



FIZYKA II

Wykład II

Prąd elektryczny

# Ładunki w materiale

Cząstki obdarzone ładunkiem mogą występować w pustej przestrzeni, ale mogą też znajdować się w materiale. W zależności od tego czy materiał pozwala na ruch ładunków dzielimy materiały na:

- izolatory: ładunki nie mają możliwości ruchu (szkło, papier, ebonit, polietylen)
- przewodniki: ładunki swobodnie mogą się poruszać (metale, polimery przewodzące, elektrolity)
- półprzewodniki: ładunki się poruszają, ale ich ruch nie jest w pełni swobodny, a ich ilość zależy od temperatury materiału (krzem, german)

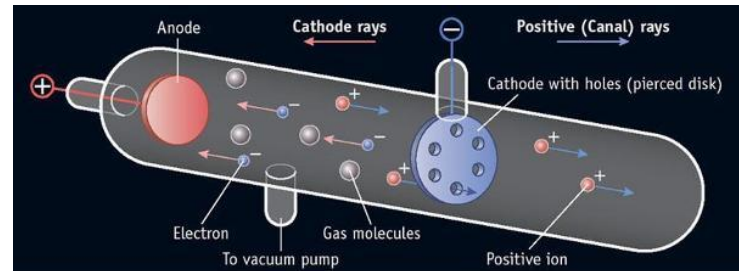
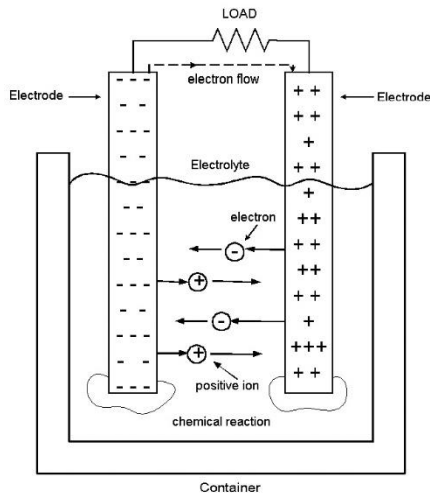
# Ładunki w materiale

Przewodnictwo elektryczne zaobserwować można praktycznie we wszystkich rodzajach materii:

- ciała stałe (przewodnictwo elektronowe bądź jonowe)
- ciecze (przewodnictwo jonowe)
- gazy (przewodnictwo jonowe)

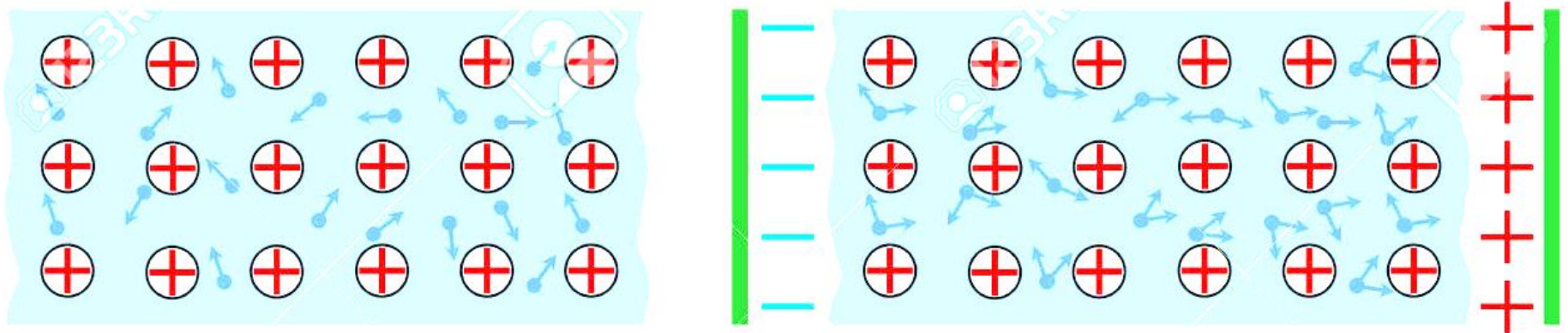
**przewodnictwo elektronowe** – nośnikami są elektrony

**przewodnictwo jonowe** – nośnikami są jony



## Prąd elektryczny – uporządkowany ruch ładunków elektrycznych

- ładunki: elektrony w metalach; jony dodatnie i ujemne w elektrolitach; elektrony i dziury w półprzewodnikach; jony dodatnie i elektrony w gazach
- pole elektryczne powodujące ruch
- ruch przewodnika lub dielektryka: prąd konwekcyjny



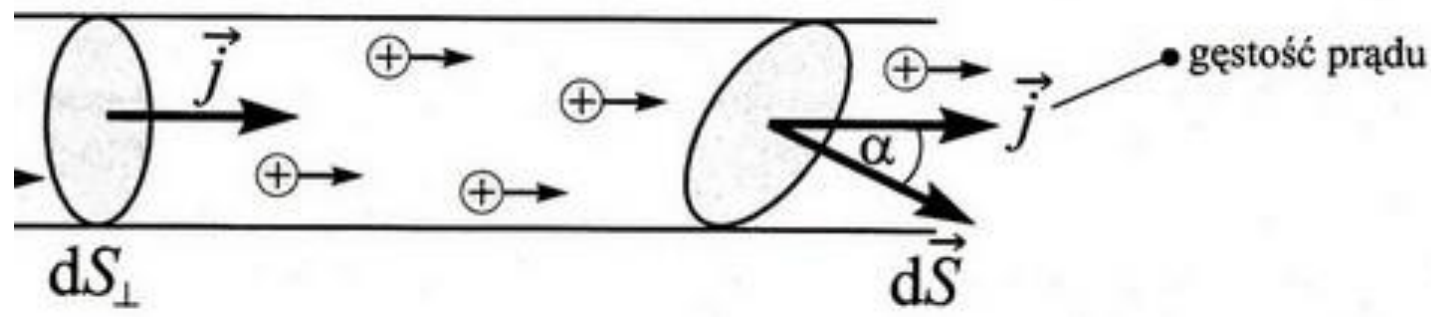
# Prąd elektryczny (natężenie prądu)

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad I = \frac{Q}{t} \quad [I] = \left[ \frac{C}{s} \right] = [A]$$

1 Amper = 1 C ładunku przechodzi w czasie 1s przez poprzeczny przekrój przewodnika

$$j = \frac{dI}{ds} \quad I = \int_S \vec{j} d\vec{s}$$

$$j = q_e n v_u \quad n = \frac{N_A \rho}{M} \left[ \frac{\text{atom/mol} \cdot \text{kg/m}^3}{\text{kg/mol}} \right], \quad v_u = \frac{q_e E}{m} \tau = \frac{q_e E}{m} \frac{\lambda}{v_F}, \quad v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m}}$$



Dla miedzi:  $v_u \approx \frac{500[A/cm^2]}{8 \cdot 10^{22}[\text{elektronów}/cm^3] \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}[C]} \approx 0.04[cm/s]$

# Prąd elektryczny (opór)

1 Ohm = prąd o natężeniu 1A płynie w przewodniku, do którego przyłożono napięcie o wartości 1V.

$$R = \frac{U}{I}$$

W stałej temperaturze opór przewodnika jest stały, tj. nie zależy od natężenia prądu i napięcia  $R = \text{const}(I, U)$ .



Dla przewodników metalicznych płynący przez nie **prąd** jest wprost **proporcjonalny** do przyłożonego **napięcia**.

Powyższe stwierdzenie **nie jest prawdziwe** dla każdego przewodnika!

Jeżeli jednak zależność między prądem a napięciem jest **liniowa**, to mówimy, że dany przewodnik spełnia **prawo Ohma**.

# Ruch ładunków w przewodniku

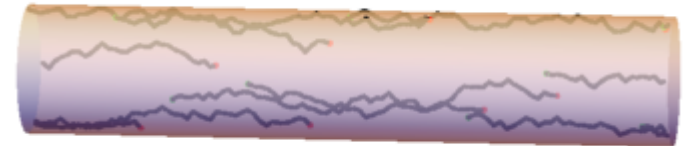
Na ładunki działa siła:  $F = qE$

Jeśli pole jest stałe to i siła jest stała:  $F = qE = \frac{qU}{d}$

ładunek porusza się ze stałym przyspieszeniem.



