

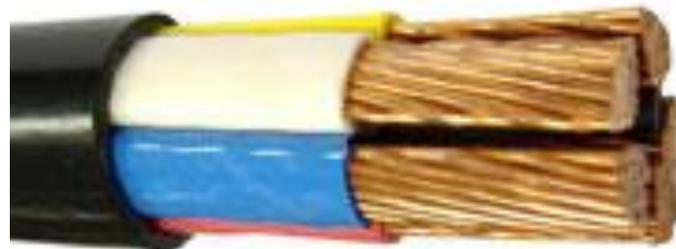
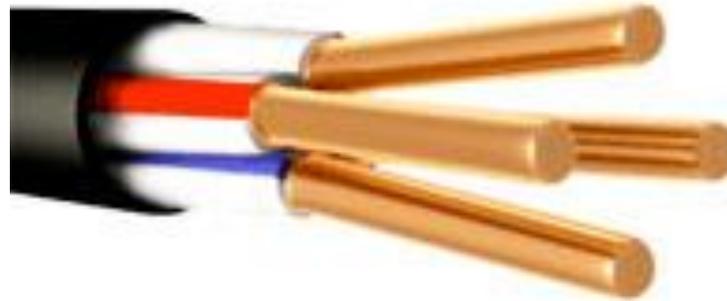
# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2022 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

# Проводниковые материалы



**Бакалавриат:**

■ **13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

- ООП «Электрические станции»
- ООП «Электроэнергетические системы и сети»
- ООП «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»
- ООП «Электроснабжение» 
- ООП «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника»
- ООП «Электрооборудование летательных аппаратов»
- ООП «Электропривод и автоматика»
- ООП «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

**Магистратура:**



■ **13.04.02 Электроэнергетика и электротехника**

- ООП • Высоковольтная энергетика, электроизоляционная и кабельная техника



**ОКБ КП**

ОСОБОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО  
КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



# ОКБ КП

ОСОБОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО  
КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## ОКБ Кабельной промышленности ([okbkr.ru](http://okbkr.ru))



**КАБЕЛИ И  
ПРОВОДА**

Разработка и  
производство  
проводов и кабелей



**БОРТОВЫЕ ПРОВОДА  
ДЛЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ  
ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

# БСЭО-36-1415 1х0,35 Кч

1-я буква	<b>Б</b> — бортовой
2-я буква	<b>С</b> — сплошная изоляция
3-я буква	<b>Э</b> — электрический экран (для проводов в экране и оболочке)
4-я буква	<b>О</b> — оболочка (для проводов в экране и оболочке)

<b>1</b>	<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ</b>		
	600 В		
	<b>3</b>		
<b>2</b>	<b>МАКС. РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПРОВОДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ</b>		
	155 °С	200 °С	
	<b>5</b>	<b>6</b>	
<b>3</b>	<b>МАТЕРИАЛ ПРОВОЛОКИ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ</b>		
	Медные проволоки	упрочненные проволоки из сплава БрХЦрК	
	<b>1</b>	<b>2</b>	
<b>4</b>	<b>ПОКРЫТИЕ ПРОВОЛОК ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ</b>		
	Олово	Серебро	Никель
	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>НОМЕР РАЗРАБОТКИ</b>		
<b>6</b>	<b>СЕЧЕНИЕ ПРОВОДА, мм<sup>2</sup> (указывается при обозначении маркоразмера)</b>		
	от 0,20 до 25		
<b>7</b>	<b>УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ЦВЕТОВ ИЗОЛЯЦИИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ (указывается при обозначении маркоразмера)</b>		
	<b>Б</b> - белый или натуральный (неокрашенный)	<b>Ж</b> - желтый	
	<b>З</b> - зеленый	<b>К</b> - красный	
	<b>Кч</b> - коричневый	<b>С</b> - синий	

### 3.1 Одножильные

Марка провода	AWG размер	Конструкция ТПЖ, количество х диаметр проволок, мм	Диаметр по изоляции		Вес, кг/км	Электрическое сопротивление токопроводящей жилы при температуре 20 °С, Ом/км
			ном	макс		
БС-35-1215 1x0,20	24	19x0,12	0,99	1,10	3,01	85,9
БС-35-1215 1x0,35	22	19x0,15	1,14	1,20	4,52	53,1
БС-35-1215 1x0,60	20	19x0,20	1,39	1,45	6,85	32,4
БС-35-1215 1x1,0	18	19x0,26	1,72	1,78	10,3	20,4
БС-35-1215 1x1,2	16	19x0,28	1,82	1,85	13,3	15,8
БС-35-1215 1x2,0	14	19x0,35	2,22	2,30	20,4	10,0
БС-35-1215 1x3,0	12	37x0,32	2,71	2,76	31,3	6,63
БС-35-1215 1x5,0	10	49x0,35	3,69	3,71	49,3	4,13



# ОКБ КП

ОСОБОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО  
КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## ОКБ Кабельной промышленности ([okbkr.ru](http://okbkr.ru))



**КАБЕЛИ И  
ПРОВОДА**

Разработка и  
производство  
проводов и кабелей



**НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ  
КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ  
ПРОДУКЦИИ**



Марка кабеля	Макс. рабочая t, °С	Номинальный диаметр внутреннего проводника, мм	Наружный диаметр кабеля, мм	Расчетная масса кабеля, кг/км
PK 50-3-14	70	0,90	не более 4,10	41,4
PK 50-3-15	70	0,90	4,70 ± 0,25	47,4
PK 50-3-16	70	0,96 (7x0,32)	не более 4,10	40,2
PK 50-3-17	70	0,96 (7x0,32)	4,70 ± 0,25	46,2

**Волновое сопротивление**

50 ± 3,5 Ом

**Коэффициент затухания**

Не более 0,30 дБ/м на частоте 0,2 ГГц;  
 Не более 0,70 дБ/м на частоте 1,0 ГГц;  
 Не более 1,20 дБ/м на частоте 3,0 ГГц

**Затухание экранирования**

Не менее 80 дБ

**Стойкость к изгибам**

На угол ± 90 ° по радиусу, равному 10 D. нар.:  
 в НКУ – не менее 150 циклов изгибов;  
 при температуре минус 15 °С - не менее 10 циклов изгибов.

**Срок службы**

25 лет

**Предельная повышенная температура окружающей среды**

85°С. Продолжительность однократного воздействия - не более 500 часов

**Предельная пониженная температура окружающей среды**

минус 65°С. Продолжительность однократного воздействия - не более 168 часов

В качестве *проводников* электрического тока могут быть использованы *твердые тела*, *жидкости* и при соответствующих условиях – *газы*.

- *Твердыми проводниками* являются *металлы и их сплавы*, а также некоторые модификации *углерода*.
- *Жидкими проводниками* являются *расплавленные металлы*, а также *водные растворы солей, кислот, щелочей (электролиты)*.
- *Все газы и пары*, в том числе и *пары металлов* являются *проводниками* при *очень высоких температурах* и *напряженностях* электрического поля.

*Сильно ионизированный газ при равенстве количества свободных электронов и положительно заряженных ионов в единице объема представляют собой особую проводящую среду, называемую **плазмой**.*

**Плазма- это** наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной.

частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

Она представляет собой газ заряженных частиц (ионов, электронов), которые электрически взаимодействуют друг с другом на больших расстояниях.

В состав плазмы входят:

- ▣ Нейтральные атомы
- ▣ Электроны
- ▣ Ионы



# ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ -

вещества, основным свойством которых является сильная электропроводность

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

Эл/техн приборы

I рода

Металлы и сплавы  
(расплавы),  
электронная элект-ть

с.н.з. — электроны

Аккумуляторы

II рода

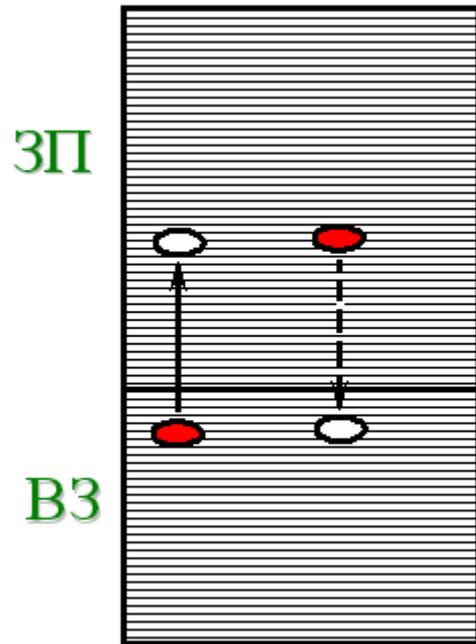
Водные растворы кислот,  
солей, щелочей -  
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

с.н.з. — ионы

I рода – структура и св-ва не меняются, II рода – меняются под действием тока.

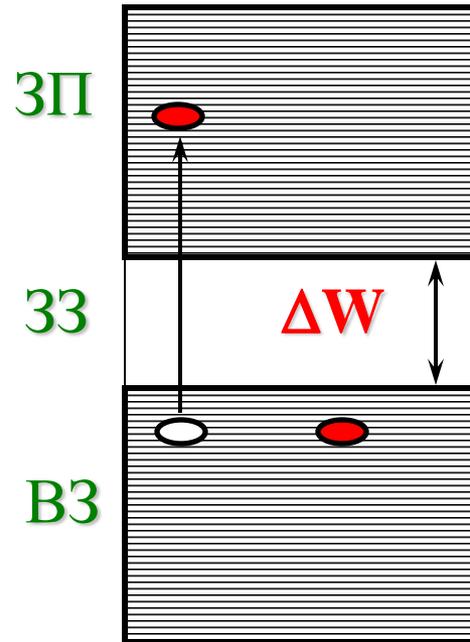
# ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



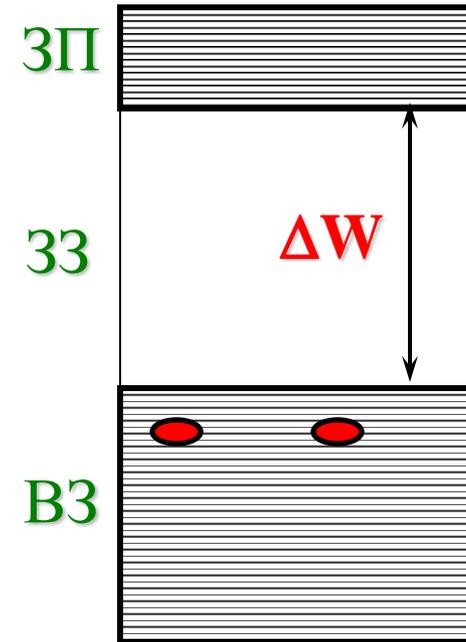
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

