



З Д Р А В С Т В У Й Т Е !

**Сегодня: \***

# Лекция 13

## **Тема: Классическая теория электропроводности металлов**

### **Содержание лекции:**

- 13.1. Классическое представление об электропроводности металлов. Экспериментальные данные**
- 13.2. Вывод законов Ома и Джоуля – Ленца в классической теории электронной проводимости металлов**
- 13.3. Сверхпроводимость**

# 13.1 Классическое представление об электропроводности металлов. Экспериментальные данные

Кристаллическая решетка металлов состоит из остовов положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решетки, и «свободных» электронов, беспорядочно движущихся в промежутках между ионами, образуя особого рода электронный газ.

В отсутствие внешнего электрического поля электроны движутся хаотически.

Появление поля вызывает направленное движение электронов вдоль силовых линий поля. Появляется электрический ток.

Сталкиваясь при своем движении с дефектами решетки или рассеиваясь на ионах электроны передают избыток энергии, приобретенный под действием поля.

Рассеяние электронов на примесях, дефектах, ионах является причиной возникновения сопротивления и теплового действия электрического тока.

Ионы в металлах не участвуют в переносе электричества. Рикке (1845–1915) в течение года пропускал ток через три поставленных друг на друга цилиндра: медный, алюминиевый и снова медный (рис. 13.1). За год через цилиндры прошло  $3,5 \cdot 10^6$  Кл электричества, но проникновения металлов друг в друга и изменения их массы с точностью до  $\pm 0,03$  мг не было обнаружено.

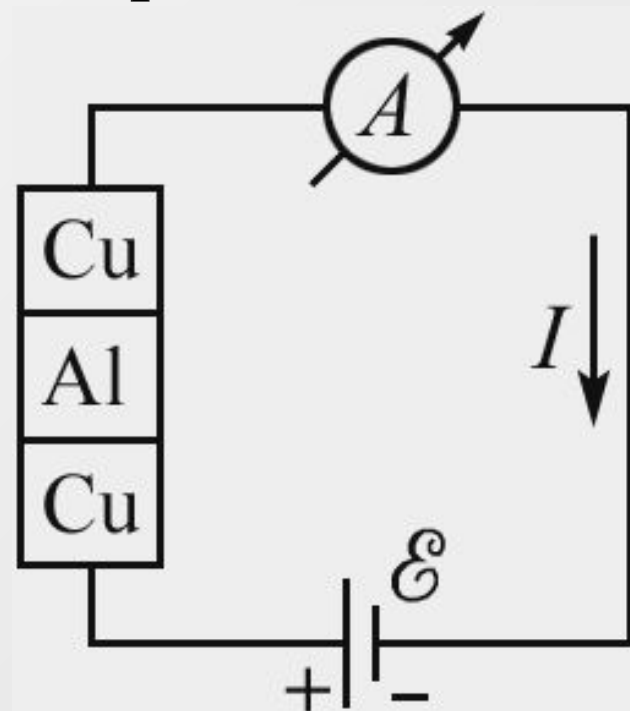


Рис. 13.1

Прямое указание на природу «свободных» носителей заряда в металлах дали опыты Мандельштама и Папалекси в 1913 г. Катушка, содержащая большое число витков проволоки, раскручивалась и быстро тормозилась, а электроны после торможения продолжали двигаться, что приводило к появлению тока в замкнутой цепи.

По отклонению баллистического гальванометра измерялся полный заряд, прошедший через гальванометр.

Количественный результат был получен Толменом

и Стюартом в 1916 г.

Величина силы инерции при торможении равна  $ma$ , она уравновешивается полем кулоновских сил  $eE$  при инерционном смещении электронов.

$$F = m \frac{v_{\text{н}} - v_{\text{к}}}{\Delta t} = eE = e \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}$$

Здесь  $m$ ,  $e$  – масса и заряд частиц, ответственных за прохождение тока в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $v_{\text{н}}$ ,  $v_{\text{к}}$  – начальная и конечная линейная скорости обода вращающейся катушки ( $v_{\text{к}} = 0$ );  $\Delta t$  – время торможения.

Согласно закону Ома, имеем

$$\phi_1 - \phi_2 = IR = \frac{\Delta q}{\Delta t} R \quad ,$$

где  $\Delta q$  – заряд, прошедший по цепи и измеренный баллистическим гальванометром.

В результате из равенства

$$m \frac{v_H}{\Delta t} = e \frac{\Delta q R}{l \Delta t}$$

была определена величина удельного заряда частицы, ответственной за прохождение тока в металлах, выраженная через экспериментально определяемые параметры:

$$\frac{e}{m} = \frac{vl}{\Delta q R}$$



Удельный заряд ( $e/m$ ) в пределах ошибок измерений оказался равным удельному заряду электрона  $1,76 \cdot 10^{-11}$  Кл/кг.

Таким образом, свободными носителями заряда, ответственными за появление тока в металлах, являются электроны.

С точки зрения классического подхода считается, что электроны представляют в металлах идеальный газ.

В газе «свободных» электронов силы отталкивания между электронами компенсируются силами притяжения электронов к регулярно расположенным остовам кристаллической решетки.

## 13.2. Вывод законов Ома и Джоуля – Ленца в классической теории электронной проводимости металлов

Исходя из того, что электроны представляют в металлах идеальный газ, попытаемся получить закон Ома и выражение для электропроводности металла.

Воспользуемся определением величины плотности тока

$$\mathbf{j} = en\mathbf{v}.$$

Согласно классической теории проводимости электроны представляют точки, движущиеся под действием внешнего поля  $\mathbf{E}$ .

В отсутствие поля средняя скорость направленного движения электронов  $u$  равна нулю, а средняя скорость хаотического движения  $v$  определяется согласно молекулярно-кинетической теории следующим выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m_e}} \approx 10^5 \text{ — } \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Под действием поля  $E$  электроны приобретают добавочную скорость  $u$  (рис. 13.2). Величина этой скорости много меньше средней скорости хаотического движения практически для всех реально достижимых токов

$$u = \frac{j}{en} = \frac{(I/S)}{en} = \frac{10^7 \text{ (А/м)}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}} \approx 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

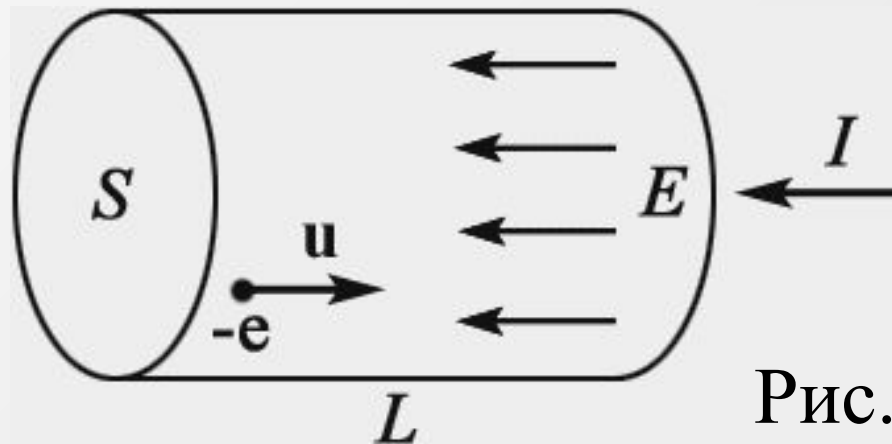


Рис.13.2

Здесь концентрация электронов подсчитана для меди,  $n = NA \cdot \rho / A \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Поэтому столкновения электронов с дефектами, примесями и ионами решетки связаны главным образом с тепловым движением электронов и происходят в среднем через промежуток времени

$$\tau = \frac{l}{v}$$

где  $l$  – длина свободного пробега электрона.

За время  $\tau$  электрон может приобрести среднюю скорость направленного движения:

$$\mathbf{u} = \mathbf{a}\tau = \frac{\mathbf{F}}{m}\tau = \frac{e\mathbf{E}}{m}\tau,$$

где  $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m = e\mathbf{E}/m$  – ускорение, сообщаемое электрону силой  $\mathbf{F} = e\mathbf{E}$ .

Среднее значение скорости  $\mathbf{u}$

$$\mathbf{u}_{\text{ср}} = \frac{0 + \mathbf{u}}{2} = \frac{1}{2} \frac{e\mathbf{E}}{m} \tau$$

Подставив величину  $u_{\text{ср}}$  в выражение для плотности тока получим

$$j = \frac{e^2 n l}{2m\nu} E$$

Плотность тока пропорциональна напряженности поля, что соответствует закону Ома

$$j = \sigma E,$$

$\sigma$ -величина электропроводности, равная

$$\sigma = \frac{e^2 n l}{2m\nu}$$

Металлы оказываются хорошими проводниками не только электрического тока, но и тепла. Это связано с тем, что переносчиками тепла и электричества в металлах являются свободные электроны, а роль ионов в передаче тепла пренебрежимо мала.

Коэффициент теплопроводности для металлов, как ранее было показано, равен

$$\lambda = \frac{1}{3} n v C_V l,$$

где  $C_V = (3/2)k$  – теплоемкость при постоянном объеме.



Разделив  $\lambda$  на  $\sigma$ , имеем ( $mv^2 \approx 3kT$ ).

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{2}{3} mv^2 \frac{C_V}{e^2} = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T$$

– закон Видемана – Франца, утверждающий, что отношение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для металлов к удельной электропроводности  $\sigma$  пропорционально температуре и не зависит от рода металла.

Этот закон был установлен в 1853 г. экспериментально немецкими физиками Г. Видеманом и Р. Францем. Теоретически закон был обоснован в 1902 г. немецким физиком Друде

Совпадение результатов теории П. Друде с экспериментом считалось долгое время веским доказательством справедливости классической теории электропроводности и теплопроводности металлов.

Но реально классическая теория дает неверные значения для  $v^2$  и  $C_V$ . Случайно эти ошибки компенсируют друг друга, и фактически  $C_V v^2$  получается верной. Последовательный вывод закона Видемана – Франца может быть выполнен только в рамках квантовой механики.

Классическая теория электропроводности дает правильное объяснение закону Джоуля – Ленца, т.е. тепловому действию тока.

Поскольку при каждом столкновении частицей рассеивается дополнительно приобретенная энергия  $mu^2/2$ , а число таких столкновений в единице объема равно  $n/\tau$ , то полное тепловыделение в единице объема

$$w = \frac{mu^2}{2} \frac{n}{\tau} = \frac{e^2 nl}{2m\nu} E^2 = \sigma E^2$$

Удельная мощность тока  $w$  пропорциональна квадрату электрического поля и удельной

электропроводности  $\sigma = \frac{e^2 n l}{2 m v}$

что соответствует эксперименту.

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho l / S,$$

где  $l$  и  $S$  – его длина и поперечное сечение;  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника, определяемое удельной электропроводностью

$$\rho = 1 / \sigma.$$

Из всех металлов наибольшую удельную электропроводность имеет серебро.

Электропроводность меди только на 10% меньше электропроводности серебра, притом медь во много раз дешевле, поэтому применяемые в электротехнике высококачественные проводники чаще всего изготавливаются из меди, очищенной от всех примесей.

Для изготовления проводов применяют также алюминий, удельное сопротивление которого в 1,5 раза превышает сопротивление меди.

Сопротивление химически чистых металлов с повышением температуры возрастает, увеличиваясь с каждым градусом примерно на 0,4% от сопротивления при 0 °С.

Для многих химически чистых металлов даже при значительном нагревании сохраняется пропорциональность между увеличением сопротивления и приростом температуры. Это позволяет вычислить сопротивление при температуре  $t$  °С по формуле

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R_0$  – сопротивление при 0 °С и  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Зависимостью электропроводности от

температуры пользуются для измерения

температуры приборами, называемыми

термометрами сопротивления.

Разновидность термометров сопротивления –

**боллометры** используются для измерения теплового

излучения. Чувствительность боллометров

чрезвычайно велика: они реагируют на поток

энергии  $10^{-8} \div 10^{-9}$  Вт.

Удельное сопротивление металлов зависит не только от температуры, но и от механических воздействий. При растяжении удельное сопротивление большинства металлов возрастает.

Зависимостью сопротивления проволоки от степени ее растяжения пользуются для измерения деформаций и механических напряжений в приборах, называемых тензometрами сопротивления.



- Таким образом, классическая электронная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, законы Ома и Джоуля–Ленца.
- Однако в ряде вопросов классическая электронная теория приводит к выводам, находящимся в противоречии с опытом.

1. Эта теория не может, например, объяснить, почему молярная теплоемкость металлов, также как и молярная теплоемкость диэлектрических кристаллов, равна  $3R$  (закон Дюлонга и Пти.)
2. Классическая электронная теория не может также объяснить температурную зависимость удельного сопротивления металлов:  
Теория дает  $\rho \sim \sqrt{T}$  в то время как из эксперимента получается зависимость  $\rho \sim T$ .
3. Однако наиболее ярким примером расхождения теории и опытов является *сверхпроводимость*.

## 13.3. Сверхпроводимость

С очевидными успехами классическая теория электропроводности столкнулась с принципиальными трудностями в объяснении сверхпроводимости, теплоемкости металлов, зависимости удельного сопротивления от температуры и в количественном описании явлений электропроводности и теплопроводности металлов.

Несоответствие поведения электронов в металле предсказаниям классической теории электропроводности обусловлено тем, что в металле электрон ведет себя как квантовый объект.

Поэтому для описания поведения электронов в металлах необходимо использовать уравнение Шрёдингера, а не уравнение Ньютона.

В рамках квантовой механики удаётся объяснить одно из интереснейших явлений: явление сверхпроводимости металлов.

Изучая поведение сопротивления ртути, охлаждаемой до гелиевых температур, Камерлинг-Оннес в 1911 г. впервые в мире наблюдал исчезновение сопротивления ртути практически до нуля.

Это явление было названо сверхпроводимостью. Между открытием этого явления и его объяснением прошло полвека.

В 1957 г. Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером дано квантово-механическое объяснение природы сверхпроводимости (теория БКШ).

Было показано, что хотя между электронами действуют силы кулоновского отталкивания, тем не менее в твердых телах при температуре перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  – критической температуре, между электронами начинают действовать силы притяжения, обусловленные обменом фононами между электронами.

**Фононы** – кванты упругих колебаний кристаллической решетки.

Это притяжение приводит к образованию связанных электронных пар – куперовских пар.

Пары электронов уже не являются фермионами, и для них уже не действует принцип запрета Паули.

Спаренные электроны являются бозонами — частицами с нулевым спином, и стремятся сконденсироваться. В результате такой конденсации образуется электрически заряженная, сверхтекучая электронная жидкость, обладающая свойствами сверхпроводимости.

Сверхпроводящее состояние является макроскопическим квантовым состоянием металла.

# Лекция 14. ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ПРОВОДНИКОВ.

## КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ПРОВОДНИКОВ

### 14.1. Эмиссия электронов из проводников

#### 14.1.1. Термоэлектронная эмиссия

#### 14.1.2. Холодная и взрывная эмиссия

#### 14.1.3. Фотоэлектронная эмиссия

### 14.2. Контактные явления на границе 14.2.

**Контактные явления на границе** 14.2.

**Контактные явления на границе** раздела

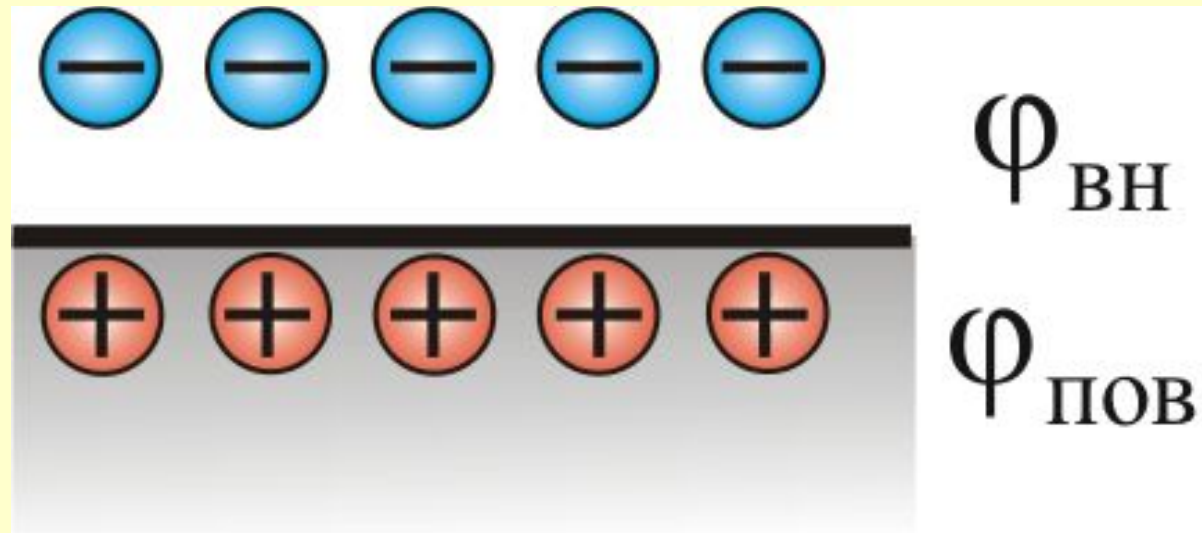
ДВУХ ПРОВОДНИКОВ



## 14.1. Эмиссия электронов из

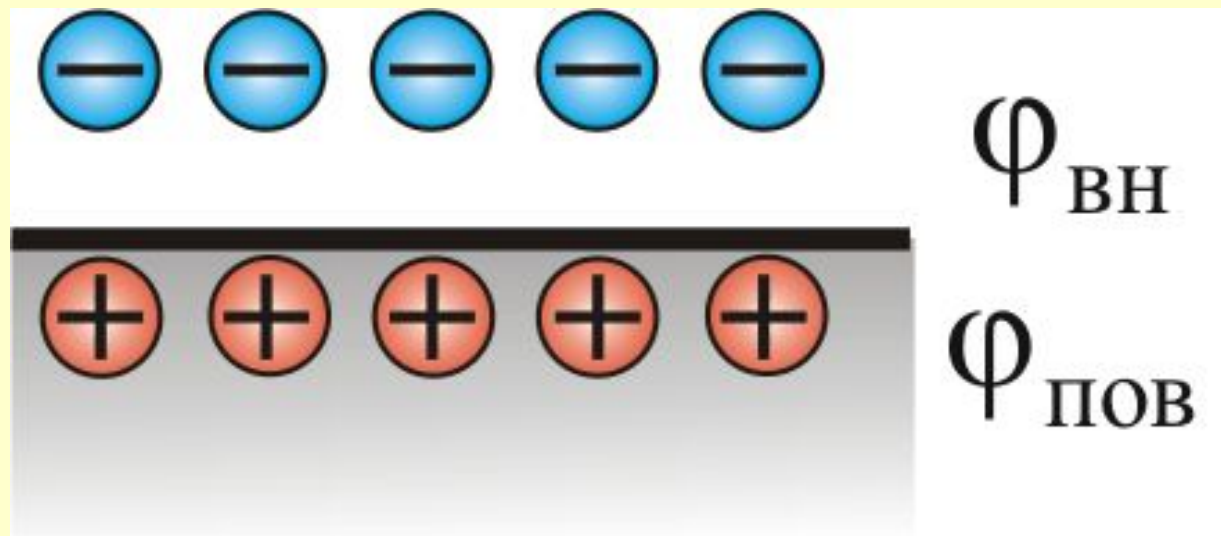
### проводников

- Электрон свободен только в границах металла. Как только он пытается перейти границу «металл – вакуум», возникает кулоновская сила притяжения между электроном и образовавшимся на поверхности избыточным положительным зарядом

