



Омский государственный технический университет
каф. Технология электронной аппаратуры

Дисциплина
Радиоматериалы и радиокомпоненты

Лекция 3.1. Проводниковые материалы.
Электропроводность

Ст. преп. Пономарёв Д.Б.



Проводниковые материалы - это материалы, хорошо проводящие электрический ток при приложении внешнего электрического поля E .

В качестве проводниковых материалов в технике используется, в основном, два класса проводников.

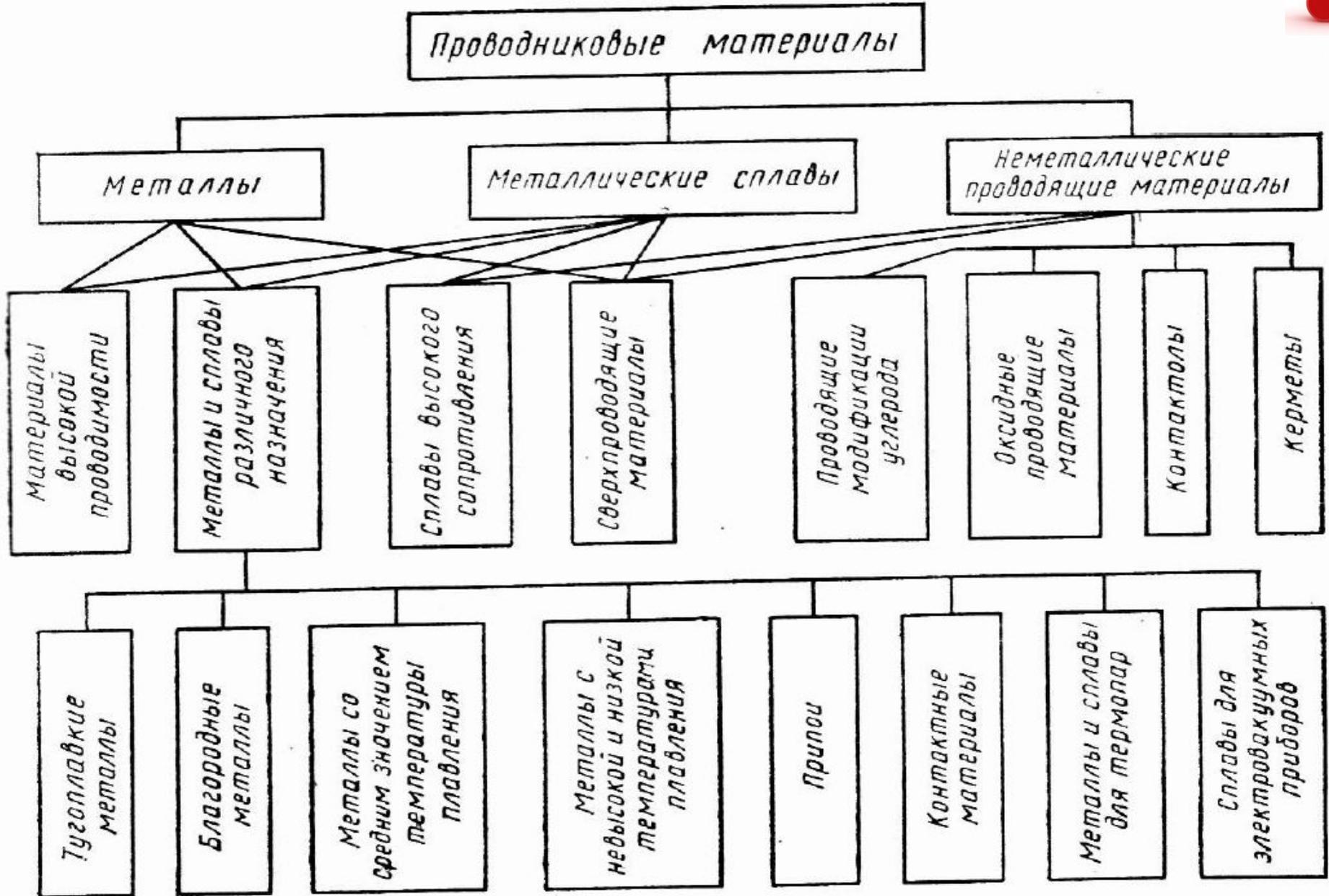
Твердые проводники с электронной проводимостью (проводники первого рода). К ним относятся металлы, сплавы, углеродистые материалы.

Жидкие проводники (проводники второго рода). К этому виду проводниковых материалов относятся расплавленные и жидкие металлы (галлий, ртуть), различные электролиты.

Особое состояние – плазма.



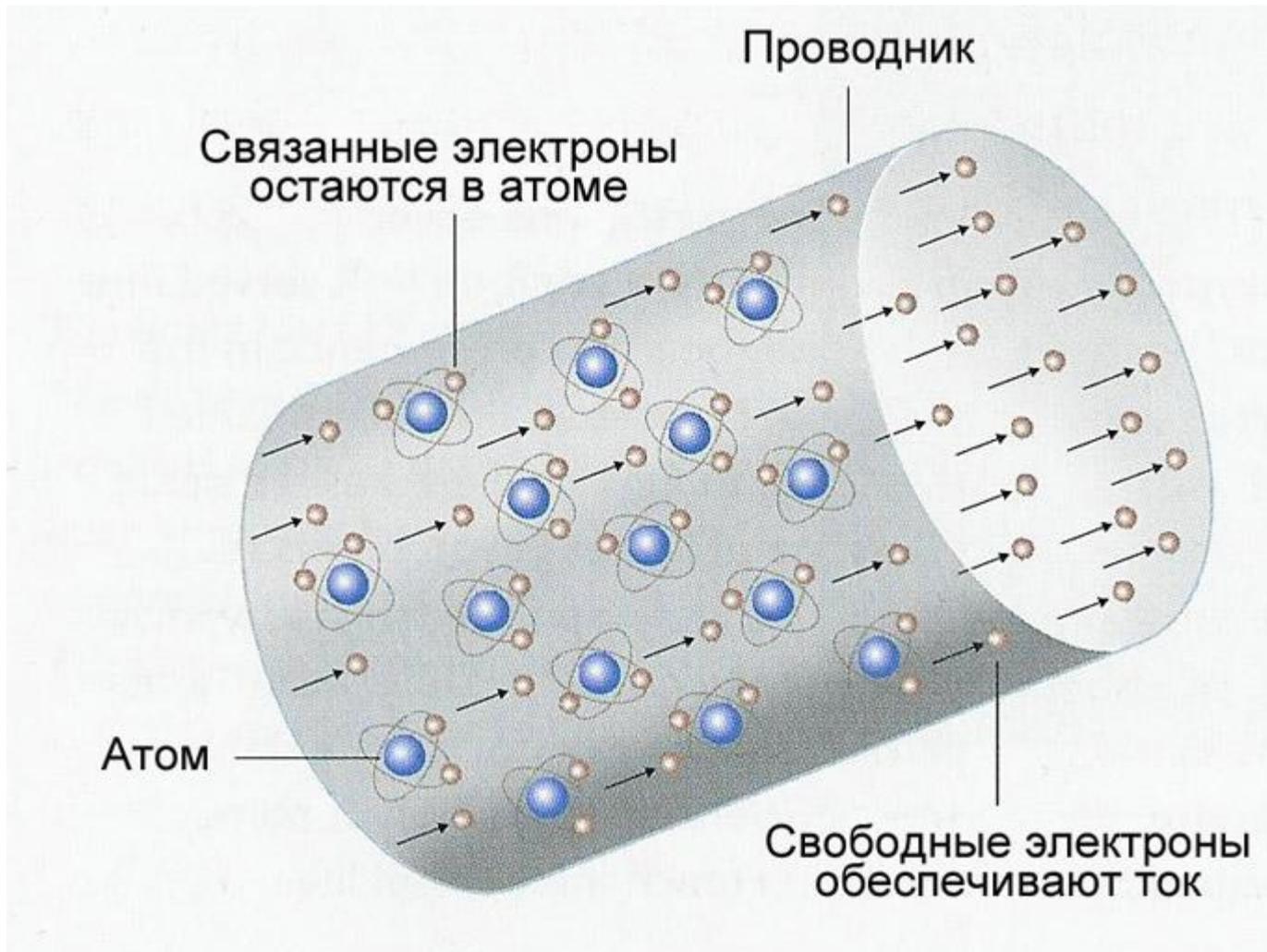
Классификация проводниковых материалов



Структурная схема



3.1. Электропроводность проводниковых материалов





Электропроводность

$$\gamma = e \cdot N \cdot \mu$$

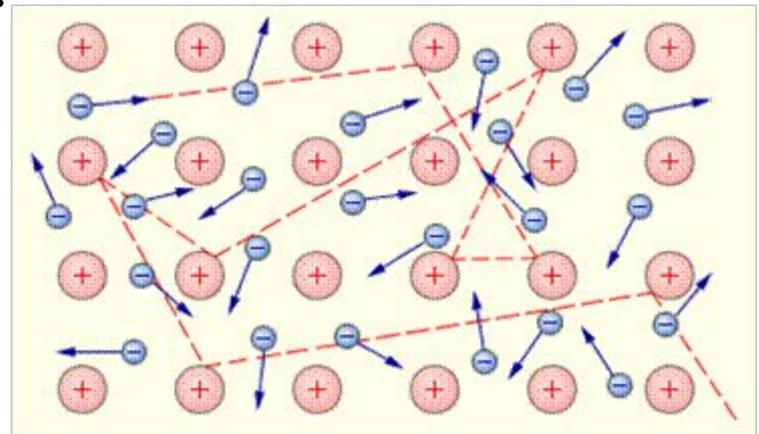
где

N - концентрация свободных носителей заряда, м^{-3} ;
 $\sim 10^{28}$ в одном кубическом метре (Ag, Cu, Au и Al)

μ - подвижность носителей заряда, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;

e - величина заряда носителя, Кл;

γ – электропроводность, См.



