

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)



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

1	ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПЯЖЕНИЕ		
	600 В		
	3		
2	МАКС. РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПРОВОДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ		
	155 °С	200 °С	
	5	6	
3	МАТЕРИАЛ ПРОВОЛОКИ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИЛЫ		
	Медные проволоки	упрочненные проволоки из сплава БрХЦрК	
	1	2	
4	ПОКРЫТИЕ ПРОВОЛОК ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ		
	Олово	Серебро	Никель
	2	3	4
5	НОМЕР РАЗРАБОТКИ		
6	СЕЧЕНИЕ ПРОВОДА, мм² (указывается при обозначении маркоразмера)		
	от 0,20 до 25		
7	УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ЦВЕТОВ ИЗОЛЯЦИИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ (указывается при обозначении маркоразмера)		
	Б - белый или натуральный (неокрашенный)	Ж - желтый	
	З - зеленый	К - красный	
	Кч - коричневый	С - 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)



**КАБЕЛИ И
ПРОВОДА**

Разработка и
производство
проводов и кабелей



**НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ
КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ
ПРОДУКЦИИ**

3. КАБЕЛИ РАДИОЧАСТОТНЫЕ

Условные обозначения,
используемые при маркировке кабелей



1

ТИП КАБЕЛЯ

РК — радиочастотный коаксиальный

2

НОМИНАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, Ом

50

3

НОМИНАЛЬНЫЙ ДИАМЕТР ПО ИЗОЛЯЦИИ, мм

1,5

2

3

4

КАТЕГОРИЯ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ И ГРУППА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

1 — обычная теплостойкость со сплошной изоляцией

2 — повышенная теплостойкость со сплошной изоляцией

5

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР РАЗРАБОТКИ

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.)



I рода

II рода

Металлы и сплавы
(расплавы),
электронная элект-ть

Водные растворы кислот,
солей, щелочей -
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

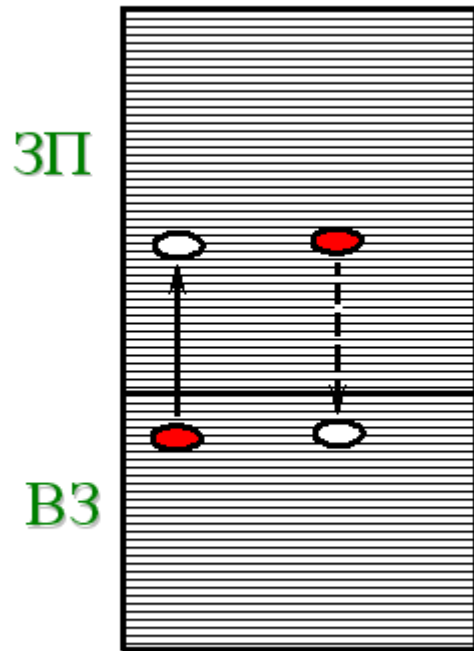
с.н.з. — электроны

с.н.з. — ионы

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

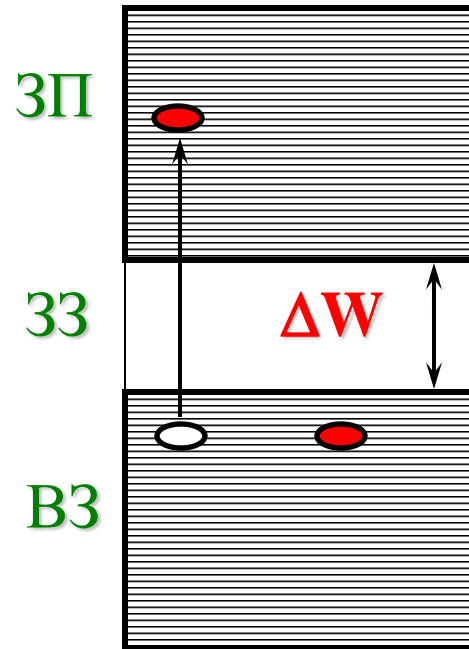
ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



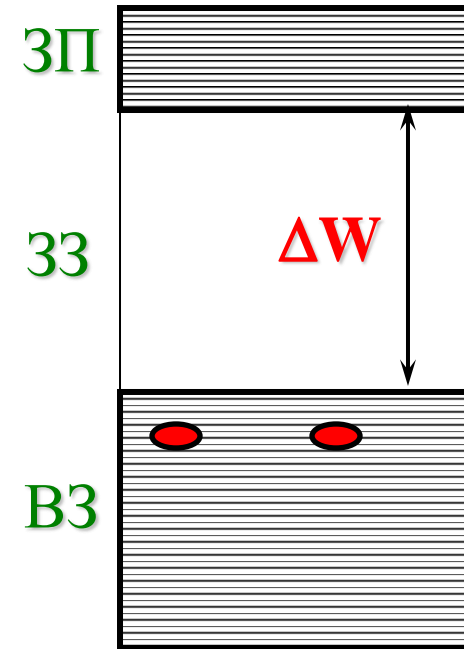
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

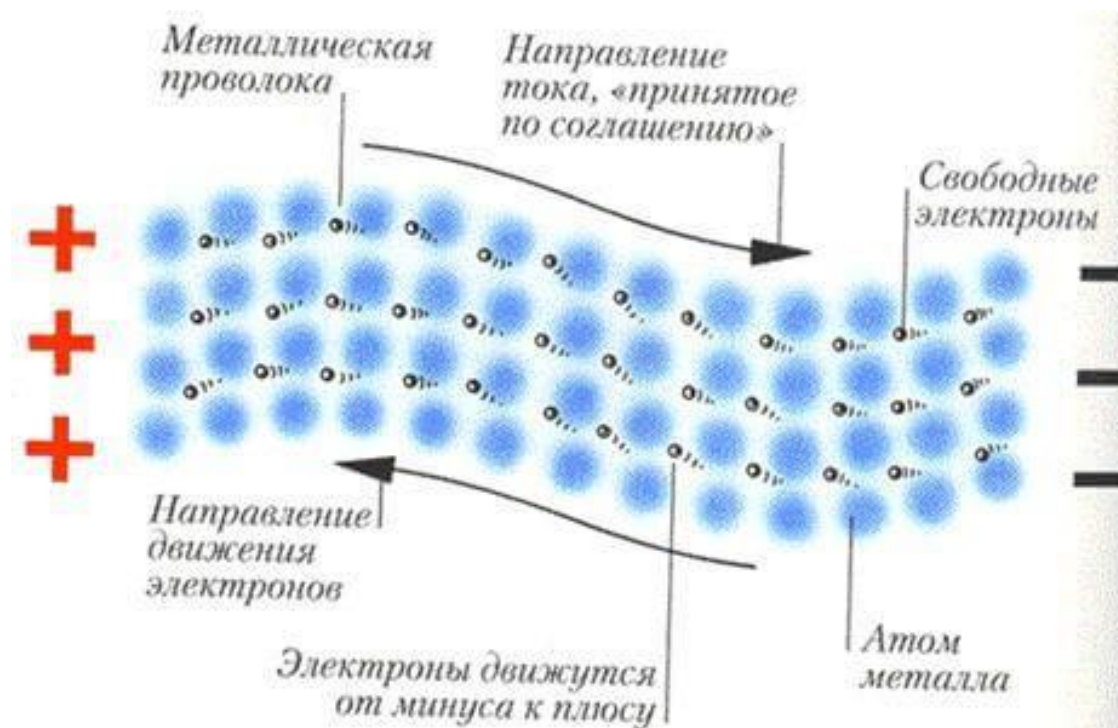
$$\rho \sim 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