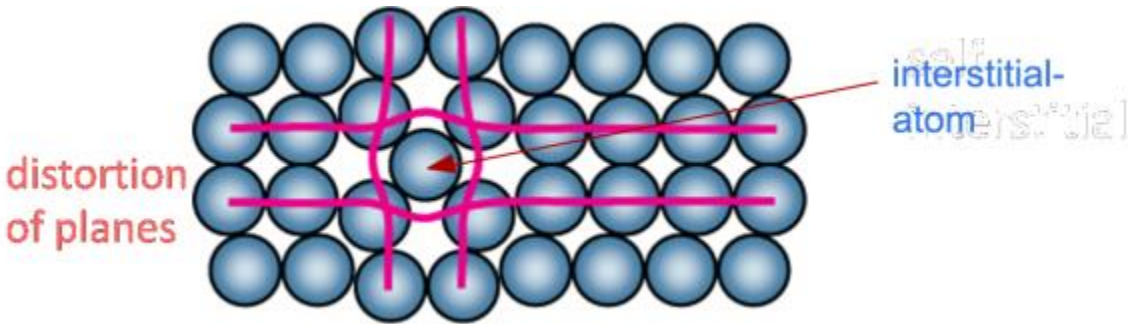
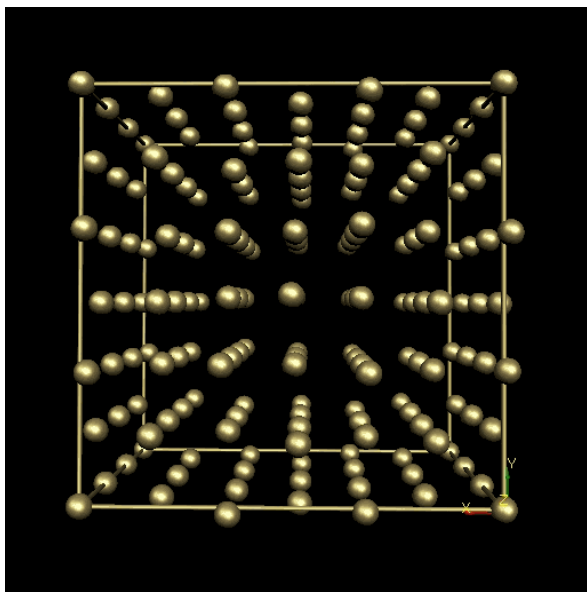
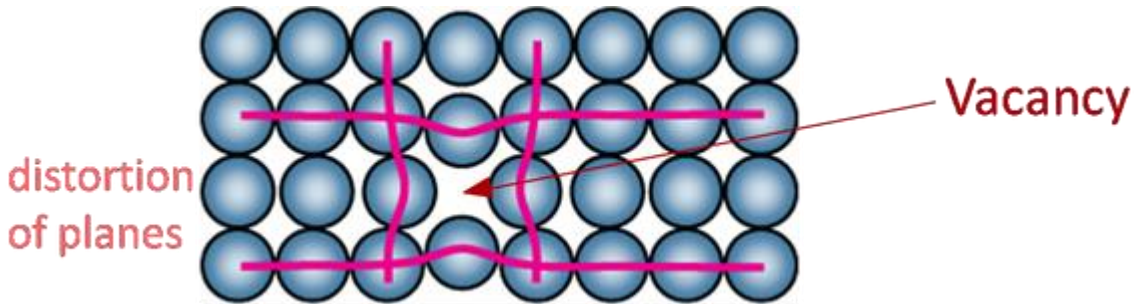
Elektrony poruszają się swobodnie (pod działaniem pola) tak długo aż nie zostaną rozproszone na niedoskonałościach struktury. Między zderzeniami elektron jest rzeczywiście przyspieszany i przebywa odległość  $\lambda$  w czasie  $t$  (średnia droga swobodna). Po zderzeniu traci pamięć kierunku ruchu i przyspieszanie rozpoczyna się na nowo. Średnia prędkość ładunków (prędkość unoszenia) jest stała.



# Ruch ładunków w przewodniku

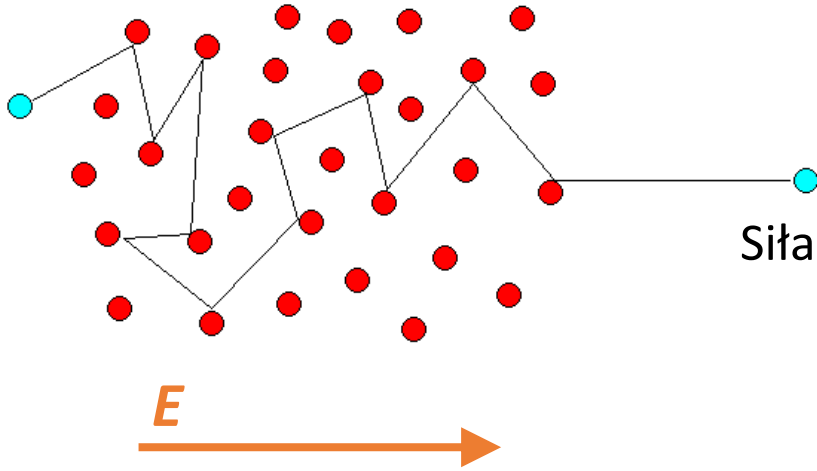
Ruch ładunków odbywa się pod wpływem

- 1. Siły wymuszającej wynikającej z różnicy potencjałów na końcach przewodnika.
- 2. Siły tłumiącej: pośrodkim czasie ruchu  $\tau$  ładunki zderzają się z ułożonymi nieregularnie jonami (defekty lub drgania sieci krystalicznej)





# Opór w ujęciu mikroskopowym



Siła jaka działa na elektron w polu elektrycznym:

$$ma = eE \quad \Rightarrow \quad a = \frac{eE}{m}$$

Prędkość unoszenia:

$$v_u = a \cdot \tau = \frac{eE\tau}{m}$$

$$v_u = \frac{eE\tau}{m} = \frac{j}{ne}$$

**Mikroskopowe prawo Ohma:**

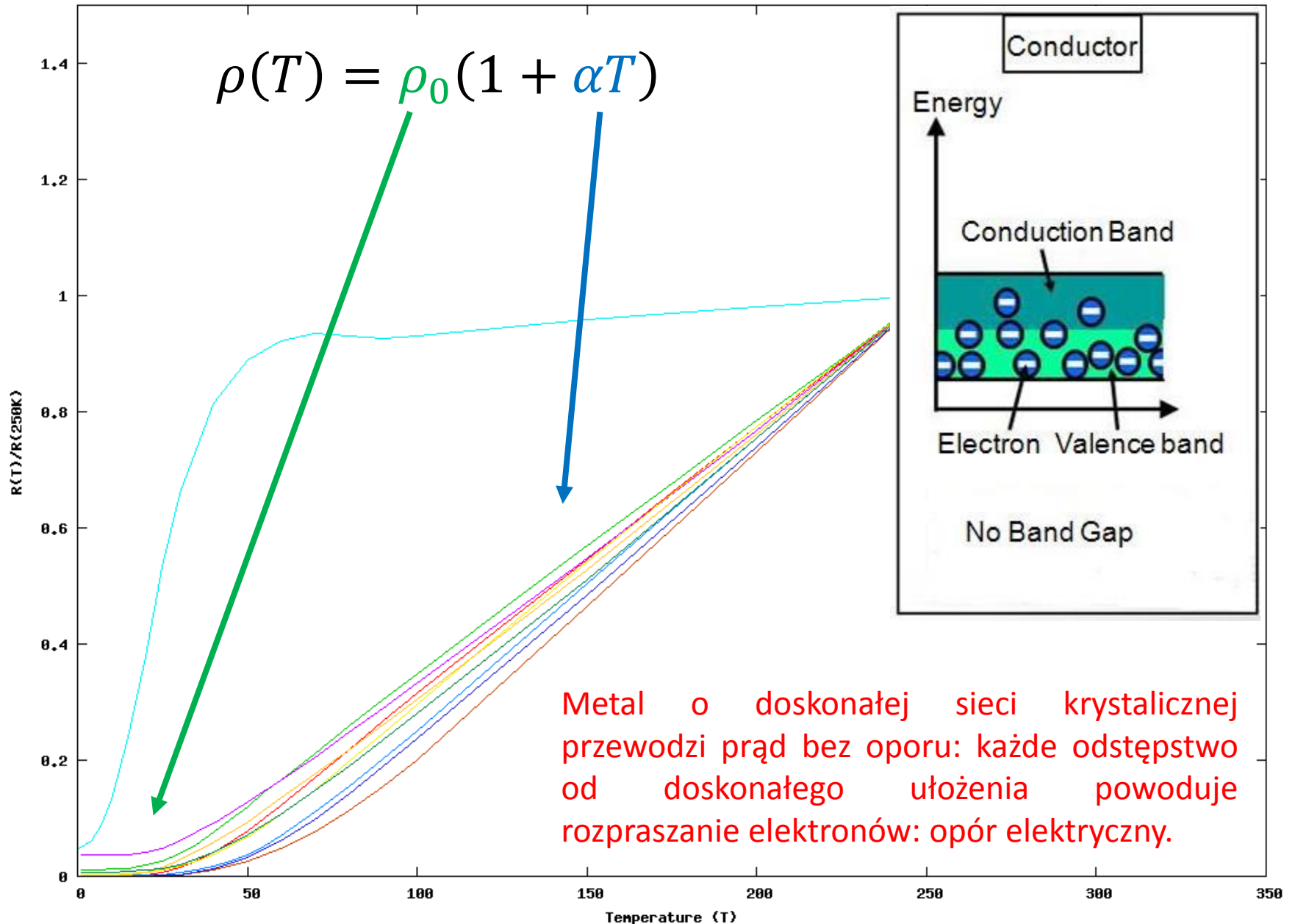
$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{m}{ne^2\tau}$$

# Prąd elektryczny (opór, oporność)

Material	Bulk Resistivity (micro- $\Omega$ cm)
silver (Ag - thick film material fired at 850°C)	1.59
copper (Cu)	1.68
gold (Au)	2.24
aluminum (Al)	2.64
Ferro CN33-246 (Ag + low melting glass, fired at 150°C)	2.7-3.2
SMP Ag flake + precursor formulation, 250°C	4.5
molybdenum (Mo)	5.2
Tungsten (W)	5.65
zinc (Zn)	5.92
nickel (Ni)	6.84
iron (Fe)	9.71
palladium (Pd)	10.54
tin (Sn)	11
solder (Pb-Sn; 50:50)	15
Lead	20.64
Titanium nitrate (TiN transparent conductor)	20
duPont Polymer Thick Film	
5029 (state of the art Ag filled polymer, 150°C)	18-50
duPont Polymer Thick Film (Cu filled polymer)	75-300
ITO indium tin oxide ( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ )	100
zinc oxide (ZnO doped-undoped)	120-450
carbon (C-graphite)	1375
KIA SCC-10 (doped silver phosphate glass, 330°C soft point)	3000
ruthenium oxide $\text{RuO}_2$ type conductive oxides	5000-10,000
Bayer conductive polymer Baytron-P	1,000,000

