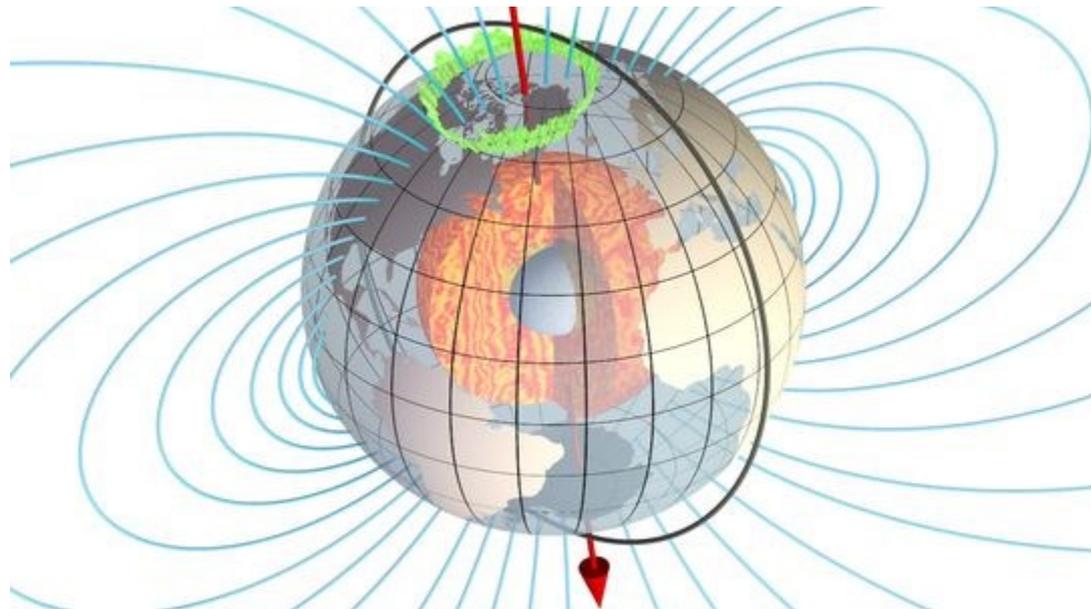




ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

Магнитные материалы

- материалы, применяемые в технике с учетом их магнитных свойств и характеризуются способностью накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию



Основные магнитные характеристики:

1. Магнитная восприимчивость χ - физическая величина, характеризующая связь между магнитным моментом (намагниченностью) вещества и магнитным полем в этом веществе
2. Относительная магнитная проницаемость μ - показывает, во сколько раз магнитная индукция в нем больше, чем в вакууме.

Суммарное магнитное поле в объёме вещества называется магнитной индукцией B [Тл]

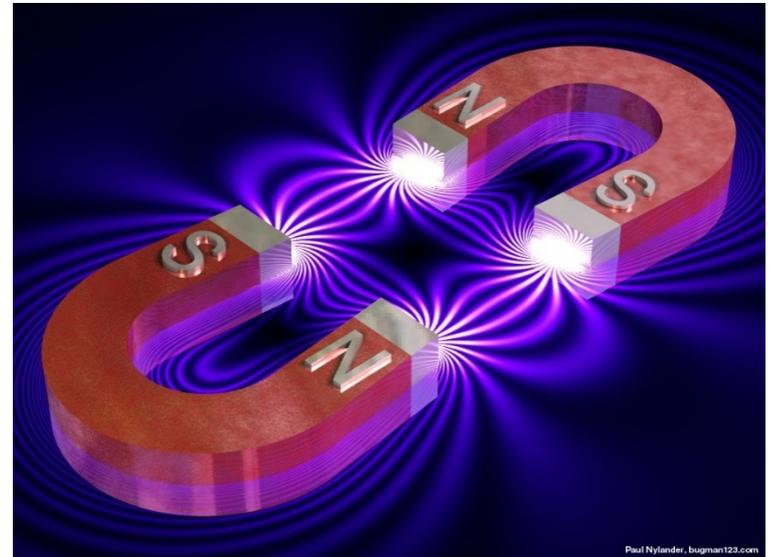
$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \vec{H}$$
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$\mu = 1 + \chi ; \mu_a = \mu_0 \mu$$

Намагничиванием называется процесс ориентации магнитных моментов атомов вещества под влиянием внешнего магнитного поля, в результате которого намагниченность материала становится $M \neq 0$.

Виды магнетизма:

1. Диамагнетизм
2. Парамагнетизм
3. Ферромагнетизм
4. Антиферромагнетизм
5. Ферримагнетизм



Диамагнетизм – свойство вещества слабо намагничиваться противоположно внешнему магнитному полю

Магнитная восприимчивость

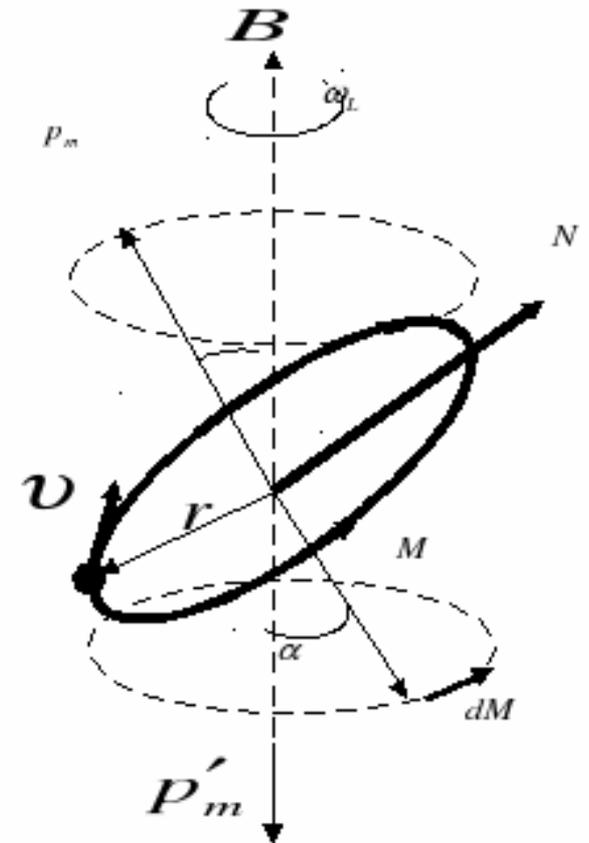
$$\chi \sim -10^{-5} \div -10^{-7}$$

Магнитная проницаемость

$$\mu \approx 0,9999$$

Диамагнетики

Cu, Ag, Au, Be, Zn, Ga, B, Pb, Sb



Парамагнетизм – свойство вещества слабо намагничиваться согласованно с внешним магнитным полем

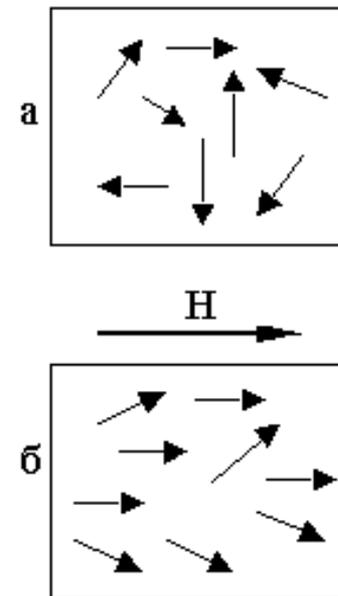
Магнитная восприимчивость

$$\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$$

$$\mu \approx 1,0001..$$

Парамагентики

Al, O, Pt, Mg, Pd, Cr, Ca



Ферромагнетизм – свойство вещества
сильно намагничиваться согласованно с
внешним магнитным полем

