

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2019 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

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

Проводниковые материалы



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.)



Металлы и сплавы,
электронная
электропроводность

Водные растворы кислот,
солей, щелочей -
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

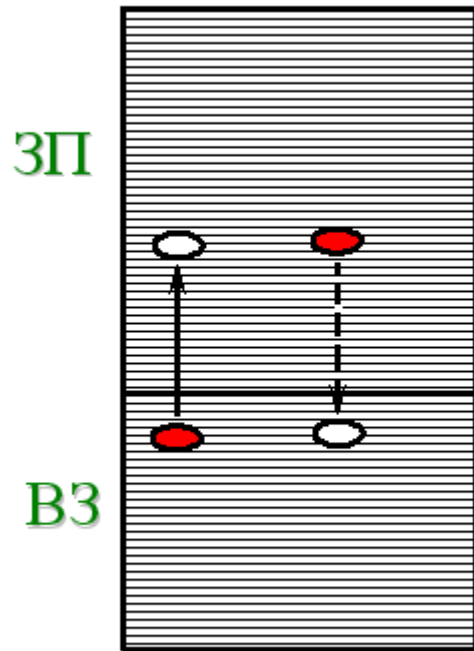
с.н.з. — электроны

с.н.з. — ионы

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

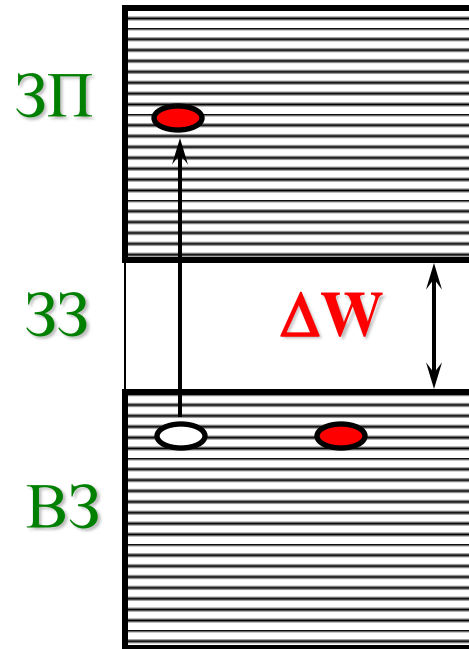
ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



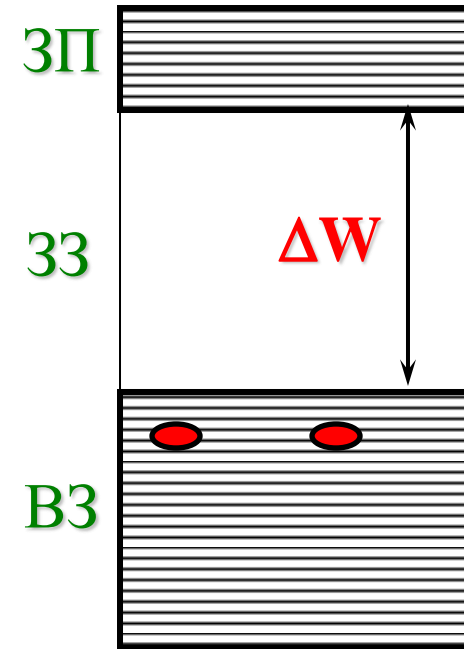
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

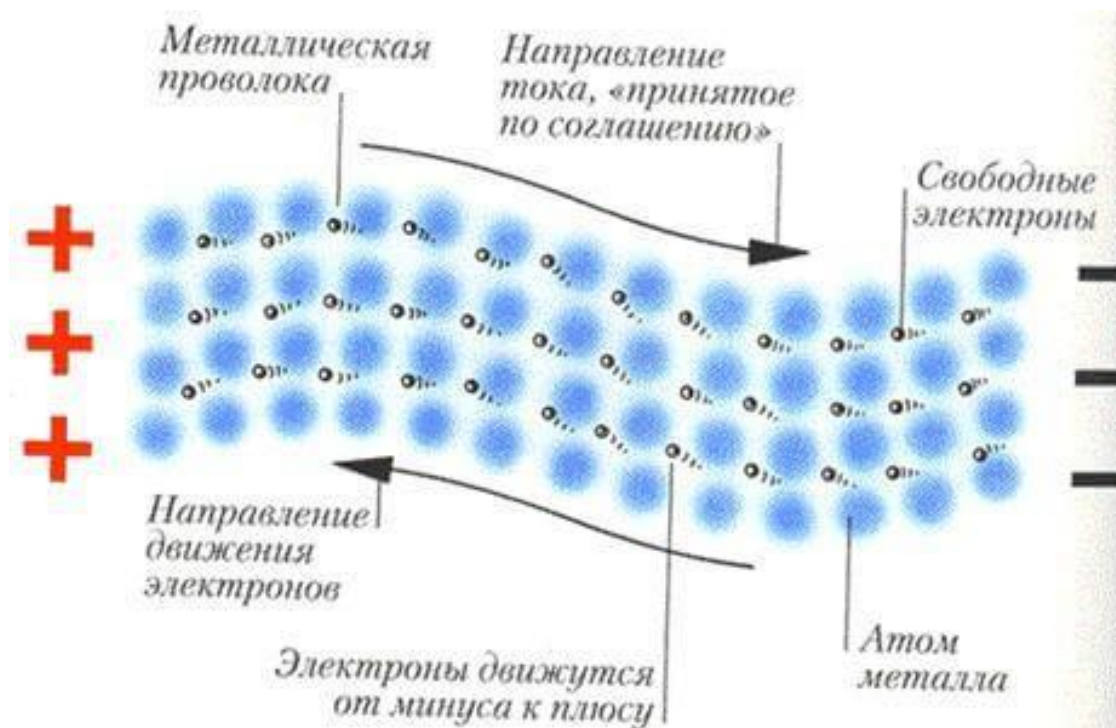
$$\rho \sim 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

