

[Радиоматериалы и радиокомпоненты]

[210303.65 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура»

210305.65 «Средства радиоэлектронной борьбы»]

[ИИБС, кафедра Электроники]

[Преподаватель Останин Борис Павлович]

Радиоматериалы и радиокомпоненты

Раздел 1

Свойства радиоматериалов.

Лекция 2

**Электрофизические
свойства
проводниковых
материалов**

Проводниковыми называют материалы, основным свойством которых является сильно выраженная проводимость.

Основные положения классической электронной теории

Хорошая электропроводность проводниковых материалов обусловлена большим количеством свободных (обобществлённых) электронов, которые классическая теория рассматривает как электронный газ.

$$\bar{u} = \frac{l}{\tau}$$

\bar{u} - средняя скорость теплового движения электронов

l - средняя длина свободного пробега электронов

τ - среднее время свободного пробега электронов

Температуре $T = 300$ К соответствует $\bar{u} \approx 10^5 \frac{м}{с}$

Средняя кинетическая энергия электронов линейно зависит от температуры

$$\frac{m(\bar{u})^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$$

Распределение электронов по энергетическим состояниям, характеризуемое вероятностью $p(E)$, подчиняется статистике Максвелла – Больцмана и описывается экспонентой

$$p(E) = \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$$

При этом считается, что в каждом энергетическом состоянии может находиться любое количество электронов, а при температуре абсолютного нуля энергия всех свободных электронов равна нулю.

Если в проводнике существует электрическое поле, то под действием этого поля электроны приобретают ускорение, пропорциональное напряжённости поля ε , в результате чего возникает направленное движение электронов со средней скоростью

$$\bar{v} = \frac{q l}{m \tau} \cdot \varepsilon$$

Такое направленное движение называют дрейфом электронов. Это движение накладывается на хаотическое движение электронов. Скорость дрейфа электронов значительно меньше скорости теплового движения. Направленное движение создаёт ток, плотность которого равна

$$j = qn\bar{v} = \frac{q^2 nl}{mi} \cdot \varepsilon$$

n - концентрация электронов.

Этот ток пропорционален напряжённости поля. Коэффициентом пропорциональности является удельная электрическая проводимость

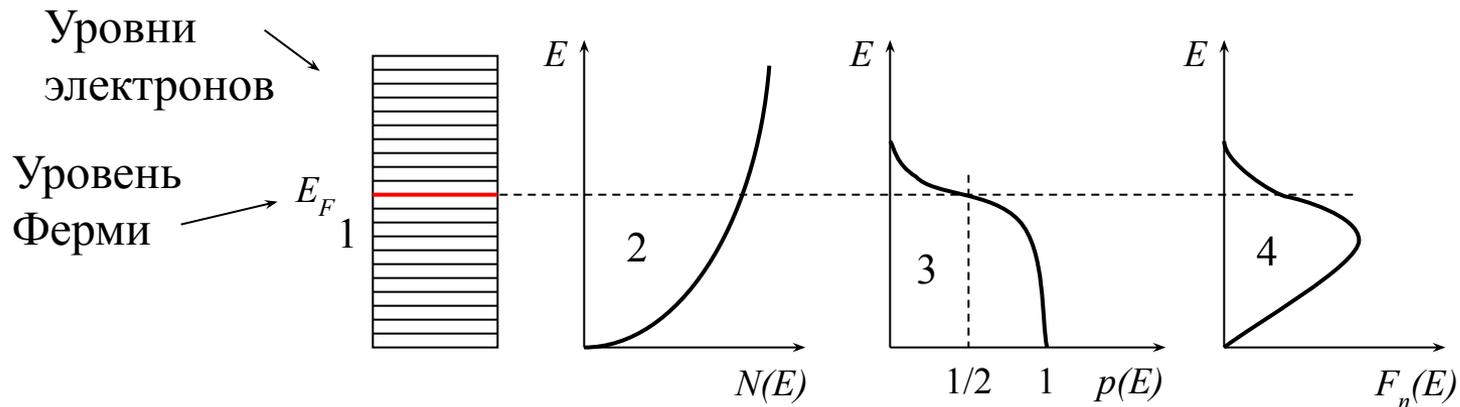
$$\sigma = \frac{q^2 nl}{mi}$$

Классическая теория, давая в целом правильное представление о механизме электропроводности, не учитывает распределение электронов по энергетическим состояниям. Более полное представление о процессах внутри, происходящих внутри вещества, даёт квантовая физика.