Магнитная восприимчивость

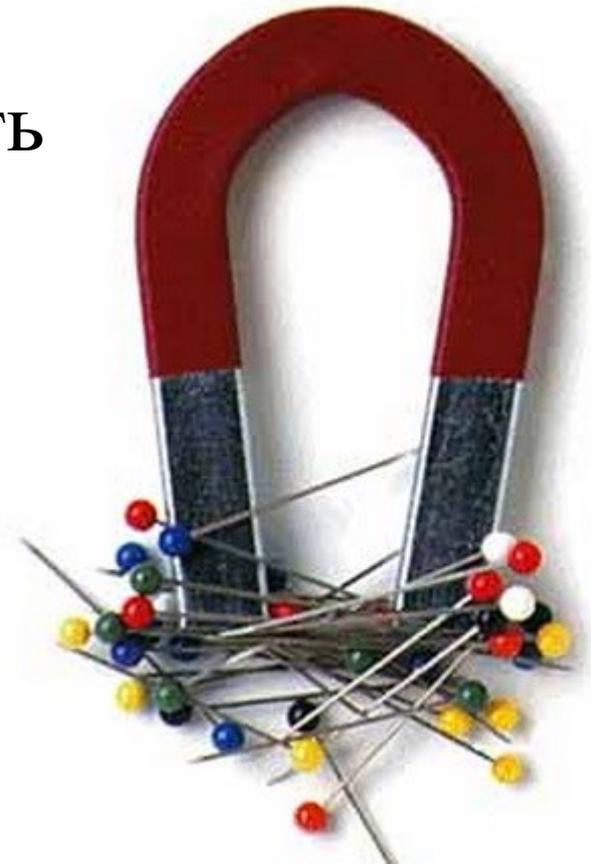
$$\chi \sim 10^3 \div 10^7$$

μ от 10^3 до 10^7

Ферромагнетики

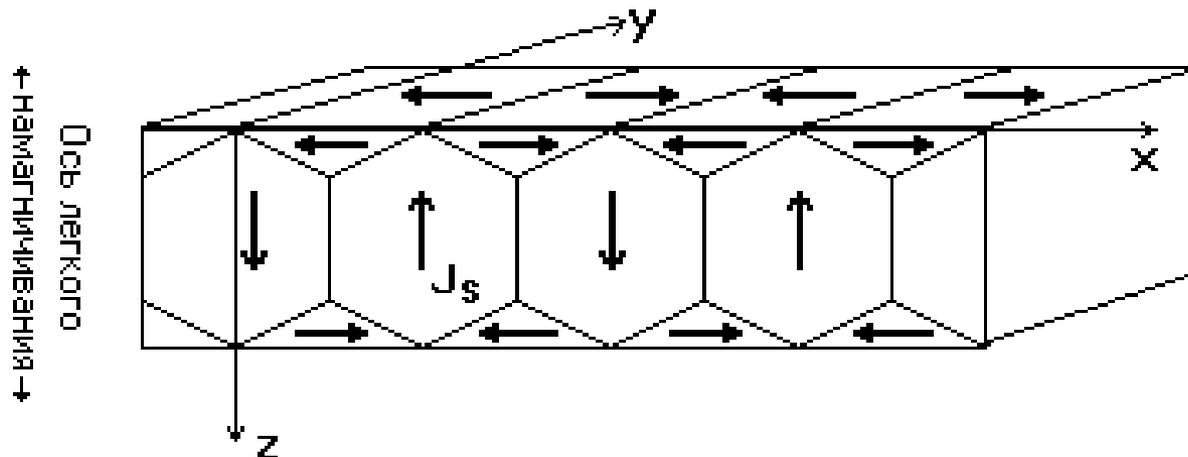
Fe, Co, Ni

Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm



Особенность свойств ферромагнетиков:

1. Наличие доменной структуры
2. Зависимость магнитного состояния от предшествующей магнитной истории
3. Наличие температуры Кюри



Идеализированная доменная структура кристаллического ферромагнетика

Намагничивание ферромагнетиков

Доменом называется

макроскопическая область

материала, внутри которой

намагниченность спонтанно ($H=0$)

достигает насыщения,

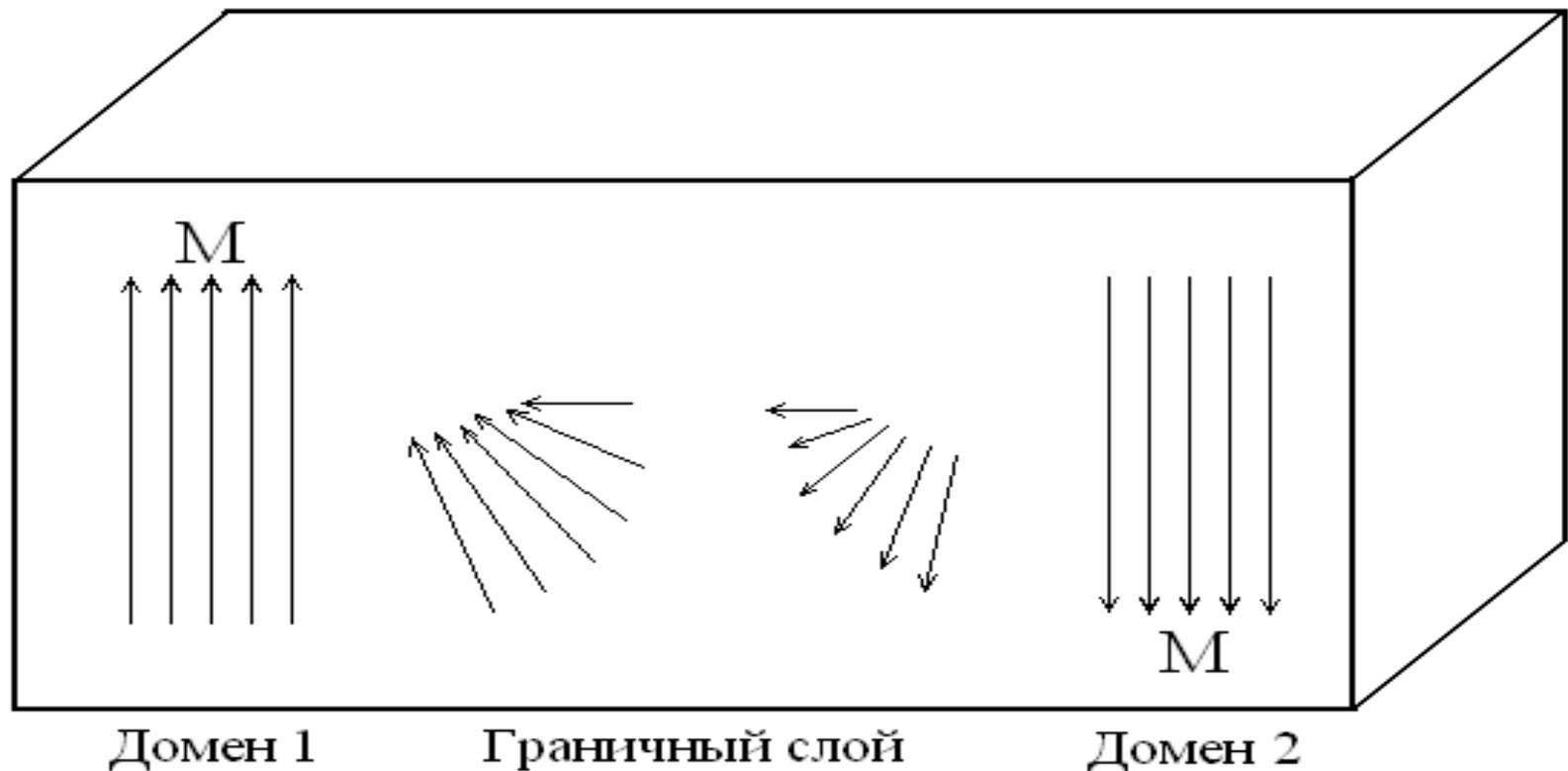
т. е. внутри домена магнитные моменты

практически всех атомов ориентированы в

одном направлении.

Условия возникновения доменной структуры (ферромагнетизма)

1. Наличие внутренних незаполненных электронных оболочек (d или f) атома;
2. Величина интеграла обменной энергии $A > 0$, что выполняется если диаметр незаполненных оболочек мал по сравнению с межатомным расстоянием кристаллической решетки: $a/d > 1,5$.



Магнитная структура граничного слоя в кристалле

Антиферромагнетики – материалы, в которых во время обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация равных по величине магнитных моментов

