

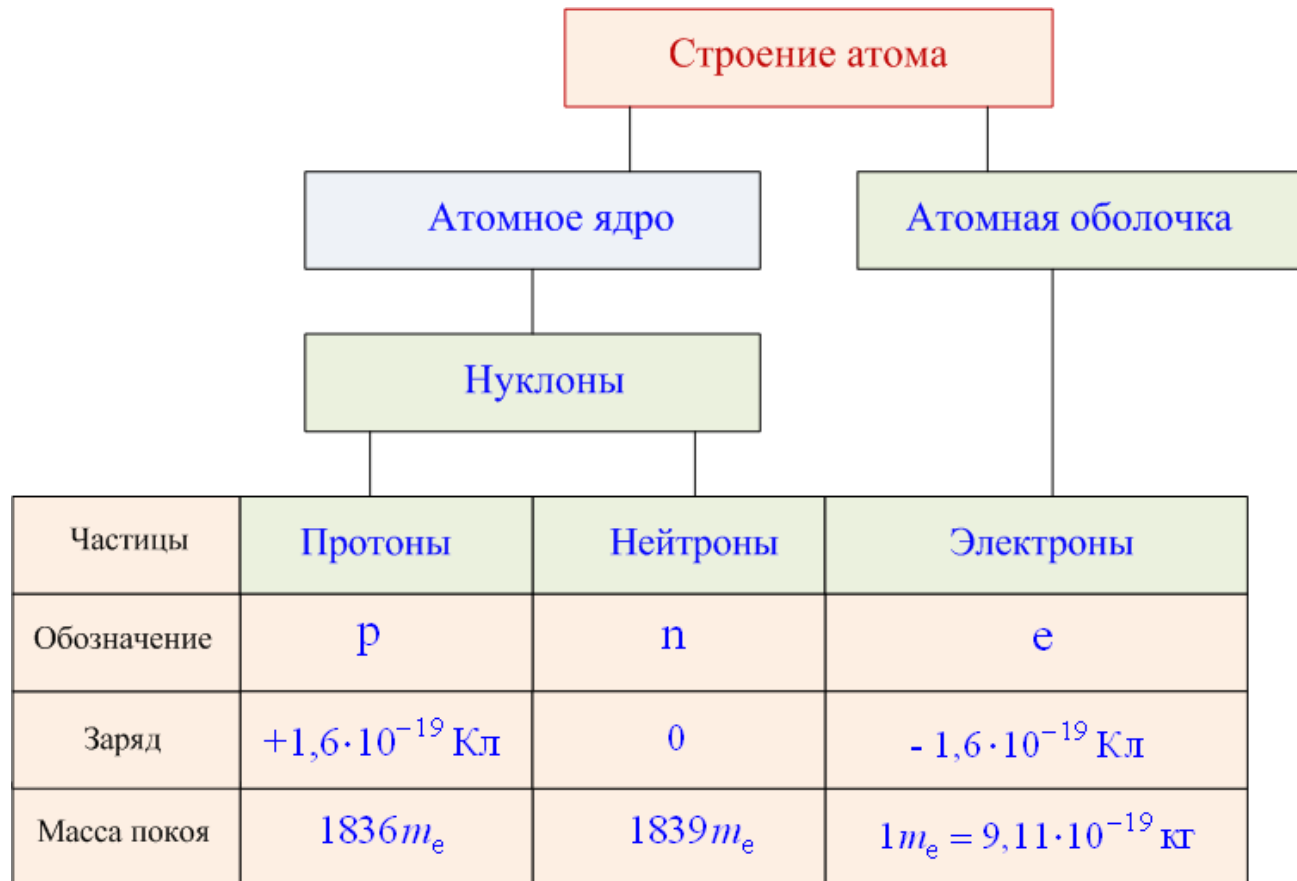
Дисциплина
«Материалы электронной техники»

ТЕМА 2: «Проводниковые материалы»

Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

Физическая природа электропроводности металлов.

Современные представления об электронном строении материалов, распределении электронов по энергетическим состояниям, их взаимодействии с другими элементарными частицами и кристаллической решеткой дает *квантовая теория*.



Физическая природа электропроводности металлов.

Атомная структура алюминия

Конфигурация электронного облака	$1s^2 2s^2 1p^6 3s^2 3p^1$	<p>ядро р: 13 п: 14 е: 13 цвет электронов: S P</p>
Число протонов p	13	
Число нейтронов n	14	
Число электронов e	13	

Физическая природа электропроводности металлов.

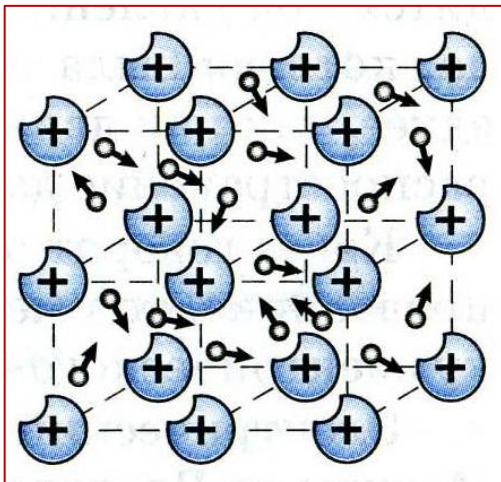
Фрагмент периодической системы элементов Д.И. Менделеева:

Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

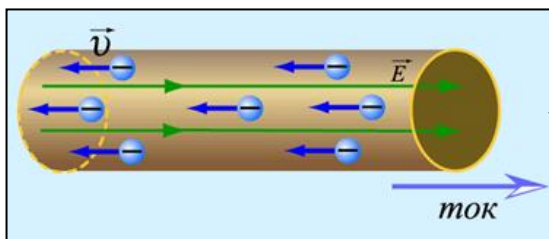
Атомная масса, относительная		186.207	Atomic mass, relative									
Атомный номер. Обозначение		75Re	Atomic No. Symbol									
Распределение электронов		[Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ²	Electron configuration									
Температура плавления (°C)		3180	Melting point (°C)									
Температура кипения (°C)		5627	Boiling point (°C)									
Электроотрицательность (по Полингу/по Аллреду и Рохову)		1.9/1.46	Electronegativity (Pauling/Allred & Rochov)									
Название		Rhenium	Name									
Латинское название		Рений <i>Rhenium</i>	Latin name									
<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Groups 1...18 IUPAC 1989 Groups IA...VIII...0 IUPAC 1970 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: x-small;"> Группы 1...18 ИЮПАК, 1989 Группы IA...VIII...0 ИЮПАК, 1970 </div>												
		13	14	15								
		IIIA	IVA	VA								
		10.811	12.011	14.00674								
		5 B	6 C	7 N								
		2s ² 2p ¹	2s ² 2p ²	2s ² 2p ³								
		2210 ~2600	~3550 4827	-209.86 -195.8								
		2.04/2.01	2.55/2.50	3.04/3.07								
		Boron Бор <i>Borium</i>	Carbon Углерод <i>Carboneum</i>	Nitrogen Азот <i>Nitrogenium</i>								
		26.981538	28.0855	30.973761								
		13 Al	14 Si	15 P								
		3s ² 3p ¹	3s ² 3p ²	3s ² 3p ³								
		660.37 2467	1412 2355	44.14 280								
		1.61/1.47	1.90/1.74	2.19/2.06								
		Aluminium [Aluminum] Алюминий	Silicon Кремний <i>Silicium</i>	Phosphorus Фосфор								
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA
44.955910	47.867	50.9415	51.9961	54.938046	55.845	58.933200	58.6934	63.546	65.39	69.723	72.61	74.92160
21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As
3d ⁴ 4s ²	3d ² 4s ²	3d ³ 4s ²	3d ⁴ 4s ¹	3d ⁵ 4s ²	3d ⁶ 4s ²	3d ⁷ 4s ²	3d ⁸ 4s ²	3d ¹⁰ 4s ¹	3d ¹⁰ 4s ²	3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	3d ¹⁰ 4s ² 4p ³
1541 2831 1.36/1.20	1670 3287 1.54/1.32	1890 3380 1.63/14.5	1857 2672 1.66/1.56	1244 1962 1.55/1.60	1535 2750 1.83/1.64	1495 2870 1.88/1.70	1453 2732 1.91/1.75	1083.4 2567 1.901.75	419.88 907 1.65/1.66	29.78 2403 1.81/1.82	937.4 2830 2.01/2.02	817 (3,7MPa) субл.615 2.18/220
Scandium Скандий	Titanium Титан	Vanadium Ванадий	Chromium Хром	Manganese Марганец <i>Manganum</i>	Iron Железо <i>Ferrum</i>	Cobalt Кобальт <i>Cobaltum</i>	Nickel Никель <i>Niccolum</i>	Copper Медь <i>Cuprum</i>	Zinc Цинк <i>Zincum</i>	Gallium Галлий	Germanium Германий	Arsenic Мышьяк <i>Arsenicum</i>
88.90585	91.224	92.90638	95.94	(97)	101.07	102.90550	106.42	107.8682	112.411	114.818	118.710	121.760
39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb
4d ¹ 5s ²	4d ² 5s ²	4d ⁴ 5s ¹	4d ⁵ 5s ¹	4d ⁵ 5s ¹	4d ⁷ 5s ¹	4d ⁸ 5s ¹	4d ¹⁰	4d ¹⁰ 5s ¹	4d ¹⁰ 5s ²	4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	4d ¹⁰ 5s ² 5p ³
1522 3337 1.22/1.11	1852 4377 1.33/1.22	2468 4742 1.6/1.23	2617 4612 2.16/1.30	2172 4877 1.9/1.36	2310 3727 2.2/1.42	1966 3727 2.2/1.5	1552 3140 2.2/1.4	961.93 2212 1.9/1.4	320.9 765 1.7/1.5	156.78 2080 1.78/1.5	231.88 2270 1.96/1.7	630.5 1750 2.05/1.8
Yttrium Иттрий	Zirconium Цирконий	Niobium Ниобий	Molybdenum Молибден <i>Molybdaenum</i>	Technetium Технеций	Ruthenium Рутений	Rhodium Родий	Palladium Палладий	Silver Серебро <i>(Argentum)</i>	Cadmium Кадмий	Indium Индий	Tin Олово <i>Stannum</i>	Antimony Сурьма <i>(Stibium)</i>

Физическая природа электропроводности металлов.

Металлы, согласно квантовой теории, *имеют кристаллическое строение*.



*В узлах кристаллической решетки находятся положительные ионы, окруженные коллективизированными атомами (электронным газом). Свободные электроны хаотически перемещаются по кристаллу со средней **тепловой скоростью** $u = 10^5$ м/с*



*В электрическом поле напряженностью E электроны получают добавочную скорость упорядоченного движения – **скорость дрейфа**, благодаря чему u возникает электрический ток.*

Физическая природа электропроводности металлов.

Согласно квантовой теории величина удельной проводимости σ определяется выражением:

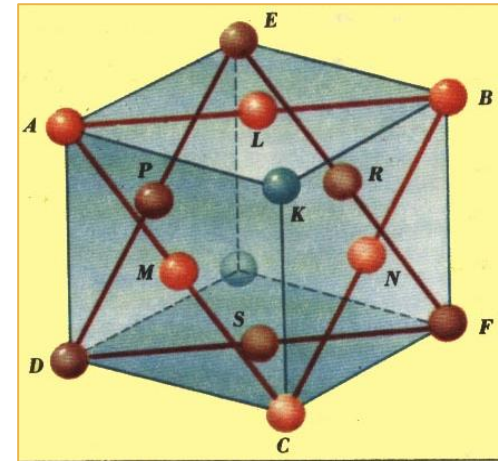
$$\sigma = \frac{q_e^2 \cdot n}{m^* \cdot V_F} \cdot \lambda \quad \text{или} \quad \sigma = \left(\frac{8 \cdot \pi}{3} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{q_e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot \lambda}{h},$$

где q_e – заряд электрона; λ – длина свободного пробега электрона (расстояние, которое проходит электрон за время между столкновениями с узлами кристаллической решетки); n – концентрация свободных электронов; h – постоянная Планка; V_F – тепловая скорость электронов, обладающих энергией, близкой к энергии Ферми E_F ; m^* – эффективная масса электрона в кристалле.

Концентрация свободных электронов в чистых металлах, характер их распределения по энергиям и энергия Ферми с повышением температуры почти не изменяется. Поэтому электропроводность металла определяется, в основном, средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от электронного строения атомов и типа кристаллической решетки.

Физическая природа электропроводности металлов.

Наибольшая длина свободного пробега наблюдается в металлах с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой (Ag, Cu, Au, Al), которые и являются лучшими проводниками.



Металлы с самой высокой удельной электропроводностью



$0,015 \cdot 10^{-9}$ Ом·м



$0,017 \cdot 10^{-9}$ Ом·м



$0,023 \cdot 10^{-9}$ Ом·м



$0,027 \cdot 10^{-9}$ Ом·м

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.

Квантовая теория показывает, что в идеальном кристалле электронная волна (движение свободных электронов в виде плоских электромагнитных волн, длина которых определяется соотношением де Бройля) распространяется в строго периодическом потенциальном поле без рассеяния энергии. Это означает, что в идеальном кристалле длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а удельное электрическое сопротивление такого кристалла равно нулю.

Реальные металлы не являются идеальными кристаллами – любые дефекты кристаллического строения вызывают снижение электропроводности.

Дефектами кристалла называют всякое устойчивое нарушение трансляционной симметрии кристалла – идеальной периодичности кристаллической решетки.

Рассеяние электронов – процесс взаимодействия электронов проводимости с нарушениями идеальной периодичности кристаллов, сопровождающийся переходом электрона из состояния с импульсом p в состояние с импульсом p' .

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.



Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.

