ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

РАЗДАТОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ (Ч. 1)

Доцент кафедры АТПП
Прахова Марина Юрьевна

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

- Введение

Значение материаловедения

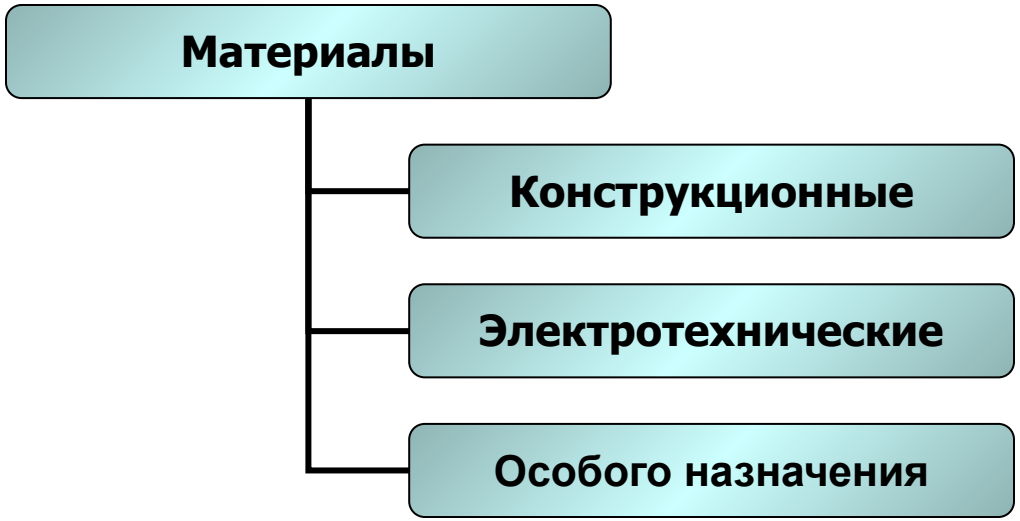
- деление исторических эпох по материалам (каменный, бронзовый, железный век);
- использование материалов: чисто природные → облагороженные → комбинации природных → синтетические;
- для каждой следующей эпохи характерно уменьшение ее длительности и одновременно увеличение количества используемых материалов

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



Электротехнические материалы – обладающие специфическими свойствами в отношении электромагнитного поля

Внешние факторы: термообработка, облучение и т.п.

Внутренние факторы: состав, структура

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

По структуре

Монокристаллы

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

Поликристаллы

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

Аморфные

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

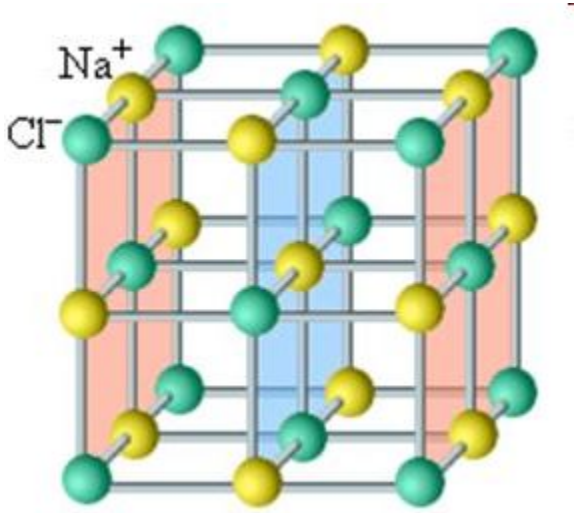
Смешанные

Аморфно-кристаллические: в аморфной структуре есть частичная кристаллизация

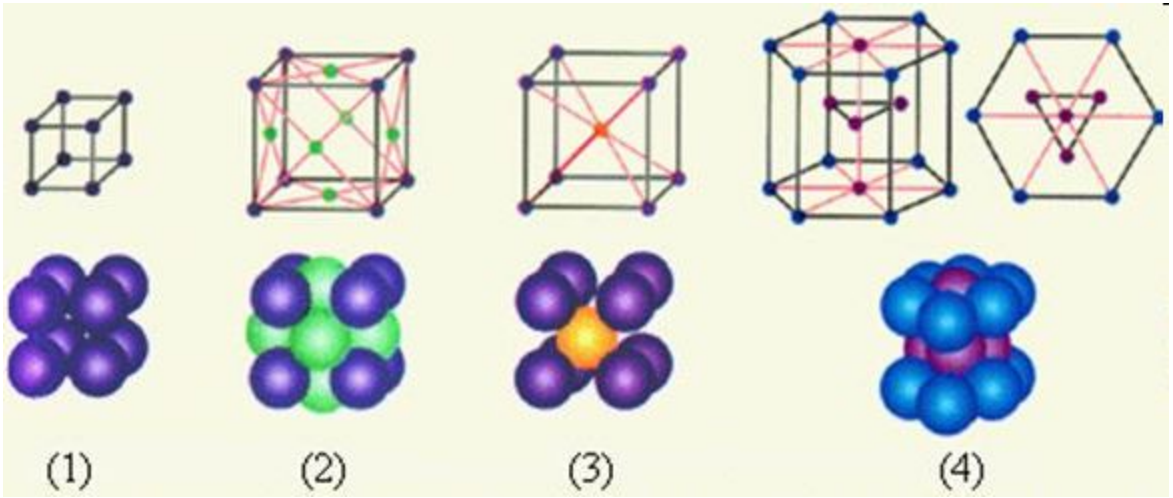
СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

- 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

МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛА

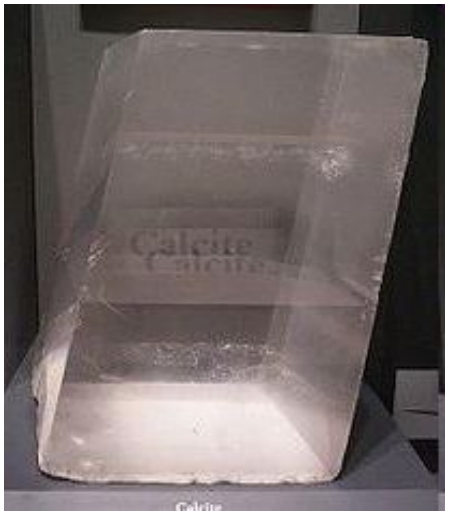


Простейшие кристаллические решетки



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

МОНОКРИСТАЛЛЫ



исландский шпат

топаз

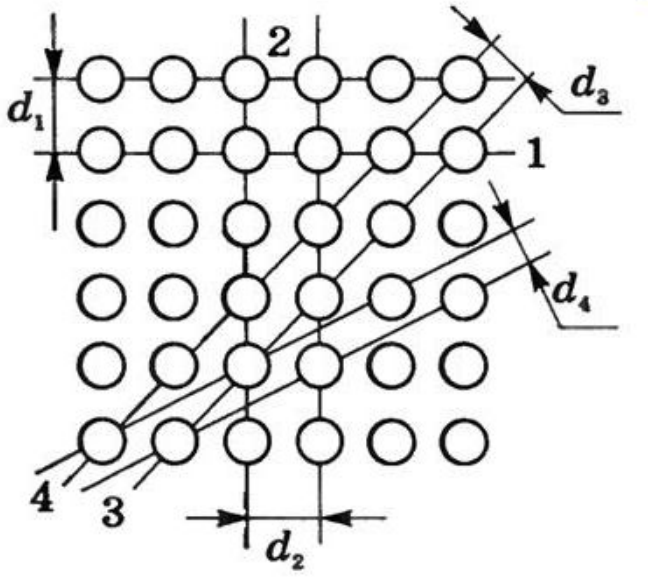
ПОЛИКРИСТАЛЛЫ

каменная соль

кварц

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

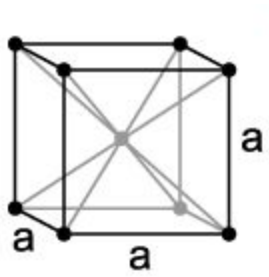
Плоскость кристалла



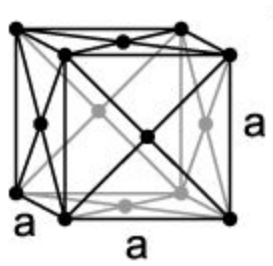
Через узлы этой плоской решетки проведены различно ориентированные параллельные прямые (1, 2, 3, 4). На единицу длины прямых приходится не одинаковое количество атомов.