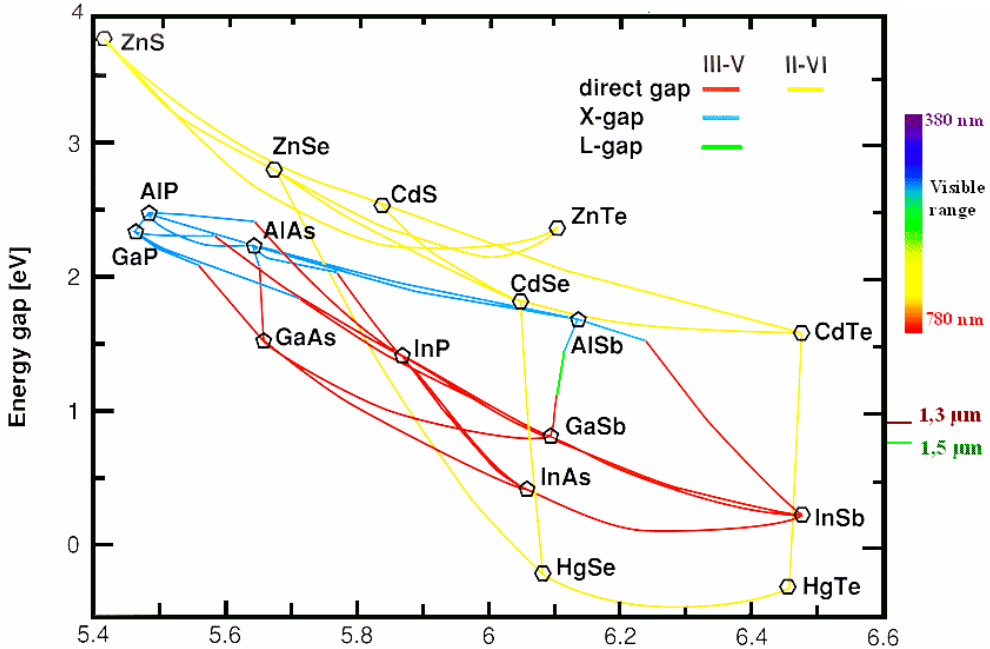
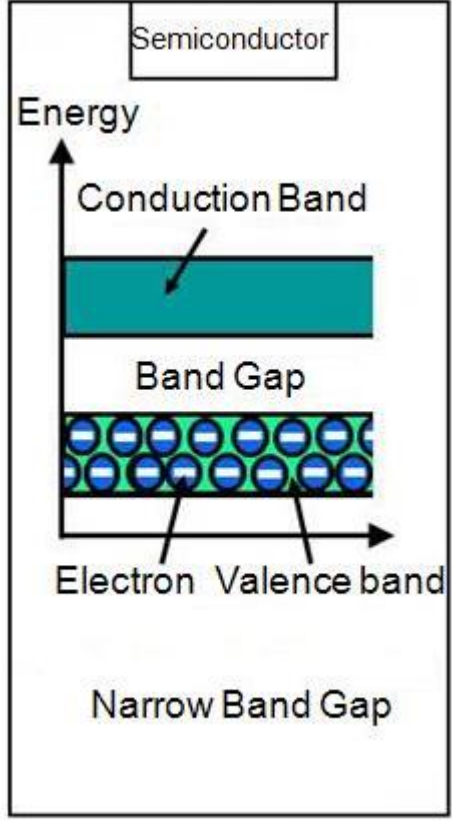
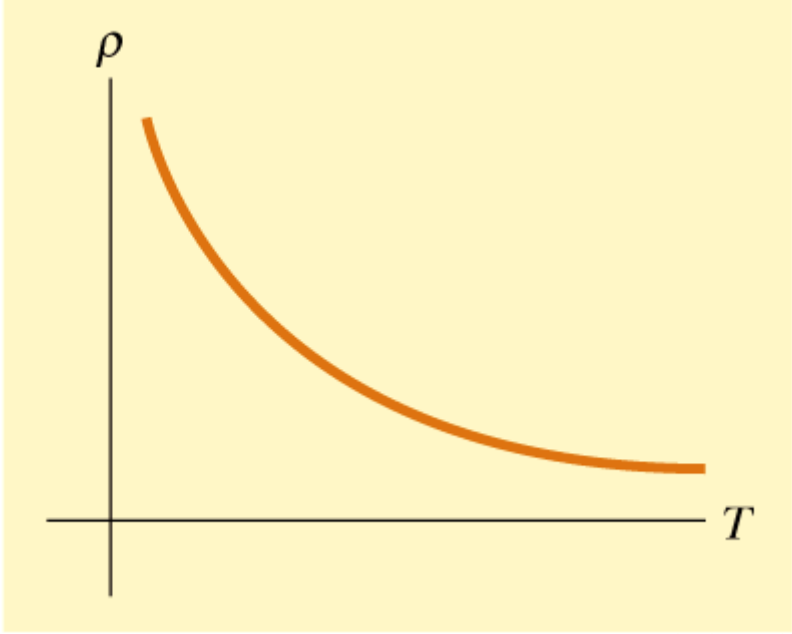
# Temperaturowa zależność oporu (metale)

Normalized Resistivity for Selected Metals



Metal o doskonałej sieci krystalicznej przewodzi prąd bez oporu: każde odstępstwo od doskonałego ułożenia powoduje rozpraszanie elektronów: opór elektryczny.

# Temperaturowa zależność oporu (półprzewodniki)

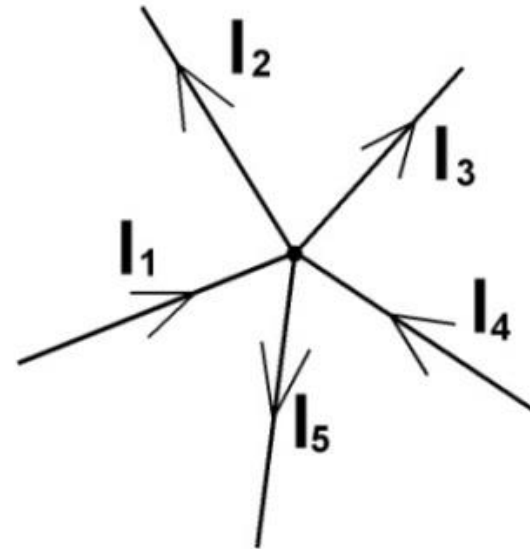


# Obwody prądu stałego: prawa Kirchhoffa

## Pierwsze prawo Kirchhoffa (zasada zachowania ładunku)

Suma natężeń prądów wpływających do węzła jest równa sumie natężeń prądów wyływających z tego węzła.

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$$



Dla węzła obwodu elektrycznego suma algebraiczna natężeń prądów wpływających (+) i wyływających (-) jest równa zero

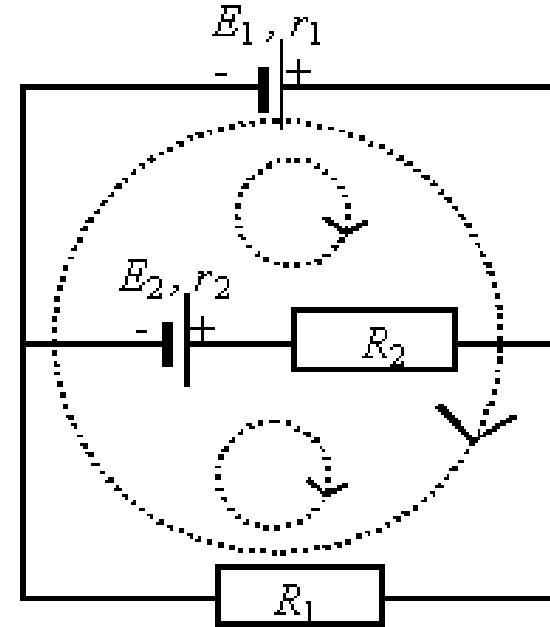
$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

# Obwody prądu stałego: prawa Kirchhoffa

## Drugie prawo Kirchhoffa (zasada zachowania energii)

W zamkniętym obwodzie (oczku) suma spadków napięć na oporach równa jest sumie sił elektromotorycznych występujących w tym obwodzie

$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{i=1}^N U_i = \sum_{i=1}^N \mathcal{E}_i$$