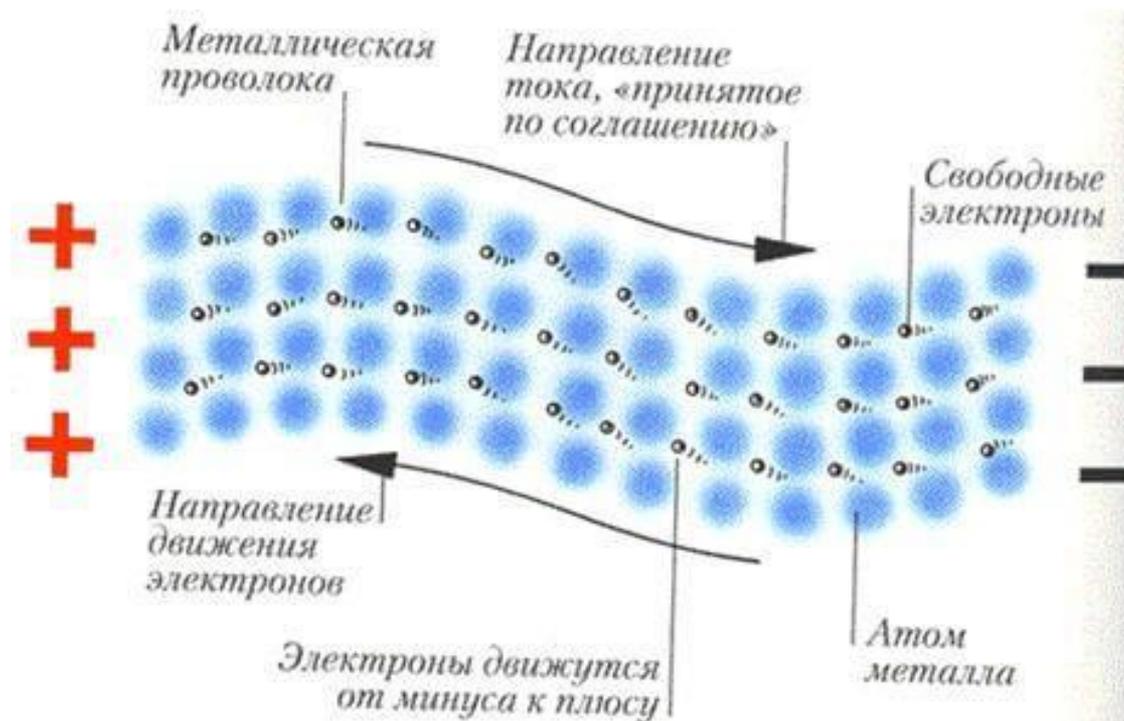
$$\rho \sim 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

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

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

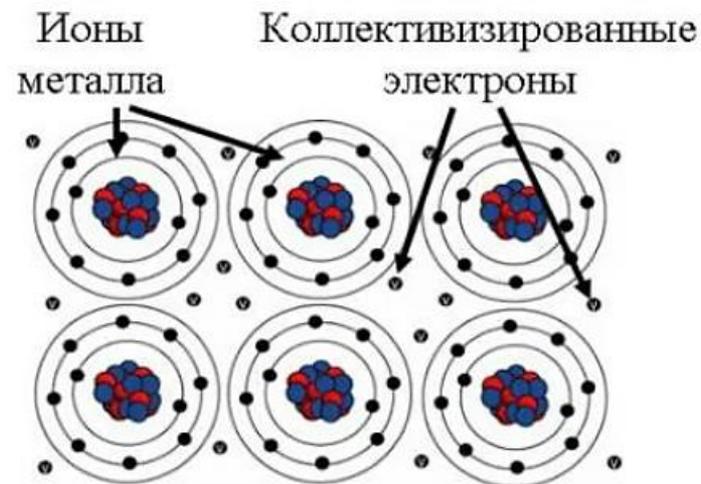
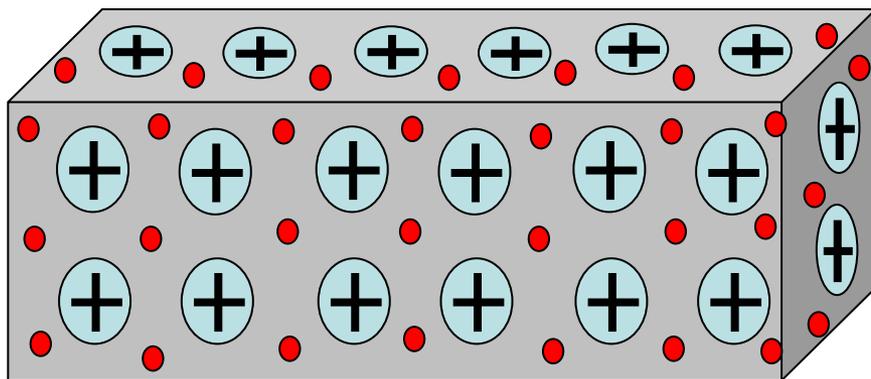
**Металлические проводники** являются основным типом проводниковых материалов, применяемых в электро- и радиотехнике.

**Твердый проводник** представляют в виде системы узлов кристаллической **ионной** решетки, внутри которой находится «**электронный газ**».



- Поскольку каждый атом *проводникового материала* отдает в «электронный газ» как минимум один электрон, концентрация свободных носителей зарядов в *проводниках* чрезвычайно велика.
- Например, *концентрация*  $n$  свободных электронов в  $Ag - 5,9 \cdot 10^{28}$ ,  $Cu - 8,5 \cdot 10^{28}$ ,  $Al - 8,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .
- Величина *концентрации* свободных электронов практически *не зависит от температуры*, что резко отличает *проводниковые материалы* от *полупроводниковых и диэлектрических*.

# 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.**

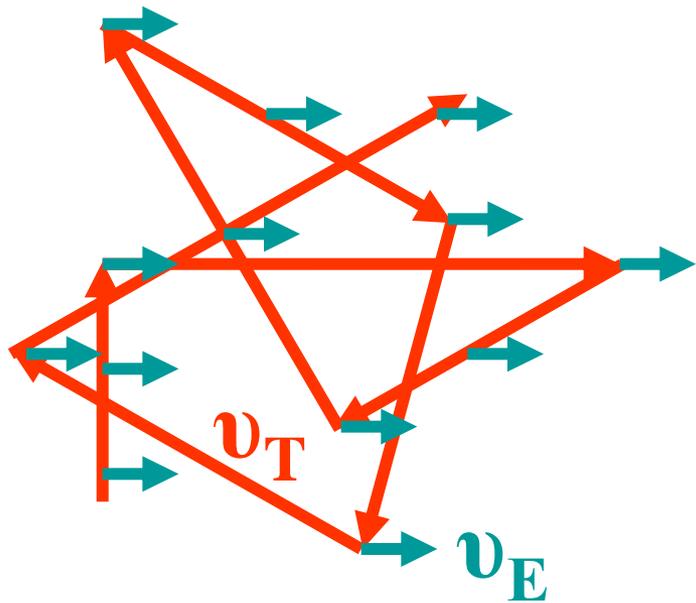
**$\mu$  - показывает среднюю скорость, которую  
приобретает с.н.з. в единицу времени в  
электрическом поле  $E=1\text{В/м}$**

- Под действием электрического поля напряженностью  $E$  свободные электроны помимо *скорости тепловых движений*  $v_T$  приобретают *компонент «электрической» скорости*  $v_E$ , имеющий направление, противоположное направлению вектора  $E$ .
- При *геометрическом сложении* скоростей свободных электронов в некотором объеме металла хаотически направленные скорости  $v_T$  *дают в сумме нуль*, а  $v_E$  *определяют дрейф электронов*.

Н-р, кабель 3 км, движется не один электрон, а масса электронов.

$$F = qE$$

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



$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с,}$$

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

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

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

*Скорость частиц* — это не скорость распространения электрического тока.

## *Скорость электрического тока*

- Н-р, «движение электронов» распространяется по кабелю со ск-ю, близкой к ск-ти света (зависит от свойств изоляции). Под ск-ю света в случае с эл. током понимается показатель ск-ти, с которым заряженные частицы *приходят в движение друг за другом (поступательное движ-е)*, а не движутся *относительно друг друга (дрейфовое движ-е)*.
- Носители заряда при этом обладают средней ск-ю, равной, как правило, нескольким миллиметрам за 1 сек.

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

$\mathbf{v}$  - дрейфовая скорость электронов [м/с];

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

$q = I \cdot t = N \cdot e$  - заряд [Кл];  $N$  – количество электронов;

$\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E} = \mathbf{E}/\rho$  - закон Ома;

$\rho = 1/\gamma$  - удельное эл. сопротивление [Ом·м];

$$1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$$

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

$S_{min} = I / j$  [м<sup>2</sup>] - минимальная площадь сечения проводника [м<sup>2</sup>];

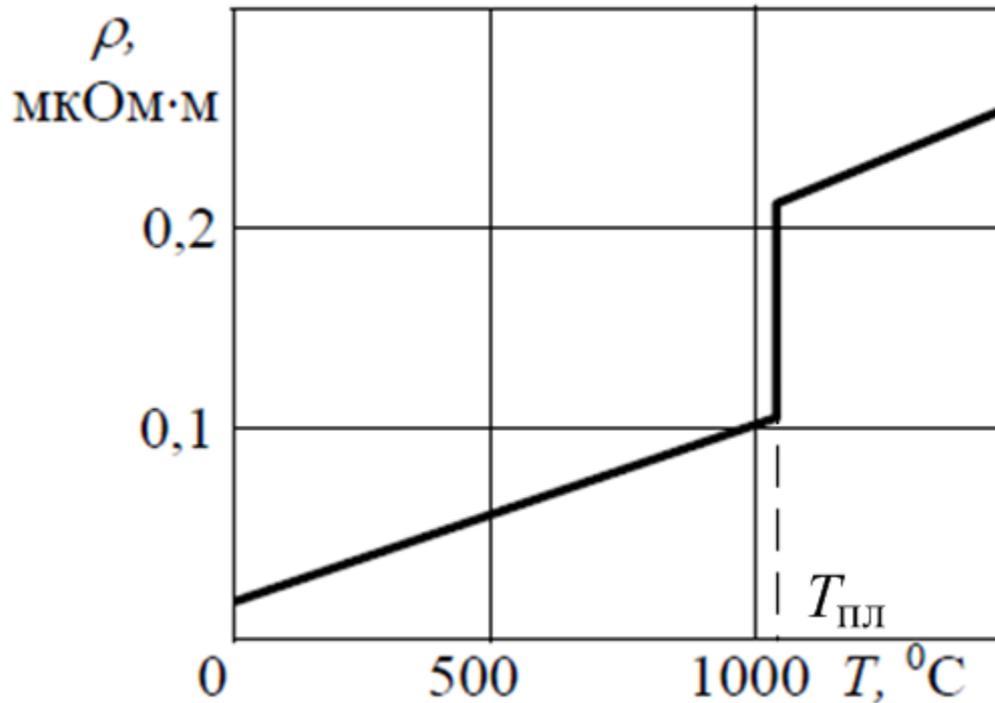
$S = S_{min} \cdot K_3$  - необходимая площадь сечения с учетом коэффициента запаса по мощности [м<sup>2</sup>];

$I$  - ток [А];

$j$  - плотность тока [А/м<sup>2</sup>];

$K_3=(1,2-2,5)$  - коэффициент запаса по мощности.