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)



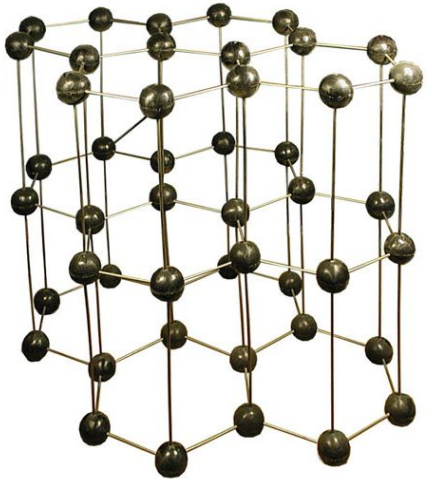
Объемно-центрированный куб



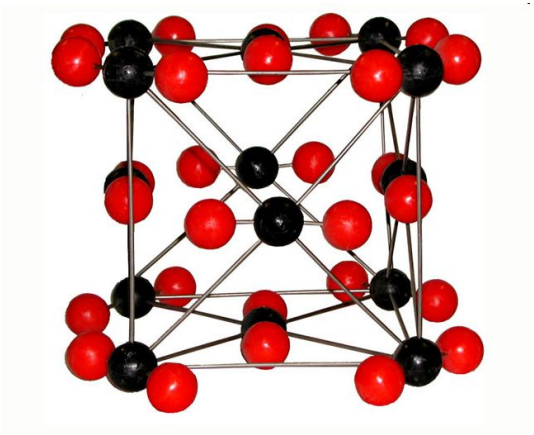
Гране-центрированный куб

Обозначение модификаций: при минимальной температуре – α, затем β, γ и т.д.

Кристаллические решетки углерода



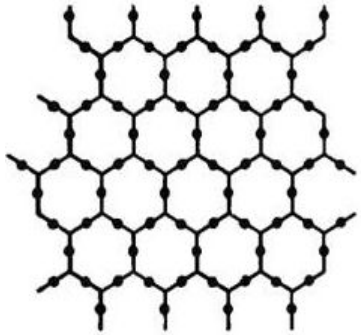
Графит



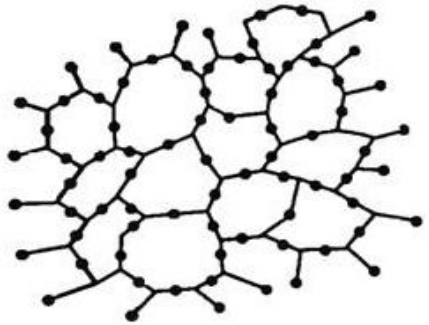
Алмаз

АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Кристаллический кварц

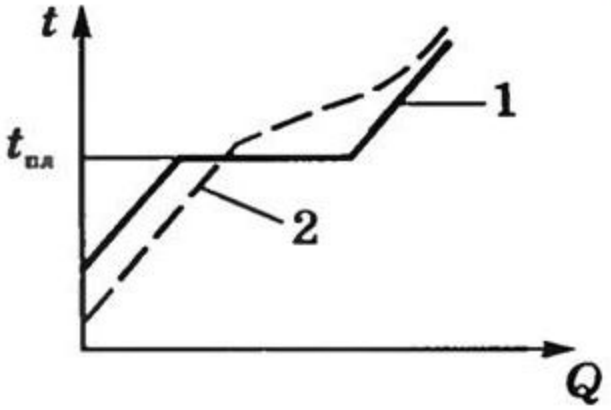


Кварцевое стекло



Обладают одновременно твердостью и текучестью

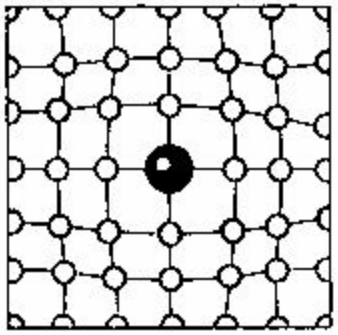
Определенная температура плавления отсутствует



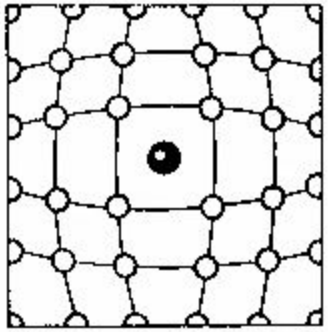
ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ

Точечные дефекты

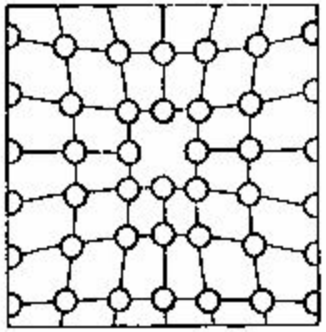
замещение собственного атома чужеродным

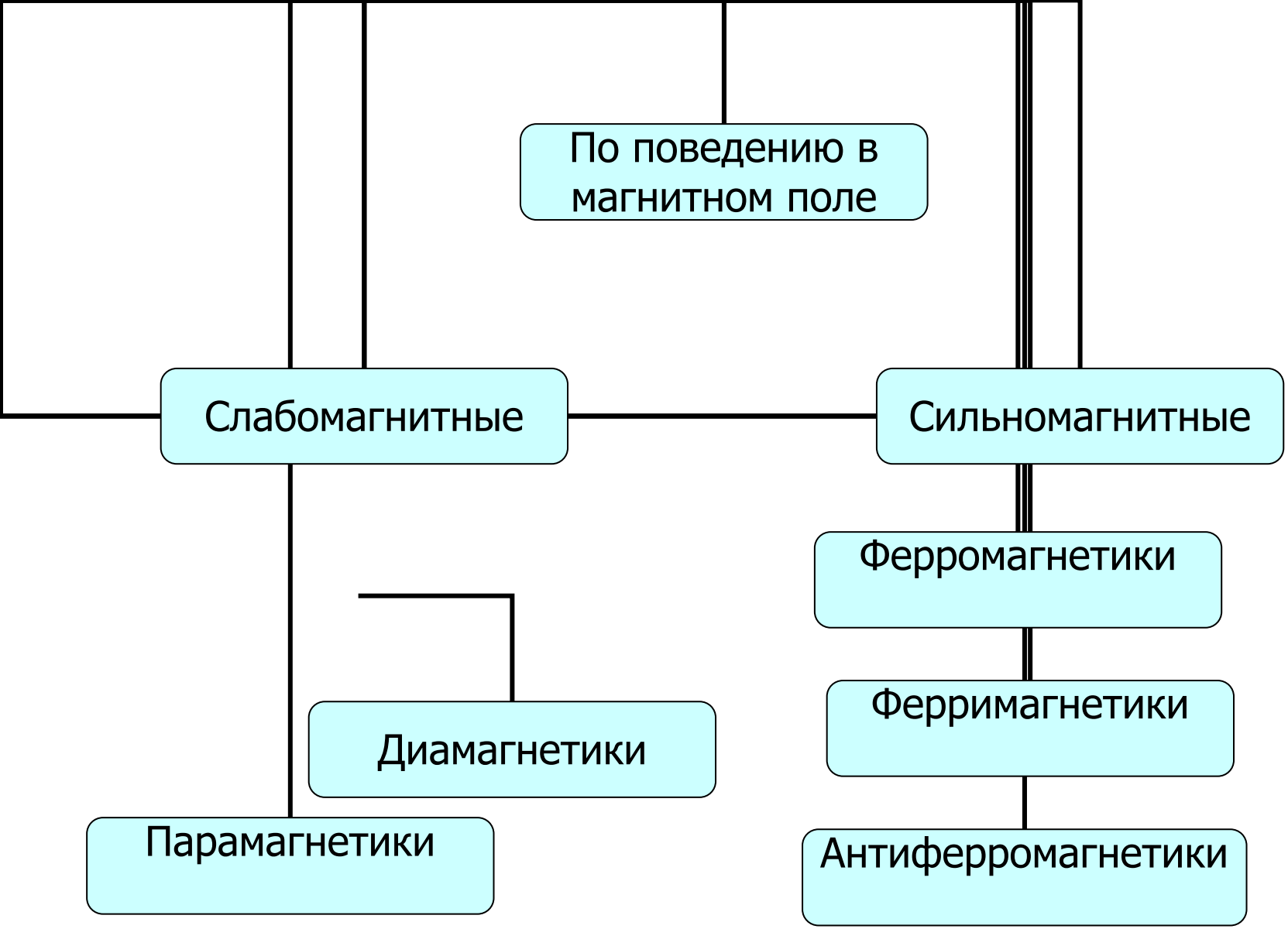


внедрение атома в пространство между узлами решетки



отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решетки

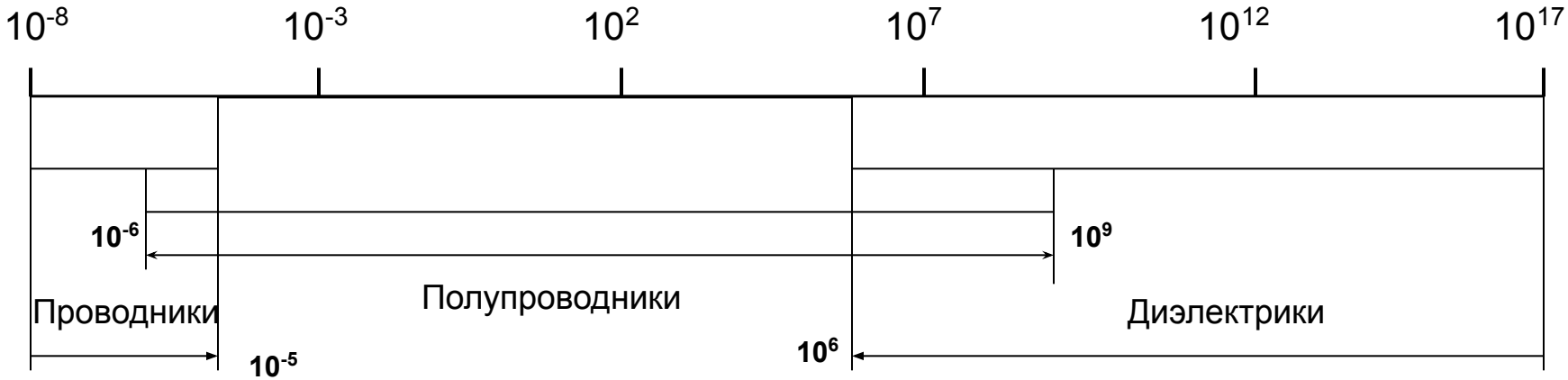



По поведению в магнитном поле
Слабомагнитные
Сильномагнитные
Ферромагнетики
Ферримагнетики
Антиферромагнетики
Диамагнетики
Парамагнетики

Количественная оценка электропроводности: ρ – удельное сопротивление [Ом*м] или γ – удельная электропроводность [См/м]

В общем случае ρ = [0; ∞] (сверхпроводники – разреженные газы)

Для твердых тел ρ = 10^{-8} … 10^{17} Ом*м



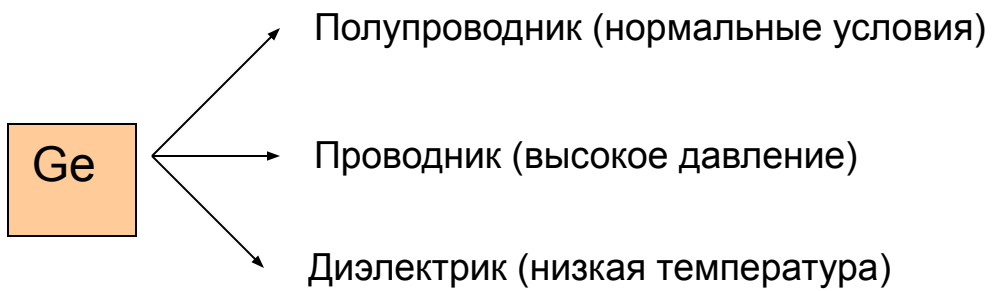
Проводники	Сильно выраженная электропроводность при нормальной температуре
Полупроводники	Активированная проводимость, т.е. сильная зависимость электропроводности от внешних факторов
Диэлектрики	Способность к поляризации и возможность существования в них электростатического поля

Все металлы – проводники, а неметаллы – полупроводники и диэлектрики

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

Удельное сопротивление ρ зависит от:

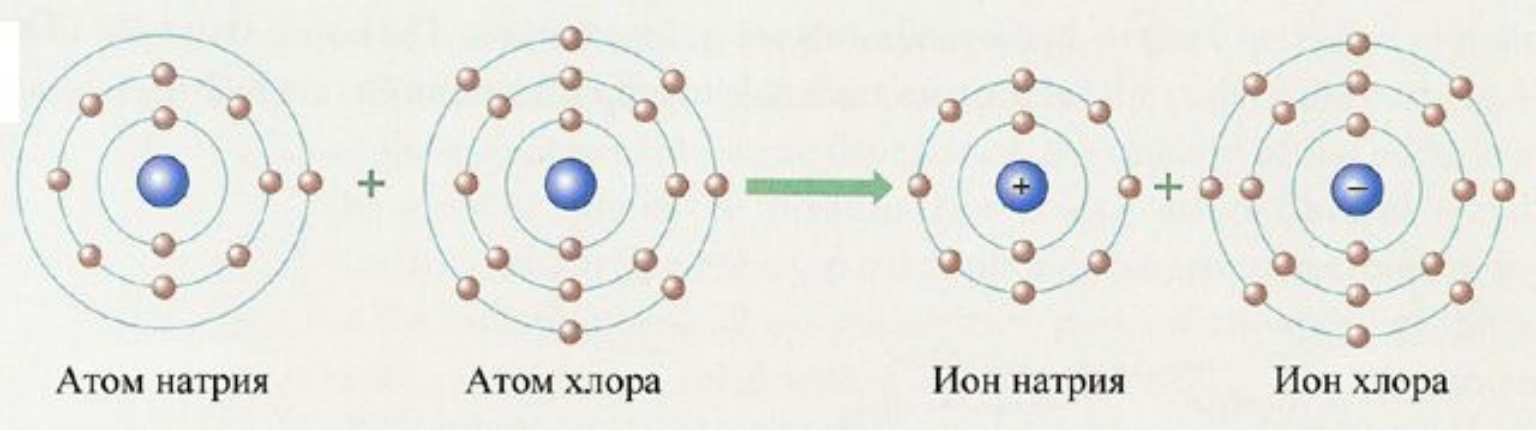
- структуры;
- модификации;
- внешних условий;
- агрегатного состояния



По виду химической связи

- Ионная
- Ковалентная
- Металлическая
- Молекулярная

ИОННАЯ СВЯЗЬ

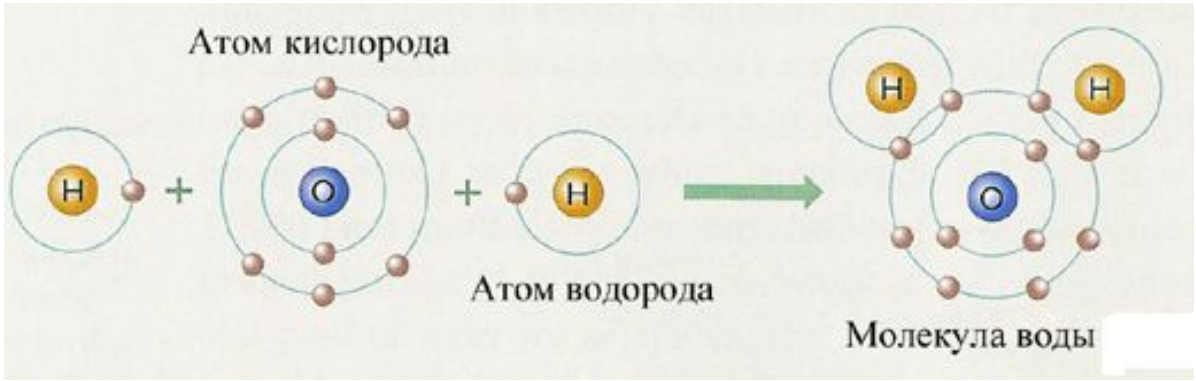


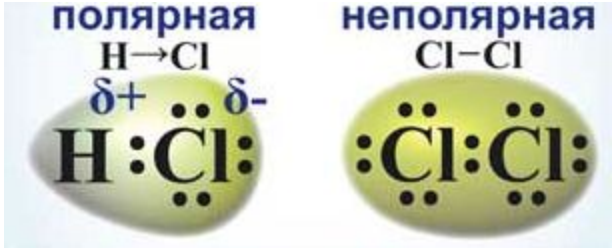
Образуется за счет электростатического притяжения ионов

