

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

**РАЗДАТОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ (Ч. 1)**

---

**Доцент кафедры АТПП  
Прахова Марина Юрьевна**

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

- Введение

## Значение материаловедения

- деление исторических эпох по материалам (каменный, бронзовый, железный век);
- использование материалов: чисто природные → облагороженные → комбинации природных → синтетические;
- для каждой следующей эпохи характерно уменьшение ее длительности и одновременно увеличение количества используемых материалов

**Материал** - это объект, обладающий определенным составом, структурой и свойствами, предназначенный для выполнения определенных функций.

**Материаловедение** - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д., а также при сочетании этих воздействий.

**Электротехническое материаловедение** - это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования.

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

**Материалы**

**Конструкционные**

**Электротехнические**

**Особого назначения**

**Электротехнические материалы** – обладающие специфическими свойствами в отношении электромагнитного поля

**Основные свойства материалов**

**Электрические**

**Магнитные**

**Теплофизические**

**Оптические**

**Механические**

**Внешние факторы:**  
термообработка,  
облучение и т.п.

**Внутренние факторы:**  
состав, структура

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

По структуре

Монокристаллы

Поликристаллы

Аморфные

Смешанные

Аморфно-кристаллические: в аморфной структуре есть частичная кристаллизация

Упорядоченность отсутствует; затвердевшие жидкости, у которых при понижении температуры вязкость растет очень быстро и кристаллы не успевают образовываться. Характерная особенность – отсутствие определенной температуры плавления, есть некоторый интервал размягчения

Мелкие сросшиеся друг с другом кристаллические зерна (кристаллиты), ориентированные хаотично; свойства изотропны

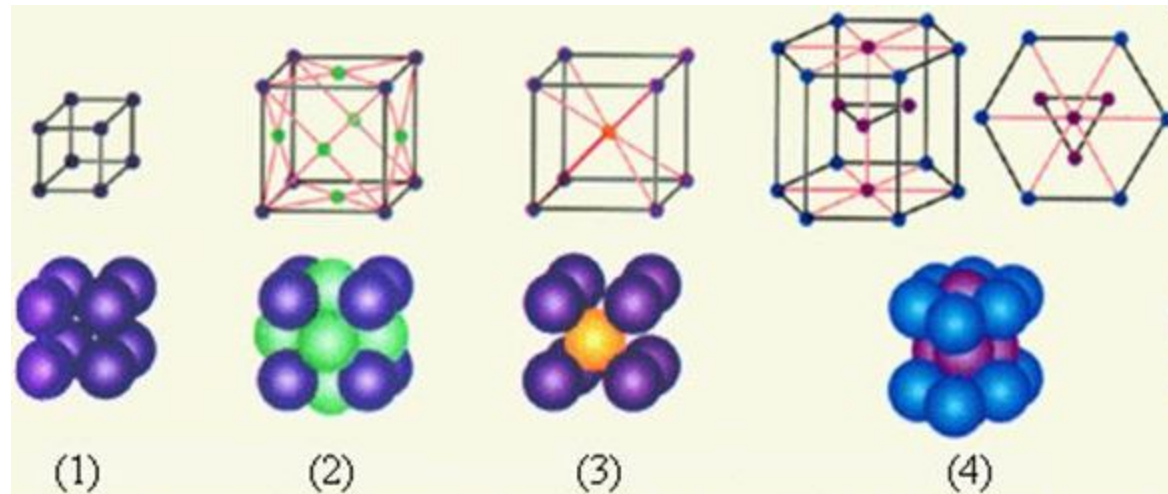
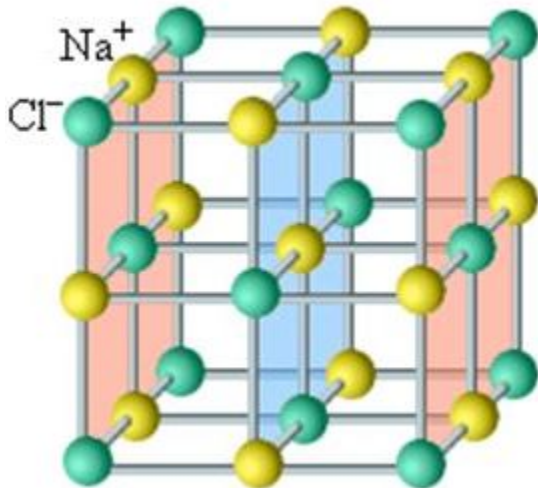
Однородные анизотропные тела, характеризующиеся правильным порядком атомов во всем объеме и состоящие из периодически повторяющихся одинаковых кристаллических ячеек

# СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

- Вид пространственной кристаллической решетки зависит от размера атомов и электронной конфигурации их внешних оболочек
- Геометрически возможны всего 14 типов кристаллической решетки
- Кристаллов с идеально правильным строением не существует, всегда есть какое-либо отклонение от регулярного расположения частиц – т.н. дефекты структуры

## Простейшие кристаллические решетки

### МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛА



1 – простая кубическая решетка; 2 – гранецентрированная кубическая решетка; 3 – объемноцентрированная кубическая решетка; 4 – гексагональная решетка.

## МОНОКРИСТАЛЛЫ



исландский шпат



топаз

## ПОЛИКРИСТАЛЛЫ



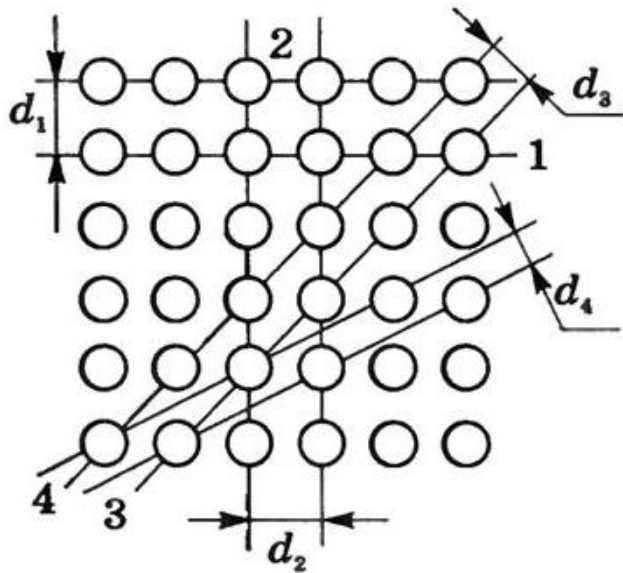
каменная соль



кварц

**АНИЗОТРОПИЯ** - зависимость физических свойств от выбранного направления из-за различия в плотности расположения частиц в кристаллической решетке по разным направлениям.

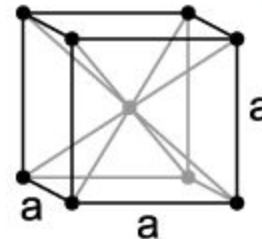
Плоскость кристалла



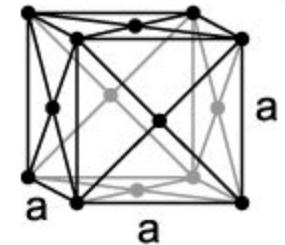
Через узлы этой плоской решетки проведены различно ориентированные параллельные прямые (1, 2, 3, 4). На единицу длины прямых приходится не одинаковое количество атомов.

**ПОЛИМОРФИЗМ** (аллотропия) – способность образовывать 2 и больше кристаллических решеток, существующих при различных давлении и температуре и имеющих различные свойства.

Железо: ОЦК (ферромагнетик) и ГЦК (диамагнетик)



Объемно-центрированный куб

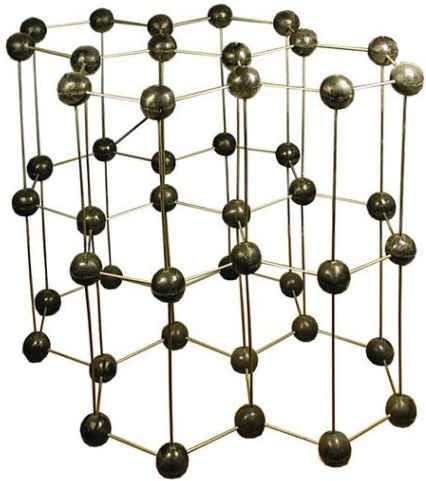


Гране-центрированный куб

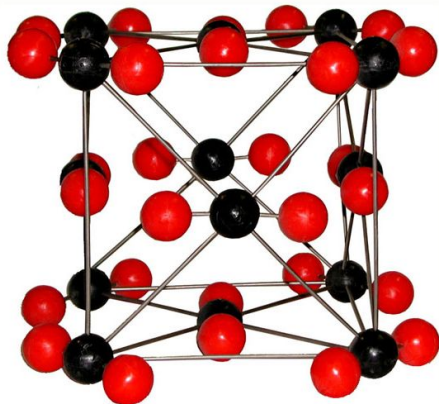
Обозначение модификаций: при минимальной температуре –  $\alpha$ , затем  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д.