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

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

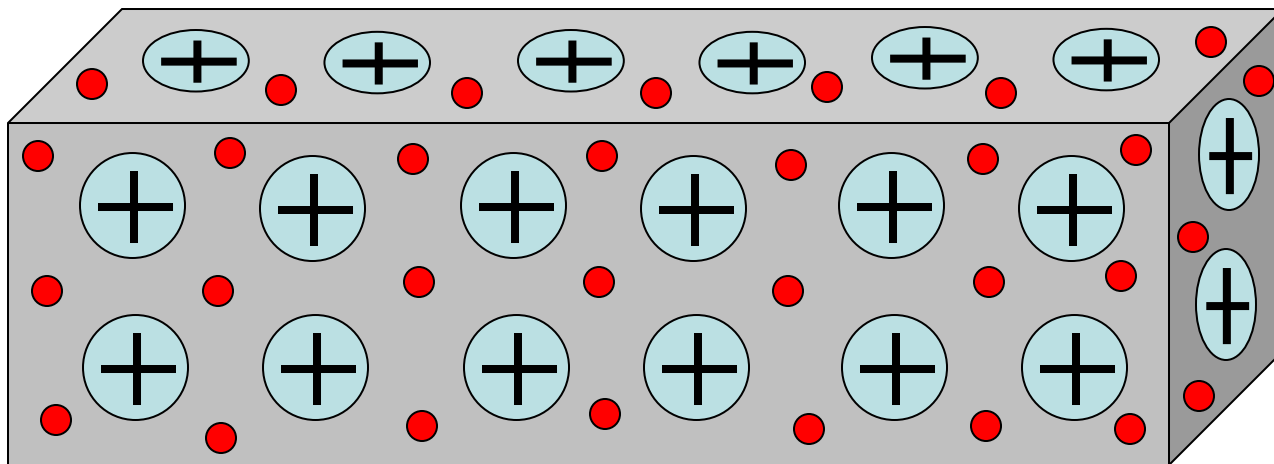
Металлические проводники являются основным типом проводниковых материалов, применяемых в электро- и радиотехнике.

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.**

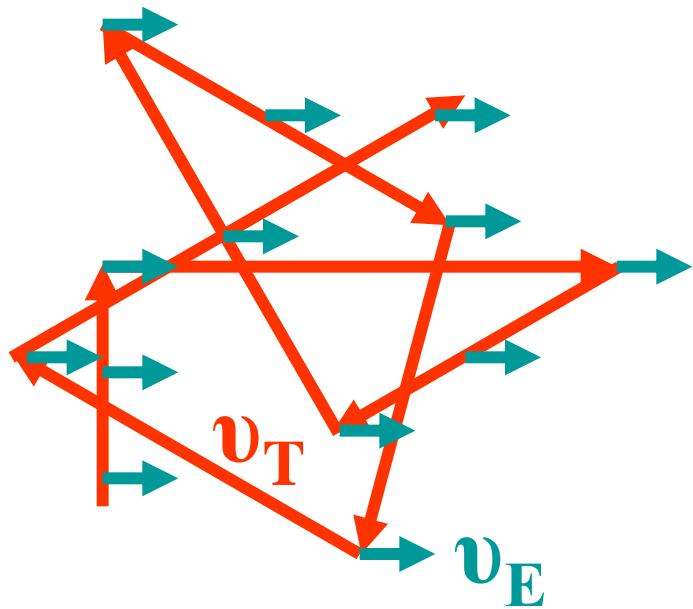
**μ - показывает среднюю скорость, которую
приобретает с.н.з. в единицу времени в
электрическом поле $E=1\text{В/м}$**

- 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.

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

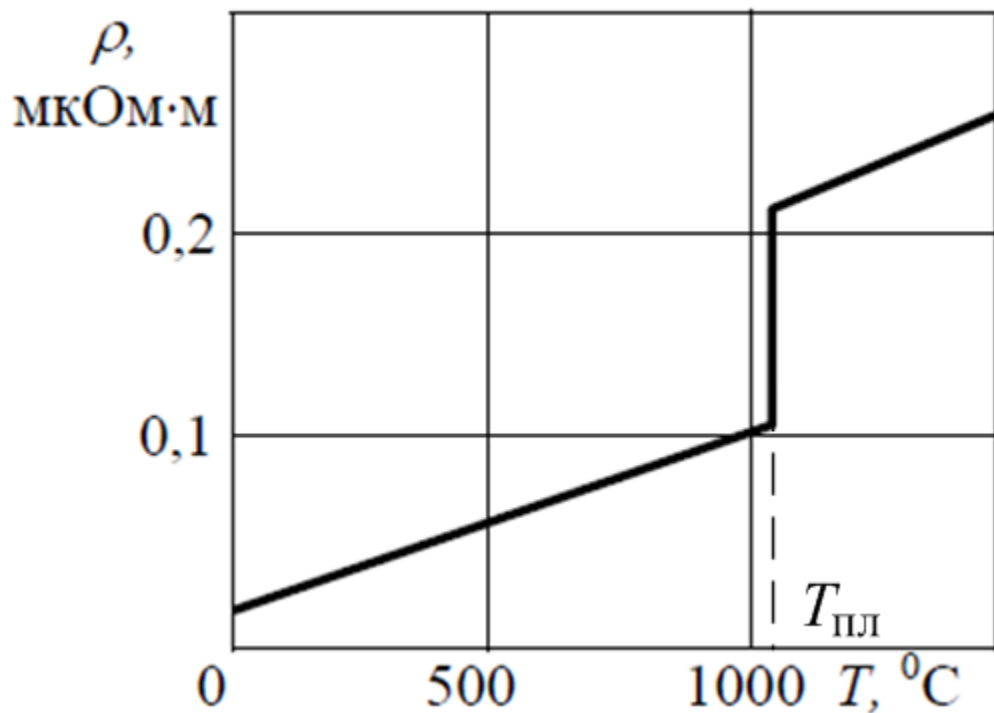
$\gamma = qn\mu$ - удельная эл. проводимость [См/м]