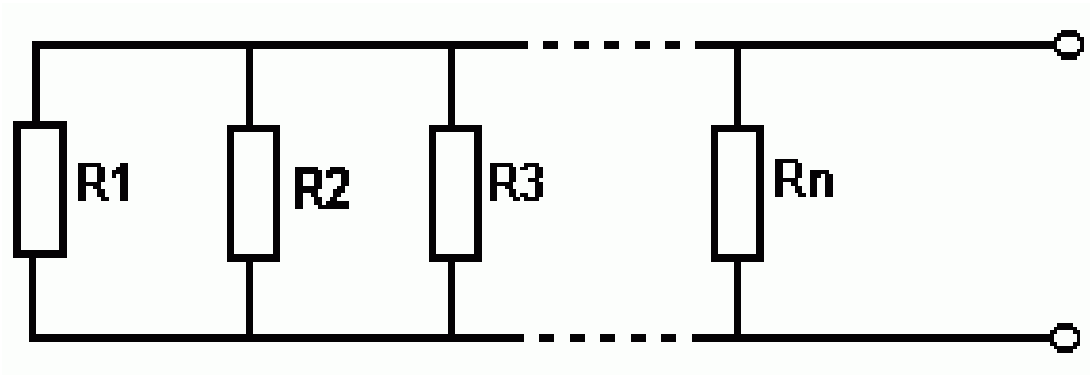


W zamkniętym obwodzie (oczku) algebraiczna suma spadków napięć na oporach równa oraz sił elektromotorycznych występujących w tym obwodzie jest równa zero

$$\sum_{i=1}^N U_i + \mathcal{E}_i = 0$$

# Obwody prądu stałego: łączenie oporników

## Równoległe łączenie oporników



$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$$

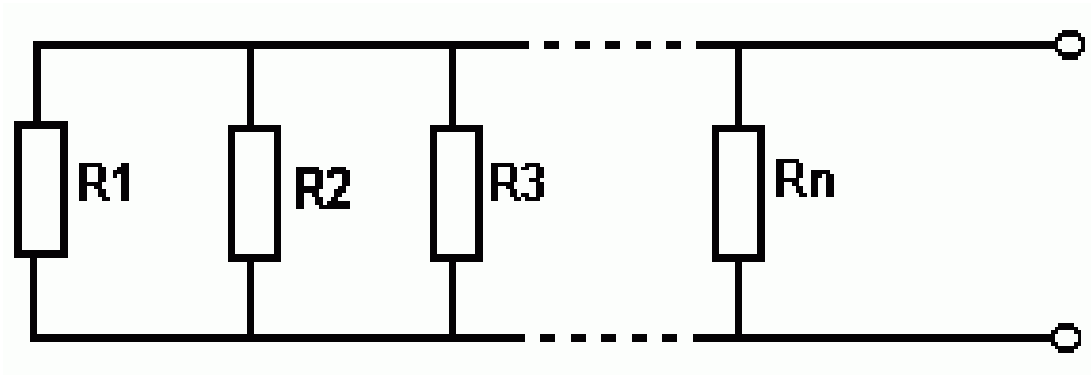
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad I = \frac{U}{R}$$

$$\frac{U}{R_Z} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

# Obwody prądu stałego: łączenie oporników

## Równoległe łączenie oporników



$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad I = \frac{U}{R}$$

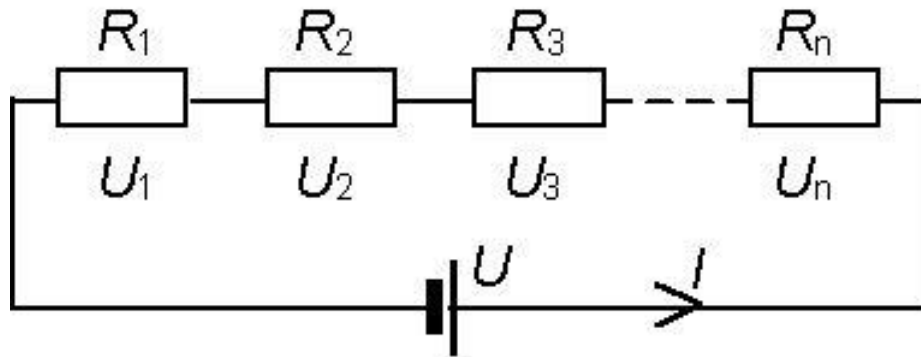
$$\frac{U}{R_Z} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



# Obwody prądu stałego: łączenie oporników

## Szeregowe łączenie oporników



$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

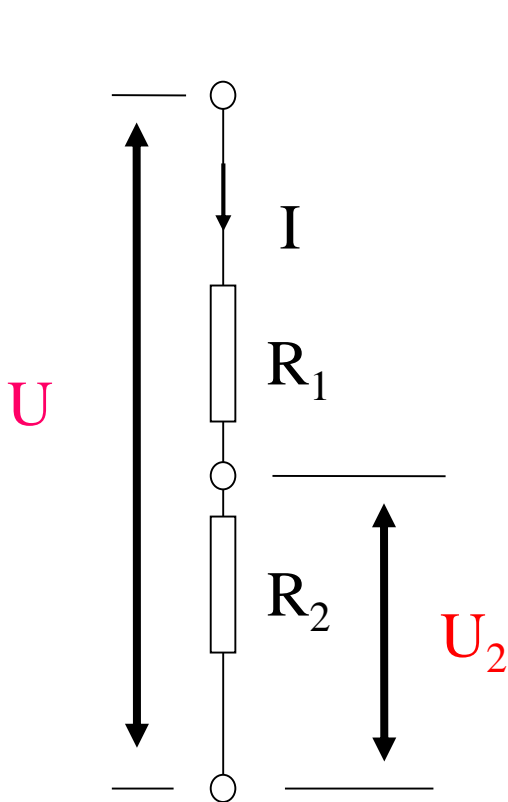
$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad U = IR$$

$$IR_Z = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_n R_n$$

$$R_Z = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

# Obwody prądu stałego

## Dzielnik napięcia



$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = IR_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Przykład:

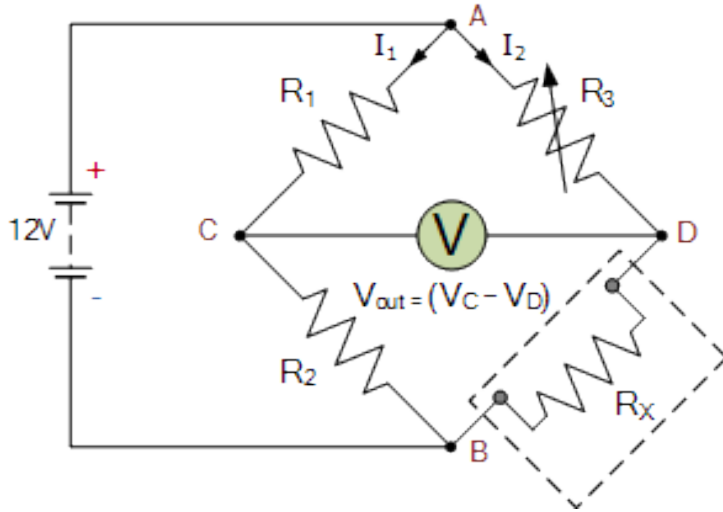
$$U = 12 \text{ V}$$

$$R_1 = 4 \text{ k} \Omega, R_2 = 8 \text{ k} \Omega$$

$$I = 1 \text{ mA}, U_2 = 8 \text{ V}$$

# Obwody prądu stałego

## Mostek Wheatstone'a



$$V_{OUT} = \frac{R_x}{R_3 + R_x} V_{IN} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{IN}$$

$$V_{OUT} = \left( \frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{IN}$$

$$R_1 = R_3 \text{ i } R_2 = R_x \Rightarrow V_{OUT} = 0$$

$$R_1 = R_3 \text{ i } R_x = R_2 + \Delta R \Rightarrow V_{OUT} = V_{IN} \left( \frac{R_2 + \Delta R}{R_1 + R_2 + \Delta R} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cong V_{IN} \left( \frac{\Delta R}{R_1 + R_2} \right)$$

# Obwody prądu stałego: źródła

Aby w przewodniku utrzymać stały prąd trzeba wykonać pracę  $W = Uq$  nad ładunkiem  $q$ , a źródłem tej energii, jest albo energia chemiczna (akumulatory, baterie), albo energia mechaniczna (prądnice).

Urządzenie, które przenosi ładunki od niższego do wyższego potencjału (utrzymuje różnicę potencjałów) nazywa się źródłem siły elektromotorycznej (napięcie na otwartym źródle i wyrażone w voltach).

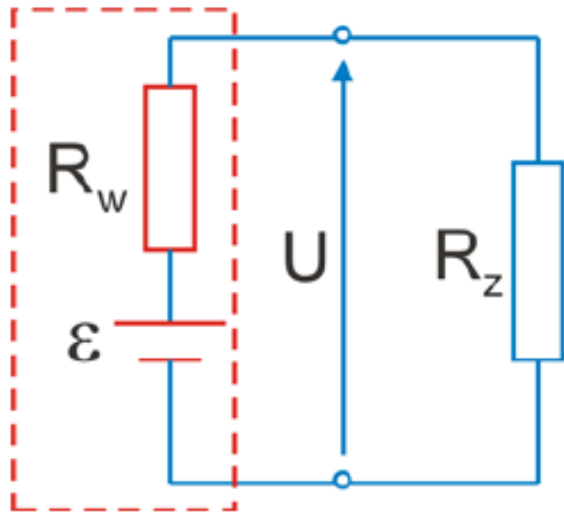
$$\varepsilon = \frac{dW}{dq} \quad [V]$$

Idealne źródło SEM nie posiada oporu wewnętrznego, więc jego energia jest w całości wykorzystana do wymuszenia przepływu prądu.

W rzeczywistości źródła SEM wykazują opór wewnętrzny, który wiąże się ze stratami energii przy przepływie ładunków do zacisków ogniwa. Takie źródło SEM będzie wykazywało obniżenie różnicy potencjałów pod obciążeniem. W bateriach lub akumulatorach opór wewnątrz ogniwa rośnie wraz ze stopniem rozładowania, tak więc wyczerpane źródło SEM po podłączeniu do układu wykazuje wartość SEM znacznie niższą niż bez obciążenia.

# Obwody prądu stałego: źródła

Napięcie zasilania  $U$  jest zawsze niższe od wartości SEM ( $\varepsilon$ ) dla nieobciążonego ogniwa. Dlatego też często stosuje się rysunek, w którym pokazany jest schemat ogniwa zawierający idealne źródło SEM oraz opór wewnętrzny  $R_w$ .



$$U = \varepsilon - IR_w$$

Widzimy więc, że w przypadku przepływu prądu – czyli kiedy do źródła podłączony jest obwód – napięcie  $U$  pomniejszone jest o spadek napięcia na oporze wewnętrznym, zgodnie z prawem Ohma.