## Кристаллические решетки углерода



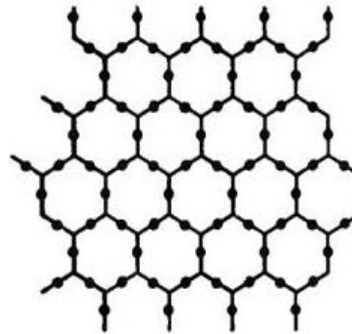
Графит



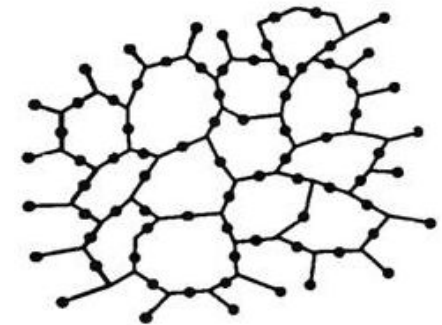
Алмаз

## АМОРФНЫЕ ТЕЛА

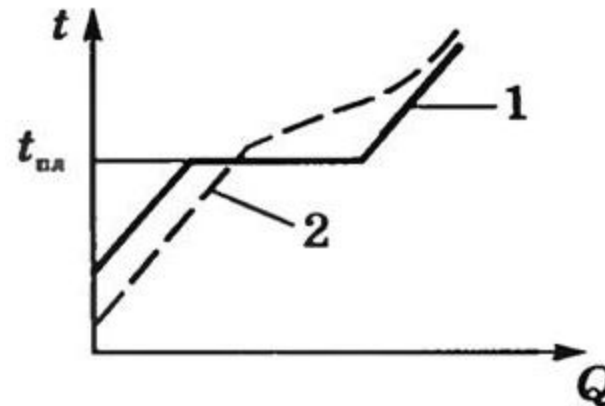
Кристаллический  
кварц



Кварцевое стекло



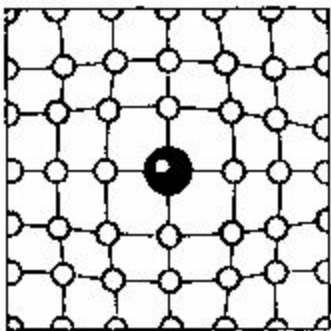
Обладают одновременно твердостью и текучестью  
Определенная температура плавления отсутствует



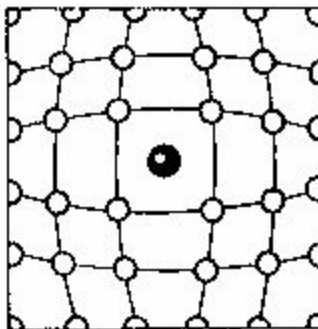
# ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ

## Точечные дефекты

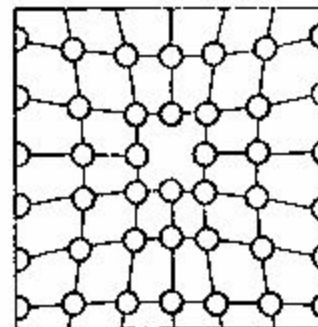
замещение  
собственного атома  
чужеродным

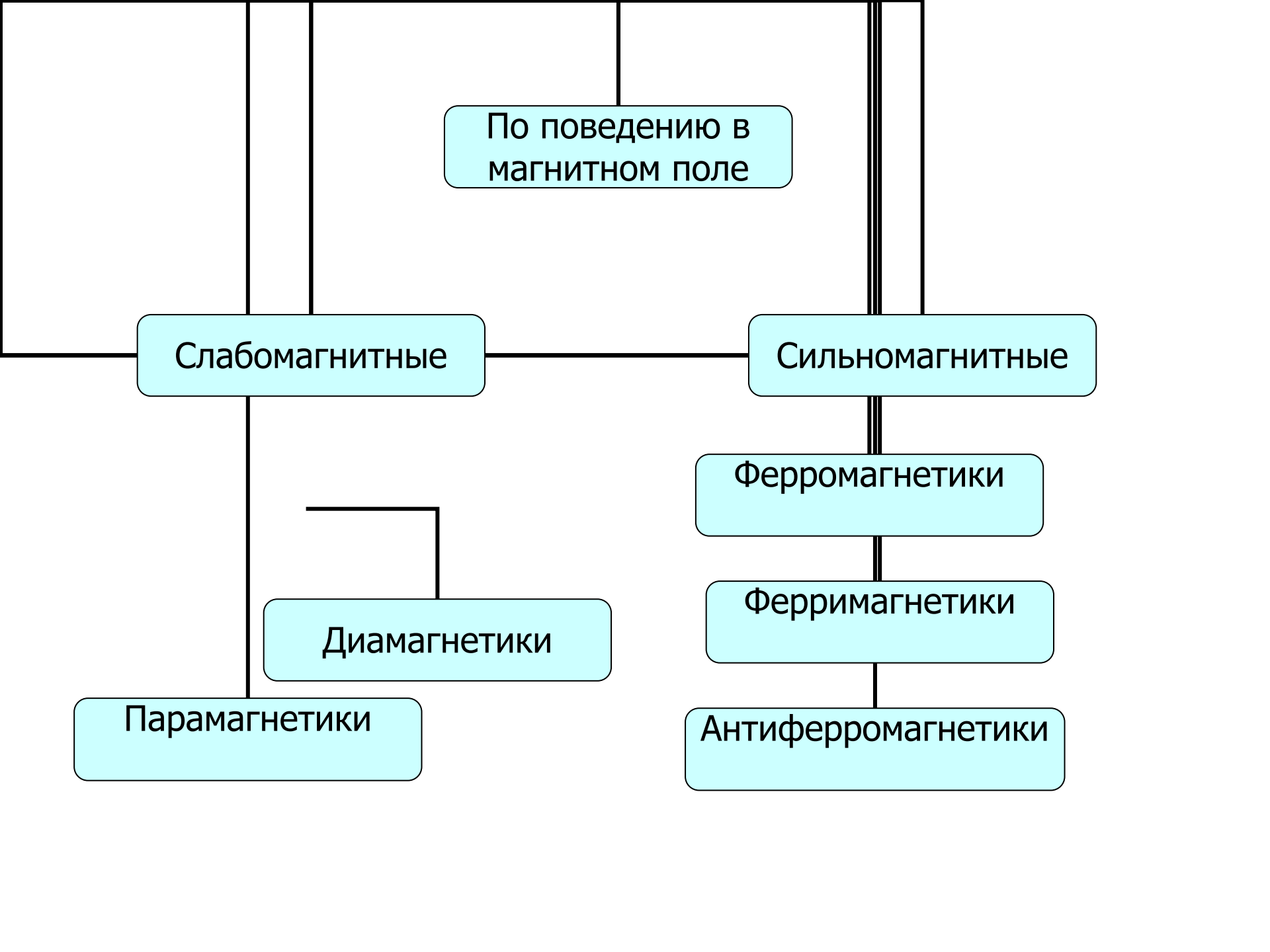


внедрение атома в  
пространство между  
узлами решетки



отсутствие атома в одном  
из узлов кристаллической  
решетки



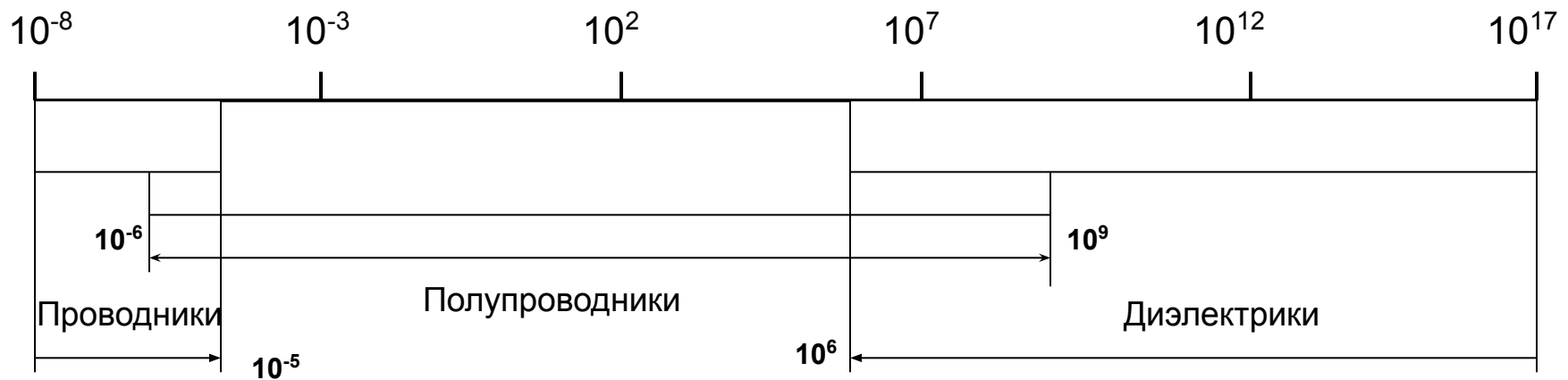




Количественная оценка электропроводности:  $\rho$  – удельное сопротивление [Ом\*м] или  $\gamma$  – удельная электропроводность [См/м]

В общем случае  $\rho = [0; \infty]$  (сверхпроводники – разреженные газы)

Для твердых тел  $\rho = 10^{-8} \dots 10^{17}$  Ом\*м



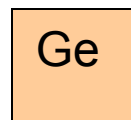
Проводники	Сильно выраженная электропроводность при нормальной температуре
Полупроводники	Активированная проводимость, т.е. сильная зависимость электропроводности от внешних факторов
Диэлектрики	Способность к поляризации и возможность существования в них электростатического поля

Все металлы – проводники, а неметаллы – полупроводники и диэлектрики

**Качественное различие:** для проводников проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков - возбужденным

Удельное сопротивление  $\rho$  зависит от:

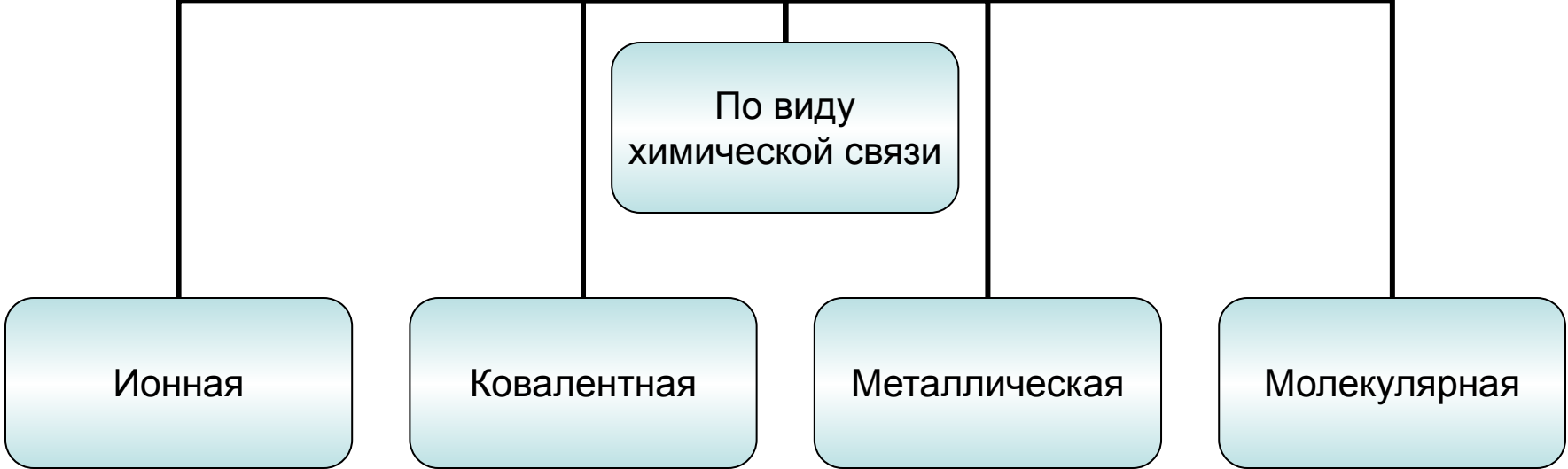
- структуры;
- модификации;
- внешних условий;
- агрегатного состояния



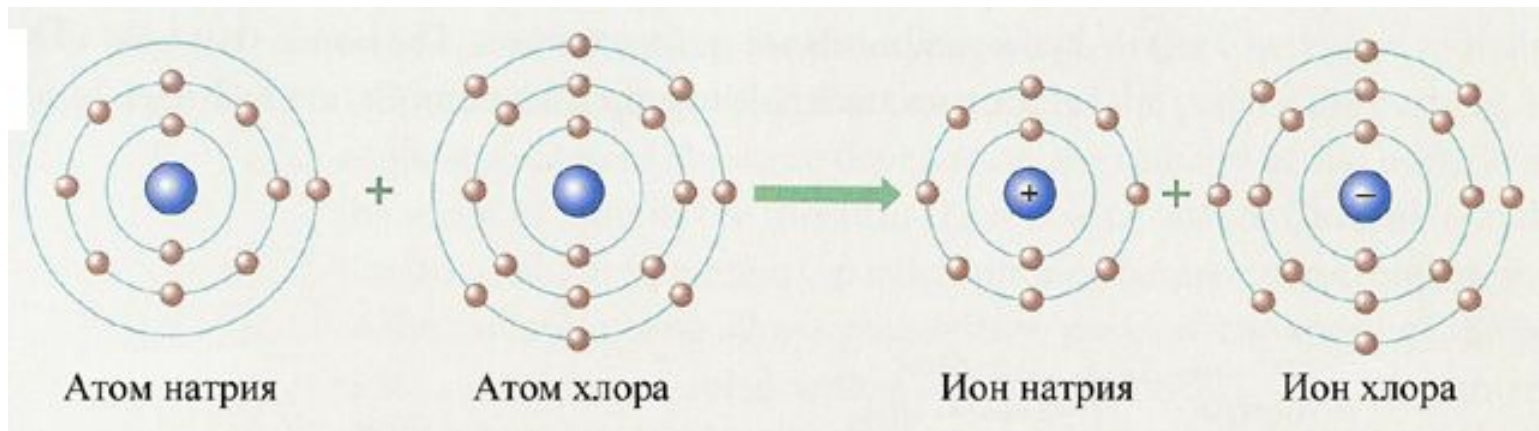
Полупроводник (нормальные условия)

Проводник (высокое давление)

Диэлектрик (низкая температура)



## ИОННАЯ СВЯЗЬ

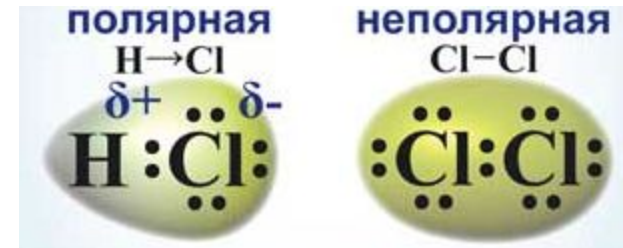
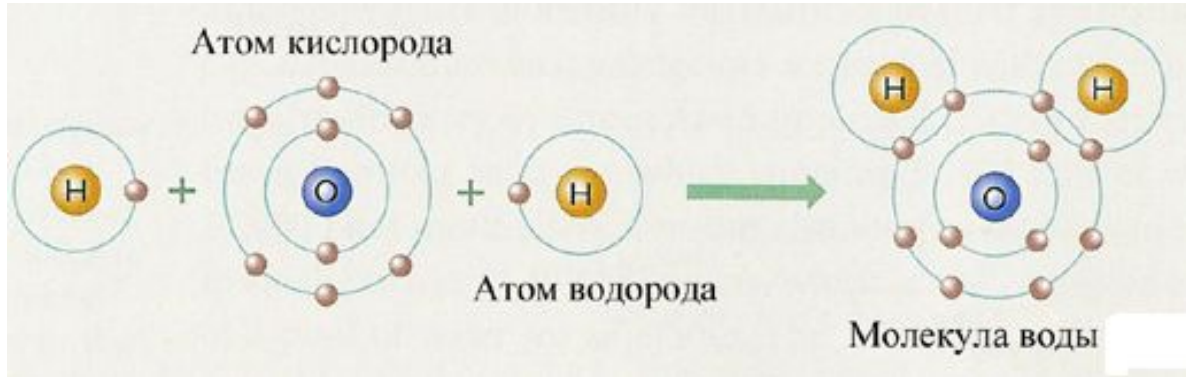


Образуется за счет электростатического притяжения ионов

Необходимое условие возникновения – согласованное движение валентных электронов в соседних молекулах. В любой момент времени электроны должны быть максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным ядрам

Галогидные соли щелочных металлов – ионные кристаллы типа NaCl

## КОВАЛЕНТНАЯ СВЯЗЬ



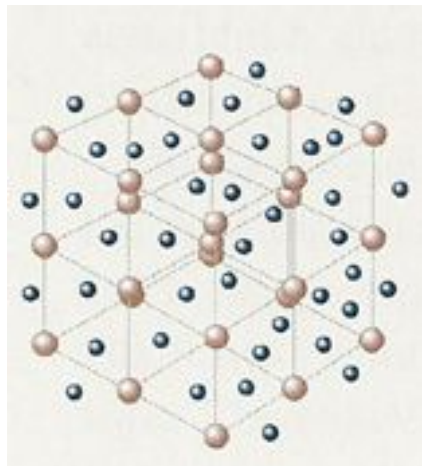
Образуется за счет создания общей пары валентных электронов

Имеет направленный характер, может быть полярной и неполярной

Материалы твердые, но хрупкие, с высокой температурой плавления

Ge, Si, алмаз; двухатомные газы  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ; **молекулы** многих органических соединений  $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$

## МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ



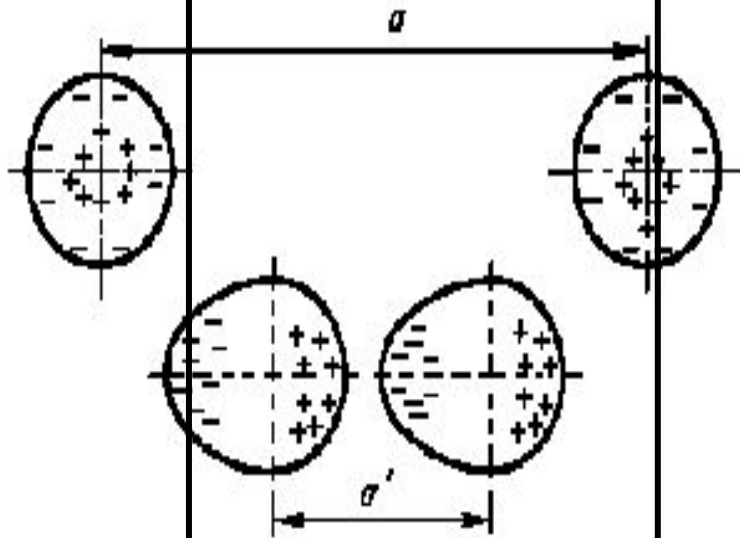
Образуется с помощью свободных коллективизированных электронов

Ненаправленный характер связи → пластичность, высокая тепло- и электропроводность

Отличия от ковалентной:

- в обобществлении электронов участвуют все атомы;
- обобществленные электроны не локализируются около своих атомов, а перемещаются по всему объему

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ (ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ, ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА) СВЯЗЬ



Образуется между отдельными молекулами в результате электростатического притяжения между зарядами противоположных знаков, которые имеются в молекулах с ковалентным характером внутримолекулярного взаимодействия

Наиболее универсальная связь, возникает между любыми частицами

Наиболее слабая (на 2 порядка слабее ионной и ковалентной)