# Зависимость $\rho$ меди от $T$ : скачок при температуре плавления 1083 °С



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

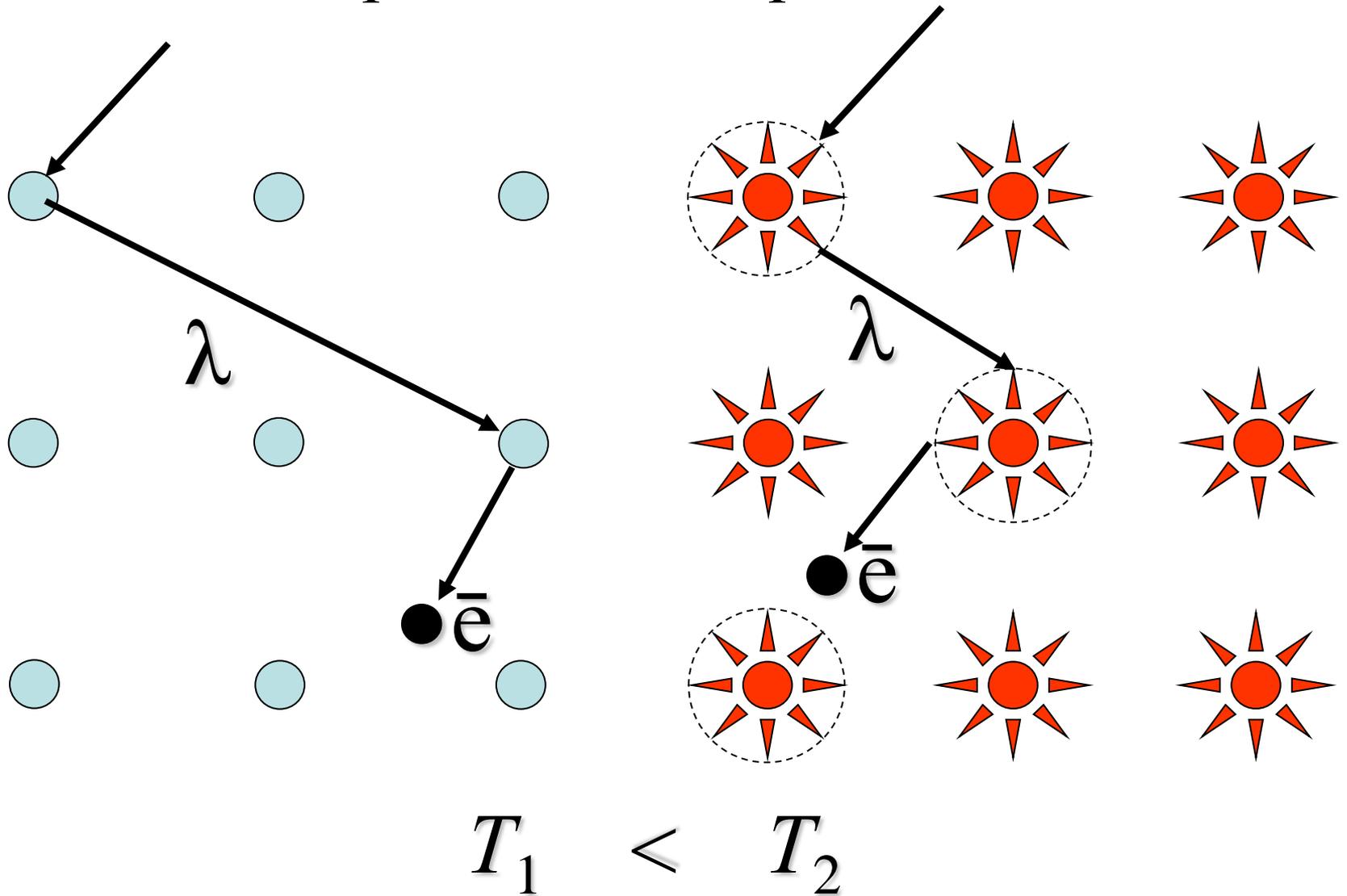
$$\rho = \rho_{\text{ост}} + \rho_T$$

При фазовом переходе из одного агрегатного состояния в другое сопротивление металлов растет скачкообразно.

Скачок – пока вся энергия не потратится на изменение агрегатного состояния, разрушается кристаллич. решетка, химич. связи.

- Рост  $\rho$  **металлов** при **повышении температуры** обусловлен тем, что **с ростом температуры** **возрастает амплитуда ангармонических тепловых колебаний узлов** кристаллической решетки.
- Вследствие этого **возрастает вероятность столкновения** дрейфующих под действием сил электрического поля **электронов с этими узлами**.
- При этом **уменьшается длина свободного пробега** электрона и **уменьшается его подвижность**.

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



Ионы совершают колебания вокруг своей оси.

Температурный коэффициент любой физической характеристики  $A$  [ $\text{K}^{-1}$ ]:

$$TK_A = \frac{1}{A} \frac{dA}{dT}$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления:

$$TK_\rho = \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

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

Характер изменения сопр-я от  $T$  описывает коэф-т.

# ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

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

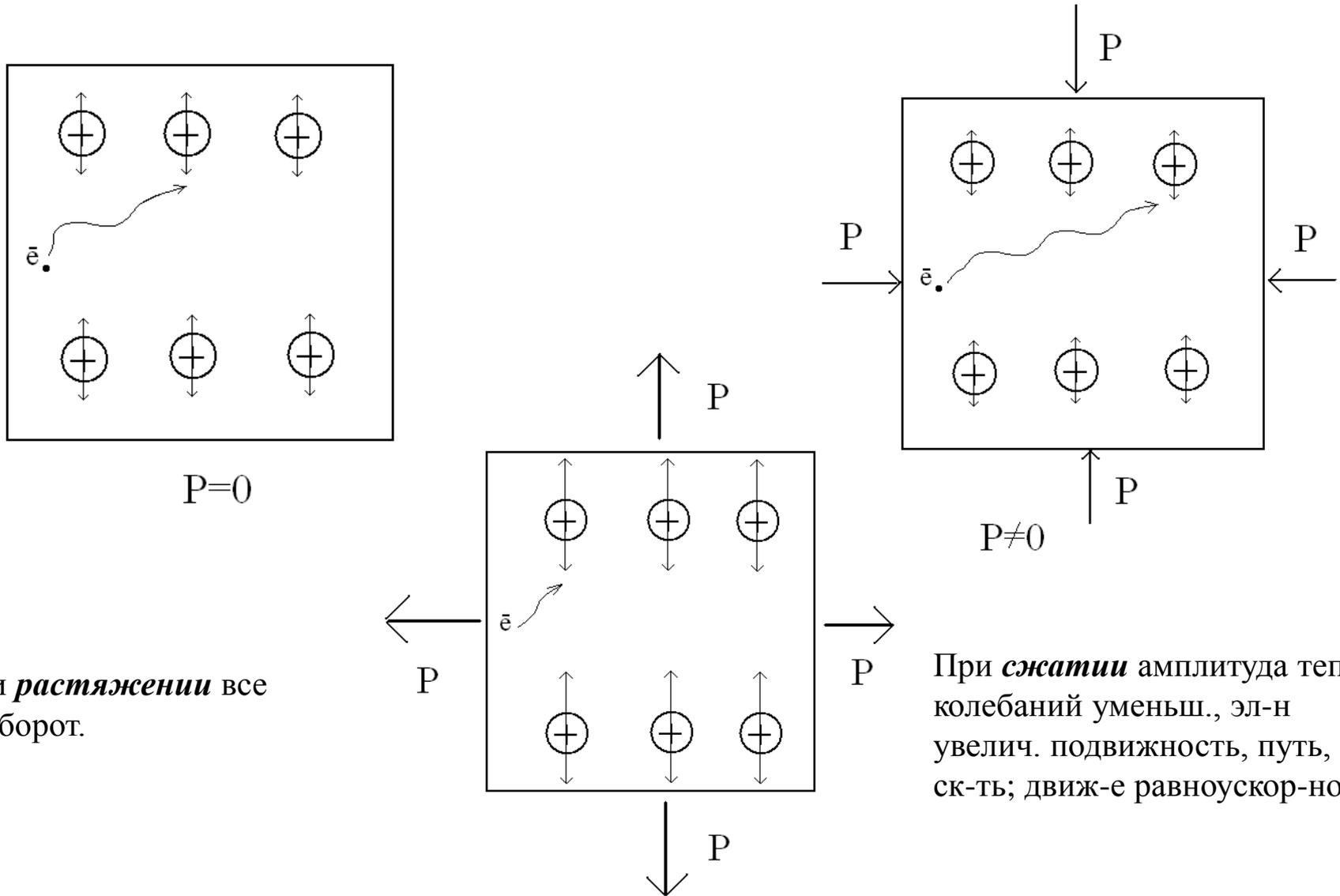
«-» сжатие  
«+» растяжение

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

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

*Отжиг* при 400-600 град., восстанавливает сопр-е (при *волочении* сопр-е увелич-ся).

# Всестороннее сжатие (растяжение)



При *растяжении* все наоборот.

При *сжатии* амплитуда тепл. колебаний уменьш., эл-н увелич. подвижность, путь, ск-ть; движ-е равноускор-но.