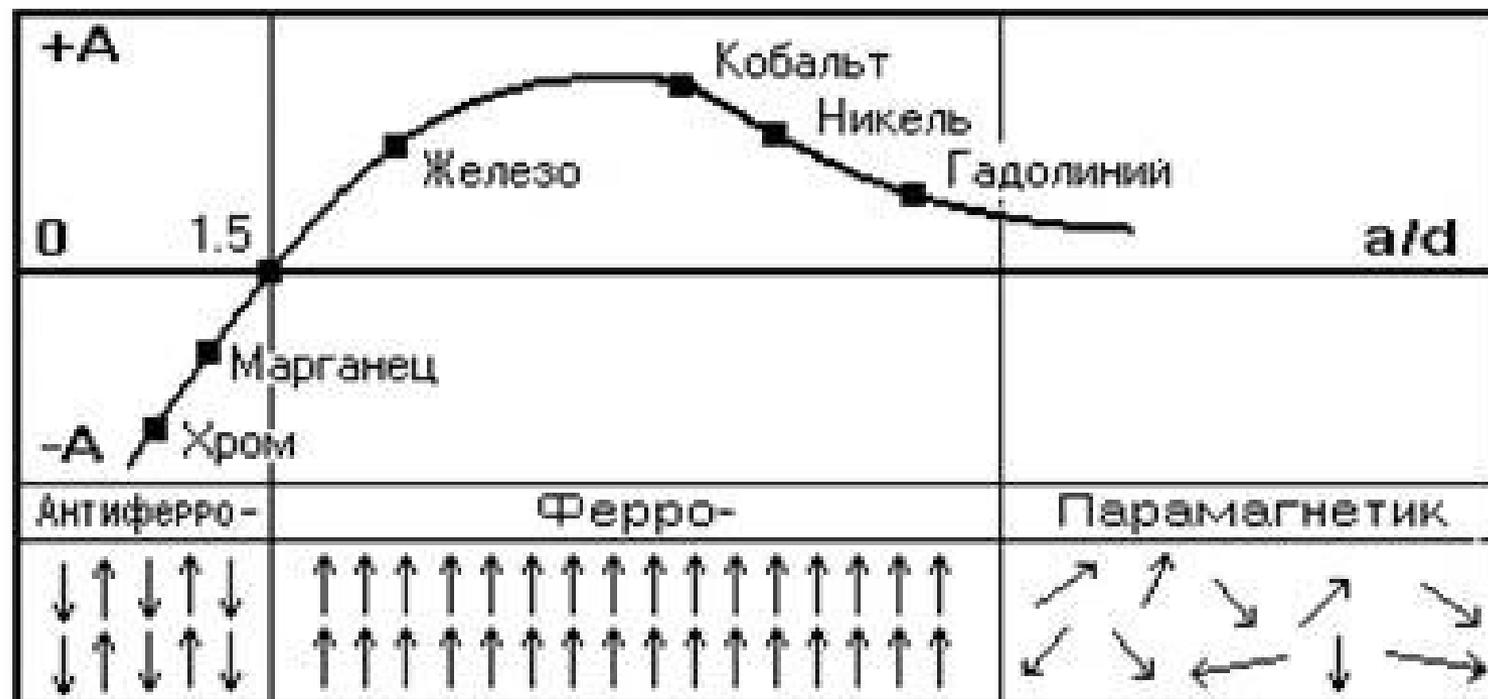
Магнитная восприимчивость

$$\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$$

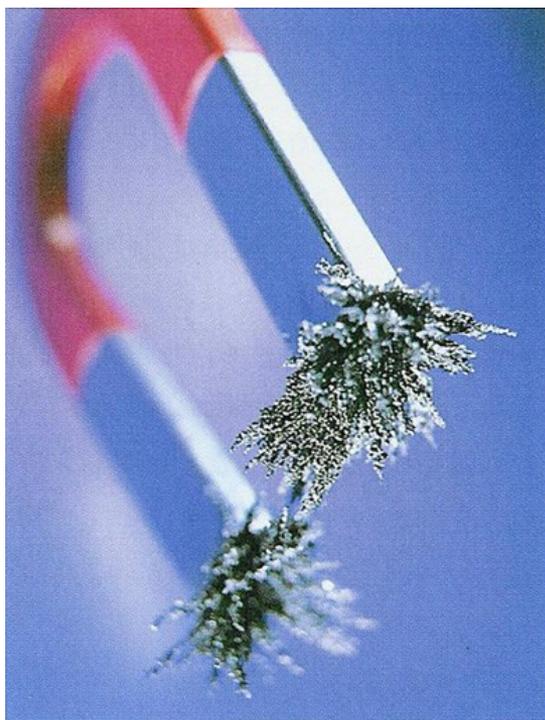
$$\mu \approx 1,0001..$$

Антиферромагнетики

Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Mn, Cr



Ферримагнетики (**ферриты**) – материалы, в которых во время обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация различных по величине магнитных МОМЕНТОВ



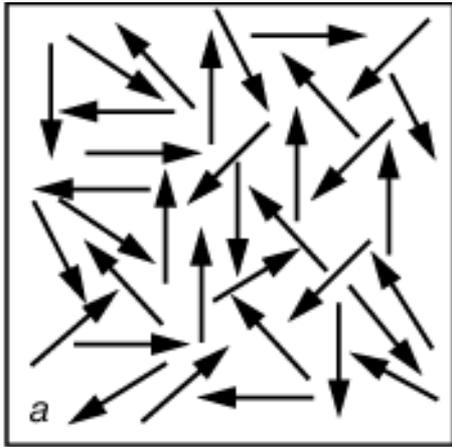
Магнитная восприимчивость

$\chi \sim$ до 10^7

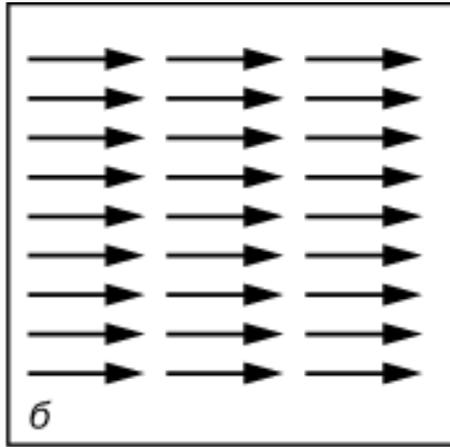
μ до 10^7

Ферриты $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MeO}$

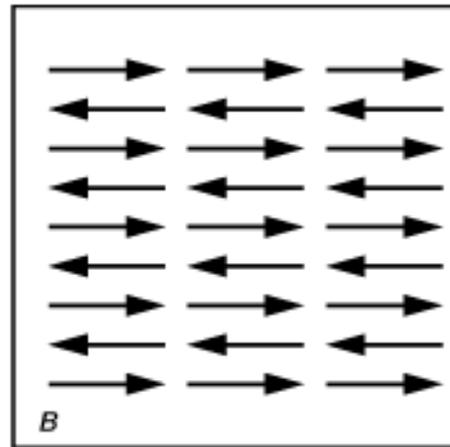
Me - Mg, Fe, Zn, Co, Cu,
Cd, Mn и др.



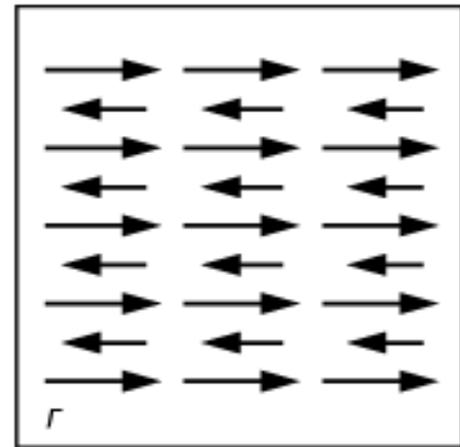
Парамагнитное вещество
во внешнем поле —
атомные магниты
разупорядочены



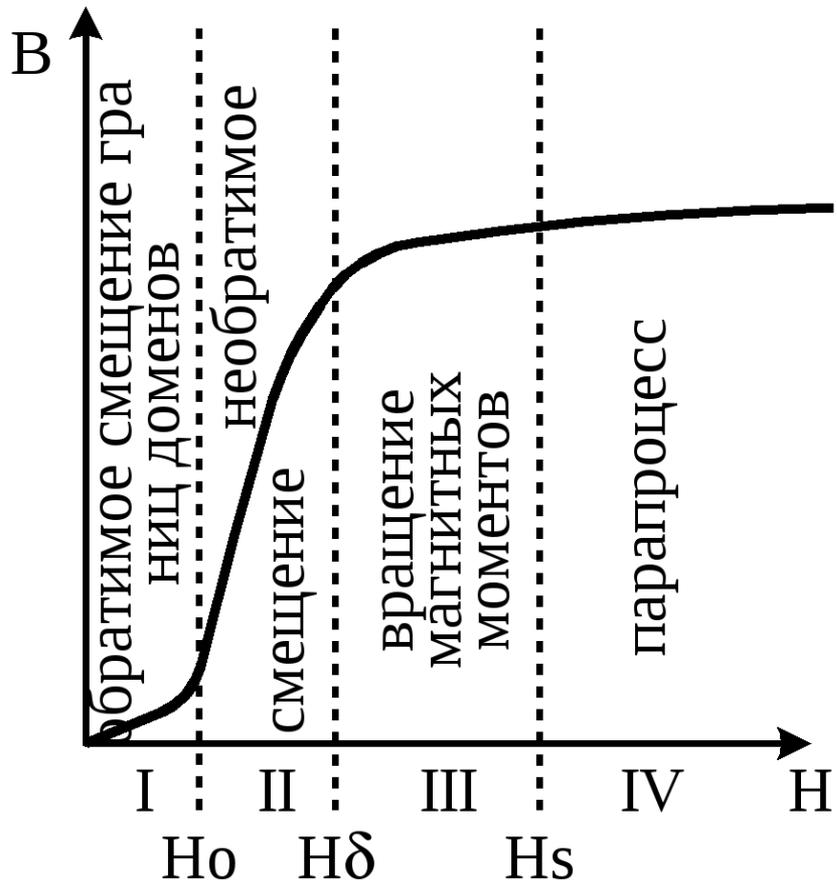
Ферромагнитное
вещество —
атомные магниты
упорядочены