Natomiast dopóki obwód jest otwarty, czyli nie ma przepływu prądu,  $U$  jest równe  $\varepsilon$ .

# Obwody prądu stałego: moc źródła

**SEM** ( $\epsilon$ ) wykonuje pracę przy wymuszaniu ruchu nośników, tracąc część energii na pokonanie oporu wewnętrznego. Jako, że moc prądu jest wyrażona przez:

$$P = IU$$

Możemy zapisać, przy uwzględnieniu oporu wewnętrznego, że moc ogniwa jest wyrażona przez:

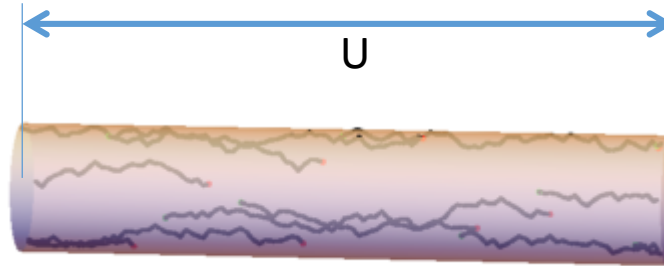
$$P = I(\epsilon - IR_w) = I\epsilon - I^2 R_w$$

moc idealnego źródła SEM

moc stracona na skutek wydzielania ciepła w ogniwie

Podczas ładowania ogniwa, część dostarczanej mocy jest tracona w postaci ciepła, co zaobserwować możemy jako grzanie się ładowanego akumulatora.

# Obwody prądu stałego: bilans energii w przepływie prądu



Praca pola elektrycznego o napięciu  $U$  nad transportem ładunku  $dQ$  wzdłuż przewodu:

$$W = dQ \cdot U$$

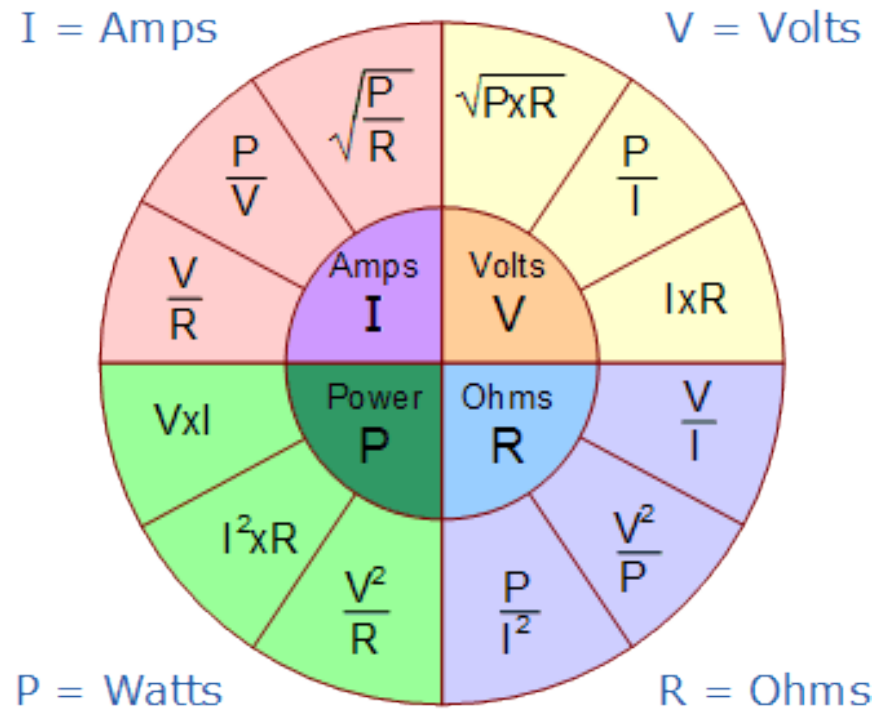
Ponieważ średnia prędkość ładunków jest stała (średnia energia ładunków jest stała) to taka sama musi też być strata energii ładunku:

$$E = dQ \cdot U$$

Moc wydzielona na przewodzie:

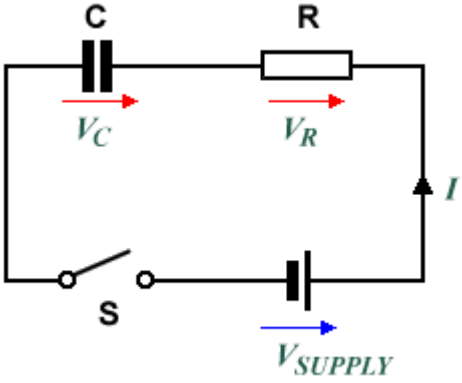
$$P = \frac{W}{dt} = \frac{dQ}{dt} U = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

# Obwody prądu stałego: U, I, R, P





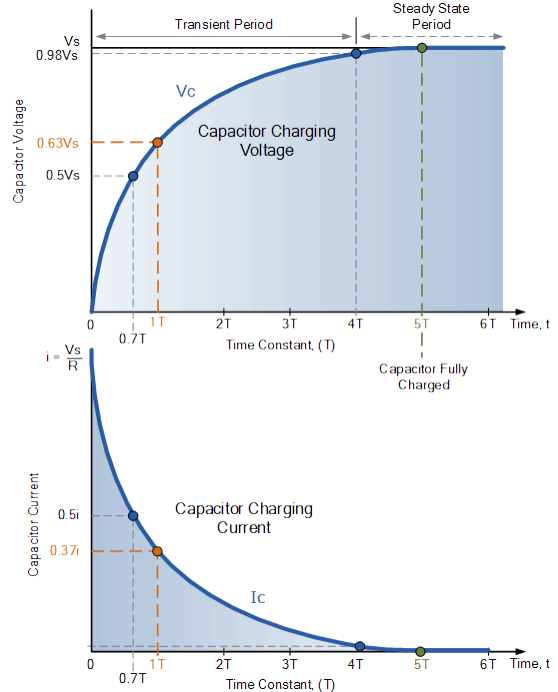
# Obwody prądu stałego: obwód RC



Włacznik (S) otwarty: prąd  $I = 0$ , ładunek na kondensatorze  $Q = 0$ , napięcie na kondensatorze  $V = 0$ .

Zamknięcie włącznika: prąd  $I \neq 0$ , ładunek na kondensatorze  $Q > 0$ , napięcie na kondensatorze  $V = \frac{Q}{C}$

Długi czas po zamknięciu obwodu: prąd  $I = 0$ , ładunek na kondensatorze  $Q = Q_{max}$ , napięcie na kondensatorze  $V = \varepsilon = \frac{Q_{max}}{C}$



$$\varepsilon - IR - \frac{Q}{C} = 0 \quad / dt$$

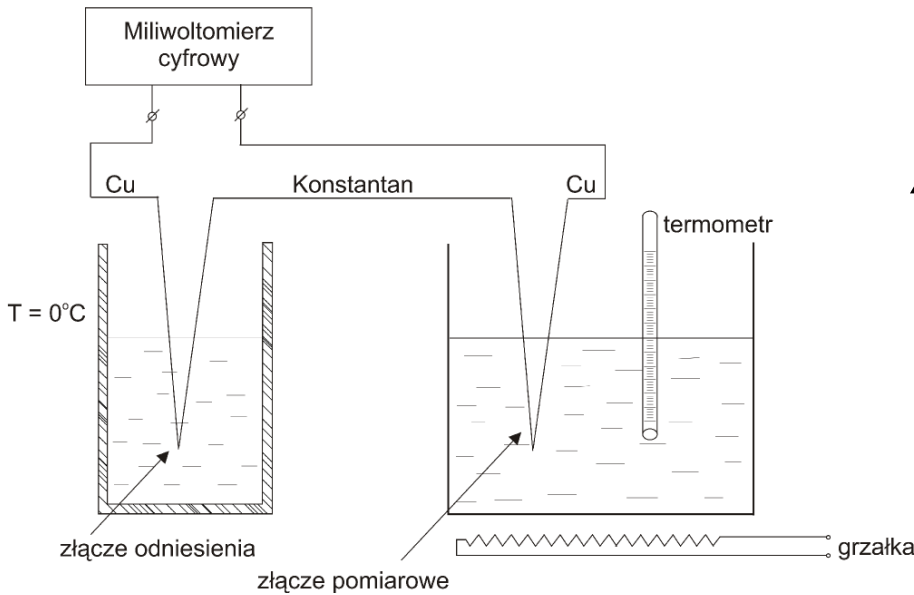
$$0 = R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} \Rightarrow 0 = R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I \Rightarrow \frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} dt$$

$$\ln I = -\frac{t}{RC} + \text{const} \Rightarrow I = e^{-\frac{t}{RC} + \text{const}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$Q(t) = \int_0^t I dt = I_0 RC (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$Q(\infty) = \varepsilon C \Rightarrow I_0 = \frac{\varepsilon}{R} \Rightarrow I = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

# Zjawiska termoelektryczne






























	<i>Ba</i>	<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Pt</i>
<i>A</i> (eV)	2.11	3.38	4.47	5.03	6.27

Przy łączeniu dwóch przewodników wykonanych z różnych metali powstaje między nimi kontaktowa różnica potencjałów, która zależy jedynie od ich składu chemicznego i temperatury.