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

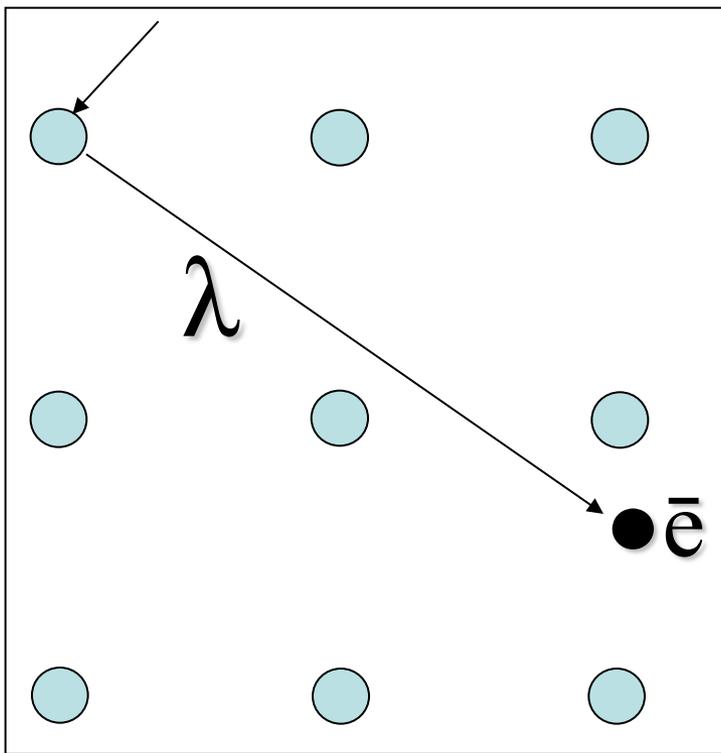
Значительное увеличение  $\rho$  наблюдается при сплавлении двух металлов при образовании общей кристаллической решетки, когда атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого – т.н. **твердые растворы**

Происходит снижение подвижности с.н.з.

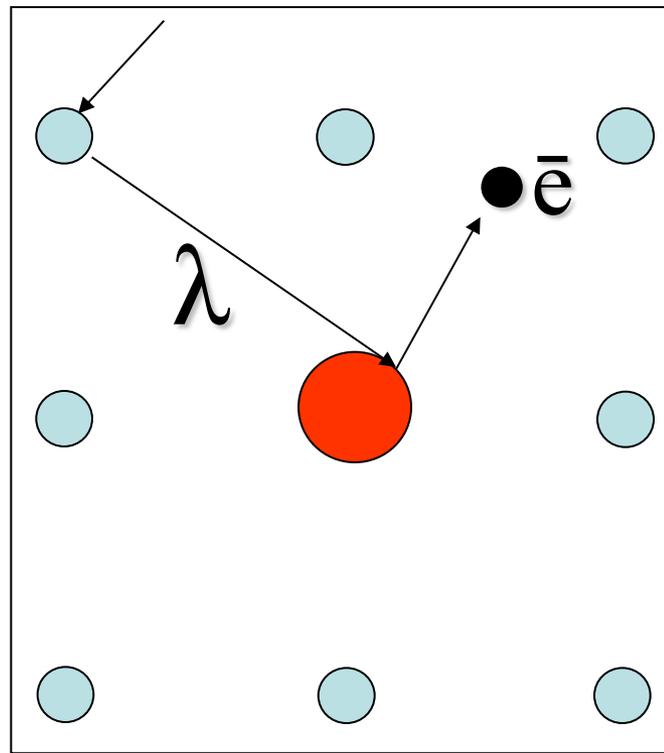
**В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!**

Если добавить серебро с низким сопр-м к железу с высоким сопр-м, в итоге сопр-е увелич-ся. Не химические связи, меняется кристаллич. решетка.

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



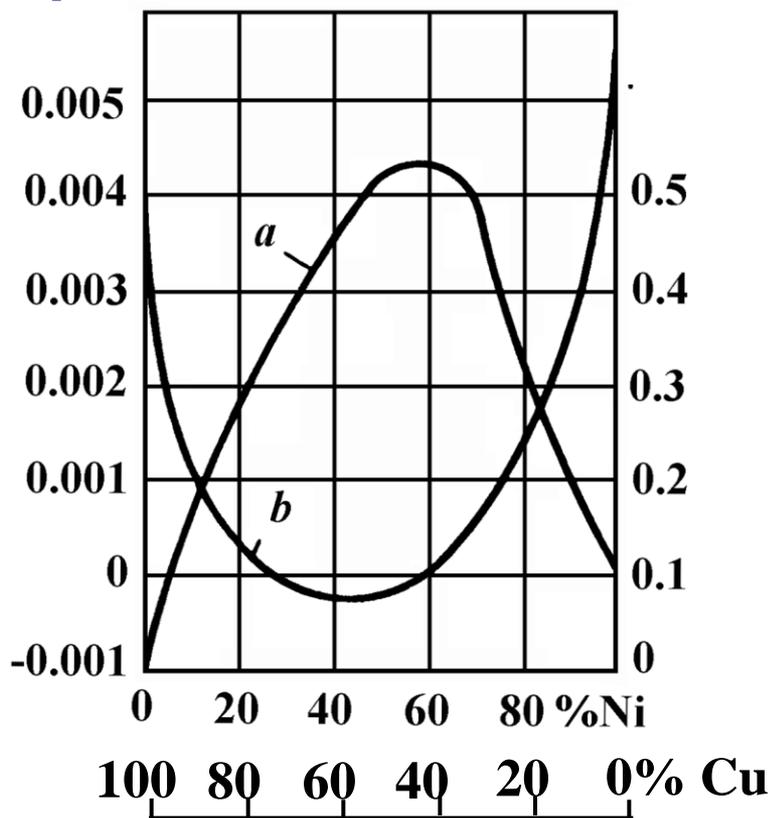
Чистый металл



Сплав

# Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава $Cu-Ni$

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



$a$  – зависимость  $\rho$

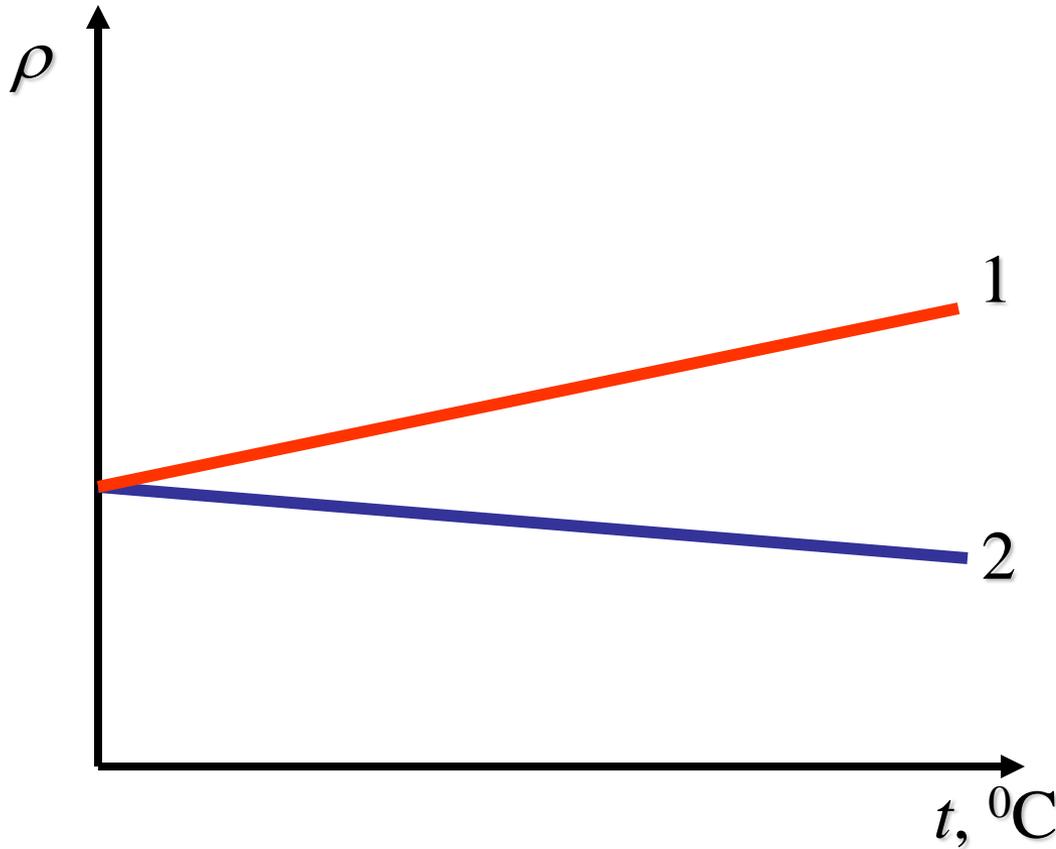
$b$  – зависимость  $TK\rho$

ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ

(в % по массе)

Медь	0,0175
Молибден	0,059
Нейзильбер (сплав меди цинка и никеля)	0,2
Натрий	0,047
Никелин ( сплав меди и никеля)	0,42
Никель	0,087

# 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)

# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

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

## Закон ВИДЕМАНА-ФРАНЦА-ЛОРЕНЦА

$$\frac{\lambda}{\gamma} = L_0 \cdot T \quad \text{где } T - \text{ абсолютная температура, } K;$$

$L_0$  - число Лоренца, равное

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k}{e^2} \quad \begin{array}{l} k - \text{ постоянная Больцмана;} \\ e - \text{ заряд электрона.} \end{array}$$

При  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К,  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл  $\Rightarrow L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup>.

- *Закон Видемана-Франца-Лоренца* для большинства *металлов* хорошо подтверждается при *температурах, близких к нормальной или несколько повышенных.*
- В *области низких температур* коэффициент  $L_0$  *проходит через минимум*, а при приближении к *абсолютному нулю* *вновь близок к теоретическому значению.*
- *Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  металлов много больше, чем  $\lambda$  диэлектриков.*

Абсолютный нуль – темп-ра, при которой отсутствует тепловое движение молекул, - 273 град. Цельсия или 0 К.

