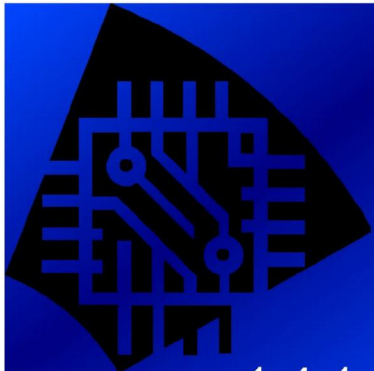


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Модуль №1

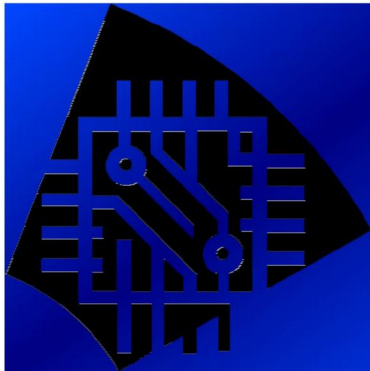
Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

Лекция 1.4 Электрические свойства проводниковых материалов



План лекции

- 1.4.1. Представления зонной теории твердого тела
- 1.4.2. Природа электропроводности металлов
- 1.4.3. Температурная зависимость удельного сопротивления
- 1.4.4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельную проводимость металлов
- 1.4.5. Электрические свойства металлических сплавов и тонких пленок
- 1.4.6. Сопротивление проводников на высоких частотах
- 1.4.7. Контактные явления и термо - эдс
- 1.4.8. Явление сверхпроводимости
- 1.4.9. Классификация проводников по составу, свойствам и техническому назначению



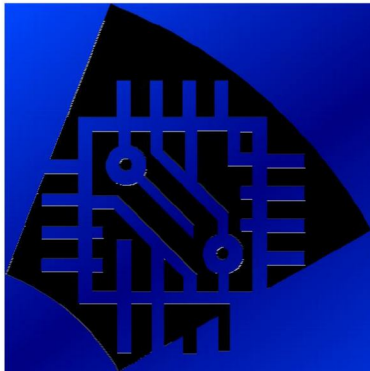
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.1. Представления зонной теории твердого тела

Зонная теория твердых тел основывается на следующих предположениях:

- 1. Твердое тело является кристаллическим**
- 2. С правильной внутренней структурой (как бездефектное)**
- 3. Рассматривается движение электронов в таком кристаллическом идеальном твердом теле**

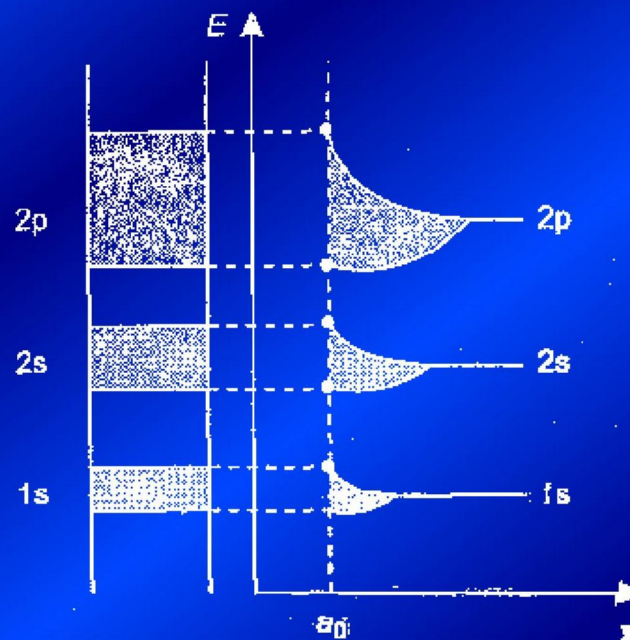


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

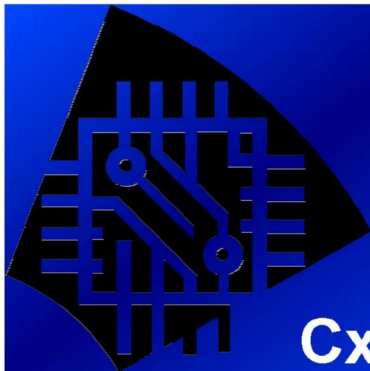
Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.1. Представления зонной теории твердого тела

