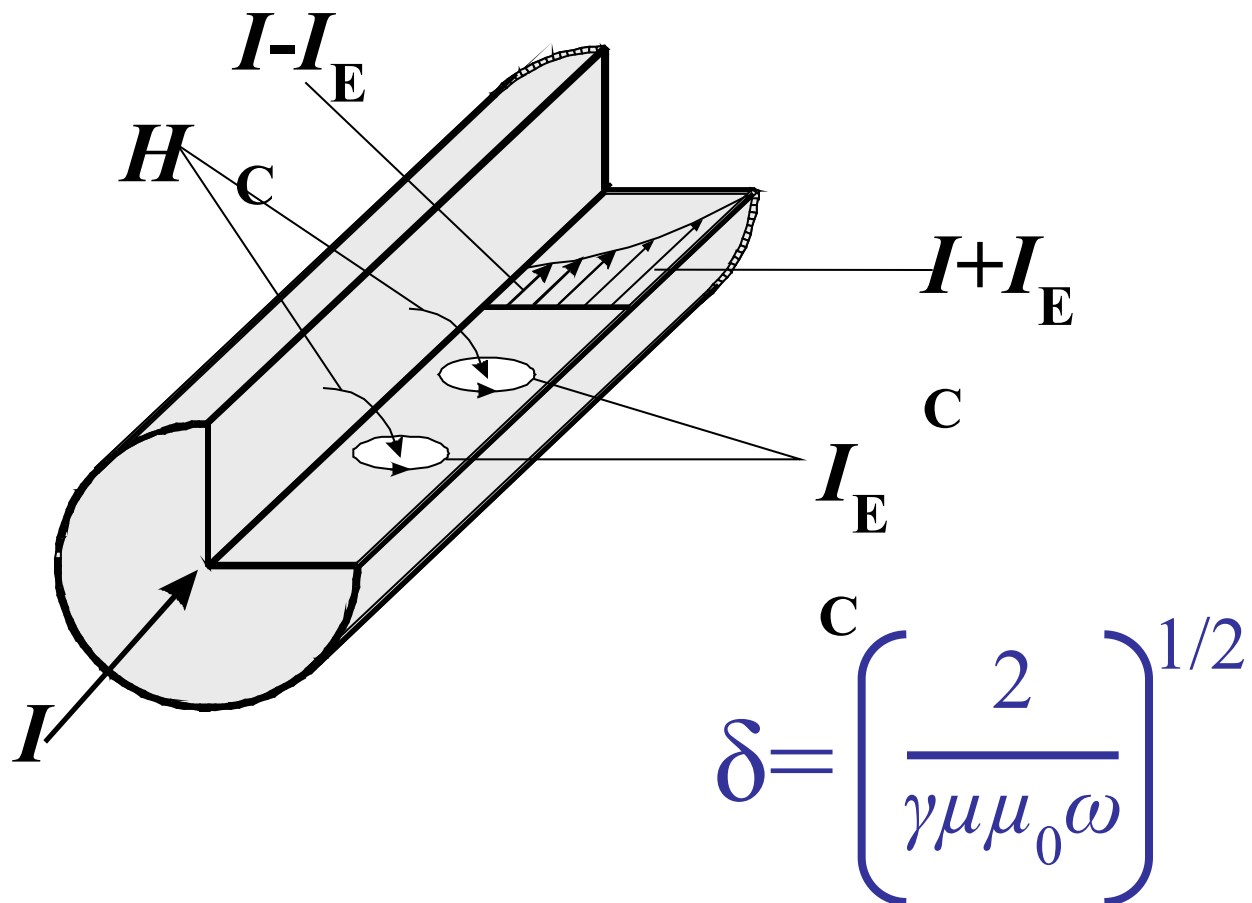
от концентрации

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°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 σ_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

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