Низкая температура плавления

Полимеры

По агрегатному  
состоянию

Твердые

Жидкие

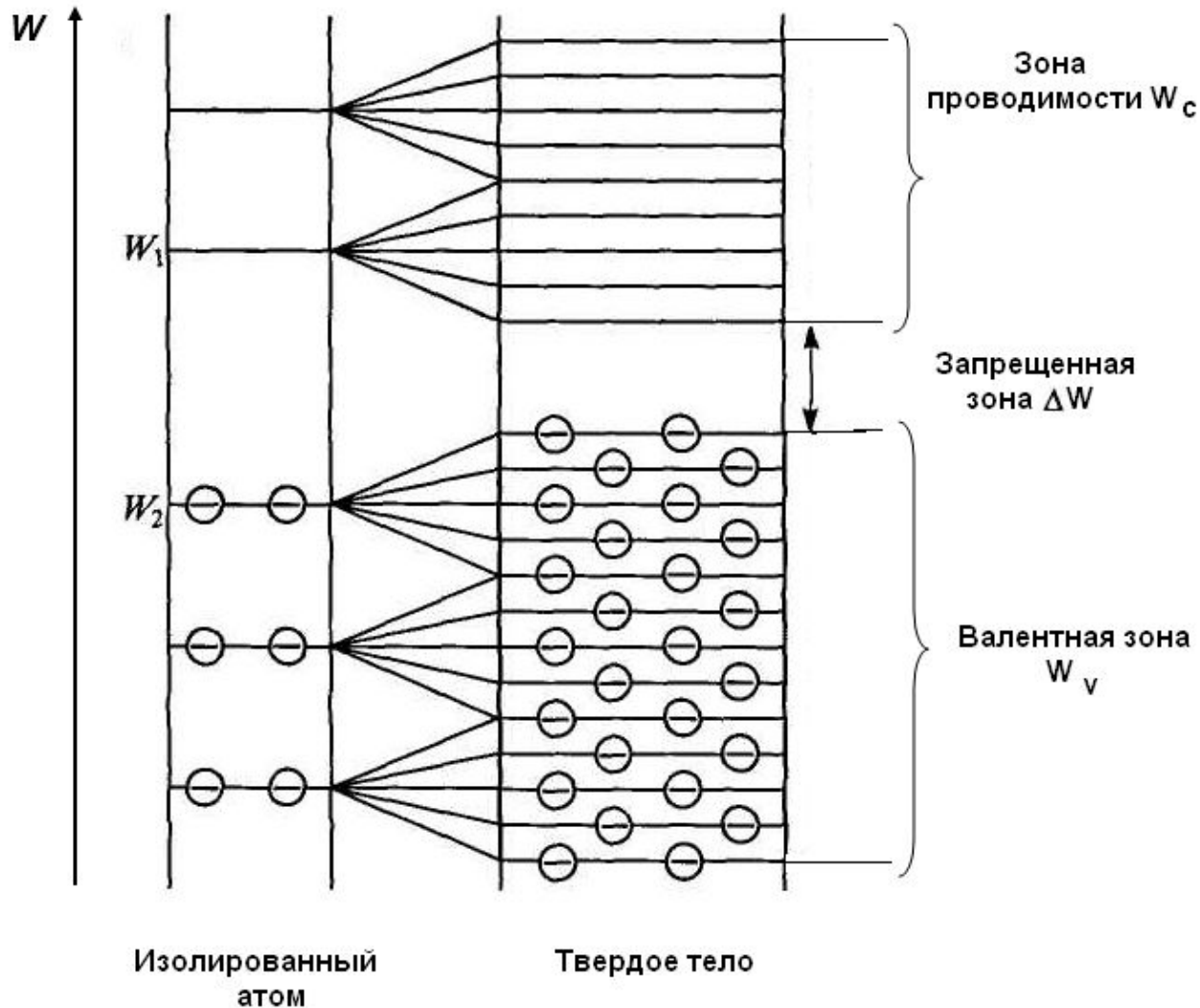
Газообразные

Плазма



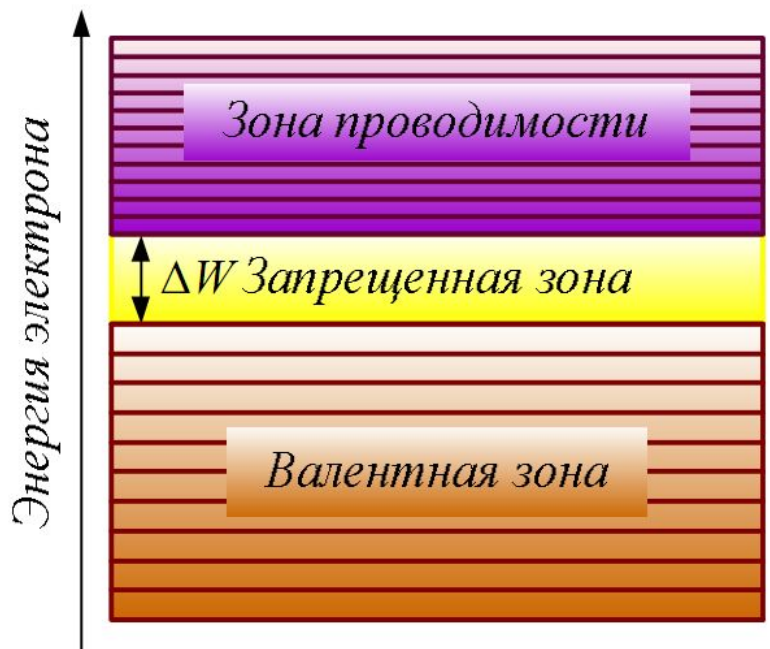
# ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Зонная теория – теория валентных электронов, движущихся в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки. Она справедлива для тел с ковалентными и металлическими связями.



## Свойства энергетических зон

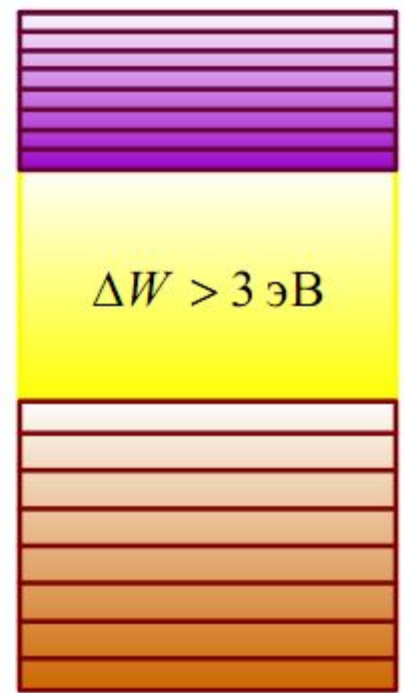
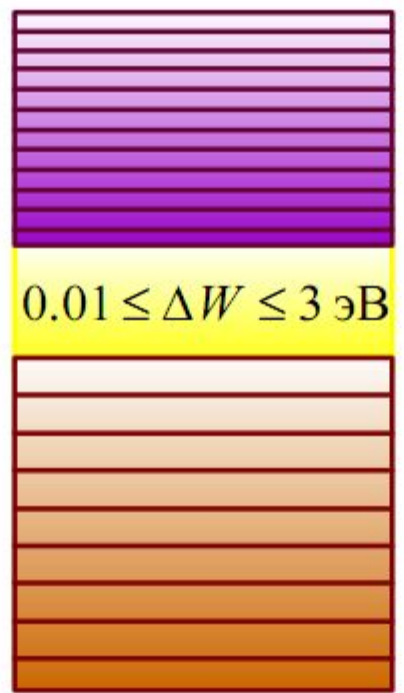
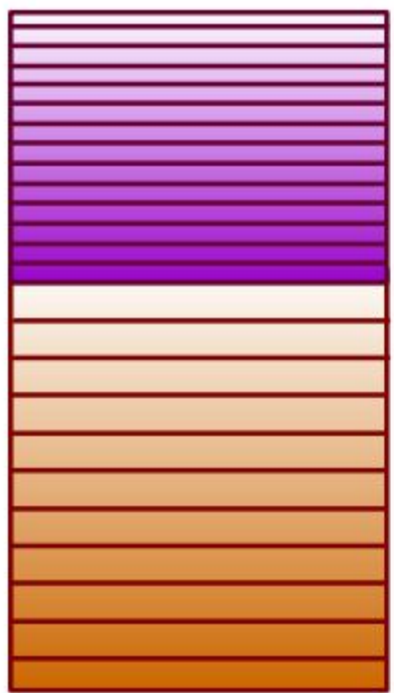
- Ширина запрещенной зоны не зависит от размеров кристалла, а определяется природой атомов, образующих материал, и симметрией кристаллической решетки
- Расщеплению в зону подвержены как нормальные (стационарные), так и возбужденные электронные уровни
- При перемещении вверх по энергетической шкале ширина разрешенных зон возрастает, а запрещенных – уменьшается
- Количество уровней в зоне определяется числом атомов в кристалле
- Ширина запрещенной зоны зависит от температуры по причине изменения:
  - амплитуды колебаний узлов КР (температура  $\uparrow$   $\rightarrow$  степень взаимодействия атомов  $\uparrow$   $\rightarrow$  расщепление энергетических уровней  $\uparrow$   $\rightarrow$  ширина запрещенной зоны  $\downarrow$ );
  - объема тела, т.е. межуатомного расстояния



Основной параметр, влияющий на электропроводность

- Ge  $\Delta W = 0.67$  эВ
- Si  $\Delta W = 1.12$  эВ
- GaAs  $\Delta W = 1.43$  эВ
- SiC  $\Delta W = 2,4 - 3,4$  эВ

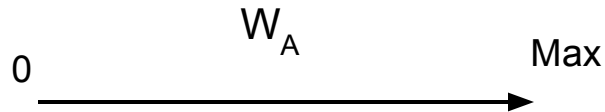
NaCl  $\Delta W \approx 6$  эВ



## ВЫВОДЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

- ❑ Электрические свойства любого вещества определяются условиями взаимодействия и расстояниями между его атомами и не являются особенностью данного атома
- ❑ Примеси и дефекты структуры создают особые энергетические уровни, которые располагаются в запрещенной зоне идеального кристалла
- ❑ Энергия возбуждения носителей заряда (энергия активации электропроводности) равна 0 у металлов и непрерывно возрастает в ряду полупроводников, а затем диэлектриков:

Металлы высокой  
проводимости



Хорошо изолирующие  
диэлектрики

# ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

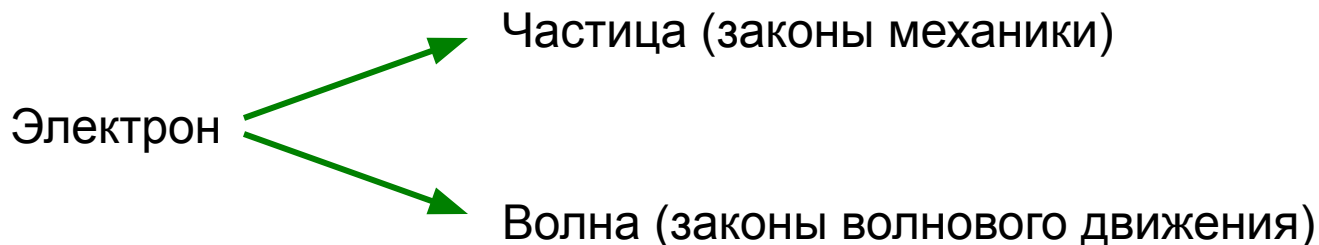
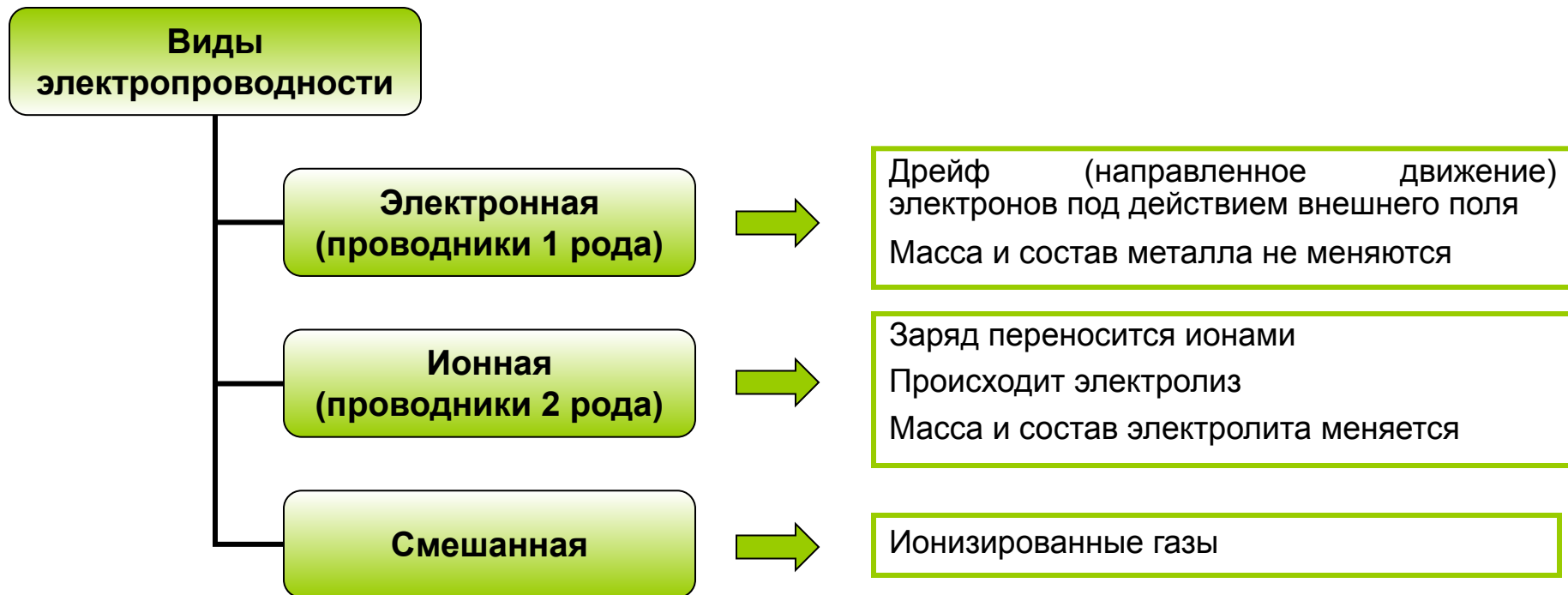


## РАЗДЕЛ 1

# КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ



# ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ



## Электрон - частица

$$F = q \cdot E$$

$$J = q \cdot N \cdot v_{\text{э}}$$

$$v_{\text{э}} = \mu \cdot E$$

$$J = q \cdot N \cdot \mu \cdot E = \gamma \cdot E = E / \rho$$

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{метр} \text{ (мкОм} \cdot \text{м)}$$

$$[\gamma] = \text{См/м} \text{ (МСм/м)}$$

$E$  – внешнее поле

$F$  – сила, действующая на частицу - носитель заряда

$q$  – заряд частицы

$J$  – плотность тока

$N$  – концентрация носителей заряда

$\mu$  – подвижность носителя

$v_{\text{э}}$  – средняя скорость упорядоченного движения

$$\rho = 0,016 \dots 10 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

**Длина свободного пробега  $\lambda$**  – среднее расстояние, проходимое электронами между двумя столкновениями с узлами КР

**Время свободного пробега  $\tau$**  – средний промежуток времени между двумя столкновениями

$$\tau = \frac{\lambda}{v_{\text{T}}}$$

где  $v_{\text{T}}$  — средняя скорость теплового движения свободных электронов в металле.

При  $T = 300 \text{ К}$  средняя скорость  $v_{\text{T}} = 10^5 \text{ м/с} = 100 \text{ км/с}$ .



Ускорение во внешнем поле

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

Максимальная скорость в конце свободного пробега

$$v_{\text{макс}} = a\tau = \frac{eE}{m}\tau$$

Средняя скорость направленного движения электрона

$$v = \frac{v_{\text{макс}} + 0}{2} = \frac{v_{\text{макс}}}{2} = \frac{eE}{2m}\tau = \frac{e\lambda}{2m\nu_{\tau}}E$$

Плотность тока

$$J = env = \frac{e^2 n \lambda}{2m\nu_{\tau}} E = \gamma E = \frac{E}{\rho}$$

Удельная электрическая проводимость

$$\gamma = \frac{e^2 n \lambda}{2m\nu_{\tau}}$$

Удельное электрическое сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{2m\nu_{\tau}}{e^2 n \lambda}$$

## Электрон - частица

Движение электронов в металле – распространение **электромагнитной волны** в твердом теле; сопротивление – следствие рассеяния волны на тепловые колебания КР

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{h}{e^2 n^{\frac{2}{3}} \lambda}$$

Концентрация свободных электронов

$$n = d \frac{N_A}{A}$$

Мощность удельных потерь

$$p = \gamma E^2 = \frac{E^2}{\rho}$$

# ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

## Температура

Температурный коэффициент любого параметра  $Z$  – это логарифмическая производная этого параметра по температуре:

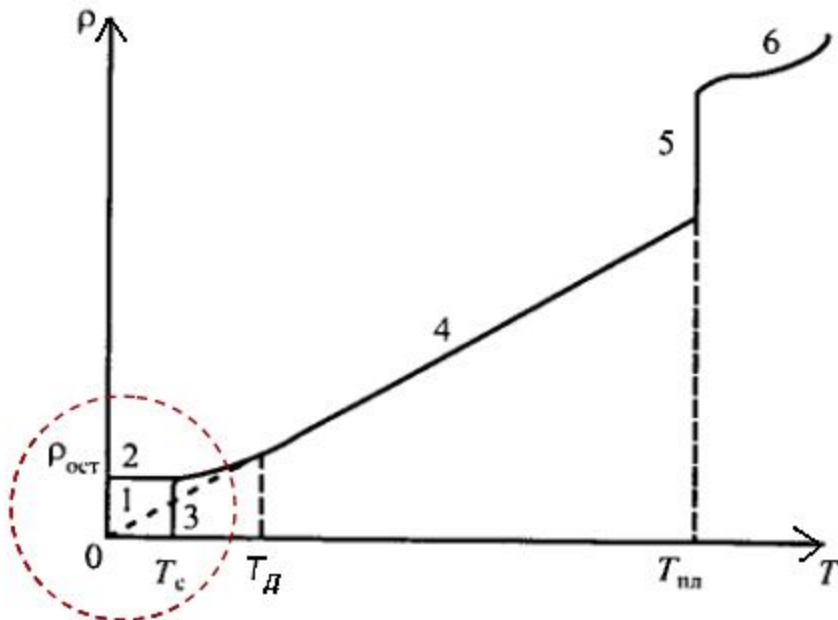
$$TK_{\rho} = \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho - \rho_0}{T - T_0}$$

$$\hat{O}E_z = \frac{\partial}{\partial T} \ln Z = \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial T}$$

$$Z > 0, \quad TK_z > 0$$

$$[1/\text{град}] \rightarrow \text{K}^{-1} \text{ или } (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T)$$



$\rho_{\text{ост}}$  – остаточное удельное сопротивление  
 $T_c$  – температура перехода в сверхпроводящее состояние

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления

$T_D$  – температура Дебая

Ветви 5, 6 – для всех металлов, кроме Vi, Ga

# Деформация

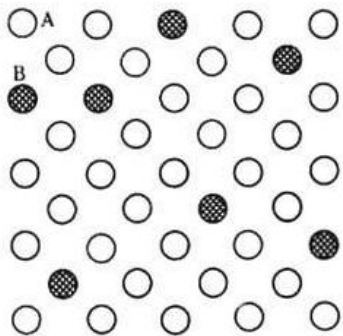
Для упругой деформации  $\rho = \rho_0 (1 \pm \hat{E}_\sigma \sigma)$