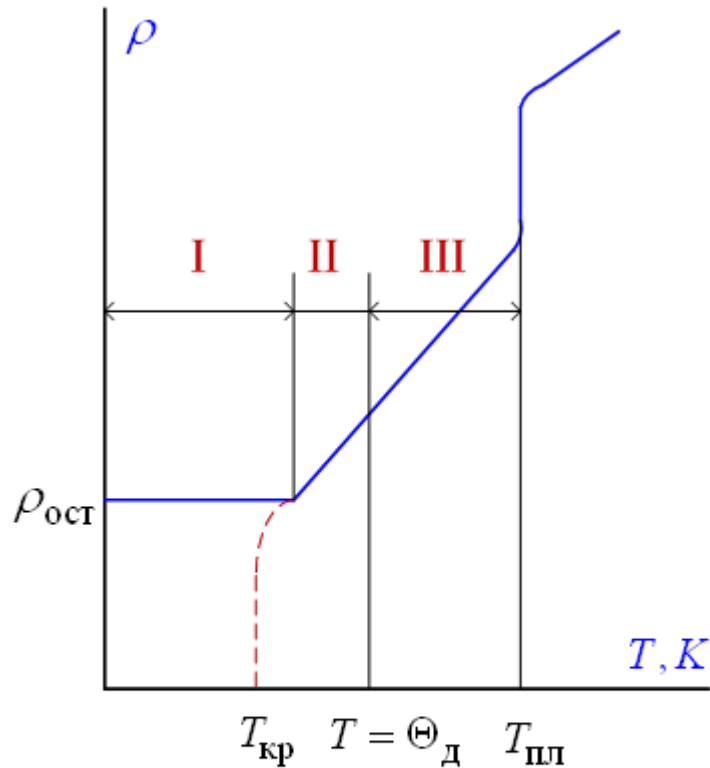
Относительное изменение удельного электрического сопротивления металлов при изменении температуры характеризует *температурный коэффициент удельного сопротивления* α_ρ (чаще используется обозначение ТК_ρ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления):

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}.$$

Физический смысл температурного коэффициента удельного сопротивления: температурный коэффициент удельного сопротивления характеризует относительное изменение удельного электрического сопротивления при изменении температуры на один градус и имеет размерность, обратную температуре.

У металлов значение ТК_ρ положительное, что связано с увеличением амплитуды тепловых колебаний узлов кристаллической решетки.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.



$T_{кр}$ — критическая температура;

Θ_d — температура Дебая;

$T_{пл}$ — температура плавления.

В области сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю, значение ρ практически не зависит от температуры (область I) и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{ост}$.

В области I у некоторых металлов наблюдается состояние сверхпроводимости. В узкой переходной области II (до температуры Дебая) удельное электрическое сопротивление растет по степенной зависимости. При $T > \Theta_d$, когда спектр колебаний возбужден полностью, увеличение амплитуды колебаний с ростом температуры приводит к линейному росту удельного электрического сопротивления примерно до температуры плавления — область III.

Рисунок 2.1 – Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металлов.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.

В диапазоне температур, где зависимость $\rho = f(T)$ близка к линейной (область III), допустима кусочно-линейная аппроксимация этой зависимости, и величина удельного электрического сопротивления может быть рассчитана по формуле:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left[1 + \alpha_\rho (T - T_0) \right],$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление при начальной температуре (например, при температуре $T_0 = 293 \text{ K}$).

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается резкое увеличение удельного сопротивления (в 1,5...2 раза), связанное с нарушением ближнего порядка в расположении атомов. Исключение составляют висмут (Bi), сурьма (Sb), галлий (Ga), объем которых при плавлении уменьшается, что сопровождается уменьшением удельного сопротивления.

Влияние примесей и дефектов на удельное сопротивление металлов.

Примеси вносят наиболее существенный вклад в величину остаточного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$.

Желательно запомнить:

1) Атомы любого элемента примеси повышают удельное электрическое сопротивление, даже если сама примесь обладает большей электропроводностью.

2) При отжиге металлов и сплавов удельное электрическое сопротивление резко снижается.

3) Пластическая деформация вызывает снижение проводимости, то есть увеличение удельного электрического сопротивления. Для чистых металлов это снижение составляет несколько процентов, для них пластическую деформацию можно использовать как способ упрочнения без существенных потерь в электропроводности. Для металлических сплавов снижение электропроводности в результате наклепа может составлять до 25%. Для восстановления электропроводности после пластической деформации проводят рекристаллизационный отжиг.

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

При протекании по проводнику быстроизменяющегося тока наблюдается неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности проводника и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление называется *скин-эффектом* или *поверхностным эффектом*.

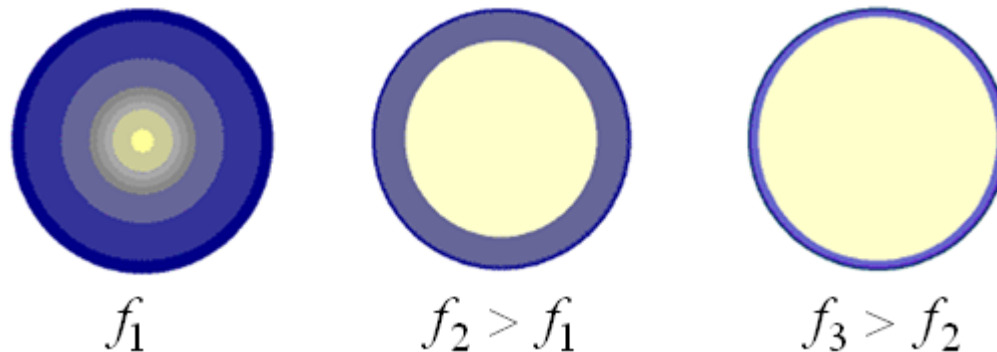


Рисунок 2.2 – Скин-эффект (неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника).

Природа скин-эффекта: Скин-эффект обусловлен тем, что при распространении электромагнитной волны *в проводящей среде возникают вихревые токи*, в результате чего часть электромагнитной энергии преобразуется в тепло. Это и приводит к затуханию напряженностей электрического и магнитного полей электромагнитного поля по экспоненциальному закону. Плотность тока изменяется по тому же закону, что и напряженность электрического поля, так как $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$.

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Закон изменения плотности тока в зависимости от расстояния x от поверхности проводника также имеет вид затухающей экспоненты:

$$j = j_0 \cdot \exp(-x / \Delta),$$

где Δ – глубина проникновения поля в проводник; j_0 – плотность тока на поверхности проводника (при $x = 0$).