Подвижность

$$\mu = \frac{\lambda_{CP} \cdot e}{2 \cdot m \cdot V},$$

где

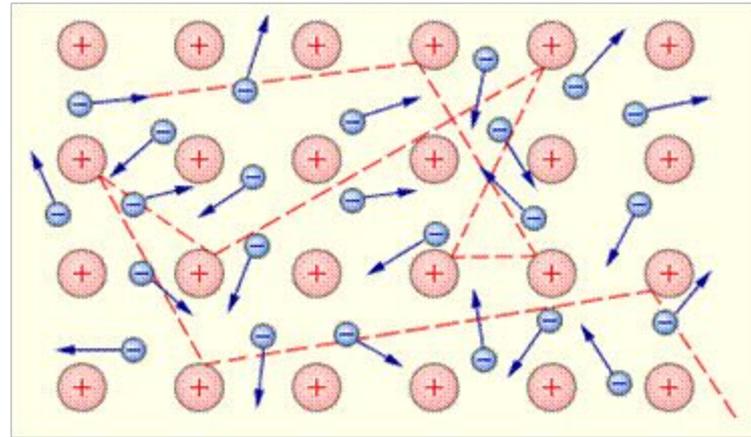
V – скорость электрона в электрическом поле, м/с;

e – заряд электрона, Кл;

λ_{CP} – средняя длина свободного пробега электрона, м;

m – масса электрона.

μ - подвижность носителей заряда, м²/В·с.



Формула для вычисления сопротивления проводника

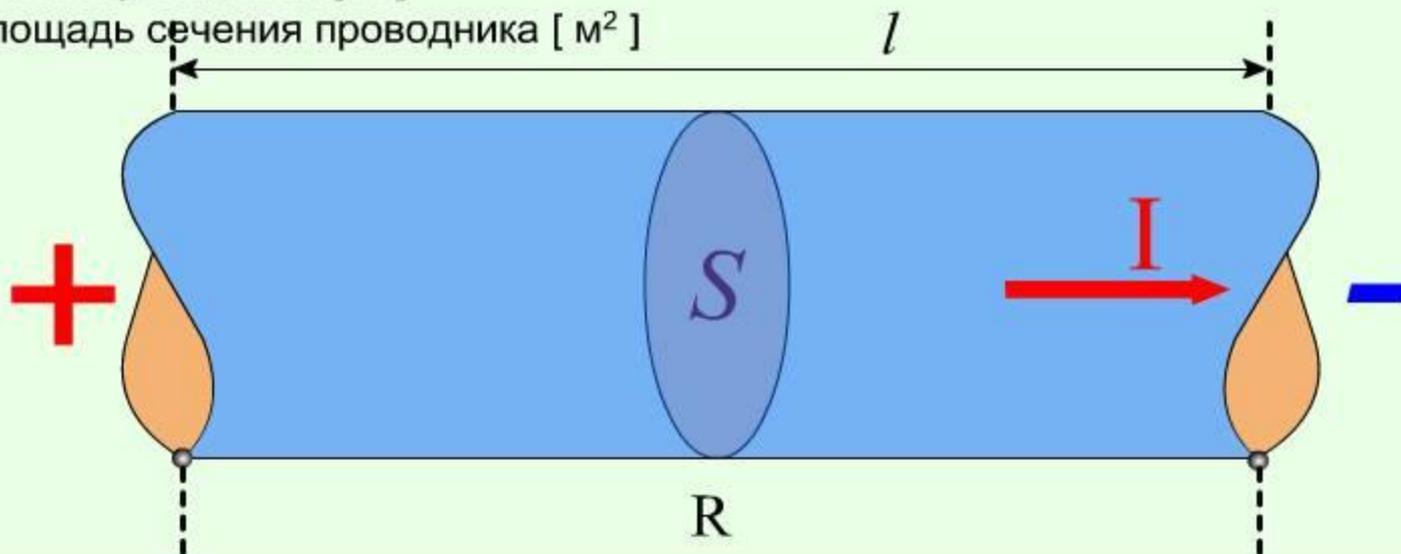
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R - электрическое сопротивление проводника [Ом]

ρ - удельное сопротивление проводника [Ом·м]

L - длина проводника [м]

S - площадь сечения проводника [м²]





Удельное сопротивление

$$\rho = \frac{2 \cdot m \cdot V}{e^2 \cdot n \cdot \lambda_{CP}} \quad R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \rho = 1/\gamma$$

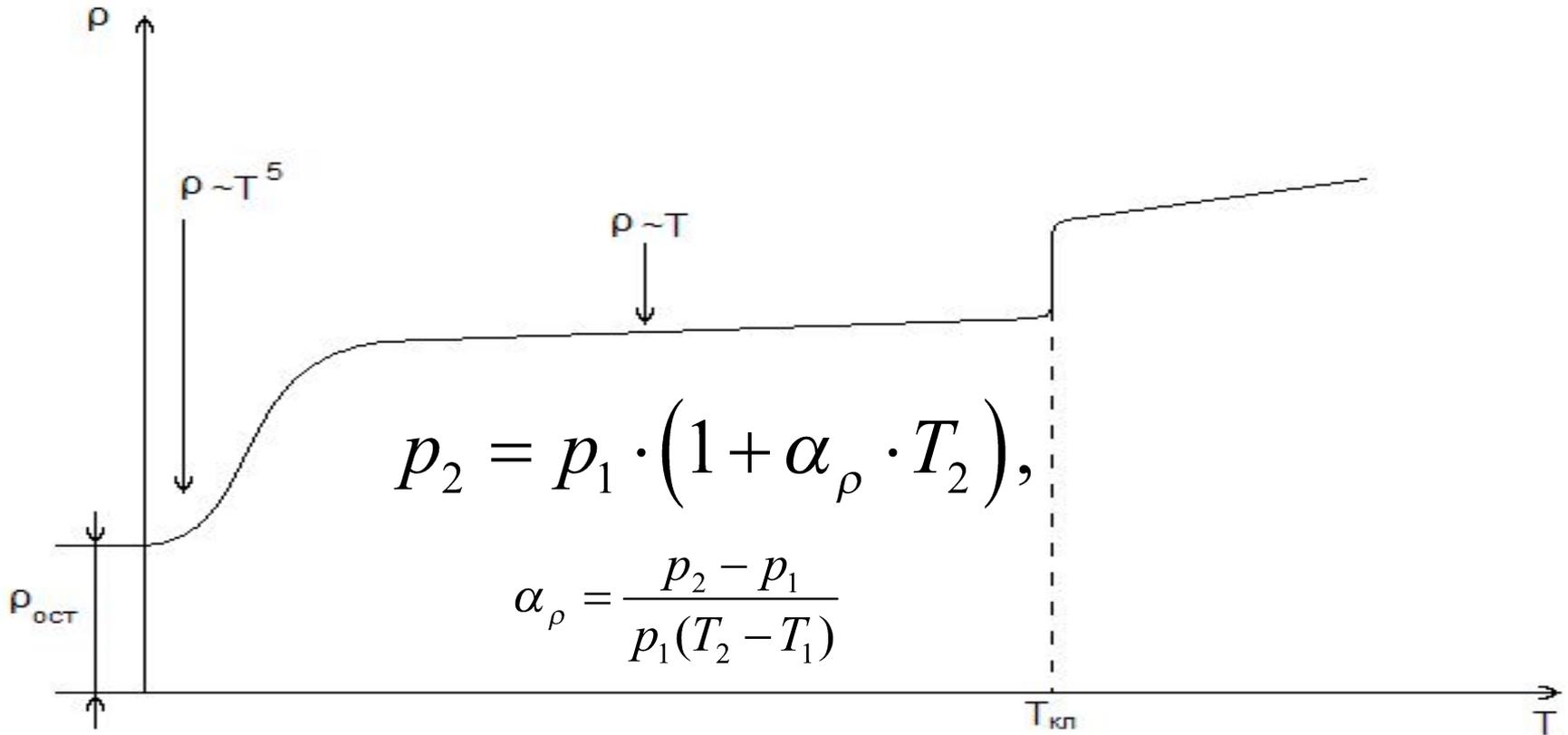
$$\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ или } \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

основной параметр проводниковых материалов

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot (1 + \alpha_\rho \cdot T_2),$$

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 (T_2 - T_1)}$$

Удельное сопротивление

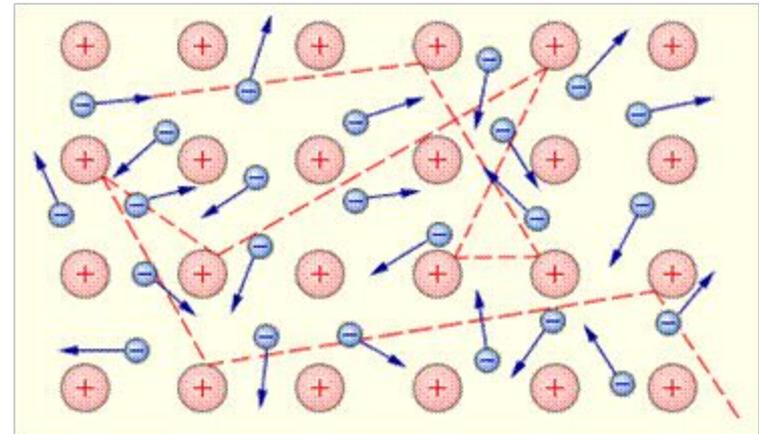


где ρ_1 – удельное сопротивление в начале диапазона;
величина α_ρ – характеризует средний температурный коэффициент