$K_T$  – коэффициент тензочувствительности

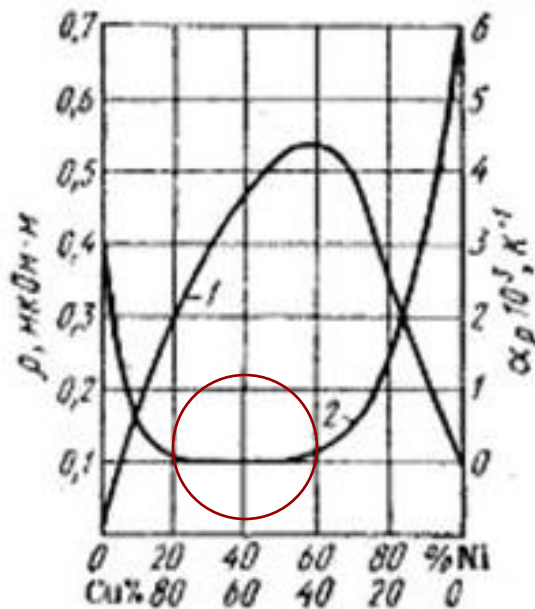
Неупругая деформация – как правило,  $\rho$  незначительно возрастает из-за искажений КР

## УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

Твердый раствор



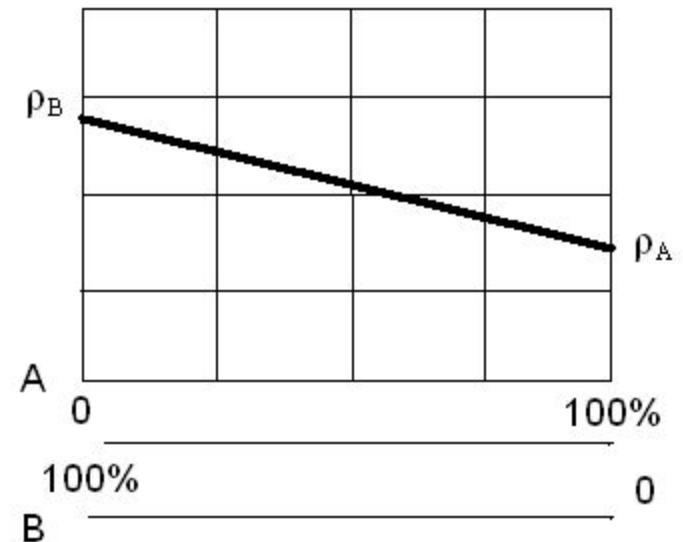
Сопротивление тем больше, чем больше разница в валентности и размерах атомов



$$\mu \downarrow \leftrightarrow N \uparrow$$

Раздельная кристаллизация (механическая смесь)

$$\rho_{\text{мех}} = \rho_A \tilde{N}_A + \rho_B \tilde{N}_B$$



# Теплоемкость и теплопроводность проводников

**Теплоемкость**  $C$  (способность вещества поглощать теплоту при нагреве) – количество тепловой энергии, поглощаемой телом при нагреве на 1 К без изменения фазового состояния

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad [C] = \text{Дж/К}$$

Отношение теплоемкости к массе тела – **удельная теплоемкость**

$$c = \frac{C}{m} \quad [c] = \text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{кг})$$

**Теплопроводность** – перенос тепловой энергии  $Q$  в неравномерно нагретой среде

Закон Фурье

$$q = -\lambda_T \text{grad } T$$

Плотность  
теплового  
потока

$$q = \frac{dQ}{dS \cdot dt}$$

Градиент  
температуры

$$\text{grad } T = \frac{dT}{dx}$$

$[\lambda_T] = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  – количество теплоты, протекающее за 1 секунду через 1 м<sup>2</sup> стенки толщиной 1 м, если градиент температуры  $\Delta T = 1^\circ \text{C}$

Закон Видемана – Франца – Лоренца:

$$\lambda_T / \gamma = L_0 T$$

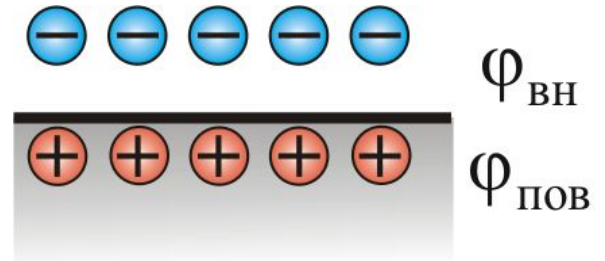
Исключение: Mn, Be

# ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ТермоЭДС)

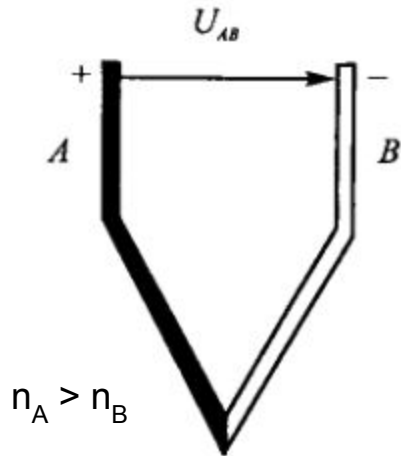
Двойной электрический слой → потенциальный барьер

**Работа выхода электрона** – работа по преодолению потенциального барьера на границе металл – вакуум

$$A_{\text{вых}} = e\phi$$

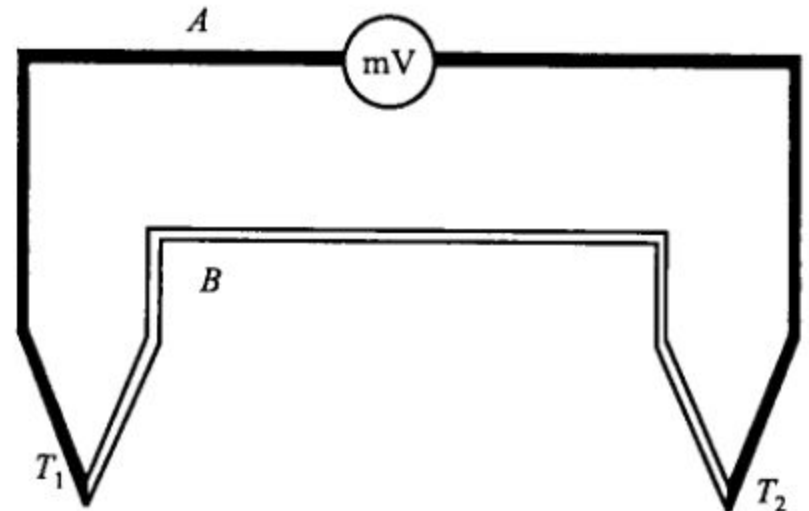


$\phi = \phi_{\text{ВН}} - \phi_{\text{ПОВ}}$  – разность потенциалов двойного электрического слоя

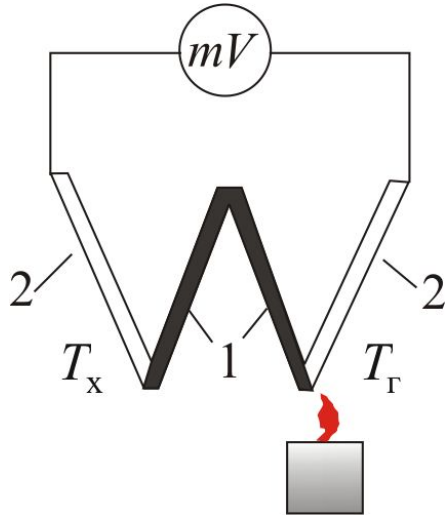


$$e_{AB} = u_{AB} = U_A - U_B + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right)$$

$$\begin{aligned} \sum e &= e_{AB} + e_{BA} = u_{AB} + u_{BA} = U_A - U_B + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) + \\ &+ U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right) = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) - \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) = 0 \end{aligned}$$



## Эффект Зеебека



$$E = \alpha(T_r - T_x)$$

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

$$\begin{aligned} e_T &= e_{AB} + e_{BA} = u_{AB} + u_{BA} = U_A - U_B + \frac{kT_1}{e} \ln \left( \frac{n_A}{n_B} \right) + \\ &+ U_B - U_A + \frac{kT_2}{e} \ln \left( \frac{n_B}{n_A} \right) = \frac{kT_1}{e} \ln \left( \frac{n_A}{n_B} \right) - \frac{kT_2}{e} \ln \left( \frac{n_A}{n_B} \right) = \\ &= \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \left( \frac{n_A}{n_B} \right) = c_T (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

$$c_T = \frac{k}{e} \ln \left( \frac{n_A}{n_B} \right) \longrightarrow \alpha - \text{удельная термоЭДС}$$

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

Предел прочности на растяжение  $\sigma_p$ , МПа

Относительное удлинение при разрыве  $\Delta l/l$ , %

Температурный коэффициент линейного расширения (удлинения),  $K^{-1}$

$$\frac{\partial \hat{E}_l}{\partial T} = \alpha_l = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}$$

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

Предел прочности на растяжение  $\sigma_p$ , МПа

Относительное удлинение при разрыве  $\Delta l/l$ , %

Температурный коэффициент линейного расширения (удлинения),  $K^{-1}$   $\hat{\alpha}_l = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}$

## МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Вещества с  $\rho \leq 0,05$  мкОм\*м (медь, алюминий, железо, некоторые сплавы)

### МЕДЬ

III место в мире по производству и потреблению

#### Преимущества:

- Малое удельное сопротивление;
- Механическая прочность;
- Стойкость к коррозии;
- Хорошая обрабатываемость (0,00X мм);
- Легкость пайки и сварки