# 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



- Соприкоснулись *2 витка из различного металла*, нужна *работа выхода*, чтобы электрон вышел из металла без ускорения.
- 3-х валентный электрон и 2-х валентный электрон – *концентрация ( $n$ ) различная*, электрон течет от  $A$  к  $B$  из металла с большей  $n$  в металл с меньшей  $n$  (*работа выхода* больше в  $A$ ), место контакта нагревается.
- Например, в *старых телевизорах* – катод разогревался – электроны вылетали (*работа выхода*) – на люминесцентном экране появлялась картинка.

# 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 ( $90\%Ni+10\%Cr$ )
- Платинородий ( $90\%Pt+10\%Rh$ )

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

$Bi$	$-65.0$	$(Fe\text{--конст.}) =$
$Fe$	$+16.0$	$= (Fe\text{--}Pt) - (\text{конст.}\text{--}Pt) =$
$Cu$	$+7.4$	$= +16,0 - (-34,4) = 50,4$
$Ni$	$-16.4$	<b>Знак</b> показывает направление термотока: в нагретом спае ток течет от меньшего $K$ к большему (напр. в $Fe$ -конст. от конст. к $Fe$ )
$Sb$	$+47.0$	
<b>Константан</b>	$-34.4$	
$Cu(60\%)Ni(40\%)$		

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

$Bi$  – висмут,  $Sb$  – сурьма

# Температурный коэффициент линейного расширения:

$$TK\ell = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dT} \quad [K^{-1}]$$

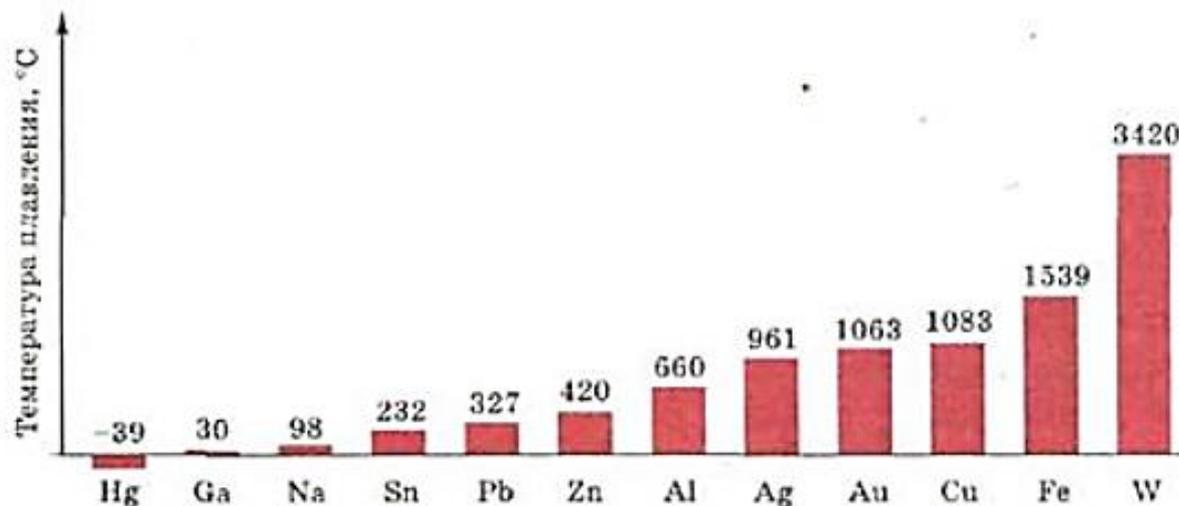
где  $l$  – произвольный линейный размер изделия из данного материала.

Коэффициент *важен* с точки зрения работы различных *сопряженных материалов в той или иной конструкции (возможность растрескивания, или нарушения вакуум-плотного соединения со стеклами, керамикой и др. при изменении температуры)*.

При нормальной температуре *легкоплавкие металлы* обычно имеют *сравнительно высокие*, а *тугоплавкие сравнительно низкие* значения  $TKl$ .

# Классификация металлов по температуре плавления

- **Легкоплавкие металлы** (температура плавления  $<1000^{\circ}\text{C}$ ). Самый легкоплавкий из металлов - *ртуть* Hg ( $-38,89^{\circ}\text{C}$ ). При комнатной температуре является жидкостью. В технике широко применяются легкоплавкие металлы: *олово* и *свинец*.
- **Тугоплавкие металлы** (температура плавления  $>1500^{\circ}\text{C}$ ). Максимальную температуру плавления имеет *вольфрам* W ( $3420^{\circ}\text{C}$ ).



*Ga* – галлий, *Sn* – олово, *Pb* – свинец

# Температурный коэффициент электрического сопротивления провода:

$$TKR = TK\rho - TK\ell \quad [K^{-1}]$$

$$TKR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$



*Для чистых металлов* можно считать приближенно  $TKR = TK\rho$ .

*Для сплавов*, имеющих малый  $TK\rho$ , формула имеет *существенное практическое значение*.

# Механические свойства проводников

*Проходили в материаловедении*

- предел прочности при растяжении  $\sigma_p$ ;
  - относительное удлинение при разрыве  $\Delta l / l$  ;
  - твердость;
  - хрупкость.
- *Механические свойства* зависят от *механической и термической обработки*, от *наличия примесей* и т. п.
  - Например, *отжиг* приводит к *уменьшению*  $\sigma_p$  меди при растяжении в 1,5 – 2 раза и *увеличению*  $\Delta l / l$  в 15 – 20 раз.

# 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 (бериллий)

Происходит замораживание узлов кристал. решетки

**Требования к криопроводникам (наличие ВЧ):**

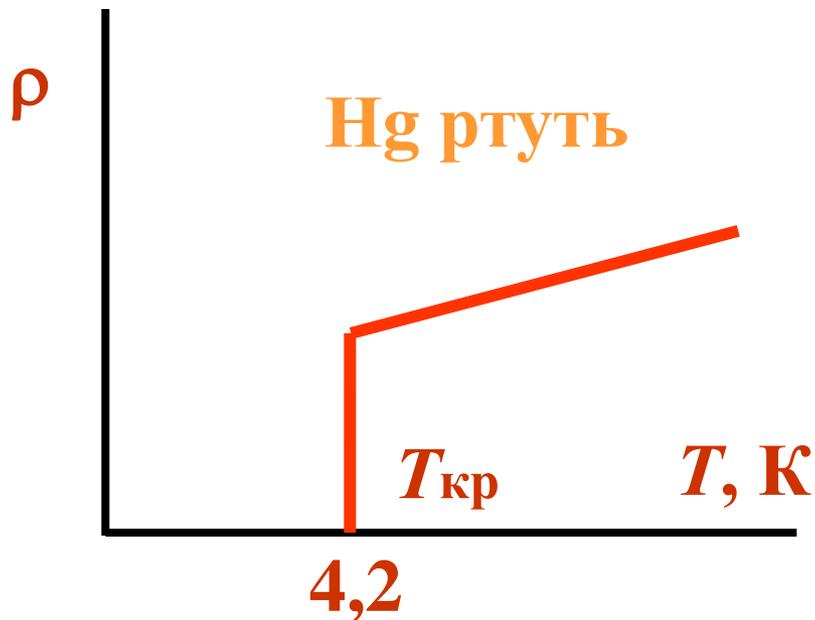
- минимальное содержание примесей;
- правильная (без дефектов) кристаллическая решетка.

Удельная проводимость **металлов** возрастает в сотни и тысячи раз по сравнению с проводимостью при нормальной температуре.

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

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

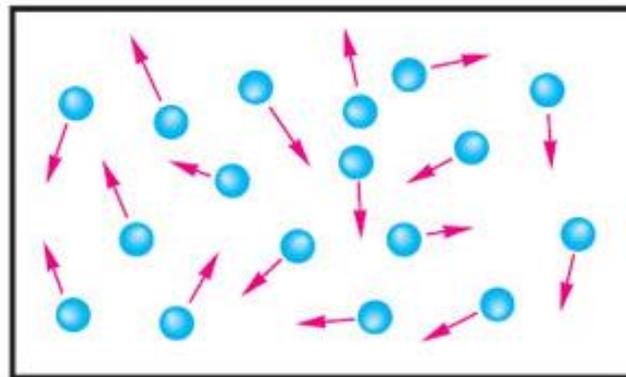
1911 год. Камерлинг - Оннес



При охлаждении до температуры 4,2 К сопр-е кольца из *замороженной ртути* внезапно падает практически до нуля. Темп-ра, при которой совершается *переход в-ва в сверхпроводящее состояние* (является обратимым), называют *температурой сверхпроводящего перехода*  $T_{кр}$ .

- ✓ Камерлинг - Оннес хотел выяснить, сколь малым может стать *сопротивление* вещества эл. току, если максимально *очистить* вещество *от примесей* и максимально *снизить «тепловой шум»*, т.е. уменьшить температуру.
- ✓ Эл. ток — это движение *заряженных* частиц. Уже в то время было известно, что эл. ток в твердых телах — это *поток электронов*. Они *заряжены отрицательно* и намного легче, чем *атомы*, из которых состоит всякое вещество.

- ✓ Каждый *атом* в свою очередь состоит из *положительно заряженного ядра* и *электронов*, взаимодействующих с ним и м/у собой по з. Кулона. Каждый *атомный электрон* занимает определенную *«орбиту»*. Чем ближе *«орбита»* к *ядру*, тем *сильнее электрон* притягивается к нему.
- ✓ *Внешние электроны* называются *валентными*. В *металлах* они отрываются от *атомов* и образуют *газ почти свободных электронов*.



- ✓ Если мы создали *эл. поле* — приложили к исследуемому кусочку в-ва *напряжение*, в *электронном газе* возникнет ветер под действием разности давлений. Этот ветер и есть *эл. ток*.
- ✓ Не все вещества хорошо проводят *эл. ток*. В *диэлектриках* валентные электроны остаются «*привязанными*» к своим *атомам* и не просто заставить их двигаться через весь образец.
- ✓ Зависит от того, *из каких атомов* составлены в-ва и *как* эти атомы *расположены*. Иногда расположение атомов меняется, например, под действием *давления атомы сближаются* и *диэлектрик* становится *металлом*.

- ✓ Через **диэлектрики** ток *не течет*, но и в **металлах электроны** движутся не свободно. Они наталкиваются на атомные «остовы», от которых «оторвались», и *рассеиваются на них*. При этом возникает **трение** или, как говорят, **эл. ток испытывает сопротивление**.
- ✓ При **сверхпроводимости** **сопротивление исчезает**, становится равным нулю, т.е. движение электронов происходит **без трения**.