Основные положения квантовой физики

Электропроводность создаётся свободными электронами, способными покинуть атомы. Такой способностью обладают только валентные электроны. Поэтому в дальнейшем пойдёт речь только об электронах, находящихся на валентных уровнях.

Электроны могут находиться на строго определённых энергетических уровнях (рис. 1), энергетическая плотность $N(E)$ которых вблизи границ энергетических зон изменяется по параболическому закону (рис. 2):



$$N(E) = \frac{4\pi}{h_3} (2m_n^*)^{3/2} E^{1/2}$$

m_n^* - эффективная масса электрона, учитывающая взаимодействие электрона с периодическим полем кристаллической решётки.

В соответствии с принципом Паули на каждом энергетическом уровне могут находиться два электрона с противоположными спинами. Если концентрация свободных электронов равна n , то при температуре абсолютного нуля они займут $n/2$ самых низких энергетических уровней.

Спин электрона равен половине постоянной Планка, поэтому он равен 0,5 или - 0,5.

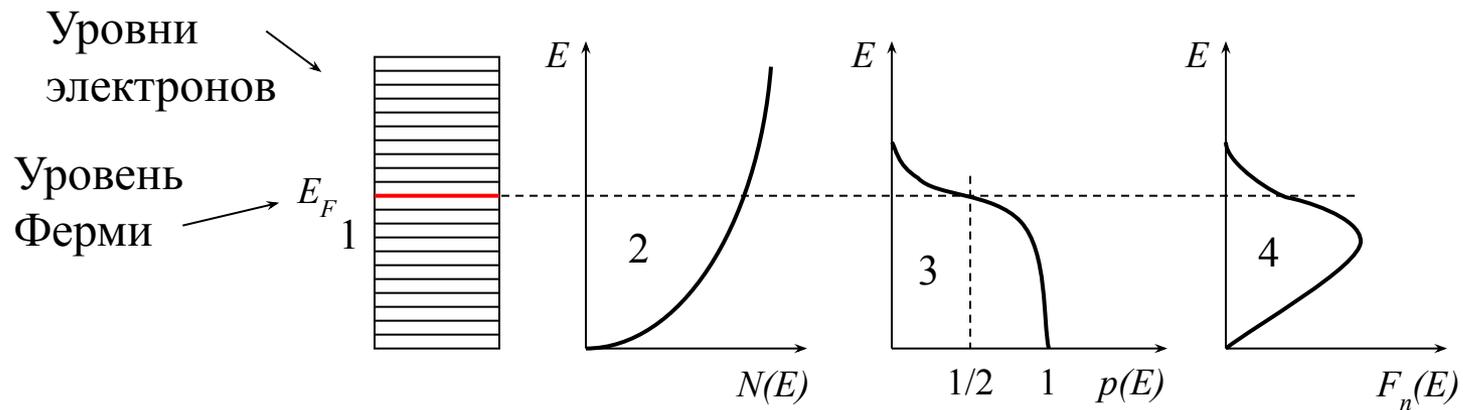
Наиболее высокий из занятых уровней E_F называется уровнем Ферми (рисунок 1, а также рисунки 2, 3, 4). При нагреве кристалла электронам сообщается энергия порядка kT , вследствие чего некоторые электроны, находящиеся вблизи уровня Ферми переходят на более высокие энергетические уровни. Избыток энергии, получаемый электронами при нагреве проводника очень незначителен по сравнению с энергией Ферми (3...15 эВ). При комнатной температуре он равен 0,026 эВ ($1\text{эВ} \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Поэтому средняя энергия свободных электронов сохраняется практически неизменной, а незначительное изменение означает малую теплоёмкость электронного газа.