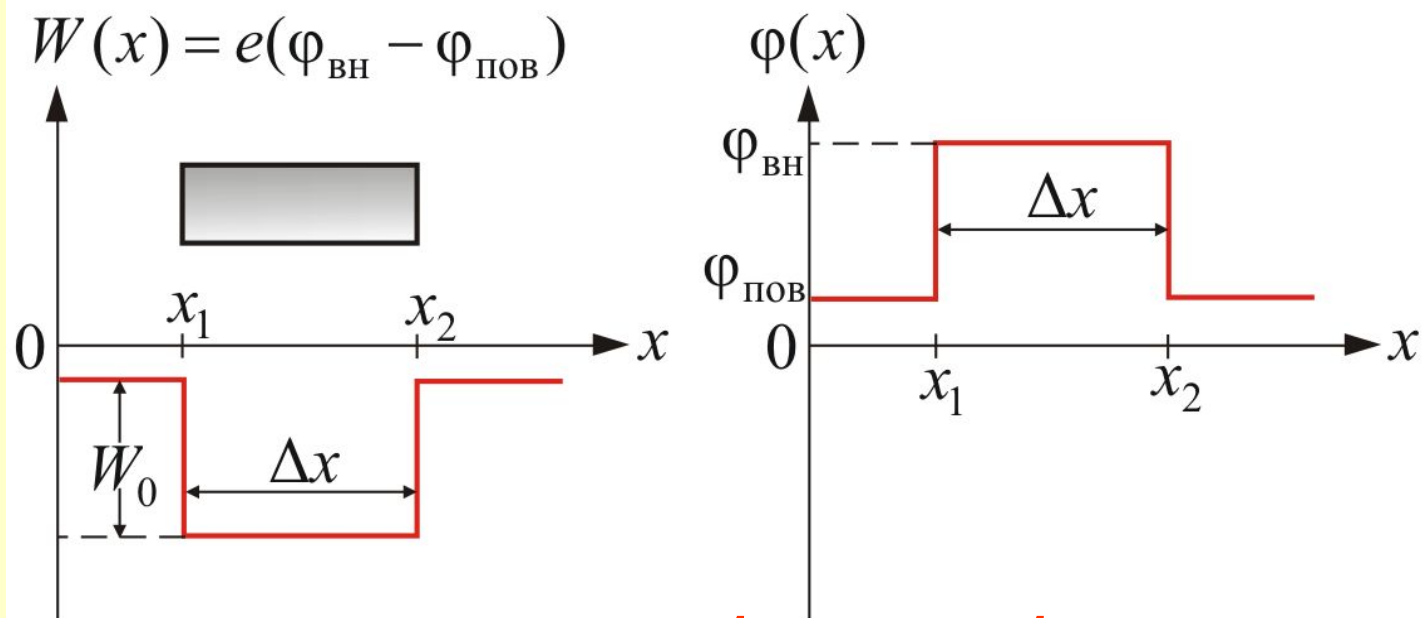


Вблизи от поверхности образуется электронное облако, и на границе раздела формируется двойной электрический слой с **разностью потенциалов**

$$\varphi_{\text{вн.}} - \varphi_{\text{пов.}}$$



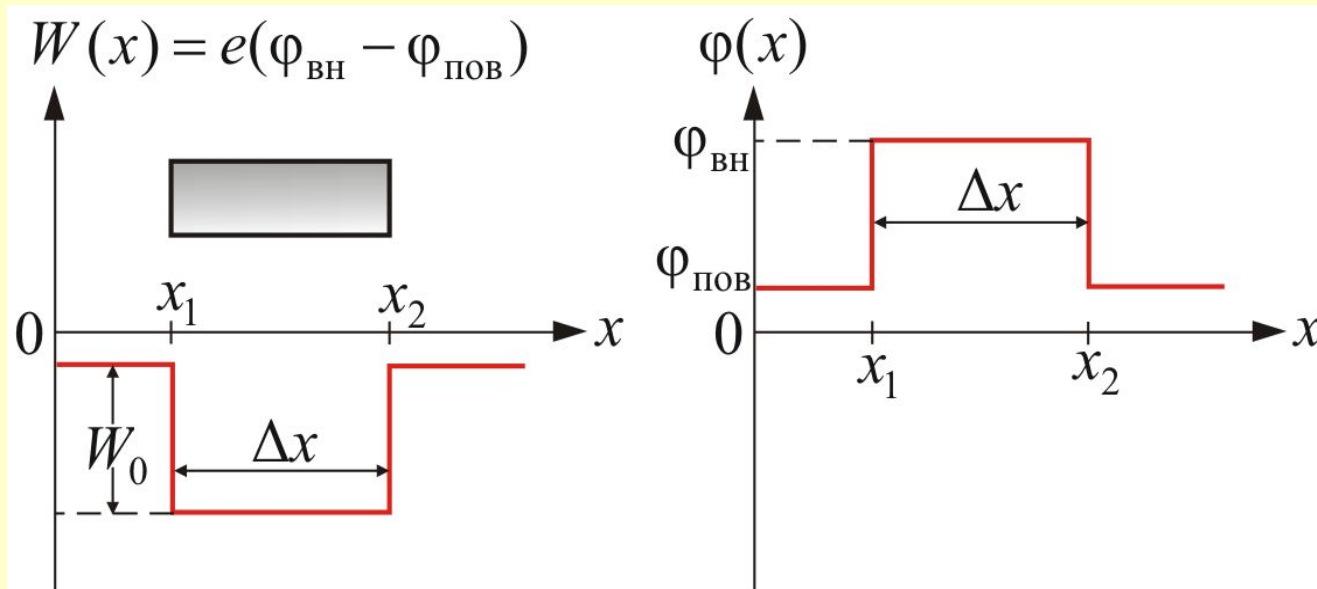
- **Скачки потенциала** на границе металла показаны на рисунке



- **В занятом металлом объеме образуется потенциальная энергетическая яма**
- Так как в пределах металла электроны свободны, и их энергия взаимодействия с узлами решетки равна нулю.
- За пределами металла электрон приобретает энергию  $W_0$ . Это энергия притяжения, поэтому  $W_0 < 0$ .

- Для того, чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть потенциальный барьер и совершить работу

$$A_{\text{ВЫХ}} = e(\varphi_{\text{ВН}} - \varphi_{\text{ПОВ}}). \quad (14.1.1)$$



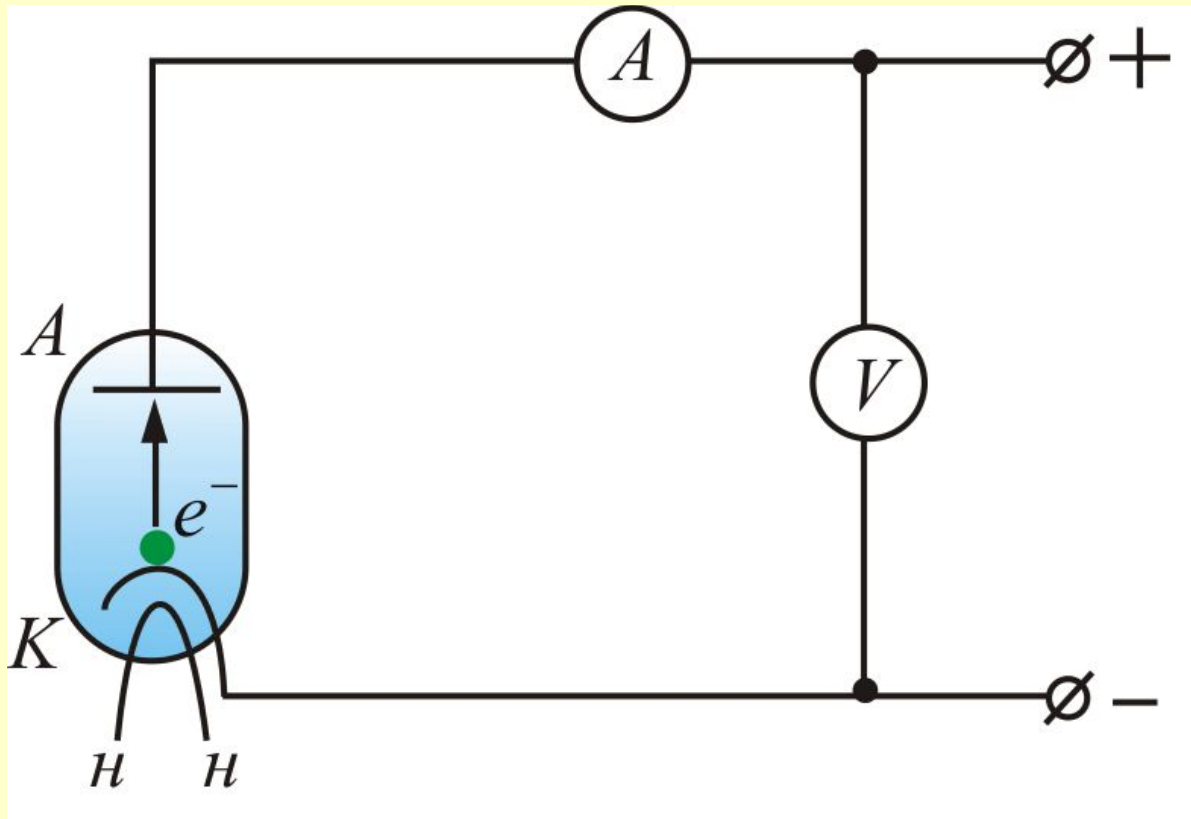
- Эту работу называют *работой выхода электрона из металла*.
- Для ее совершения электрону необходимо сообщить достаточную энергию

$$W \geq A_{\text{ВЫХ}}.$$

# 14.1.1. Термоэлектронная ЭМИССИЯ

- Величина работы выхода зависит от химической природы вещества, от его термодинамического состояния и от состояния поверхности раздела.
- *Если энергия, достаточная для совершения работы выхода, сообщается электронам путем нагревания, то процесс выхода электронов из металла называют термоэлектронной эмиссией.*

- Явление испускания электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум называется **термоэлектронной эмиссией**.



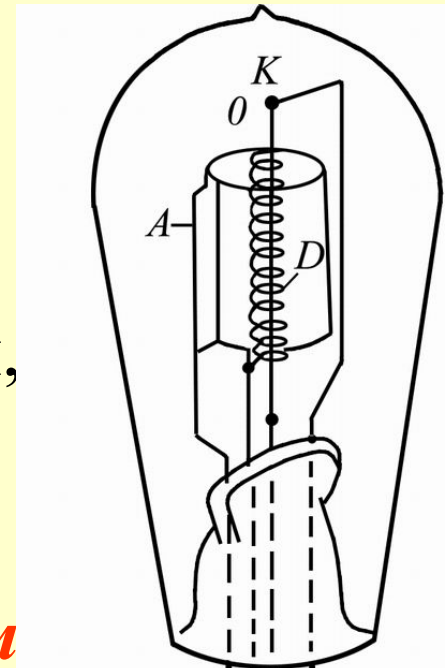
- Нагрев необходим для того, чтобы энергии теплового движения электрона было достаточно для преодоления сил кулоновского притяжения между отрицательно заряженным электроном и индуцируемым им на поверхности металла положительным зарядом при удалении с поверхности. Кроме того, при достаточно высокой температуре над поверхностью металла создается отрицательно заряженное электронное облако, препятствующее выходу электрона с поверхности металла в вакуум.

- **Явление термоэлектронной эмиссии открыто в 1883 г.** знаменитым американским изобретателем **Эдисоном**.

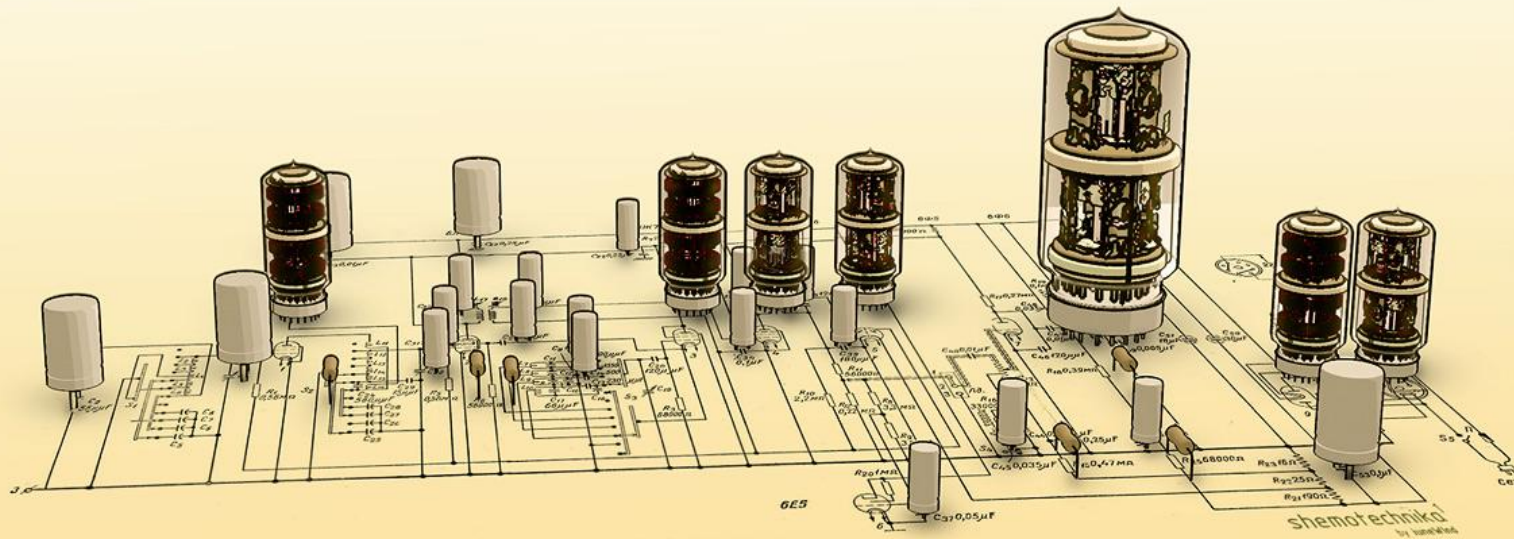
- Это явление наблюдалось им в вакуумной лампе с двумя электродами – анодом, имеющим положительный потенциал, и катодом с отрицательным потенциалом.

- Катодом лампы может служить нить из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден, тантал и др.), нагреваемая электрическим током.

- Такая лампа называется **вакуумным диодом**

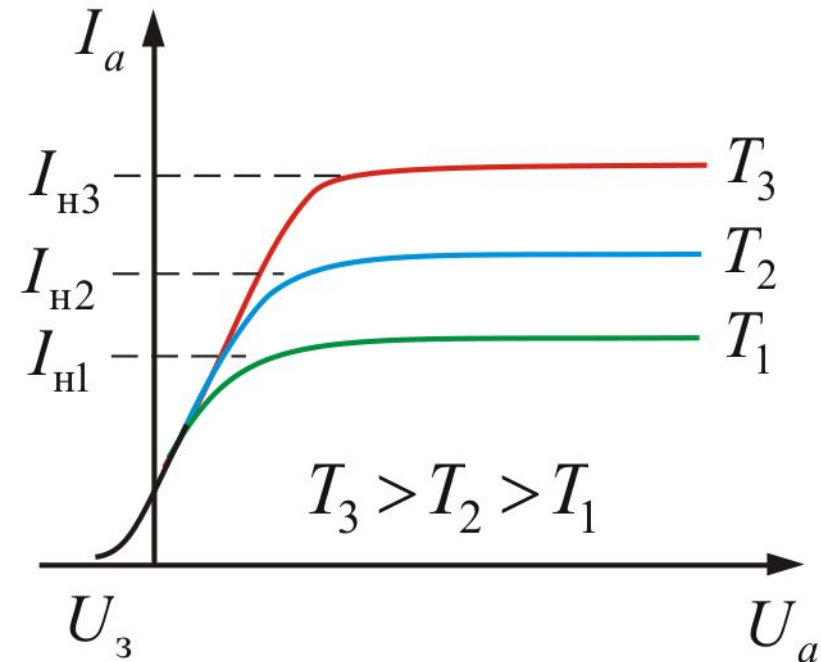
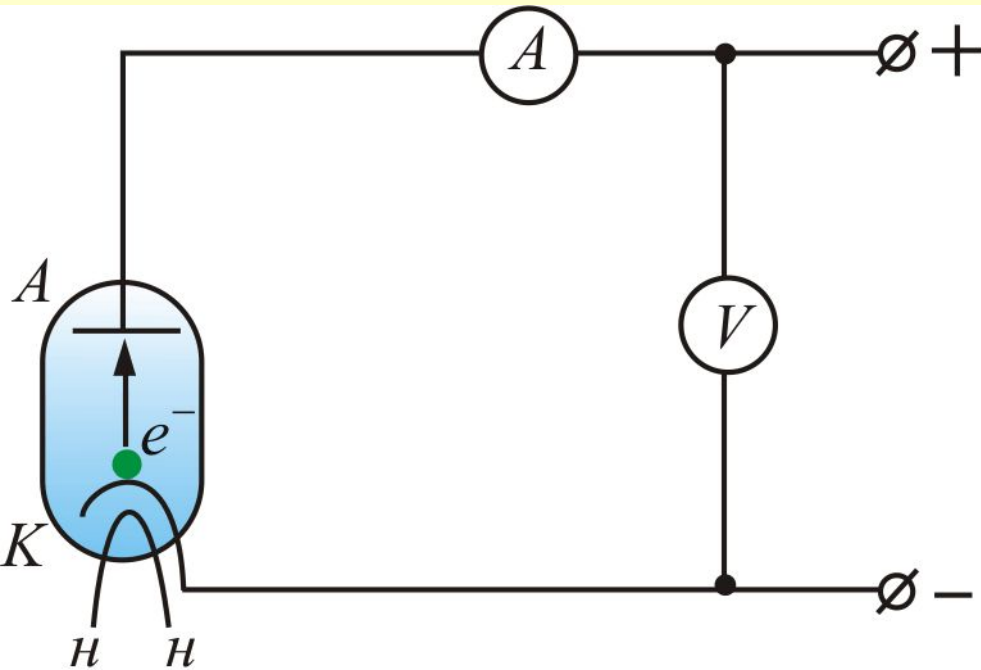






- Если катод холодный, то ток в цепи катод – анод практически отсутствует.
- При повышении температуры катода в цепи катод – анод появляется электрический ток, который тем больше, чем выше температура катода.
- При постоянной температуре катода ток в цепи катод – анод возрастает с повышением разности потенциалов  $U$  между катодом и анодом и выходит к некоторому стационарному значению, называемому **током насыщения**  $I_{\text{н}}$ .
- При этом **все термоэлектроны, испускаемые катодом, достигают анода.**
- Величина тока анода не пропорциональна  $U$ , и поэтому для вакуумного диода закон Ома не выполняется.