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

Галоидные соли щелочных металлов – ионные кристаллы типа NaCl

КОВАЛЕНТНАЯ СВЯЗЬ





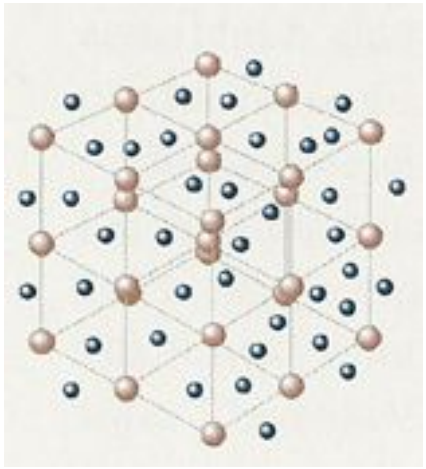
Образуется за счет создания общей пары валентных электронов

Имеет направленный характер, может быть полярной и неполярной

Материалы твердые, но хрупкие, с высокой температурой плавления

Ge, Si, алмаз; двухатомные газы H_2, N_2, O_2; ***молекулы*** многих органических соединений $(C_2H_4)_n$

МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ



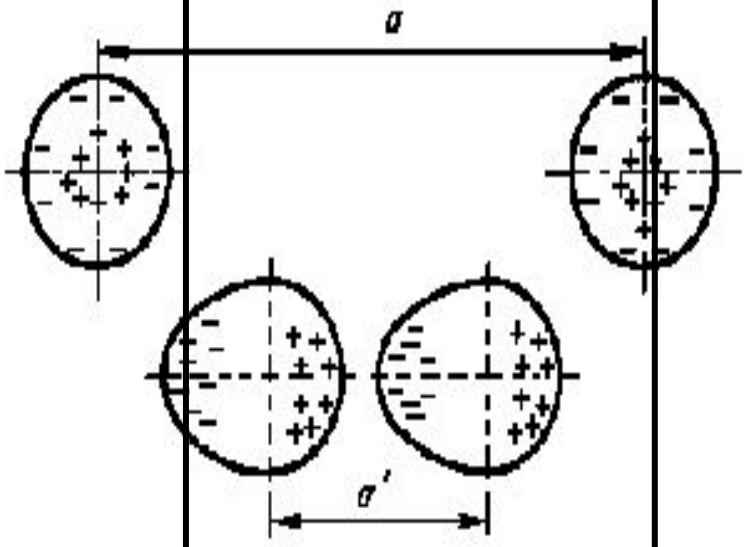
Образуется с помощью свободных коллективизированных электронов

Ненаправленный характер связи → пластичность, высокая тепло- и электропроводность

Отличия от ковалентной:

- в обобществлении электронов участвуют все атомы;
- обобществленные электроны не локализуются 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

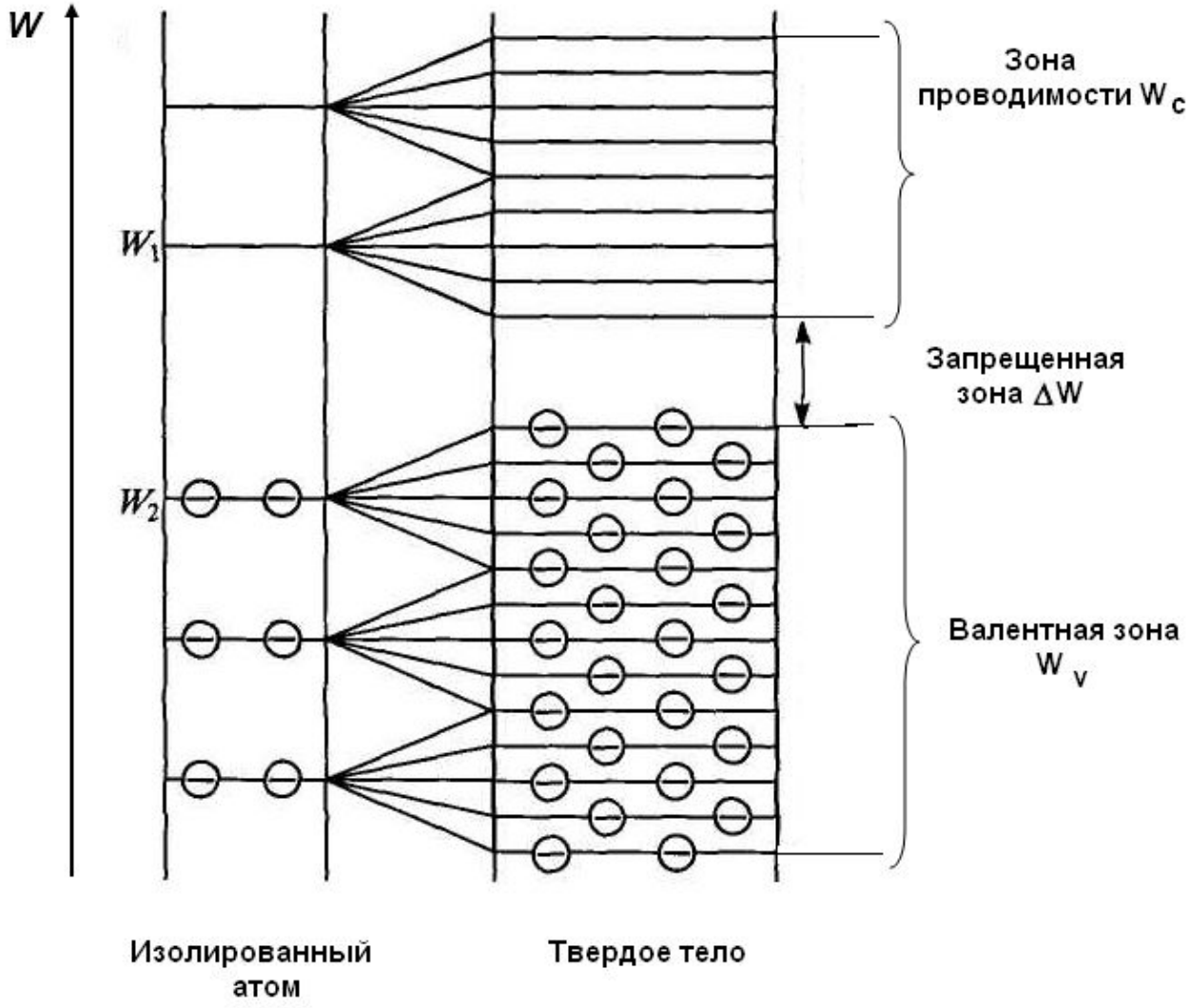
Жидкие

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.

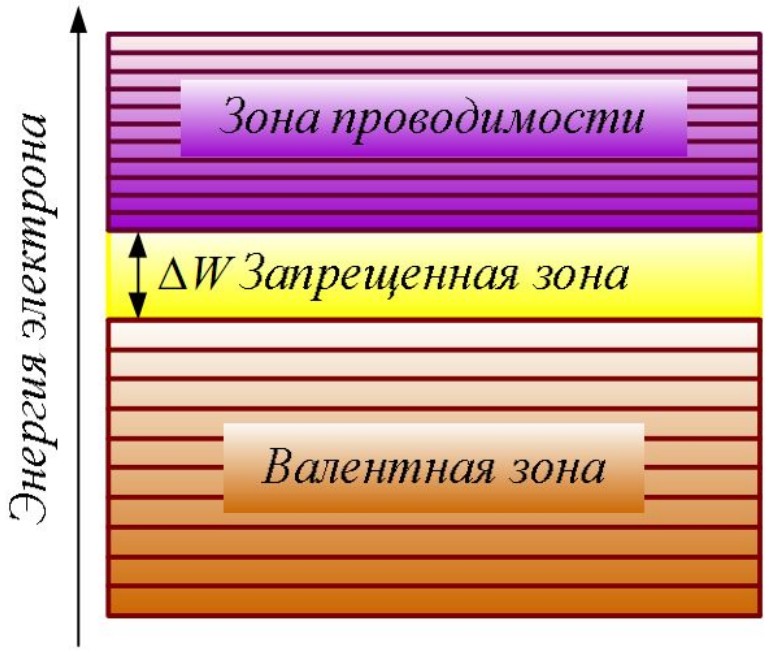


Свойства энергетических зон

- 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 ↑ → степень взаимодействия атомов ↑ → расщепление энергетических уровней ↑ → ширина запрещенной зоны ↓);