В квантовой теории вероятность заполнения энергетических уровней электронами определяется функцией Ферми – Дирака (рисунок 3):

$$p(E) = \frac{1}{\exp \frac{E - E_F}{kT} + 1}$$

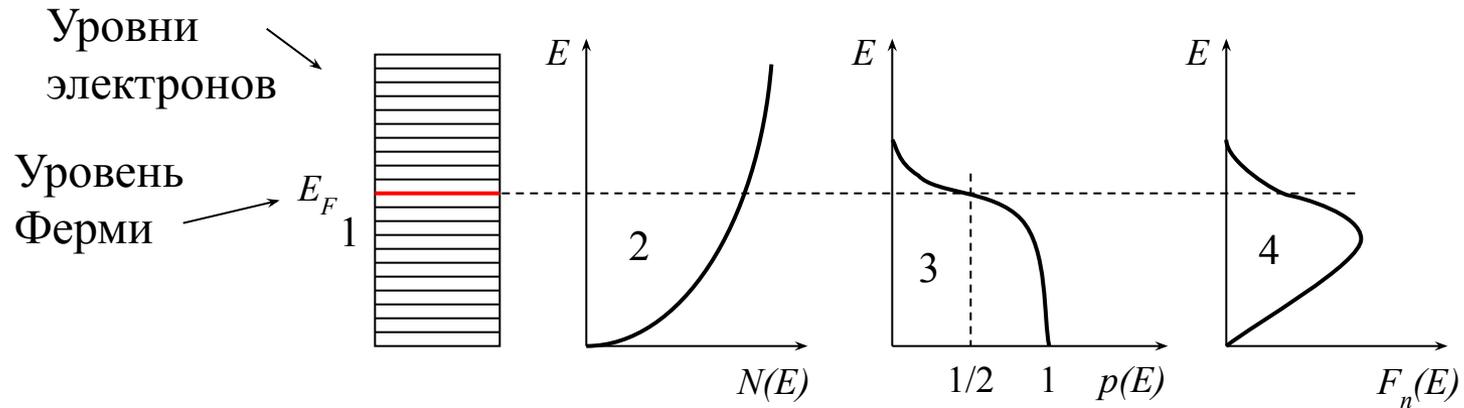
Из полученного выражения следует, что вероятность заполнения уровня Ферми равна 0,5

$$p(E) = \frac{1}{\exp \frac{E_F - E_F}{kT} + 1} = \frac{1}{\exp 0 + 1} = \frac{1}{1 + 1} = 0,5$$



Распределение электронов по энергиям $F_n(E)$ определяется энергетической плотностью разрешенных уровней $N(E)$ и вероятностью их заполнения $p(E)$ (рисунок 4).

$$F_n(E) = N(E)p(E)$$



Концентрация электронов может быть найдена путём интегрирования по всем заполненным состояниям:

$$n = \int_0^{E_F} N(E) p(E) dE = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} E_F^{3/2}$$

Если считать, что атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация электронов будет равна концентрации атомов.

$$n = \frac{d}{A} N_0$$

d - плотность материала,

A - атомная масса,

N_0 - число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Уровень Ферми, отсчитанный от дна валентной зоны, может быть найден из верхней формулы

$$E_F = \frac{m_n^* u_F^2}{2} = \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{n^{2/3} h^2}{2m_n^*}$$

Величина энергии Ферми для различных металлов лежит в пределах от 3 до 15 эВ.

Если в проводнике создать электрическое поле с напряжённостью ε , то электроны, расположенные вблизи уровня Ферми, переходят на более высокие энергетические уровни, приобретая дополнительную скорость направленного движения

$$v_F = \frac{q\varepsilon}{m_n^*} \tau_F = \frac{q\varepsilon}{m_n^*} \frac{\bar{l}}{u_F}$$

τ_F - время свободного пробега;

u_F - тепловая скорость быстрых электронов, обладающих энергией, близкой к энергии Ферми E_F .