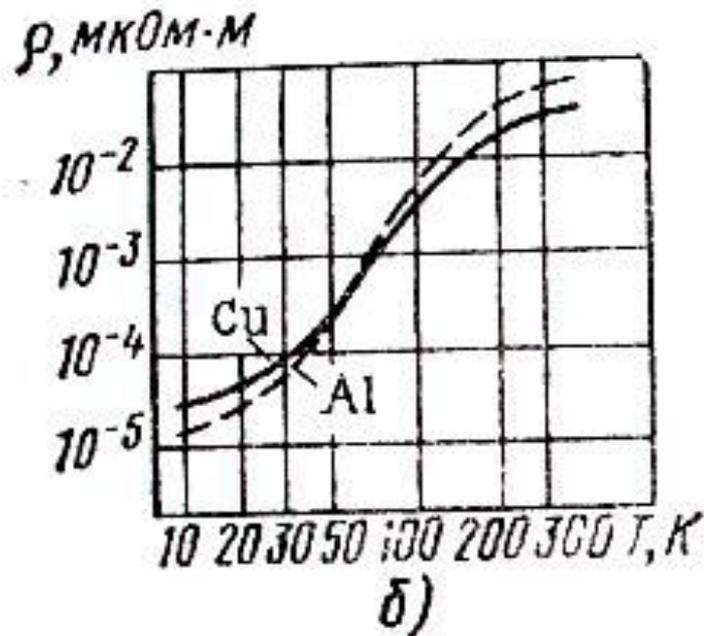
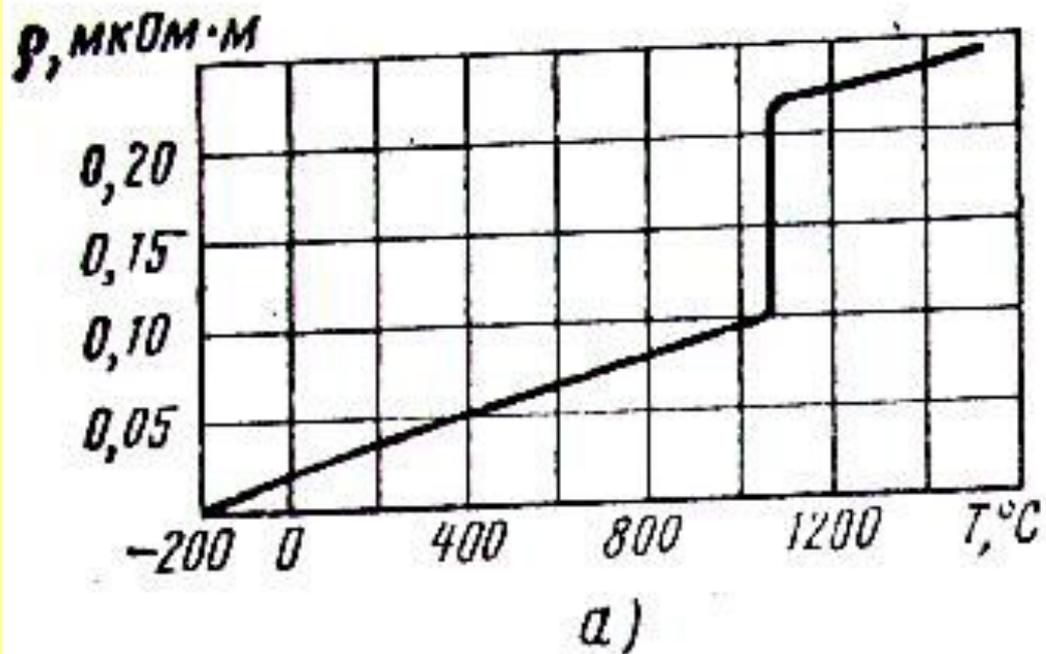


Зависимость электропроводности проводника от температуры может определяться только длиной свободного пробега электрона в решетке. Из физики твердого тела известно, что λ_{CP} уменьшается при повышении температуры.

$$T \uparrow \Rightarrow \lambda_{CP} \downarrow \Rightarrow \mu \downarrow \Rightarrow \rho \uparrow, \gamma \downarrow$$



Удельное сопротивление меди



Зависимости удельного сопротивления от температуры в широком интервале температур для меди (а) и при низких температурах для меди и алюминия (б)

Температурный коэффициент сопротивления ТКР (TK_ρ) проводников (чистых металлов) положителен и составляет величину $(3 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-3})$ 1/град. Несколько большим α_ρ характеризуются ферромагнитные металлы.

На практике при изменении α_ρ часто бывает полезной следующая формула

$$\alpha_\rho = \alpha_r + \alpha_l$$



$$\alpha_\rho = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)}$$

α_r – ТК сопротивления данного резистора,

α_l - ТК линейного расширения материала.

У чистых металлов $\alpha_\rho \gg \alpha_l$, поэтому у них $\alpha_\rho \approx \alpha_r$. Однако для термостабильных металлических сплавов такое приближение оказывается несправедливым.

Влияние примесей

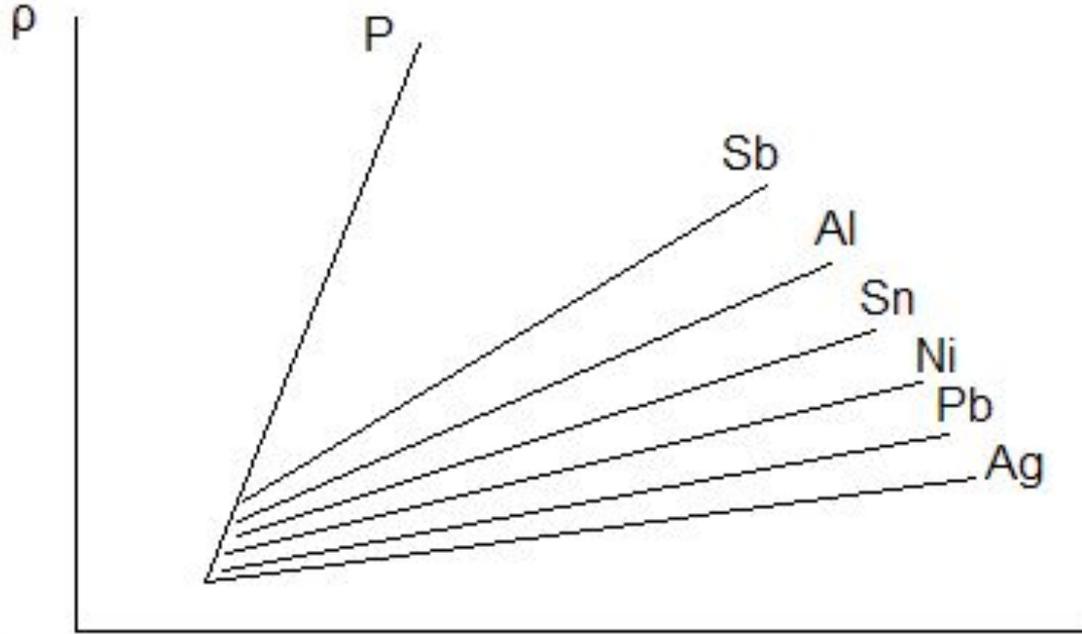
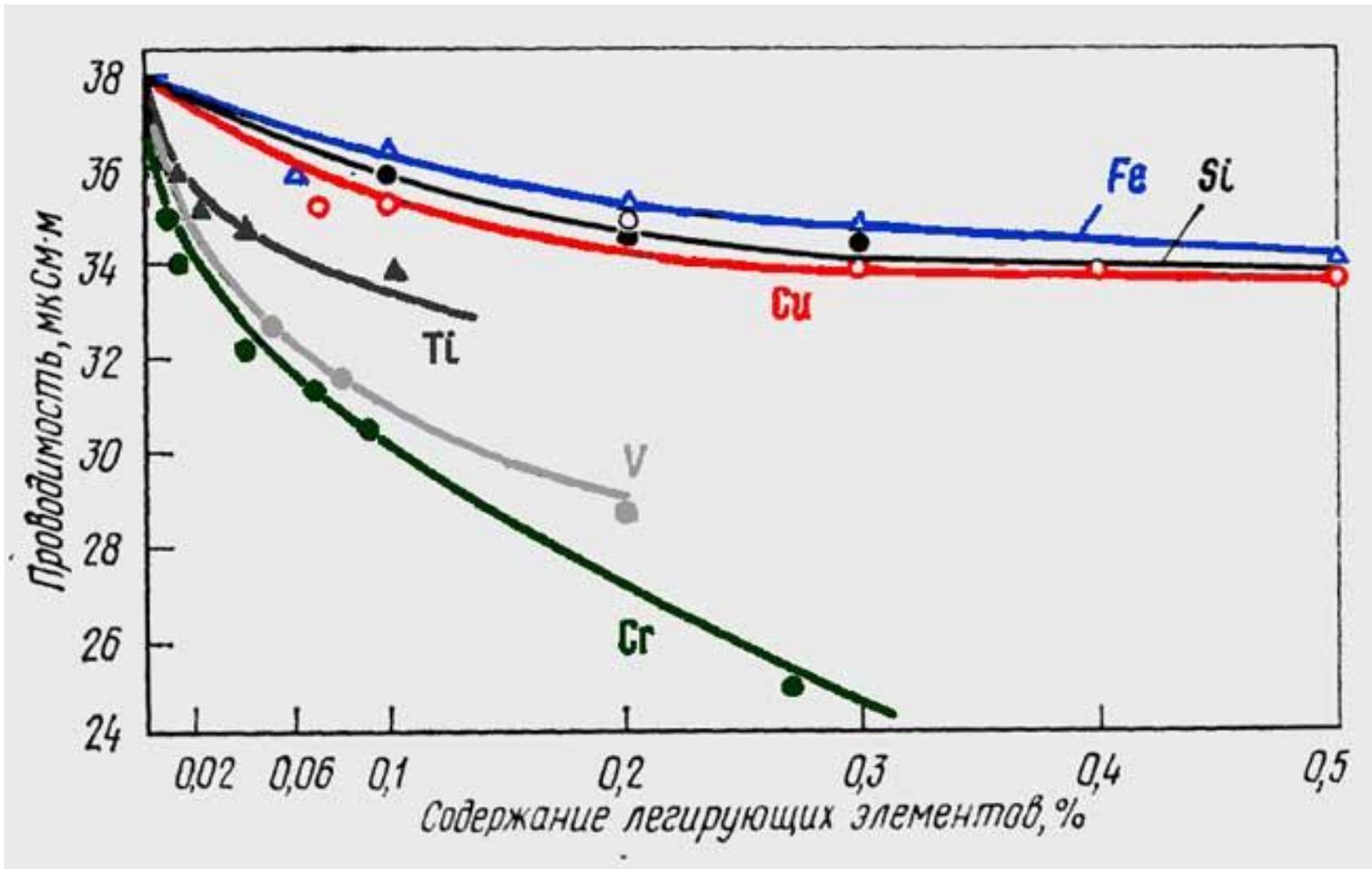


Рис.а
Влияние примесей на сопротивление Cu при 20°C .