  - объема тела, т.е. междуатомного расстояния



Основной параметр, влияющий на электропроводность

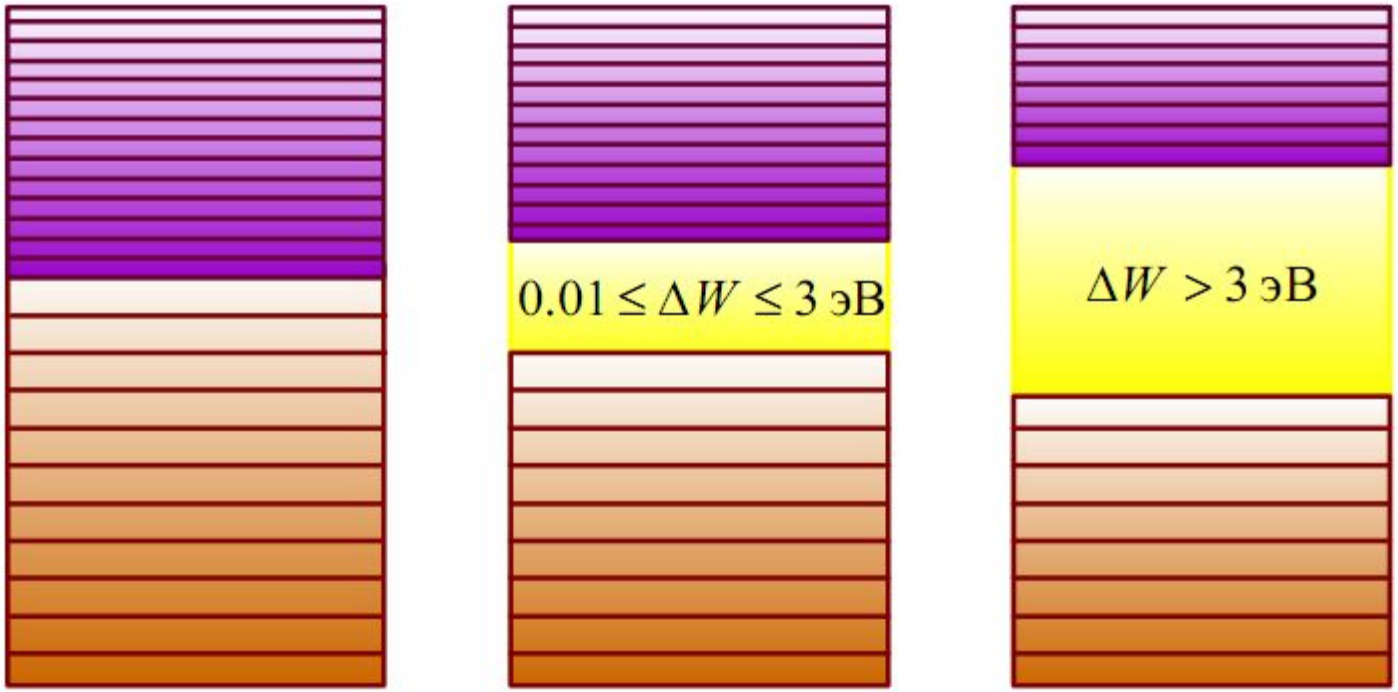
Ge ΔW = 0.67 эВ

Si ΔW = 1.12 эВ

GaAs ΔW = 1.43 эВ

SiC ΔW = 2,4 – 3,4 эВ

NaCl $\Delta W \approx$ 6 эВ



ВЫВОДЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

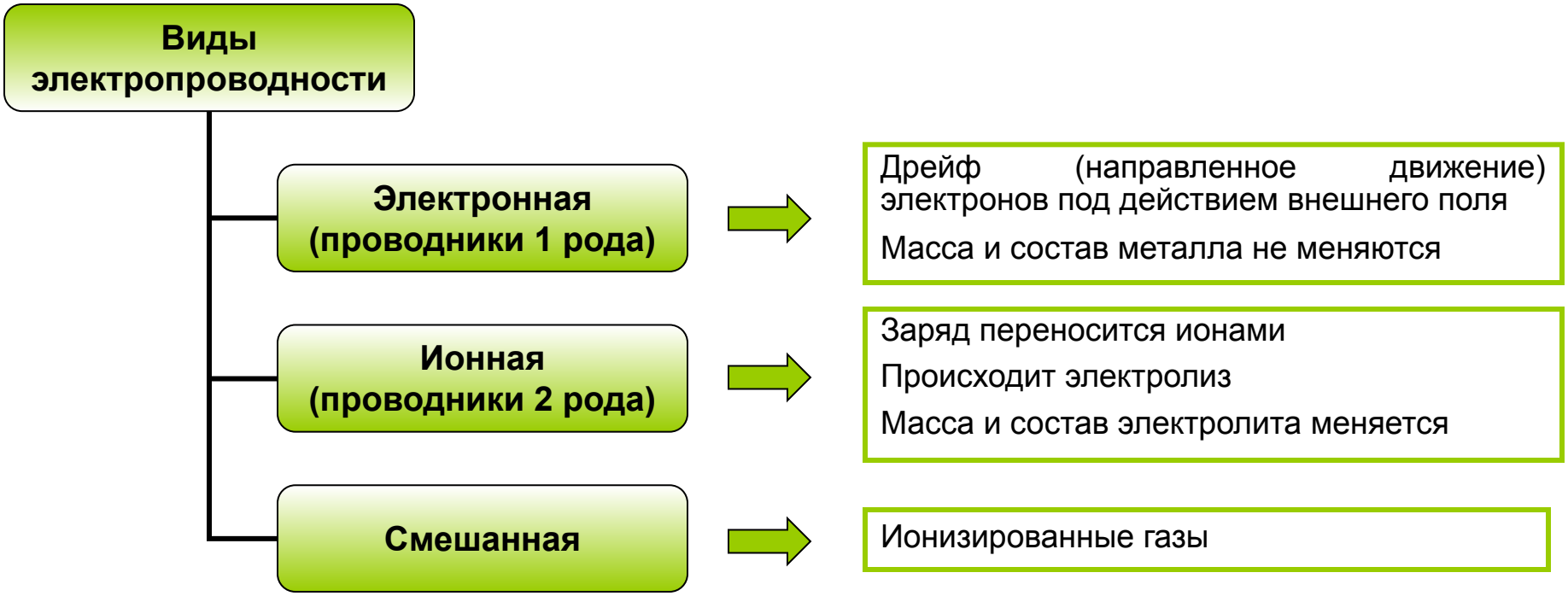
- Электрические свойства любого вещества определяются условиями взаимодействия и расстояниями между его атомами и не являются особенностью данного атома
- Примеси и дефекты структуры создают особые энергетические уровни, которые располагаются в запрещенной зоне идеального кристалла
- Энергия возбуждения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

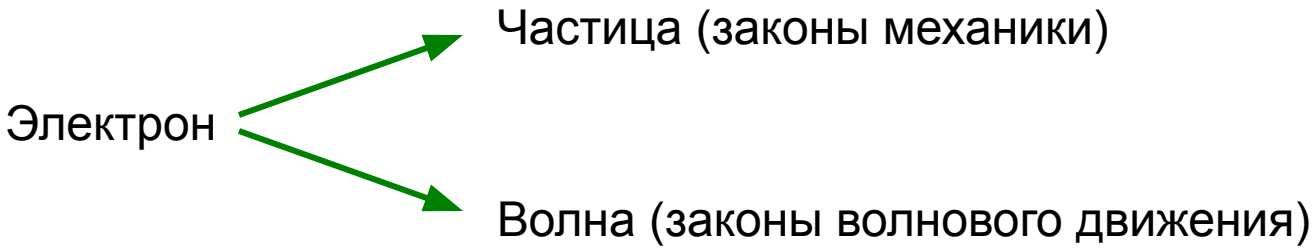
ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

РАЗДЕЛ 1

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ





Электрон - частица

$$F = q*E$$

$$J = q*N*v_э$$

$$V_э = \mu*E$$

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

$[\rho]$ = Ом*метр (мкОм*м)

$[\gamma]$ = См/м (МСм/м)

E – внешнее поле
F – сила, действующая на частицу - носитель заряда
q – заряд частицы
J – плотность тока
N – концентрация носителей заряда
μ – подвижность носителя
$V_э$ – средняя скорость упорядоченного движения

ρ = 0,016 … 10 мкОм*м

Длина свободного пробега λ – среднее расстояние, проходимое электронами между двумя столкновениями с узлами КР

Время свободного пробега τ – средний промежуток времени между двумя столкновениями

$$\tau = \frac{\lambda}{v_т}$$

где $v_т$ — средняя скорость теплового движения свободных электронов в металле.
При $T = 300$ К средняя скорость $v_т = 10^5$ м/с = 100 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

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

Плотность тока

$$J = env = \frac{e^2 n\lambda}{2mv_{\text{т}}}E = \gamma E = \frac{E}{\rho}$$

Удельная электрическая проводимость

$$\gamma = \frac{e^2 n\lambda}{2mv_{\text{т}}}$$

Удельное электрическое сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{2mv_{\text{т}}}{e^2 n\lambda}$$