- На рисунке показаны *схема вакуумного диода и вольт-амперные характеристики (ВАХ)  $I_a(U_a)$*
- $U_3$  – *задерживающее напряжение* при котором  $I = 0$



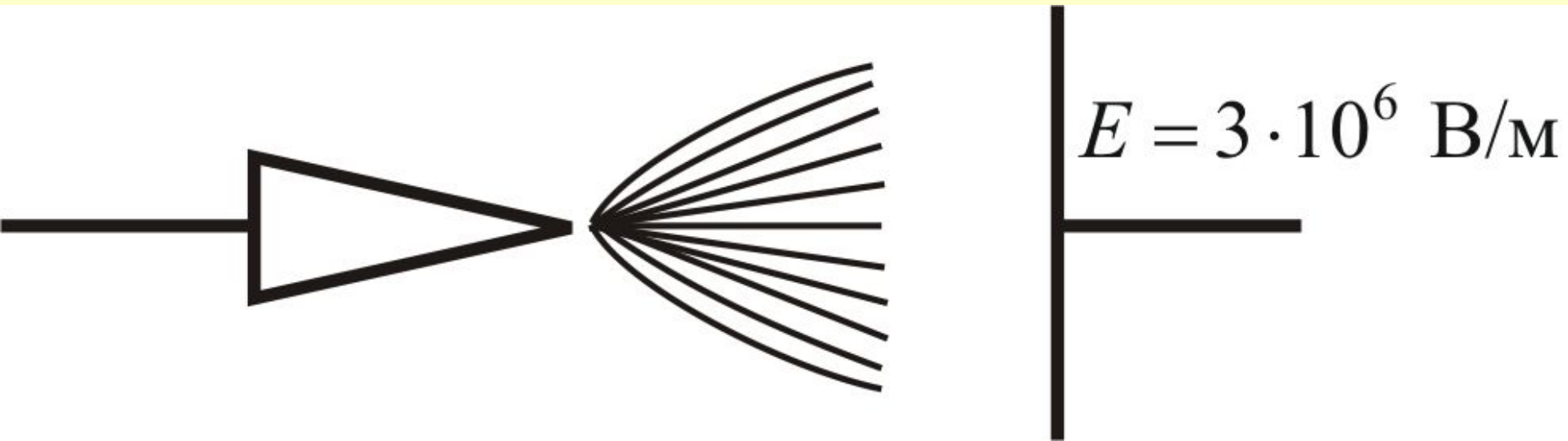
- $I_n$  – *ток насыщения*, при котором **ВСЕ** электроны, испускаемые катодом достигают анода

## 14.1.2. Холодная и взрывная

### ЭМИССИЯ

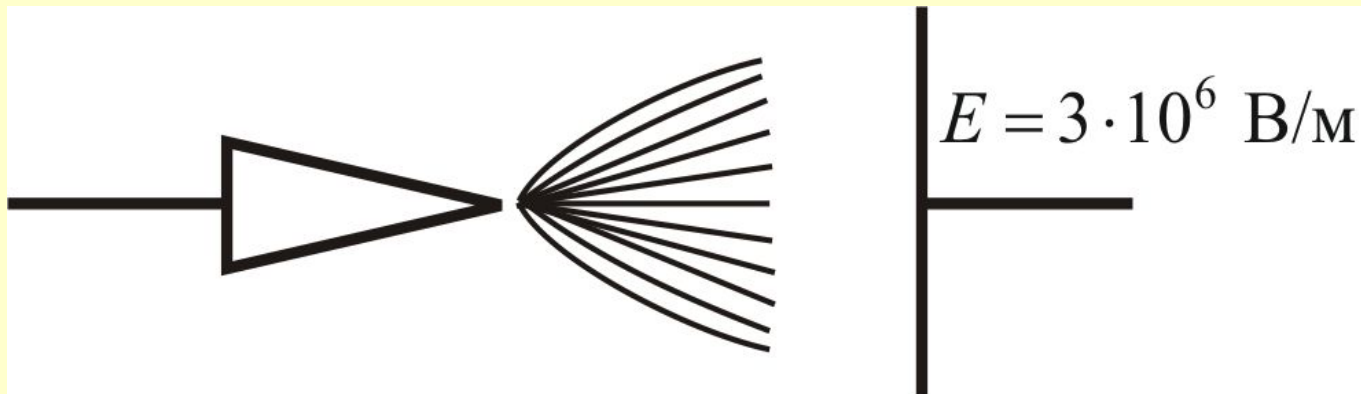
- *Электронную эмиссию, вызываемую действием сил электрического поля на свободные электроны в металле, называют холодной или автоэлектронной эмиссией.*
- Для этого должна быть достаточной **напряженность** поля и должно выполняться **условие**
- $$A_{\text{ВЫХ}} = e(\varphi_{\text{ВН}} - \varphi_{\text{ПОВ}}) \leq eEd, \quad (6.1.2)$$
- здесь  $d$  – толщина двойного электрического слоя, на границе раздела сред.

- Автоэлектронную эмиссию можно наблюдать в **хорошо откачанной вакуумной трубке**, катодом которой служит **острие**, а анодом – обычный электрод с плоской или мало изогнутой поверхностью.



- Напряженность электрического поля на поверхности острия с радиусом кривизны  $r$  и потенциалом  $U$  относительно анода равна

$$E = \frac{U}{r}.$$



- При  $r \sim 10^{-2}$  мми  $U \sim 10^3$  В  $E \sim 10^6$  В/см, что приводит к появлению слабого тока, обусловленного автоэлектронной эмиссией с поверхности катода.
- Сила эмиссионного тока быстро нарастает с повышением разности потенциалов  $U$ .
- Катод специально не разогревается, поэтому эмиссия и называется холодной.
- *Закон Чайльда - Ленгмюра*

$$j = A E^{3/2}$$

- Плотность тока АЭЭ равна

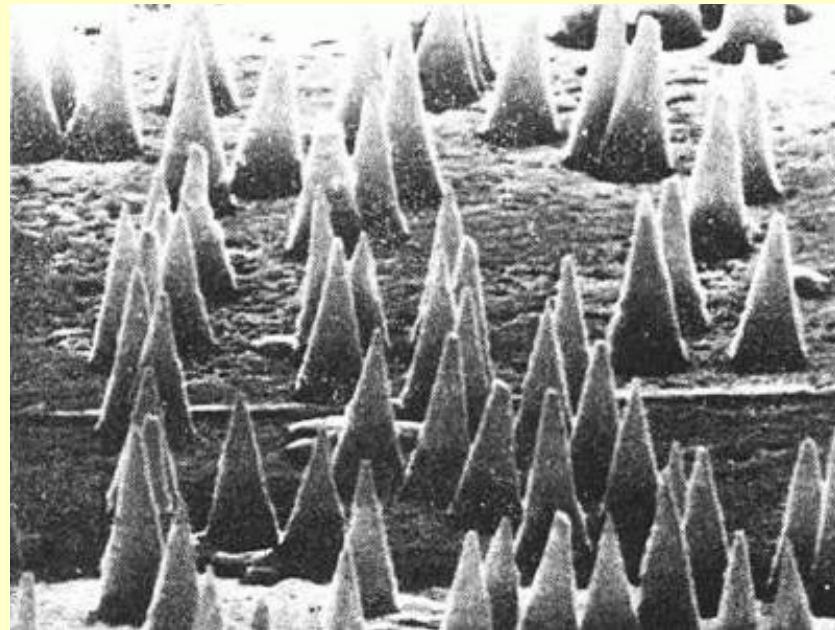
$$j = A E^{3/2} \leq 10^8 \text{ А/см}^{-2},$$

где  $A = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left( \frac{2e}{m} \right) r^{-1/2}$  – коэффициент

- пропорциональности, определяемый геометрией и материалом катода.
- Проще говоря, **закон Чайльда-Ленгмюра показывает, что плотность тока пропорциональна  $E^{3/2}$  (закон трех вторых).**



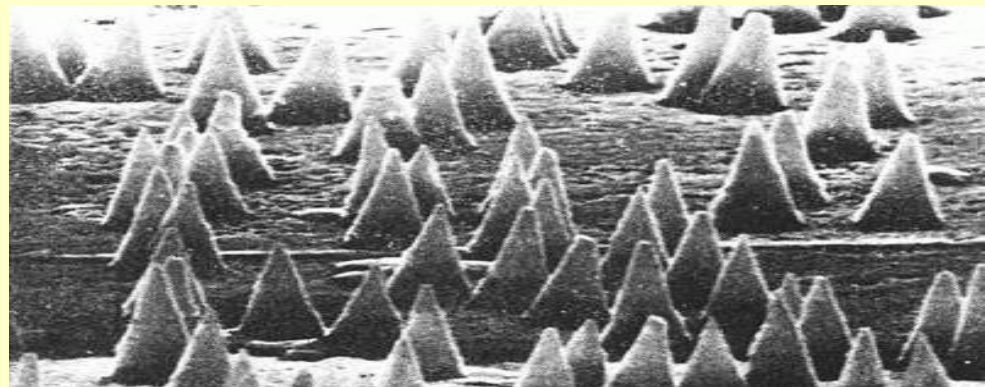
• Электронная микрофотография эмиттера с острой поверхностью, полученного в г. Дубне с использованием современных трековых методик. Острия – конусы высотой 6,6 мкм, диаметром 1,5 мкм. Радиус кривизны вершины 0,1 мкм. Концентрация  $10^7 \text{ см}^{-2}$



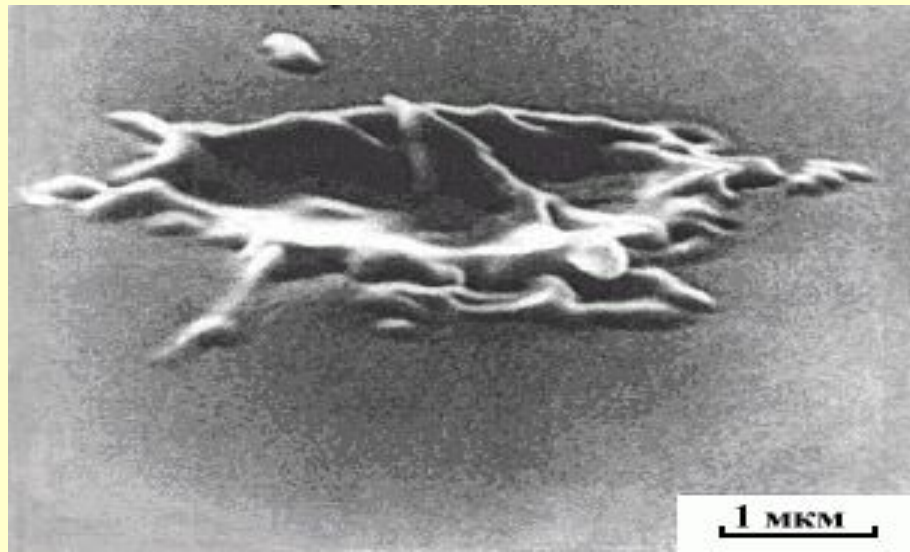
## *Взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ).*

При плотности тока  $10^8$  А/см<sup>2</sup> и большой концентрации энергии  $10^4$  Дж · м<sup>-1</sup> микроострия начинают взрываться и разрушаться.

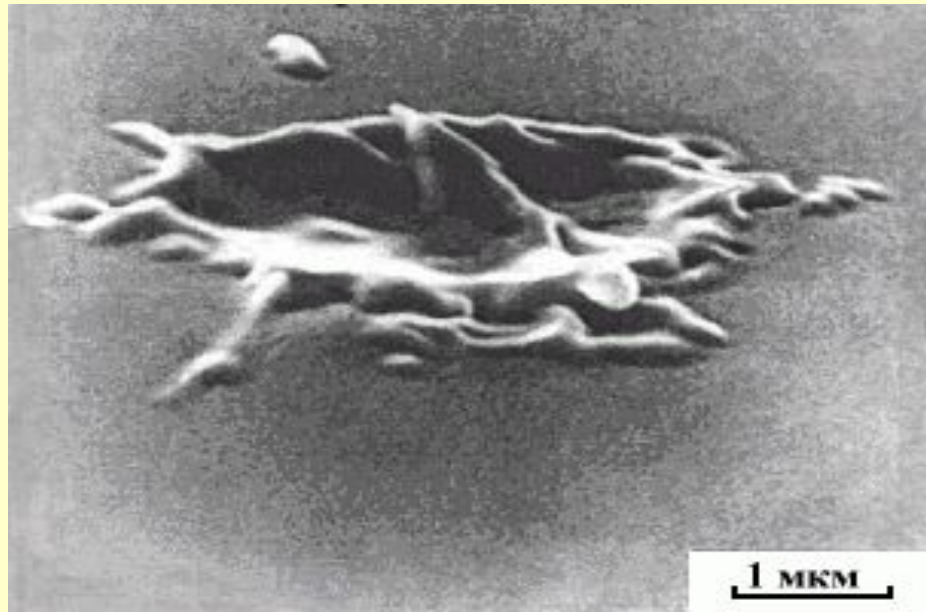
- Иницируется качественно иной вид эмиссии, обусловленный *взрывом микроострий на катоде.*
- Ток электронов, на порядки превосходит начальный ток ААЭ – *наблюдается взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ).*
- ВЭЭ была открыта и изучена в Томском политехническом институте в 1966 г. коллективом сотрудников под руководством Г. А. Месяца.



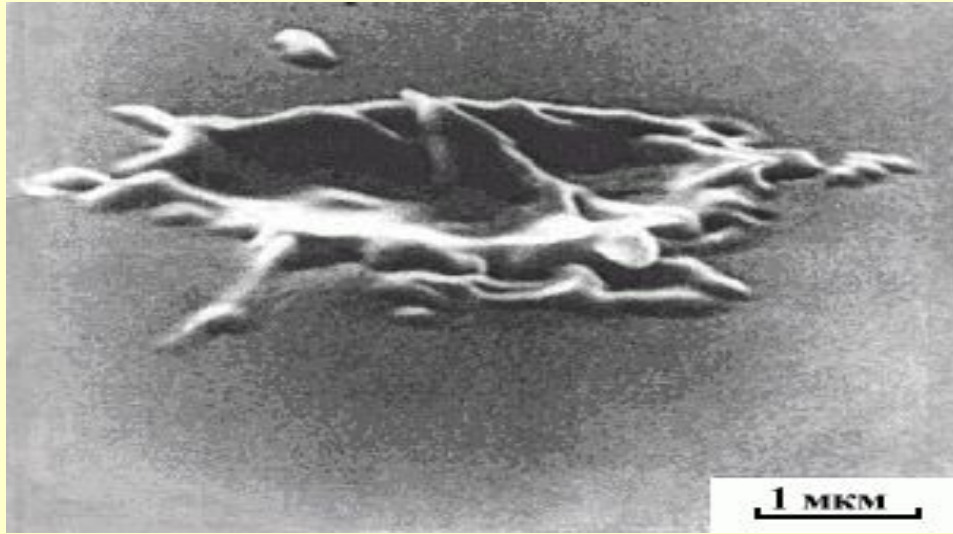
- **ВЭЭ** – это единственный вид электронной эмиссии, позволяющий получить потоки электронов **мощностью до  $10^{13}$  Вт** с **плотностью тока до  $10^9$  А/см<sup>2</sup>**.
- Ток ВЭЭ необычен по структуре. Он состоит из отдельных порций электронов  $10^{11} \div 10^{12}$  штук, имеющих характер электронных лавин, получивших название **эктонов** (начальные буквы «*explosive centre*»).
- **Время образования лавин  $10^{-9} \div 10^{-8}$  с.**



- Появление электронов в эктоне вызвано быстрым перегревом микроучастков катода и является, по существу, разновидностью термоэлектронной эмиссии.
- Прекращение эмиссии электронов в эктоне обусловлено охлаждением зоны эмиссии за счет теплопроводности, уменьшения плотности тока, испарения атомов.



- Существование эктона проявляется в образовании кратера на поверхности катода.



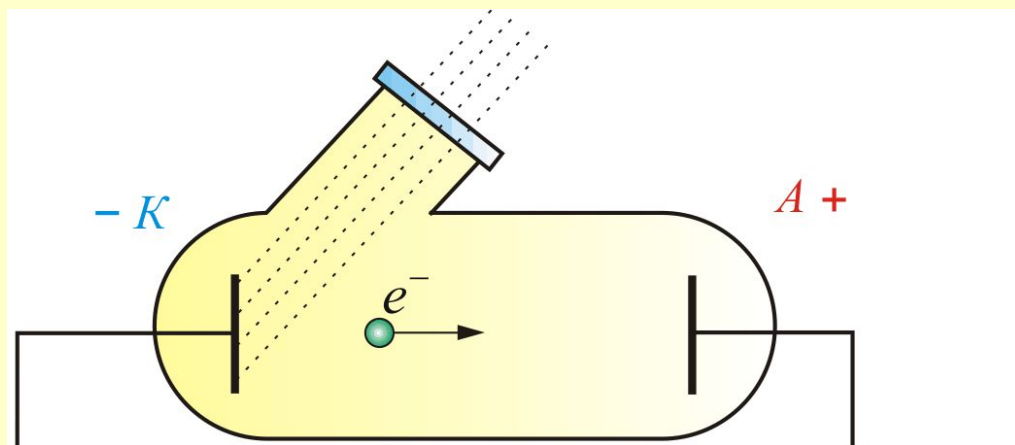
- Взрывная эмиссия электронов и эктоны играют фундаментальную роль в вакуумных искрах и дугах, в разрядах низкого давления, в сжатых и высокопрочных газах, в микропромежутках, т.е. там, где в наличии есть электрическое поле высокой напряженности на поверхности катода.

- Явление взрывной электронной эмиссии послужило основой для создания импульсных электрофизических установок, таких как ***сильноточные ускорители электронов***, мощные импульсные и рентгеновские устройства, мощные релятивистские сверхвысокочастотные генераторы.
- Например, ***импульсные ускорители электронов*** имеют мощность  $10^{13}$  Вт и более при длительности импульсов  $10^{-10} \div 10^{-6}$  с, токе электронов  $10^6$  А и энергии электронов  $10^4 \div 10^7$  эВ.
- Такие пучки широко используются для исследований в физике плазмы, радиационной физике и химии, для накачки газовых лазеров и пр.

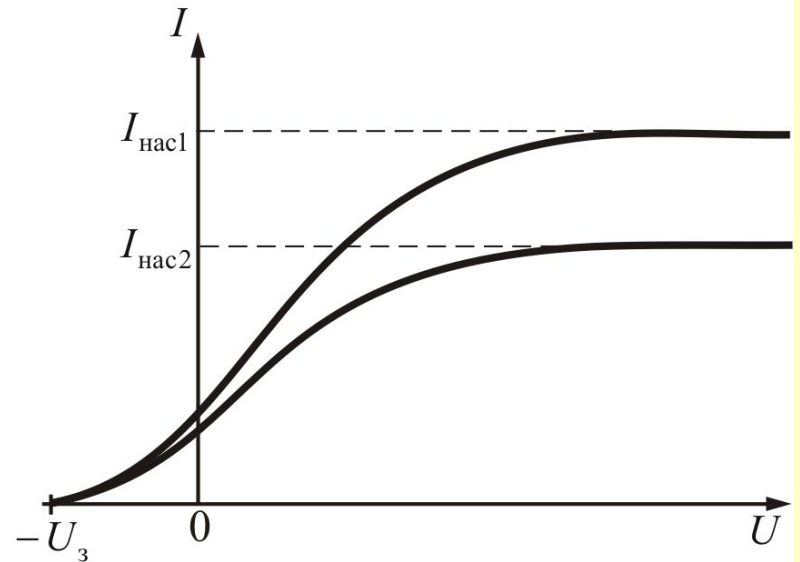
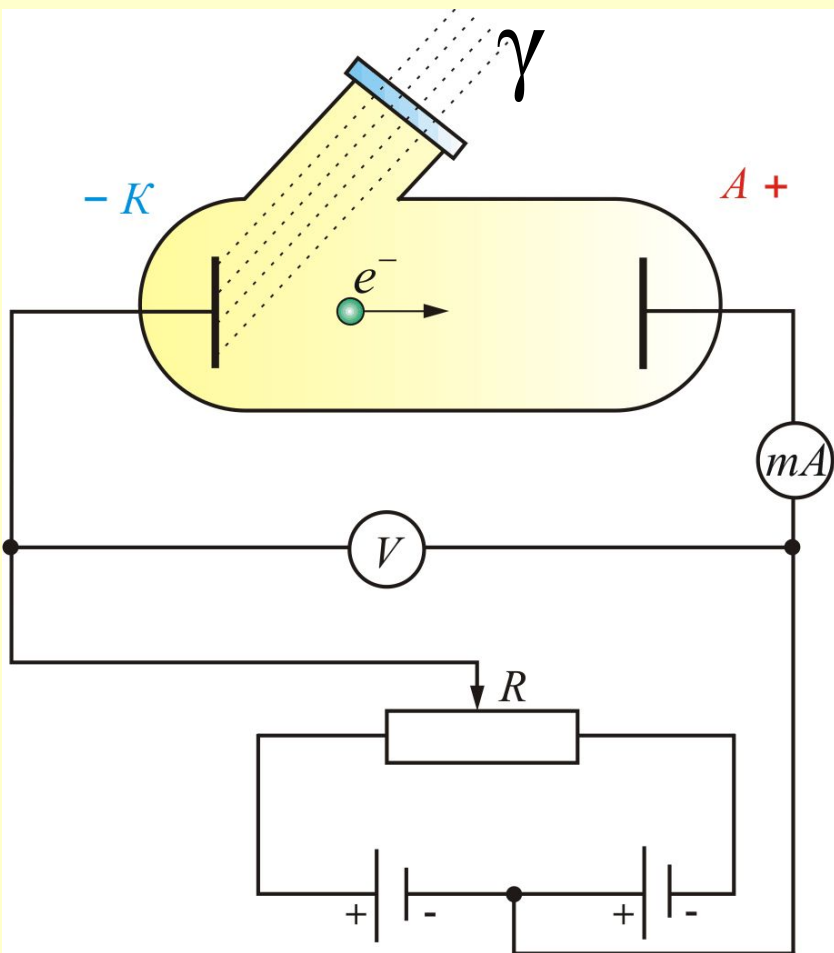


## 14.1.3. Фотоэлектронная ЭМИССИЯ

- *Фотоэлектронная эмиссия (фотоэффект) заключается в «выбивании» электронов из металла при действии на него электромагнитного излучения.*

