

Недостатки классической теории электропроводности

1. $\frac{\rho(\text{теория})}{\rho(\text{пыт})} \approx 1000$

2. $\rho(\text{теория}) \approx \sqrt{T}$
 $\rho(\text{пыт}) \approx T$

3. При высоких температурах для молярной теплоемкости металлов

$$\frac{C_{\mu}(\text{теория})}{C_{\mu}(\text{пыт})} \approx \frac{3R + \frac{3}{2}R}{3R} = 1.5$$

электроны проводимости

закон Дюлонга-Пти

4. Классическая теория не может объяснить явление сверхпроводимости.

Элементы зонной теории

$$\sigma = \begin{cases} > 10^4 \text{ см}^{-1} \cdot \text{ОМ}^{-1} & \text{проводники} \\ 10^{-10} \div 10^4 \text{ см}^{-1} \cdot \text{ОМ}^{-1} & \text{полупроводники} \\ < 10^{-10} \text{ см}^{-1} \cdot \text{ОМ}^{-1} & \text{диэлектрики} \end{cases}$$

Энергетический спектр электрона в водородоподобном атоме

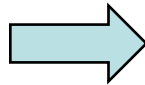
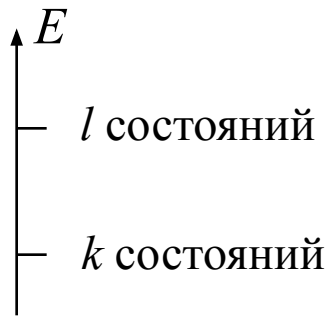


1. Энергетические уровни вырождены: число квантовых состояний с энергией E_n (кратность вырождения) $g_n = 2n^2$
2. Электроны подчиняются принципу запрета Паули – в квантовом состоянии может находиться только один электрон.
3. Энергетические уровни заполняются после заполнения предшествующих, начиная с $n=1$.

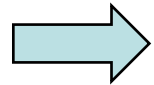
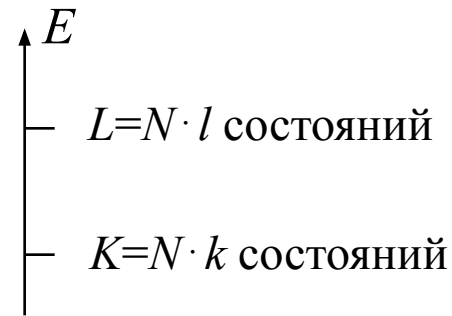
Элементы зонной теории

Объяснение энергетических зон

1 атом



N изолированных атомов



Система N атомов (твердое тело)



Взаимодействие атомов снимает вырождение: энергетические уровни превращаются в энергетические зоны

Элементы зонной теории

Твердое тело при $T = 0$

Полупроводник



Валентная зона заполнена,
зона проводимости свободна.

Проводимость $\sigma = 0$.

Металл



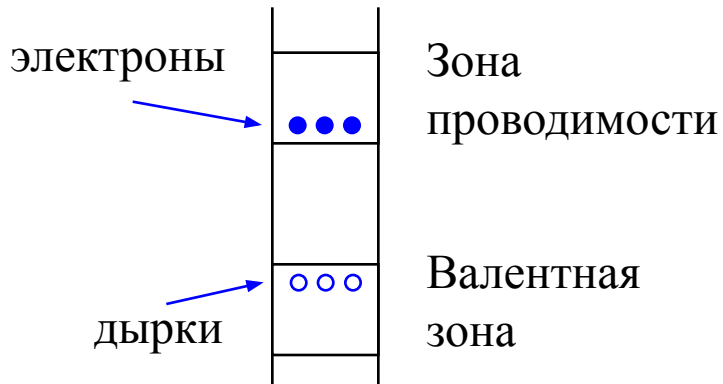
Зона проводимости
заполнена частично.

Проводимость $\sigma > 0$.