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

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

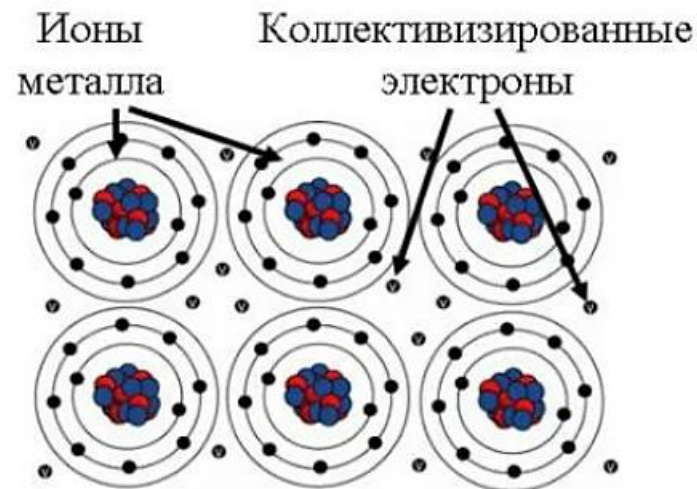
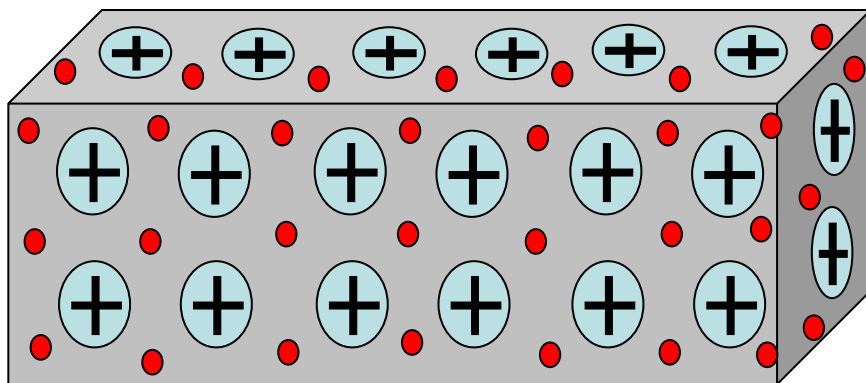
Металлические проводники являются основным типом проводниковых материалов, применяемых в электро- и радиотехнике.

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)

**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.**

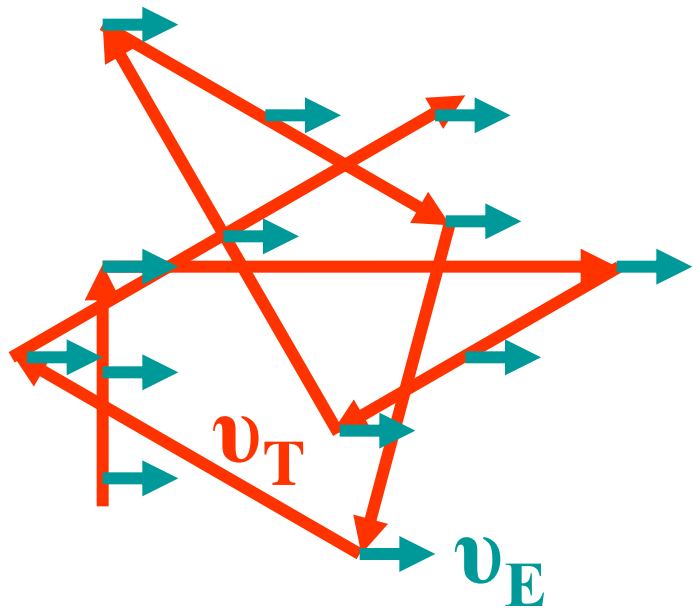
**μ - показывает среднюю скорость, которую
приобретает с.н.з. в единицу времени в
электрическом поле $E=1\text{В/м}$**

- 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.

$$F = qE$$

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



$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с},$$

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

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

μ - 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];

$$1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$$

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

$S_{min} = I / j$ [м²] - минимальная площадь сечения проводника [м²];

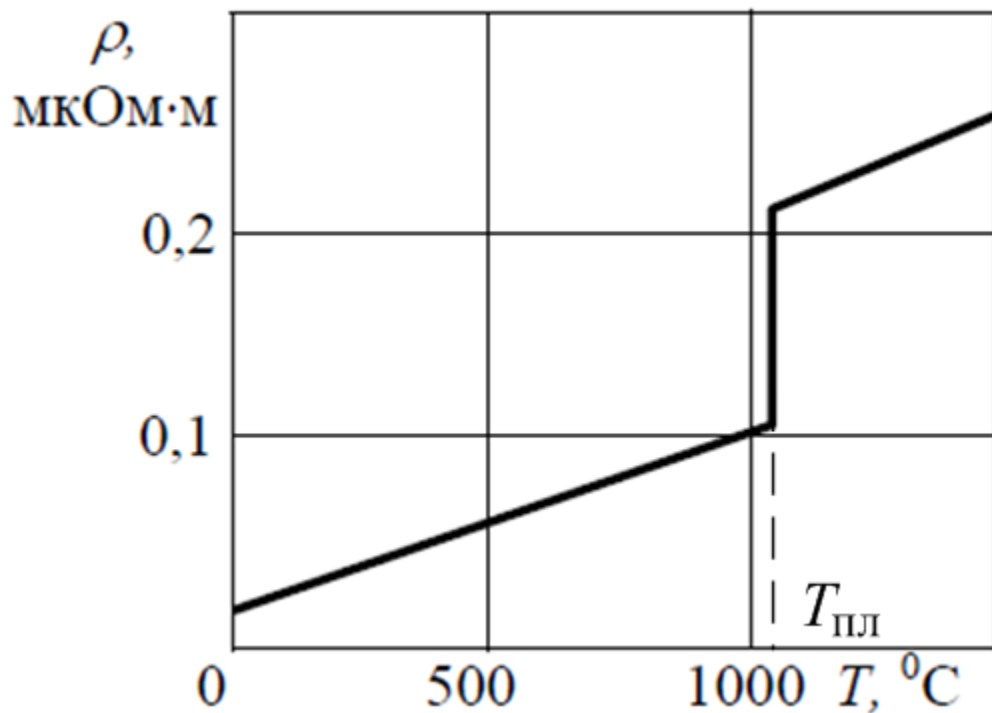
$S = S_{min} \cdot K_3$ - необходимая площадь сечения с учетом коэффициента запаса по мощности [м²];

I - ток [А];

j - плотность тока [А/м²];