Схематическое изображение образования энергетических зон



По мере сближения атомов (уменьшения расстояний) сначала расщепляются самые высокие энергетические уровни, затем по мере сближения атомов – более низкие

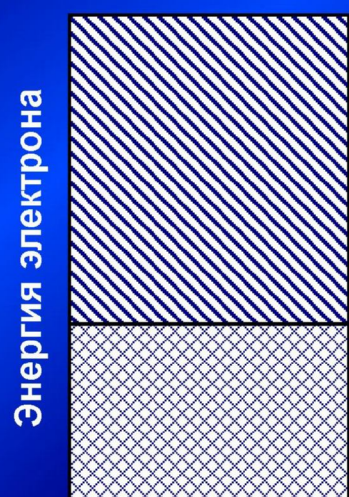


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

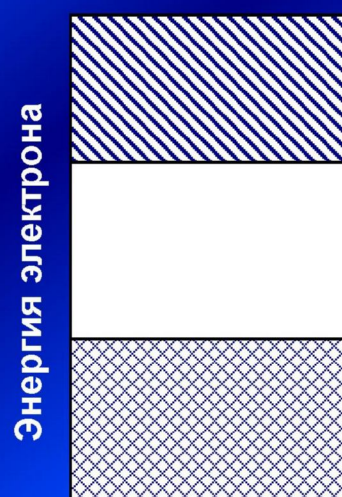
Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.1. Представления зонной теории твердого тела

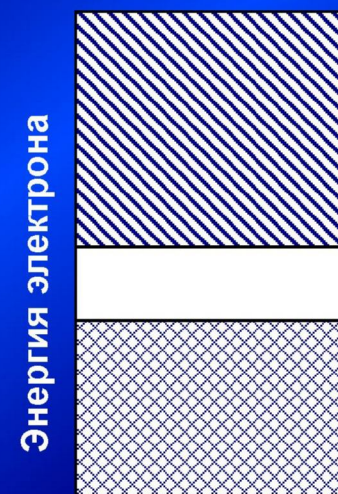
Схема энергетических зон электротехнических материалов



Проводник



Диэлектрик



Полупроводник



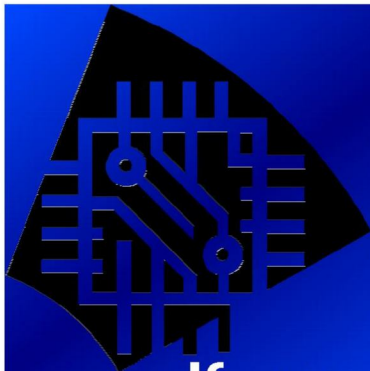
- заполненная
электронами зона
(валентная зона)



- запрещенная зона
 E_g



- зона свободных
энергетических
уровней (зона
проводимости)