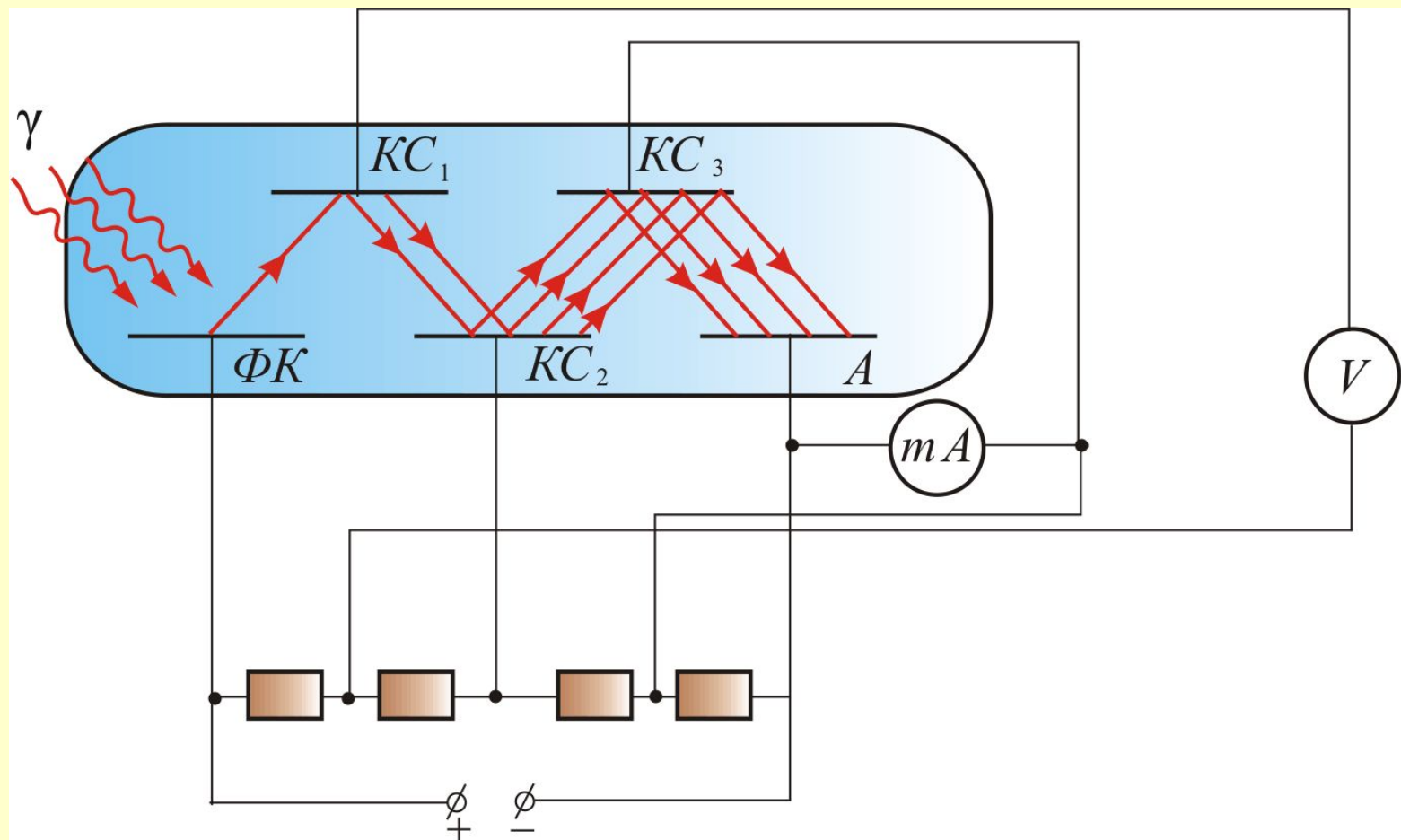


- **Схема установки** для исследования фотоэффекта и **ВАХ** аналогичны термоэмиссии. Здесь, вместо разогрева катода, на него направляют поток фотонов или -

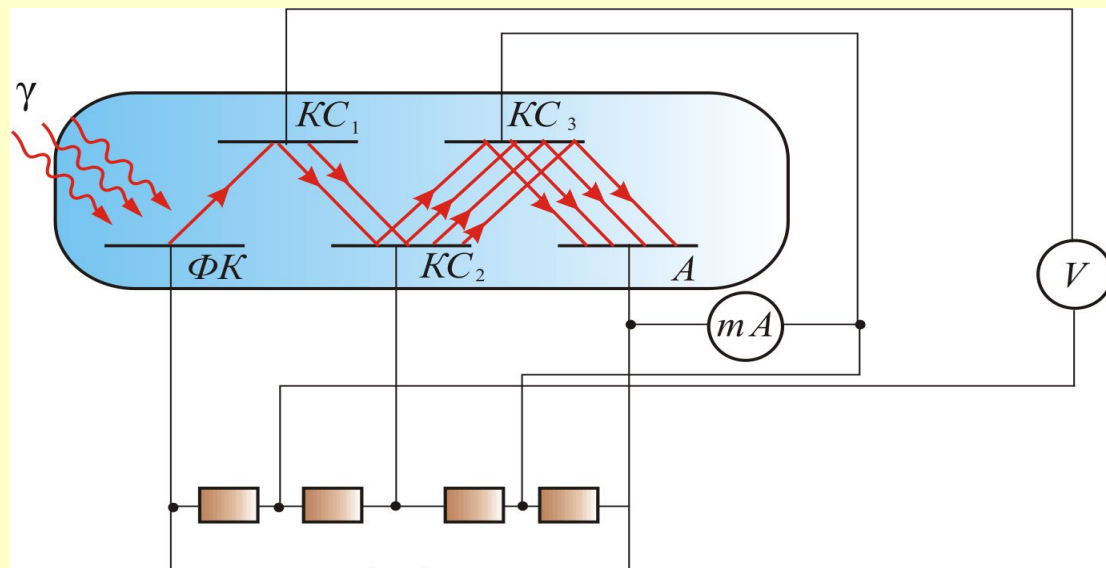




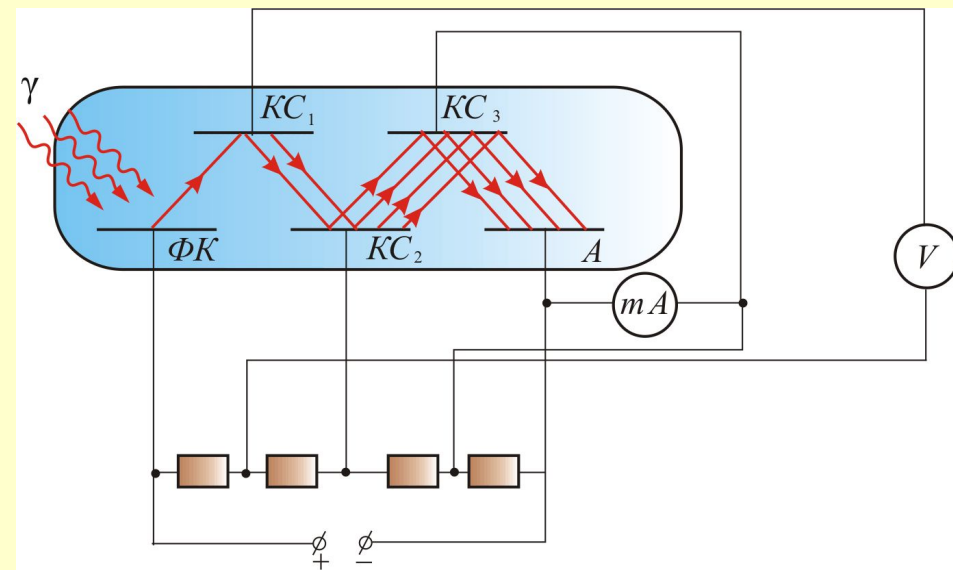
- В физических приборах, регистрирующих излучение, используют **фотоэлектронные умножители (ФЭУ)**. Схема прибора приведена на рисунке.



- В ФЭУ используют **два эмиссионных эффекта**: *фотоэффект и вторичную электронную эмиссию*, которая заключается в выбивании электронов из металла при бомбардировке последнего другими электронами.
- Электроны выбиваются светом из фотокатода ( $\Phi K$ ).
- Ускоряясь между  $\Phi K$  и первым эмиттером ( $KC_1$ ), они приобретают энергию, достаточную, чтобы выбить большее число электронов из следующего эмиттера.

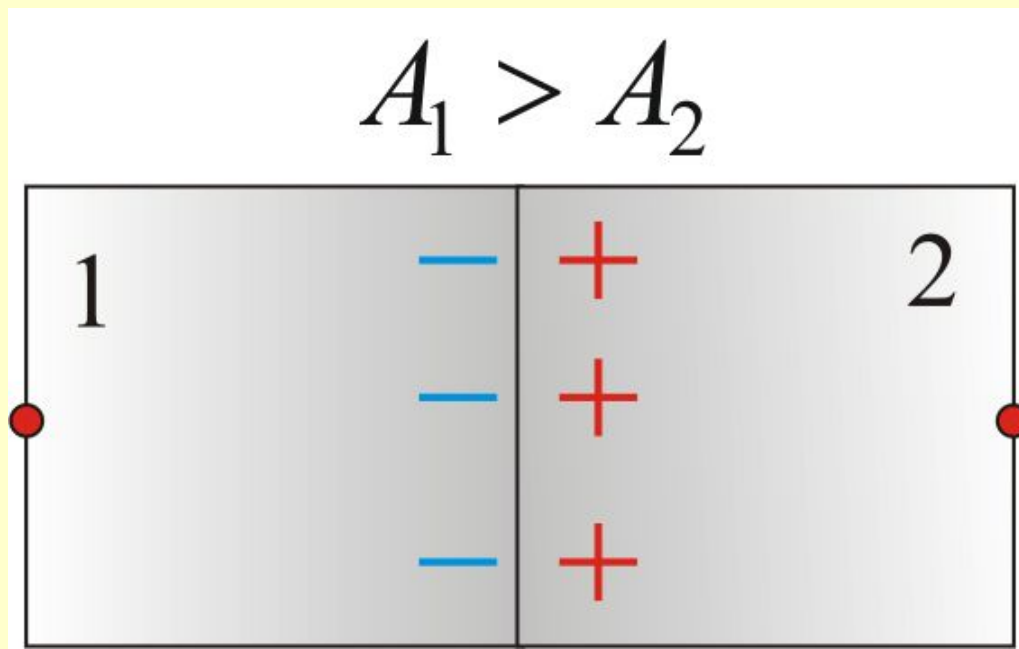


- Умножение электронов происходит за счет увеличения их числа при последовательном прохождении разности потенциалов между соседними эмиттерами.
- Последний электрод называют коллектором.
- Регистрируют ток между последним эмиттером и коллектором.
- Таким образом,  $\Phi Э У$  служит усилителем тока, а последний пропорционален излучению, попадающему на фотокатод, что и используют для оценки радиоактивности.

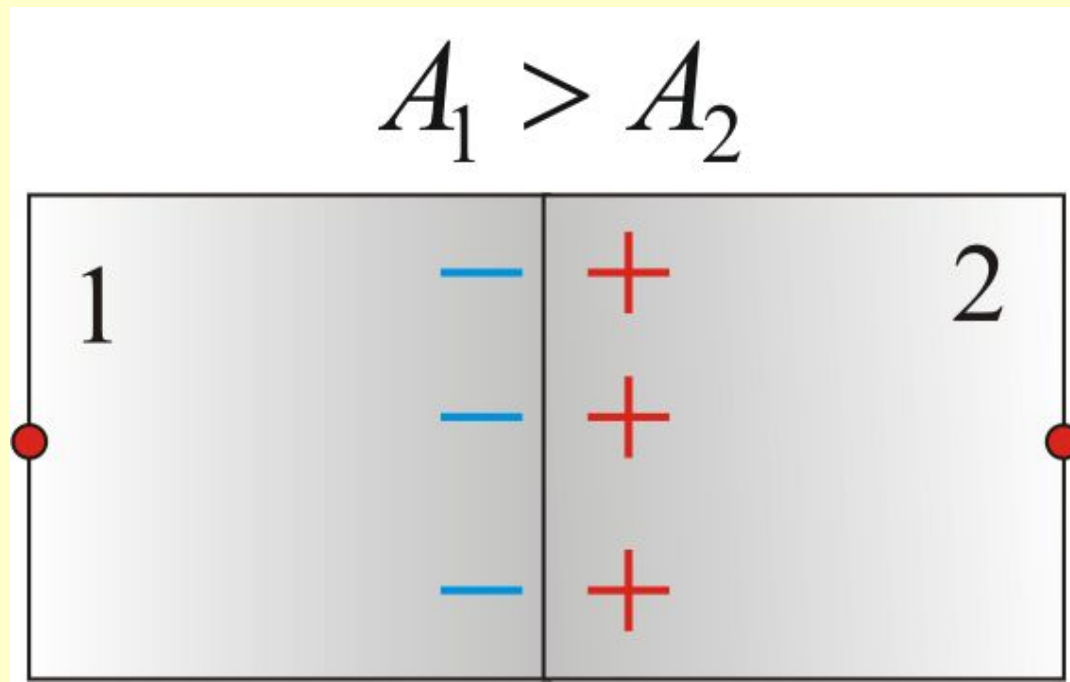


## 14.2. Контактные явления на границе раздела двух проводников

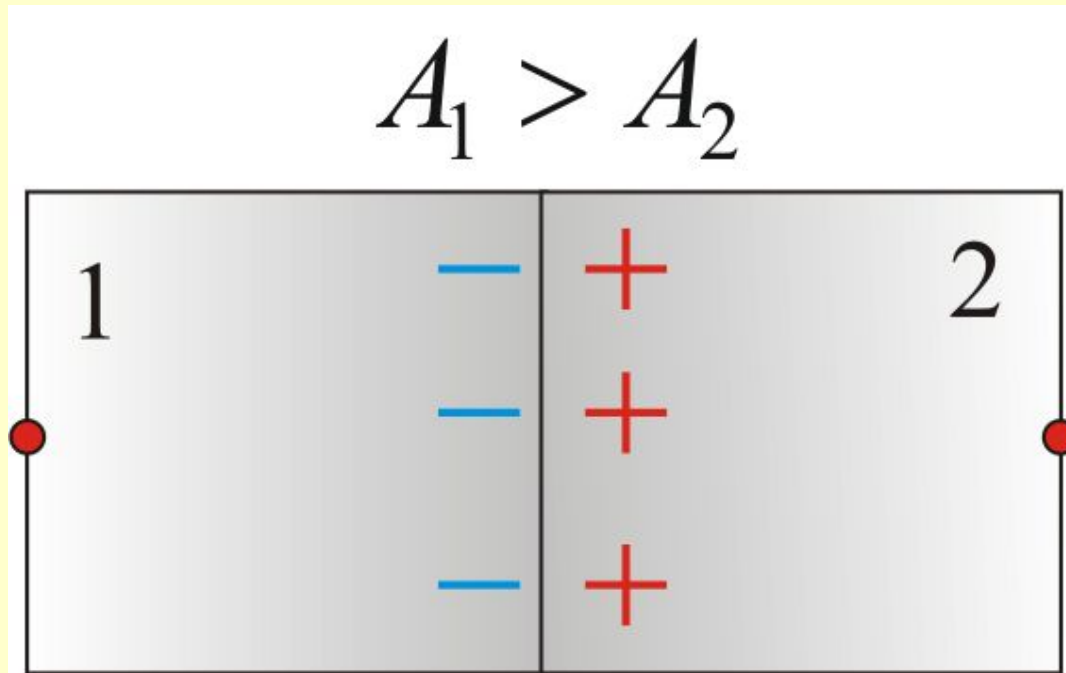
- Как показывает опыт, *на контакте двух различных металлов образуется двойной электрический слой* и соответствующая разность потенциалов:



- Появление двойного электрического слоя обусловлено *различием работ выхода электронов из металлов.*
- Чем она больше, тем меньше вероятность перехода электронами границы раздела.
- Поэтому со стороны металла с большей работой выхода накапливается отрицательный заряд, а с противоположной – положительный.

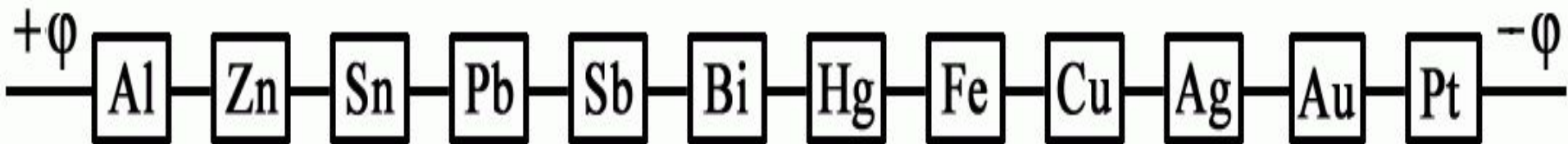


■ Это явление наблюдалось итальянским физиком **Алессандро Вольта (1745 – 1827)**, который сформулировал два экспериментальных закона, известных как законы Вольта



# Законы Вольты

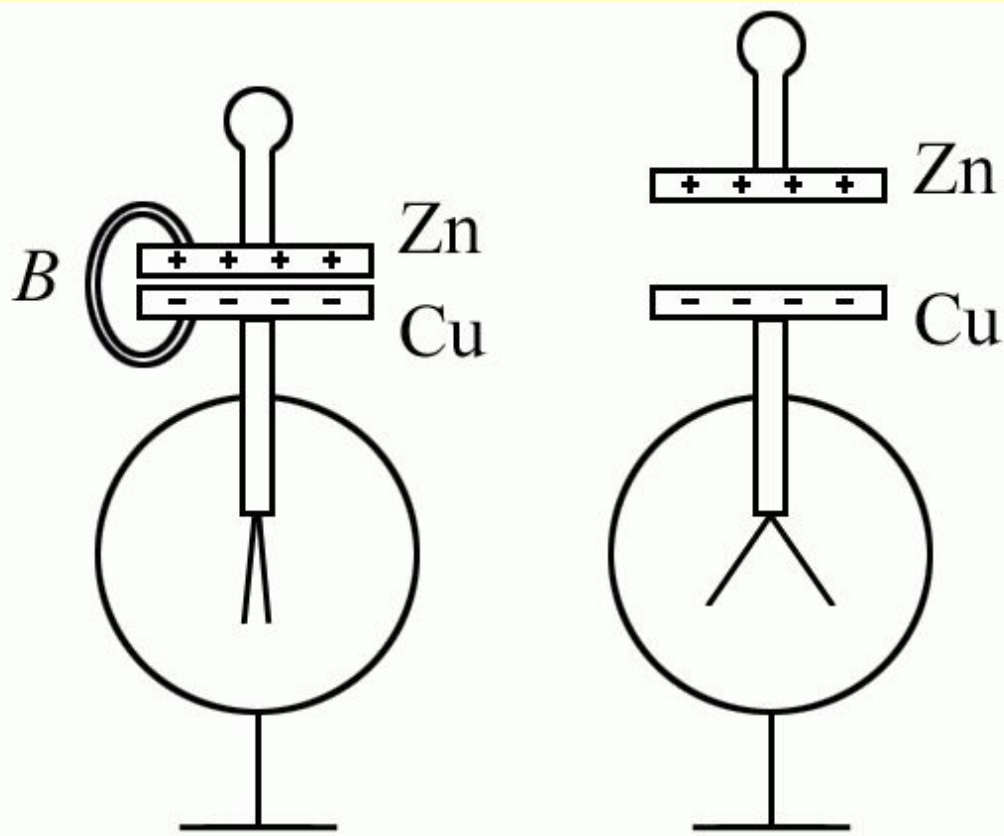
- 1. *На контакте двух разных металлов возникает разность потенциалов, которая зависит от химической природы и от температуры спаяев.*
- 2. *Разность потенциалов на концах последовательно соединенных проводников не зависит от промежуточных проводников и равна разности потенциалов, возникающей при соединении крайних проводников при той же температуре (закон последовательных контактов Вольта).*