Введение в медный проводник 0,01 ат. доли примеси серебра вызывает увеличение удельного сопротивления меди на $0,002 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Влияние примесей на проводимость Me



Влияние обработки

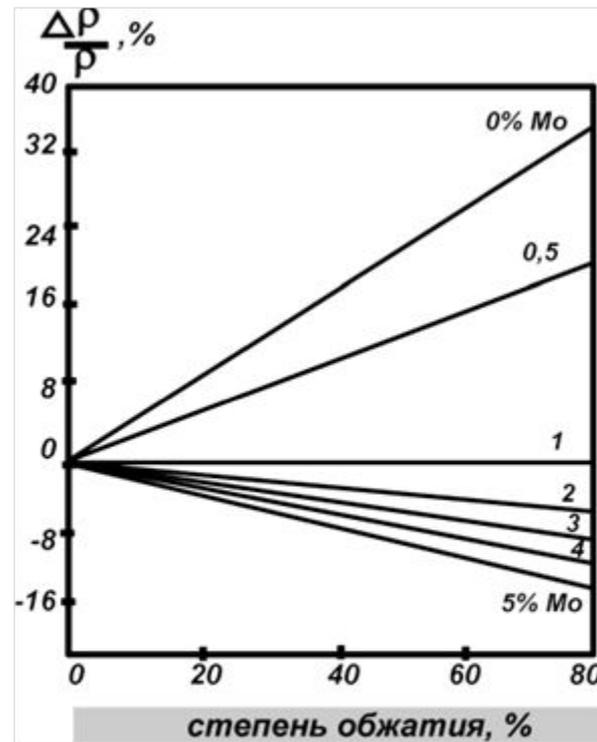
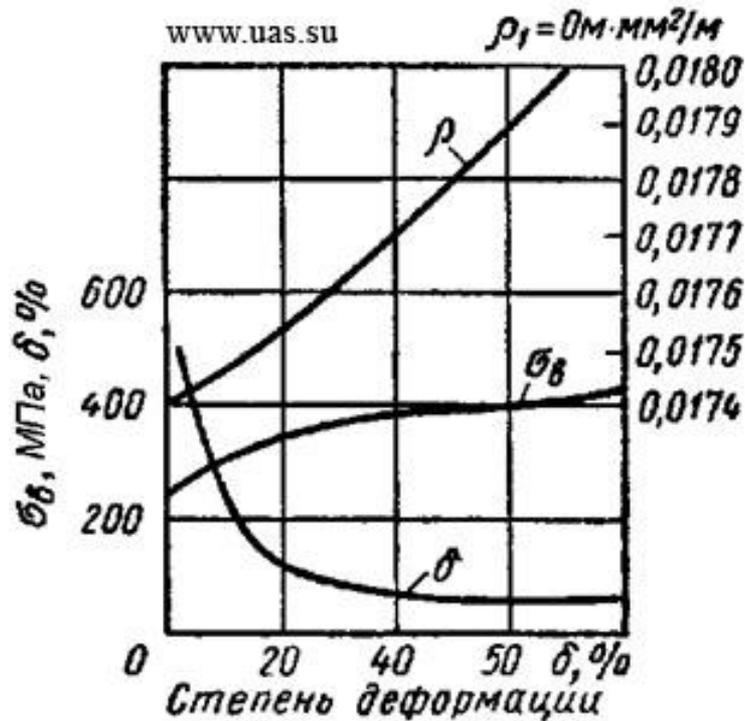


Рисунок 6.
Влияние наклепа на электрическое сопротивление
Ni-Fe-Mo сплавов

Вносят свой вклад в электросопротивление и дефекты, вводимые в металл при его холодной пластической деформации (ХПД), так, после сильной ХПД у Al, Cu, Ag, Au, ρ увеличивается на 5-6%, а у Mo и W до 10-20%.

В сплавах с ростом концентрации примесей удельное сопротивление сплава ρ возрастает за счет увеличения составляющей $\rho_{\text{ост}}$. Соответственно, *TKC* сплава с ростом концентрации дефектов уменьшается.

Правило Матиссена для сплавов



Удельное электросопротивление металла со статическими дефектами определяется *правилом Матиссена*

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}}, \quad (2.12)$$

где ρ_T - составляющая удельного электросопротивления, обусловленная рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки, $\rho_{\text{ост}}$ - остаточное электросопротивление, обусловленное рассеянием электронов на точечных и линейных дефектах.

При этом величина $\rho_{\text{ост}}$ практически не зависит от температуры T .

Поэтому температурная зависимость удельного электросопротивления сплава $\rho=f(T)$ характеризуется более слабым изменением, чем чистого металла. *ТКС* сплава определяется только относительным изменением составляющей электросопротивления $\Delta\rho_T/\rho$, обусловленной рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки, происходящим при изменении температуры ΔT , и выражается соотношением

$$\alpha_{\rho,T} = \frac{\Delta\rho_T}{\rho} \frac{1}{\Delta T}, \quad ,1/\text{K}$$

Примеры для сплавов благородных металлов

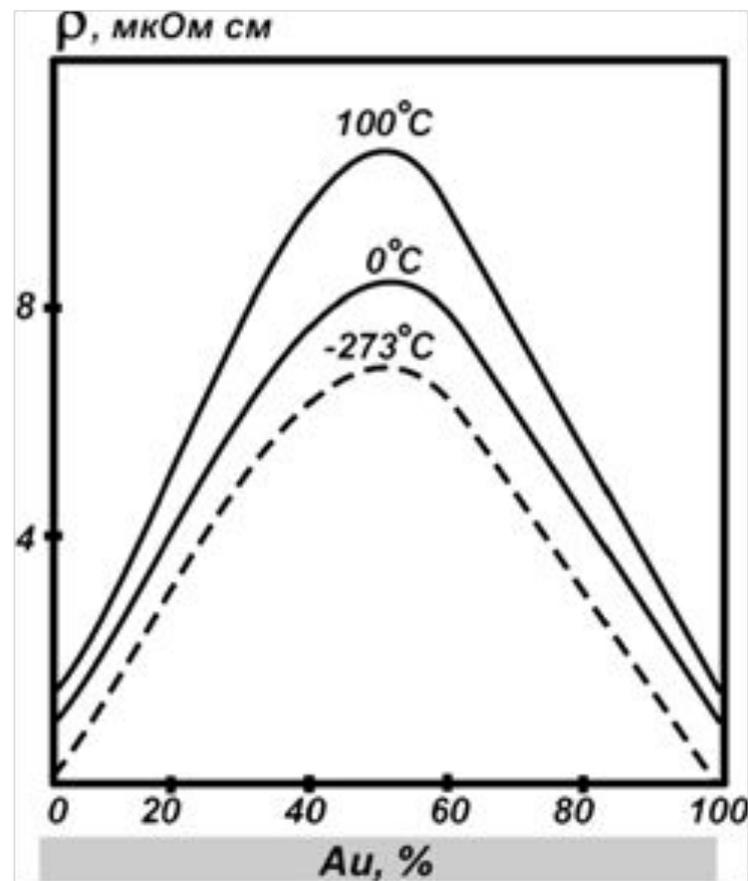
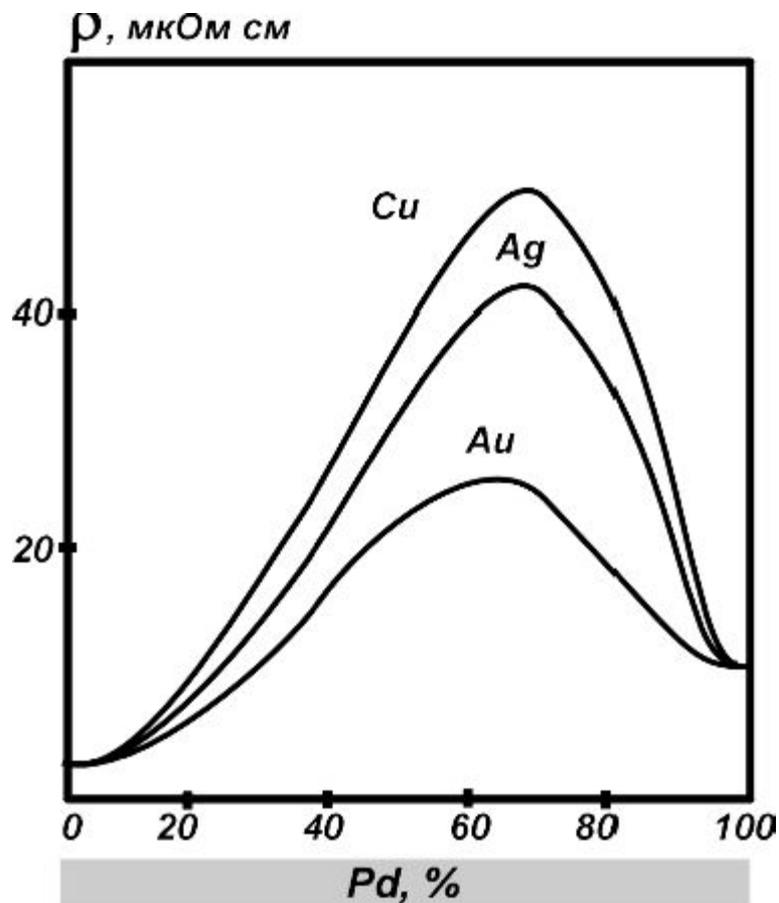
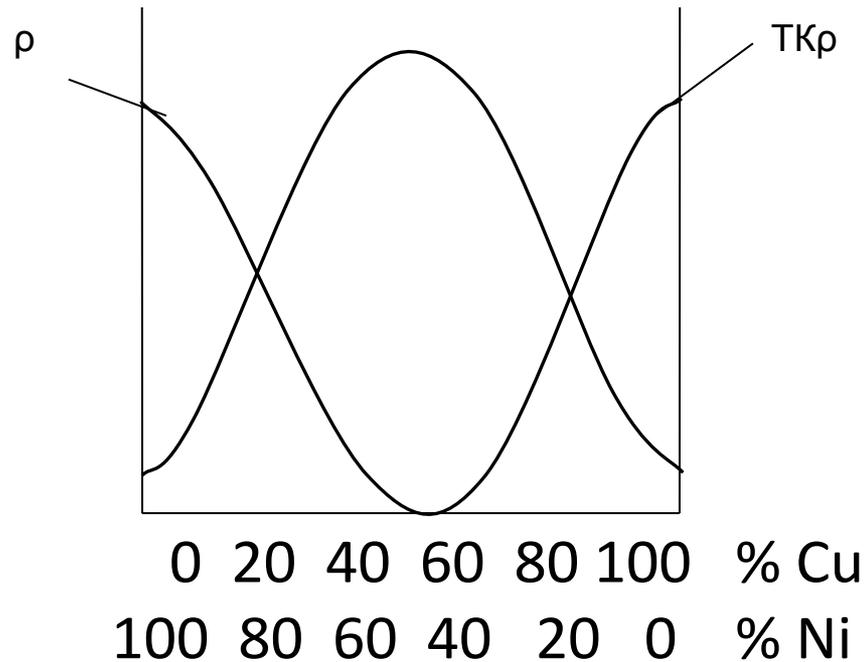