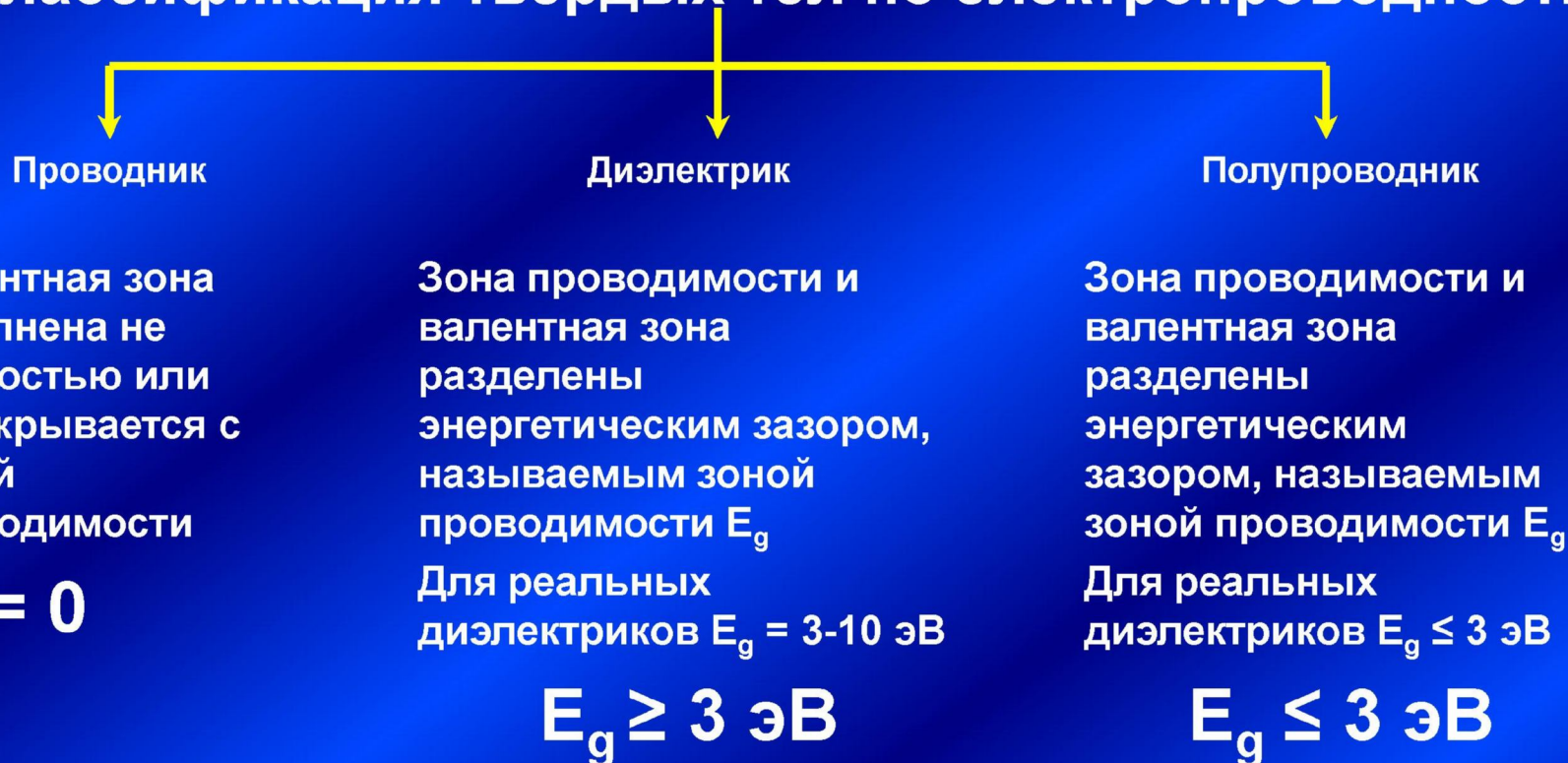


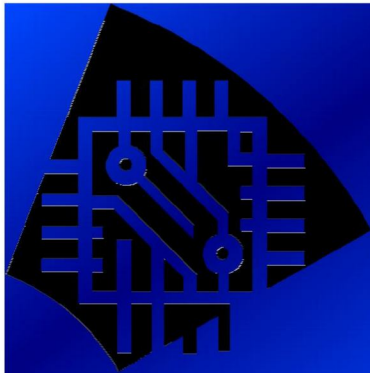
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.1. Представления зонной теории твердого тела

Классификация твердых тел по электропроводности





Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.2. Природа электропроводности металлов

Плотность тока в проводнике

$$J = qn\bar{v}$$

q - заряд электрона; n - концентрация электронов; v - средняя скорость направленного движения носителей зарядов (скорость дрейфа)

Концентрация свободных электронов

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

d – плотность материала; A - атомная масса; N_0 - число Авогадро

$n \approx (10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3})$; $v \approx (10^{-4} \text{ м/с})$, для сравнения скорость теплового (хаотического) движения электронов 10^5 м/с при $T = 300 \text{ К}$

Скорость направленного движения электронов

$v \sim E$, где E – напряженность внешнего электрического поля

$v = \mu_n E$, где μ_n – подвижность электронов

$J = qn\mu_n E$; $J = \sigma E$, где σ – удельная электропроводность



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.3. Температурная зависимость удельного сопротивления

Удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления

$$J = qn\mu_n E,$$

где $qn\mu_n = \sigma$; $\sigma = 1/\rho$; и $\rho = 1/(qn\mu_n)$

С $T \uparrow n = \text{Const}$, μ_n — скорость направленного движения электронов в поле единичной напряженности — $\downarrow$ вследствие рассеяния электронов