## Ряд Вольты.

Потенциал каждого последующего металла в этом ряду ниже потенциала предыдущего

Опыт Вольты по доказательству существования контактной разности потенциалов





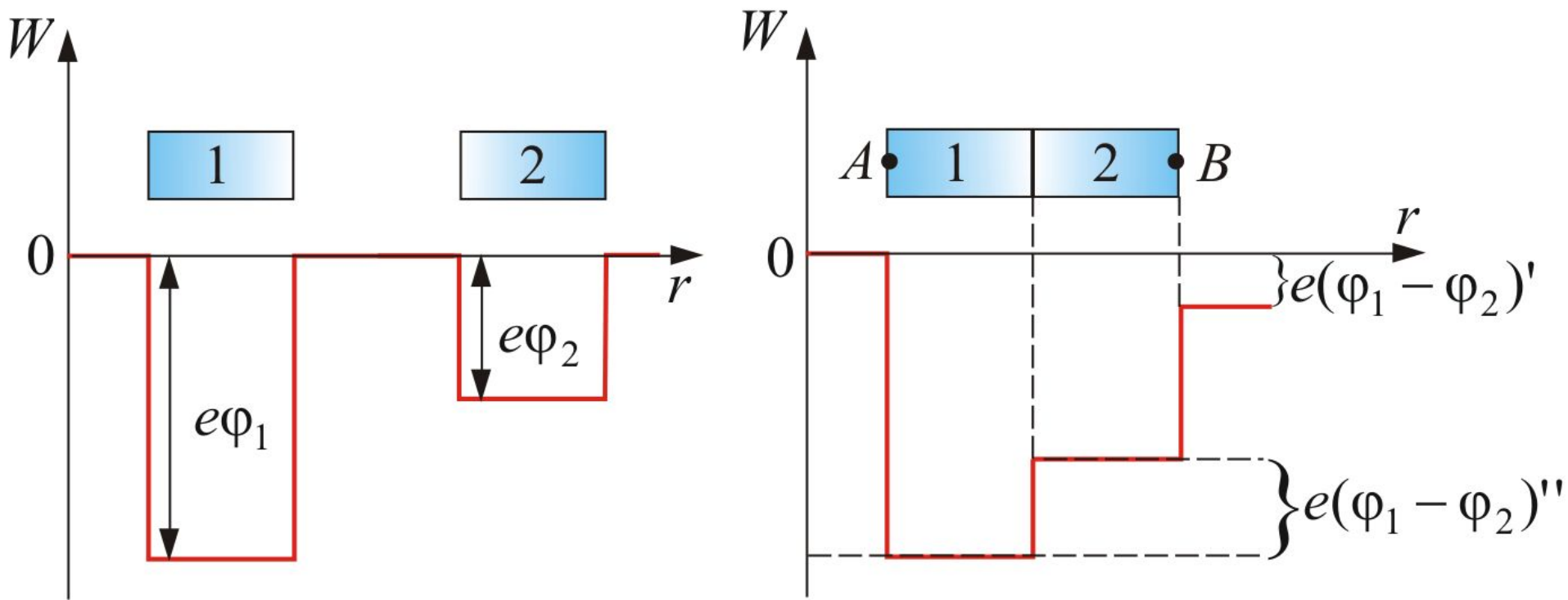
- Результаты эксперимента можно объяснить с позиции **классической электронной теории**.
- Если принять, что потенциал за пределами металла равен нулю, то **энергия электрона внутри металла с потенциалом  $\varphi_i$  определится выражением**

(14.2.1)

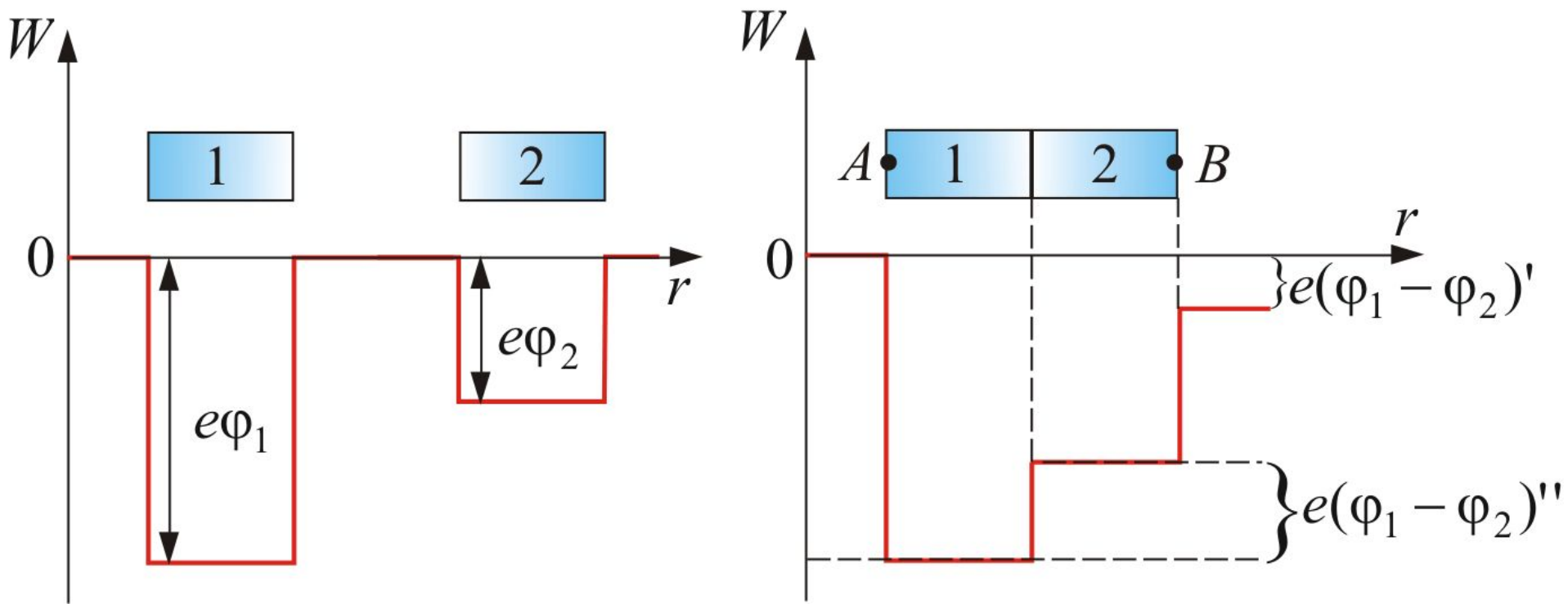
$$W_i = e\varphi_i.$$

- При соединении двух разных металлов с работами выхода  $A_2 = e\varphi_2$  и  $A_1 = e\varphi_1$  возникает избыточный переход электронов из второго металла в первый, так как

$$A_2 < A_1.$$



- В результате концентрация электронов  $n_1$  в металле 1 увеличивается, по сравнению с  $n_2$ , что порождает обратный избыточный поток электронного газа за счет диффузии, противоположный потоку, обусловленному разностью работ выхода.



- Установившуюся разность потенциалов можно найти из выражения:

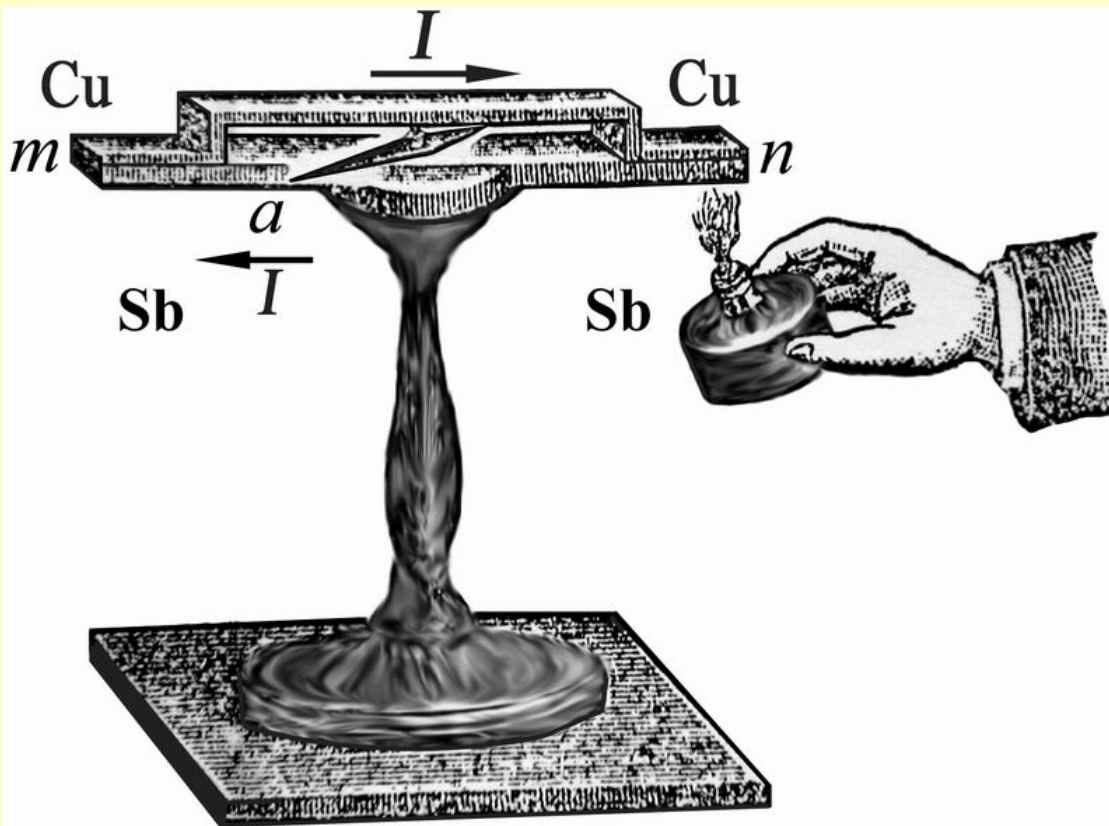
$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

- *Явление возникновения контактной разности потенциалов и ее зависимость от температуры называют **прямым термоэлектрическим эффектом** или **эффектом Зеебека**.*

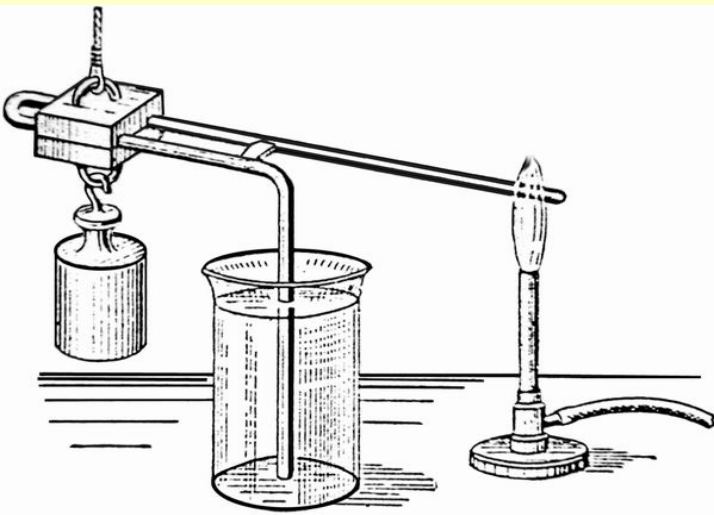
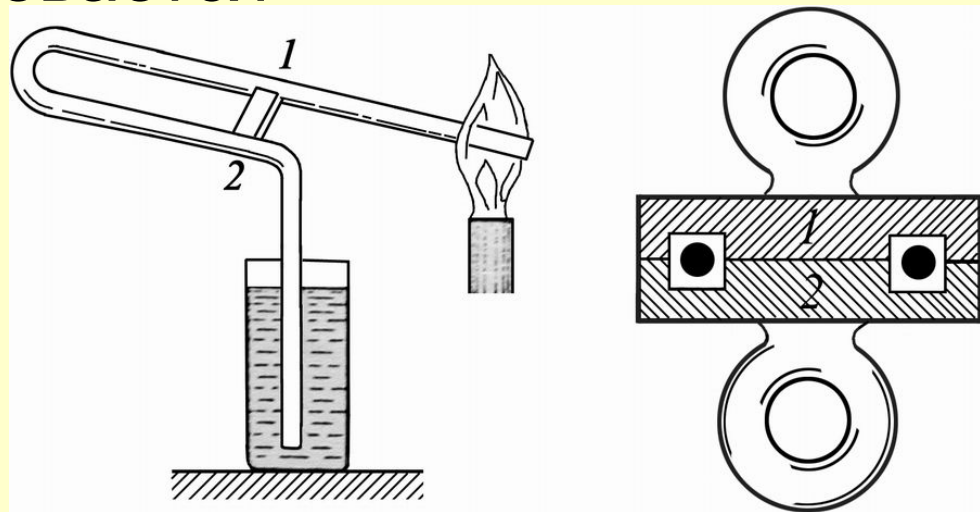
# Эффект Зеебека

(*прямой термоэлектрический эффект*)

заключается в появлении разности потенциалов в термопарах.

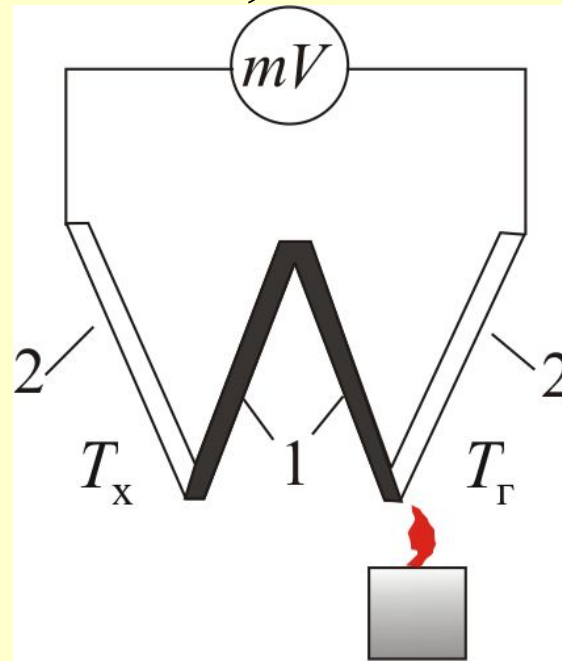


- Эффективная демонстрация термоэлектрического тока может быть осуществлена в опыте, приведенном на рис.
- Толстая U-образная медная дуга перекрывается коротким мостиком 1–2 из константана или железа. Место спая 1 разогревается



Электромагнит, питаемый током термоэлемента, способен удерживать гирю весом в несколько килограммов

- **Схема термопары** состоящей из спая двух разных металлов 1 и 2, показана на рисунке.



- На концах термопары возникает термоЭДС :

- $$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_x - T_r) = \alpha (T_r - T_x), \quad (14.2.2)$$

- где  $T_r$  – температура горячего спая и  $T_x$  – температура холодного спая.

- Таким образом – *термоЭДС термопары:*

$$E = \alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{X}})$$

- – *постоянная термопары:*

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$



# Эффектом Пельтье

*обратный термоэлектрический эффект.*

- Он заключается в том, что *при пропускании тока через термопару, ее спай поглощает или выделяет тепло в зависимости от направления тока.*
- Количество поглощенного тепла пропорционально плотности тока.

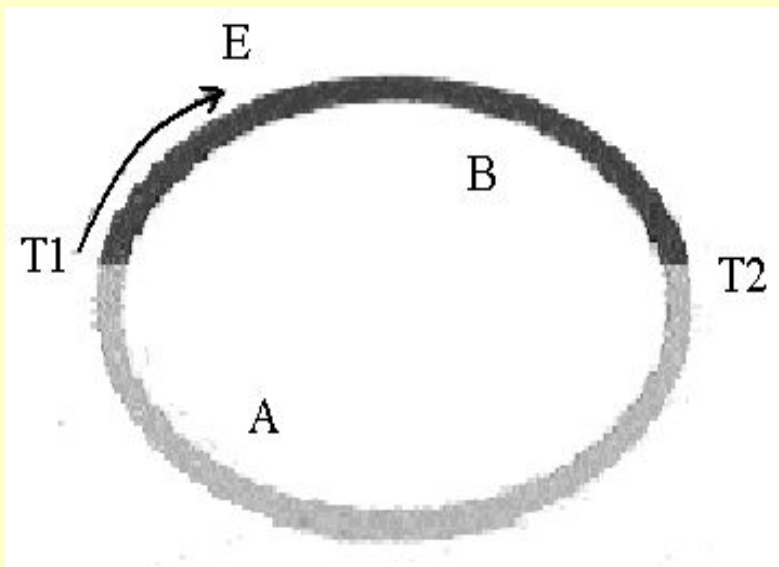
(6.2.4)

- где  $\Pi_{12}$  – *коэффициент Пельтье*, зависящий от материала контактирующих металлов.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОПАР

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- Термопары относятся к классу термоэлектрических преобразователей, принцип действия которых основан на явлении Зеебека:
- если спаи двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, имеют неодинаковую температуру ( $T_1 \neq T_2$ ), то в цепи протекает электрический ток.



- Таким образом, термопара может образовывать устройство, использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры.
- В сочетании с электроизмерительным прибором термопара образует термоэлектрический термометр.
- Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рис. 2,а), либо в разрыв одного из них (рис. 2,б).

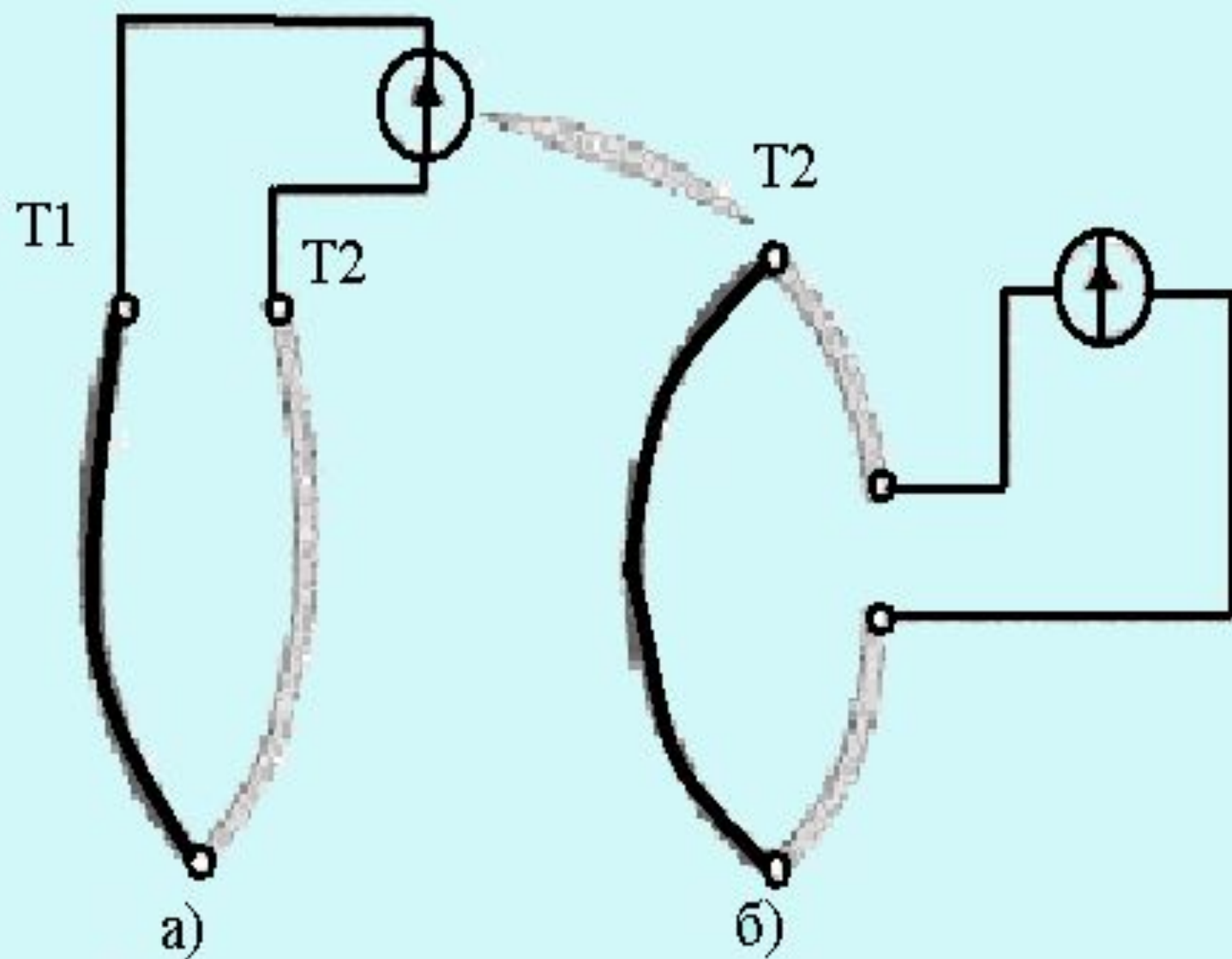
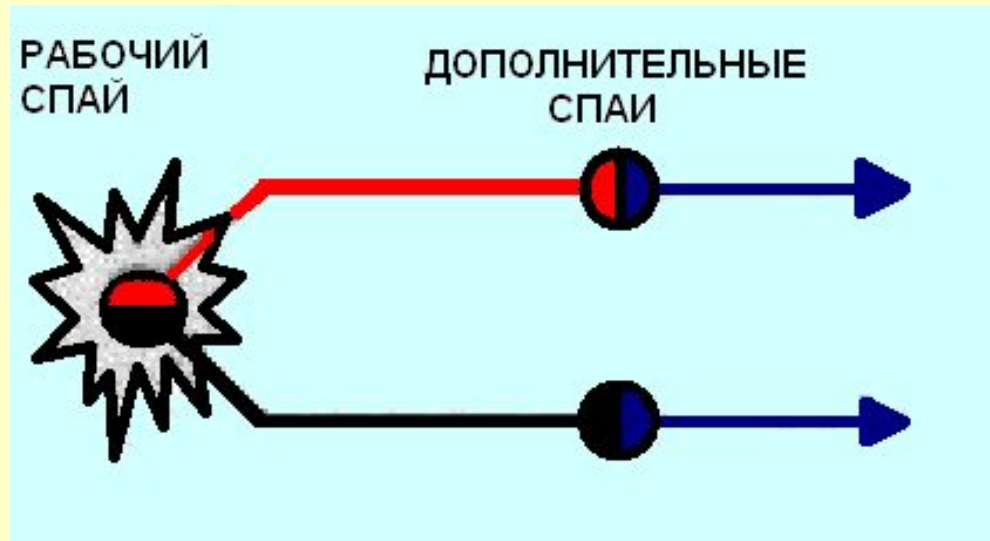


Рис.2 (а,б) Подключение термопар к измерительному прибору

- В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термоЭДС.
- В результате их действия на вход измерительной системы фактически поступает сумма сигналов от рабочей термопары и от «термопар», возникших в местах подключения.
- Существуют различные способы избежать этого эффекта. Самым очевидным из них является поддержание температуры холодного спая постоянной.