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

Зависимость ρ меди от T : скачок при температуре плавления 1083 °С



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

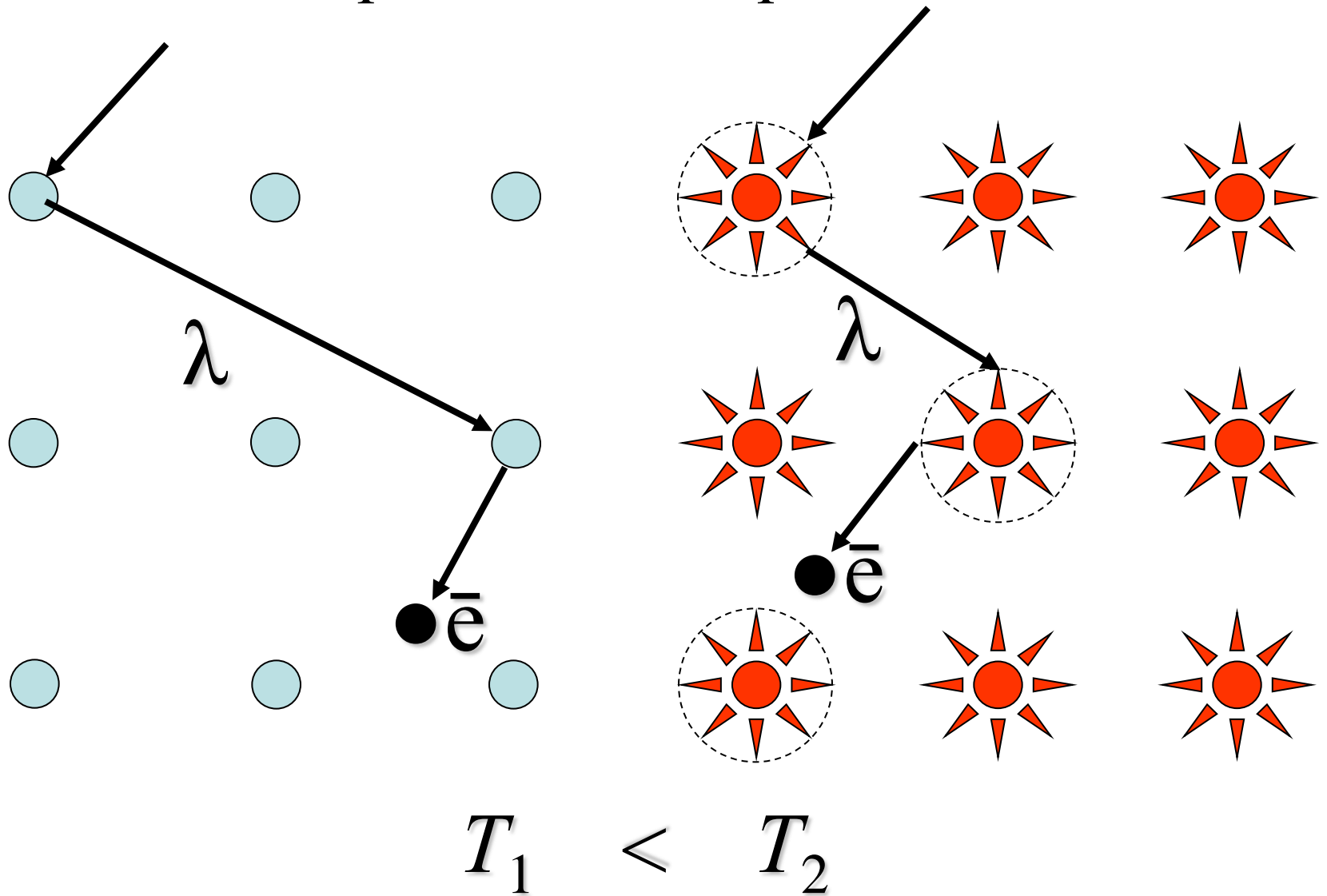
$$\rho = \rho_{\text{ост}} + \rho_T$$

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 ρ **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 ρ удельного сопротивления с ростом T



Ионы совершают колебания вокруг своей оси.

Температурный коэффициент любой физической характеристики A [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