Рис. 1

Зависимость удельного электросопротивления от сплавов Ag-Au от состава



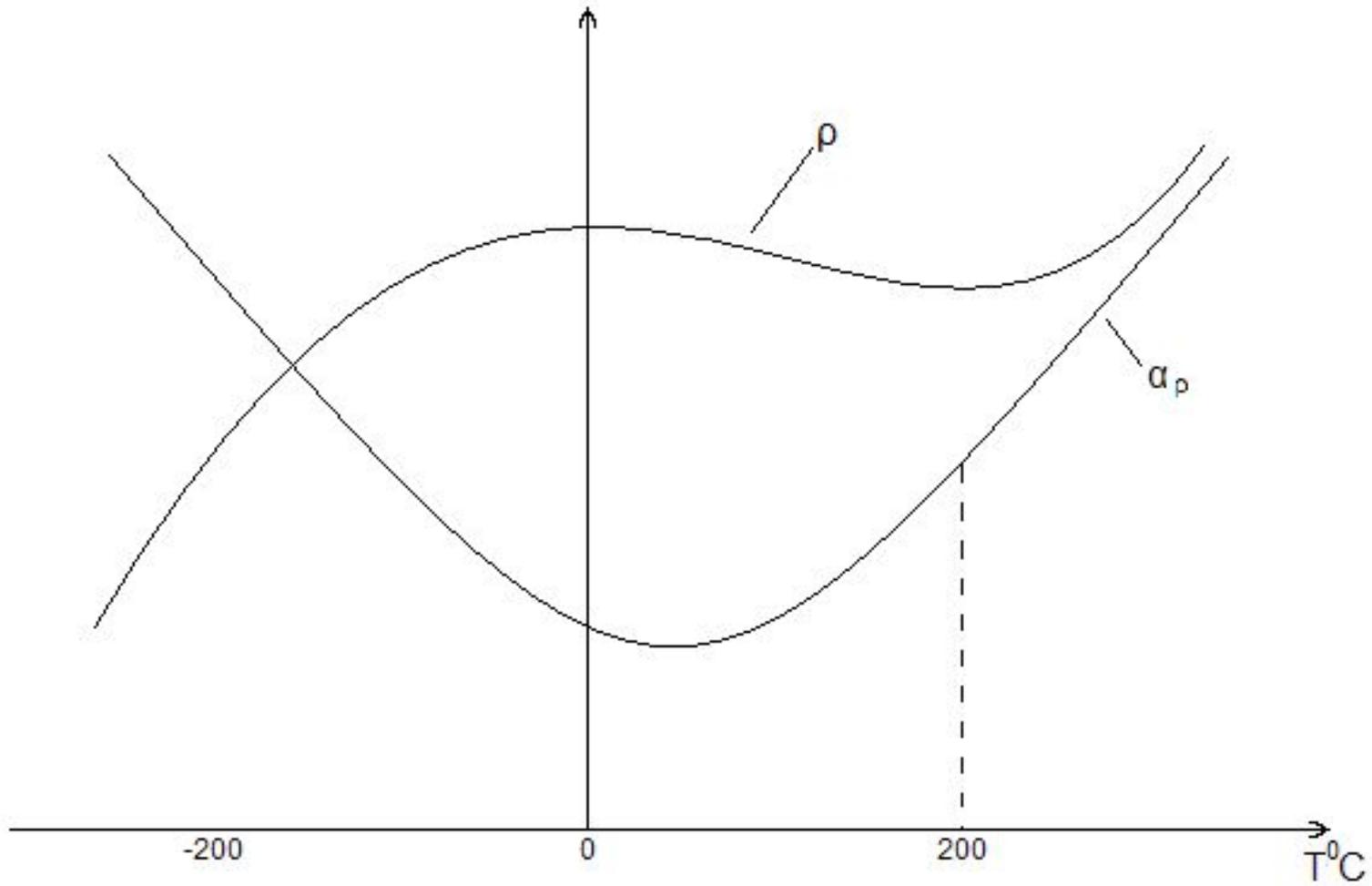
Зависимость $T\alpha_\rho$ и ρ для сплава Ni – Cu



Cu - $0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Ni, - $0,073 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$

константан (60% Cu и 40% Ni) **$0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$** .

$T\alpha_\rho$ этого сплава отрицателен или очень мал: - $(5...20)\cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$;



Зависимость α_ρ и ρ от температуры для манганина

Металл проводника	Химический индекс	Удельн. эл. сопротивление ρ мкОм·м или Ом·мм ² /м	Темпер. коэфф. удельного сопротивления ТКр, 1/град	Термо-ЭДС относительно меди, мкВ/град	Температура плавления, $T_{пл}$, °С
1	2	3	4	6	8
Сплавы					
Манганин	Cu – 86% Mn – 12%	0,42...0,48	(5...30) · 10 ⁻⁶	1...2	940
Константан	Cu – 60% Ni – 40%	0,48...0,52	(5...20) · 10 ⁻⁶	40...50	1270
Нихром	Ni – 60% Cr – 15%	1...1,2	1,7 · 10 ⁻⁴		1360
Фехраль	Cr – 15% Al – 5% Ост. Fe	1,3	1,2 · 10 ⁻⁴		1450
Хромаль	Cr – 23% Al – 5% Ост. Fe	1,5	6,5 · 10 ⁻⁵		
Нейзильбер		0,35	3 · 10 ⁻⁶		1050

Электросопротивление тонких плёнок

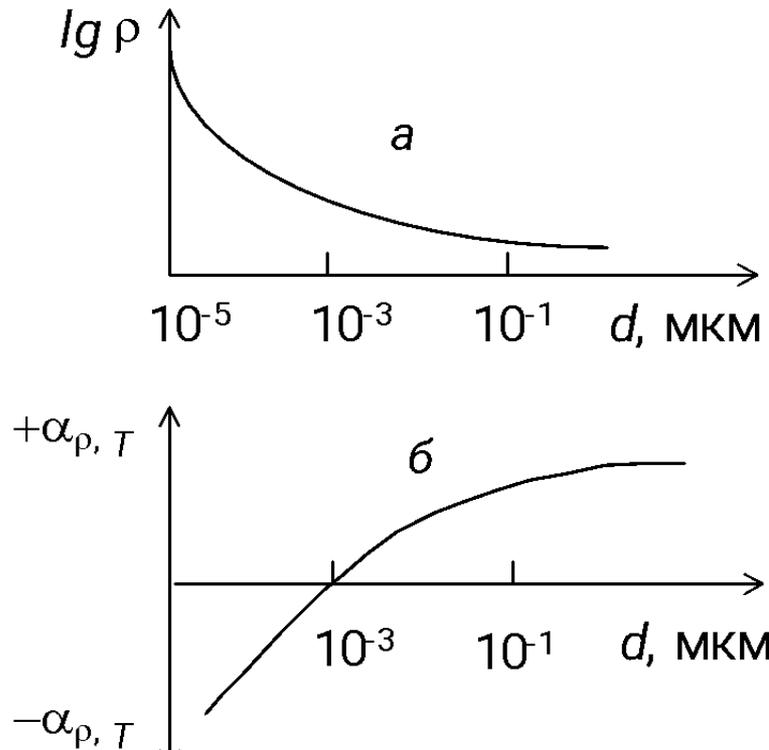


Рис. 2.2. Электрические характеристики тонких резистивных пленок:
а - зависимость электросопротивления, $\lg \rho$, от толщины пленки, d ;
б - зависимость ТКС от толщины пленки

Характеристикой электросопротивления тонких пленок с толщиной d более 0,1 мкм является сопротивление квадрата поверхности ($\rho_{\text{кв}}$)

$$\rho_{\text{кв}} = \frac{\rho}{d}, \text{ Ом}, \quad (2.14)$$

где d - толщина пленки; ρ - удельное электросопротивление пленки данной толщины, Ом×м.

Формулы для расчёта электросопротивления

Общее электросопротивление пленочного проводникового элемента рассчитывается по формуле

$$R = \rho_{\text{кв}} \frac{l}{b}, \text{ Ом,}$$

где l - длина пленки, мм; b - ширина пленки, мм.

Для тонкослойных резисторов величина $\rho_{\text{кв}}$ находится в пределах 500...1000 Ом.

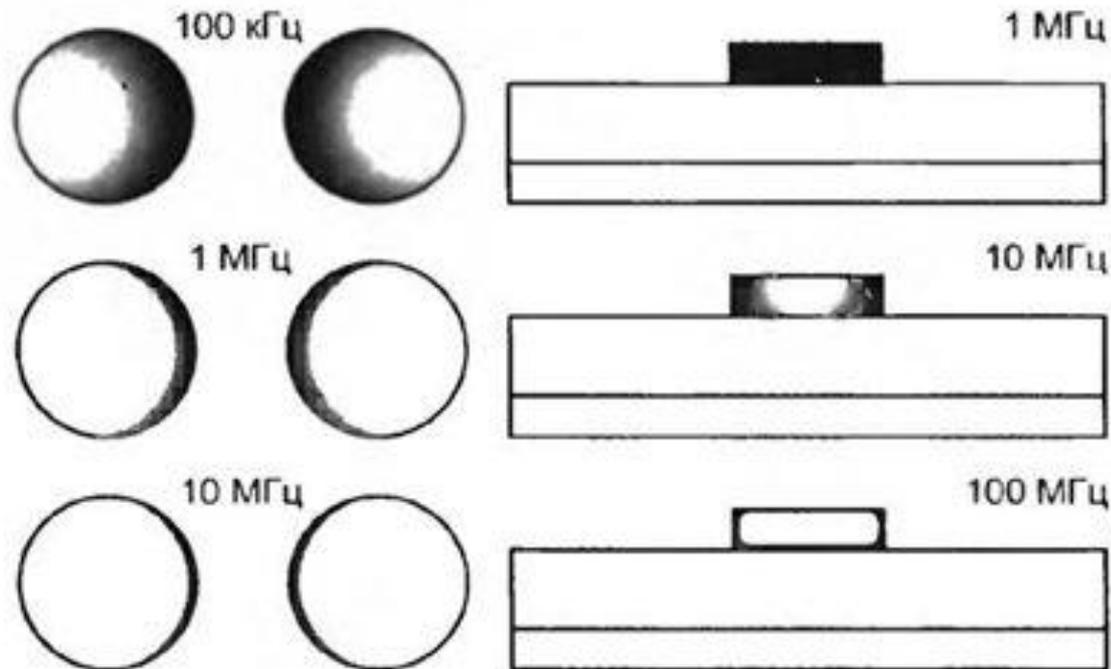
Сопротивление проволочного резистивного элемента определяется соотношением

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ Ом,}$$

где ρ - удельное сопротивление проводника, Ом·м, l - длина проводника, м; S - площадь поперечного сечения, м².