$\rho = 0,0172$  мкОм\*м  
 $TK_\rho = 0,00426$  1/°C  
 $TЭДС_{Pt} = 0,76$  мВ/град  
 $T_{\text{плав}} = 1083$  °C

#### Марки меди

M1 99,9% примесь  $O_2 \leq 0,08\%$

M0 99,95% примесь  $O_2 \leq 0,02\%$

# Получение меди

Плавление сульфидных руд

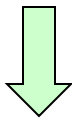
Электролитическая очистка (катодные пластины)

Перековка в болванки (80 – 90 кг)

Горячая прокатка (катанка диаметром 6,5 – 7,2 мм)

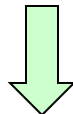
Травление в слабом растворе серной кислоты

Холодное протягивание до необходимого диаметра (0,03 – 0,02 мм)



Твердая (твердотянутая) медь МТ  
 $\rho = 0,0178 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p \approx 400 \text{ МПа}$   
Твердость, упругость, пружинистость

Отжиг (нагрев до  $\approx 800 \text{ }^\circ\text{C}$  без доступа кислорода с последующим охлаждением)



Мягкая (отожженная) медь ММ  
 $\rho = 0,0175 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\sigma_p \leq 200 \text{ МПа}$   
Пластичность



## Использование меди

МТ



Контактные провода, шины распределительных устройств (высокая механическая прочность, твердость, сопротивление истиранию)

ММ



Провода, жилы кабелей (высокая проводимость, пластичность)

Влияние примесей на удельную проводимость количественное и качественное: 1% Ag, Cd уменьшает  $\rho$   $\approx$  на 10%; 1% Be -  $\approx$  на 70%

## Сплавы на основе меди

Cu + Zn  $\rightarrow$  латунь (большое значение  $\Delta l/l$  при большом значении  $\sigma_p$  дает преимущества при производстве деталей штамповкой)

Cu + Sn, Si, P, Be, Cr, Mg, Cd  $\rightarrow$  бронза (увеличивается механическая прочность до  $\sigma_p = 800 - 1350$  МПа и упругость; токоподводящие пружины, контактные провода, коллекторные пластины)

Маркировка: БрО10 – 10% олова; БрА7 – 6 – 8% алюминия

Проводимость сплавов – 10 – 30% от значения для чистой меди

# Алюминий

## Преимущества:

- Коррозионная стойкость
- Малый удельный вес (в 3,5 раза легче меди)

## Недостатки:

- Образование на воздухе оксидной пленки с большим сопротивлением
- Трудность пайки
- Гальваническая коррозия в паре с медью во влажной среде

## Марки алюминия

- A1 ≤ 0,5% электротехнические цели
- AB00 ≤ 0,03% фольга, обкладки конденсаторов, электроды
- AB0000 ≤ 0,004% специальное назначение

$$\rho = 0,0265 \text{ мкОм*м}$$

$$TK_{\rho} = 0,0041 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$$

$$\sigma_{\rho} = 80 - 160 \text{ МПа}$$

$$T_{\text{плав}} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

**Сплавы алюминия** (увеличение механической прочности)

**Альдрей** (Mg 0,3-0,5%; Si 0,4-0,7%; Fe 0,2-0,3%)

$$\rho = 0,0317 \text{ мкОм*м } \sigma_{\rho} = 80 - 160 \text{ МПа}$$

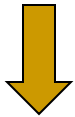
Сталеалюминиевый провод

# Железо

**Особенность** – удельное сопротивление на постоянном и переменном токе различное

**Недостаток** – малая коррозионная стойкость

**Проводниковый биметалл** – сталь, покрытая снаружи слоем меди



**Горячий способ:** стальную болванку помещают в форму, промежуток заливают расплавленной медью, затем прокатывают и протягивают



**Холодный (электролитический) способ:** стальная проволока пропускается через ванну с медным купоросом → более равномерное покрытие, но более дорогое и менее прочное сцепление

$$\rho = 0,1 \text{ мкОм*м}$$

$$\sigma_p = 700 - 750 \text{ МПа}$$

(мягкая сталь)

$$\Delta l/l = 5 - 8\%$$

# ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

Температура плавления выше 1700 °C (W, Mo, Ta, Nb, Cr, V, Ti)

## Вольфрам

Руда → вольфрамовая кислота  $H_2WO_4$

Нагрев до 900 °C (водород испаряется, W остается в виде мелкого порошка  $WO_3$ )

Прессовка в стержни под давлением 200 МПа

Термическая обработка в атмосфере водорода

Ковка

Волочение (проволока диаметром до 0,01 мм)

Руды:

Вольфрамит  
( $FeWO_4$ ,  $MnWO_4$ )

Шеелит  $CaWO_4$

$\rho = 0,055 \text{ мкОм*м}$

$\Delta l/l = 4\%$

$\sigma_p = 550 - 3500 \text{ МПа}$

$T_{\text{плав}} = 3380 \text{ °C}$

**Особенность:** чем тоньше, тем крепче

Стержни  $d = 5 \text{ мм}$   $\sigma_p = 500 - 600 \text{ МПа}$

Проволока  $d = 0,05 \text{ мм}$   $\sigma_p = 3000 - 4000 \text{ МПа}$

(зернистое строение → волокнистое строение)

## Использование вольфрама:

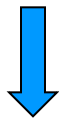
- ❑ нити накаливания до 2000 °С (в атмосфере инертного газа);
- ❑ вакуумплотные термосогласованные вводы в тугоплавкое стекло;
- ❑ контакты на большие токи

### Вольфрамовые контакты



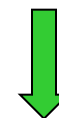
#### Достоинства

- ❑ Устойчивость в работе
- ❑ Малый механический износ
- ❑ Малая подверженность механической эрозии
- ❑ Способность противостоять действию электрической дуги и отсутствие привариваемости



#### Недостатки

- ❑ Трудная обрабатываемость
- ❑ Образование оксидных пленок в атмосферных условиях
- ❑ Необходимость больших прижимных усилий для обеспечения малого переходного сопротивления



#### Изготовление (металлокерамика)

- ❑ Прессовка вольфрамового порошка под высоким давлением
- ❑ Спекание в атмосфере водорода (прочная, но пористая основа)
- ❑ Пропитка расплавленным серебром или медью для уменьшения  $\rho$

## Молибден

### Особенности:

- ❑ Механическая прочность очень сильно зависит от механической обработки, вида изделия, диаметра стержней и проволоки, термообработки
- ❑ Очень чувствителен к примесям даже порядка  $10^{-3} - 10^{-4} \%$

$$\rho = 0,057 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 2 - 55 \%$$

$$\sigma_p = 350 - 2500 \text{ МПа}$$

$$T_{\text{плав}} = 2620 \text{ }^\circ\text{C}$$

# БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ (Ag, Au, Pt, Pd)

## Серебро

**Достоинства** – коррозионная стойкость

**Недостатки** – большая подвижность, что приводит к миграции внутрь диэлектрика, на который нанесено серебро, при высоких температуре и влажности

**Применение** – контакты на маленькие токи, обкладки в слюдяных и керамических конденсаторах, в качестве компонента твердых припоев, в аккумуляторах

Один из наиболее дефицитных материалов

$$\rho = 0,0168 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 50 \%$$

$$\sigma_p \approx 200 \text{ МПа}$$

## Золото

**Достоинства** – коррозионная стойкость, отсутствие взаимодействия с кислотами и щелочами, за исключением «царской водки», высокая пластичность (можно делать фольгу толщиной до 0,01 мкм)

**Недостатки** – невысокая прочность

**Применение** – контакты на маленькие токи, электроды фотоэлементов, фоторезисторов и полупроводниковых приборов

$$\rho = 0,024 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 40 \%$$

$$\sigma_p \approx 150 \text{ МПа}$$

## Платина

**Достоинства** – наибольшая химическая стойкость, легкость обработки

**Недостатки** – высокая стоимость

**Применение** – термопары и терморезисторы на высокие температуры (до 1600 °С), контактные сплавы, гермовводы в стекло, особо тонкие нити (диаметр  $\approx 1$  мкм) для подвесок подвижных систем в электрометрах (получают многократным волочением биметаллической проволоки Pt – Ag с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте)

$$\rho = 0,105 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 30 - 35\%$$

$$\sigma_p \approx 150 \text{ МПа}$$

$$T_{\text{плав}} = 1773^{\circ} \text{ C}$$

## КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ МЕТАЛЛЫ (Ni, Pb, Zn, Sn)

### Свинец

**Особенности:** крупнокристаллическое строение; мягкий, пластичный

**Достоинства** – высокая коррозионная стойкость, легкость обработки (холодная прокатка фольги), поглощение X-лучей

**Недостатки** – малопрочный, ядовитый

**Применение** – кабельные оболочки, плавкие предохранители, аккумуляторные пластины

$$\rho = 0,19 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l > 55\%$$

$$\sigma_p \approx 15 \text{ МПа}$$

$$T_{\text{плав}} = 327^{\circ} \text{ C}$$

## Олово

**Особенности:** ярко выраженное крупнокристаллическое строение: мягкий, пластичный, тягучий Существует в 3 модификациях: белое олово (тетрагональная КР) при нормальной температуре, серое олово (порошкообразное) при температуре  $< 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , хрупкое ромбическое олово ( $t > 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**Достоинства** – коррозионная стойкость (на воздухе не окисляется, вода не действует, разбавленные кислоты очень медленно), легкость обработки (холодная прокатка фольги до 6 мкм)