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

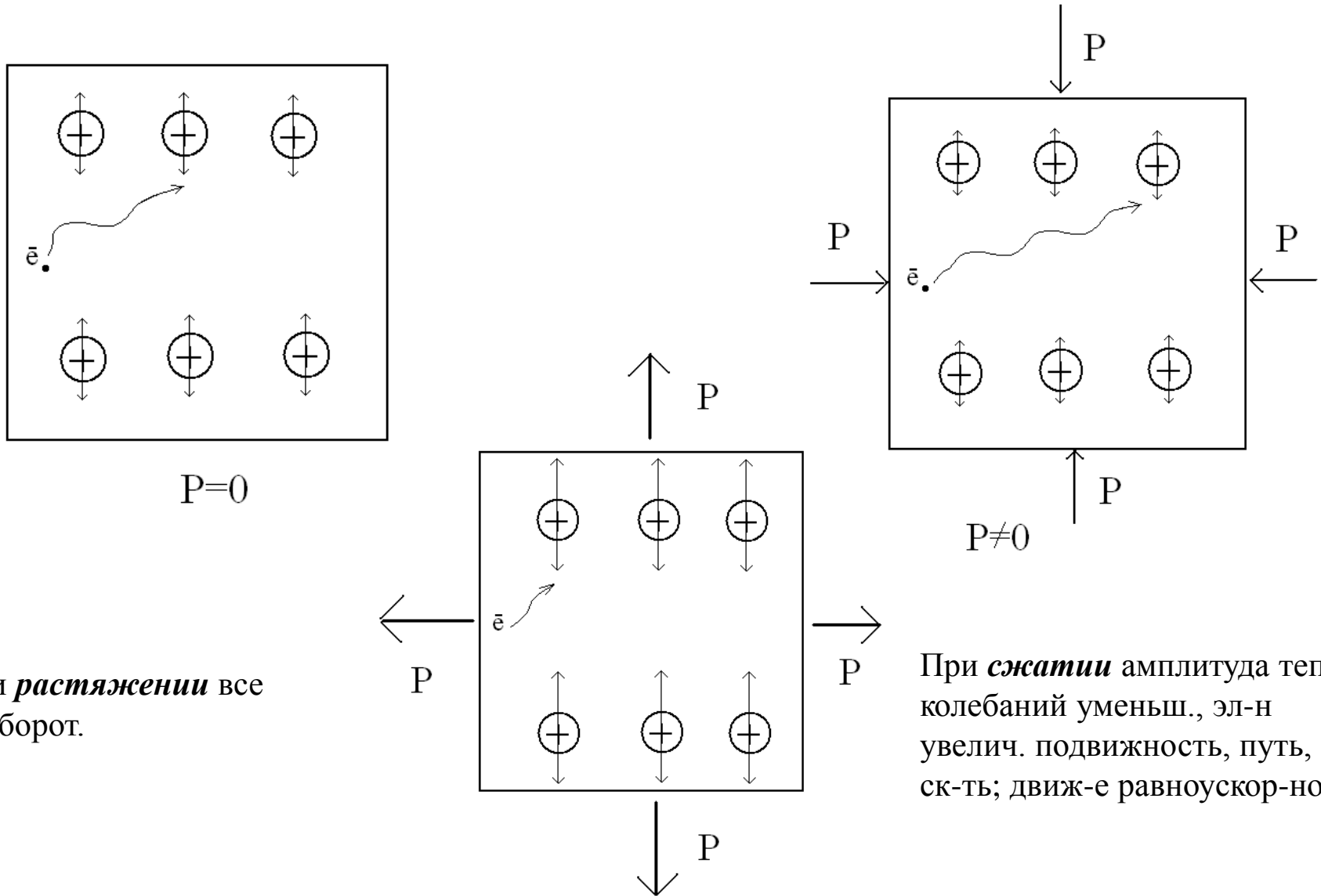
«-» сжатие
«+» растяжение

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

Изменение ρ 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

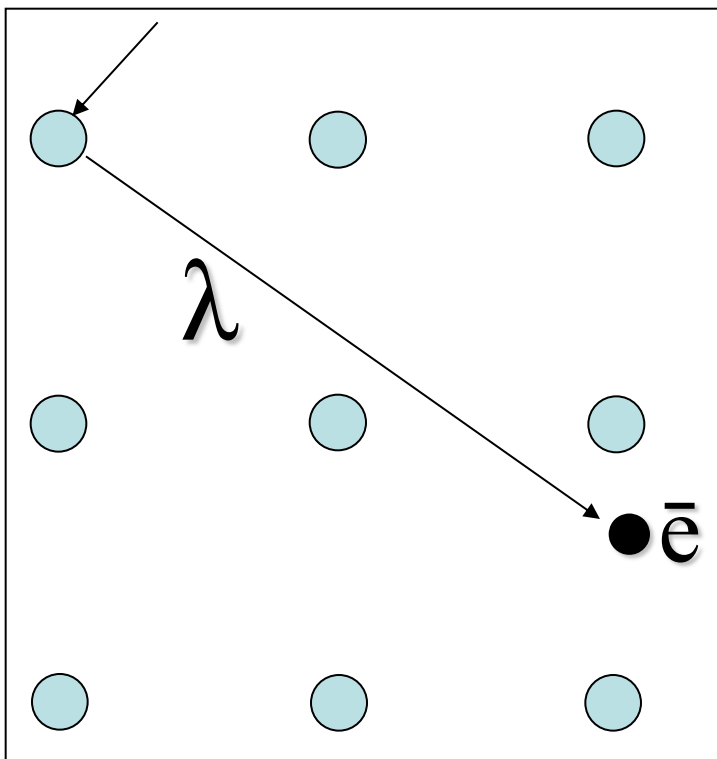
Значительное увеличение ρ наблюдается при сплавлении двух металлов при образовании общей кристаллической решетки, когда атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого – т.н. **твердые растворы**

Происходит снижение подвижности с.н.з.

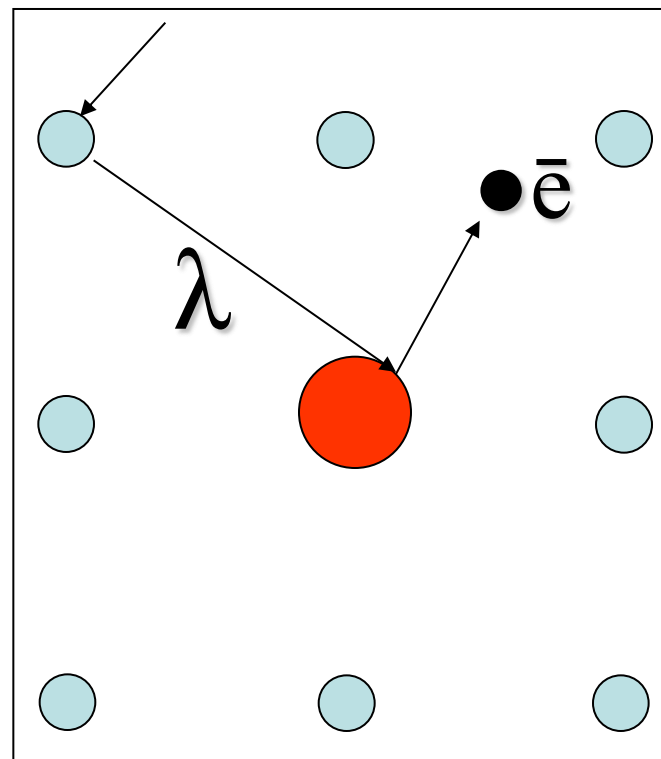
В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!

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.