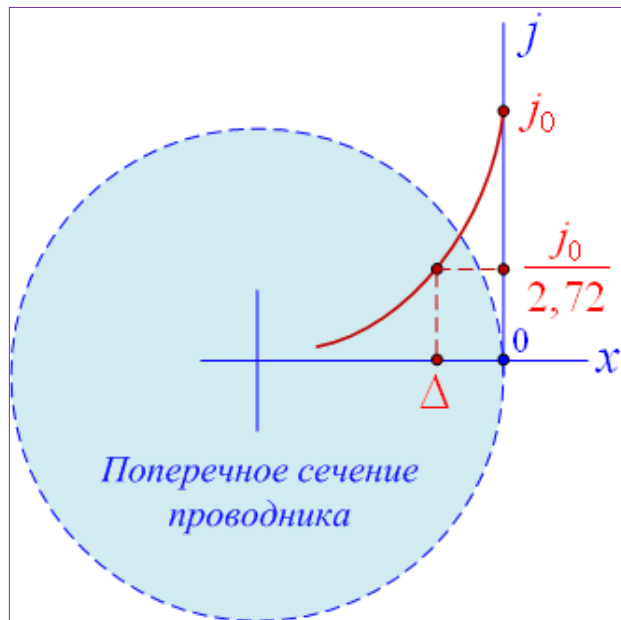


Рисунок 2.3 – Закон изменения плотности тока в зависимости от расстояния x от поверхности проводника.

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Чем выше частота ν электромагнитного поля и больше магнитная проницаемость μ , тем сильнее вихревое электрическое поле, а чем больше проводимость σ проводника, тем больше плотность тока и рассеиваемая в единице объема мощность. Другими словами, чем больше ν, μ, σ , тем сильнее проявляется скин-эффект.

Связь глубины Δ проникновения поля с физическими параметрами вещества определяется выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0}},$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; ω – круговая частота.

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Физический смысл глубины проникновения поля (глубины скин-слоя) – это расстояние, на котором плотность тока уменьшается в 2,72 раза по отношению к значению на поверхности.

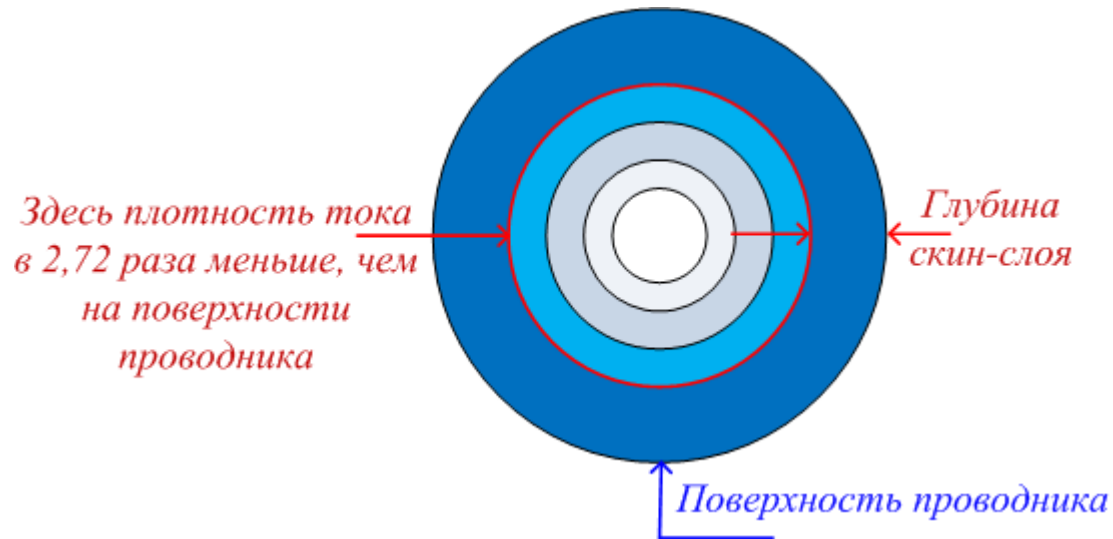


Рисунок 2.4 – Физический смысл глубины проникновения поля (глубины скин-эффекта).

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Методы борьбы со скин-эффектом

Применение проводников различного сечения

Плоских
(в виде лент)

Трубчатых
(полых внутри)

Нанесение на поверхность проводника слоя металла с более низким удельным сопротивлением

Применение многожильного провода типа литцендрат

Примечание: Провод литцендрат изготавливается сплетением изолированных медных проводов в жгут так, что положение каждого изолированного провода в жгуте меняется по длине жгута - каждый провод идет снаружи, проходит через центр жгута и выходит снова наружу.

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

В литературе можно найти рекомендуемые диаметры одиночной медной жилы с эмалевой изоляцией многожильного провода в зависимости от частоты.

Диаметр одиночной медной жилы многожильного провода типа литцендрат

Рабочая частота	Диаметр одиночной медной жилы без изоляции, мм	Рабочая частота	Диаметр одиночной медной жилы без изоляции, мм
$60\text{Гц} \leq f \leq 1\text{кГц}$	0,375	$50\text{кГц} \leq f \leq 100\text{кГц}$	0,100
$1\text{кГц} \leq f \leq 10\text{кГц}$	0,250	$100\text{кГц} \leq f \leq 200\text{кГц}$	0,080
$10\text{кГц} \leq f \leq 20\text{кГц}$	0,180	$200\text{кГц} \leq f \leq 300\text{кГц}$	0,063
$20\text{кГц} \leq f \leq 50\text{кГц}$	0,125	$350\text{кГц} \leq f \leq 850\text{кГц}$	0,050

Диаметр D одиночной медной жилы (с эмалевой изоляцией) многожильного провода типа литцендрат можно определить по формуле

$$D[\text{мм}] \leq \frac{1}{\sqrt{f} [\text{кГц}]}$$

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Пример 1: Вычислить глубину Δ_{f_1} проникновения электромагнитного поля в медный проводник на частоте $f_1 = 100 \cdot 10^3 \text{ Гц}$. *Решение примера 1:*

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0}}, \quad D[\text{мм}] \leq \frac{1}{\sqrt{f} [\text{кГц}]}, \quad 50 \text{ кГц} \leq f \leq 100 \text{ кГц},$$
$$D = 0,100 \text{ мм.}$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \nu \cdot \mu \cdot \mu_0}}.$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \nu \cdot \mu \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{0,017 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \pi \cdot 10^{-7}}} = 0,208 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$D \leq \frac{1}{\sqrt{100}} = 0,1 \text{ мм.} \quad D \leq \frac{1}{\sqrt{50}} = 0,14 \text{ мм.}$$