Элементы зонной теории

Твердое тело при $T > 0$

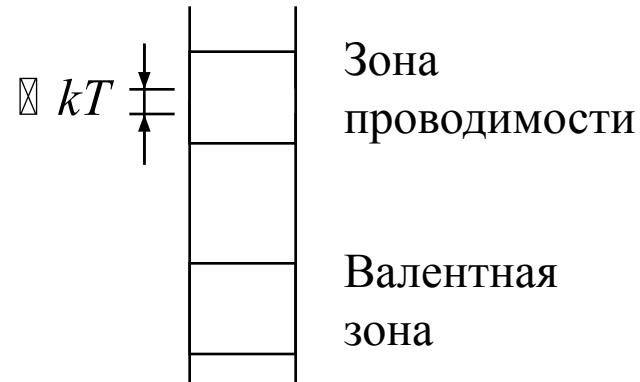
Полупроводник



В валентной зоне появляются дырки, в зоне проводимости - электроны.

Проводимость $\sigma > 0$.

Металл



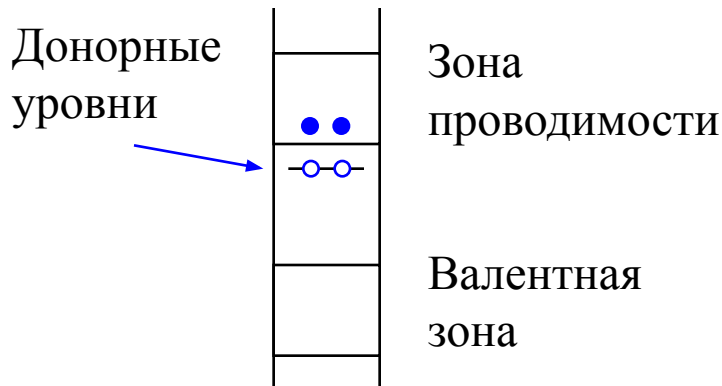
Граница между заполненными и незаполненными уровнями размывается.

Проводимость $\sigma > 0$.

Элементы зонной теории

Примесные полупроводники

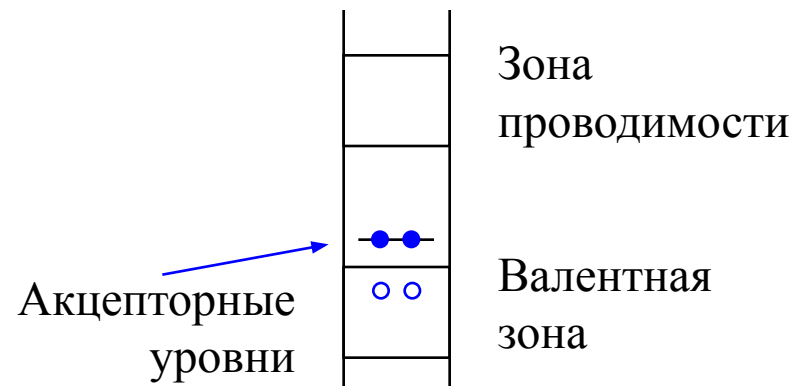
n-типа



Электроны с донорных уровней переходят в зону проводимости.

В зоне проводимости появляются электроны.

p-типа



Электроны из валентной зоны переходят на акцепторные уровни.

В валентной зоне появляются дырки.

Температурная зависимость сопротивления металлов и полупроводников

$$\left. \begin{array}{l} j = enu \\ u = \mu E \end{array} \right\} \longrightarrow \rho = 1/en\mu$$