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

$\rho = 1/\gamma$ - 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 ρ меди от T : скачок при температуре плавления 1083 °С



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

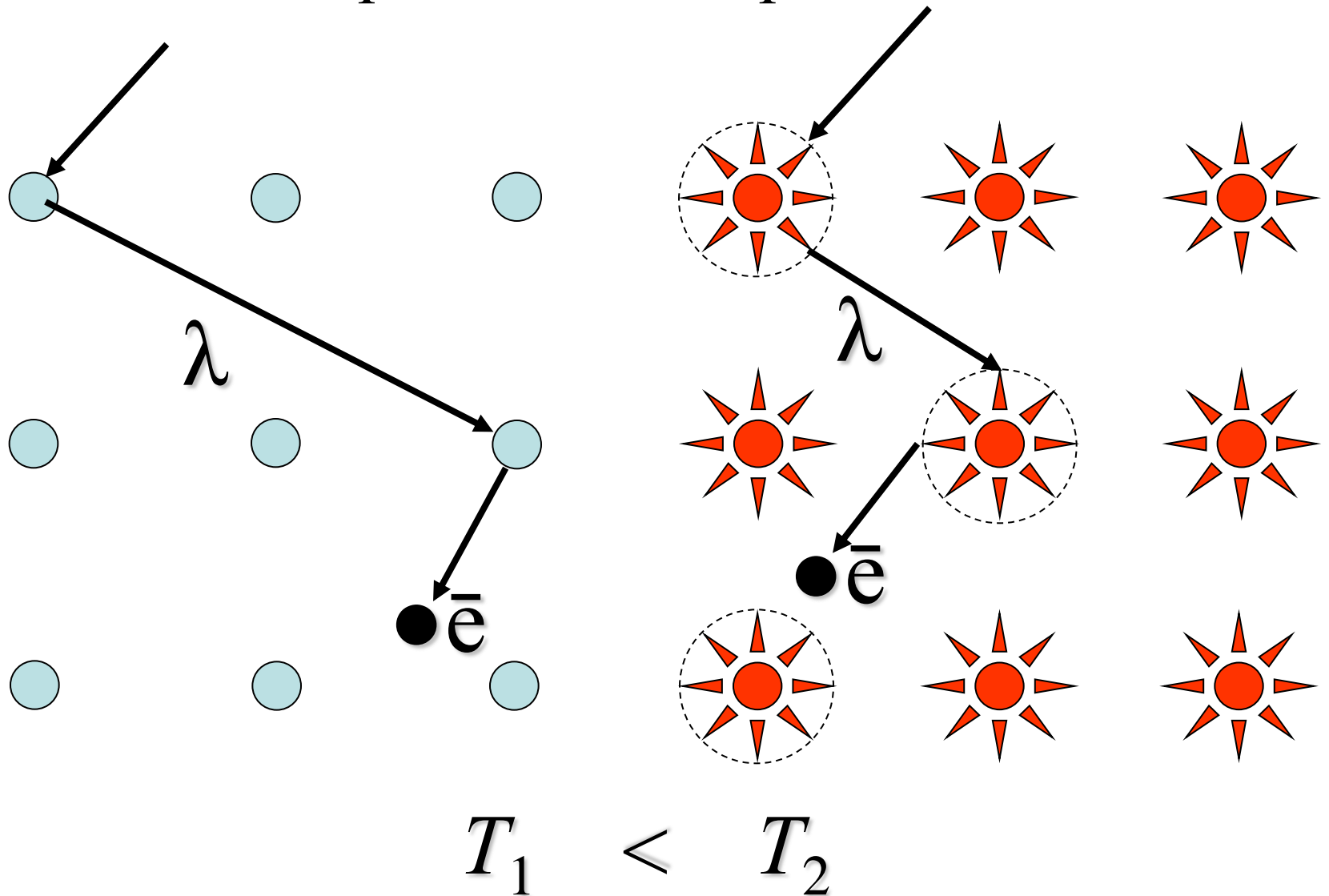
$$\rho = \rho_{ост} + \rho_T$$

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

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

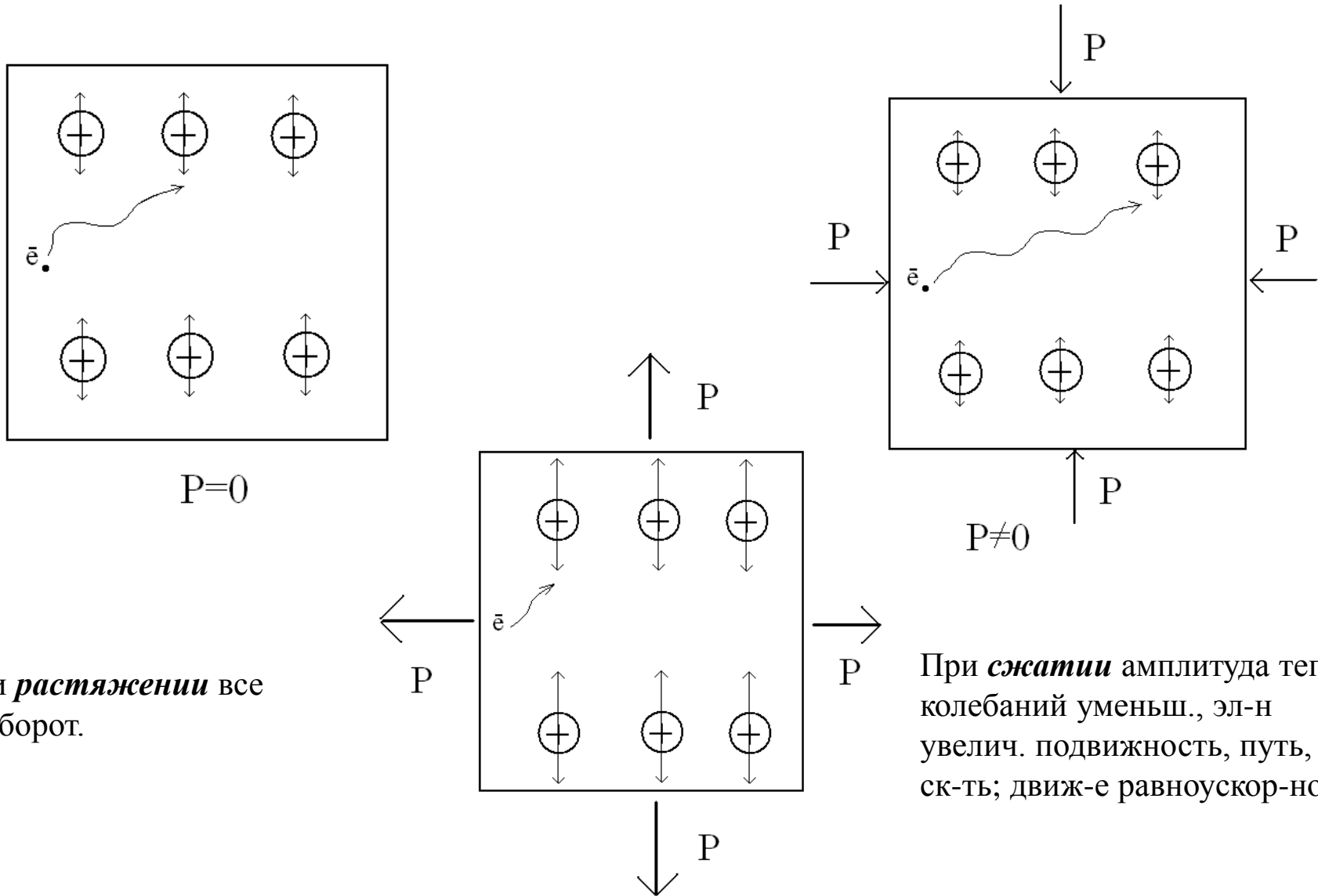