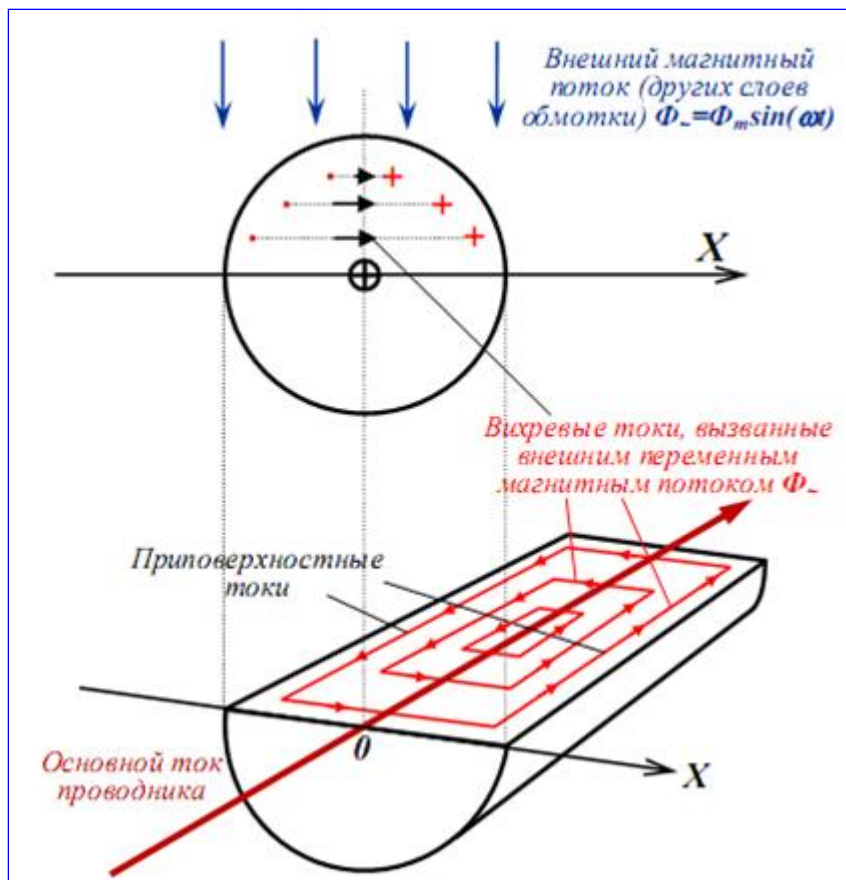
Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.

Анализ полученных результатов при решении примера 1:

$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0}}$	$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \nu \cdot \mu \cdot \mu_0}} = 0,208 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$
$D [\text{мм}] \leq \frac{1}{\sqrt{f} [\text{кГц}]}$	$D \leq \frac{1}{\sqrt{50}} = 0,14 \text{ мм.} \quad D \leq \frac{1}{\sqrt{100}} = 0,1 \text{ мм.}$
$50 \text{ кГц} \leq f \leq 100 \text{ кГц,}$ $D = 0,100 \text{ мм.}$	$50 \text{ кГц} \leq f \leq 100 \text{ кГц, } D = 0,100 \text{ мм.}$

*Влияние частоты на сопротивление проводников может быть связано не только со скин-эффектом, но и с макроскопической формой проводника. Сопротивление криволинейного проводника может значительно отличаться от сопротивления прямолинейного проводника при всех прочих равных условиях, особенно, если некоторые участки проводника близко расположены друг к другу, и появляется возможность их взаимного влияния друг на друга посредством изменяющихся магнитных полей. Указанное явление называется **эффектом близости** и особенно сильно проявляется в проводниках, свернутых в виде спирали, например в проводах магнитных элементов электронных устройств.*

Удельное сопротивление проводников на высоких частотах.



Эффект близости вызывает дополнительные потери в проводниках находящихся в непосредственной близости от других проводников с током. Эти потери являются результатом вихревых токов, создаваемых в проводнике под действием токов протекающих в близлежащих проводниках. Следует отметить, что эффект близости имеет тенденцию становиться доминирующим в образовании потерь в проводах магнитных элементов электронных устройств, особенно когда обмотки многослойные.

Рисунок 2.5 – Эффект близости вызывает дополнительные потери в проводниках.

Материалы высокой проводимости.



Материалы высокой проводимости. Проводниковая медь.

<i>Медь в периодической системе элементов Д.И. Менделеева</i>	<i>Самородная медь</i>	<i>Медная руда</i>	<i>Марка меди (ГОСТ 859-78)</i>
 <p>63.546 29 Cu 3d¹⁰4s¹ 1083.4 2567 1.901.75 Copper Медь Cuprum</p>			

Медь по электропроводности уступает только серебру. Медь обладает достаточно высокой механической прочностью и стойкостью к коррозии. При этом медь легко протягивается в проволоку малого диаметра (до 0,001 мм) и легко прокатывается в листы, ленту и фольгу (до 0,005 мм), хорошо паяется.

При холодной прокатке и волочении получают *твердотянутую медь* (МТ), которая благодаря наклепу приобретает повышенную твердость, упругость, предел прочности на разрыв, но при этом возрастает удельное сопротивление. После отжига получают *мягкую отожженную медь* (ММ).

Материалы высокой проводимости. Проводниковая медь.

Существует множество марок меди (ГОСТ 859-78), различающихся химическим составом. Максимальное содержание меди имеют марки М00к и М00б (не менее 99,99%).

Марка меди (ГОСТ 859-78)	Чистота меди	Способ изготовления меди (технология обработки)
М00к	высокочистая	катодная медь
М00б	высокочистая	безкислородная медь
М1р, М2р, М3р	технически чистая	раскисленная медь, содержание кислорода до 0,01%
М1, М2, М3	технически чистая	содержание кислорода 0,05 – 0,08%

Примечание: Буквой «М» в начале марки обозначают чистую медь и медно-никелевые прецизионные сплавы. После обозначения марки указывают способ изготовления меди: катодная медь, безкислородная медь, раскисленная медь, катодная переплавленная медь. Чистоту меди обозначают числом, стоящим после буквы «М». Чем меньше число, тем более чистый металл (00 – высокочистая; 1, 2, 3 – технически чистая). Строчные буквы в конце марки обозначают технологию обработки: к – катодная; б – безкислородная; р, ф – раскисленная.

Материалы высокой проводимости. Проводниковая медь.

Примеси, входящие в состав меди

1 группа

никель (Ni), цинк (Zn), сурьма (Sb), олово (Sn), алюминий (Al), мышьяк (As), железо (Fe), фосфор (P) и другие

Образуют с медью твердые растворы. Эти примеси, особенно сурьма и мышьяк, резко снижают электропроводность и теплопроводность меди.

2 группа

свинец (Pb), висмут (Bi) и другие

Практически не растворяются в меди, оказывают небольшое влияние на электропроводность меди.

3 группа

кислород (O) и сера (S)

Образуют с медью хрупкие химические соединения. Кислород уменьшает электропроводность меди. Сера улучшает обрабатываемость меди резанием, а кислород образует закись меди и вызывает «водородную болезнь», которая приводит к значительной потере прочности.

Материалы высокой проводимости. Конструкционные медные сплавы.

Латуни (сплавы медно-цинковые)

*Латуни литейные –
ГОСТ 17711-93 «Сплавы медно-цинковые
(латуни) литейные. Марки.»*

Пример маркировки

Латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 – литейная латунь с содержанием 23% цинка, 6% алюминия, 3% железа, 2% марганца, остальное медь.

В марке литейной латуни после буквы Л стоит буква Ц и сразу указывается содержание цинка (в весовых процентах). Далее в таком же порядке приводятся остальные легирующие элементы с их содержанием, остальное – медь.

*Латуни обрабатываемые давлением –
ГОСТ 15527-2004 «Сплавы медно-цинковые
(латуни), обрабатываемые давлением. Марки.»*

Пример маркировки

Латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 – обрабатываемая давлением латунь содержит 75% меди, легирована 2% алюминия, 2,5% никеля, 0,5% кремния, 0,5% марганца, остальное цинк.