ρ сплавов как правило выше, чем
 ρ чистых металлов



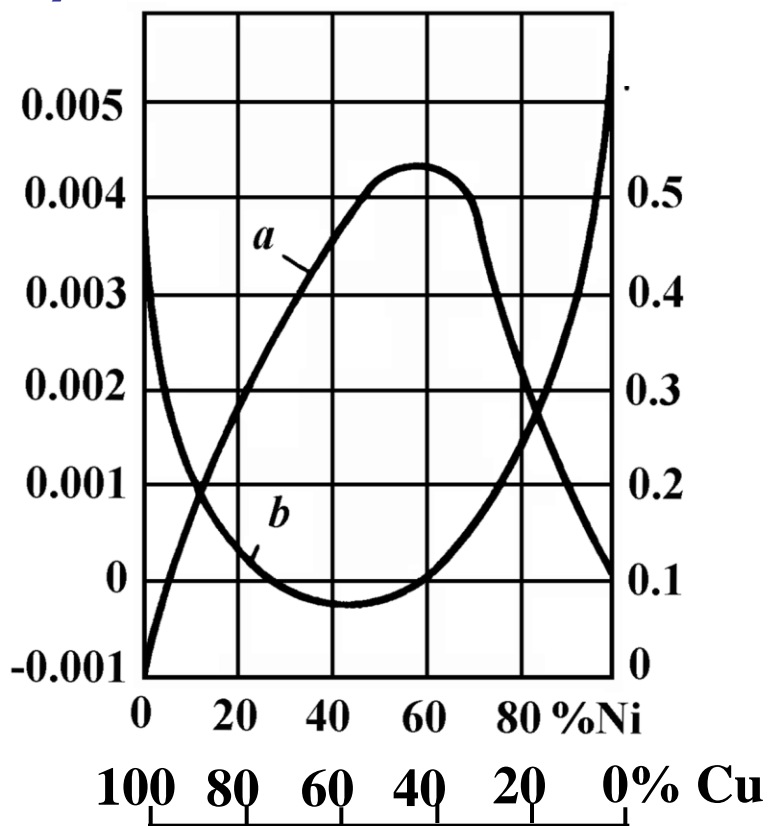
Чистый металл



Сплав

Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава $Cu-Ni$

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



a – зависимость ρ

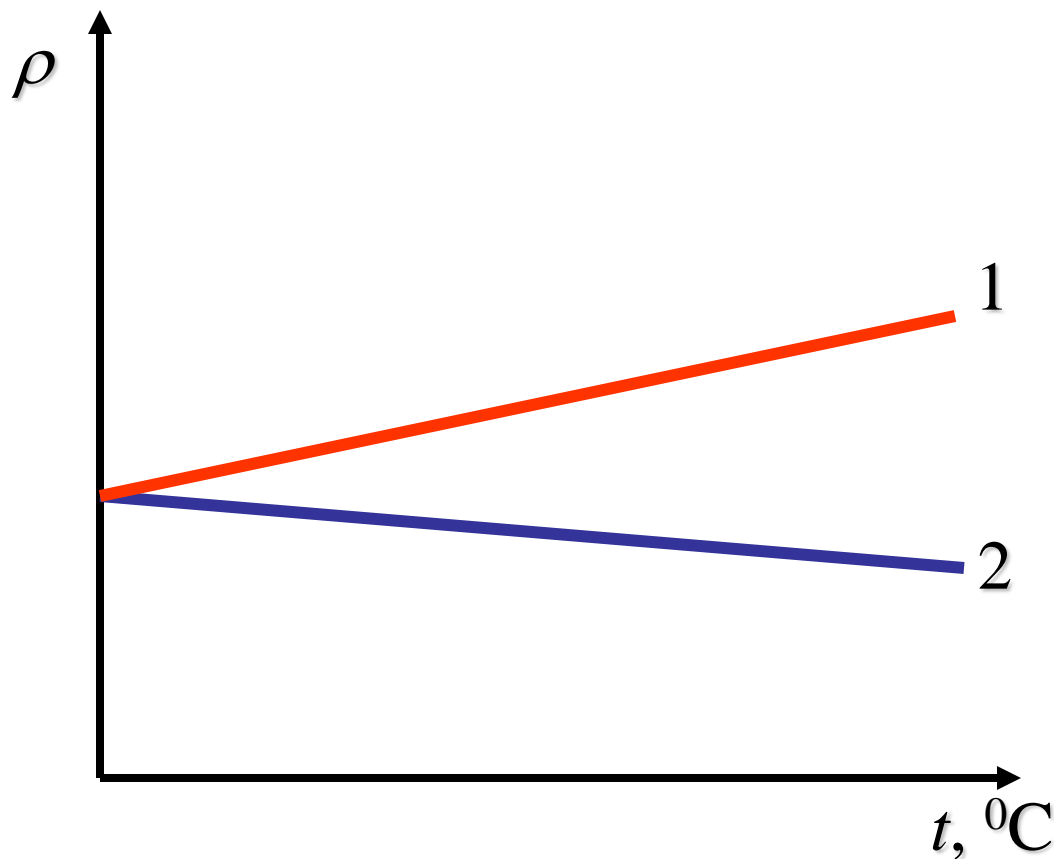
b – зависимость $TK\rho$

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

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

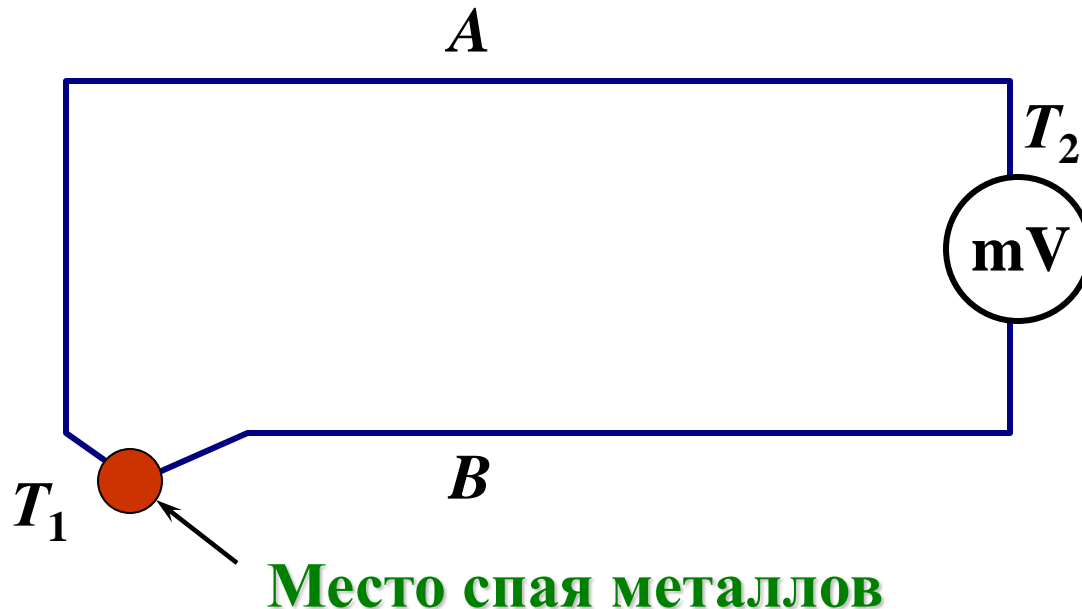
При $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл $\Rightarrow L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$ В²/К².

- *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 λ металлов* *много больше, чем λ 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°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	Знак показывает направление термотока: в нагретом спае ток течет от меньшего K к большему (напр. в Fe -конст. от конст. к Fe)
Sb	$+47.0$	
Константан	-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:

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

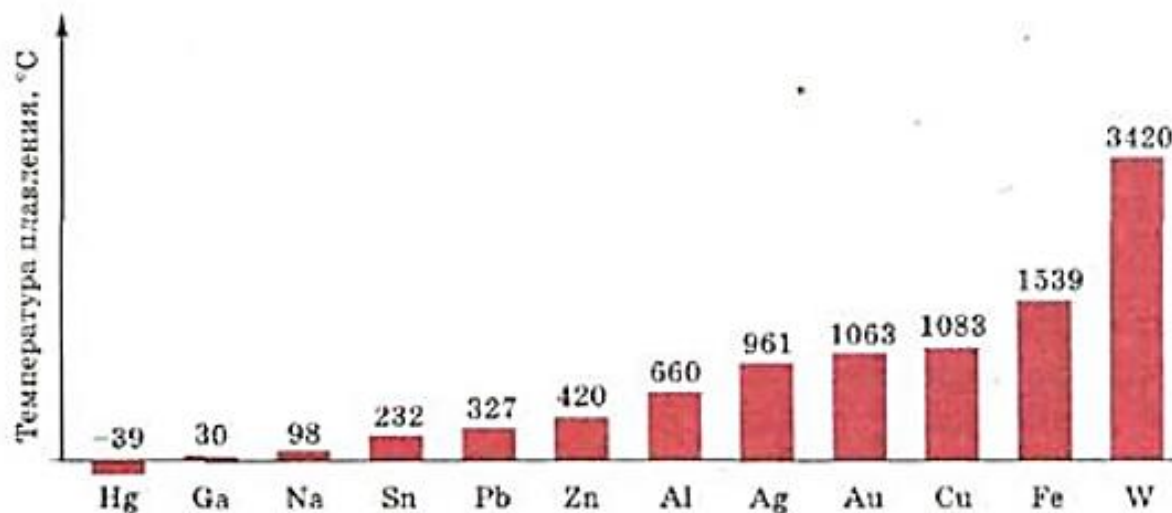
где l – произвольный линейный размер изделия из данного материала.

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°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 σ_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* σ_p меди при растяжении в 1,5 – 2 раза и *увеличению* $\Delta l / l$ в 15 – 20 раз.