Электроны, находящиеся на глубинных уровнях, вероятность заполнения которых равна 1, непосредственно реагировать на внешнее поле не могут, так как все ближайшие энергетические уровни заняты. Однако, несмотря на это, они участвуют в процессе электропроводности, перемещаясь на более высокие энергетические уровни по мере их освобождения. Поле начинает влиять на эти электроны, когда они оказываются вблизи уровня Ферми. Таким образом, в движение приходит весь «коллектив» электронов. Скорость движения «коллектива» определяется скоростью движения электронов, находящихся вблизи уровня Ферми. С учётом этого выражение для плотности тока принимает вид

$$j = qn v_F = \frac{q^2 n l}{m_n^* u_F} \varepsilon = \sigma \varepsilon$$

$$\sigma = \frac{q^2 n l}{m_n^* u_F} \quad \text{- удельная электрическая проводимость.}$$

Из выражения, полученного ранее $E_F = \frac{m_n^* u_F^2}{2} = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{n^{2/3} h^2}{2m_n^*}$

найдем $m_n^* u_F$, подставим его в $j = qn v_F = \frac{q^2 n l}{m_n^* u_F} \varepsilon = \sigma \varepsilon$ и найдем

$$\sigma = \frac{q^2 m^{2/3} l}{h} \left(\frac{8\pi}{3}\right)^{1/3}$$

Концентрация свободных электронов в чистых металлах различается незначительно. Поэтому удельная электрическая проводимость металлов определяется средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от структуры атомов и кристаллической решётки.

Температурная зависимость электропроводности

В чистых металлах с идеальной кристаллической решёткой единственной причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, являются тепловые колебания атомов в узлах кристаллической решётки, амплитуда которых возрастает с ростом температуры. Интенсивность столкновений электронов с атомами, т.е. их рассеяние, прямо пропорциональна поперечному сечению сферического объёма, занимаемого колеблющимся атомом, и концентрации атомов. Следовательно, длина свободного пробега будет равна

$$l = \frac{1}{\pi(\Delta a)^2 n}$$

Δa – отклонение атома от узла кристаллической решётки.

Потенциальная энергия атома, отклонившегося на величину Δa , от узла кристаллической решётки

$$E_{\text{УПР}} = \frac{1}{2} k_{\text{УПР}} (\Delta a)^2$$

$k_{\text{УПР}}$ - коэффициент упругой связи, которая стремится вернуть атом в положение равновесия.

Поскольку средняя энергия колеблющегося атома равна kT , то

$$\frac{1}{2} k_{\text{УПР}} (\Delta a)^2 = kT$$

Тогда

$$(\Delta a)^2 = \frac{2kT}{k_{\text{УПР}}}$$

Подставим $(\Delta a)^2 = \frac{2kT}{k_{УПР}}$ в $l = \frac{1}{\pi(\Delta a)^2 n}$ и получим

$$l = \frac{k_{УПР}}{2\pi nkT}$$

Следовательно, удельная электрическая проводимость с ростом температуры уменьшается, а удельное сопротивление растёт. Влияние температуры на сопротивление проводника оценивают температурным коэффициентом сопротивления:

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

$\rho = \frac{1}{\sigma}$ - удельное сопротивление.

У большинства металлов при комнатной температуре $\alpha_p \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$. Если в металле есть примеси, то помимо рассеяния на основных атомах возникает рассеяние электронов на примесных атомах, в результате чего уменьшается длина свободного пробега согласно

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_T} + \frac{1}{l_{II}} \quad \text{или} \quad l = \frac{l_T l_{II}}{l_T + l_{II}}$$

где l_T и l_{II} - характеризуют рассеяние на тепловых колебаниях атомов и от примесей соответственно. Этим объясняется то, что чистые металлы имеют более низкое удельное сопротивление по сравнению со сплавами.

Итоги

1. Удельное сопротивление с ростом температуры растёт.
2. Чистые металлы имеют более низкое удельное сопротивление по сравнению со сплавами .

Зависимость электропроводности от частоты

На высоких частотах плотность тока изменяется по сечению проводника. Она максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление называется поверхностным эффектом.

Неравномерное распределение тока объясняется действием магнитного поля тока, протекающего по проводнику. Магнитный поток, сцеплённый с проводом, пропорционален току:

$$\Phi = L \cdot i$$

L - индуктивность проводника.

Например, $i = I_m \sin \omega t$

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t$$

Потокосцепление максимально во внутренних слоях и минимально во внешних.