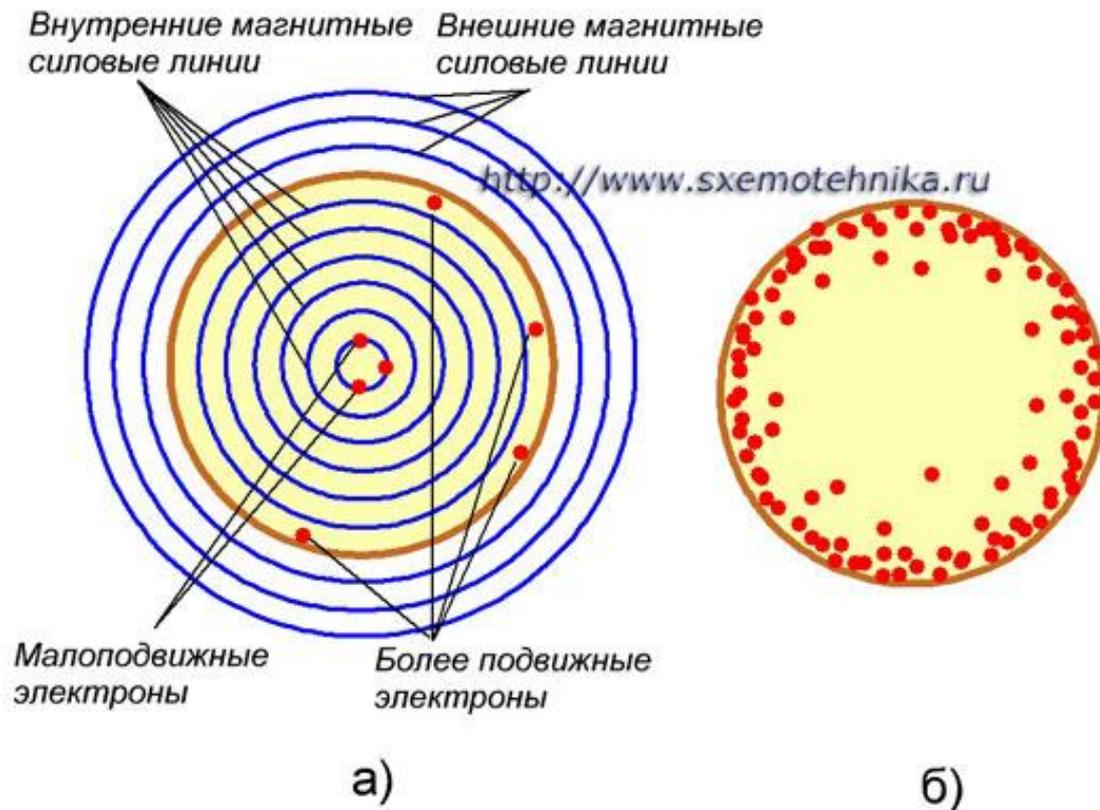
Электросопротивление на высоких частотах

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников: плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения в глубь проводника. Это явление получило название поверхностного эффекта (скин - эффекта).



Электросопротивление на высоких частотах

Глубина проникновения поля численно равна расстоянию, на котором амплитуда напряженности поля, а следовательно, и плотности тока, **уменьшается в e раз** по отношению к своему значению на поверхности проводника.



Электросопротивление на высоких частотах

Связь глубины проникновения поля с физическими характеристиками вещества определяется выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \omega \gamma}}$$

Коэффициент увеличения сопротивления k_R цилиндрического провода круглого сечения S_0 рассчитывают по формуле ($\Delta \ll d$):

$$k_R = \frac{d}{4\Delta}$$

Классификация проводниковых материалов



по ρ

1. Проводниковые материалы с малым электрическим сопротивлением ($\rho=(0.015...0.2)\times 10^{-6}$ Ом \times м). К ним относятся:

материалы для точечных изделий, проводного монтажа, печатных и пленочных проводников;

металлы и сплавы для электрических контактов;

припой;

Неметаллические проводниковые материалы.

2. Проводниковые материалы с удельным электросопротивлением более $0,2\times 10^{-6}$ Ом \times м:

высокоомные сплавы и материалы для проволочных резисторов;

материалы для пленочных резисторов;

сплавы для выводов электровакуумных и полупроводниковых приборов.

3. Сверхпроводящие материалы:

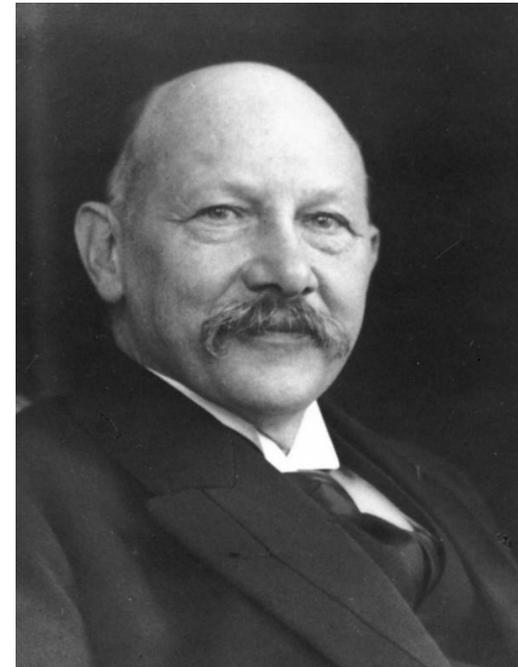
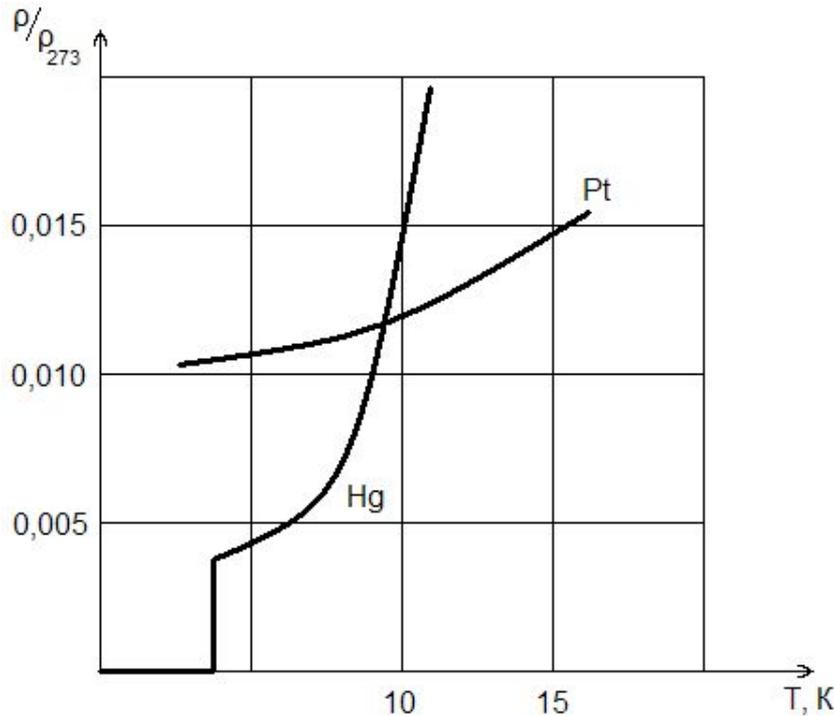
чистые металлы;

интерметаллические и химические соединения металлов;

керамические материалы.

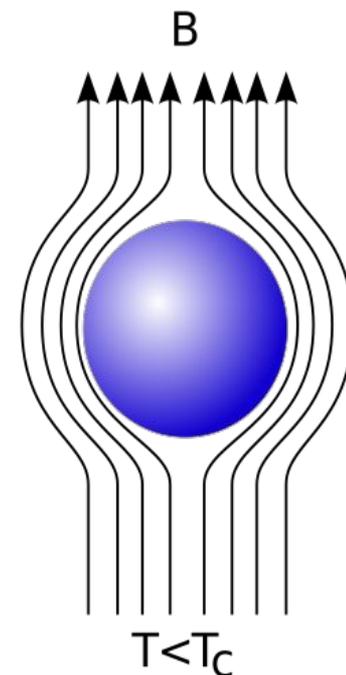
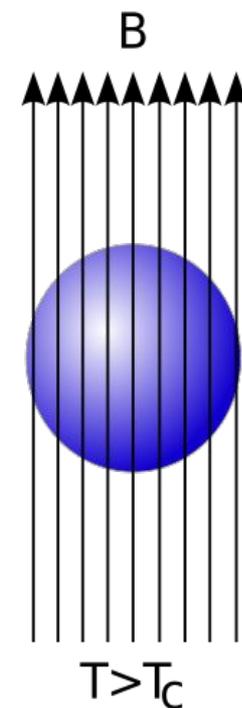
3.2. Сверхпроводимость

- это явление резкого уменьшения удельного сопротивления металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю.

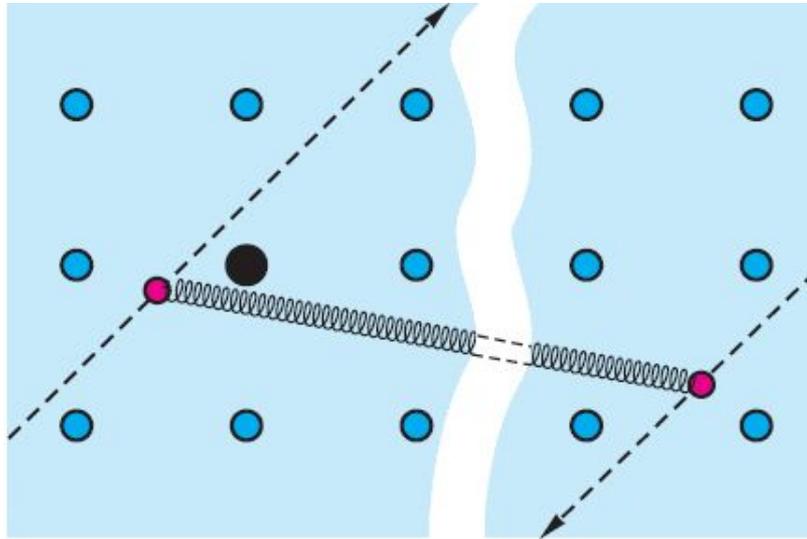


Впервые сверхпроводимость была обнаружена у ртути ($T_{CB} = 4,2$ K) в 1911 году голландским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом.