«-» сжатие
«+» растяжение

$S = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}$ — 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

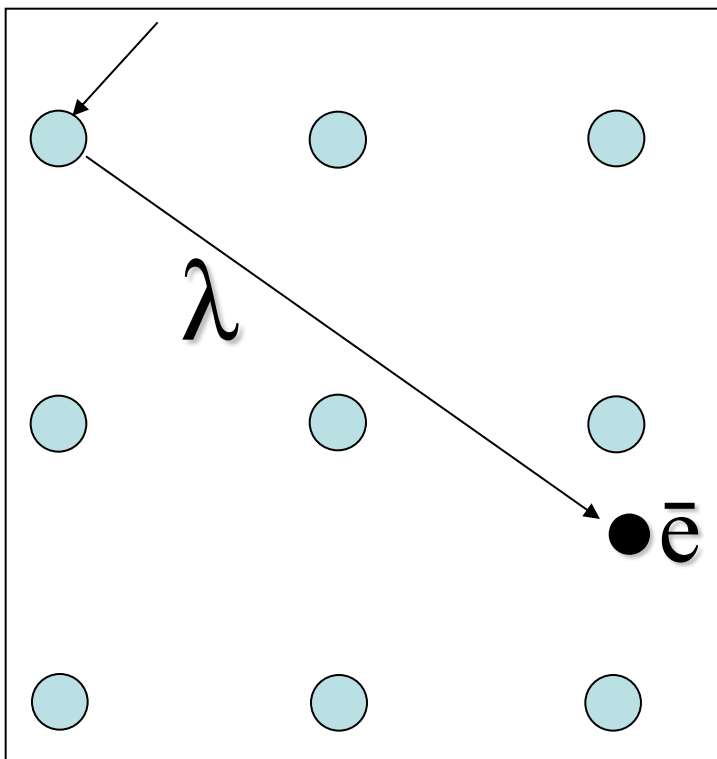
Значительное увеличение ρ наблюдается при сплавлении двух металлов при образовании общей кристаллической решетки, когда атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого – т.н. **твердые растворы**

Происходит снижение подвижности с.н.з.