Распределение плотности тока по сечению проводника подчиняется экспоненциальному закону:

$$j = j_0 \exp\left(-\frac{z}{\Delta}\right)$$

- j_0 - плотность тока на поверхности;
- z - расстояние, измеряемое от поверхности;
- Δ - глубина проникновения тока.

Глубина проникновения тока, выраженная в миллиметрах, равна расстоянию, на котором плотность тока уменьшается в $e = 2,72$ раз по отношению к значению на поверхности. Она пропорциональна удельному сопротивлению ρ [Ом·м] и обратно пропорциональна частоте f [МГц].

$$\Delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

В случае сильно выраженного поверхностного эффекта, когда ток протекает по тонкому поверхностному слою, толщина которого много меньше диаметра провода d , экспоненциальное распределение может быть заменено однородным распределением с постоянной плотностью тока в пределах тонкого слоя толщиной Δ , на основании чего можно ввести понятие эквивалентной площади сечения проводника, занятой током:

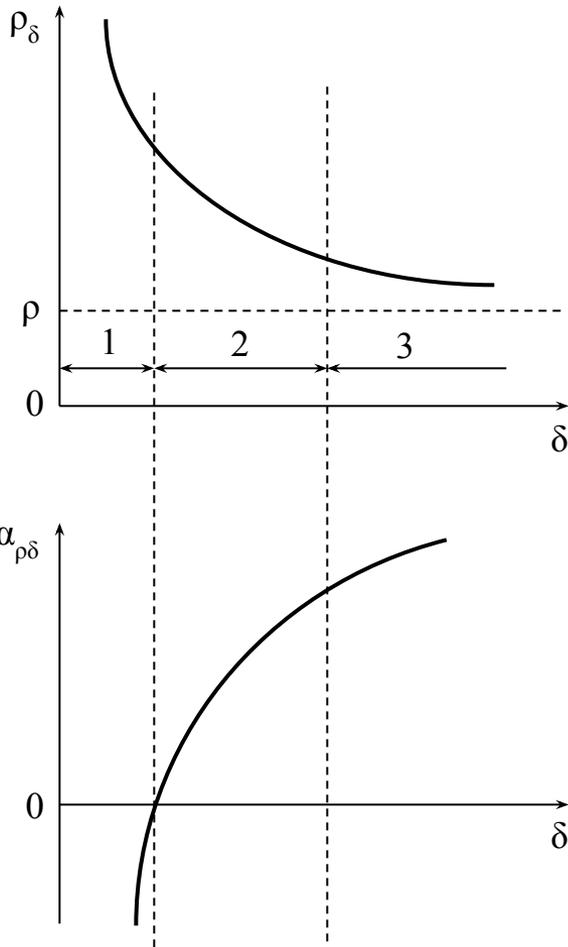
$$S_{\text{э}} = \pi d \Delta$$

Поскольку площадь сечения, через которое протекает ток, уменьшилась, то сопротивление провода переменному току R_{\sim} стало больше, чем его сопротивление постоянному току R_0 , что учитывают коэффициентом увеличения сопротивления:

$$K_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \frac{S_0}{S_{\text{э}}} = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d \Delta} = \frac{d}{4\Delta}$$

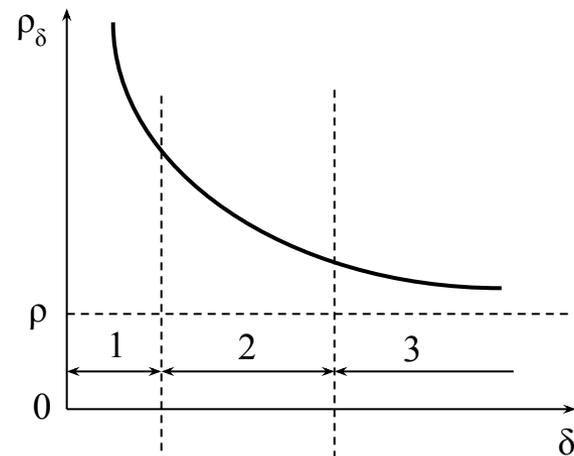
Полученная формула справедлива при $\Delta \ll d$.