Антиферромагнитное
вещество —
атомные магниты
ориентированы
антипараллельно
и магнитный момент
отсутствует

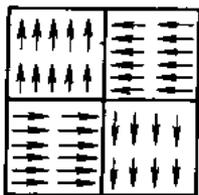


Ферримагнитное
вещество —
нескомпенсированная
антипараллельная
ориентация



а) Поле отсутствует

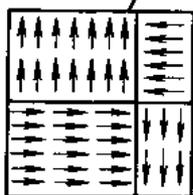
Домены



Магнитные поля атомов

б) Слабое поле

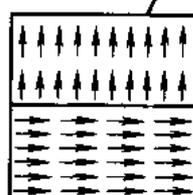
H



Направление внешнего поля

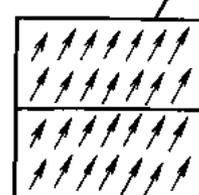
в) Более сильное поле

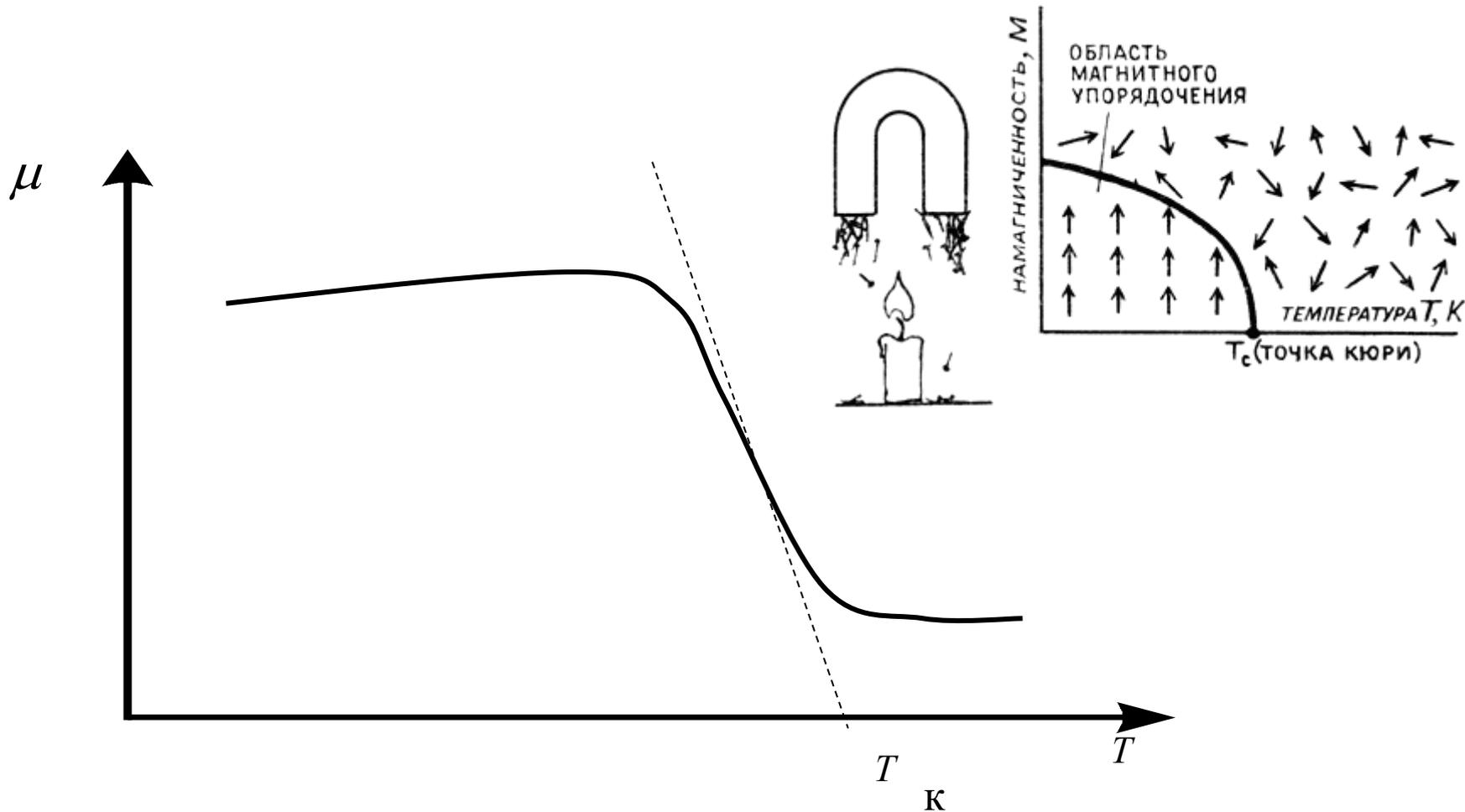
H



г) Насыщение

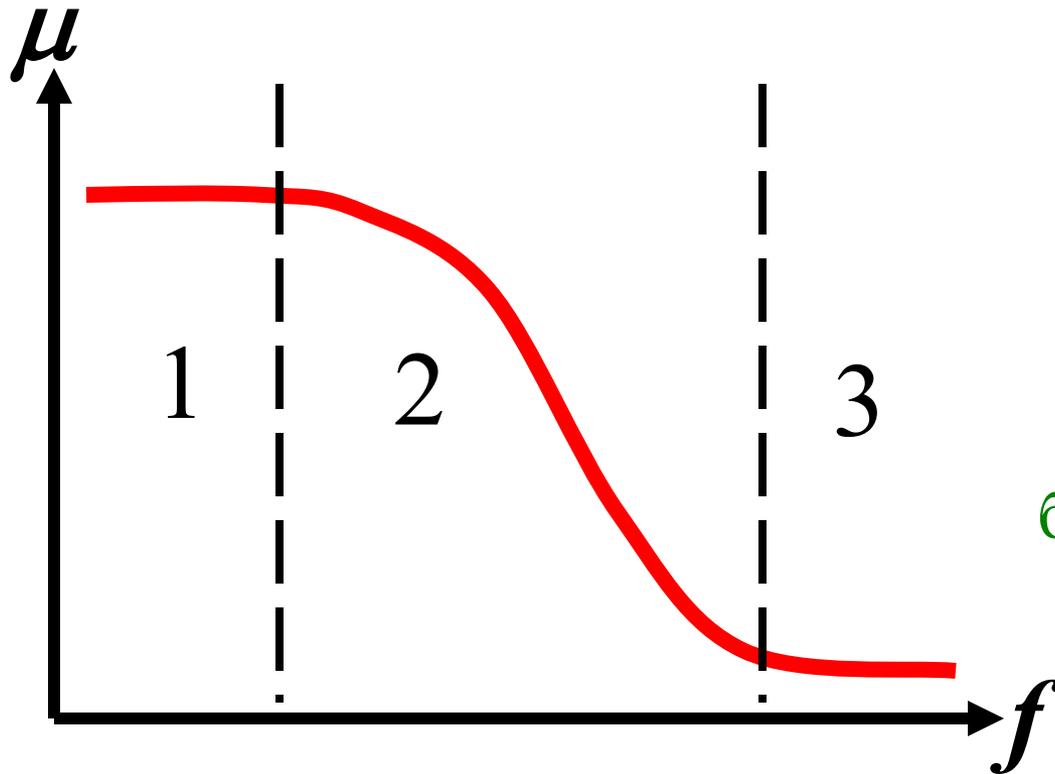
H





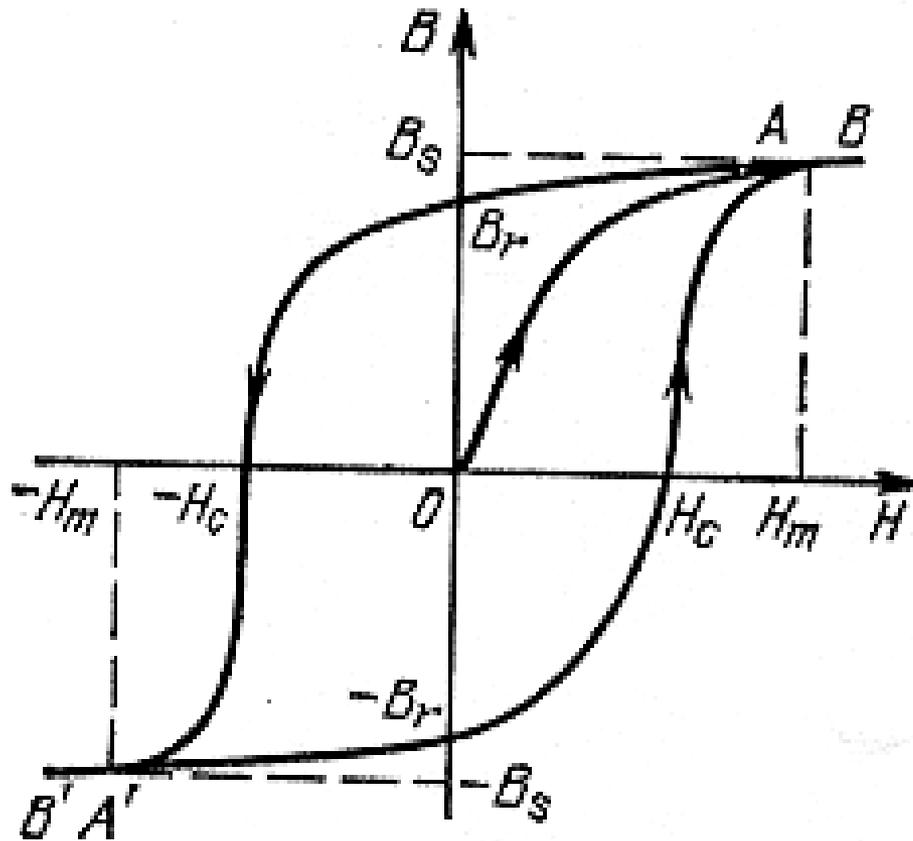
Типичная зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнитных материалов от температуры T .