В марке латуни, обрабатываемой давлением, после буквы Л идет перечень всех букв легирующих элементов, входящих в состав сплава. Первая цифра указывает содержание меди, остальные цифры указывают содержание легирующих элементов. Содержание цинка получается как остаток до 100%.

Материалы высокой проводимости. Конструкционные медные сплавы.

Т а б л и ц а 2.1 – Условные обозначения химических элементов в марках цветных металлов и сплавов

<i>Элемент</i>	<i>Химический символ</i>	<i>Обозначение элемента</i>	<i>Элемент</i>	<i>Химический символ</i>	<i>Обозначение элемента</i>
<i>Алюминий</i>	<i>Al</i>	А	<i>Ртуть</i>	<i>Hg</i>	Р
<i>Бериллий</i>	<i>Be</i>	Б	<i>Свинец</i>	<i>Pb</i>	С
<i>Железо</i>	<i>Fe</i>	Ж	<i>Сурьма</i>	<i>Sb</i>	Су
<i>Иридий</i>	<i>Ir</i>	И	<i>Теллур</i>	<i>Te</i>	Те
<i>Кадмий</i>	<i>Cd</i>	Кд	<i>Титан</i>	<i>Ti</i>	Т
<i>Кремний</i>	<i>Si</i>	К	<i>Фосфор</i>	<i>P</i>	Ф
<i>Магний</i>	<i>Mg</i>	Мг	<i>Хром</i>	<i>Cr</i>	Х
<i>Марганец</i>	<i>Mn</i>	Мц	<i>Цинк</i>	<i>Zn</i>	Ц
<i>Медь</i>	<i>Cu</i>	М	<i>Церий</i>	<i>Zr</i>	Цр
<i>Мышьяк</i>	<i>As</i>	Мш	<i>Палладий</i>	<i>Pd</i>	Пд
<i>Никель</i>	<i>Ni</i>	Н	<i>Золото</i>	<i>Au</i>	Зл
<i>Олово</i>	<i>Sn</i>	О	<i>Серебро</i>	<i>Ag</i>	Ср

Материалы высокой проводимости. Конструкционные медные сплавы.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, алюминием, бериллием, кремнием и некоторыми другими элементами.

Бронзы сочетают высокую электропроводность и теплопроводность с высокими механическими (в частности, упругими) свойствами, например, бериллиевая, кадмиевая, хромистая бронзы. Бронзы оловянные, алюминиевые и кремнистые, в которые, как правило, добавляются и другие легирующие элементы, применяются как **конструкционные немагнитные коррозионно-стойкие материалы**. Бронзы хорошо свариваются и паяются, обладают и хорошими антифрикционными свойствами.



Материалы высокой проводимости. Конструкционные медные сплавы.

В зависимости от состава, назначения и метода обработки бронзы делят на литейные оловянные (ГОСТ 613-79) и безоловянные (ГОСТ 493-79), обрабатываемые давлением оловянные (ГОСТ 5017-74) и безоловянные (ГОСТ 18175-78).

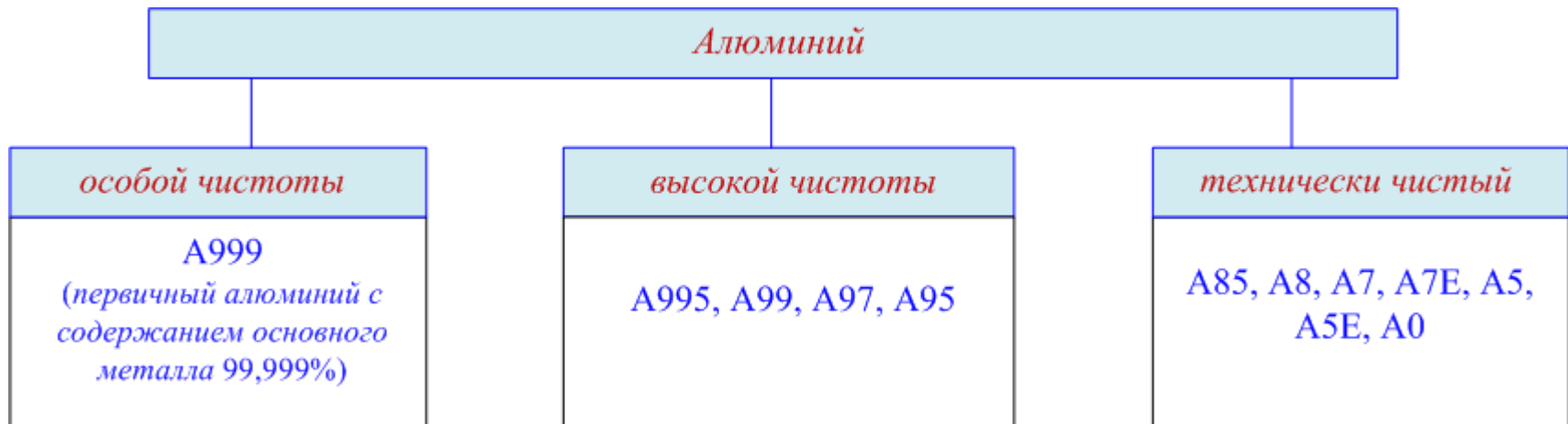


Материалы высокой проводимости. Проводниковый алюминий.



Основной недостаток алюминия – низкая механическая прочность. Алюминиевая проволока, применяемая в отожженном состоянии, имеет предел прочности 80...90 МПа и относительное удлинение 25...30%. К числу недостатков алюминия следует отнести также его склонность к электрохимической коррозии в месте контакта алюминиевого провода с медью. Из-за оксидной пленки возникают трудности при пайке алюминия.

Материалы высокой проводимости. Проводниковый алюминий.