для металлов и полупроводников,
где μ – подвижность

Металлы

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

Для чистых металлов $\alpha \cong 1/273$

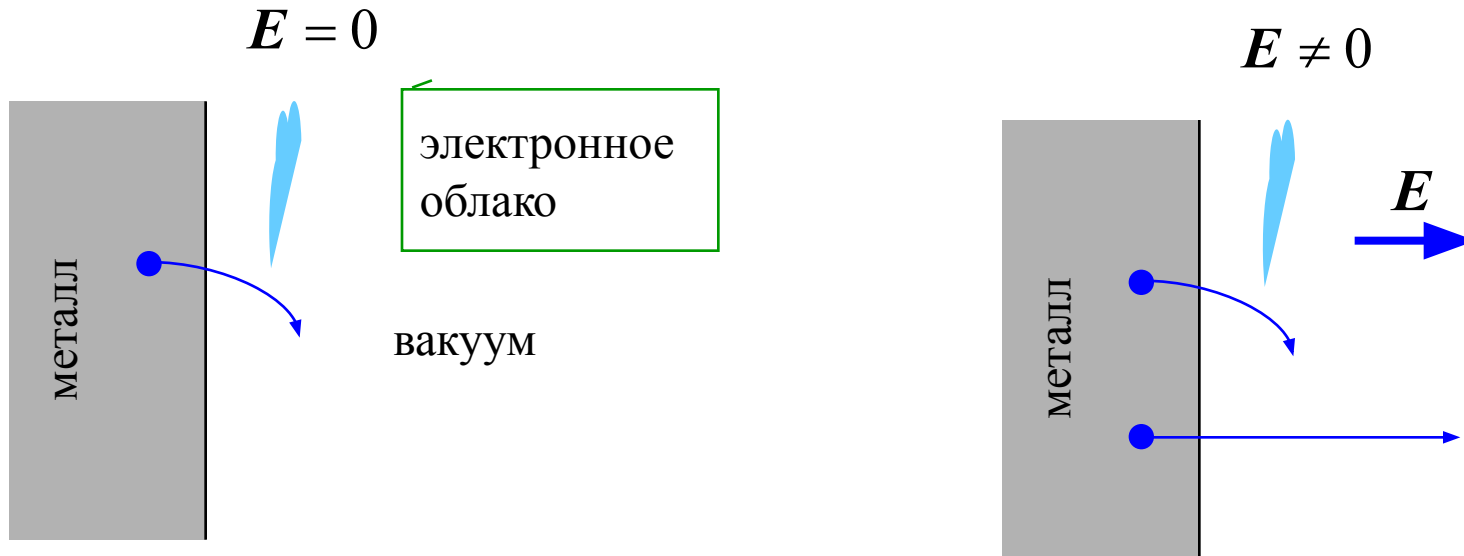
Полупроводники

$$\rho = \rho_0 \exp(E_0/2kT)$$

E_0 – константа

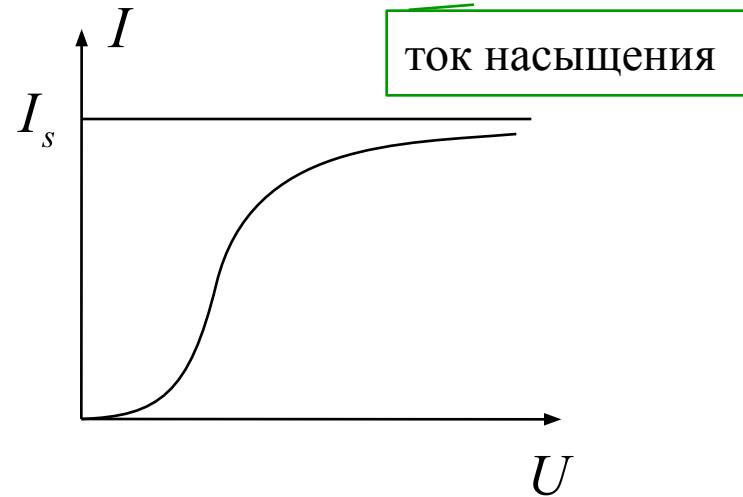
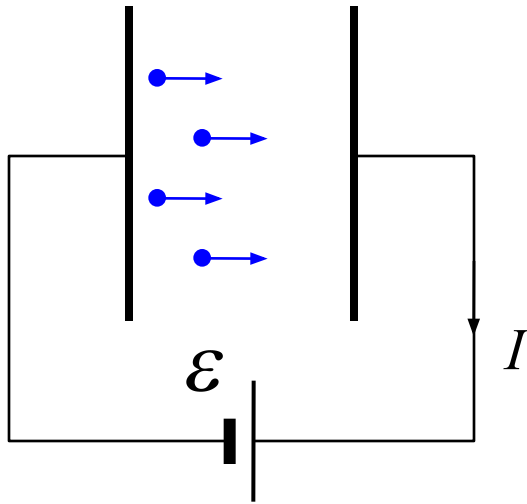
Электрический ток в вакууме