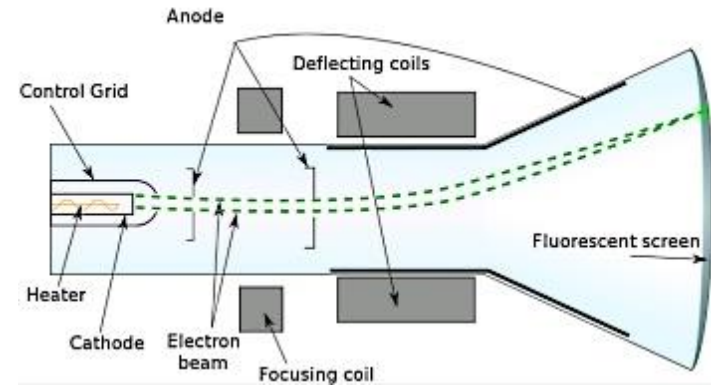
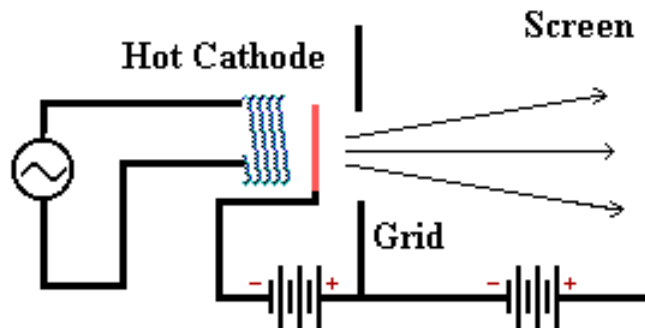
Różnica potencjałów między końcami obwodu składającego się z połączonych szeregowo przewodników pozostających w jednakowej temperaturze nie zależy od składu chemicznego ogniw pośrednich szeregu. Różnica ta równa się kontaktowej różnicy potencjałów, powstającej przy bezpośrednim połączeniu przewodników skrajnych.

# Zjawiska termoelektryczne

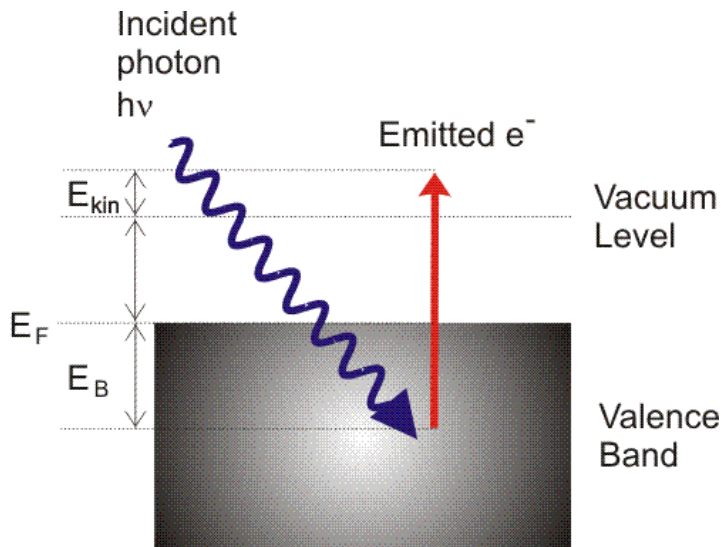
ANSI Code	Alloy Combination		Color Coding  		Maximum Useful Temperature Range ++	Maximum Thermocouple Grade Temperature Range	EMF (mV) Over Max. Temperature Range	Standard Limits of Error** (above 0°C)	Special Limits of Error** (above 0°C)	International IEC 584-3	Comments Environment – Bare Wire	IEC Code
	+ Lead	- Lead	Thermocouple Grade	Extension Grade								
<b>J</b>	IRON Fe (magnetic)	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: 32 to 1382°F 0 to 750°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-346 to 2193°F -210 to 1200°C	-8.095 to 69.553	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidizing at High Temperatures. Not Recommended for Low Temperatures.	<b>J</b>
<b>K</b>	CHROMEAL® NICKELCHROMIUM Ni-Cr	ALOMEGA® NICKEL-ALUMINUM Ni-Al (magnetic)			Thermocouple Grade: -328 to 2282°F -200 to 1250°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-454 to 2501°F -270 to 1372°C	-6.458 to 54.886	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Clean Oxidizing and Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Wide Temperature Range. Most Popular Calibration	<b>K</b>
<b>T</b>	COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: -328 to 662°F -250 to 350°C Extension Grade: -76 to 212°F -60 to 100°C	-454 to 752°F -270 to 400°C	-6.258 to 20.872	greater of 1.0°C or 0.75%	greater of 0.5°C or 0.4%		Mild Oxidizing, Reducing Vacuum or Inert. Good Where Moisture Is Present. Low Temperature and Cryogenic Applications	<b>T</b>
<b>E</b>	CHROMEAL® NICKELCHROMIUM Ni-Cr	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni			Thermocouple Grade: -328 to 1652°F -200 to 900°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-454 to 1832°F -270 to 1000°C	-9.835 to 76.373	greater of 1.7°C or 0.5%	greater of 1.0°C or 0.4%		Oxidizing or Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Highest EMF Change Per Degree	<b>E</b>
<b>N</b>	OMEGA-P® NICROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N® NISIL Ni-Si-Mg			Thermocouple Grade: -450 to 2372°F -270 to 1300°C Extension Grade: 32 to 392°F 0 to 200°C	-450 to 2372°F -270 to 1300°C	-4.345 to 47.513	greater of 2.2°C or 0.75%	greater of 1.1°C or 0.4%		Alternative to Type K. More Stable at High Temps	<b>N</b>
<b>R</b>	PLATINUM-13% RHODIUM Pt-13% Rh	PLATINUM Pt	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 2642°F 0 to 1450°C Extension Grade: 32 to 300°F 0 to 150°C	-58 to 3214°F -50 to 1768°C	-0.226 to 21.101	greater of 1.5°C or 0.25%	greater of 0.6°C or 0.1%		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	<b>R</b>
<b>S</b>	PLATINUM-10% RHODIUM Pt-10% Rh	PLATINUM Pt	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 2642°F 0 to 1400°C Extension Grade: 32 to 300°F 0 to 150°C	-58 to 3214°F -50 to 1768°C	-0.236 to 18.693	greater of 1.5°C or 0.25%	greater of 0.6°C or 0.1%		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	<b>S</b>
<b>U</b>	COPPER Cu	COPPER-LOW NICKEL Cu-Ni	NONE ESTABLISHED		Extension Grade: 32 to 122°F 0 to 50°C						Extension Grade Connecting Wire for R and S Thermocouples. Also Known as RX and SX Extension Wire.	<b>U</b>
<b>B</b>	PLATINUM-30% RHODIUM Pt-30% Rh	PLATINUM-6% RHODIUM Pt-6% Rh	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 3092°F 0 to 1700°C Extension Grade: 32 to 212°F 0 to 100°C	32 to 3308°F 0 to 1820°C	0 to 13.820	0.5% over 800°C	NOT ESTABLISHED		Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature. Common Use in Glass Industry	<b>B</b>
<b>G<sup>+</sup></b> <b>(W)</b>	TUNGSTEN W	TUNGSTEN-26% RHENIUM W-26% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 500°F 0 to 260°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 38.564	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	<b>G</b> <b>(W)</b>
<b>C<sup>+</sup></b> <b>(W5)</b>	TUNGSTEN-5% RHENIUM W-5% Re	TUNGSTEN-26% RHENIUM W-26% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 1600°F 0 to 870°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 37.066	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F). Not for Oxidizing Atmosphere	<b>C</b> <b>(W5)</b>
<b>D<sup>+</sup></b> <b>(W3)</b>	TUNGSTEN-3% RHENIUM W-3% Re	TUNGSTEN-25% RHENIUM W-25% Re	NONE ESTABLISHED		Thermocouple Grade: 32 to 4208°F 0 to 2320°C Extension Grade: 32 to 500°F 0 to 260°C	32 to 4208°F 0 to 2320°C	0 to 39.506	greater of 4.5°C or 1.0%	NOT ESTABLISHED		Vacuum, Inert, Hydrogen. Beware of Embrittlement. Not Practical Below 399°C (750°F)-Not for Oxidizing Atmosphere	<b>D</b> <b>(W3)</b>

# Zjawiska emisyjne

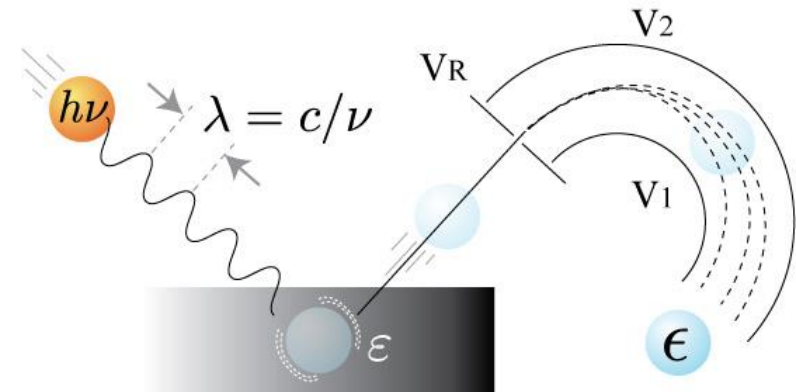
*Termoemisja - emisja elektronów przez rozgrzane metale (termiczne wzbudzenia elektronów)*



*Fotoemisja - zjawisko emitowania elektronów przez metale pod wpływem fali elektromagnetycznej*



$$h\nu = \epsilon + \epsilon$$



$h$  : Plank's constant



# Prąd elektryczny w cieczech

Dysocjacja elektrolityczna - rozpad związków chemicznych na cząsteczki składowe pod wpływem wody (rozpuszczalnika)