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 $n = d\frac{N_{\text{A}}}{A}$

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:

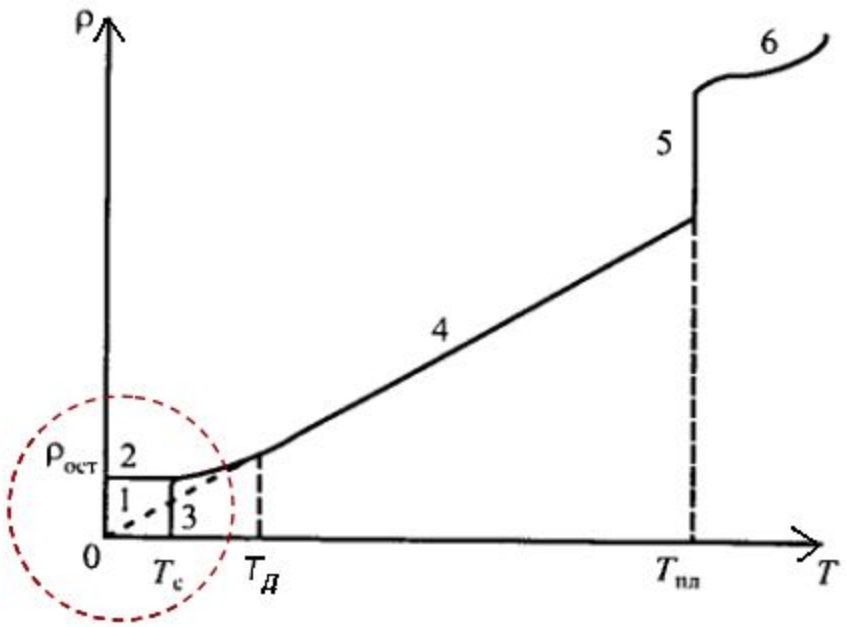
$$TK_\rho = \alpha = \frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T} = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\rho_0}\frac{\rho-\rho_0}{T-T_0}$$

$$\grave{O}\hat{E}_Z = \frac{\partial}{\partial T}\ln Z = \frac{1}{Z}\frac{\partial Z}{\partial T}$$

$Z > 0, \quad TK_Z > 0$

[1/град] → K^{-1} или $(^0C)^{-1}$

$$\rho = \rho_0(1+\alpha\grave{O})$$



$\rho_{ост}$ – остаточное удельное сопротивление

$T_с$ – температура перехода в сверхпроводящее состояние

$T_{пл}$ – температура плавления

$T_Д$ – температура Дебая

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

Деформация

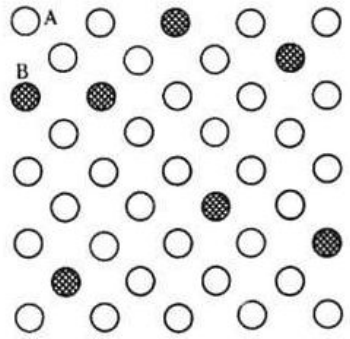
Для упругой деформации $\rho = \rho_0(1 \pm \hat{E}_{\partial}\sigma)$

K_T – коэффициент тензочувствительности

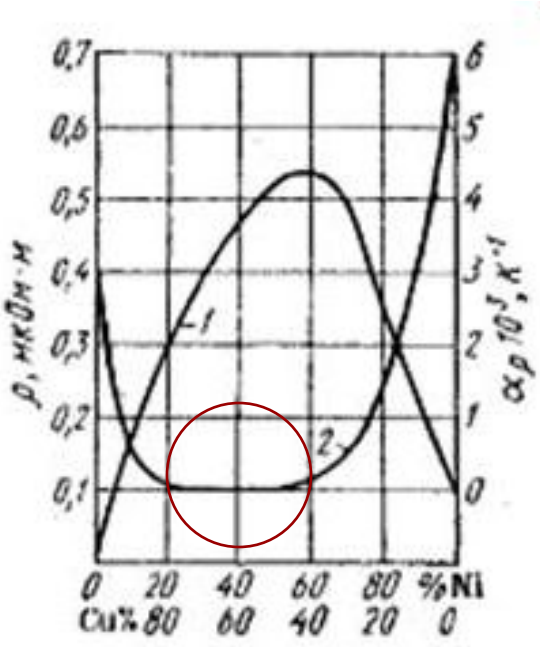
Неупругая деформация – как правило, ρ незначительно возрастает из-за искажений КР

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СПЛАВОВ

Твердый раствор



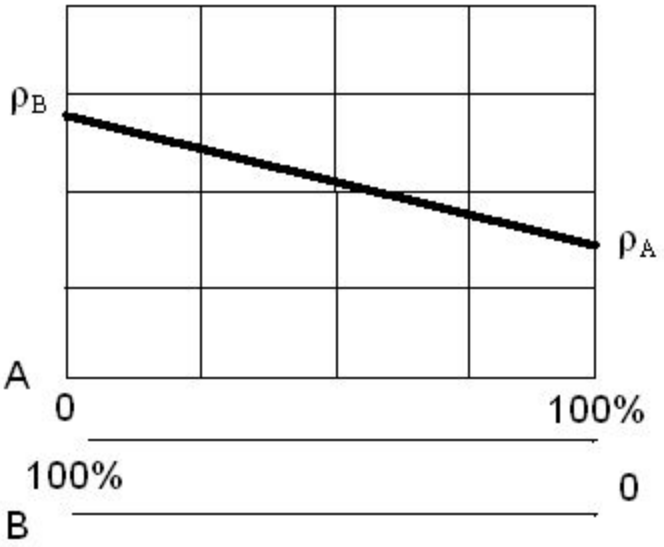
Сопротивление тем больше, чем больше разница в валентности и размерах атомов



μ↓ ↔ N↑

Раздельная кристаллизация (механическая смесь)

$$\rho_{\tilde{n}\tilde{i}\ddot{e}\grave{a}\hat{a}\grave{a}} = \rho_{\grave{A}}\tilde{N}_{\grave{A}} + \rho_{\hat{A}}\tilde{N}_{\hat{A}}$$



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

$$C = \frac{dQ}{dT}$$ [C] = Дж/К

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

$$c = \frac{C}{m}$$ [c] = Дж/(К*кг)

Теплопроводность – перенос тепловой энергии Q в неравномерно нагретой среде

Закон Фурье $q = -\lambda_T \operatorname{grad} T$

$[\lambda_T]$ = Вт/(м*К) – количество теплоты, протекающее за 1 секунду через 1 м^2 стенки толщиной 1 м, если градиент температуры ΔT = 1 ^{0} C

Плотность теплового потока $q = \frac{dQ}{dS \cdot dt}$

Закон Видемана – Франца – Лоренца: $\lambda_T/\gamma = L_0 T$

Градиент температуры $\operatorname{grad} T = \frac{dT}{dx}$

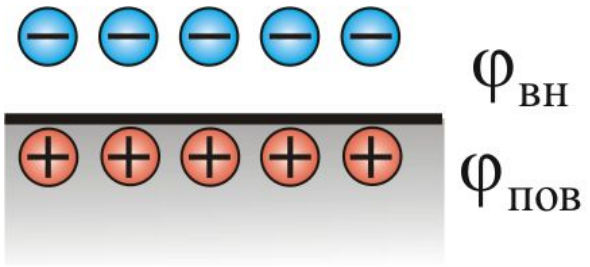
Исключение: Mn, Be

ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ТермоЭДС)

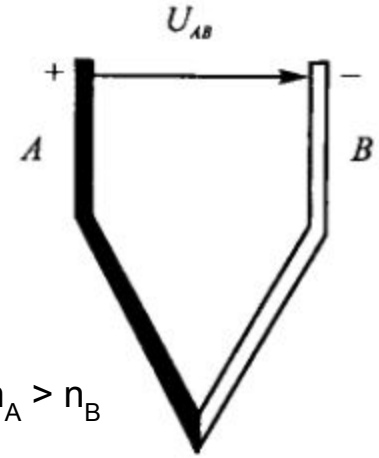
Двойной электрический слой → потенциальный барьер