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 (бериллий)

Происходит замораживание узлов кристал. решетки

Требования к криопроводникам (наличие ВЧ):

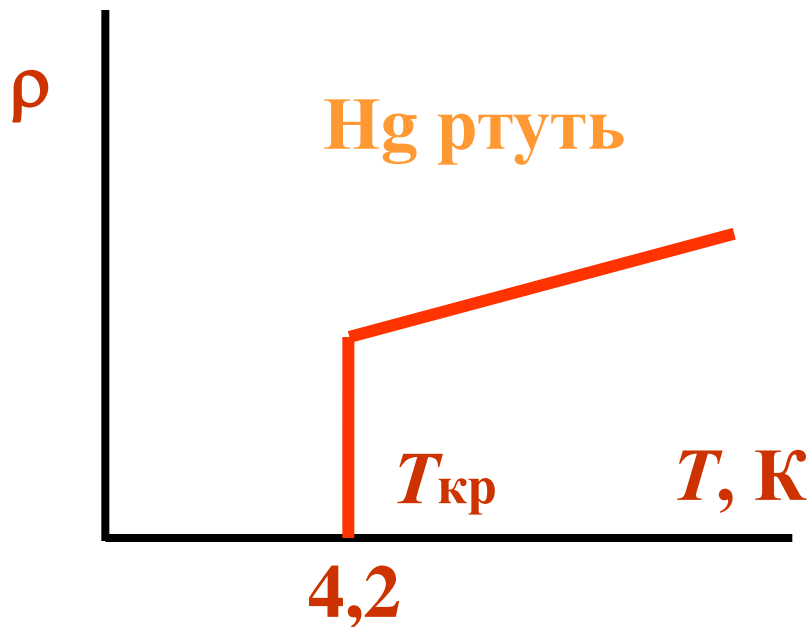
- минимальное содержание примесей;
- правильная (без дефектов) кристаллическая решетка.

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

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

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

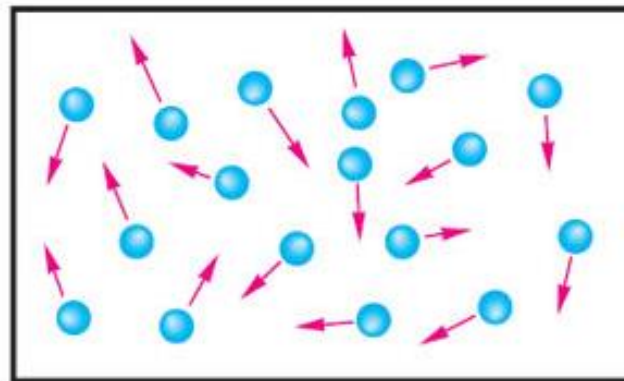
1911 год. Камерлинг - Оннес



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: $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

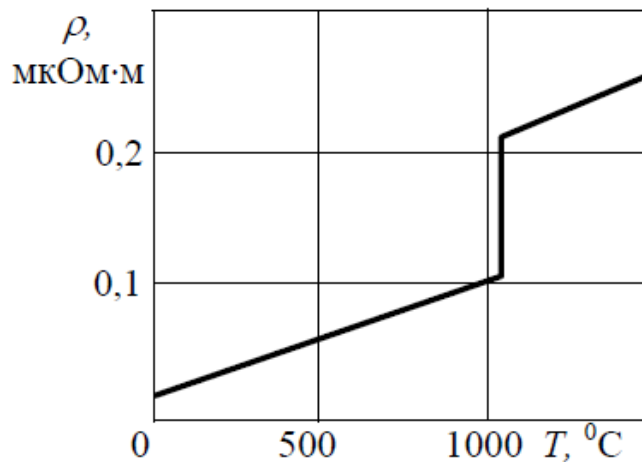
Металлы:

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

Диэлектрики:

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

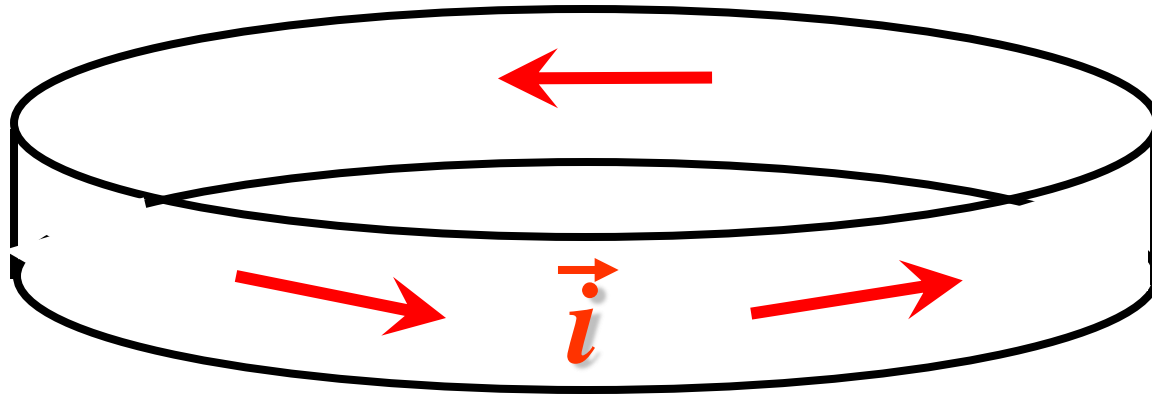
- ✓ При *понижении темп-ры T удельное сопр-е меди* постепенно понижается и при темп-ре несколько К составляет 10^{-9} Ом·см, но *сверхпроводником медь* (так же *золото, платина*) *не становится*. А *алюминий, свинец, ртуть переходят* в *сверхпроводящее* состояние.



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 ρ порядка 10^{-26} Ом·м

Nb – ниобий, Sn - олово

В объеме сверхпроводника **нет** магнитного поля

Сильное магнитное поле *разрушает*
явление сверхпроводимости!!!

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ:

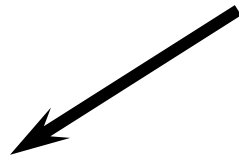
1. Сверхнизкие температуры $T_i < T_{кр}$
2. Слабые магнитные поля $H_i < H_{кр}$

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

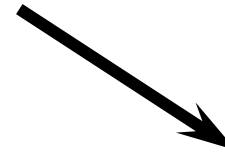
СВЕРХПРОВОДНИКИ



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 ₂ N	
Tl	2,38	NbV	
Sn (белое)	3,73	MoNe	8-12
Hg	4,15	NbTi	9,3
La	4,71	NbZr	10,5
V	5,1	V ₂ Ga	14,5-16,5
Pb	7,22	V ₃ Si	16,9-17,1
Tc	11,2	NbSn	

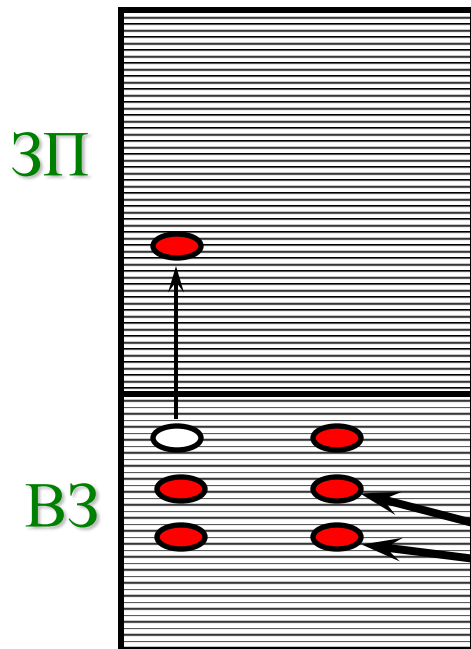
- ✓ Термины *мягкий* и *твердый* не характеризует *механических свойств* материалов. Эти термины связаны с *малым значением* $H_{кр}$ у «*мягких*» и *высоким значением* $H_{кр}$ у «*твердых*» сверхпроводников.