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на 1 K называют температурным коэффициентом удельного сопротивления (ТКС)

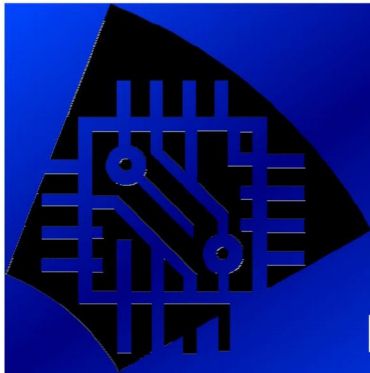
$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad \rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] \quad \alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l$$

ρ_0 и α_ρ — удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесенные к началу температурного диапазона, т.е. температуре T_0 ; ρ — удельное сопротивление при температуре T .

$\alpha_\rho \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ (для большинства металлов при $T=300 \text{ K}$)

α_R — температурный коэффициент сопротивления данного резистора; α_l — температурный коэффициент линейного расширения материала.

$\alpha_\rho \approx \alpha_R$ для чистых металлов



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельную проводимость металлов

Влияние примесей и других структурных дефектов оценивается правилом Маттиссена

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}}$$

где ρ – полное удельное сопротивления металла

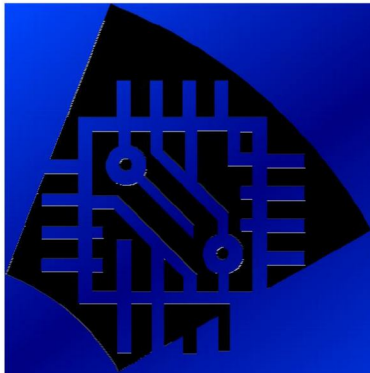
ρ_T – сопротивление обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки

$\rho_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на статических дефектах структуры

Критерий химической чистоты и структурного совершенства металлов – отношение удельных сопротивлений при комнатной температуре и температуре жидкого гелия

$$\beta = \rho_{(300)} / \rho_{(4.2)}$$

Для металлов степени чистоты 99.99999% $\beta = 10^5$



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельную проводимость металлов

При напряженном состоянии металла

$$\rho = \rho_0 (1 \pm \varphi \sigma)$$

$\varphi = (1/\rho) \cdot (d\rho/d\sigma)$ коэффициент удельного сопротивления по давлению;
 σ - механическое напряжение в сечении образца.

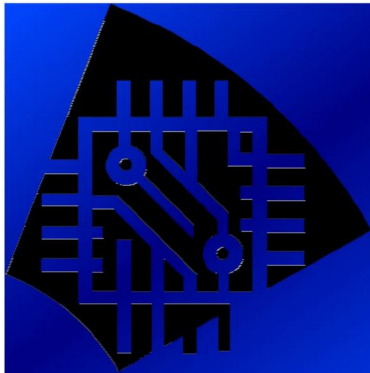
Знак плюс в выражении соответствует деформации при растяжении, а знак минус — при сжатии.

$$\varphi = (1 - 5) \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$$

Пластическая деформация и наклеп
Термическая закалка

Отжиг - $\rho \downarrow$ из – за снятия внутренних напряжений
(«залечивание» дефектов)

$\rho \uparrow$ из – за
появления
внутренних
напряжений



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.5. Электрические свойства металлических сплавов и тонких пленок

Полное сопротивление сплава

$$\rho_{\text{сплав}} = \rho_T + \rho_{\text{ост}}$$

ρ_T – сопротивление обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки

$\rho_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на неоднородности структуры сплава

Закон Нордгейма

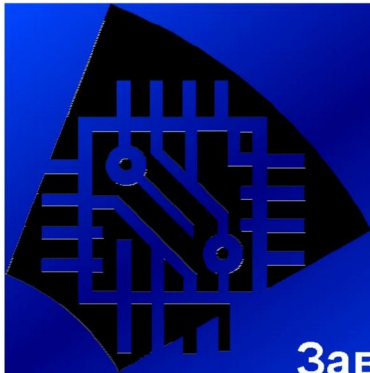
$$\rho_{\text{ост}} = C \cdot x_A \cdot x_B = C \cdot x_B (1 - x_B)$$