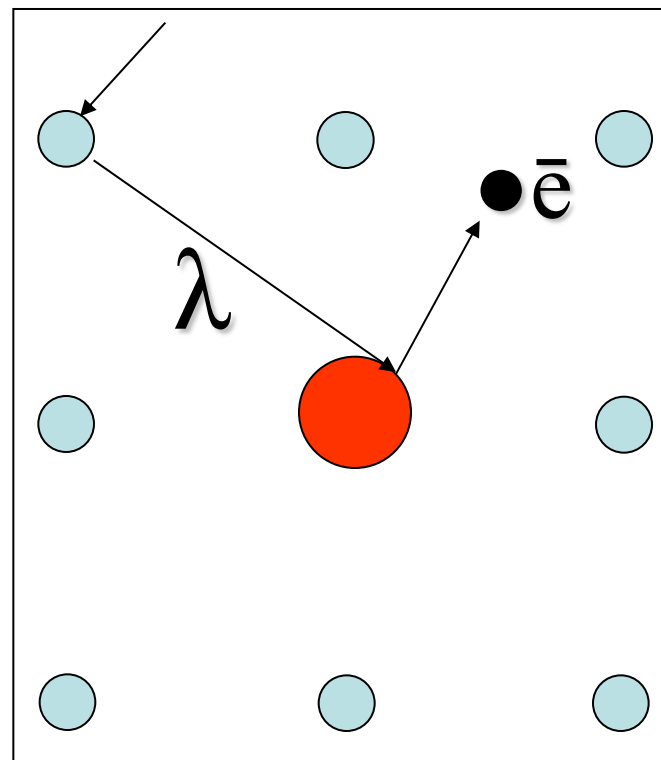
В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!