Для меди при комнатной тем-ре:  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Металлы:

Алюминий  
Свинец  
Ртуть

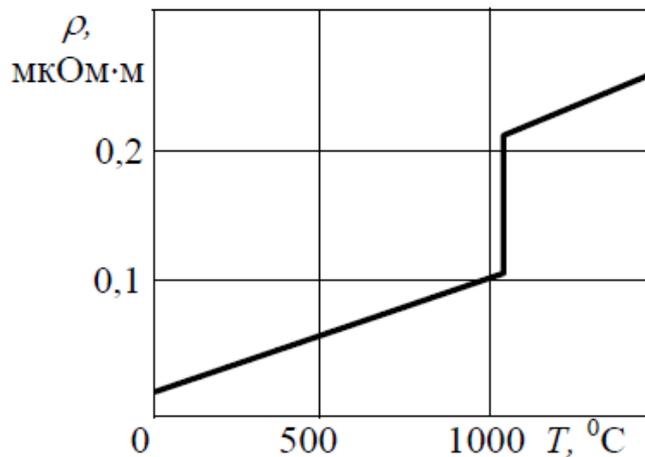
$\rho = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$   
 $\rho = 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$   
 $\rho = 95,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

Диэлектрики:

Асбест  
Резина  
Янтарь

$\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$   
 $\rho = 4 \cdot 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{см}$   
 $\rho = 1 \cdot 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

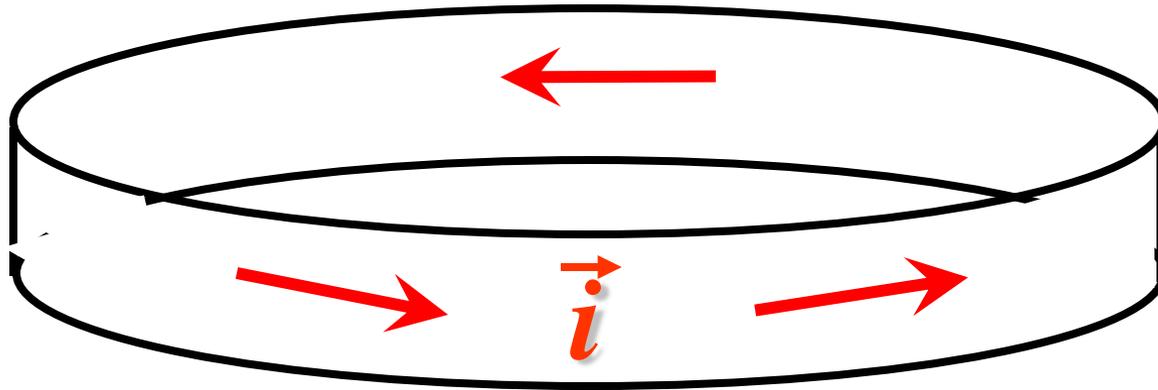
- ✓ При *понижении темп-ры  $T$  удельное сопр-е меди* постепенно понижается и при темп-ре несколько К составляет  $10^{-9}$  Ом·см, но *сверхпроводником медь* (так же *золото, платина*) *не становится*. А *алюминий, свинец, ртуть переходят* в *сверхпроводящее* состояние.



Для меди.

*Остаточное сопр-е* зависит от *совершенства и состава образца*. В любом веществе встречаются посторонние атомы-примеси, а также всевозможные другие дефекты. Чем *меньше* в образце *дефектов*, тем *меньше* *остаточное сопр-е*.

Если в кольце из сплава  $Nb_3Sn$  (станнид ниобия) путем электромагнитной индукции возбудить ток



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

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

$Nb$  – ниобий,  $Sn$  - олово

# В объеме сверхпроводника **нет** магнитного поля

Сильное магнитное поле *разрушает*  
явление сверхпроводимости!!!

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ:

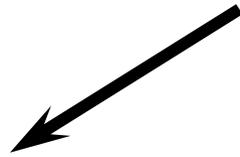
1. Сверхнизкие температуры  $T_i < T_{кр}$
2. Слабые магнитные поля  $H_i < H_{кр}$

При достижении *критического значения напряженности*  $H_{кр}$  состояние *сверхпроводимости* разрушается. Это м.б. вызвано также магнитным полем критического тока  $I_{кр}$ , проходящего по *сверхпроводнику*.

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

- ✓ алюминий  $Al = 1,19 \text{ }^\circ\text{K}$ ;
- ✓ кадмий  $Cd = 0,56 \text{ }^\circ\text{K}$ ;
- ✓ олово  $Sn = 3,722 \text{ }^\circ\text{K}$ ;
- ✓ цинк  $Zn = 0,875 \text{ }^\circ\text{K}$ ;
- ✓ ниобий-германий  $Nb_3Ge = 23,2 \text{ }^\circ\text{K}$ .

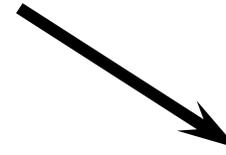
# СВЕРХПРОВОДНИКИ



## I рода (мягкие)

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

**Полное вытеснение** магнитного поля из объема сверхпроводника.

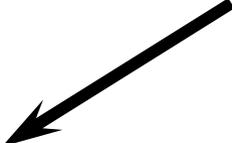


## II рода (твердые)

Переход в сверхпроводящее состояние двумя значениями  $H_{кр1}$  и  $H_{кр2}$ . Область  $H_{кр1} - H_{кр2}$  соот-т смешанному состоянию проводимости материала (сверхпроводимость и криопроводимость).

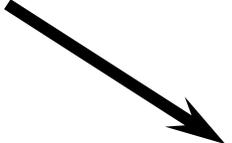
**Частичное вытеснение** магнитного поля из объема сверхпроводника.

# СВЕРХПРОВОДНИКИ



## I рода (мягкие)

Относятся чистые металлы (всего более 20), кроме таких как ниобий Nb, ванадий V и технеций Tc. Это металлы, обладающие сравнительно плохой проводимостью при комнатной температуре (ртуть, свинец, титан и др.).

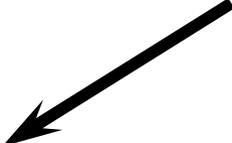


## II рода (твердые)

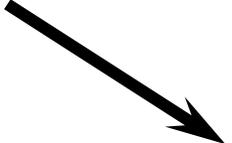
Относятся не чистые металлы, а сплавы или химические соединения (всего несколько сотен). Например, соединения MoN, WC, CuS являются сверхпроводниками второго рода, хотя Mo, W, Cu и тем более N, C и S не являются сверхпроводниками.

Mo – молибден; N – азот; W – вольфрам; C – углерод; Cu – медь; S – сера.

# СВЕРХПРОВОДНИКИ



## I рода (мягкие)



## II рода (твердые)

Сверхпроводники 1-го рода  $T_c$ , °K      Сверхпроводники 2-го рода  $T_c$ , °K

Ti	0,37	CuS	1,6
Zn	0,79	PbTl	3,8
Al	1,14	Mo <sub>2</sub> N	
Tl	2,38	NbB	
Sn (белое)	3,73	MoNe	8-12
Hg	4,15	NbTi	9,3
La	4,71	NbZr	10,5
V	5,1	V <sub>2</sub> Ga	14,5-16,5
Pb	7,22	V <sub>3</sub> Si	16,9-17,1
Tc	11,2	NbSn	

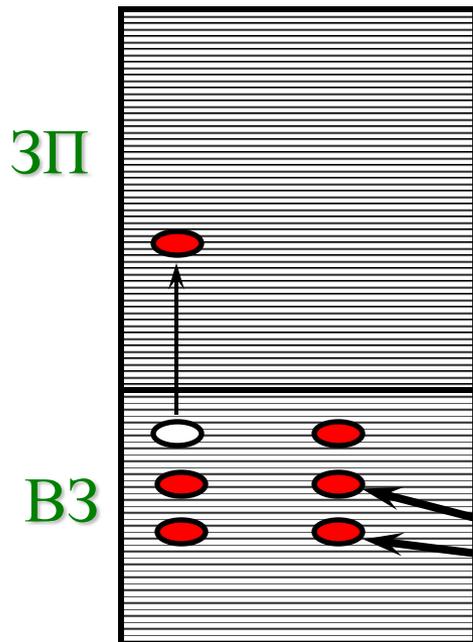
- ✓ Термины *мягкий* и *твердый* не характеризует *механических свойств* материалов. Эти термины связаны с *малым значением*  $H_{кр}$  у «*мягких*» и *высоким значением*  $H_{кр}$  у «*твердых*» сверхпроводников.



*Постоянный магнит* длиной несколько см парит на расстоянии чуть больше 1 см над дном *сверхпроводящей* чашечки, поставленной на три *медные* ножки. Ножки стоят *в жидком гелии*, а чашечка находится *в парах гелия* для *поддержания сверхпроводящего* состояния.

# ПРИРОДА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

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



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.

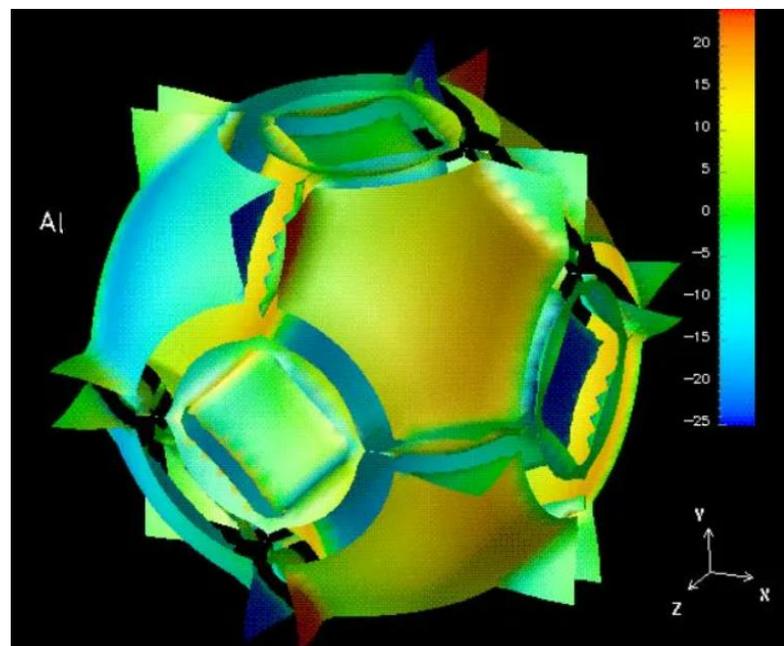
$$\Delta W = 0$$

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

- ✓ *Ферми поверхность* – изоэнергетическая поверхность в пространстве квазиимпульсов  $p$ , отделяющая область занятых электронных состояний металла от области, в которой при  $T=0$  К электронов нет.
- ✓ *Каждый металл* характеризуется *своей Ферми поверхностью*, причем *формы* поверхностей *разнообразны*.