Причина тока в вакууме



Термоэлектронная эмиссия – явление образования электронного облака вблизи поверхности металлов из-за теплового движения свободных электронов

Электрический ток в вакууме



$$j_s = AT^2 \exp(-\Phi/kT)$$

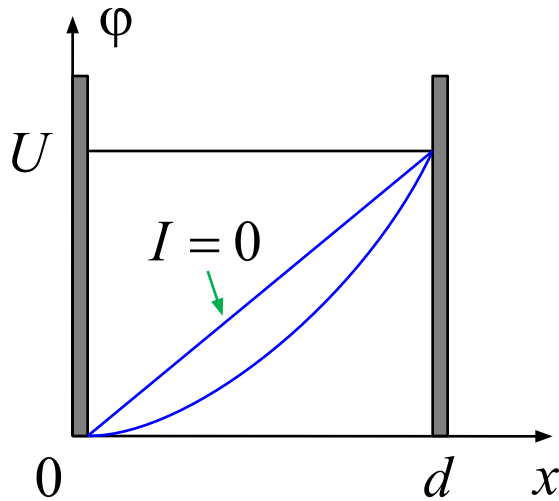
– формула Ричардсона-Дешмана

$A = 120 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$, Φ – термоэлектронная работа выхода.

Для чистых металлов значительный ток достигается при температуре порядка 2000 К.

Для оксидных катодов, благодаря пониженной работе выхода, значительные токи достигаются уже при 1100 К.

Закон трех вторых



уравнение Лапласа

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$j = \rho v$$

$$v = \sqrt{2|e|\phi/m_e}$$

из закона сохранения энергии

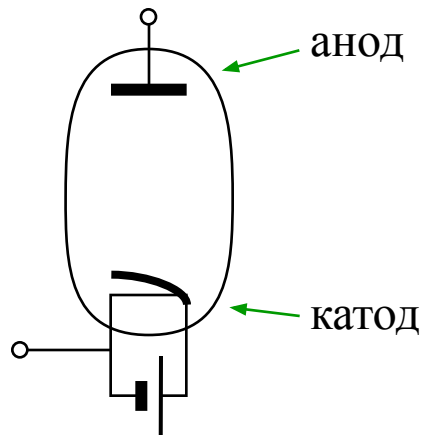
$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\alpha}{\sqrt{\phi}}, \quad \alpha = -j\sqrt{m_e/2|e|}/\epsilon_0 > 0$$

$$I = CU^{3/2}$$

– закон трех вторых (Богуславского-Ленгмюра)