Электропроводность тонких плёнок

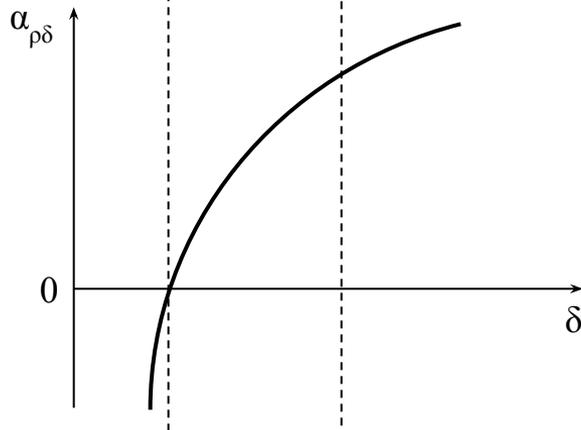


Электрические свойства тонких плёнок отличаются от свойств объёмных проводников.

При напылении плёнки сначала образуются отдельные разрозненные островки (область 1), переход электронов происходит через узкие диэлектрические зазоры, что обусловлено термоэлектронной эмиссией и туннельным эффектом. В этой области сопротивление очень велико, а температурный коэффициент отрицателен, так как с ростом температуры облегчается переход электронов от островка к островку.



По мере напыления плёнки происходит образование проводящих цепочек между отдельными островками и начинает работать обычный механизм электропроводности. Удельное сопротивление плёнки уменьшается, а температурный коэффициент становится положительным (область 2).



При дальнейшем напылении островки исчезают, и образуется сплошная плёнка толщиной около 0,1 мкм (область 3). На этом участке удельное сопротивление выше, чем удельное сопротивление монокристаллического проводника, т.к. сокращается длина свободного пробега электронов вследствие их отражения от поверхности плёнки.

Полагая, что процессы рассеяния электронов в объёме и на поверхности независимы

$$\frac{1}{l_{\delta}} = \frac{1}{l} + \frac{1}{l_s}$$

l_{δ} - длина свободного пробега в плёнке,

L - длина свободного пробега электронов при рассеянии в объёме,

l_s - длина свободного пробега электронов при рассеянии на поверхности.

Приближённо полагая длину свободного пробега при рассеянии на поверхности l_s равной толщине плёнки δ , получим:

$$\rho_{\delta} = \frac{m_n^* u_F}{nq^2 l_{\delta}} = \rho \left(1 + \frac{l}{\delta}\right)$$

ρ - удельное сопротивление монолитного проводника.

m_n^* - эффективная масса электрона, учитывающая взаимодействие электрона с периодическим полем кристаллической решётки.

Сопротивление плёнки

$$R = \rho_{\delta} \frac{l}{S}$$

l – длина проводящей плёнки;

S – площадь поперечного сечения плёнки.

$$S = \delta \cdot w$$

w – ширина плёнки;

δ – толщина плёнки.

Тогда

$$R = \rho_{\delta} \frac{l}{\delta w} = \frac{\rho_{\delta}}{\delta} \cdot \frac{l}{w} = \rho_s \frac{l}{w}$$

$\rho_s = \frac{\rho_{\delta}}{\delta}$ - удельное поверхностное сопротивление. Оно определяется при условии $l = w$, т.е. это сопротивление плёнки, имеющей форму квадрата.

Вывод

Подбором толщины плёнки можно изменять величину ρ_S независимо от удельного сопротивления материала.

В микроэлектронике в качестве соединительных плёнок применяют пленки из чистого металла, чаще всего алюминия, а в качестве резистивных плёнок – тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал, рений, хром, молибден) и сплавы никеля с хромом.

Классификация проводниковых материалов

Все проводниковые материалы можно разделить на три основные группы:

1. Металлы
2. Сплавы металлов
3. Неметаллические проводящие материалы.

Металлы подразделяют на четыре группы

1. **Металлы с высокой удельной проводимостью.** К ним относят медь и алюминий. У меди $\rho = 0,017$ мкОм · м, у алюминия $\rho = 0,028$ мкОм · м. Они применяются для изготовления радиомонтажных проводов и кабелей, тонких плёнок в интегральных микросхемах.