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



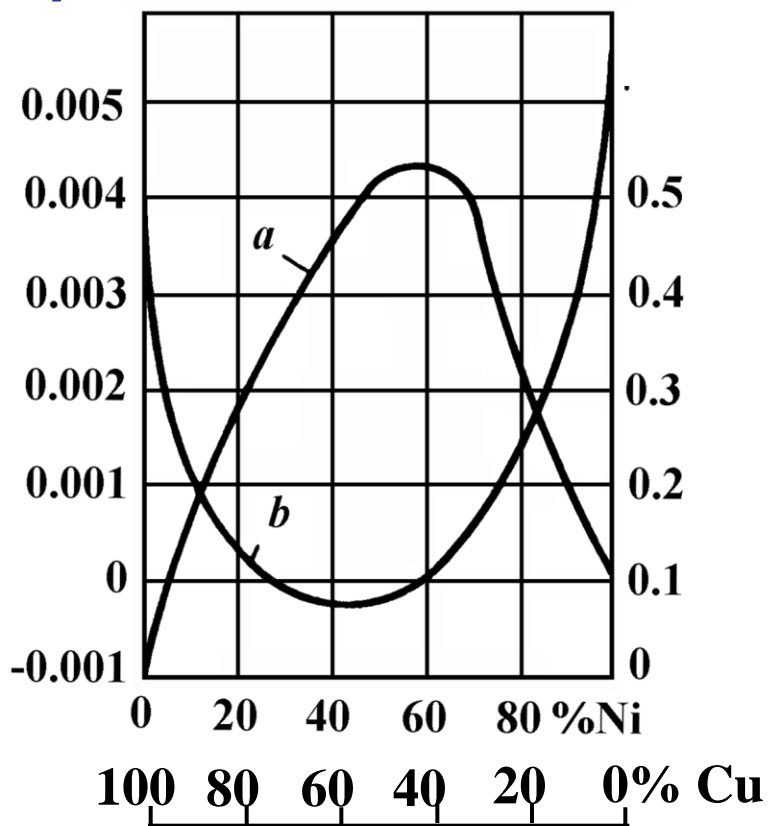
Чистый металл



Сплав

Влияние концентрации на удельное сопротивление сплава *Cu-Ni*

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



a – зависимость ρ

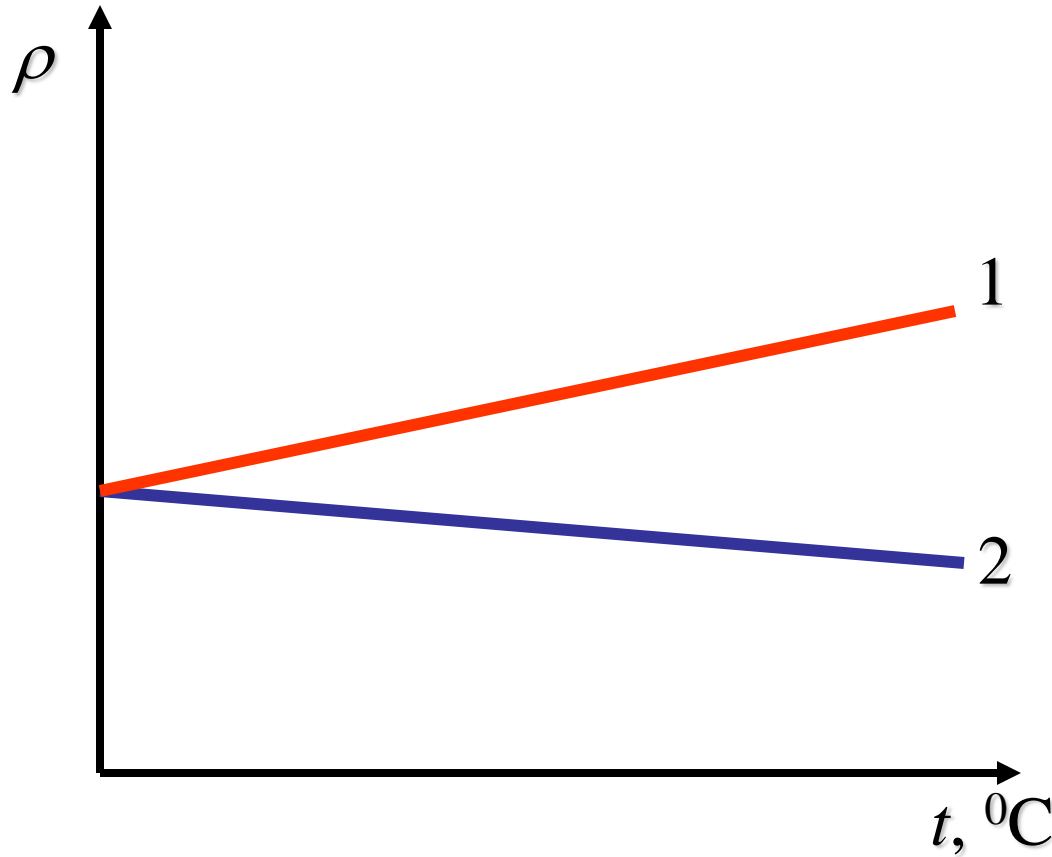
b – зависимость $TK\rho$

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

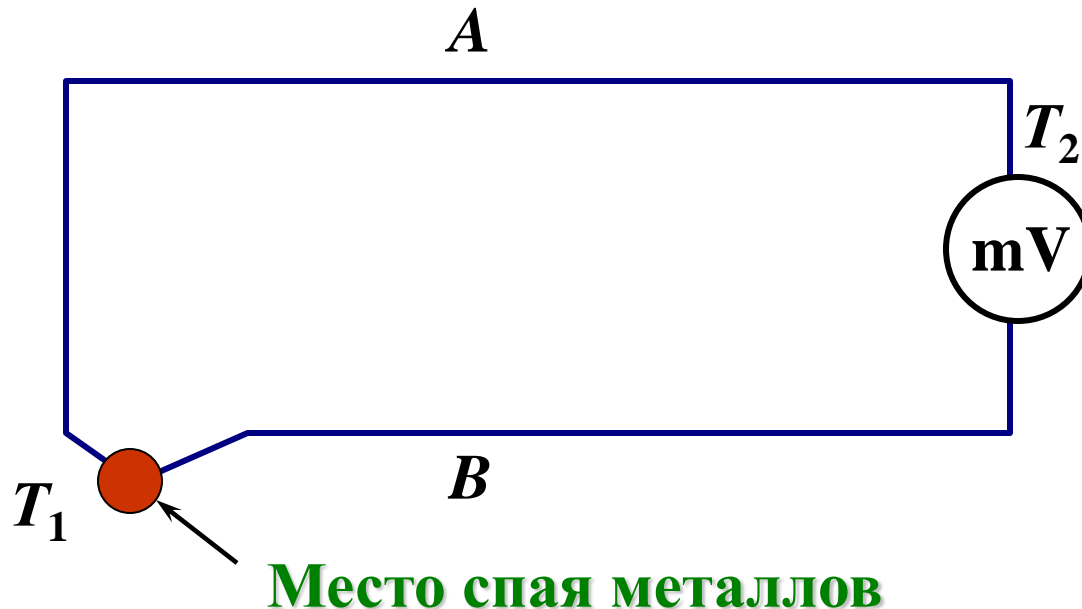
$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k}{e^2} \quad \begin{array}{l} k - \text{ постоянная Больцмана;} \\ e - \text{ заряд электрона.} \end{array}$$

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.*

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	$+16.0$	$= (Fe-Pt) - (\text{конст.}-Pt) =$
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

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 .

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):

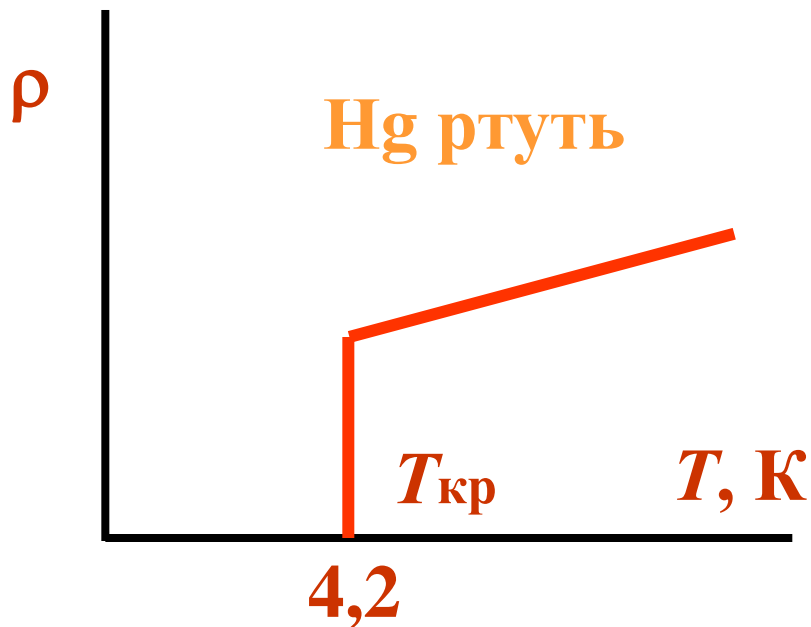
- минимальное содержание примесей;
- правильная (без дефектов) кристаллическая решетка.