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

$$A_{вых} = e\varphi$$

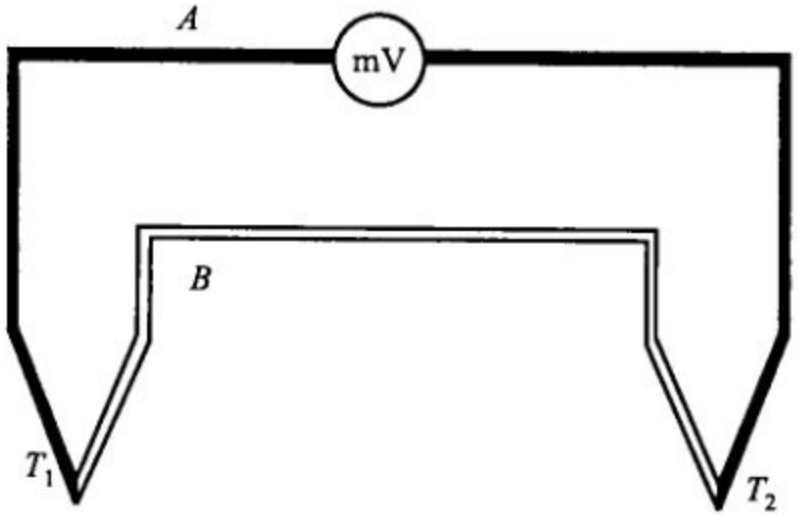


$\varphi = \varphi_{вн} - \varphi_{пов}$ – разность потенциалов двойного электрического слоя



$n_A > n_B$

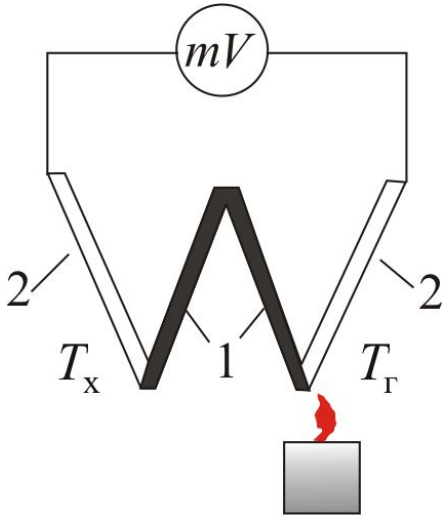
$$e_{AB} = u_{AB} = U_A - U_B + \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right)$$



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

$$+ U_B - U_A + \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) - \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) = 0$$

Эффект Зеебека



$$e_T = e_{AB} + e_{BA} = u_{AB} + u_{BA} = U_A - U_B + \frac{kT_1}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) +$$

$$+U_B - U_A + \frac{kT_2}{e}\ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right) = \frac{kT_1}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) - \frac{kT_2}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) =$$

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

$$c_T = \frac{k}{e}\ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \longrightarrow$$ α – удельная термоЭДС

$$E = \alpha(T_г - T_x)$$

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

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

Предел прочности на растяжение σ_P, МПа

Относительное удлинение при разрыве Δl/l, %

Температурный коэффициент линейного расширения (удлинения), $К^{-1}$ $\hat{O}\hat{E}_l = \alpha_l = \frac{1}{l_0}\frac{\Delta l}{\Delta T}$

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

Предел прочности на растяжение σ_P, МПа

Относительное удлинение при разрыве Δl/l, %

Температурный коэффициент линейного расширения (удлинения), $К^{-1}$ $\hat{O}\hat{E}_l = \alpha_l = \frac{1}{l_0}\frac{\Delta l}{\Delta T}$

МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Вещества с ρ ≤ 0,05 мкОм*м (медь, алюминий, железо, некоторые сплавы)

МЕДЬ

ρ = 0,0172 мкОм*м

$ТК_ρ$ = 0,00426 $1/^0C$

$ТЭДС_{Pt}$ = 0,76 мВ/град

$Т_{плав}$ = 1083 ^0C

III место в мире по производству и потреблению

Преимущества:

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

Марки меди

М1	99,9%	примесь O_2 ≤ 0,08%
М0	99,95%	примесь O_2 ≤ 0,02%

Получение меди

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 ρ ≈ на 10%; 1% Be - ≈ на 70%

Сплавы на основе меди

Cu + Zn → латунь (большое значение Δl/l при большом значении σ_p дает преимущества при производстве деталей штамповкой)

Cu + Sn, Si, P, Be, Cr, Mg, Cd → бронза (увеличивается механическая прочность до σ_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

ρ = 0,0265 мкОм*м

$ТК_\rho$ = 0,0041 $1/^0C$

$\sigma_р$ = 80 – 160 МПа

$T_{плав}$ = 660 ^0C

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

А1 ≤ 0,5% электротехнические цели

АВ00 ≤ 0,03% фольга, обкладки конденсаторов, электроды

АВ0000 ≤ 0,004% специальное назначение

Сплавы алюминия (увеличение механической прочности)

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

ρ = 0,0317 мкОм*м $\sigma_р$ = 80 – 160 МПа

Сталеалюминиевый провод

Железо

ρ = 0,1 мкОм*м

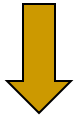
σ_p = 700 – 750 МПа (мягкая сталь)

Δl/l = 5 – 8%

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

ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

Температура плавления выше 1700 ^{0}C (W, Mo, Ta, Nb, Cr, V, Ti)

Вольфрам

Руда → вольфрамовая кислота H_2WO_4

↓

Нагрев до 900 ^{0}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 $CaWO_4$

ρ = 0,055 мкОм*м

$\Delta l/l$ = 4%

σ_p = 550 – 3500 МПа

$T_{плав}$ = **3380** ^{0}C

Особенность: чем тоньше, тем крепче

Стержни d = 5 мм σ_p = 500 – 600 МПа

Проволока d = 0,05 мм σ_p = 3000 – 4000 МПа

(зернистое строение → волокнистое строение)

Использование вольфрама:

- нити накаливания до 2000 ^{0}C (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 ρ

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} %

ρ = 0,057 мкОм*м

Δl/l = 2 – 55 %

$\sigma_р$ = 350 – 2500 МПа

$T_{плав}$ = 2620 ^{0}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

ρ = **0,0168** мкОм*м

$\Delta l/l$ = 50 %

$\sigma_p \approx$ 200 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

ρ = 0,024 мкОм*м

$\Delta l/l$ = 40 %

$\sigma_p \approx$ 150 МПа

Платина

Достоинства – наибольшая химическая стойкость, легкость обработки

Недостатки – высокая стоимость

Применение – термопары и терморезисторы на высокие температуры (до 1600 ^{0}C), контактные сплавы, гермовводы в стекло, особо тонкие нити (диаметр ≈ 1 мкм) для подвесок подвижных систем в электрометрах (получают многократным волочением биметаллической проволоки Pt – Ag с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте)

ρ = 0,105 мкОм*м

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

$\sigma_р \approx$ 150 МПа

$T_{плав}$ = 1773 ^{0} с

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

ρ = 0,19 мкОм*м

$\Delta l/l$ > 55%

$\sigma_р \approx$ 15 МПа

$T_{плав}$ = 327 ^{0} с

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 ^{0}C, хрупкое ромбическое олово (t > 160 ^{0}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

ρ = 0,113 мкОм*м

$\Delta l/l$ > 55%

$\sigma_р$ = 16 – 38 МПа

$T_{плав}$ = 232 ^{0} с

СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Общие требования:

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

Манганин

Состав: Cu ≈ 85%; Mn ≈ 12%; Ni ≈ 3%

ρ = 0,42 – 0,48 мкОм*м

$\Delta l/l$ = 15 – 30%

σ_{ρ} = 450 – 600 МПа

$ТК_{\rho}$ = (6 – 50)*10^{-6} $1/^0C$

$К_E^{Cu}$ = 1-2 мкВ/град

Продукция: тонкая проволока (d ≥ 0,02 мм) в эмалевой изоляции

Технология производства:

Отжиг в вакууме 1-2 часа при t = 550 – 600 ^{0}C с последующим медленным охлаждением

↓

Намотка катушек

↓

Дополнительный отжиг при 200 ^{0}C

↓

Длительная выдержка (до 1 года) при комнатной температуре

Результат – стабильное ρ и низкий $ТК_{\rho}$

Использование:

- образцовые резисторы с допустимой температурой нагрева ≤ 200 ^{0}C;
- датчики высокого гидростатического давления

Константан **Состав**: Cu ≈ 60%; Ni ≈ 40%

Допустимая температура нагрева 450 ^{0}C

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

ρ = 0,48 – 0,52 мкОм*м

$\Delta l/l$ = 20 – 40%

$\sigma_р$ = 400 – 500 МПа

$ТК_\rho$ = (5 – 25)*10^{-6} 1/^{0}C

$К_E^{Cu}$ = 44 - 55 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

0Х25Ю5 – хромаль особо жаростойкий (1400 ^{0}C)