*Изоэнергетическая поверхность* – поверхность, в каждой точке которой энергия имеет одно и то же значение.

*Квазиимпульс* – векторная величина, характеризующая состояние квазичастицы (н-р, подвижного электрона в периодическом поле кристаллической решётки).



# ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость

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

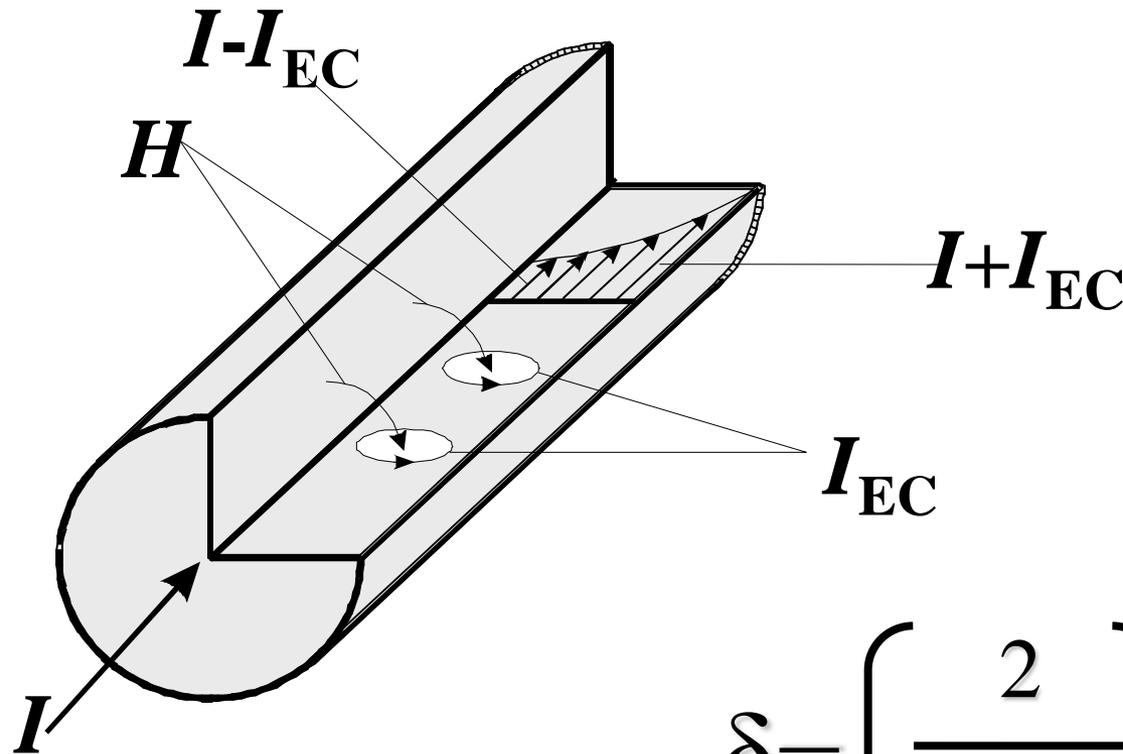
В настоящее время известно 27 простых (*чистых металлов*) и более 1000 сложных (*сплавов и соединений*) *сверхпроводников*.

Широко используется керамика на основе висмута.

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

- ✓ В силу отсутствия сопр-я в *сверхпроводниках*, *кабели* из такого в-ва доставляли бы *электричество без потерь* на нагревание, что значительно бы *повысило эффективность электроснабжения*.
- ✓ Такие *кабели требуют охлаждения* посредством жидкого азота, что *повышает цену* на их эксплуатацию.
- ✓ *Первая электропередача* на основе *сверхпроводников* была приведена в эксплуатацию в Нью-Йорке 2008-м г. компанией American Superconductor.

# Поверхностный эффект (Скин-эффект)



Поверхностный эффект в  
одиначном проводнике.

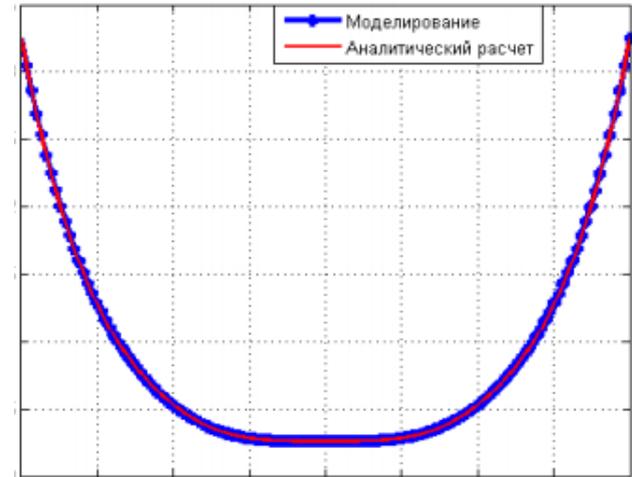
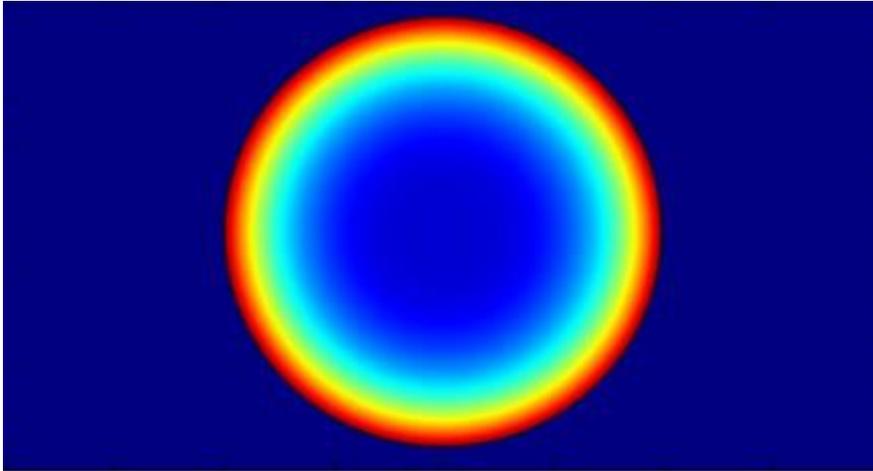
$$\delta = \left( \frac{2}{\gamma \mu \mu_0 \omega} \right)^{1/2}$$

где  $\delta$  – глубина проникновения или толщина скин-слоя;  
 $I_{EC}$  – индукционные вихревые токи.

- ✓ Если в однородном **проводнике** течёт **постоянный ток**, то плотность тока  $j$  **одинакова** в каждой точке сечения. В случае **переменного тока** **наибольшая**  $j$  – на поверхности, а **наименьшая**  $j$  – на оси круглого проводника → **поверхностный** или **скин-эффект**.
- ✓ Переменный ток  $I$  частотой  $f$  вызывает возникновение **переменного поля**  $H$ , которое вызывает возникновение  $I_{\text{ес}}$  в объёме **проводника**. При этом, происходит **«выдавливание»** эл. поля из объёма **проводника**.

Направление **магн. поля** – по правилу левой руки; направление **вихревых токов** – по правилу буравчика.

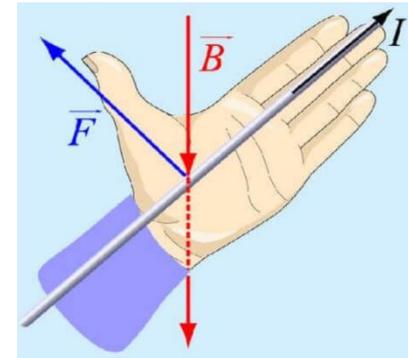
**Поверхностный эффект** – увеличение плотности тока у поверхности жилы при увеличении частоты, обусловленное взаимодействием *вихревых токов с основным*.



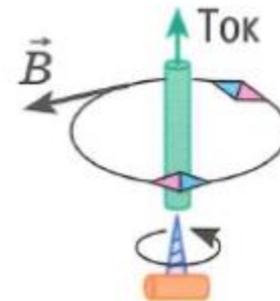
**Вихревые токи (токи Фуко)** – замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока.

**Вихревые токи** в центре жилы имеют противоположное направление *основному току*, а у поверхности – совпадают по направлению.

- ✓ **Правило левой руки** – если расположить левую руку так, чтобы четыре пальца были направлены по направлению движения положительного заряда (или по направлению тока), а линии магнитной индукции входили в ладонь, «прокалывая» её, то большой палец покажет направление силы Лоренца (или силы Ампера).



- ✓ **Правило буравчика** – если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора  $B$ .



- ✓ *Сила Лоренца* – Магнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами. И в свою очередь электрические заряды, движущиеся в магнитном поле, испытывают силовое воздействие с его стороны. Сила, действующая на движущийся заряд, называется силой Лоренца.

$$F_L = qvB\sin\alpha$$

где:

- $F_L$  — величина силы Лоренца;
- $q$  — величина движущегося заряда;
- $v$  — скорость движения заряда;
- $B$  — индукция магнитного поля;
- $\alpha$  — угол между векторами скорости и индукции.

- ✓ *Сила Ампера* – Поскольку электрический ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов, то в случае, когда он протекает через магнитное поле, силы Лоренца, действующие на отдельные носители, складываются в одну общую силу, которая называется силой Ампера.

$$F_A = I \Delta l B \sin \alpha$$

где:

- $F_A$  — величина силы Ампера;
- $I$  — сила тока в проводнике;
- $\Delta l$  — длина проводника;
- $B$  — индукция магнитного поля;
- $\alpha$  — угол между векторами тока и индукции.

Схожесть формул объясняется тем, что сила Ампера является макроскопическим проявлением силы Лоренца. Направление действия этих сил совпадает.

✓ *Электрон* – субатомная частица (обозначается символом  $e$  или  $q$ ), чей электрический заряд отрицателен и равен по модулю одному элементарному электрическому заряду. В пределах экспериментальной точности заряд электрона идентичен заряду протона, но с обратным знаком.