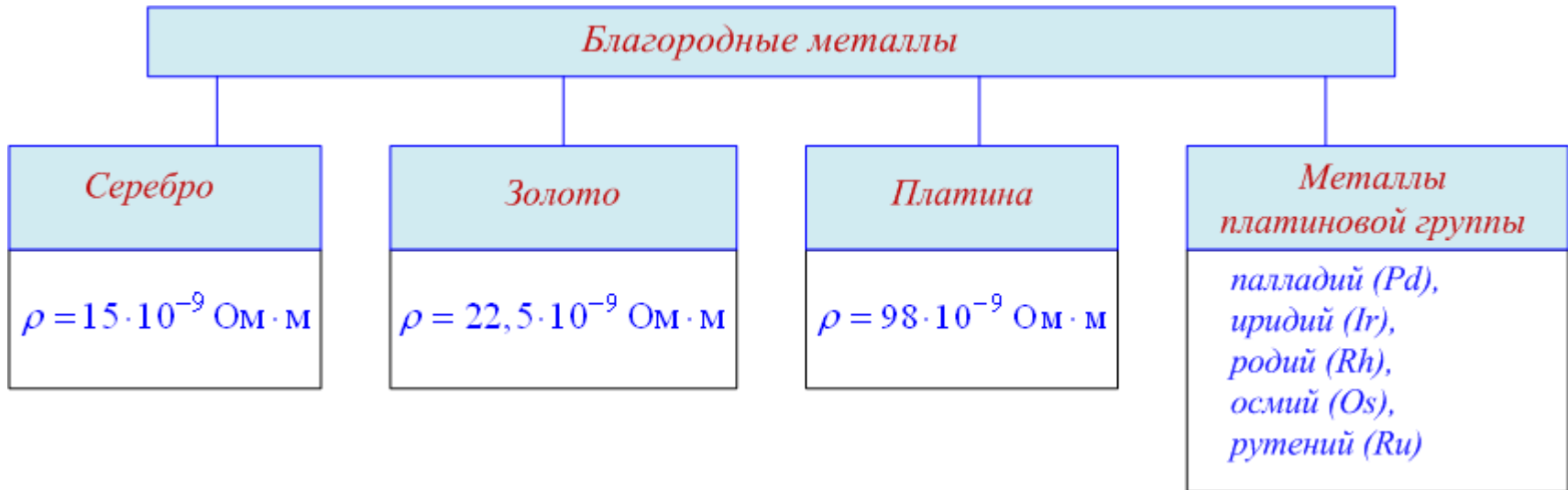


Алюминий первичный получают путем электролиза глинозема, а алюминий высокой чистоты – дополнительной электролитической рафинировкой. Примеси (Cu, Ag, Mg, Mn, V, Ti), образующие с алюминием твердые растворы, снижают его удельную проводимость (на 5-10% при содержании примеси 0,5% по массе). Менее заметно влияют на электропроводность Ni, Si, Fe, Zn. В электронной технике используют первичный алюминий с содержанием примесей 0,5%, 0,03% и 0,001%.

Материалы высокой проводимости. Благородные металлы.

Основное свойство благородных металлов – высокая коррозионная стойкость, обусловленная высоким значением электрохимического потенциала. Благородные металлы практически не окисляются в атмосферных условиях при комнатной и повышенной температуре, отличаются высокой пластичностью, но невысокой твердостью и прочностью.

Обладая высокой коррозионной стойкостью и низким переходным сопротивлением, благородные металлы широко используются в качестве материалов для электрических контактов.



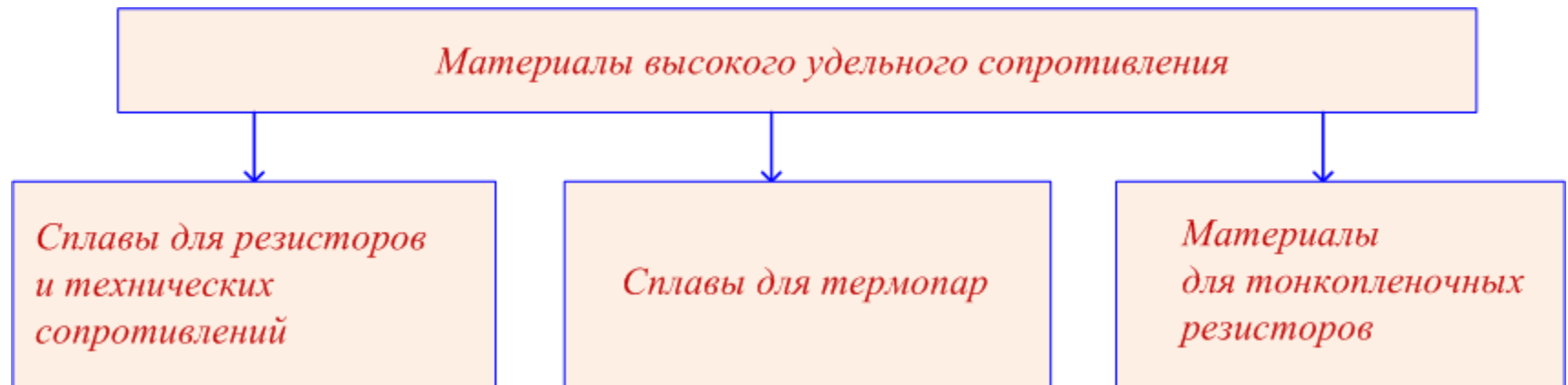
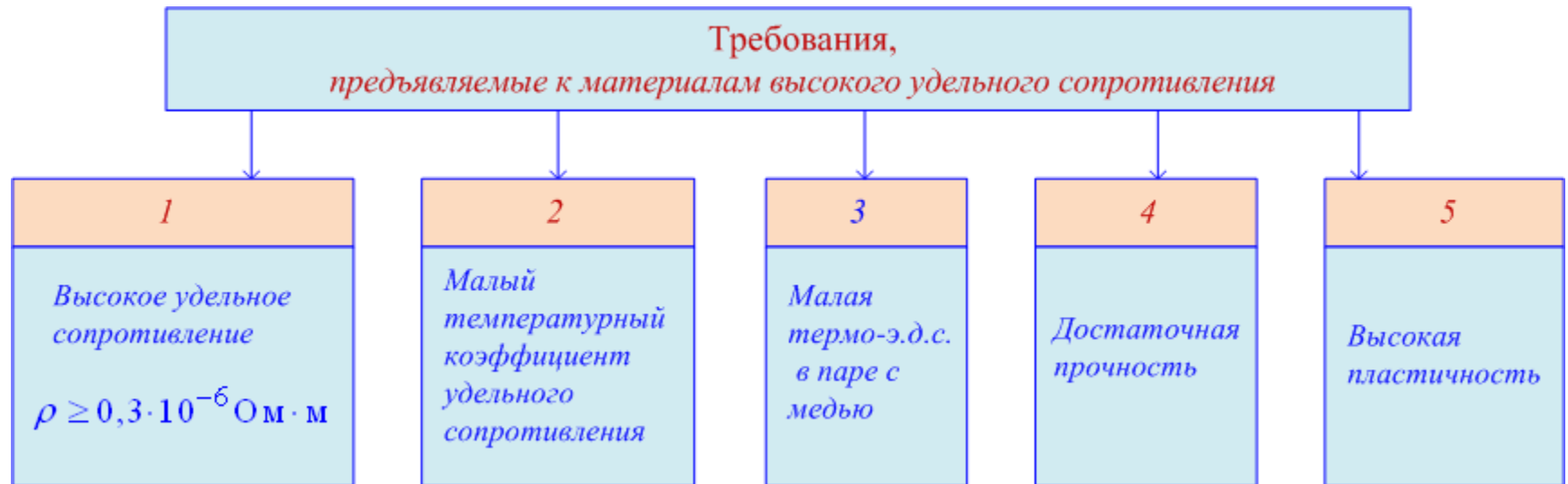
Тугоплавкие металлы.

К тугоплавким металлам относятся металлы с температурой плавления выше 1700 °С: вольфрам (W), молибден (Mo), тантал (Ta), ниобий (Nb), хром (Cr), цирконий (Zr), рений (Re). Чаще всего эти металлы получают методами порошковой металлургии с использованием электровакуумных технологий выплавки и очистки.