Электронные лампы

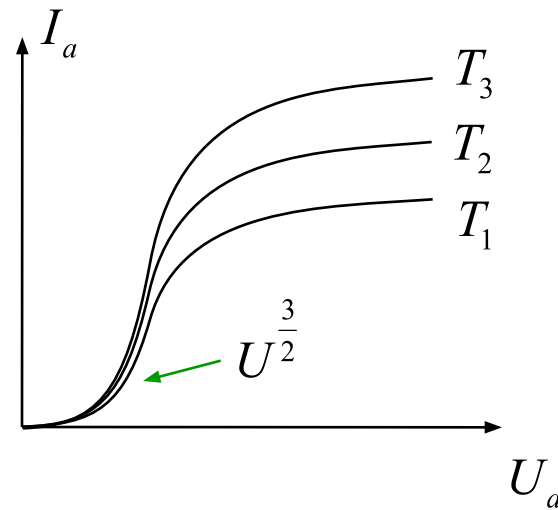
Вакуумный диод



Ток в диоде появляется, если

$$U_a > U_k$$

Вольт-амперная характеристика

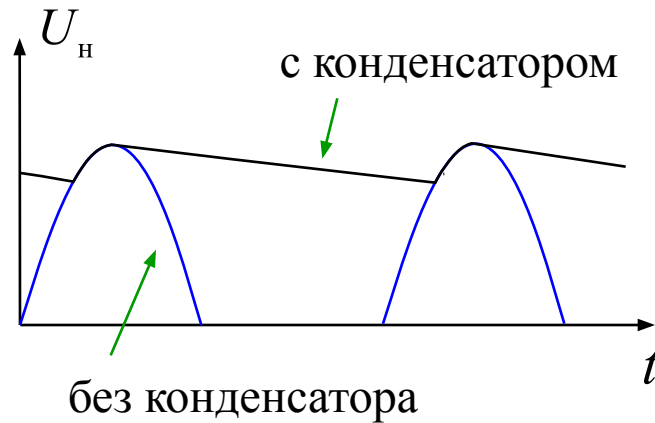
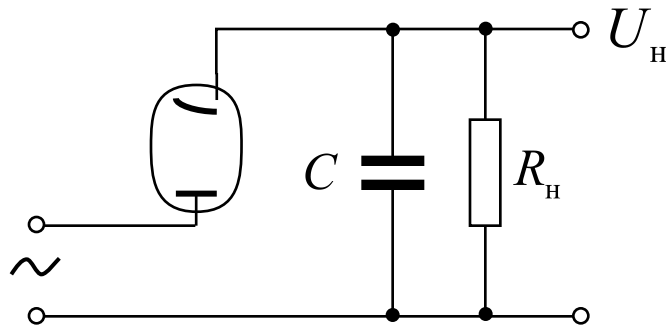


Температура катода

$$T_3 > T_2 > T_1$$

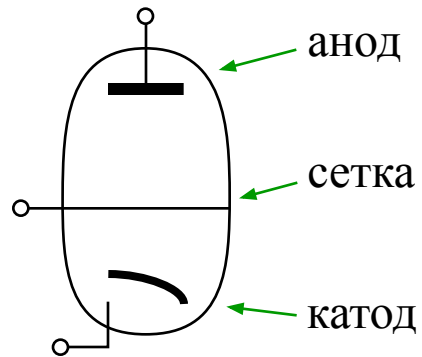
Электронные лампы

Схема выпрямителя



Электронные лампы

Триод



$$I_a = I_a(U_c, U_k)$$

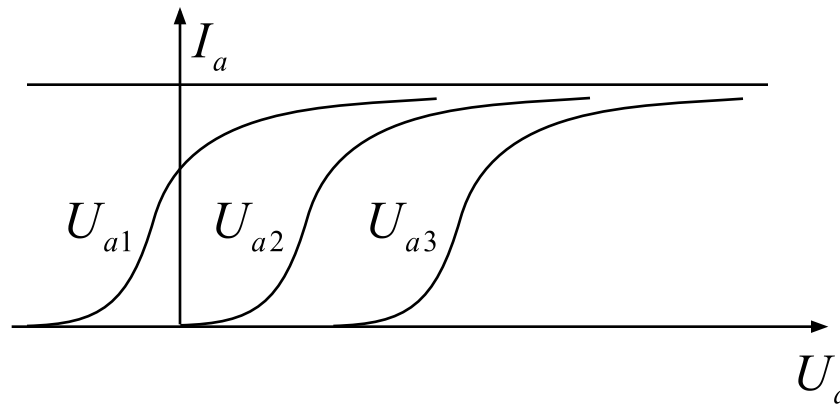
Сетка располагается значительно ближе к аноду, чем катод. Поэтому U_c сильнее влияет на I_a , чем U_a .

$$I_a = I_a(U_c, U_a = \text{const}) \text{ – сеточные характеристики}$$

$$I_a = I_a(U_c = \text{const}, U_a) \text{ – анодные характеристики}$$

Электронные лампы

Сеточные характеристики



$$U_{a1} > U_{a2} > U_{a3}$$

≈ смещение характеристики
влево при $U_a \uparrow$ и вправо при $U_a \downarrow$

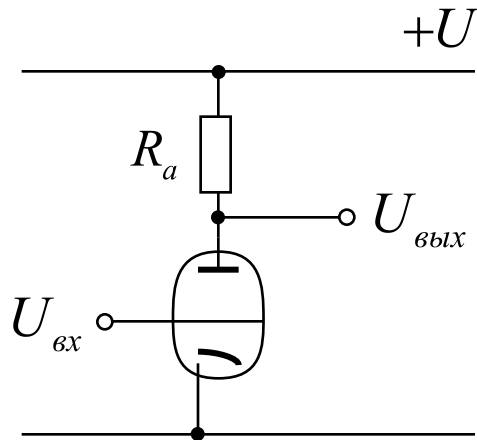


$$I_a = I_a(U_c + DU_a)$$

D – проницаемость сетки

Электронные лампы

Схема усилителя



$$R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{U_c} \quad - \text{дифференциальное сопротивление триода}$$