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ



С повышением частоты магнитные моменты доменов не успевают переориентироваться вслед за быстроизменяющимся магнитным полем

ПРЕМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



1. B_s – индукция насыщения
2. H_c – коэрцитивная сила
3. B_r – остаточная индукция
4. Потери на гистерезис (на перемагничивание) – площадь петли гистерезиса

ВИДЫ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

1. ПОТЕРИ НА ГИСТЕРЕЗИС

$$P_H = f \frac{\oint HdB}{D} [Вт / кг]$$

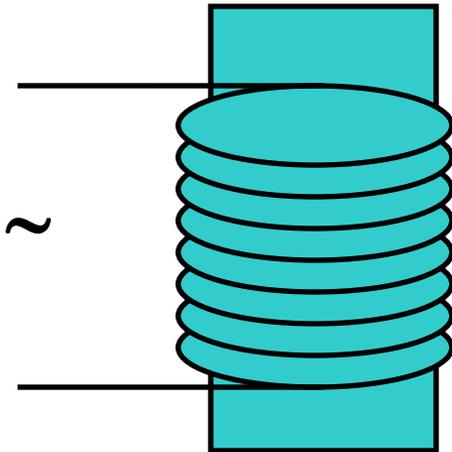
2. ПОТЕРИ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

$$P_v = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D \cdot \rho_V}$$

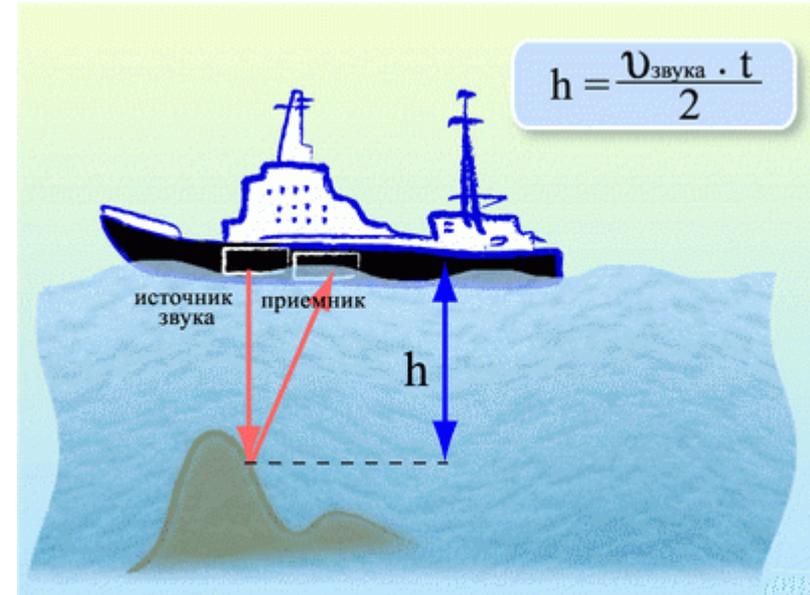
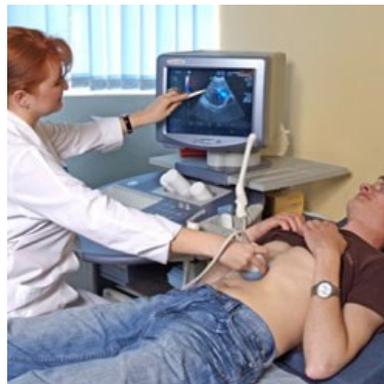
3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ

МАГНИТОСТРИКЦИЯ -

- ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ИЛИ РАЗМЕРА
МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Генераторы УЗ – колебаний.



Классификация магнитных материалов:

- 1. Магнитомягкие ($H_C < 4$ кА/м) – высокая μ , малая H_C , узкая петля гистерезиса, малые потери на перемагничение.**
- 2. Магнитотвердые ($H_C > 4$ кА/м) – большая B_r , широкая петля гистерезиса, большие потери на перемагничение**
- 3. Магнитные материалы специального назначения**



К магнитомягким материалам относят:

1. Технически чистое железо (электротехническая низкоуглеродистая сталь).
2. Электротехнические кремнистые стали.
3. Железоникелевые и железокобальтовые сплавы.
4. Магнитомягкие ферриты.

К магнитотвердым материалам относят:

1. Литые магнитотвердые материалы на основе сплавов Fe-Ni-Al.

2. Порошковые магнитотвердые материалы, получаемые путем прессования порошков с последующей термообработкой.

3. Магнитотвердые ферриты. Магнитотвердые материалы – это материалы для постоянных магнитов, использующихся в электродвигателях и других электротехнических устройствах, в которых требуется постоянное магнитное поле.

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ -

вещества, основным свойством которых является сильная электропроводность

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

I рода

Металлы и сплавы,
электронная
электропроводность

с.н.з. — электроны

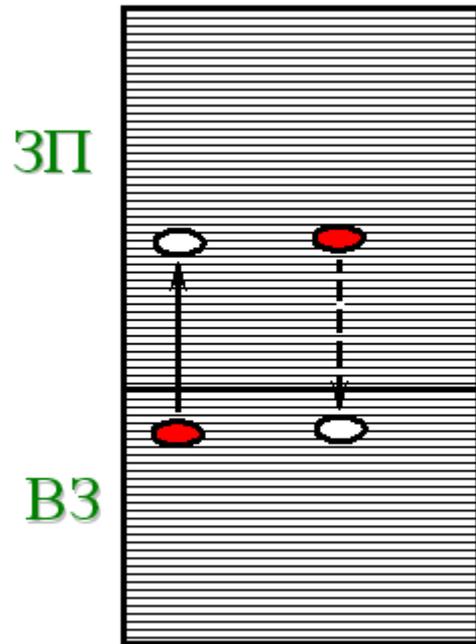
II рода

Водные растворы кислот,
солей, щелочей -
ЭЛЕКТРОЛИТЫ

с.н.з. — ионы

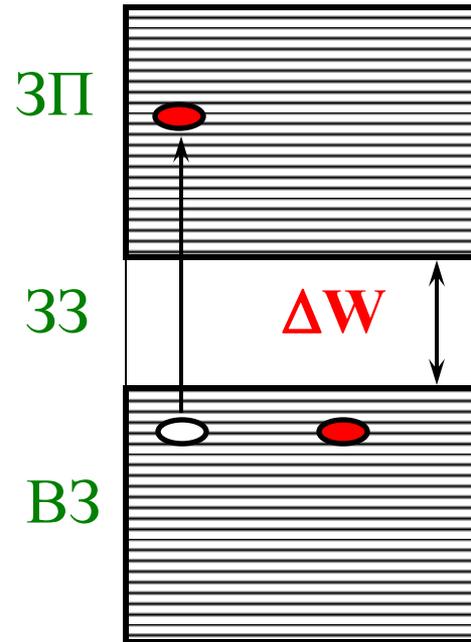
ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