1Х25Ю5 – хромаль (Cr ≈ 25%, Al ≈ 5%) (1000 ^{0}C)

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

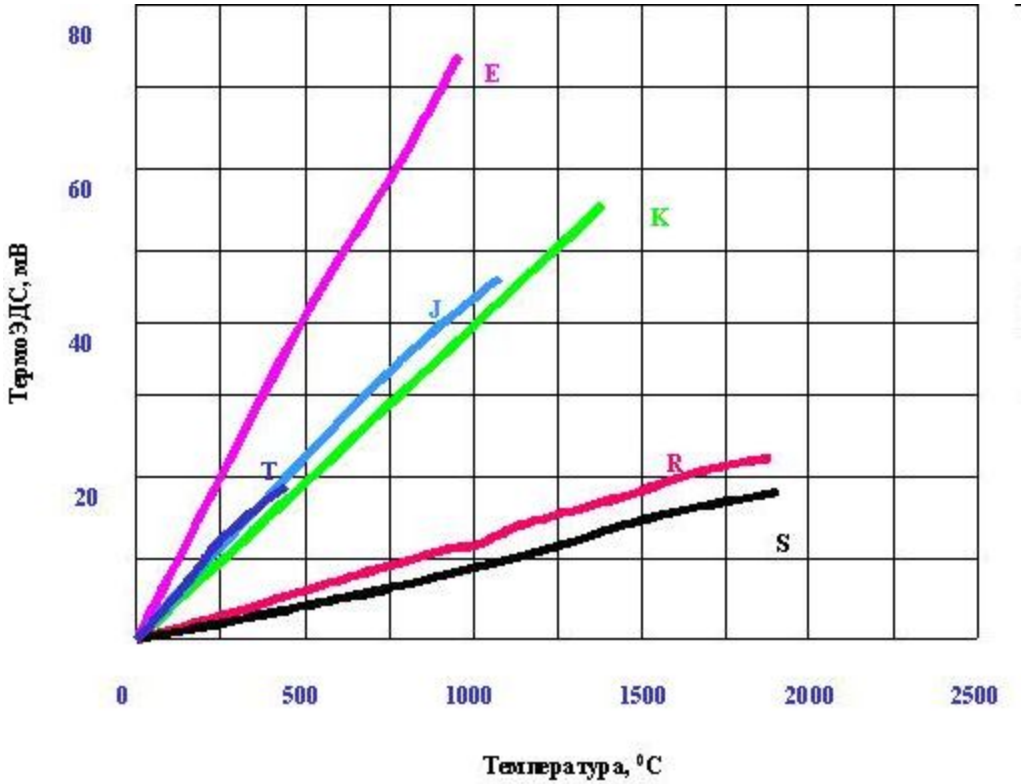
Изготовление нагревательных элементов

Нихромовая проволока помещается в трубку из стойкого к окислению металла

Промежуток между проволокой и трубкой заполняется порошком диэлектрика с высокой теплопроводностью (например, магнезией 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 T, °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

Высокая стойкость к истиранию

Твердотянутая медь МТ

Бериллиевая бронза

Сплав Ag - CdO

Разрывные

Не допускается эрозия и приваривание

Чистые тугоплавкие металлы

Сплавы

Металлокерамические композиции

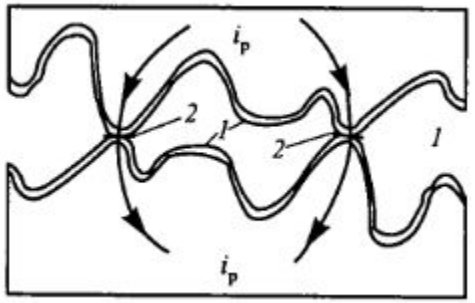
Небольшая мощность Ag - CdO

Большая мощность Ag + Co, Ni, Cr, W, Mo, Ta;

Cu + W, Mo;

Au + W, Mo

Микроструктура электрического контакта



ПРИПОИ И ФЛЮСЫ

Припои

Мягкие ($T_{пл}$ ≤ 400 ^{0}C; $\sigma_р$ ≤ 50 – 70 МПа)

Твердые ($T_{пл}$ ≥ 500 ^{0}C; $\sigma_р$ ≤ 500 МПа)

Факторы выбора

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

Мягкие припои

Оловянно-свинцовые ПОС

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

ρ = 0,132 – 0,188 мкОм*м

$ТК_l$ = (26 – 27)*10^{-6} 1/^{0}C

Сплав Вуда $T_{плав}$ ≈ 60 ^{0}C

Bi – 50% Sn – 12,5%

Pb – 25% Cd - 12,5%

Твердые припои

Медно-цинковые ПМЦ

Серебряные ПСр

Припои для электровакуумных элементов

Главное требование - $ТК_l$ припоя должен соответствовать $ТК_l$ стекла для получения вакуум-плотного ввода

Ковар (29НК)

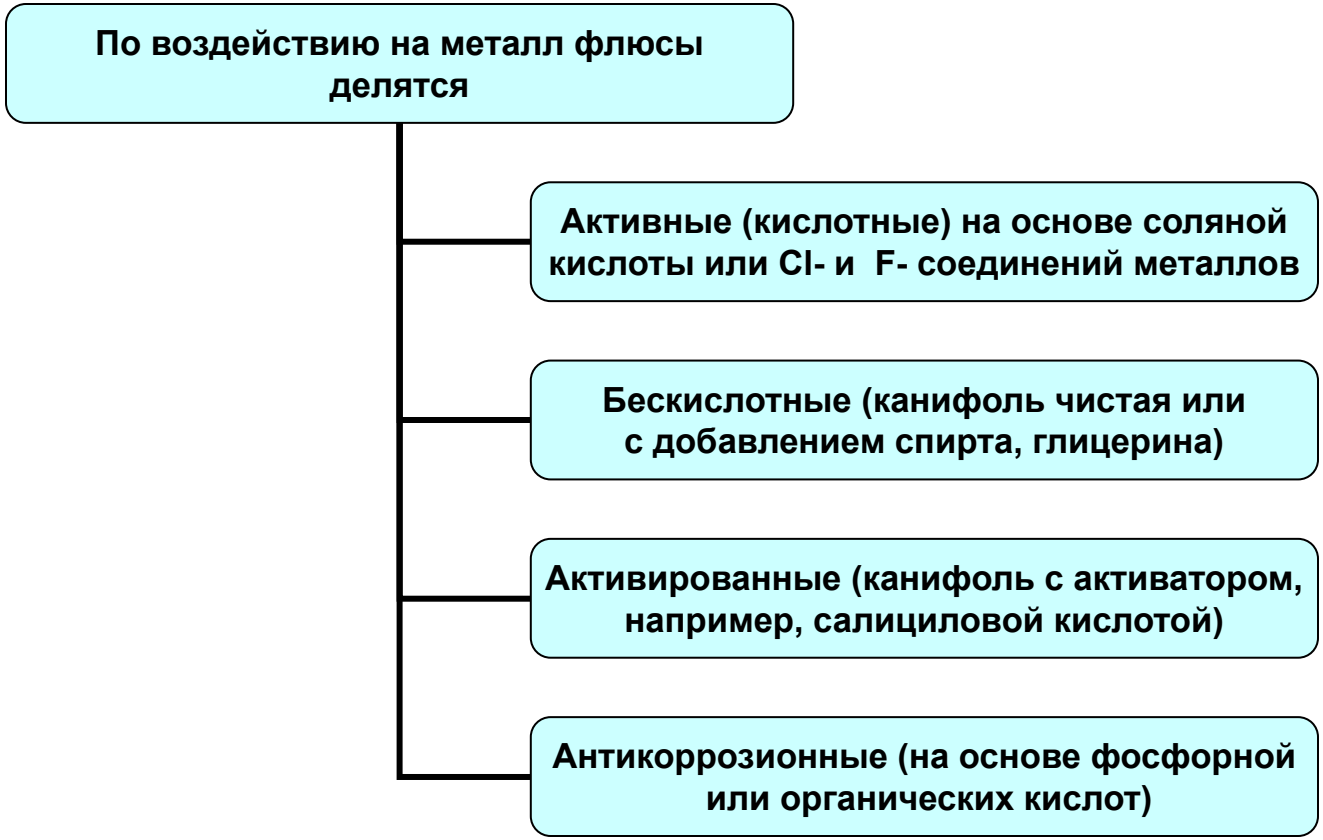
ρ = 0,49 мкОм*м

$ТК_l$ = (4,4 – 5,7)*10^{-6} 1/^{0}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