При $R_i \ll R$

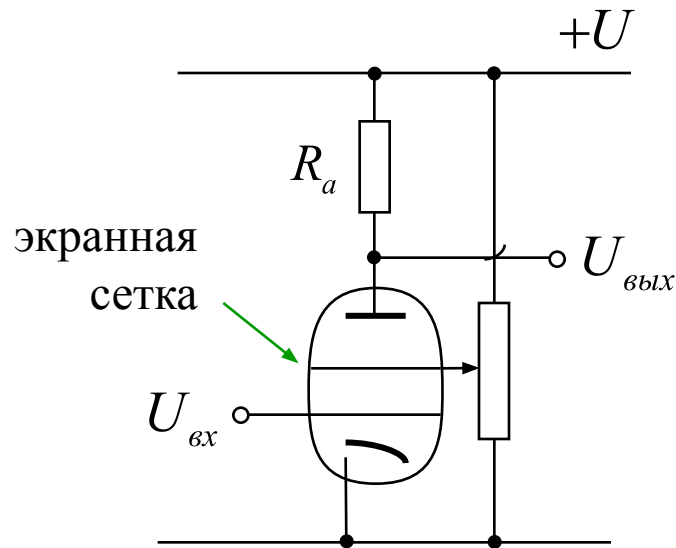
$$K = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = -\frac{1}{D}$$

– коэффициент усиления

Так как $D < 1$ \implies усиление (с инвертированием) переменного сигнала

Электронные лампы

Тетрод



Назначение экранной сетки – уменьшение влияния U_a на I_a .

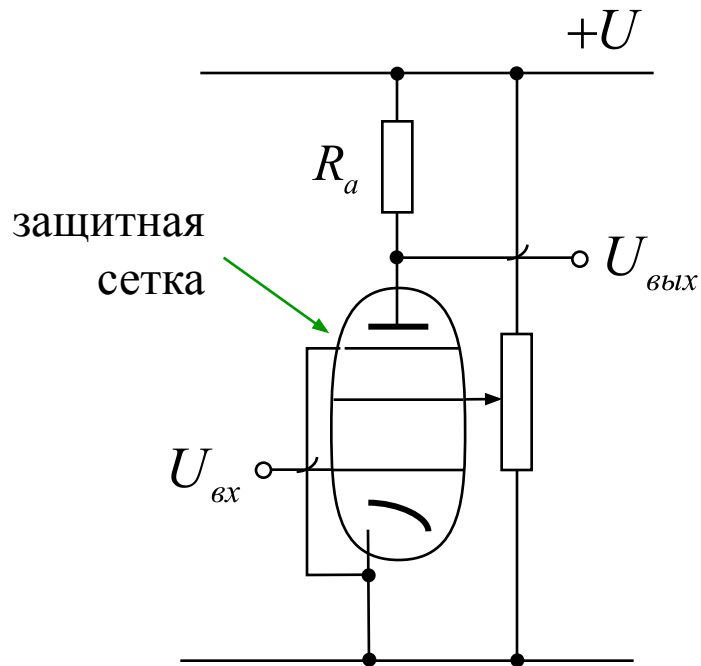


Уменьшается D и увеличивается K .

Недостаток – динатронный эффект (из-за вторичной электронной эмиссии), что приводит к ухудшению характеристик тетрода.

Электронные лампы

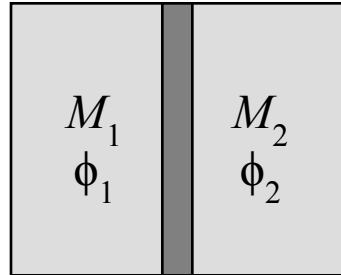
Пентод



Назначение защитной сетки –
устранение динаatronного эффекта.