Elektrolity – wodne roztwory kwasów, zasad i soli

Przykładowe reakcje

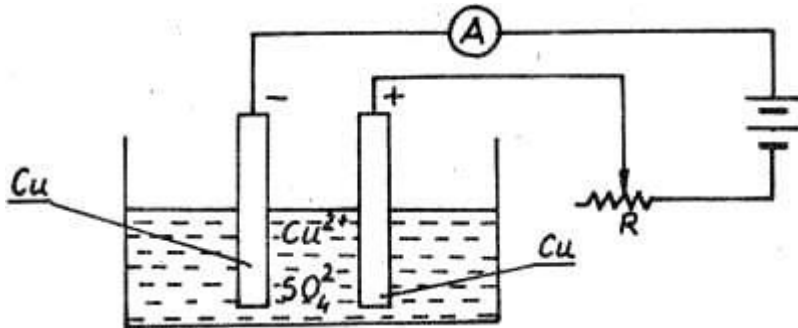


Ilościowo rozpad cząsteczek na jony określa współczynnik dysocjacji elektrolitycznej  $\alpha$

Jeżeli w jednostce objętości roztworu znajduje się  $n_0$  cząsteczek, a  $n_1$  z nich jest „zdysocjowanych” na jony, to:

$$n_1 = \alpha n_0$$

# Prąd elektryczny w cieczach



I: masa wydzielającej się substancji  $m$  jest proporcjonalna do przepływającego przez elektrolit ładunku  $Q$

II: równoważniki elektrochemiczne  $k$  pierwiastków są proporcjonalne do ich równoważników chemicznych

$$m = k Q$$

Stała  $k$  jest równoważnikiem elektrochemicznym, równym liczbowo masie wydzielonej przy przepływie przez elektrolit ładunku 1 kulomba w czasie 1 s [kg/A s]

$$m = k I t$$

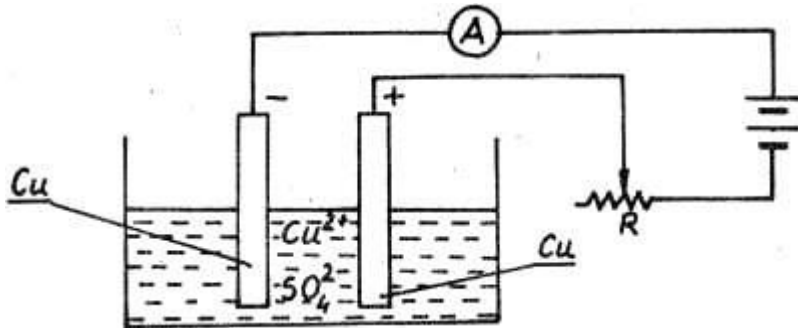
$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{W_i}$$

gdzie  $M$  jest masą jonu,  $W_i$  jest wartościowością jonu, a  $F$  jest stałą Faraday'a ( $F=96485$  C/mol), czyli ładunkiem mola elektronów

Łącząc pierwsze i drugie prawo Faraday'a otrzymujemy:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{W_i} Q$$

# Prąd elektryczny w cieczach



I: masa wydzielającej się substancji  $m$  jest proporcjonalna do przepływającego przez elektrolit ładunku  $Q$

II: równoważniki elektrochemiczne  $k$  pierwiastków są proporcjonalne do ich równoważników chemicznych

$$m = k Q$$

Stała  $k$  jest równoważnikiem elektrochemicznym, równym liczbowo masie wydzielonej przy przepływie przez elektrolit ładunku 1 kulomba w czasie 1 s [kg/A s]

$$m = k I t$$

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{W_i}$$

gdzie  $M$  jest masą jonu,  $W_i$  jest wartościowością jonu, a  $F$  jest stałą Faraday'a ( $F=96485$  C/mol), czyli ładunkiem mola elektronów

Łącząc pierwsze i drugie prawo Faraday'a otrzymujemy:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{W_i} Q$$



# Prąd elektryczny w cieczech

W elektrolicie ruch jonów składa się z dwóch przyczynków. Pierwszy pochodzi od ukierunkowanego ruchu związanego z przyłożonym polem elektrycznym, a drugi od ruchów termicznych.

Ze względu na to, że jony są znacznie większe od elektronów, nie możemy zaniedbać oporu ośrodka.

Równanie ruchu jonu dodatniego będzie następujące:

$$m_+ \vec{a}_+ = q\vec{E} - f_+ \vec{v}_+$$

gdzie  $m$  oznacza masę jonu,  $a$  – przyspieszenie jonu,  $v$  – prędkość jonu,  $f$  – współczynnik tarcia,  $E$  – natężenie pola elektrycznego.

Dla pewnej prędkości  $v$ ,  $qE - f_+ v_+ = 0$ , więc prędkość jonów przyjmuje stałą wartość:

$$\vec{v}_+ = \frac{q \vec{E}}{f_+}$$

# Prąd elektryczny w cieczech

Prędkość jonów  $v_+$  ma kierunek wektora natężenia pola elektrycznego. Analogicznie określamy prędkość jonów ujemnych.

Prąd w elektrolicie jest sumą prądów jonów dodatnich i ujemnych.

Liczba jonów każdego znaku w jednostce objętości jest równa:

$$n = n_0 \alpha$$

Całkowita gęstość prądu  $j$  jest sumą:

$$\vec{j} = \vec{j}_+ + \vec{j}_- = q\alpha n_0 \vec{v}_+ + q\alpha n_0 \vec{v}_- = q\alpha n_0 (\vec{v}_+ + \vec{v}_-)$$

$$\vec{j} = F\eta\alpha(\vec{v}_+ + \vec{v}_-)$$

gdzie  $F$  jest stałą Faraday'a,  $\eta$  jest tzw. stężeniem równoważnym, równym ilości gramorównoważników rozpuszczonej substancji przypadającej na jednostkę objętości roztworu

Gramorównoważnik to taka masa związku chemicznego, która całkowicie przereaguje z jednym molem innego związku chemicznego zgodnie z równaniem stechiometrycznym określonej reakcji chemicznej

# Prąd elektryczny w cieczech

Jeśli przez  $N'$  oznaczymy liczbę cząsteczek w gramorównoważniku substancji, to stała Faradaya wyraża się wzorem:

$$F = qN' \quad \eta = \frac{n_0}{N'} \quad qn_0 = \eta F$$

wówczas 
$$\vec{j} = F\eta\alpha \left( \frac{q}{f_+} + \frac{q}{f_-} \right) \vec{E}$$

Jeśli wprowadzimy wyrażenie na ruchliwość jonów,  $\mu_{\pm} = q/f_{\pm}$  otrzymamy:

$$\vec{j} = F\eta\alpha(\mu_+ + \mu_-) \vec{E}$$

$$\sigma = F\eta\alpha(\mu_+ + \mu_-)$$

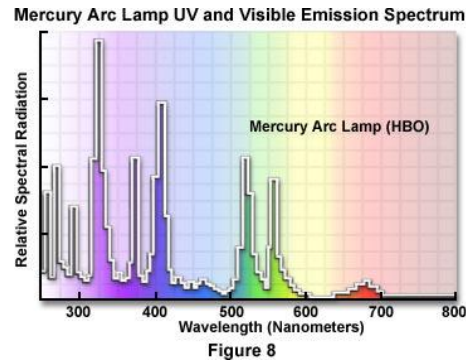
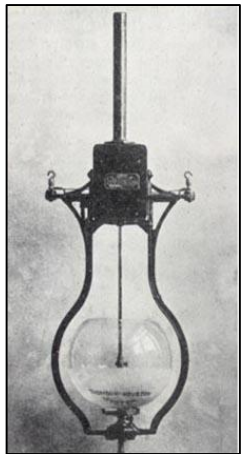
# Prąd elektryczny w próżni i gazach

## Wyładowanie łukowe

Łuk węglowy zapala się przy napięciu  $U=55\text{ V}$  (typowe napięcia w sieci elektrycznej 110V i 220 V są pozostałością po oświetleniu łukowym (2 lub 4 łuki połączone w szereg).

Elektrody łuku silnie się nagrzewają do temperatury ok.  $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$  i prąd płynie nawet wtedy, gdy rozdzielimy elektrody do odległości ok. 1cm

Na wskutek wysokiej temperatury katoda emituje zgodnie z efektem Richardsona\_bardzo wiele elektronów, które rozpędzone jonizują napotkane atomy powietrza