проводники



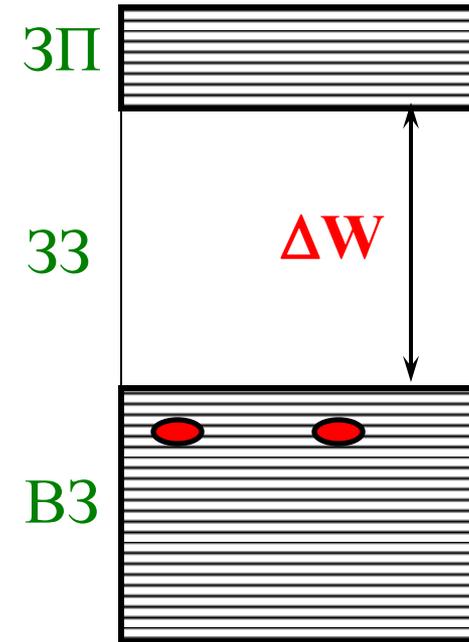
$$\Delta W = 0$$

полупроводники



$$\Delta W \text{ до } 3\text{эВ}$$

диэлектрики



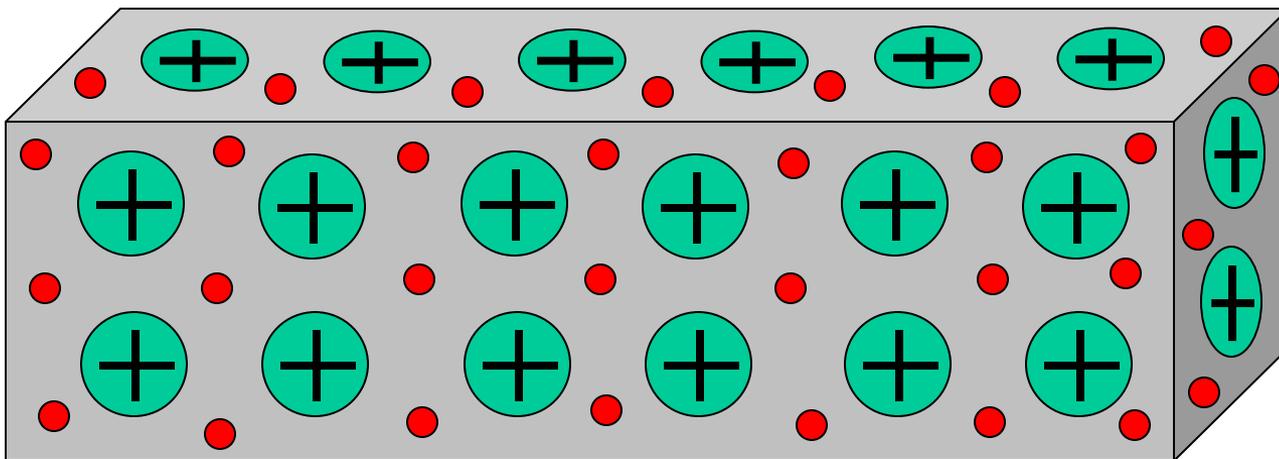
$$\Delta W \text{ выше } 3\text{эВ}$$

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

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

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

СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ



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

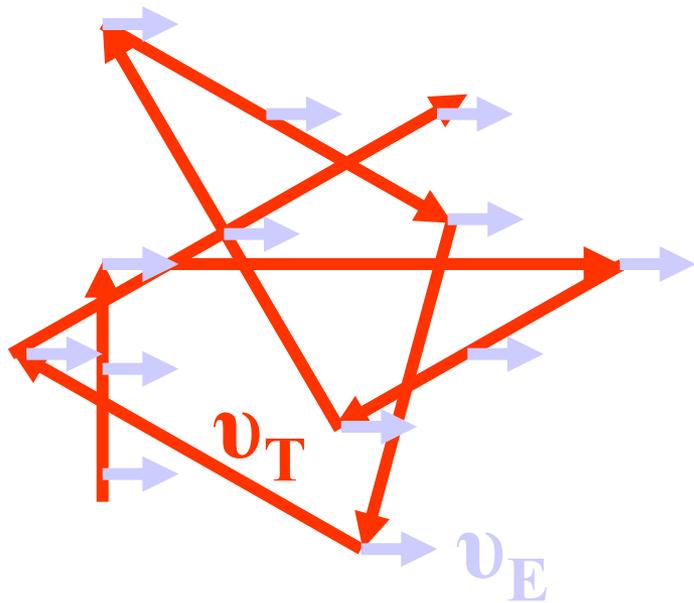
λ - длина свободного пробега с.н.з.,
определяет подвижность μ с.н.з.

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

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

$$F = qE$$

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



$$v_T \sim 10^5 \text{ м/с,}$$

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

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

μ - подвижность [м²/В·с]

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

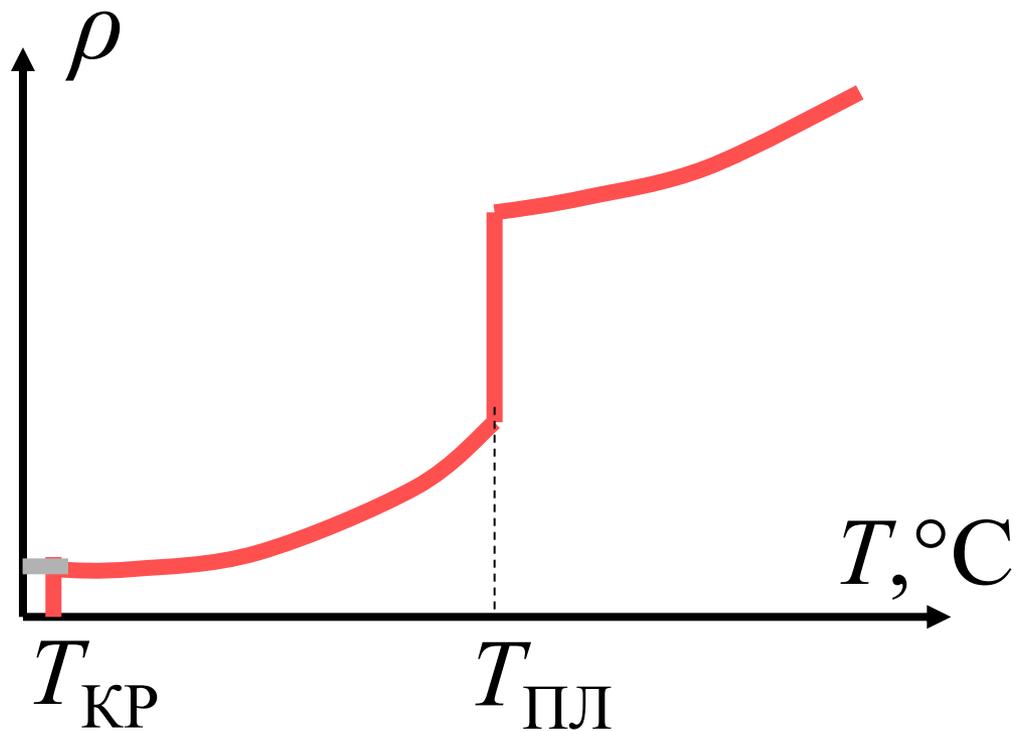
$\gamma = qn\mu$ удельная эл. проводимость
[См/м]

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

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

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

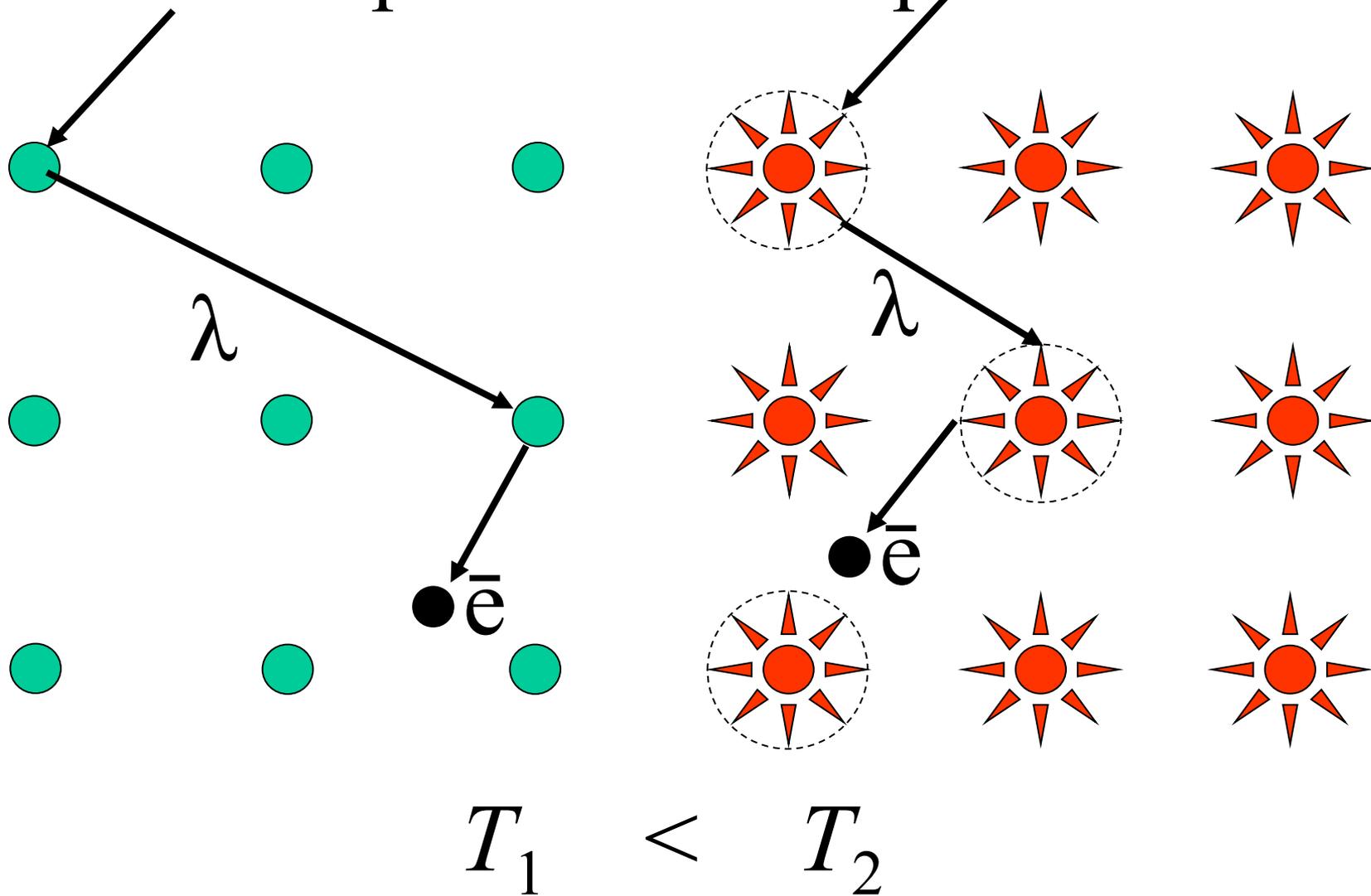
Зависимость $\rho = f(T)$ для металлов и сплавов в широком интервале температур