где C – константа, зависящая от природы сплава

x_A и x_B – атомные доли компонентов в сплаве

При $x_A = x_B = 0.5$ достигается максимальное $\rho_{\text{ост}}$

$$\alpha_{\rho}^{\text{спл}} = \frac{1}{1 + \rho_{\text{ост}} / \rho_T} \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \approx \frac{\alpha_{\rho}^{\text{мет}}}{1 + \rho_{\text{ост}} / \rho_T}$$

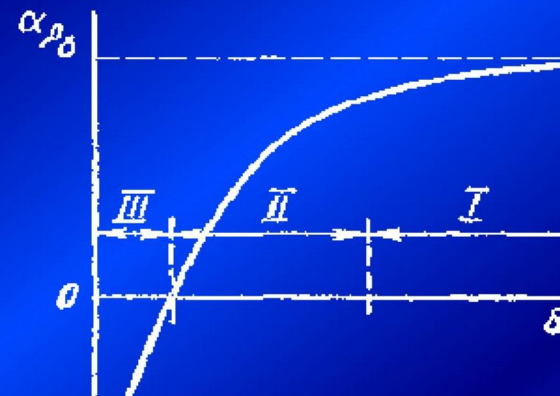
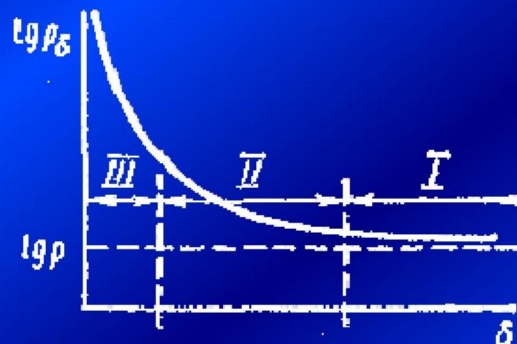


Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

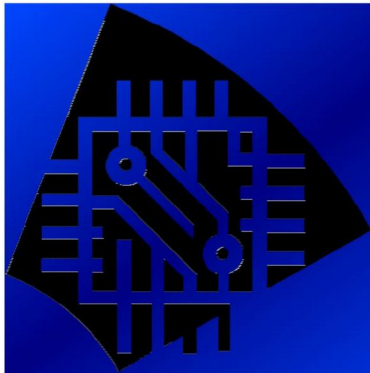
Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.5. Электрические свойства металлических сплавов и тонких пленок

Зависимость сопротивления и температурного коэффициента сопротивления от толщины пленки



- I – соответствует толщине около **0,1 мкм** и выше (удельное сопротивление близко к сопротивлению массивного образца)
- II – охватывает диапазон изменения δ от 10^{-1} до 10^{-2} **мкм** (удельное сопротивление пленки уже существенно больше сопротивления массивного образца)
- III – соответствующая толщине порядка 10^{-3} **мкм** (очень высокое удельное сопротивление и отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления)



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.5. Электрические свойства металлических сплавов и тонких пленок

Сопротивление квадрата $R_{\square}$

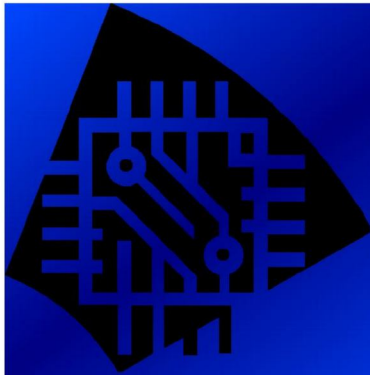
$$R_{\square} = \rho_{\delta} / \delta$$

Сопротивление тонко пленочного резистора R

$$R = R_{\square} \cdot l_0 / d_0$$

где l_0 - длина резистора в направлении прохождения тока
 d_0 – ширина пленки

**Для изготовления тонкопленочных резисторов
обычно требуются пленки с поверхностным
сопротивлением 500 – 1000 Ом/квадрат**