Одним из главных отличий сверхпроводников от идеальных проводников является эффект Мейснера, открытый в 1933 году, т.е. полное вытеснение магнитного поля из материала (диамагнетизм) при переходе в сверхпроводящее состояние.

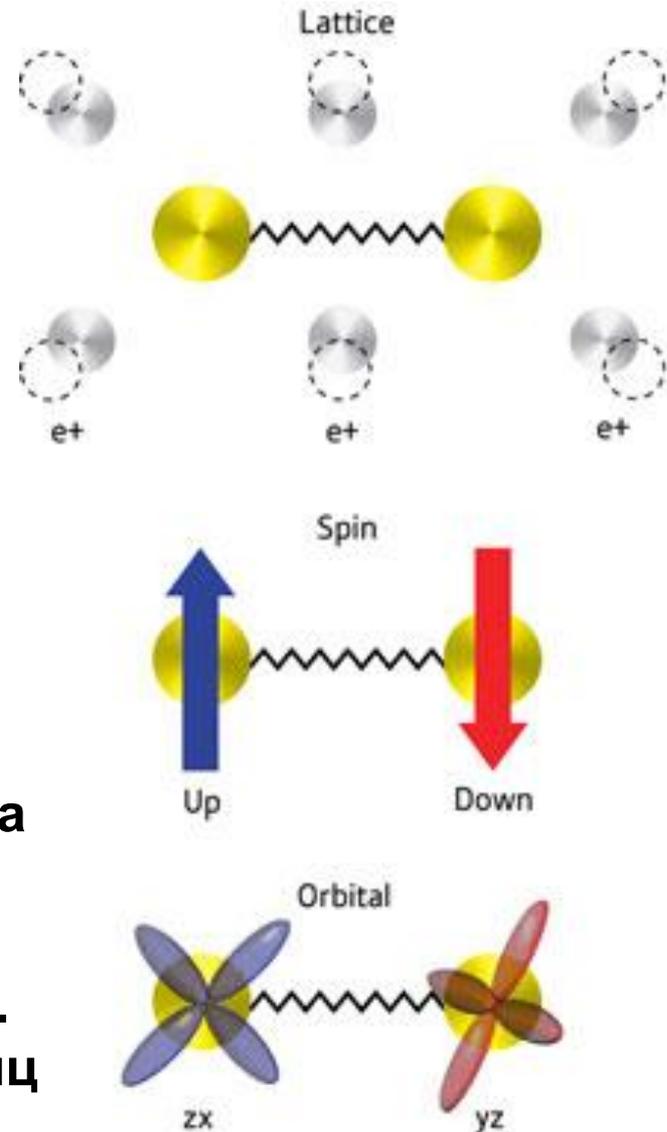


Куперовская пара электронов сверхпроводящие электроны



собственные колебания решетки
согласованы с электронной волной

Для двух электронов, находящихся на
расстоянии порядка атомного
($d \sim 10^{-8}$ см),
Энергия магнитной связи $W \approx 10^{-4}$ эВ.
Это соответствует температуре частиц
порядка 1 К.



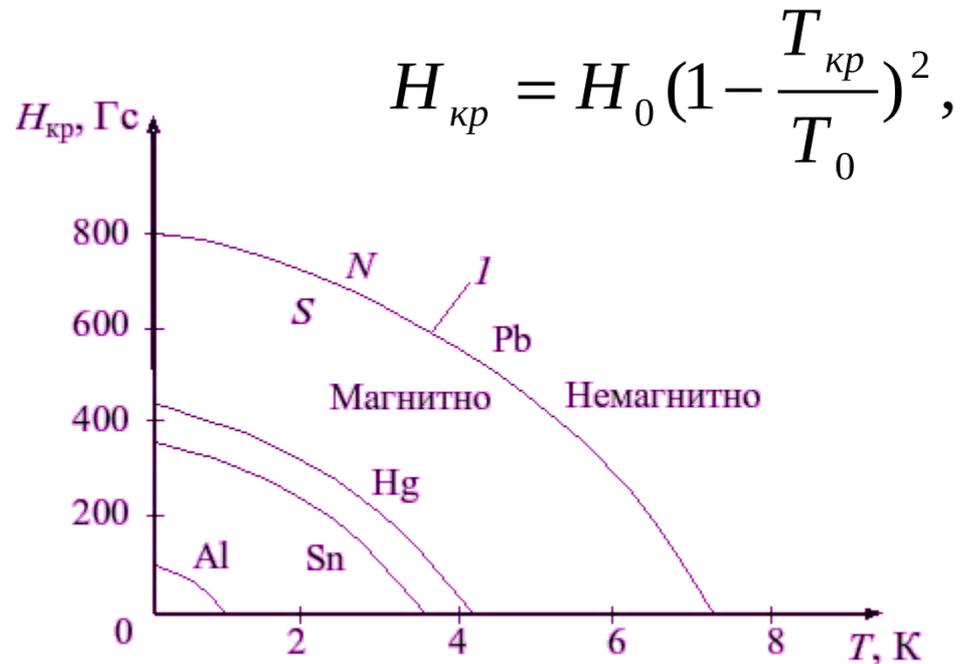


Критическое магнитное поле

В магнитном поле с напряженностью H энергия переворота частицы со спином $\frac{1}{2}$ равна $2\mu H$. Сравнивая эту энергию с энергией, необходимой для переворота электрона и разрыва куперовской пары в сверхпроводящем металле, получим правильную оценку так называемого критического магнитного поля, разрушающего сверхпроводимость: $H \sim 10$ кГс, магнитная индукция ~ 1 Тл.



Рис. а



$$H_{кр} = H_0 \left(1 - \frac{T_{кр}}{T_0}\right)^2,$$

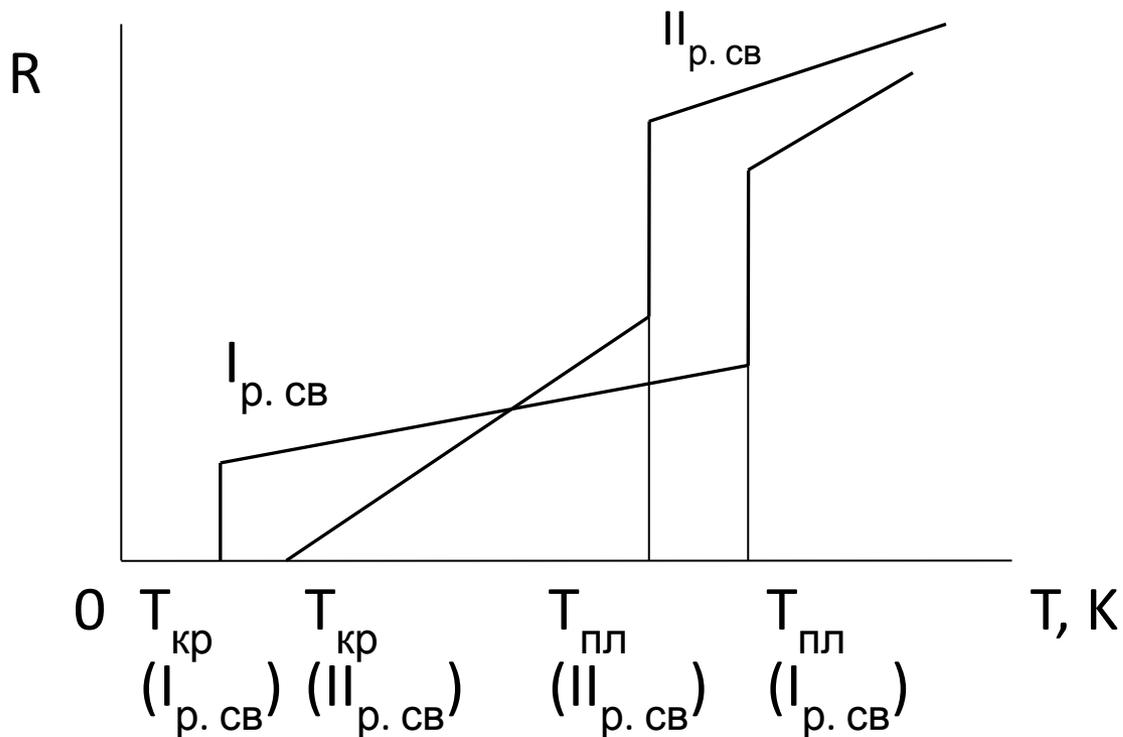


Параметры сверхпроводников

Материал	Критическая температура $T_{кр}$, К	Критическое магнитное поле $H_{кр}$, кА/м
Цинк (Zn)	0,88	4,24
Алюминий (Al)	1,2	8
Кадмий (Cd)	0,56	2,5
Ртуть (Hg)	4,15	32,8
Свинец (Pb)	7,2	64,5
Ниобат олова (Nb_3Sn)	18,1	$19,5 \cdot 10^3$

Значение ρ составляет $\sim 10^{-25}$ Ом*м, что в 10^{17} раз меньше удельного сопротивления меди при $20^{\circ}C$.