Тугоплавкие металлы применяют в изделиях электровакуумной техники, для изготовления прецизионных резисторов в интегральных микросхемах (рений), тонкопленочных конденсаторов высокой удельной емкости (тантал), высокотемпературных термопар (вольфрам и его сплавы с молибденом, иридием, рением).

Тугоплавкие металлы				
Вольфрам (W)	Молибден (Mo)	Рений (Re)	Тантал (Ta)	Ниобий (Nb)
$\rho = 15 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho = 50 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho = 214 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho = 155 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\rho = 160 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
$T_{\text{пл}} = 3400 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}} = 2620 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}} = 3180 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}} = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}} = 2500 \text{ }^\circ\text{C}$

Материалы высокого удельного сопротивления.



Материалы высокого удельного сопротивления.

Сплавы для резисторов и технических сопротивлений

*Манганин МНМц3-12
(Cu+3%Ni+12%Mn)*

$$\rho = 0,5 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$
$$\alpha_{\rho} = 0 \text{ К}^{-1}$$

*Для образцовых резисторов
и электроизмерительных
приборов высокого класса
точности.*

*Константан МНМц40-1,5
(Cu+40% Ni+1,5% Mn)*

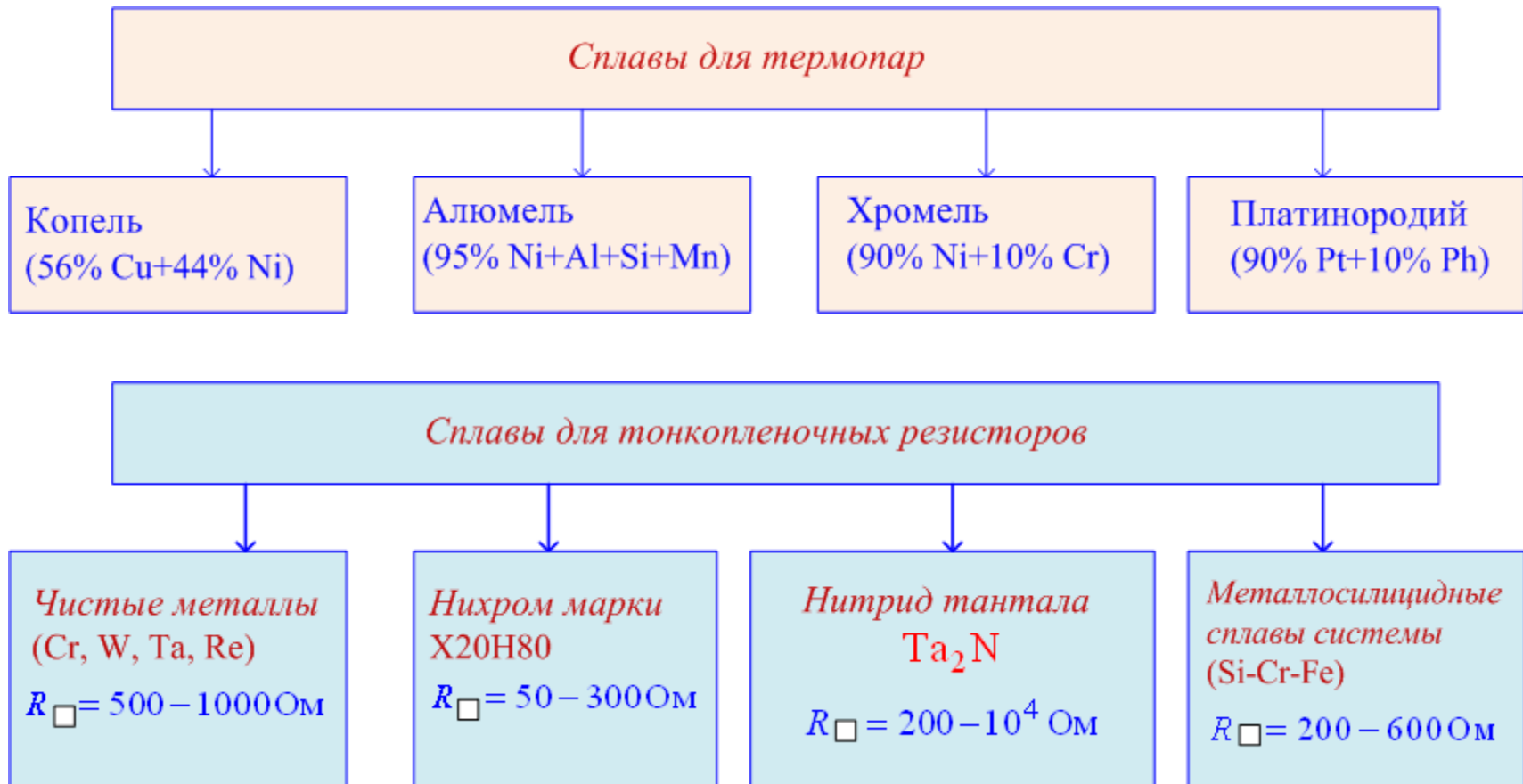
$$\rho = 0,52 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$
$$\alpha_{\rho} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

*Для технических
сопротивлений,
потенциометров,
термопар.*

*Хромоникелевые
сплавы (нихромы)*

*Используются в
ответственных
соединениях
электровакуумной
техники.*

Материалы высокого удельного сопротивления.



Резистивные пленки получают в вакууме методом термического испарения с последующей конденсацией на диэлектрическую или полупроводниковую подложку.

Тонкие пленки характеризуются сопротивлением квадрата R_{\square} – чем тоньше пленка, тем выше R_{\square} .

Вопросы для самоконтроля

- 1. Почему удельное сопротивление металлов увеличивается с повышением температуры?*
- 2. Что характеризует величина температурного коэффициента удельного сопротивления? Является ли температурный коэффициент удельного сопротивления величиной постоянной для данного металла?*
- 3. Как влияет на удельное электрическое сопротивление металлов термическая обработка и пластическая деформация?*
- 4. В чем заключается физический смысл глубины проникновения электромагнитного поля (глубины скин-слоя)?*
- 5. Какие меры принимают для борьбы со скин-эффектом?*
- 6. Какие и для каких целей металлические сплавы высокого удельного сопротивления нашли применение в электронной технике?*

Рекомендуемая литература

1. **Легостаев Н.С.** Материалы электронной техники: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Эль Контент, 2012. – 184 с. ISBN 978-5-4332-0023-4

2. **Легостаев Н.С.** Материалы электронной техники: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 74 с. ISBN 978-5-86889-678-1

Тема следующего занятия «Пассивные и активные диэлектрики».

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 4 учебного пособия на страницах 57-74 и в разделе 6 на страницах 89-96. Необходимо знать важнейшие электрические свойства диэлектриков, основные эффекты в активных диэлектриках. Особое внимание обратите на пьезоэлектрический и пироэлектрический эффекты.

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Спасибо за внимание