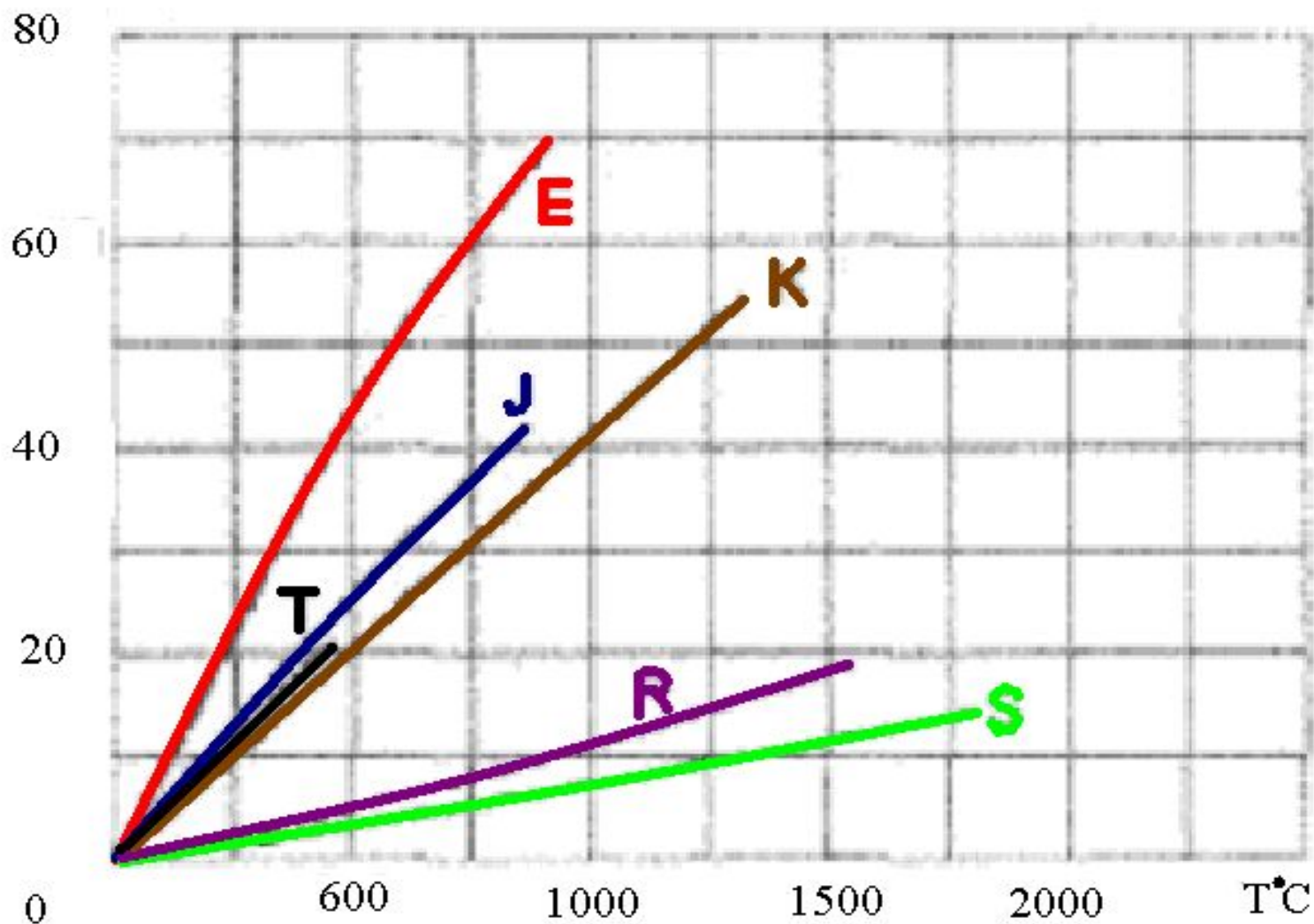


# Основные параметры термопар промышленного типа

<b>Обоз. Термо- электро- дов</b>	<b>Материалы</b>	<b>Пределы измерения при длительном применении</b>	<b>Верхний предел измерений при кратковременном применении</b>
<b>ПП-1</b>	<b>Платинородий (10% родия)</b>	<b>От -20 до 1300°С</b>	<b>1600°С</b>
<b>ПР-30</b>	<b>Платинородий (30% родия)</b>	<b>300-1600°С</b>	<b>1800°С</b>
<b>ХА</b>	<b>Хромель-алюмель</b>	<b>-50-1000°С</b>	<b>1300°С</b>
<b>ХК</b>	<b>Хромель-копель</b>	<b>-50-600°С</b>	<b>800°С</b>

# ЗАВИСИМОСТЬ ЭДС

Термо ЭДС, мВ

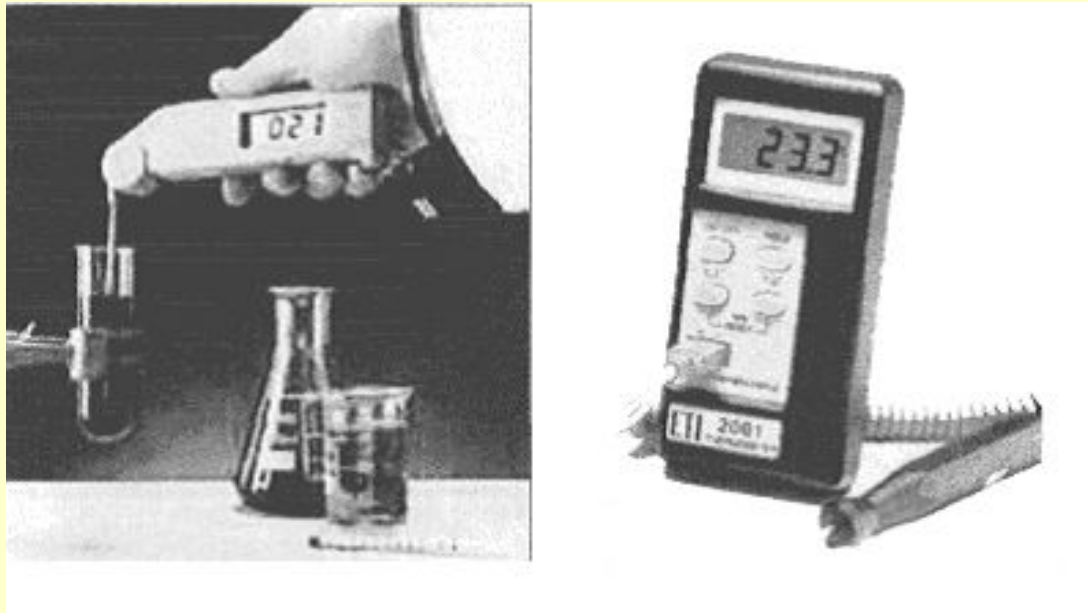




# ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- Отечественная промышленность выпускает электронные термометры для измерения температуры контактным способом.
- Так, например, одно из отечественных предприятий наладило производство серии измерителей температуры, каждый из которых состоит из электронного блока и набора сменных датчиков температуры, представляющих собой стандартные хромель-алюмелевые

# ВНЕШНИЙ ВИД



Миниатюрный и контактный термометр

# ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

- **Надежность конструкции датчика, возможность работы в широком диапазоне температур, дешевизна, простота, удобство монтажа, возможность измерения локальной температуры, малая инерционность.**
- **Необходимость поддержания температуры холодного спая постоянной и нелинейность на некоторых участках.**

# ПРИМЕНЕНИЕ

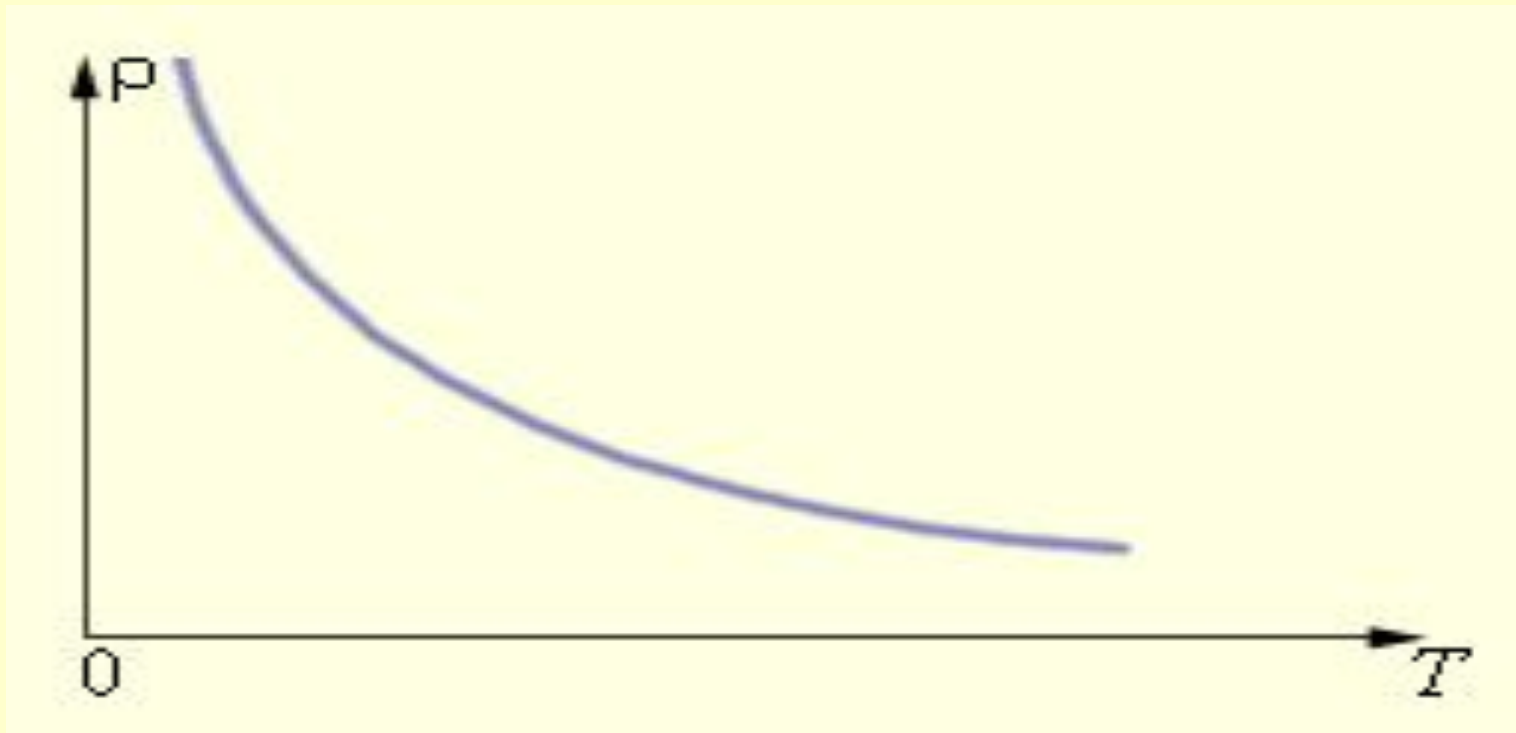
**Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и контроля.**

# Электрический ток в полупроводниках

- 1. Качественное отличие полупроводников от металлов.**
- 2. Электронно-дырочный механизм проводимости чистых беспримесных полупроводников.**
- 3. Электронная и дырочная проводимость примесных полупроводников.**  
**Донорные и акцепторные примеси.**
  - 1. Электронно-дырочный переход.**  
**Полупроводниковый диод. Транзистор.**

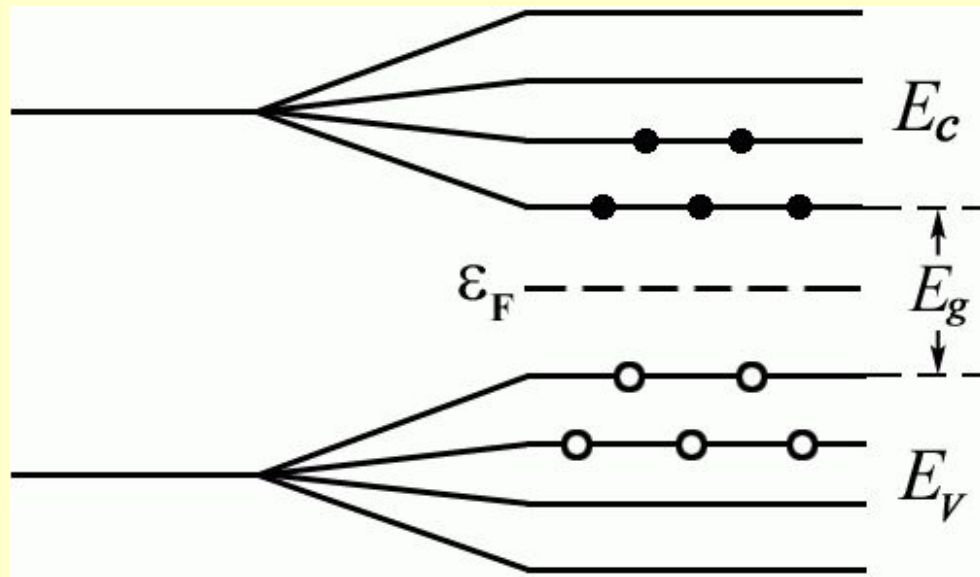
- К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений.
- Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники.
- Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

- **Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры.**



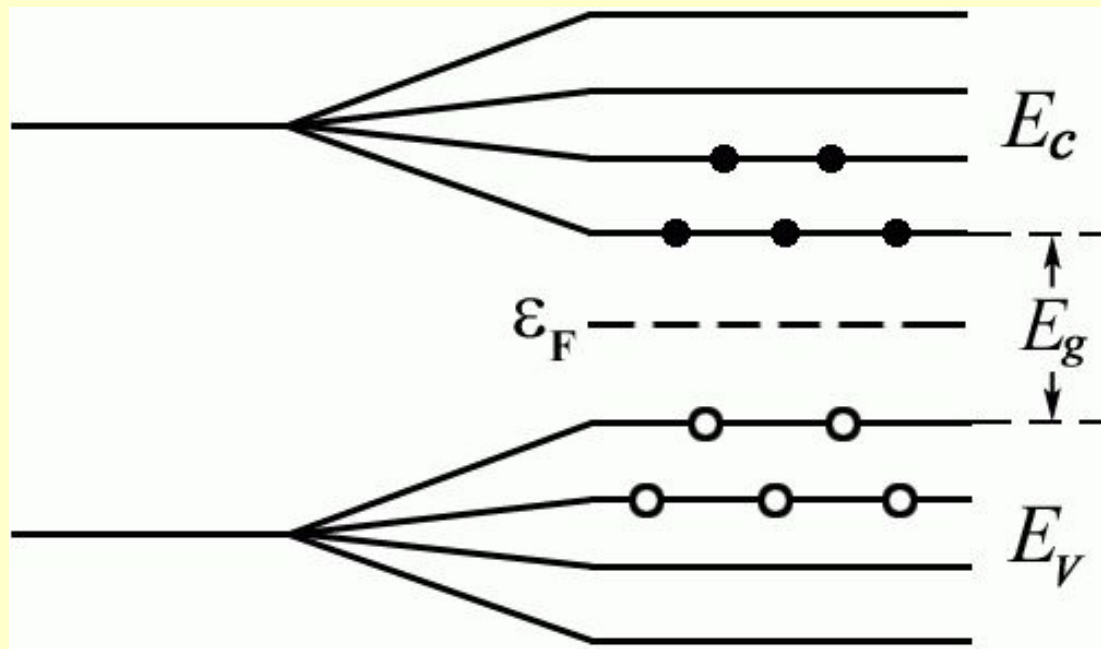
# Зонная модель электронно-дырочной проводимости полупроводников

- При образовании твердых тел возможна ситуация, когда энергетическая зона, возникшая из энергетических уровней валентных электронов исходных атомов, оказывается полностью заполненной электронами, а ближайшие, доступные для заполнения электронами энергетические уровни отделены от **валентной зоны** промежутком неразрешенных энергетических состояний – так называемой **запрещенной зоной**.

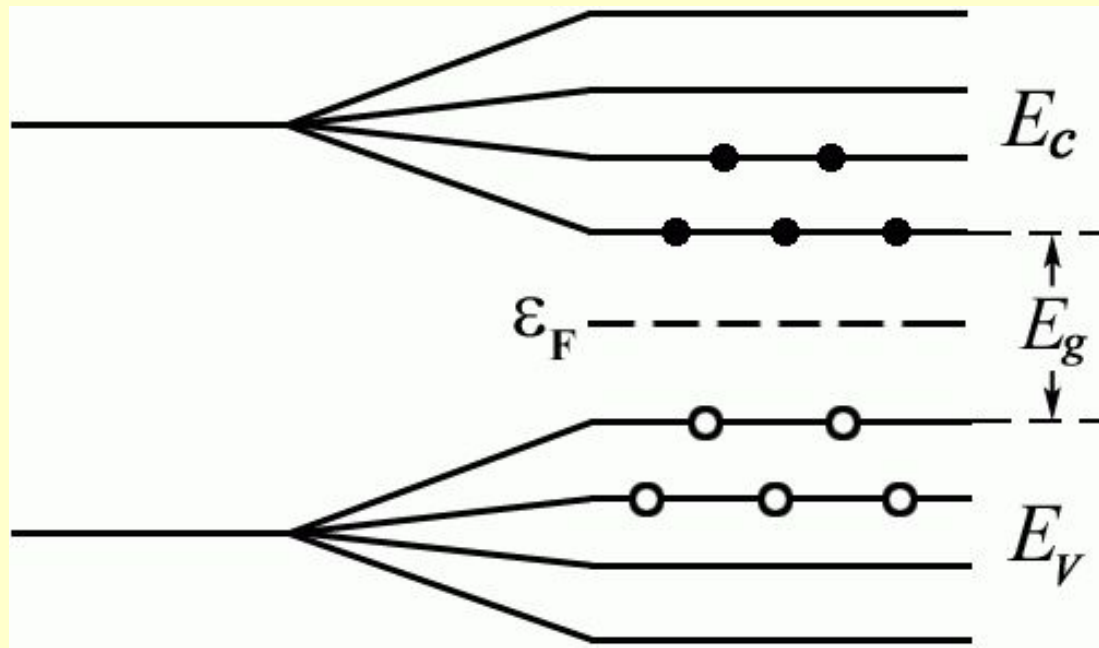




- Выше запрещенной зоны расположена зона разрешенных для электронов энергетических состояний – зона проводимости.
- Зона проводимости при 0 К полностью свободна, а валентная зона полностью занята.
- Подобные зонные структуры характерны для кремния, германия, арсенида галлия (GaAs), фосфида индия (InP) и многих других твердых тел, являющихся полупроводниками (см. рис.).