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.

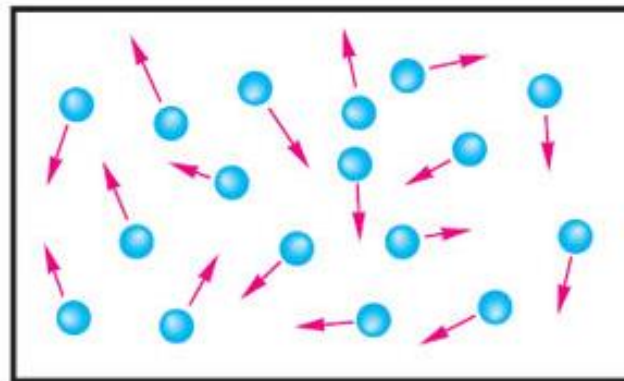
1911 год. Камерлинг - Оннес



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

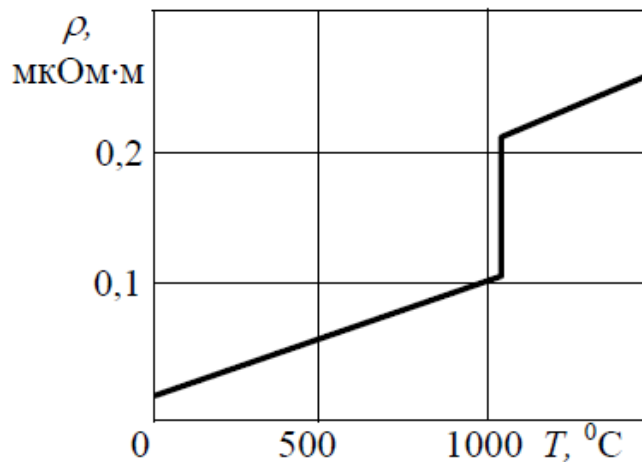
Металлы:

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	$\rho = 1 \cdot 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

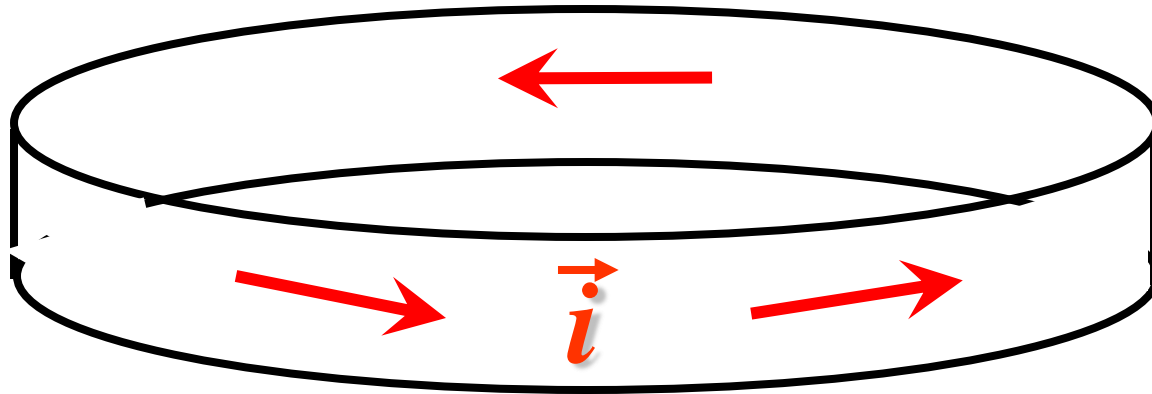
- ✓ При *понижении темп-ры T удельное сопр-е меди* постепенно понижается и при темп-ре несколько К составляет 10^{-9} Ом·см, но *сверхпроводником медь* (так же *золото, платина*) *не становится*. А *алюминий, свинец, ртуть переходят* в *сверхпроводящее* состояние.



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:

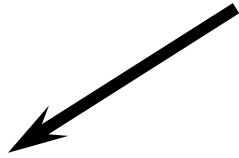
1. Сверхнизкие температуры $T_i < T_{кр}$
2. Слабые магнитные поля $H_i < H_{кр}$

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

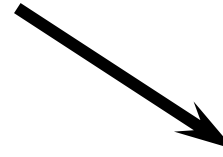
СВЕРХПРОВОДНИКИ



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.

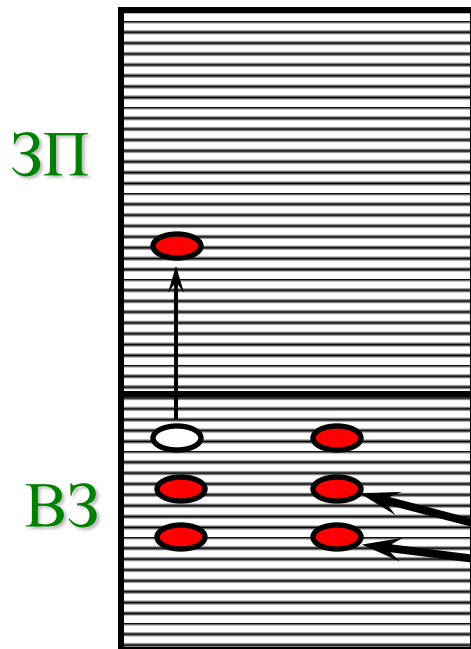
- ✓ Термины *мягкий* и *твердый* не характеризует *механических свойств* материалов. Эти термины связаны с *малым значением* $H_{кр}$ у «*мягких*» и *высоким значением* $H_{кр}$ у «*твердых*» сверхпроводников.