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 паре 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.

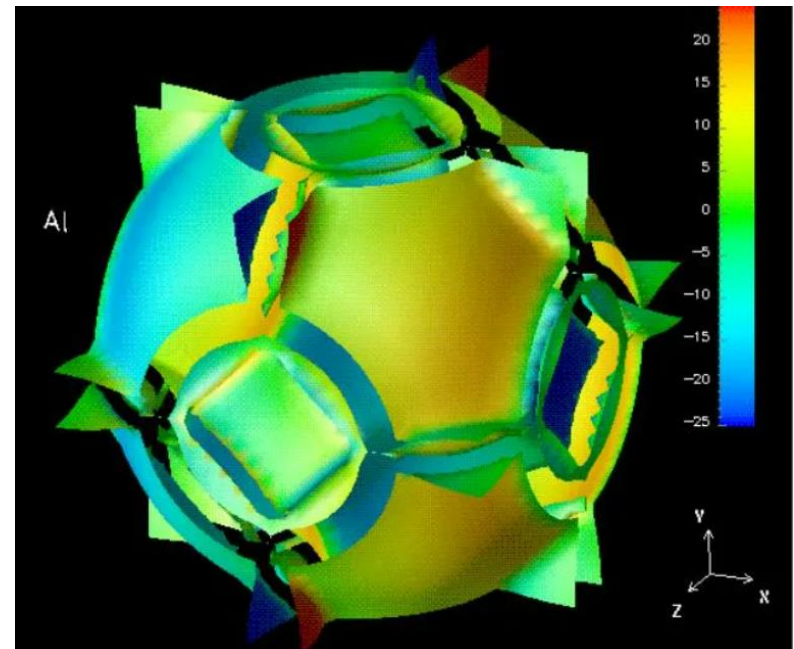
$$\Delta W = 0$$

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!!!**

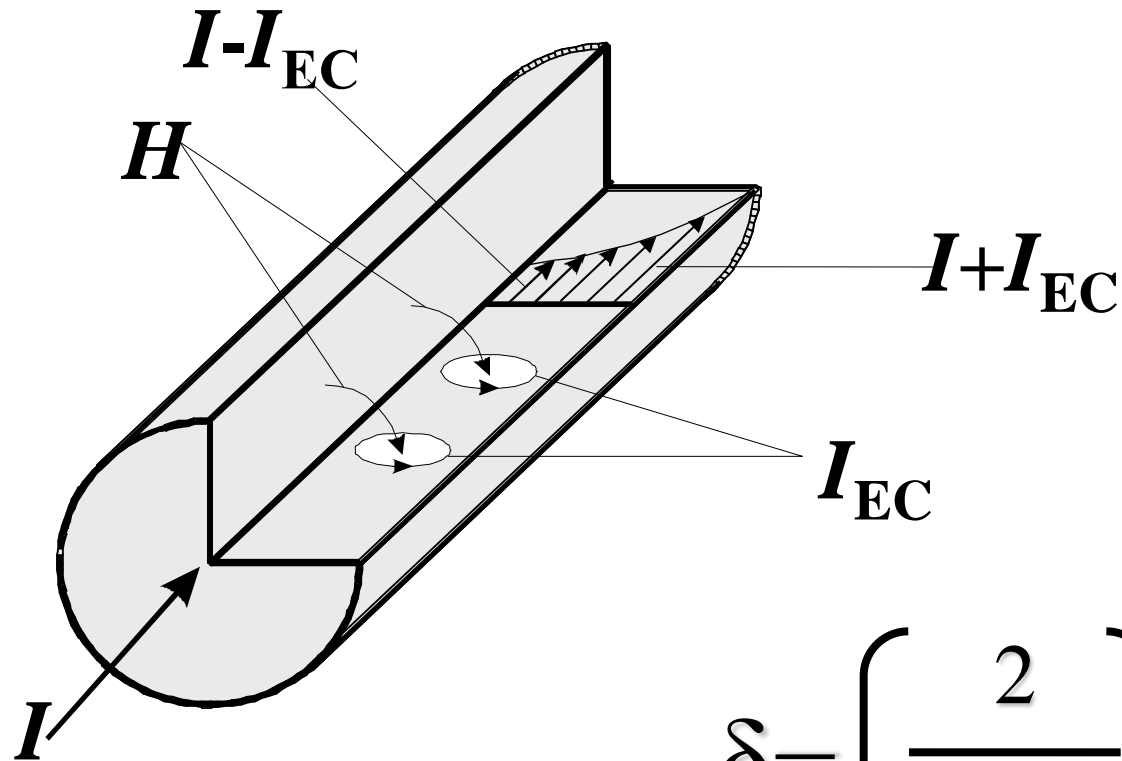
В настоящее время известно 27 простых (*чистых металлов*) и более 1000 сложных (*сплавов и соединений*) *сверхпроводников*.

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
одиночном проводнике.

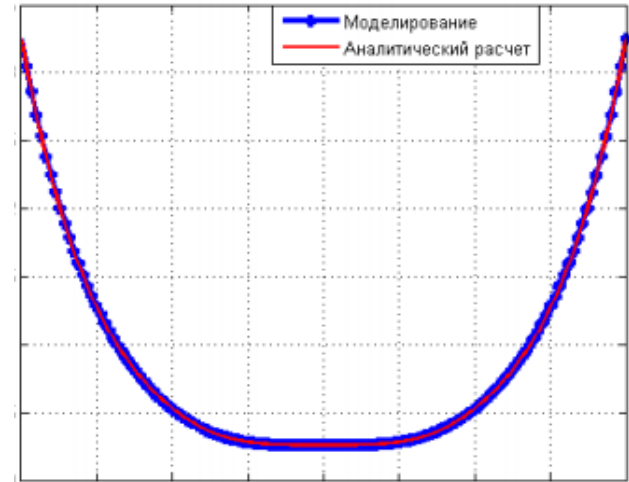
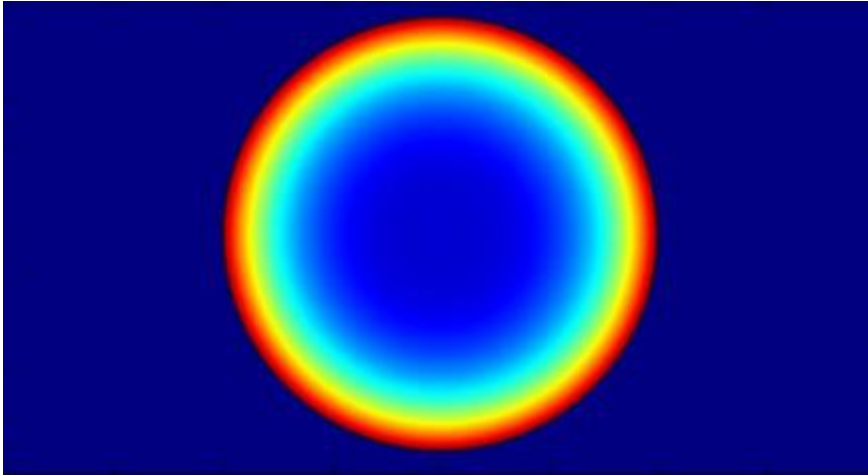
$$\delta = \left(\frac{2}{\gamma \mu \mu_0 \omega} \right)^{1/2}$$

где δ – 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.