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

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

Причины увеличения ρ удельного сопротивления с ростом T



Температурный коэффициент любой физической характеристики A :

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

Температурный коэффициент удельного сопротивления

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

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

КРИОПРОВОДИМОСТЬ

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

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

КРИОПРОВОДНИКИ - Cu, Al, Be

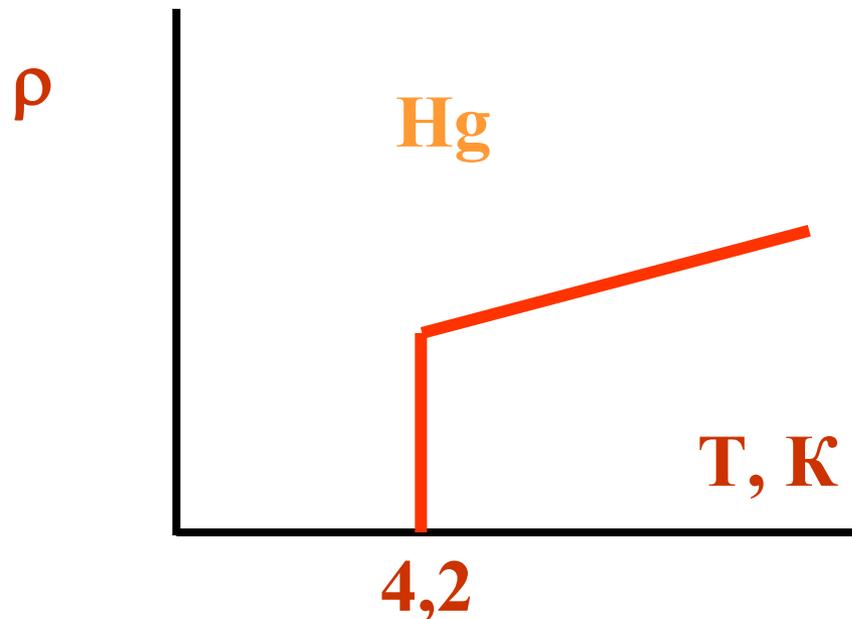
Требования к криопроводникам:

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

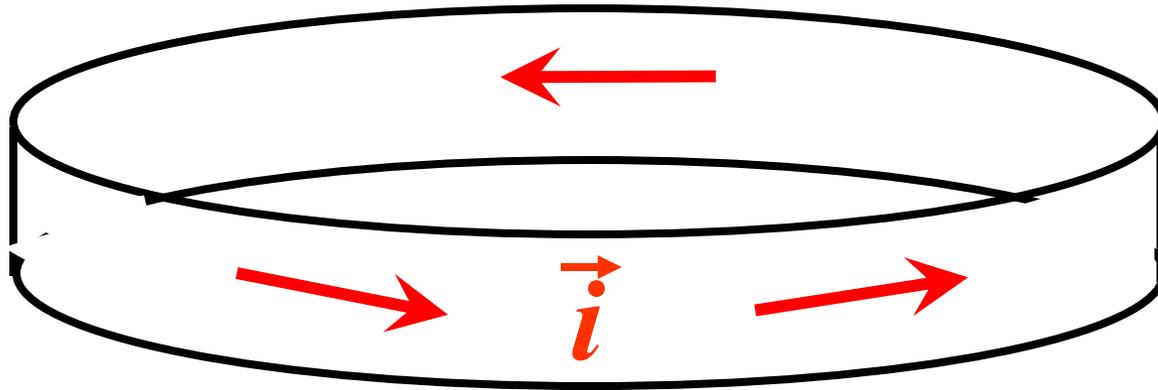
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

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

1911 год. Камерлинг - Оннес



Если в кольце из сплава Nb_3Sn путем электромагнитной индукции возбудить ток



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

Это соответствует величине ρ порядка 10^{-26} Ом·м

**В объеме сверхпроводника нет
магнитного поля**

**Сильное магнитное поле разрушает
явление сверхпроводимости!!!**

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДИМОСТИ**

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

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

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

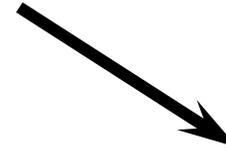
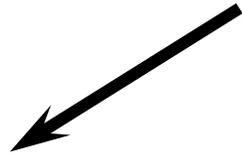
$$Cd = 0,56 \text{ } ^\circ\text{K}$$

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

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

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

СВЕРХПРОВОДНИКИ



I рода (мягкие)

резкий переход в
сверхпроводящее
состояние при одном
фиксированном значении

$H_{кр}$

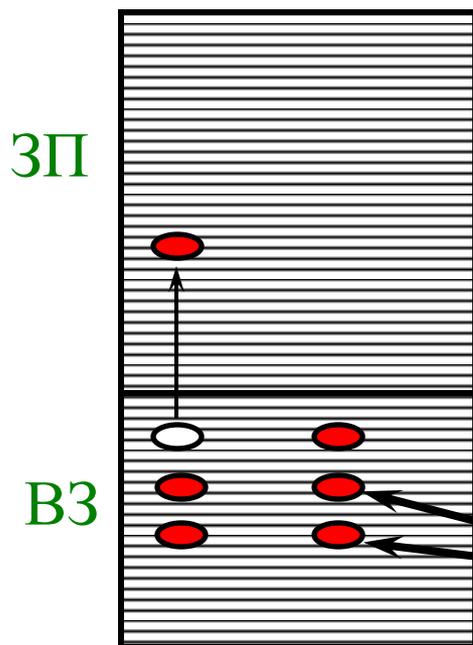
Полное вытеснение
магнитного поля из
объема сверхпроводника

II рода (твёрдые)

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

ПРИРОДА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

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



$$\Delta W=0$$

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

Куперовские пары образуются из электронов, расположенных ниже поверхности Ферми

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

ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость

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

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

**Широко используется керамика на основе
висмута.**

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

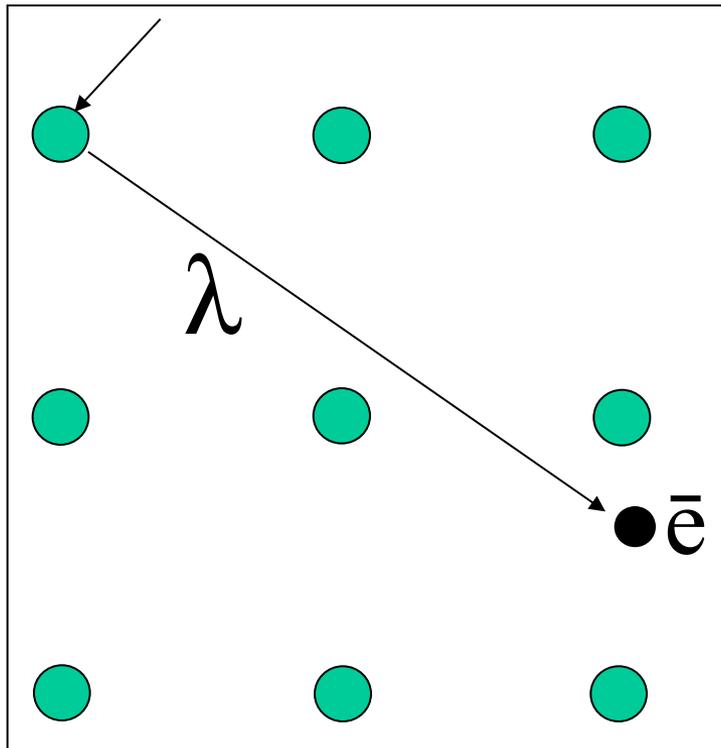
УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