2. *Благородные металлы.* К ним относят золото, серебро, платину и палладий. Они обладают высокой химической стойкостью. Применяются в качестве контактных материалов и коррозиестойких покрытий

3. *Тугоплавкие металлы* имеют температуру плавления свыше 1700 °С. Вольфрам, молибден, хром, рений и др.

4. *Металлы со средней температурой плавления.* Железо, никель и кобальт. Температура плавления около 1500 °С. Эти металлы имеют сильно выраженные магнитные свойства.

Сплавы металлов подразделяют на три группы

1. Сплавы высокого сопротивления. Манганин (86% Cu, 12%Mn, 2%Ni), константан (69% Cr, 40%Ni), хромоникелевые сплавы. Эти сплавы имеют удельное электрическое сопротивление более 0,4 мкОм · м. Применяются для изготовления резисторов и нагревательных элементов
2. Сверхпроводящие сплавы. У них при температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Среди таких сплавов наилучшими параметрами обладают сплавы ниобия (Nb_3Sn , Nb_3Ga , Nb_3Ge).
3. Припой. Низкотемпературные сплавы, применяемые при пайке. Различают мягкие и твёрдые припои. Мягкие припои имеют температуру плавления ниже 300 °С. В их состав входит от 10 (ПОС-10) до 90% (ПОС-90) олова, остальное – свинец. Твёрдые припои имеют температуру плавления свыше 300 °С. Наиболее распространёнными являются медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСр)

Неметаллические проводящие материалы подразделяют на три группы

1. Углеродистые материалы. Наиболее широкое применение имеет графит. Ценные свойства: малое удельное сопротивление, хорошая теплопроводность, стойкость ко многим агрессивным средам
2. Композиционные материалы. Это механическая смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Наибольший интерес – контактолы и керметы. Контакттолы – маловязкие или пастообразные композиции, применяемые в качестве токопроводящего клея или краски. Связующим веществом в них являются синтетические смолы, а токопроводящим наполнителем – мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия). Керметы – металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим веществом. Обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением, поэтому применяются для изготовления тонкоплёночных резисторов. Наибольшее распространение получила микрокомпозиция Cr-SiO₂, тонкие плёнки которой изготавливают путём напыления в вакууме на диэлектрическую подложку

3. Проводящие материалы на основе окислов. Подавляющее большинство чистых оксидов являются диэлектриками, однако при неполном окислении или при введении примесей проводимость оксидов резко увеличивается. Такие материалы можно использовать в качестве контактных и резистивных слоёв. Практический интерес представляют тонкие плёнки диоксида олова SnO_2 и оксида индия In_2O_3 .

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные параметры проводников малого сопротивления

Материал	Удельное сопротивление при 20°C, Ом · мм ² /м	ТКС, %/°C	Температура плавления °C	Плотность г/см ³
Алюминий	0,028	0,49	660	2,7
Бронза фосфористая	0,115	0,4	900	8,8
Золото	0,024	0,37	1060	19,3
Латунь	0,03...0,06	0,2	900	8,5
Медь электротехническая	0,0175	0,4	1080	8,9
Никель	0,07	0,6	1450	8,8
Олово	0,115	0,42	230	7,3
Платина	0,1	0,3	1770	21,4
Свинец	0,21	0,21	330	11,4
Серебро	0,016	0,38	960	10,5
Сталь	0,059	0,62	1520	7,8
Уголь	0,33...1,85	0,06	-	-
Хром	0,027	-	-	6,6
Цинк	0,059	0,35	420	7,0

Основные параметры проводников МАЛОГО сопротивления

Удельное сопротивление при 20°C, Ом · мм ² /м	Материал	ТКС, %/°C	Температура плавления °C	Плотность г/см ³
0,016	Серебро	0,38	960	10,5
0,0175	Медь электротехническая	0,4	1080	8,9
0,024	Золото	0,37	1060	19,3
0,027	Хром	-	-	6,6
0,028	Алюминий	0,49	660	2,7
0,059	Сталь	0,62	1520	7,8
0,059	Цинк	0,35	420	7,0
0,07	Никель	0,6	1450	8,8
0,03...0,06	Латунь	0,2	900	8,5
0,1	Платина	0,3	1770	21,4
0,115	Бронза фосфористая	0,4	900	8,8
0,115	Олово	0,42	230	7,3
0,21	Свинец	0,21	330	11,4
0,33...1,85	Уголь	0,06	-	-