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!!!

ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость

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

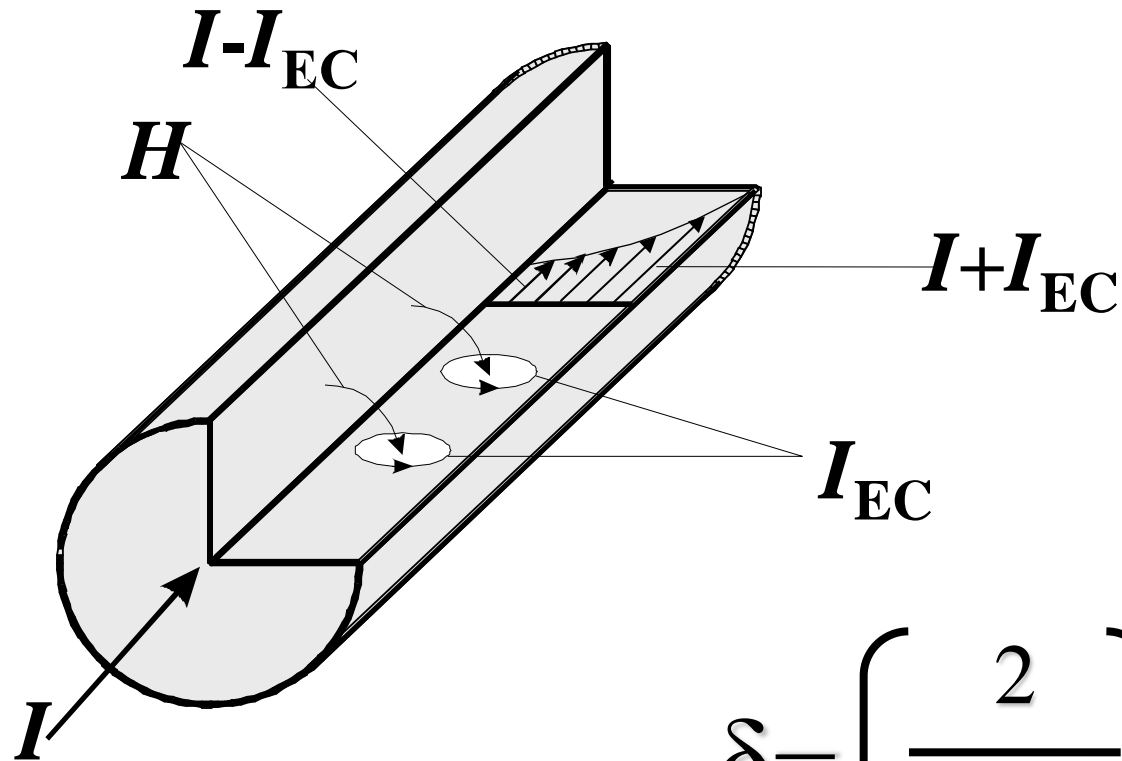
В настоящее время известно 27 простых (*чистых металлов*) и более 1000 сложных (*сплавов и соединений*) *сверхпроводников*.

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.

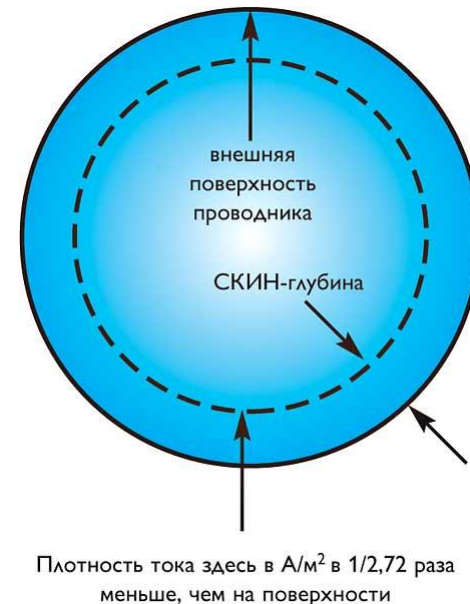
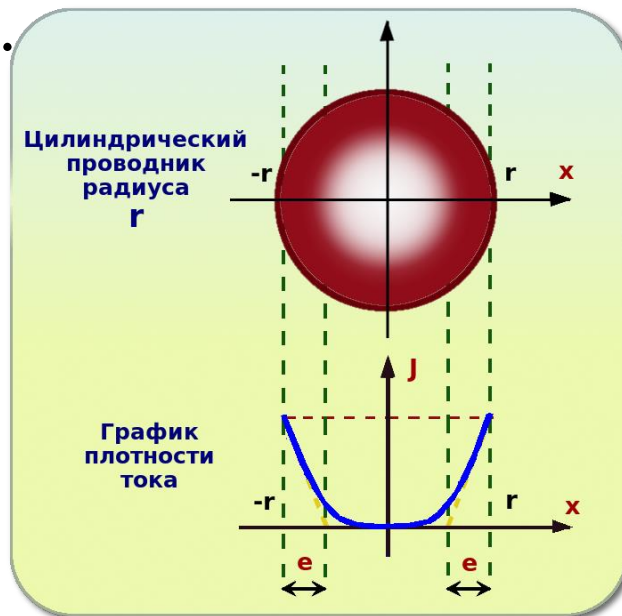
$$\delta = \left(\frac{2}{\gamma \mu \mu_0 \omega} \right)^{1/2}$$

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.

- ✓ 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).



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

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

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

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.