Вторичные электроны под действием
поля между анодом и защитной сеткой
возвращаются на анод.

Контактная разность потенциалов



M_1, M_2 – металлы

При контакте $\phi_1 \neq \phi_2$ \Rightarrow

В приконтактной области действует ЭДС.



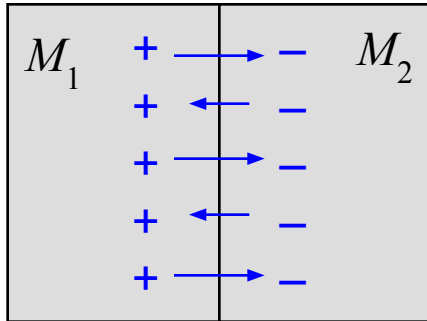
$$T_i = T$$

Правило Вольты:

$(\phi_n - \phi_1)$ не зависит от числа и вида промежуточных металлов.

Правило Вольты является следствием законов термодинамики.

Контактная разность потенциалов



Причина возникновения КРП – диффузия электронов из-за их разной концентрации и скорости в контактирующих металлах.

При термодинамическом равновесии

$$\mu_1 + e\varphi_{i1} = \mu_2 + e\varphi_{i2} \quad \longrightarrow$$

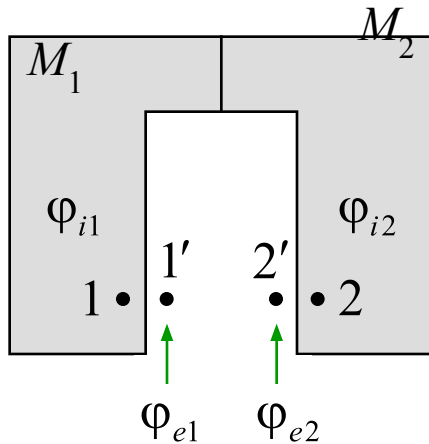
$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = (\mu_1 - \mu_2)/e$$

– внутренняя контактная разность потенциалов

μ – химический потенциал электронного газа в металле
в отсутствии электрического поля,

ϕ – электрический потенциал металла.

Контактная разность потенциалов



В тонком приповерхностном слое металла имеется электрическое поле, по причине того, что “центр тяжести” электронной оболочки поверхностного атома не совпадает с его ядром.



$$\varphi_{e1} \neq \varphi_{i1}, \quad \varphi_{e2} \neq \varphi_{i2}$$

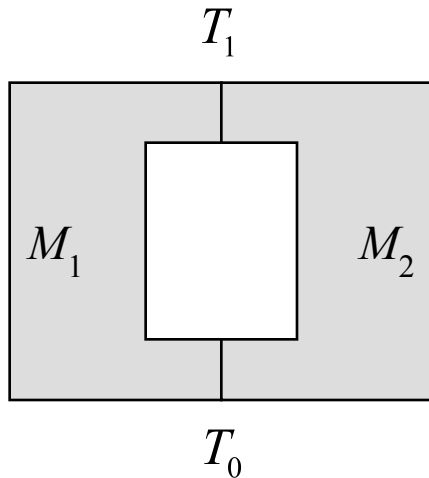
По определению Φ – работа выхода электрона из металла

$$\Phi = e\varphi_e - (\mu + e\varphi_i) \quad \longrightarrow$$

$$\varphi_{e2} - \varphi_{e1} = (\Phi_1 - \Phi_2)/e$$

– внешняя контактная разность потенциалов

Термоэлектрический ток (явление Зеебека)



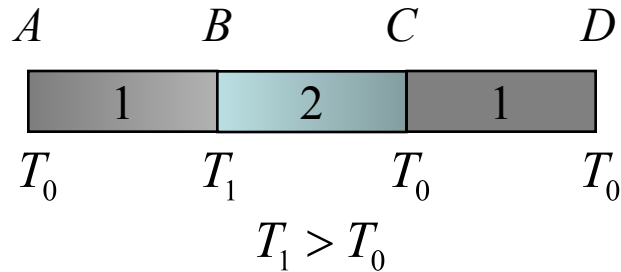
Если температуры контактов не равны $T_1 \neq T_0$, то в цепи возникает ток и, следовательно, возникает термоЭДС.