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

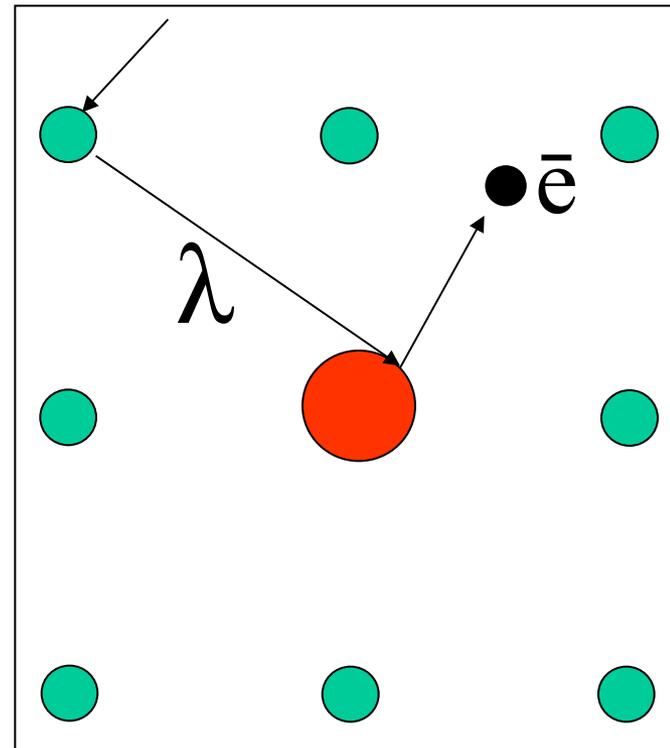
Происходит снижение подвижности с.н.з.

В проводниковых материалах любая примесь резко снижает электропроводность!!!

ρ СПЛАВОВ как правило выше, чем
 ρ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

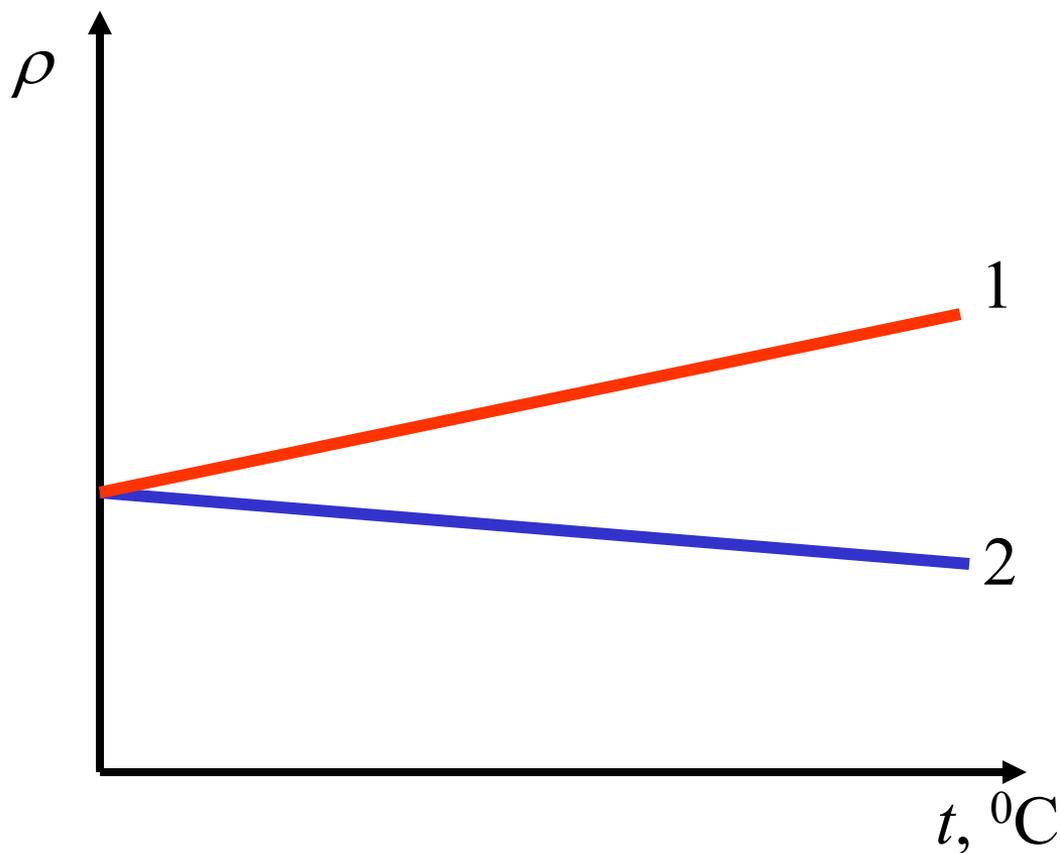


Чистый металл



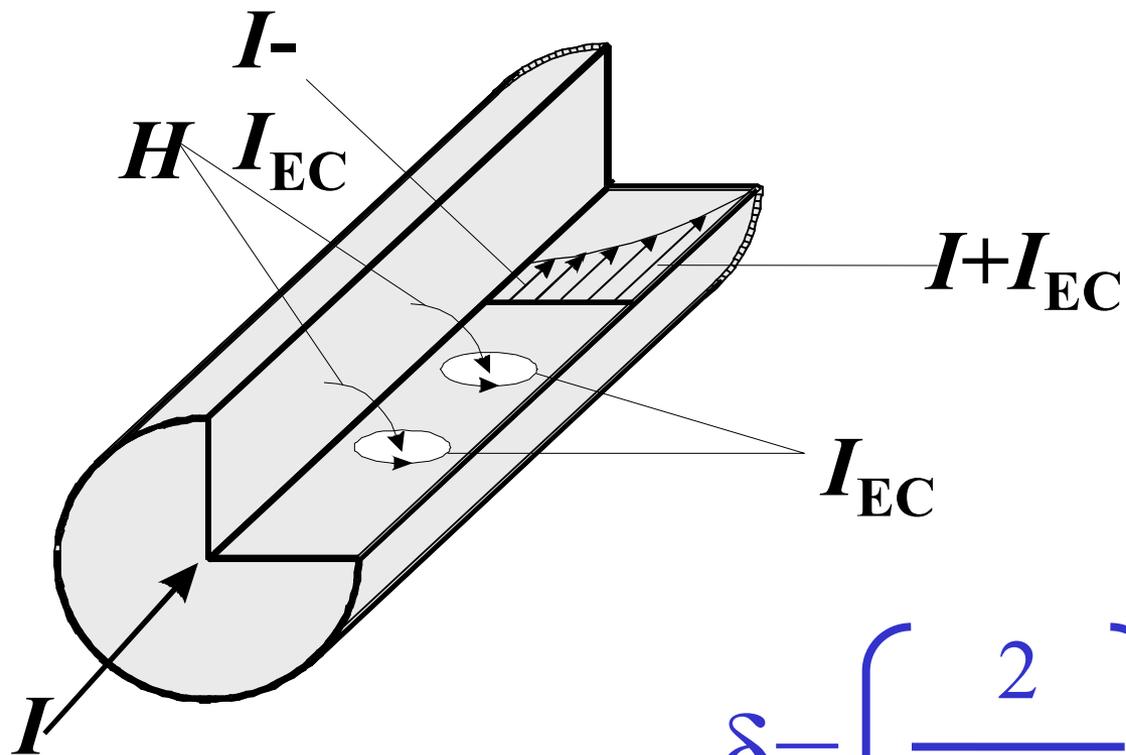
Сплав

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ



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

Скин-эффект



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

ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

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



термоЭДС

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

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

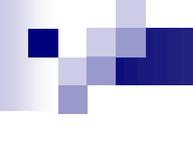
$$K = (k/e) \ln(n_A/n_B), \quad U = K \Delta T$$

K – коэффициент термоЭДС

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

Конструкции термопар

- | | |
|-------------------------|----------------|
| 1. Платина-Платинородий | до 1600 °С |
| 2. Хромель-Алюмель | до 1000 °С |
| 3. Железо-Константан | |
| Железо-Копель | до 600 °С |
| Хромаль-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 ($90\%Pt+10\%Rh$)

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

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

Закон ВИДЕМАНА-ФРАНЦА-ЛОРЕНЦА

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

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

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

k – постоянная Больцмана;
 e – заряд электрона.

Механические свойства проводников

- предел прочности при растяжении σ_p ;
- относительное удлинение при растяжении;
- твердость;
- хрупкость.

Температурный коэффициент линейного расширения

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