Основные параметры проводников МАЛОГО сопротивления

ТКС, %/°С	Материал	Удельное сопротивление при 20°С, Ом · мм ² /м	Температура плавления °С	Плотность г/см ³
-	Хром	0,027	-	6,6
0,06	Уголь	0,33...1,85	-	-
0,2	Латунь	0,03...0,06	900	8,5
0,21	Свинец	0,21	330	11,4
0,3	Платина	0,1	1770	21,4
0,35	Цинк	0,059	420	7,0
0,37	Золото	0,024	1060	19,3
0,38	Серебро	0,016	960	10,5
0,4	Медь электротехническая	0,0175	1080	8,9
0,4	Бронза фосфористая	0,115	900	8,8
0,42	Олово	0,115	230	7,3
0,49	Алюминий	0,028	660	2,7
0,6	Никель	0,07	1450	8,8
0,62	Сталь	0,059	1520	7,8

Основные параметры проводников МАЛОГО сопротивления

Температура плавления °С	Материал	Удельное сопротивление при 20°С, Ом · мм ² /м	ТКС, %/°С	Плотность г/см ³
-	Хром	0,027	-	6,6
-	Уголь	0,33...1,85	0,06	-
230	Олово	0,115	0,42	7,3
330	Свинец	0,21	0,21	11,4
420	Цинк	0,059	0,35	7,0
660	Алюминий	0,028	0,49	2,7
900	Латунь	0,03...0,06	0,2	8,5
900	Бронза фосфористая	0,115	0,4	8,8
960	Серебро	0,016	0,38	10,5
1060	Золото	0,024	0,37	19,3
1080	Медь электротехническая	0,0175	0,4	8,9
1450	Никель	0,07	0,6	8,8
1520	Сталь	0,059	0,62	7,8
1770	Платина	0,1	0,3	21,4

Основные параметры проводников МАЛОГО сопротивления

Температура плавления °С	Материал	Удельное сопротивление при 20°С, Ом · мм ² /м	ТКС, %/°С	Плотность г/см ³
-	Хром	0,027	-	6,6
-	Уголь	0,33...1,85	0,06	-
230	Олово	0,115	0,42	7,3
330	Свинец	0,21	0,21	11,4
420	Цинк	0,059	0,35	7,0
660	Алюминий	0,028	0,49	2,7
900	Латунь	0,03...0,06	0,2	8,5
900	Бронза фосфористая	0,115	0,4	8,8
960	Серебро	0,016	0,38	10,5
1060	Золото	0,024	0,37	19,3
1080	Медь электротехническая	0,0175	0,4	8,9
1450	Никель	0,07	0,6	8,8
1520	Сталь	0,059	0,62	7,8
1770	Платина	0,1	0,3	21,4

Основные параметры проводников высокого сопротивления

Материал	Удельное сопротивление при 20° С, Ом · мм ² /м	ТКС, (в диапазоне 0...100) %/° С	Максимальная рабочая температура а, °С	Температура плавления, °С	Плотность г/см ³
Константан	0,44...0,52	0,0005	500	1270	8,9
Манганин	0,4...0,5	0,005	100	1200	8,4
Нейзильбер	0,28...0,35	0,03	150	1000	8,4
Никелин	0,39...0,45	0,002	150	-	-
Нихром	1,0...1,1	0,015	900	1400	8,2
Реотан	0,45...0,52	0,04	150	-	-
Фехраль	1,1...1,3	0,01	900	1460	7,2

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните, какие материалы называют проводниковыми.
2. Укажите, чем обусловлена электропроводность проводниковых материалов.
3. Поясните отличие хаотического движения электронов от их дрейфа.
4. Укажите, чем определяется удельная электрическая проводимость.
5. Объясните температурную зависимость электропроводности.
6. Объясните зависимость электропроводности от частоты.
7. Поясните электропроводность тонких плёнок.
8. Укажите, как классифицируются проводниковые материалы.