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

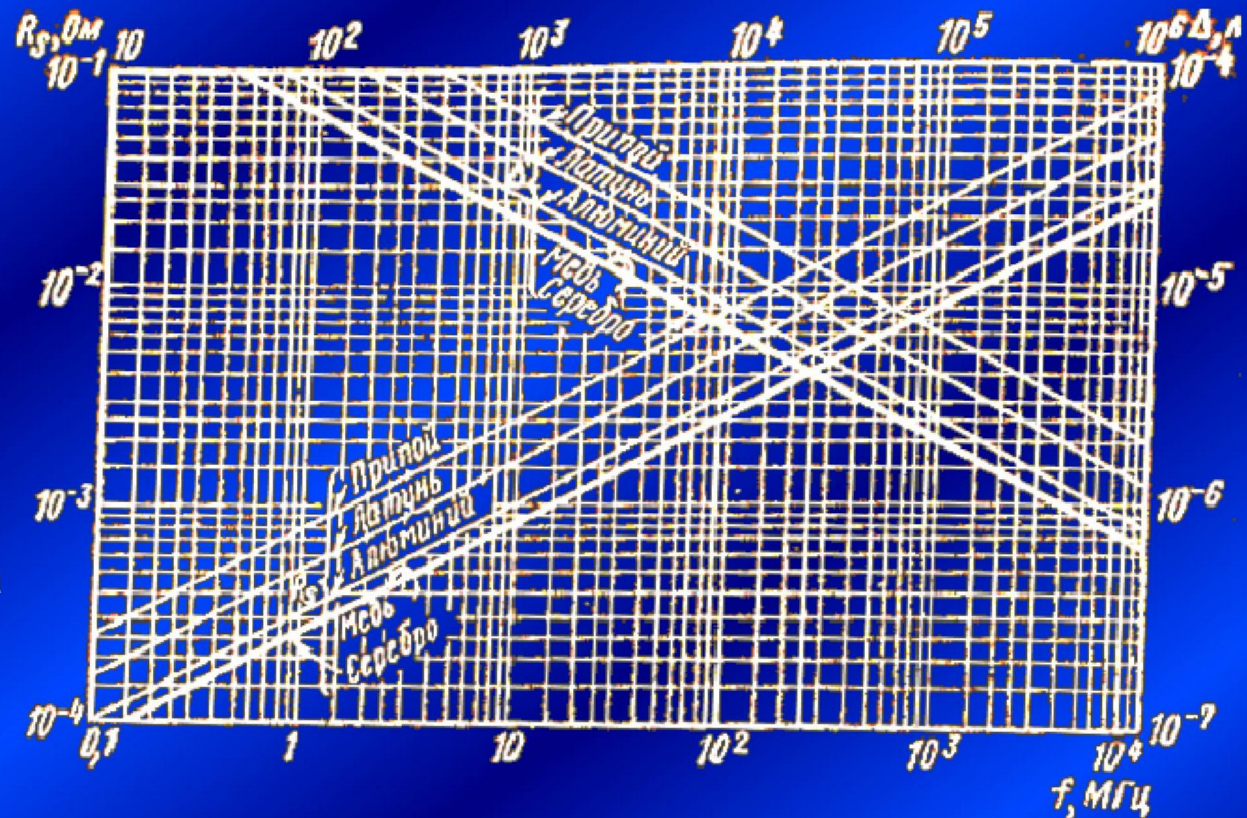
Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

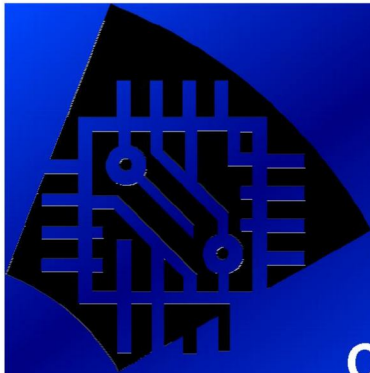
1.4.6. Сопротивление проводников на высоких частотах

Сопротивление квадрата поверхности

$$R_s = \rho / \Delta$$

ρ – удельное
сопротивление проводника
 Δ - толщина проводника





Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

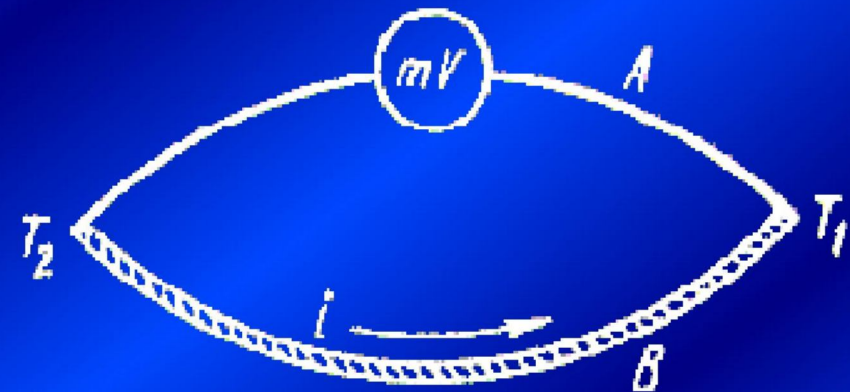
1.4.7. Контактные явления и термо - эдс

Схема термопары

Термоэлемент составленный из двух различных полупроводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой

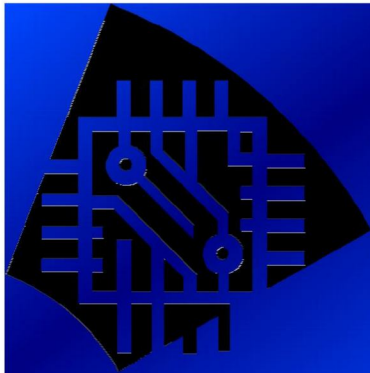
$$U \approx \alpha_T (T_2 - T_1)$$

α_T - коэффициент пропорциональности относительной дифференциальной или удельной термо - э.д.с.



Составляющие термо – э.д.с.

1. Контактная составляющая
2. Составляющая, обусловленная диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным
3. Составляющая, возникающая в контуре вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии (фононами)



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.8. Явления сверхпроводимости

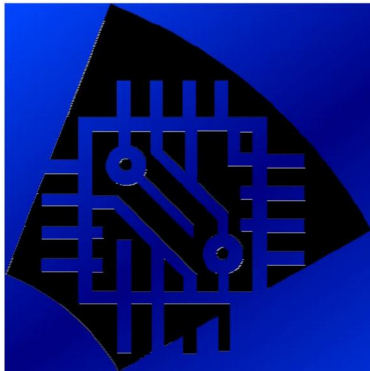
Явление сверхпроводимости

Обладают:

- **26 металлов** температурах >4.2 К
- **13 металлов** при высоких давлениях германий, селен, теллур, сурьма
- Интерметаллические соединения и сплавы, более **2000** соединений
 1. Ферромагнетики и антиферромагнетики с **большой** диэлектрической проницаемостью при $\downarrow T$ (SrTiO_3 , GeTe , SnTe , CuS и др.)

Не обладают:

1. Наилучшие проводники в нормальных условиях (**Cu, Ag, Au**)
2. Большинство ферромагнетиков и антиферромагнетиков.



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.8. Явления сверхпроводимости

Явление сверхпроводимости

Сверхпроводимость нарушается если **напряженность** поля превысит критическую величину $H_{св}$:

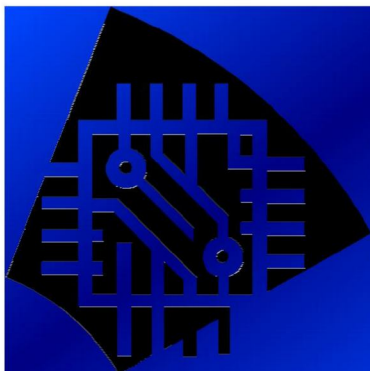
$$H_{св}(T) = H_{св}(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_{св}} \right)^2 \right],$$

где $H_{св}$ – напряженность критического поля ($H_{св}(0)$ при температуре абсолютного 0), $T_{св}$ – температура перехода в сверхпроводящее состояние.

Сверхпроводимость может быть нарушена **током** текущем по проводнику:

$$I_{св} = 2\pi H_{св}(T),$$

где $I_{св}$ – критическое значение тока.