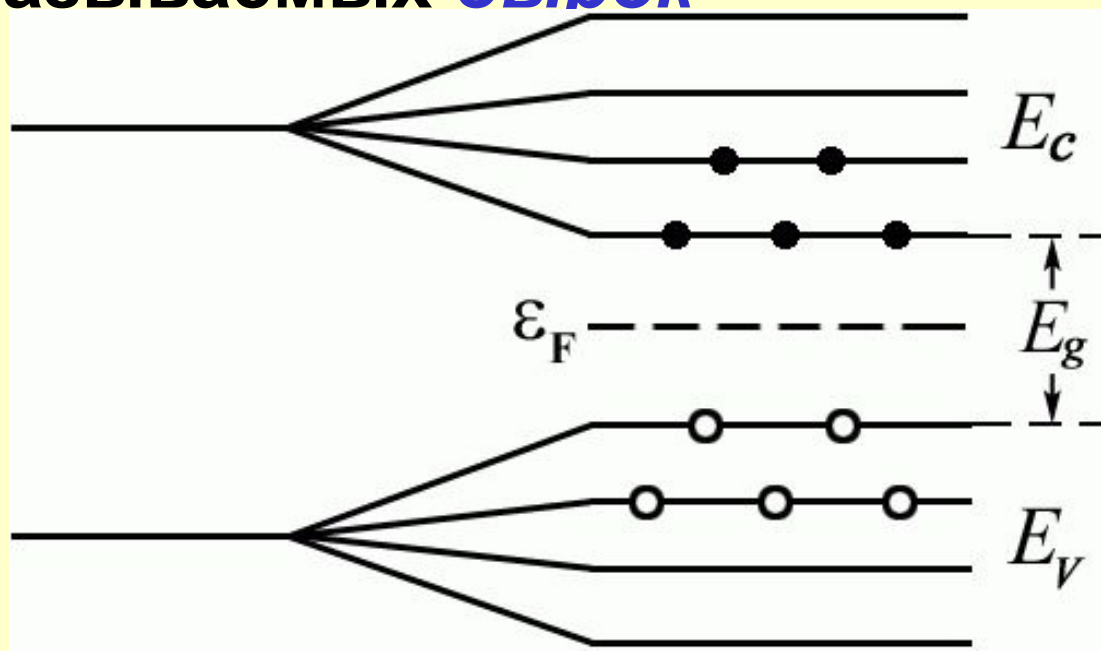


- При повышении температуры полупроводников и диэлектриков электроны способны получать дополнительную энергию, связанную с тепловым движением  $kT$ .
- У части электронов энергии теплового движения оказывается достаточно для перехода *из валентной зоны в зону проводимости*, где электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться практически свободно



- В этом случае, в цепи с полупроводниковым материалом по мере повышения температуры полупроводника будет нарастать электрический ток.

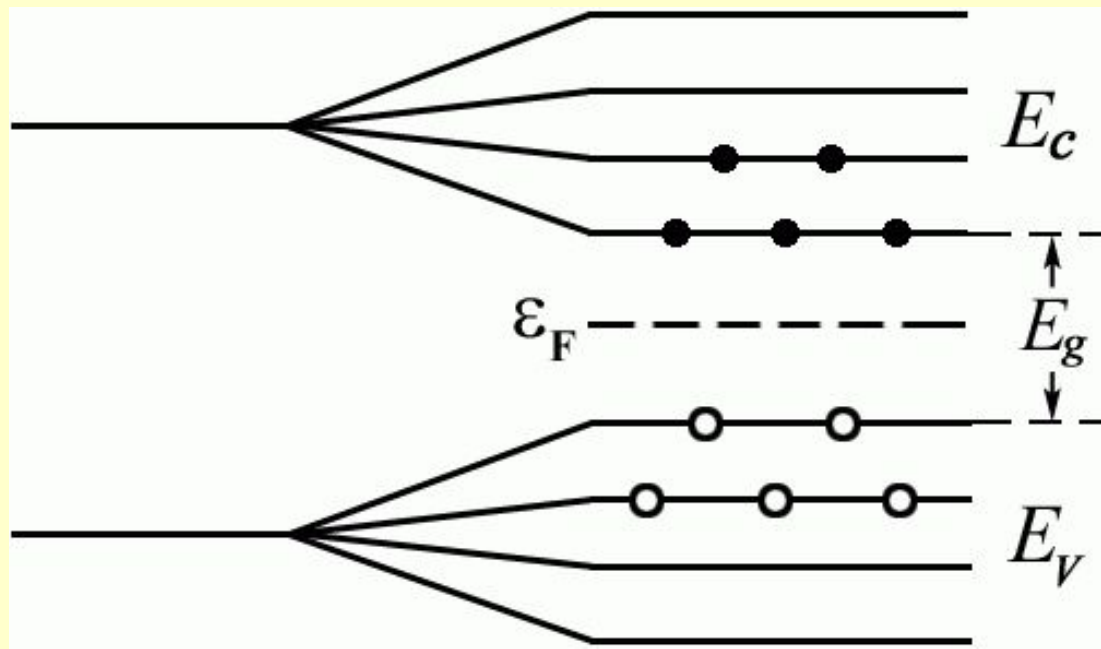
- Этот ток связан не только с движением электронов в зоне проводимости, но и с появлением *вакантных мест от ушедших в зону проводимости электронов* в валентной зоне, так называемых *дырок*



- **Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле.**
- **Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы.**

- Поэтому ток  $I$  в полупроводнике складывается из электронного  $I_n$  и дырочного  $I_p$  токов:  $I = I_n + I_p$ .
- Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т. е. без примесей) полупроводников.
- Он называется *собственной электрической проводимостью* полупроводников.

- Электроны забрасываются в зону проводимости с **уровня Ферми**, который оказывается в собственно полупроводнике расположенным **посередине запрещенной зоны**.



■ Существенно изменить проводимость полупроводников можно, введя в них очень небольшие количества примесей.

■ В металлах примесь всегда уменьшает проводимость.

■ Так, добавление в чистый кремний  $10^{-3}$  % атомов фосфора увеличивает электропроводность кристалла в  $10^5$  раз.

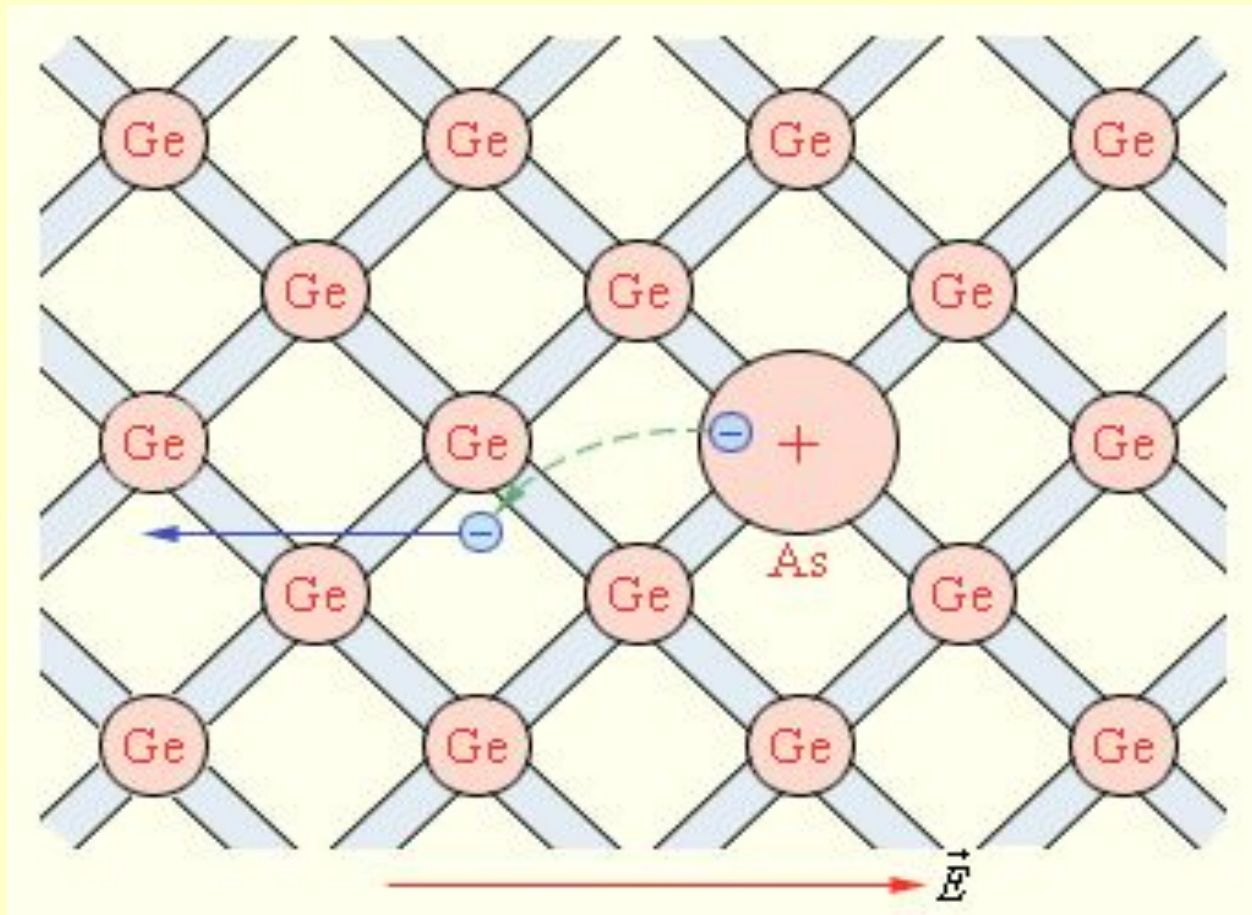
■ Небольшое добавление примеси к полупроводнику называется легированием.

■ Если добавить пятивалентный атом фосфора в решетку кремния, то четыре валентных электрона фосфора вступят в связь с четырьмя соседними атомами кремния, у которого во внешней оболочке четыре электрона, а пятый электрон атома P может достаточно легко отщепиться в результате теплового движения и перейти в зону проводимости (рис. 6.11).

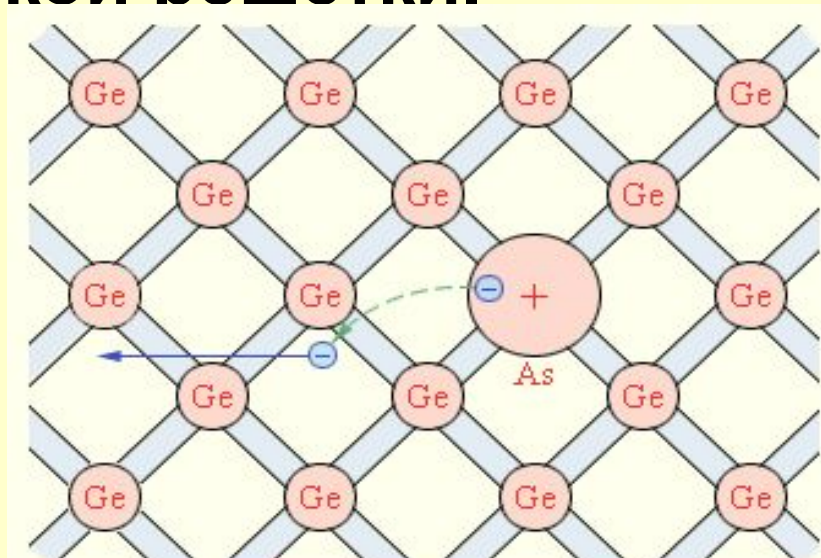
- **Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.**
- **Проводимость полупроводников при наличии примесей называется *примесной проводимостью*.**



- Различают два типа примесной проводимости – **электронную** и **дырочную проводимости**.
- ***Электронная проводимость*** возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пентивалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).



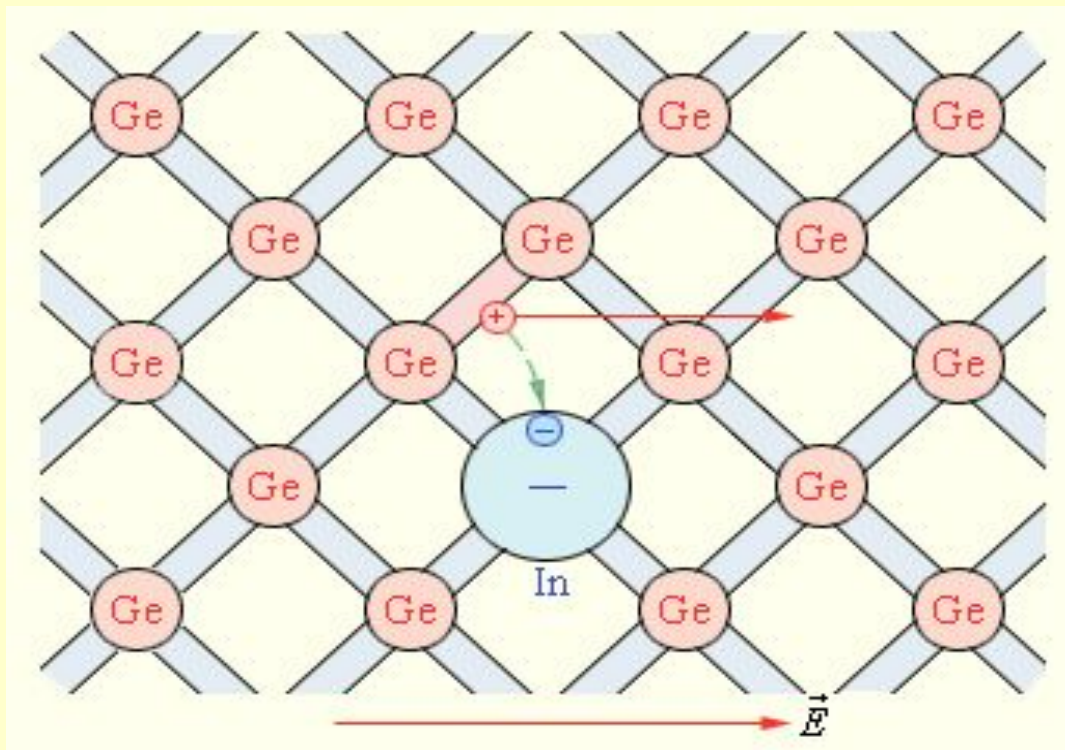
- Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия.
- Пятый валентный электрон оказался излишним.
- Он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным.
- Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки.



- **Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется *донорской примесью*.**
- **В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов.**
- **Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз.**
- **Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.**

- Такая проводимость, обусловленная свободными электронами, называется **электронной**, а полупроводник, обладающий электронной проводимостью, называется ***полупроводником n-типа***.

- *Дырочная проводимость* возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы (например, атомы индия, In).



**На рис. показан атом индия, который создал с помощью своих валентных электронов ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия.**

**На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона.**

**Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия.**

**В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия.**

- Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется *акцепторной примесью*.
- В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки).
- На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.



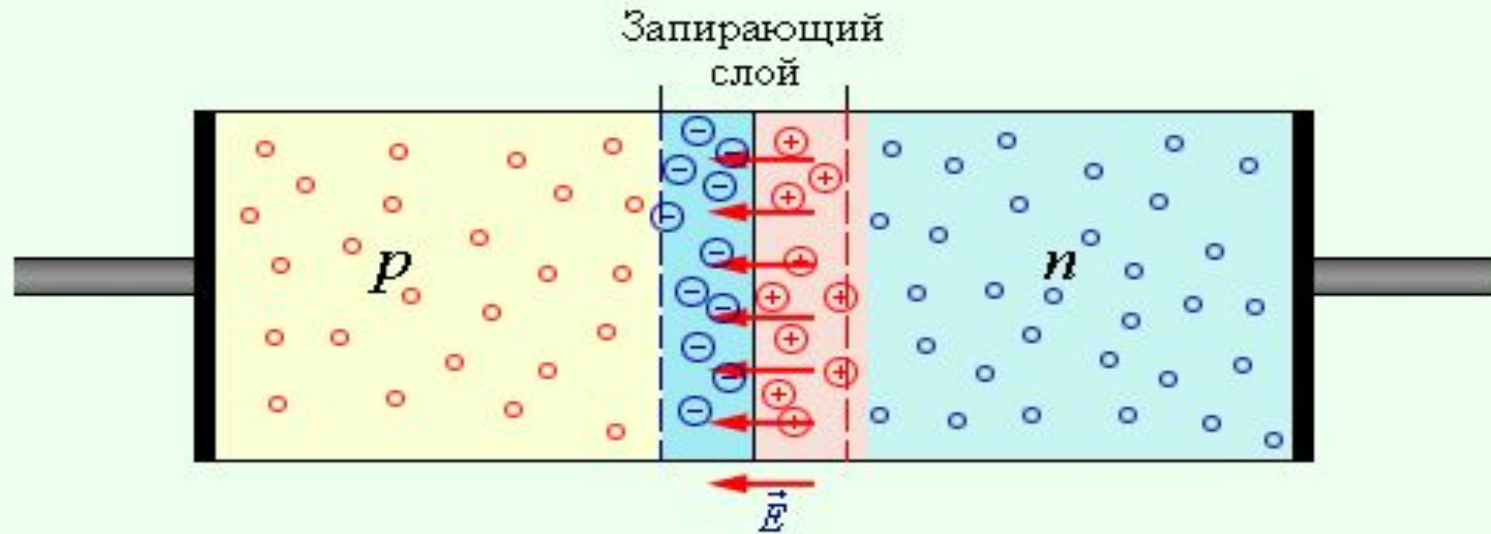
- Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника:  $p \gg n$ .
- Проводимость такого типа называется **дырочной проводимостью**.
- Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется **полупроводником p-типа**.
- Основными носителями свободного заряда в полупроводниках p-типа являются дырки.

# Электронно-дырочный переход.

- В современной электронной технике полупроводниковые приборы играют исключительную роль.
- За последние три десятилетия они почти полностью вытеснили электровакуумные приборы.
- В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.
- *Электронно-дырочный переход* (или *n–p-переход*) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

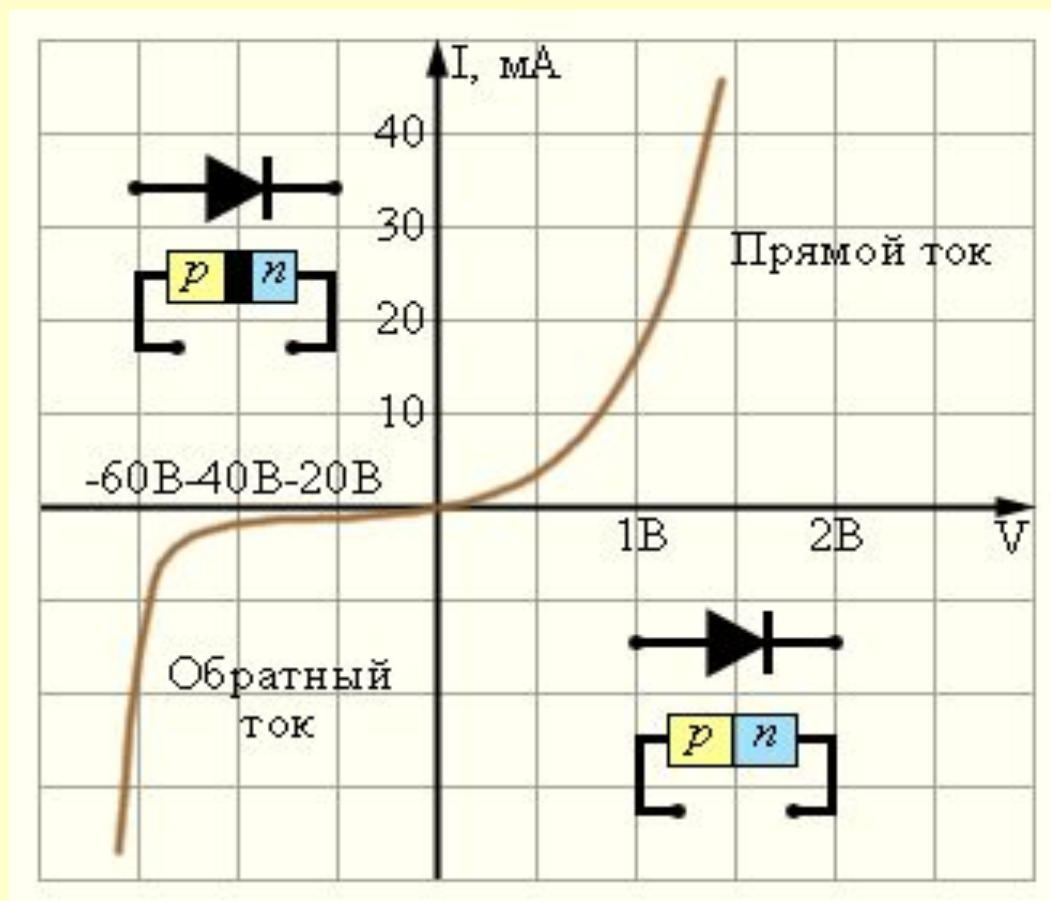
## Электронно-дырочный переход.

- Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу



- **Способность  $n$ – $p$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются *полупроводниковыми диодами*.**
- **Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия.**
- **При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.**

- Типичная вольт - амперная характеристика кремниевого диода

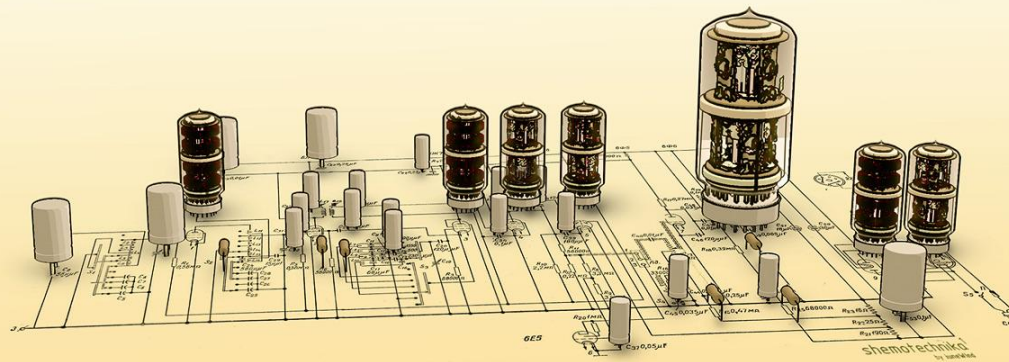


# Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя *n–p*-переходами называются *транзисторами*.
- Транзисторы бывают двух типов: *p–n–p*-транзисторы и *n–p–n*-транзисторы.

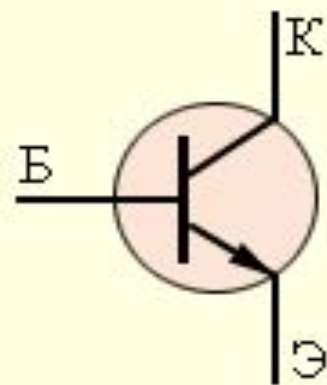
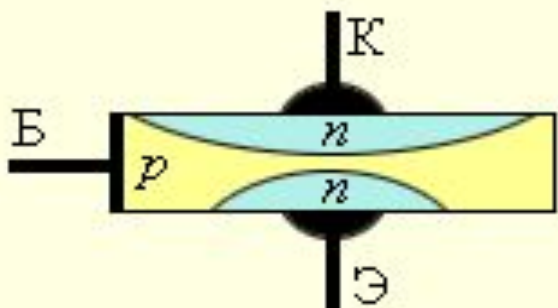
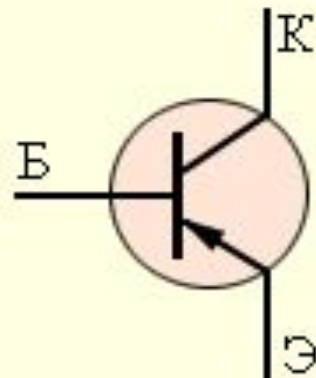
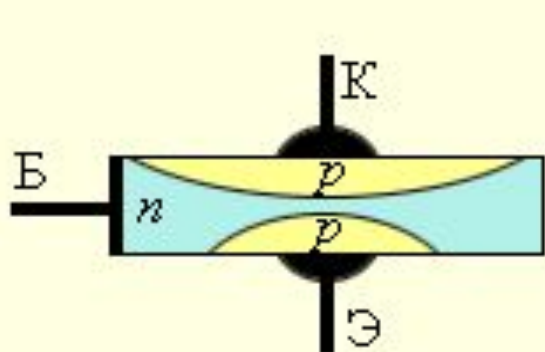
# Электронно-дырочный переход. Транзистор

- В транзисторе  $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью  $p$ -типа, а созданные на ней две области – проводимостью  $n$ -типа.
- В транзисторе  $p-n-p$  – типа всё наоборот.
- Пластинку транзистора называют *базой (Б)*, одну из областей с противоположным типом проводимости – *коллектором (К)*, а вторую – *эмиттером (Э)*.





# Электронно-дырочный переход. Транзистор



# Сверхпроводимость

- Существует одно явление, механизм которого оказалось возможным объяснить лишь в рамках квантовой теории.

При некоторой определенной температуре  $T_{кр}$ , различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля.

- В 1908 г. голландскому физика Г. Камерлинг-Оннесу удалось получить жидкий гелий с температурой кипения 4,44 К. Метод получения жидкого гелия оказался очень сложным и малоэффективным, и в течение долгого времени лишь лаборатория Камерлинг-Оннеса в Лейдине производила жидкий гелий.

- Изучая поведение сопротивления ртути, охлаждаемой до гелиевых температур, Камерлинг-Оннес в 1911 г. впервые в мире **наблюдал исчезновение сопротивления ртути практически до нуля.**
- Это явление было названо ***сверхпроводимостью.***
- Камерлинг-Оннес писал: «При 4,3 К сопротивление ртути уменьшается до 0,084 Ом, что составляет 0,0021 от значения сопротивления которое имела бы твердая ртуть при 0 °С (39,7 Ом).
- Обнаружено, что при 3 К сопротивление падает ниже  $3 \cdot 10^{-6}$  Ом, что составляет  $10^{-7}$  от значения при 0 °С». Отметим, что температурный интервал, в котором сопротивление уменьшалось до нуля, очень узок, и для некоторых металлов он составляет лишь  $10^{-3}$  К.

- В 1957 г. Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером дано квантово-механическое объяснение природы сверхпроводимости (теория БКШ).
- Было показано, что хотя между электронами действуют силы кулоновского отталкивания, тем не менее в твердых телах при температуре перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  – критической температуре, между электронами начинают действовать силы притяжения, обусловленные обменом *фононами* между электронами.

- **Фононы – кванты упругих колебаний кристаллической решетки.**
- **Это притяжение приводит к образованию связанных электронных пар – *куперовских пар*.**
- **Пары электронов уже не являются фермионами, и для них уже не действует принцип запрета Паули.**
- **Спаренные электроны являются бозонами – частицами с нулевым спином, и стремятся сконденсироваться.**
- **В результате такой конденсации образуется электрически заряженная, сверхтекучая электронная жидкость, обладающая свойствами сверхпроводимости.**

- **Сверхпроводящее состояние является макроскопическим квантовым состоянием металла**
- **Электрон, движущийся среди положительно заряженных ионов, поляризует решетку т.е. электростатическими силами притягивает к себе ближайшие ионы.**
- **Благодаря такому смещению ионов в окрестности траектории электрона локально возрастает плотность положительного заряда.**
- **Второй электрон, движущийся вслед за первым будет притягиваться областью с избыточным положительным зарядом.**
- **В результате косвенным образом за счет взаимодействия с решеткой между электронами 1 и 2 возникают силы притяжения (связанная куперовская пара).**

- **Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами.**
- **Практически наиболее важным их них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи.**
- **Научный интерес к сверхпроводимости возрастал по мере открытия новых материалов с более высокими критическими температурами.**

- **Значительный шаг в этом направлении произошел в 1986 году, когда было обнаружено, что у одного сложного керамического соединения  $T_{кр} = 35 \text{ K}$ .**
- **Уже в следующем 1987 году физики сумели создать новую керамику с критической температурой 98 K, превышающей температуру жидкого азота (77 K).**
- **Явление перехода веществ в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения жидкого азота, было названо *высокотемпературной сверхпроводимостью*.**
- **В 1988 году было создано керамическое соединение на основе элементов Tl–Ca–Ba–Cu–O с критической температурой 125 K.**



- **Следует отметить, что до настоящего времени механизм высокотемпературной сверхпроводимости керамических материалов до конца не выяснен.**

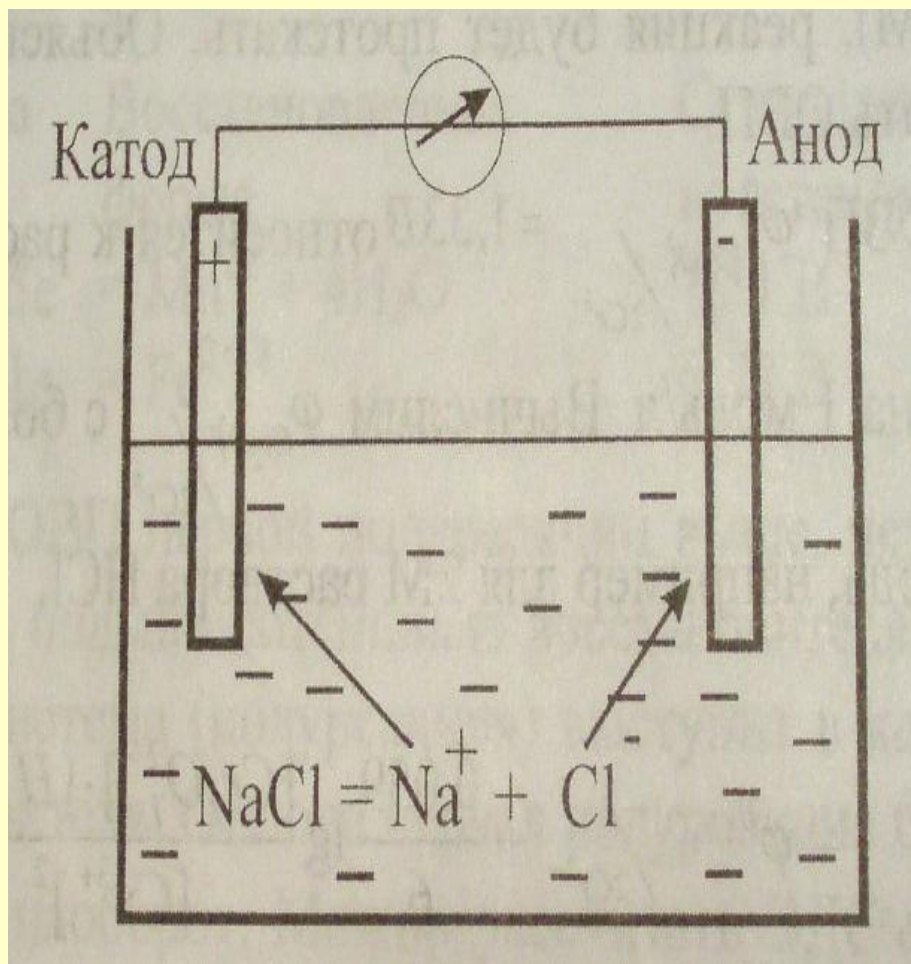
# **Электрический ток в электролитах**

- 1. Электролиты. Носители зарядов в электролитах.**
- 2. Электролиз. Электролитическая диссоциация.**
- 3. Закон Фарадея для электролиза.**
- 4. Объединенный закон Фарадея для электролиза.**

- ***Электролитами*** принято называть проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества.
- **Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы.**

- Основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются водные **растворы неорганических кислот, солей и оснований.**
- Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах.
- Это явление получило название *электролиза.*

# Электролиз



- Это совокупность процессов, протекающих в растворе или расплаве электролита, при пропускании через него электрического тока. Электролиз является одним из важнейших направлений в электрохимии

- **Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.**
- **Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы – к положительному электроду (*аноду*).**
- **Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул.**
- **Это явление называется *электролитической диссоциацией*.**

- Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году.
- *Закон Фарадея* определяет количества первичных продуктов, выделяющихся на электродах при электролизе:
- Масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду  $Q$ , прошедшему через электролит:  
$$m = kQ = kIt.$$
- Величину  $k$  называют *электрохимическим эквивалентом*.

- Так как заряд иона равен произведению валентности вещества  $n$  на элементарный заряд  $e$  ( $q_0 = ne$ ), то выражение для электрохимического эквивалента  $k$  можно записать в виде :

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{m_0 N_A}{ne N_A} = \frac{1}{F} \frac{M}{n}$$

- $F = eN_A$  – *постоянная Фарадея.*
- $F = eN_A = 96485$  Кл / моль.



- *Постоянная Фарадея численно равна заряду, который необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде одного моля одновалентного вещества.*
- **Объединенный закон Фарадея для электролиза приобретает вид:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{z} It.$$

**\* Электролитические процессы \* классифицируются следующим образом:**

- получение неорганических веществ (водорода, кислорода, хлора, щелочей и т.д.)
- получение металлов (литий, натрий, калий, бериллий, магний, цинк, алюминий, медь и т.д.)
- очистка металлов (медь, серебро, ...)
- получение металлических сплавов
- получение гальванических покрытий
- обработка поверхностей металлов (азотирование, борирование, электрополировка, очистка)
- получение органических веществ
- электродиализ и обессоливание воды
- нанесение пленок при помощи электрофореза

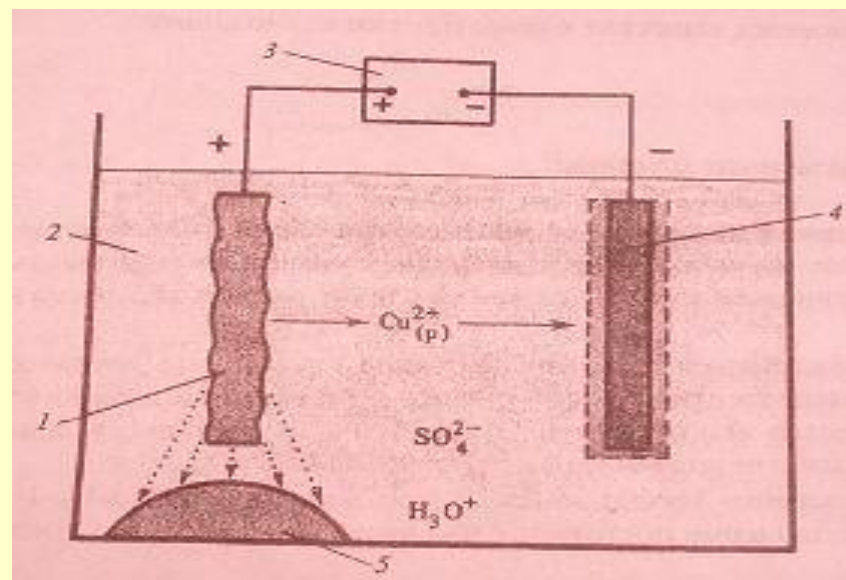
# Практическое применение электролиза

- Электрохимические процессы широко применяются в различных областях современной техники, в **аналитической химии, биохимии** и т. д. В **химической промышленности** электролизом получают хлор и фтор, щелочи, хлораты и перхлораты, надсерную кислоту и персульфаты, химически чистые [водород](#) и кислород и т. д. При этом одни вещества получают путем восстановления на катоде (альдегиды, парааминофенол и др.), другие электроокислением на аноде (хлораты, перхлораты, перманганат калия и др.).
- Электролиз в **гидрометаллургии** является одной из стадий переработки металлосодержащего сырья, обеспечивающей получение товарных металлов.  
Электролиз может осуществляться с растворимыми анодами - процесс электрорафинирования или с нерастворимыми - процесс электроэкстракции.  
Главной задачей при электрорафинировании металлов является обеспечения необходимой чистоты катодного металла при приемлемых энергетических расходах.

- В цветной металлургии электролиз используется для **извлечения металлов** из руд и их **очистки**. Электролизом расплавленных сред получают алюминий, магний, титан, цирконий, уран, бериллий и др.

Для **рафинирования (очистки)** металла электролизом из него отливают пластины и помещают их в качестве анодов в электролизер. При пропускании тока металл, подлежащий очистке, подвергается анодному растворению, т. е. переходит в раствор в виде катионов. Затем эти катионы металла разряжаются на катоде, благодаря чему образуется компактный осадок уже чистого металла. Примеси, находящиеся в аноде, либо остаются нерастворимыми, либо переходят в электролит и удаляются.

Схема электролитического рафинирования меди

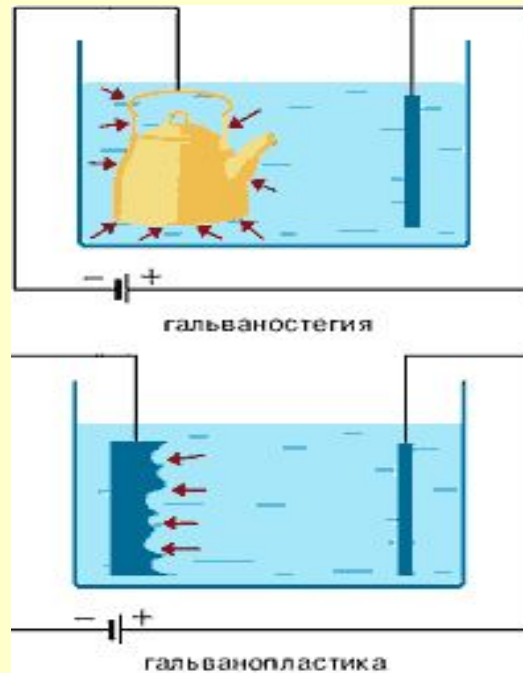


- **Гальванотехника** – область прикладной электрохимии, занимающаяся процессами нанесения металлических покрытий на поверхность как металлических, так и неметаллических изделий при прохождении постоянного электрического тока через растворы их солей. Гальванотехника подразделяется на гальваностегию и гальванопластику.
- **Гальваностегия** (от греч. покрывать) – это электроосаждение на поверхность металла другого металла, который прочно связывается (сцепляется) с покрываемым металлом (предметом), служащим катодом электролизера.
- Перед покрытием изделия необходимо его поверхность тщательно очистить (обезжирить и протравить), в противном случае металл будет осаждаться неравномерно, а кроме того, сцепление (связь) металла покрытия с поверхностью изделия будет непрочной. Способом гальваностегии можно покрыть деталь тонким слоем золота или серебра, хрома или никеля. С помощью электролиза можно наносить тончайшие металлические покрытия на различных металлических поверхностях. При таком способе нанесения покрытий, деталь используют в качестве катода, помещенного в раствор соли того металла, покрытие из которого необходимо получить. В качестве анода используется пластинка из того же металла.

- **Гальванопластика** – получение путем электролиза точных, легко отделяемых металлических копий относительно значительной толщины с различных как неметаллических, так и металлических предметов, называемых матрицами.

С помощью гальванопластики изготавливают бюсты, статуи и т. д.

Гальванопластика используется для нанесения сравнительно толстых металлических покрытий на другие металлы (например, образование "накладного" слоя никеля, серебра, золота и т. д.).



- Кроме указанных выше, электролиз нашел применение и в других областях:
- получение **оксидных защитных пленок** на металлах (анодирование);
- электрохимическая обработка поверхности металлического изделия (**полировка**);
- электрохимическое **окрашивание** металлов (например, меди, латуни, цинка, хрома и др.);
- **очистка воды** – удаление из нее растворимых примесей. В результате получается так называемая мягкая вода (по своим свойствам приближающаяся к дистиллированной);
- электрохимическая **заточка** режущих инструментов (например, хирургических ножей, бритв и т.д.).





**Сегодня: \***

Лекция окончена.

До свидания!

**УРА! УРА! УРА!**