**Недостатки** – низкая прочность

**Применение** – защитное покрытие металла (лужение), входит в состав бронз и мягких припоев (ПОС), оловянно-свинцовой фольги 20 – 40 мкм для обкладок слюдяных конденсаторов

$$\rho = 0,113 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l > 55\%$$

$$\sigma_p = 16 - 38 \text{ МПа}$$

$$T_{\text{плав}} = 232\text{ }^{\circ}\text{C}$$

## СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

### Общие требования:

- высокое удельное сопротивление  $\rho > 0,3 \text{ мкОм*м}$ ;
- высокая стабильность  $\rho$  во времени;
- низкий ТКС;
- малый коэффициент ТЭДС в паре с медью (для образцовых резисторов);
- высокая рабочая температура (до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  при работе на воздухе);
- возможность изготовления проволоки диаметром в сотые доли мм



# Манганин

**Состав:** Cu  $\approx$  85%; Mn  $\approx$  12%; Ni  $\approx$  3%

Продукция: тонкая проволока ( $d \geq 0,02$  мм) в эмалевой изоляции

Технология производства:

Отжиг в вакууме 1-2 часа при  $t = 550 - 600$  °C  
с последующим медленным охлаждением

Намотка катушек

Дополнительный отжиг при 200 °C

Длительная выдержка (до 1 года)  
при комнатной температуре

**Результат** – стабильное  $\rho$  и низкий  $TK_{\rho}$

$$\rho = 0,42 - 0,48 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 15 - 30\%$$

$$\sigma_{\rho} = 450 - 600 \text{ МПа}$$

$$TK_{\rho} = (6 - 50) * 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$$

$$K_E^{Cu} = 1-2 \text{ мкВ/град}$$

## Использование:

- образцовые резисторы с допустимой температурой нагрева  $\leq 200$  °C;
- датчики высокого гидростатического давления

## Константан

**Состав:** Cu  $\approx$  60%; Ni  $\approx$  40%

Допустимая температура нагрева 450 °С

Использование: реостаты, ТЭНы, термопары на низкие температуры (в паре с медью и железом)

$$\rho = 0,48 - 0,52 \text{ мкОм*м}$$

$$\Delta l/l = 20 - 40\%$$

$$\sigma_p = 400 - 500 \text{ МПа}$$

$$TK_p = (5 - 25) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$K_E^{Cu} = 44 - 55 \text{ мкВ/град}$$

## Сплавы на основе железа

**Fe – Ni – Cr** нихромы/ферронихромы

**Fe – Cr – Al** фехрали/хромали

### Обозначение сплавов

буквы (наиболее характерные элементы сплава)

цифры (примерное содержание элемента в сплаве)

Б – ниобий	Л - бериллий
В – вольфрам	Н - никель
Г – марганец	Т - титан
Д – медь	Х - хром
К – кобальт	Ю - алюминий

Дополнительные цифры в начале обозначения соответствуют повышенному (0) или пониженному (1) качеству сплава

0X25Ю5 – хромаль особо жаростойкий (1400 °С)

1X25Ю5 – хромаль (Cr  $\approx$  25%, Al  $\approx$  5%) (1000 °С)

Свойства нихромов	Свойства хромалей
$\Delta l/l = 25 - 30\%$ $\sigma_p = 650 - 700 \text{ МПа}$ Очень технологичны Выдерживают высокие рабочие температуры Дорогие	$\Delta l/l = 10 - 20\%$ $\sigma_p = 700 - 800 \text{ МПа}$ Более твердые, хрупкие, менее технологичные Имеют больший диаметр, чем нихромы Дешевые

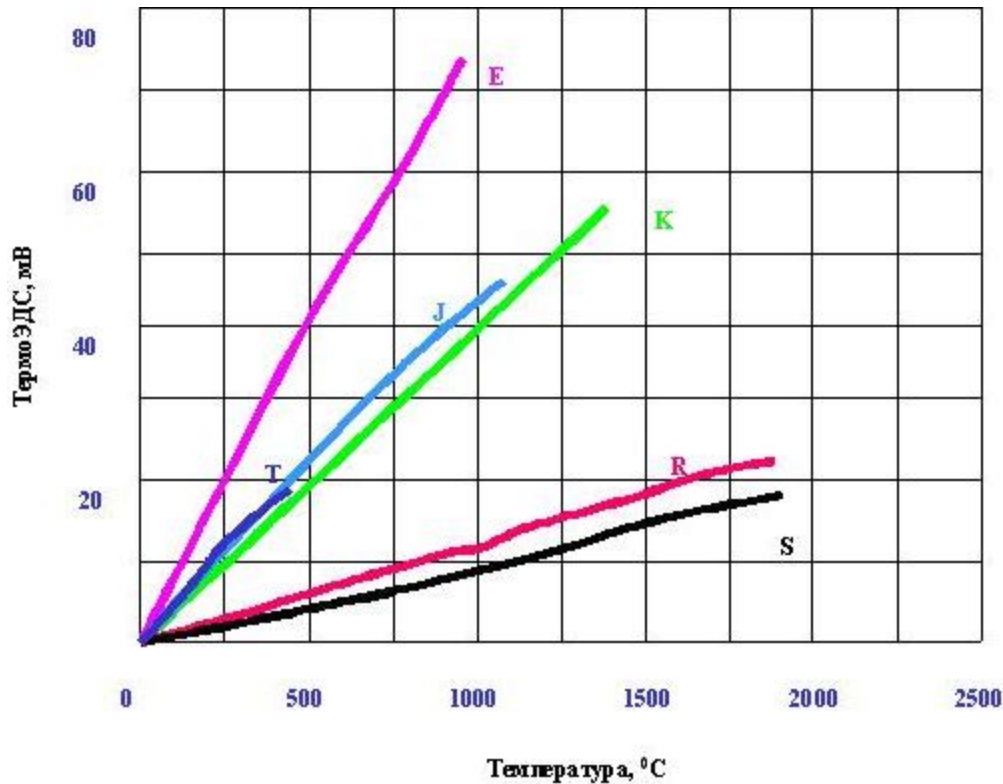
## Изготовление нагревательных элементов

Нихромовая проволока помещается в трубку из стойкого к окислению металла

Промежуток между проволокой и трубкой заполняется порошком диэлектрика с высокой теплопроводностью (например, магнезией  $\text{MgO}$ )

Производится дополнительная протяжка (внешний диаметр уменьшается, порошок уплотняется и образует механически прочную изоляцию внутреннего проводника)

# СПЛАВЫ ДЛЯ ТЕРМОПАР



## Название термопар:

предполагается, что в холодном спае ток идет от первого названного материала ко второму, а в горячем - наоборот

Обоз ANSI	Тип	Материал		Диапазон Т, °C
		+	-	
K	ТХА	хромель Cr - Ni	алюмель Ni - Al	-270 +1300
S R	ТПП	платина-родий	платина	-50 +1768
E	ТХК	хромель Cr - Ni	копель Cu - Ni	-270 +1000
J		железо	константан	-210 +1200
T		медь	константан	-270 +400

# КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Электрический контакт** – место соприкосновения или соединения составных частей электрической цепи, обеспечивающее прохождение между ними электрического тока; приспособление, обеспечивающее такое соединение; поверхность соприкосновения двух проводящих частей

## Контакты

### Скользящие

### Разрывные

Высокая стойкость к истиранию

Не допускается эрозия и приваривание

Твердотянутая медь МТ

Бериллиевая бронза

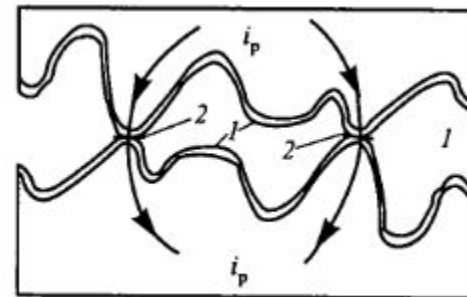
Сплав Ag - CdO

Чистые металлы тугоплавкие

Сплавы  
Металлокерамические композиции

Небольшая мощность Ag - CdO  
Большая мощность Ag + Co, Ni, Cr, W, Mo, Ta;  
Cu + W, Mo;  
Au + W, Mo

Микроструктура электрического контакта



# ПРИПОИ И ФЛЮСЫ

## Припои

Мягкие ( $T_{\text{пл}} \leq 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\sigma_p \leq 50 - 70 \text{ МПа}$ )      Твердые ( $T_{\text{пл}} \geq 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\sigma_p \leq 500 \text{ МПа}$ )

### Мягкие припои

Оловянно-свинцовые ПОС

Содержание олова от 18% (ПОС-18) до 90% (ПОС-90) → чем < олова, тем > температура плавления

$\rho = 0,132 - 0,188 \text{ мкОм*м}$   
 $\text{TK}_1 = (26 - 27) * 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$

**Сплав Вуда**  $T_{\text{плавл}} \approx 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Bi – 50%      Sn – 12,5%  
Pb – 25%      Cd – 12,5%

### Твердые припои

Медно-цинковые ПМЦ

Серебряные ПСр

## Факторы выбора

- Род спаиваемых металлов (сплавов)
- Требуемая механическая прочность
- Коррозионная стойкость
- Удельное сопротивление припоя (при пайке токоведущих частей)

## Припои для электровакуумных элементов

Главное требование -  $\text{TK}_1$  припоя должен соответствовать  $\text{TK}_1$  стекла для получения вакуум-плотного ввода

### Ковар (29НК)

$\rho = 0,49 \text{ мкОм*м}$   
 $\text{TK}_1 = (4,4 - 5,7) * 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$

Ni – 29%  
Co – 17%  
Fe - остальное

# Флюсы

- ❑ Растворение и удаление окислов и загрязнений с поверхности спаиваемых металлов
- ❑ Защита поверхности металла и расплавленного припоя от окисления в процессе пайки
- ❑ Уменьшение поверхностного натяжения расплавленного припоя, улучшение его растекаемости и смачиваемости