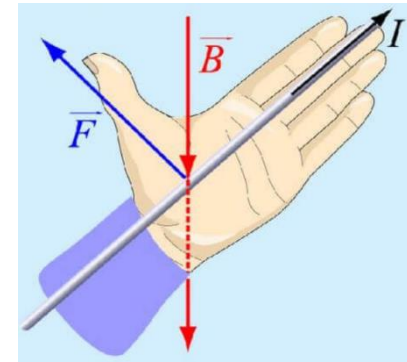
Поверхностный эффект – увеличение плотности тока у поверхности жилы при увеличении частоты, обусловленное взаимодействием *вихревых токов с основным*.



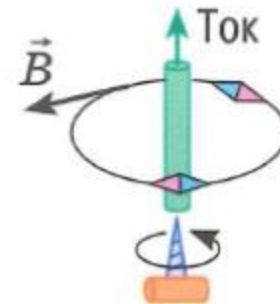
Вихревые токи (токи Фуко) – замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока.

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 \vec{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;
- α — 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;
- Δl — длина проводника;
- B — индукция магнитного поля;
- α — 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:

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

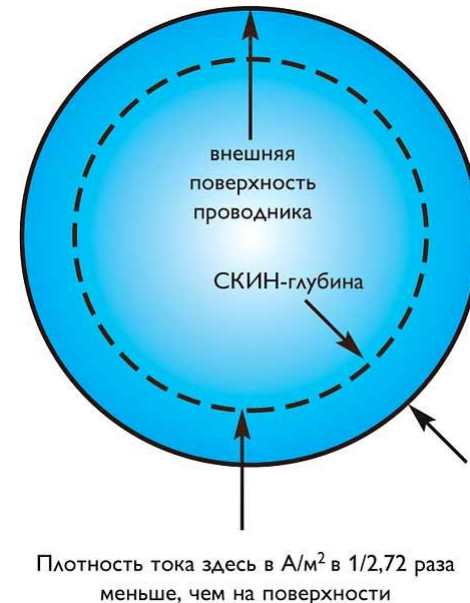
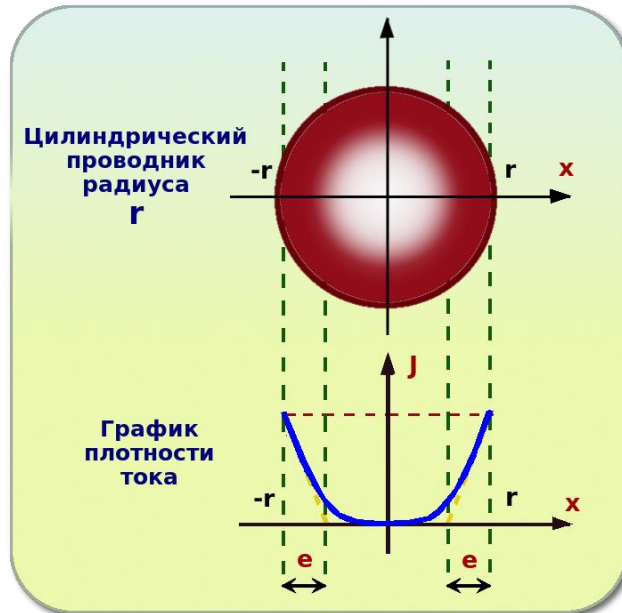
- ✓ *Второй закон Ньютона – ускорение* a тела прямо пропорционально приложенной силе F и обратно пропорционально массе m :

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

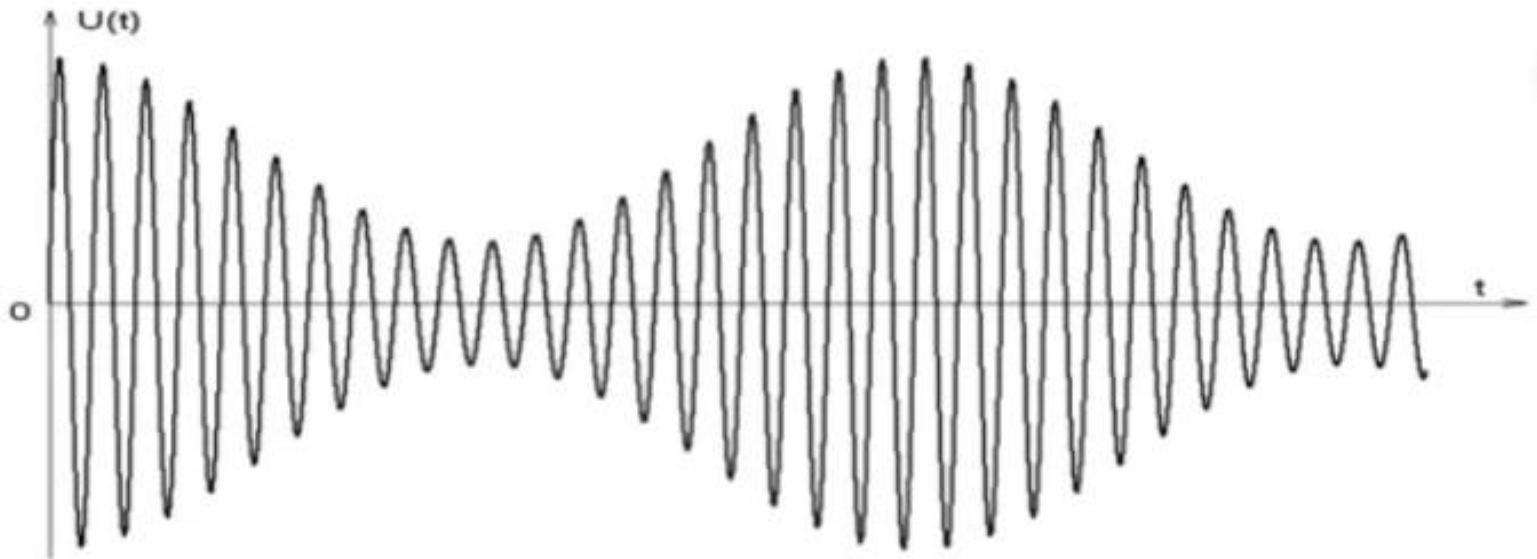
$$a = \frac{v}{t}$$

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 ρ ; 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 ρ ; стабильное значение ρ во времени; малый температурный коэффициент сопротивления $T\alpha$; 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 сжигания, коэффициентами термоЭДС и удельным электрическим сопротивлением ρ .
- **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.