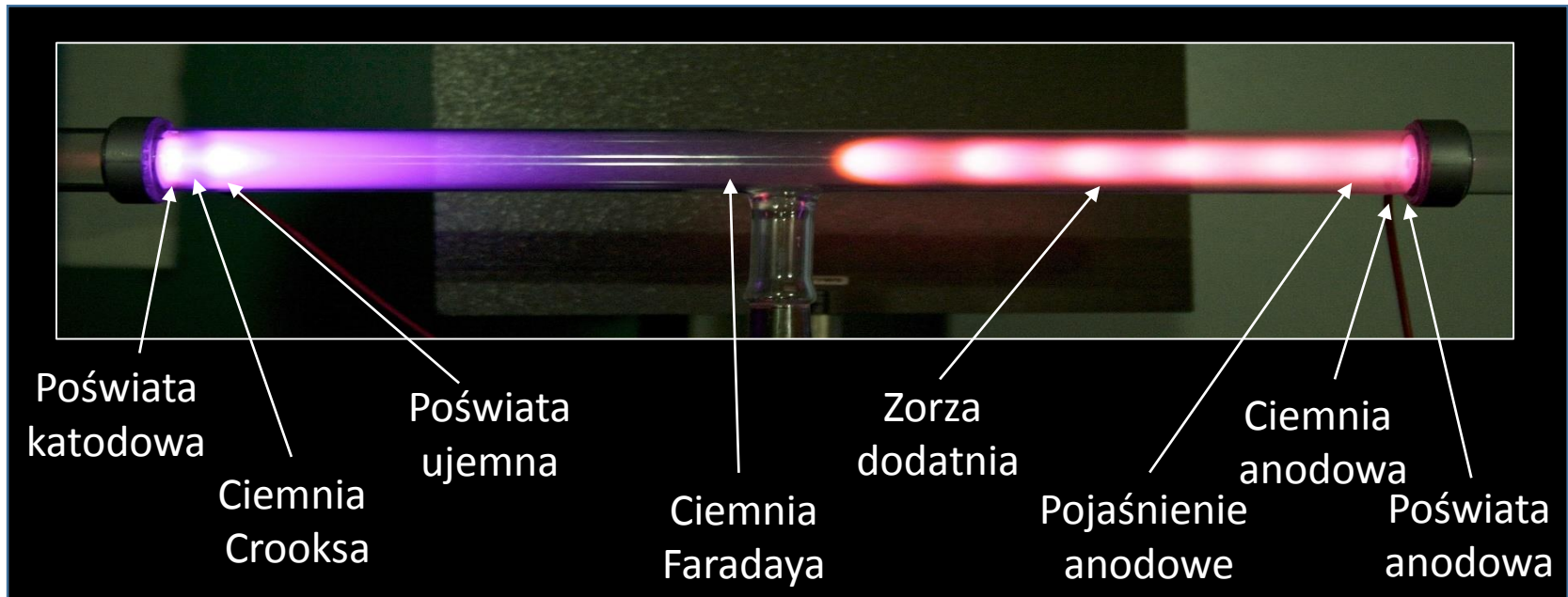


Pod ciśnieniem atmosferycznym i przy przepływie prądu 1 A temperatura łuku jest rzędu 5000–6000 K (jasność łuku może przekroczyć jasność Słońca)

Łuk elektryczny ma szerokie zastosowanie w technice, stosowany jest do wytwarzania światła w lampach łukowych. Używa się go w syntezie chemicznej i przy spawaniu elektrycznym, w piecach łukowych etc.

# Prąd elektryczny w próżni i gazach

## Wyładowanie jarzeniowe



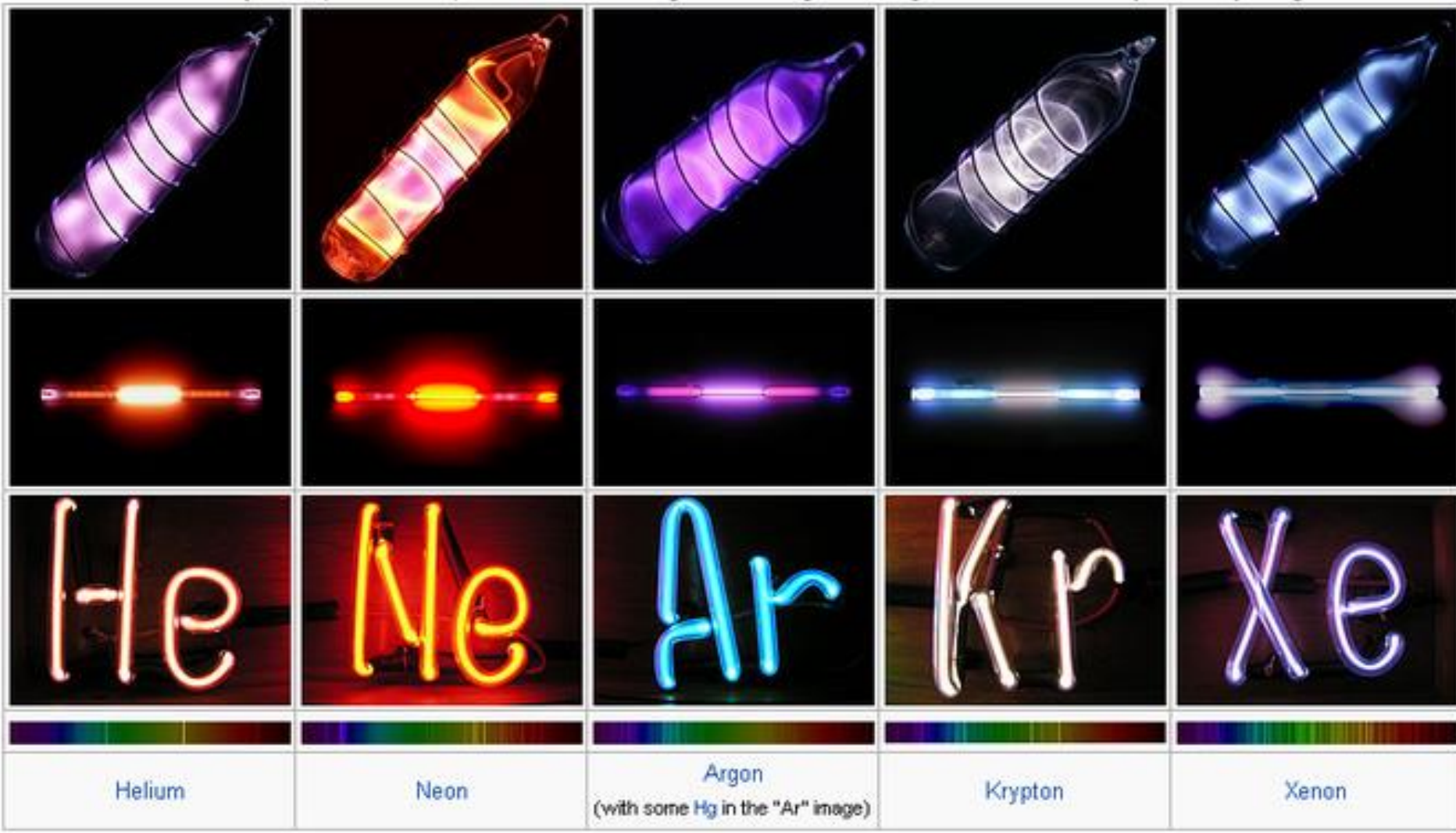
Proces wyładowania można opisać następująco:

1. Wyładowanie rozpoczyna się dzięki istnieniu pewnej liczby jonów w gazie.
2. Jony są przyspieszane i bombardują katodę wybijając z niej elektrony.
3. Elektrony przyspieszane w gazie nabierają w obszarze ciemni Crooksa (odpowiada średniej drodze swobodnej elektronów w gazie, przeważa prąd jonowy, który wraz z wybitymi elektronami silnie modyfikuje przyłożone pole zewnętrzne) energię niezbędną do wzbudzenia i jonizacji gazu.
4. Obszar jonizacji za ciemnią Crooksa nazywa się poświatą ujemną.
5. Wytworzone tam elektrony mają niewielką energię a niewielkie pole nie może ich wystarczająco przyspieszyć, cząsteczki gazu nie wzbudzają się, czyli również nie świecą (ciemnia Faradaya).
6. Elektrony jednak w trakcie ruchu w stronę anody na tyle się przyspieszają, że w obszarze zorzy dodatniej są w stanie wzbudzić atomy gazu i spowodować jego świecenie.

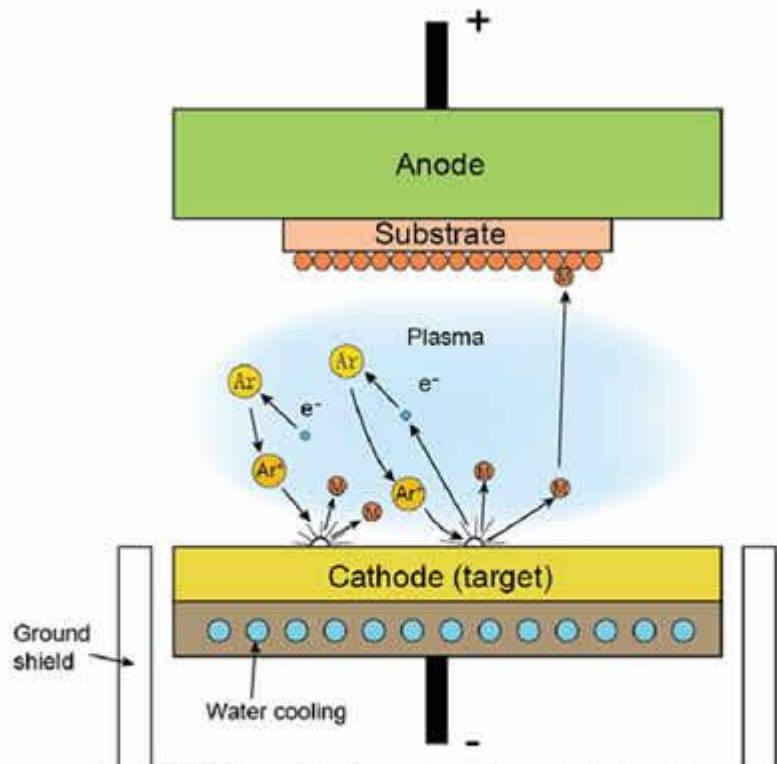
# Prąd elektryczny w próżni i gazach

## Wyładowanie jarzeniowe

Colors and spectra (bottom row) of electric discharge in noble gases; only the second row represents pure gases.



# Prąd elektryczny w próżni i gazach



*In a DC diode sputtering system, Argon is ionized by a strong potential difference, and these ions are accelerated to a target. After impact, target atoms are released and travel to the substrate, where they form layers of atoms in the thin-film*