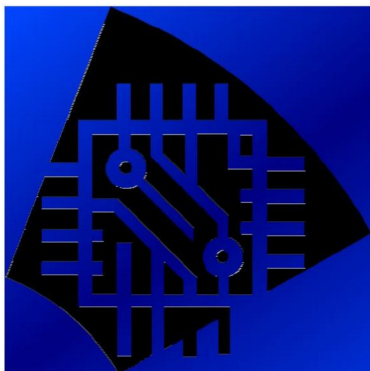
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.8. Явления сверхпроводимости

Основные свойства сверхпроводящих сплавов

Материал	$T_{\text{св}}, \text{К}$	$\mu_0 H_{\text{св1}}(0), \text{Тл}$	$J_{\text{доп}}(0), \text{А/м}^2$	$\mu_0 H_{\text{св2}}(0), \text{Тл}$	Отличительные особенности
V_3Ga	14,8	0,6	21	$1.6 \cdot 10^9$	Удовлетворительные мех. Сво-ва
V_3Si	17,0	0,62	23,4	$2 \cdot 10^9$	То же
Nb_3Sn	18,3	0,54	24,5	$2.4 \cdot 10^9$	Высокая плотность тока, технологичность
Nb_3Ga	20,3	-	34,0	-	Высокая температура перехода, технологичность
Nb_3Ge	21- 24,3	-	37,0	10^9	Наиболее высокая температура перехода



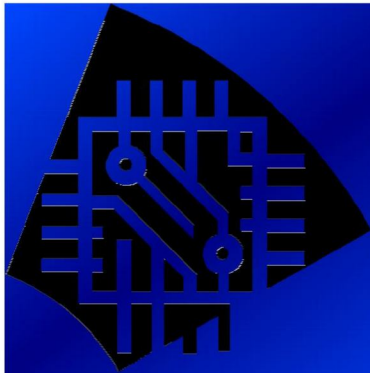
Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.8. Явления сверхпроводимости

Основные свойства сверхпроводящих сплавов

Материал	$T_{\text{св}}, \text{К}$	$\mu_0 H_{\text{св1}}(0), \text{Тл}$	$J_{\text{доп}}(0), \text{А/м}^2$	$\mu_0 H_{\text{св2}}(0), \text{Тл}$	Отличительные особенности
V_3Ga	14,8	0,6	21	$1.6 \cdot 10^9$	Удовлетворительные мех. Сво-ва
V_3Si	17,0	0,62	23,4	$2 \cdot 10^9$	То же
Nb_3Sn	18,3	0,54	24,5	$2.4 \cdot 10^9$	Высокая плотность тока, технологичность
Nb_3Ga	20,3	-	34,0	-	Высокая температура перехода, технологичность
Nb_3Ge	21-24,3	-	37,0	10^9	Наиболее высокая температура перехода



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.8. Явления сверхпроводимости

Схема пленочного криотрона

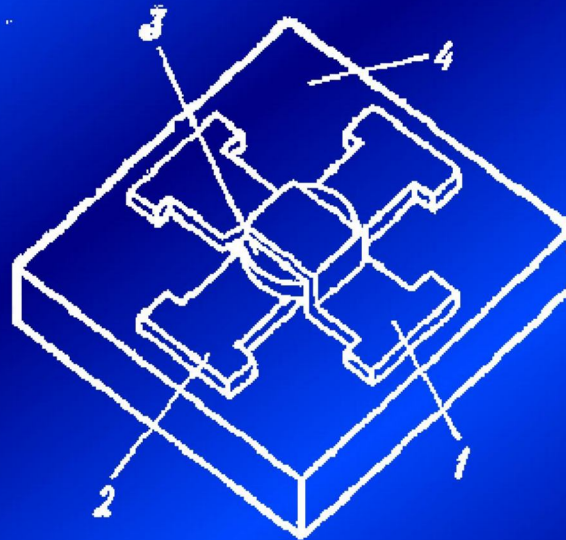
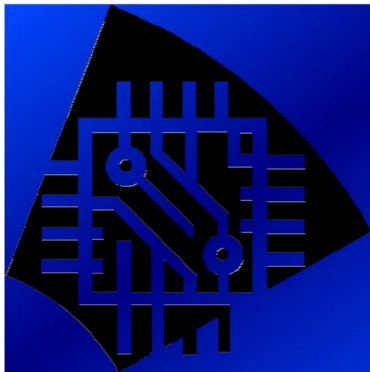


Схема пленочного криотрона:

1 – управляющая пленка из свинца; 2 - вентильная пленка из олова;

3 -изоляционный слой; 4 — подложка



Дисциплина : "МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"

Тема 1.2 Основные характеристики и классификация проводников

1.4.9. Классификация проводников по составу, свойствам и техническому назначению

Проводники делятся на :

Металлы

Неметаллические

Сплавы металлов