Явление Зеебека – явление возбуждения термоэлектрического тока.

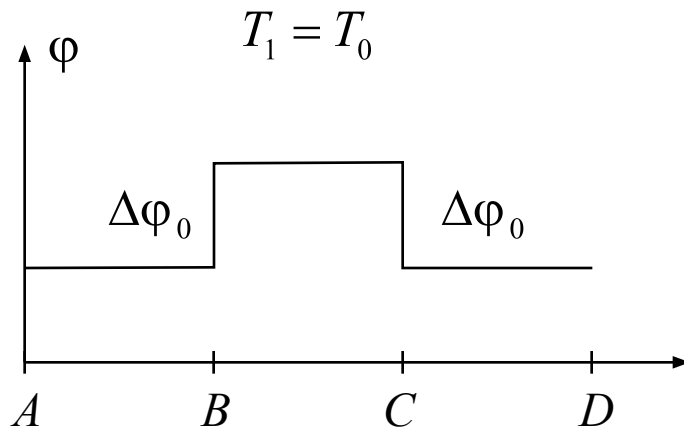
Причина возникновения термоЭДС:

1. Диффузия электронов по причине различия
 - а) тепловых скоростей электронов
 - б) концентраций электронов в случае полупроводников
2. Зависимость КРП от температуры.

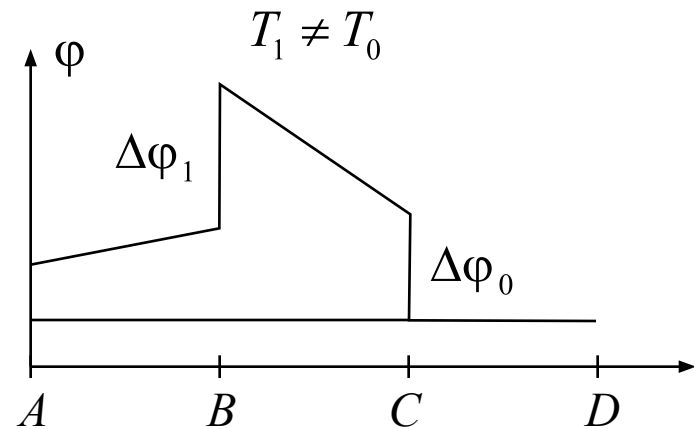
Термоэлектрический ток (явление Зеебека)



Распределение потенциала в цепи



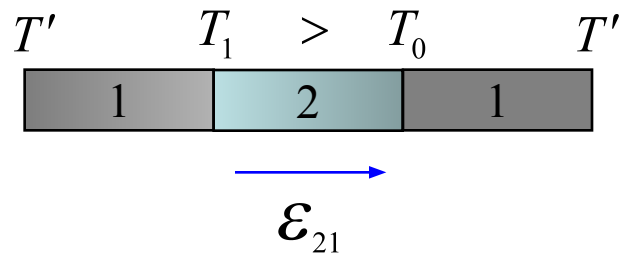
$$\varphi_A = \varphi_B$$



$$\varphi_A \neq \varphi_B$$

Термоэлектрический ток (явление Зеебека)

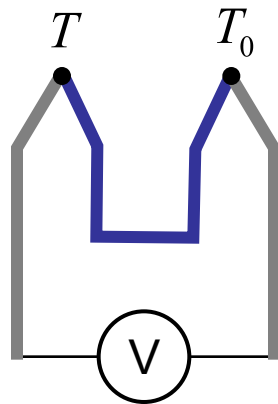
Положительное направление термоЭДС



Положительным направлением термоЭДС принимается направление в проводнике 2 от более нагретого контакта к менее нагретому.

Свойства термоЭДС —

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{21} = \mathcal{E}_{20} - \mathcal{E}_{10} \\ \mathcal{E}_{21} = \alpha_{21}(T_1 - T_0) \end{cases} \quad \alpha_{21} - \text{коэффициент термоЭДС}$$



Термопара – устройство для измерения температуры