Мягкие и твердые сверхпроводники



Зависимость сопротивления
сверхпроводников I_p и II_p от температуры

Твердые сверхпроводники обладают рядом особенностей:

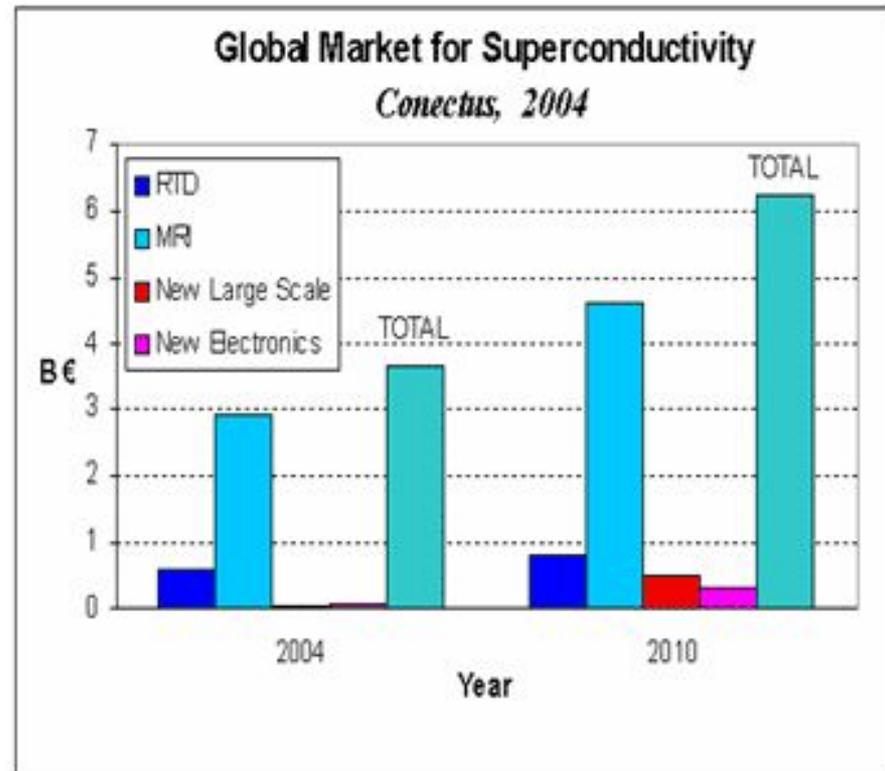
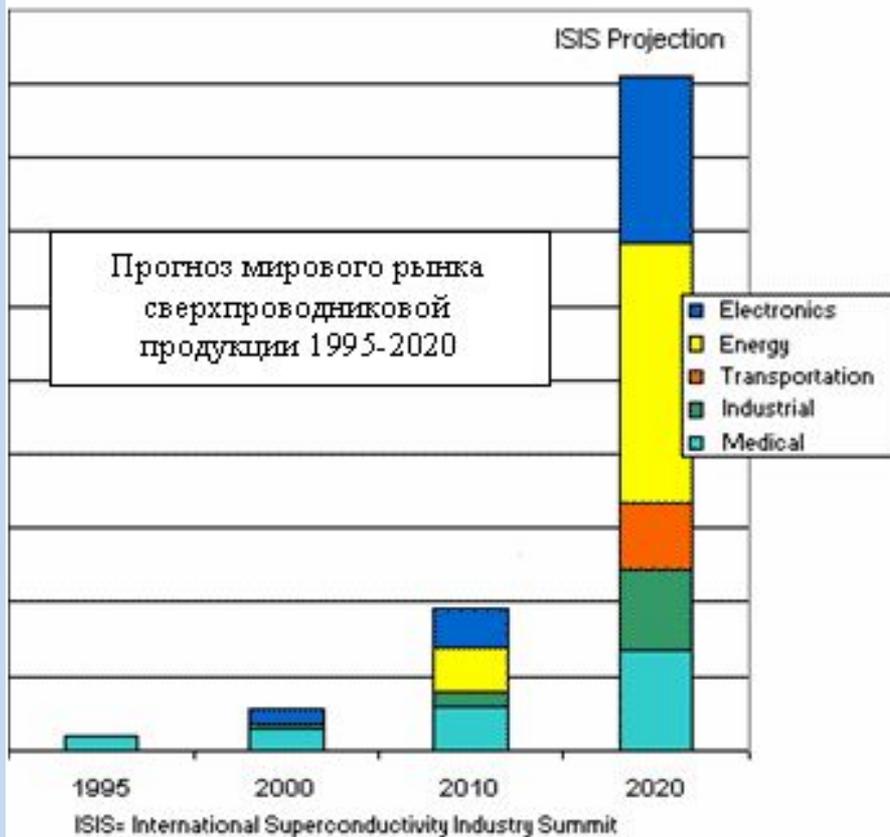
1. При охлаждении переход в сверхпроводящее состояние происходит не резко (как у мягких и СВП), а на протяжении некоторого температурного диапазона.
2. При изменениях магнитной индукции могут также наблюдаться промежуточные состояния между СВП и нормальным.
3. Эффект Майснера-Оксенфельда-Аркадьева у них выражен не полностью.
4. Замечается тенденция к рассеянию энергии при пропускании через них переменного тока.
5. СВП свойства в большой степени зависят от технологического режима изготовления и т. д.

Применение сверхпроводников в мощных магнитах, трансформаторах, генераторах, линиях передач сводит к нулю потери в проводниках и позволяет значительно повышать плотность тока и напряженность магнитного поля.

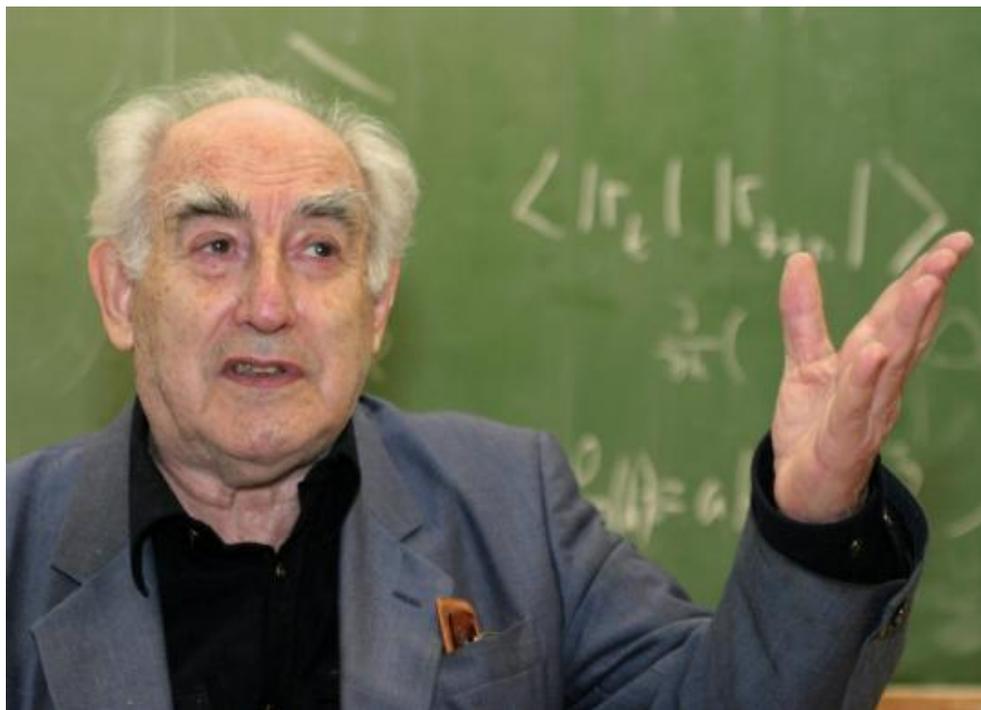
Маломощная электроника (*Джозефсоновский переход*).



Прогноз рынка сверхпроводников



Академики В.Л. Гинзбург, А.А. Абрикосов нобелевские лауреаты за работы по сверхпроводимости



<http://polit.ru/article/2012/12/04/superconductor/>

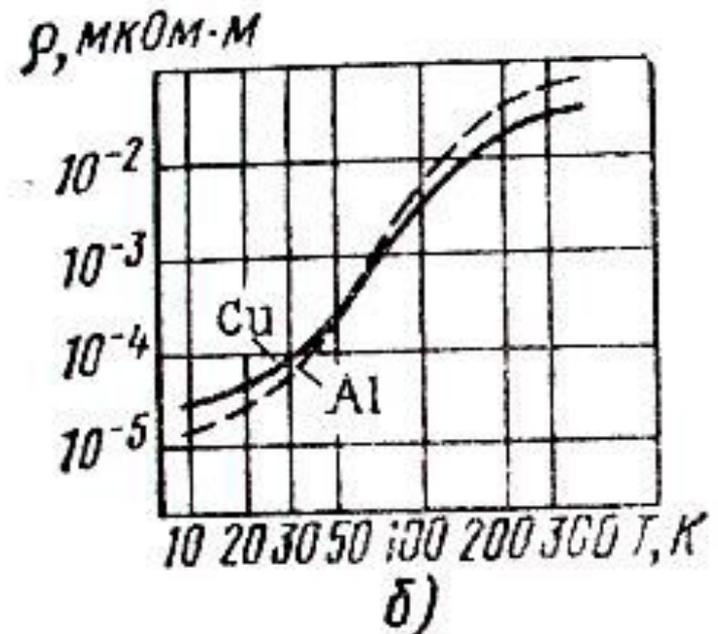


Криопроводимость (прежнее название – гиперпроводимость),

-явление достижения некоторыми металлами при криогенных температурах (но при температуре выше $T_{кр}$, если данный металл принадлежит к СВП) весьма малого значения ρ , в сотни и тысячи раз меньшего, чем ρ при нормальной температуре.

Cu и Al (охлаждение - жидкий водород)

Вi (охлаждение жидкий азот)



В основе линии – самый длинный (600 м), самый мощный (574 МВт) и самый высоковольтный (138 кВ) трехфазный ВТСП кабель в мире



http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein.php?menu=bull_subj&id=462

Для изготовления кабеля потребовалось 155 км ВТСП проводника – ленточных проводов ВТСП 1-го поколения Bi-2223



Классификация сверхпроводников

1. Наиболее известными сверхпроводниками являются **олово** ($T_{\text{сп}} = 3,72 \text{ K}$), **свинец** ($T_{\text{сп}} = 7,2 \text{ K}$), **ниобий** ($T_{\text{сп}} = 9,2 \text{ K}$). У остальных металлов сверхпроводимость наблюдается или при охлаждении под очень высоким давлением - до $108...109 \text{ Па}$, или в тонких пленках этих материалов.

2. Широкий класс сверхпроводников представляют **сплавы**, интерметаллические соединения и химические соединения металлов. Таких сверхпроводников известно более 1000. Наиболее известными из них являются соединения **V_3Ga** ($T_{\text{сп}} = 14,8 \text{ K}$), **станнид ниобия Nb_3Sn** ($T_{\text{сп}} = 18,0 \text{ K}$), **германид ниобия Nb_3Ge** ($T_{\text{сп}} = 23,3 \text{ K}$).

3. Разработаны **сверхпроводящие керамические материалы** сложных химических составов **на основе редкоземельных металлов**, обладающих сверхпроводимостью при сравнительно высоких температурах, приближающихся к температуре жидкого азота. К ним относятся материалы **$La_{1,8}Sr_{0,2}CuO_4$** ($T_{\text{сп}} = 36 \text{ K}$), **$La_{1-x}Ba_xCu_yO_{3-y}$** ($T_{\text{сп}} = 56 \text{ K}$), **$YBa_2Cu_3O_{6,5}$** ($T_{\text{сп}} = 82 \text{ K}$).

В настоящее время налажен выпуск сверхпроводящих материалов в виде проволоки и лент, а также полуфабрикатов для изготовления на их основе тонких пленок методом пленочной микроэлектроники.



Спасибо за внимание!