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

- ✓ *Центростремительная сила* – сила, определяющая кривизну траектории движущейся материальной точки. Направлена перпендикулярно вектору скорости точки к центру кривизны её траектории. Ц. с. создаёт нормальное ускорение (центростремительное ускорение).

$$\vec{F}_{\text{ц}} = m \cdot \vec{a}_{\text{ц}} = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$\vec{a}_n \left( \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)$  – центростремительное ускорение;

$v \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$  – линейная скорость точки;

$$\left| \vec{a}_n \right| = \frac{v^2}{R}$$

$R \text{ (м)}$  – радиус окружности, по которой движется точка.

$m \text{ (кг)}$  – масса точки.

- ✓ *Работа* – изменение кинетической энергии материальной точки (электрона), которое произошло за время действия сил.
- ✓ *Напряжение* показывает, какую *работу* совершает электрическое поле при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую.

$$eU = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

$e$  – заряд электрона;

$U$  – напряжение

$m$  – масса электрона

$v$  – скорость

$$U = Ed$$

$E$  – напряженность эл. поля;

$d$  – расстояние между двумя точками.

- ✓ *Напряженность* электрического поля  $E$  в данной точке численно равна силе  $F$ , с которой поле действует на единичный положительный заряд  $q_0$ , помещенный в эту точку:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

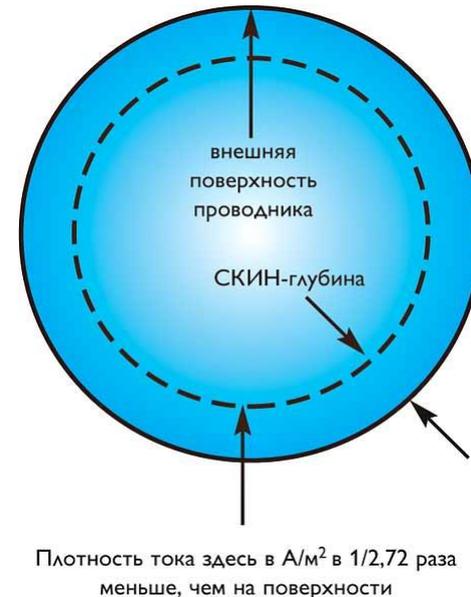
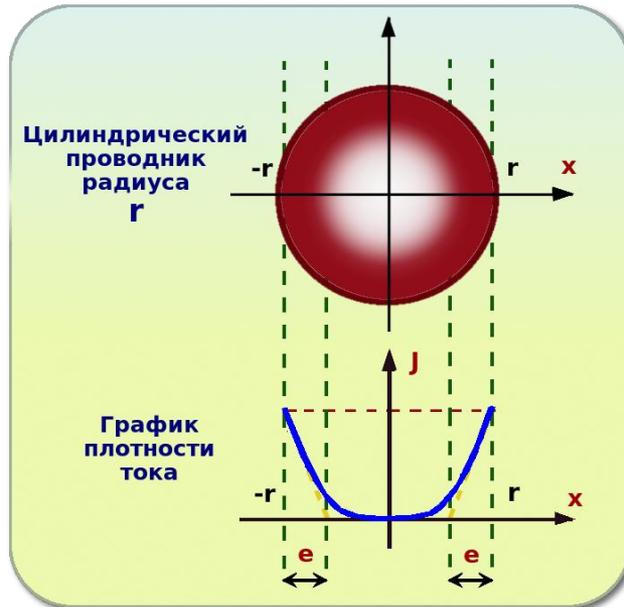
- ✓ *Второй закон Ньютона – ускорение*  $a$  тела прямо пропорционально приложенной силе  $F$  и обратно пропорционально массе  $m$ :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

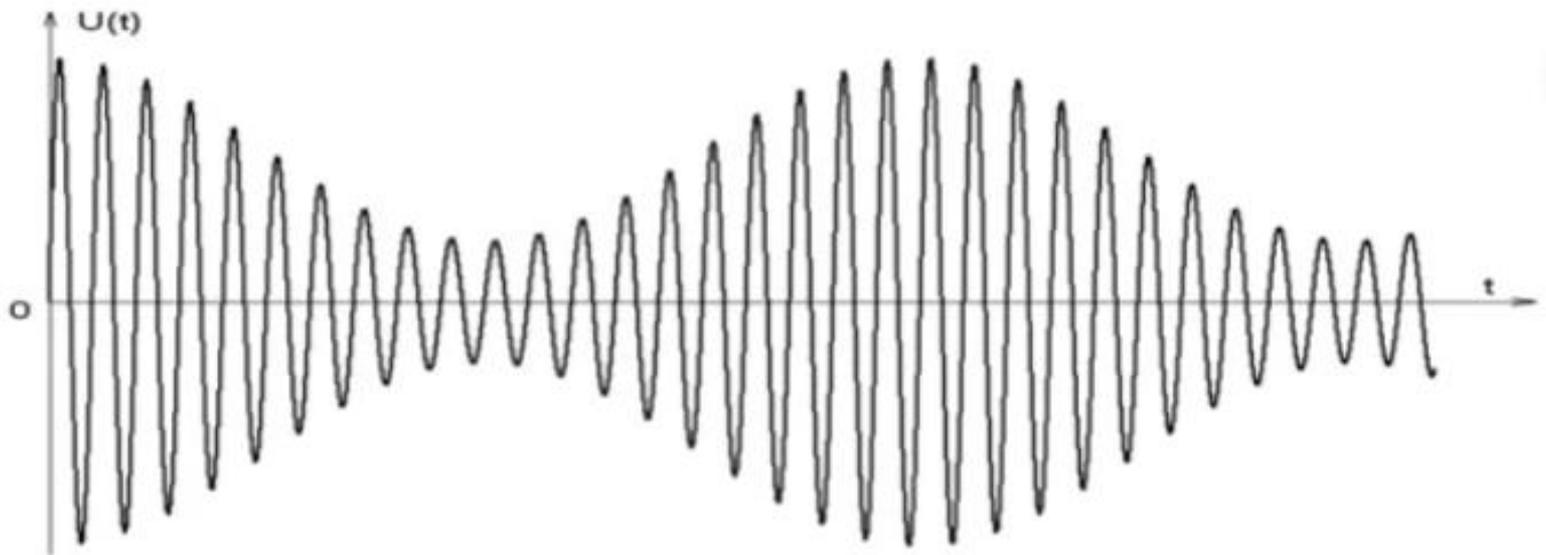
$$a = \frac{v}{t}$$

$v$  – скорость;  
 $t$  – время.

- ✓ Вследствие **скин-эффекта** при больших  $f$  ток течёт **через узкий поверхностный слой проводника**, что приводит к **увеличению сопр-я**. Поэтому на РЧ применяют **полые (трубчатые) проводники** (фидеры), а для уменьшения потерь на ВЧ поверхности **проводников**, а также внутренние поверхности волноводов покрывают **слоем металла с высокой проводимостью** (Ag, Au).



- ✓ Основное преимущество серебрения на ВЧ и СВЧ (Ag): **более высокая устойчивость серебра к окислению.**
- ✓ Вместо чистого сигнала, на выходе проводника появляется **искажённый результат со множеством гармоник**. Нередко задача заключается в выделении именно слабых составляющих сигнала (например, ЭХО-ответ), которые, получаются, сильно зашумленными.



# 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

# Применение проводниковых материалов:

**1. Металлы и сплавы с высокой удельной электропроводностью:** минимальное значение  $\rho$ ; достаточно высокие мех. свойства; хорошая технологичность (способность к пластическим деформациям, пайке, сварке); высокая стойкость к действию агрессивных сред.

**Область применения:** для изготовления обмоточных и монтажных проводов; различного вида токоведущих частей (жил кабелей); для изготовления коллекторных узлов эл. машин; контактных проводов; при производстве малогабаритных конденсаторов; в стабилизаторах тока; в электронной технике и приборостроении.

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

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

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

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

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

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

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

$(5 \div 10)\% Al$ , ост.  $Cr$

# Применение проводниковых материалов:

## 2. Металлы и сплавы с высоким удельным сопротивлением:

высокое значение  $\rho$ ; стабильное значение  $\rho$  во времени; малый температурный коэффициент сопротивления  $T\alpha\rho$ ; малый коэффициент термоЭДС в паре с медью (за исключением материалов для термопар); хорошая технологичность; способность длительно работать при высоких (до 1000 °С) температурах.

**Область применения:** для изготовления образцовых резисторов (манганин и константан) и нагревательных элементов (сплавы на основе железа, нихромы, ферронихромы и фехрали (хромали)).

### 3. Металлы и сплавы специального назначения

- **Материалы для термопар.**
- **Тензометрические сплавы** (датчики деформаций и давлений).
- **Контактные материалы:** скользящие (потенциометры, реостаты и т.д.), разрывные (реле, пускатели и т.д.) контакты.
- **Припой** (сплавы, применяемые при пайке): мягкие, низкотемпературные (сплав Вуда – 50%Bi; 25%Pb; 12,5%Sn; 12,5% Cd;  $t_{\text{пл}} = 60,5^{\circ}\text{C}$ ), твёрдые.

# Применение проводниковых материалов:

## 3. **Металлы и сплавы специального назначения:**

- **Материалы для термопар** характеризуются наибольшими предельно допустимыми величинами температур спая, коэффициентами термоЭДС и удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ .
- **Тензометрические сплавы** применяются для изготовления датчиков деформаций и давлений (обычно растягивающих усилий).
- **Контактные материалы.** По условиям работы подвижные контакты могут быть разделены на два типа: **скользящие** (передача эл. энергии от неподвижной части уст-ва к подвижной (потенциометры, реостаты и т.д.) и **разрывные** (обеспечивают управляемое, периодическое замыкание и размыкание эл. цепей в течение длительного времени (реле, пускатели и т.д.).

# Применение проводниковых материалов:

## 3. Металлы и сплавы специального назначения:

- Материалы электровакуумной техники используются для получения герметически прочных спаев металла со стеклом или керамикой, что необходимо в электровакуумном и полупроводниковом производстве.
- Припой подразделяют на мягкие с температурой плавления  $T_{пл} < 300 \text{ }^\circ\text{C}$  и твердые с  $T_{пл} \geq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ . В настоящее время мягкие припой подразделяются на *низкотемпературные*  $T_{пл} < 145 \text{ }^\circ\text{C}$  и легкоплавкие  $145 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{пл} \leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Особую группу твердых припоев составляют *электровакуумные припой*, применяемые при пайке узлов электронных приборов работающих в вакууме при высоких температурах.