

Prąd elektryczny

- Ruch elektronów w przewodniku
- Wektor gęstości prądu
- Przewodność elektryczna
- Prawo Ohma
- Klasyczny model przewodnictwa w metalach
- Zależność przewodności/oporności od temperatury dla metali, półprzewodników i nadprzewodników
- Moc prądu elektrycznego
- Prawa Kirchoffa

Czym jest prąd elektryczny

Prąd elektryczny tworzony jest przez “przepływ” ładunku elektrycznego przez pewien obszar przestrzeni w jakimś określonym czasie

Przepływ prądu elektrycznego jest opisywany przez wielość fizyczną zwaną **natężeniem prądu**

Jednostką SI natężenia prądu jest **Amper [A]**

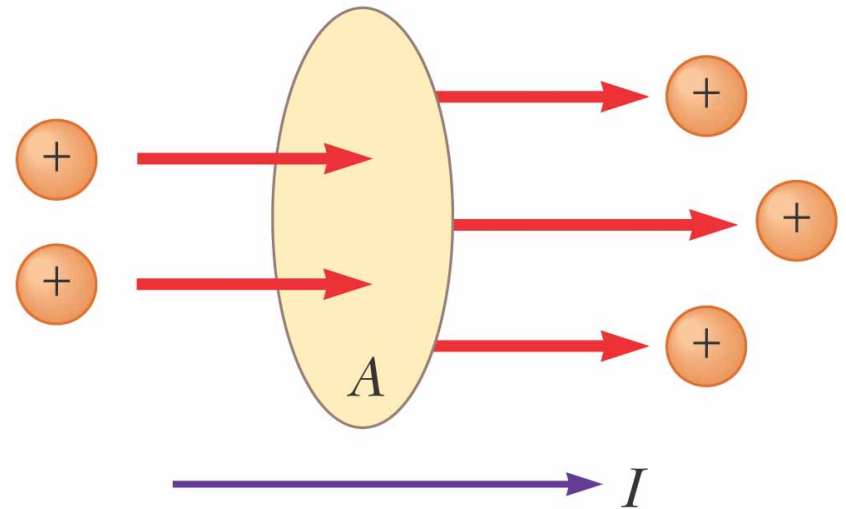
Jeśli przez określoną powierzchnię **A** w pewnym czasie Δt przepłynie ładunek ΔQ to mówimy że przepłynął **prąd o natężeniu I**

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

ogólniej

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Kierunek prądu el. umownie określono jako kierunek ruchu ładunków dodatnich



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Czym jest prąd elektryczny

Założenia:

Prąd płynie przez przewodnik o przekroju A

W jednostce objętości znajduje się n nośników ładunku

Na długości przewodnika Δx znajduje się całkowity ładunek:

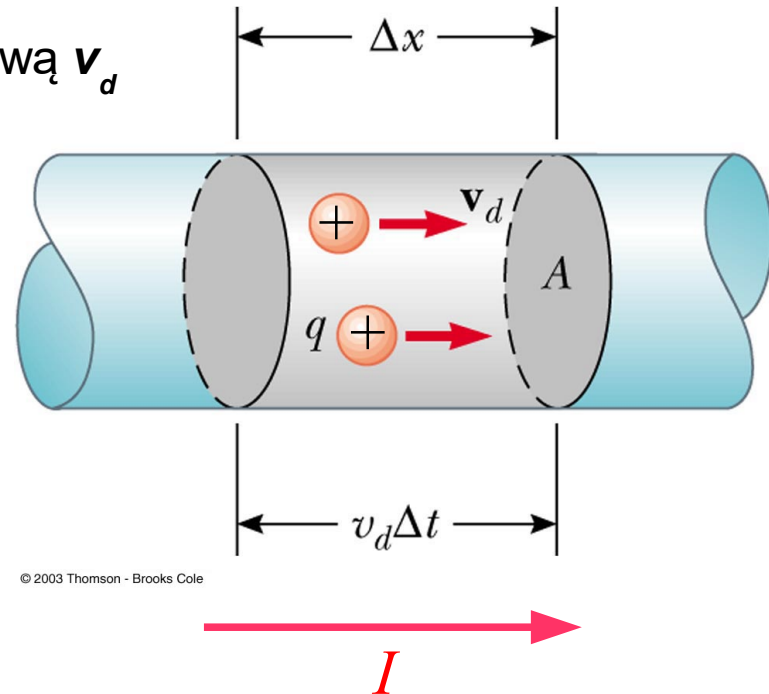
$$\Delta Q = (n A \Delta x) q$$

Ładunek porusza się z efektywną prędkością dryfową v_d

$$v_d = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad \Delta x = v_d \Delta t$$

Więc **natężenie prądu** możemy określić:

$$I = \Delta Q / \Delta t = n q v_d A$$



Ruch elektronów w przewodniku pod wpływem pola el.

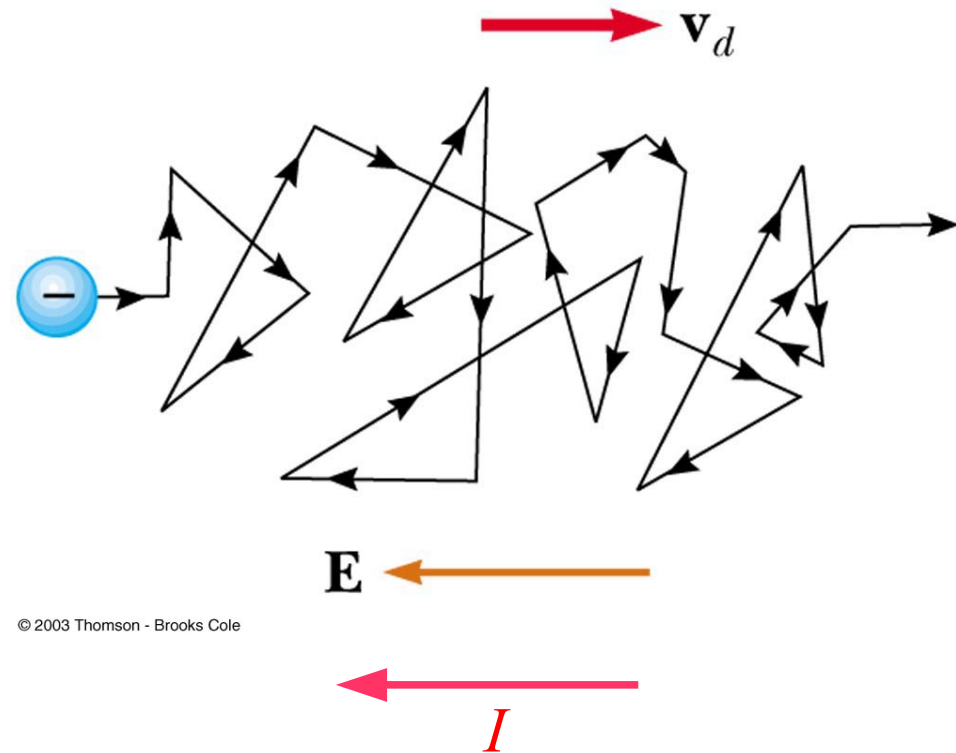
W metalach (które są dobrymi przewodnikami el.) nośnikami ładunku są elektrony

Elektrony przewodnictwa są w nieustannym ruchu (model “gazu elektronowego”) i zderzają się z atomami

Kiedy przyłożone zostanie pole elektryczne wówczas ruch elektronów staje się “bardziej uporządkowany”

Efektywnie elektrony przemieszczają się z prędkością “dryfowania” $\mathbf{v}_d$

Elektrony (mają ładunek ujemny) więc poruszają się przeciwnie do ustalonego kierunku prądu



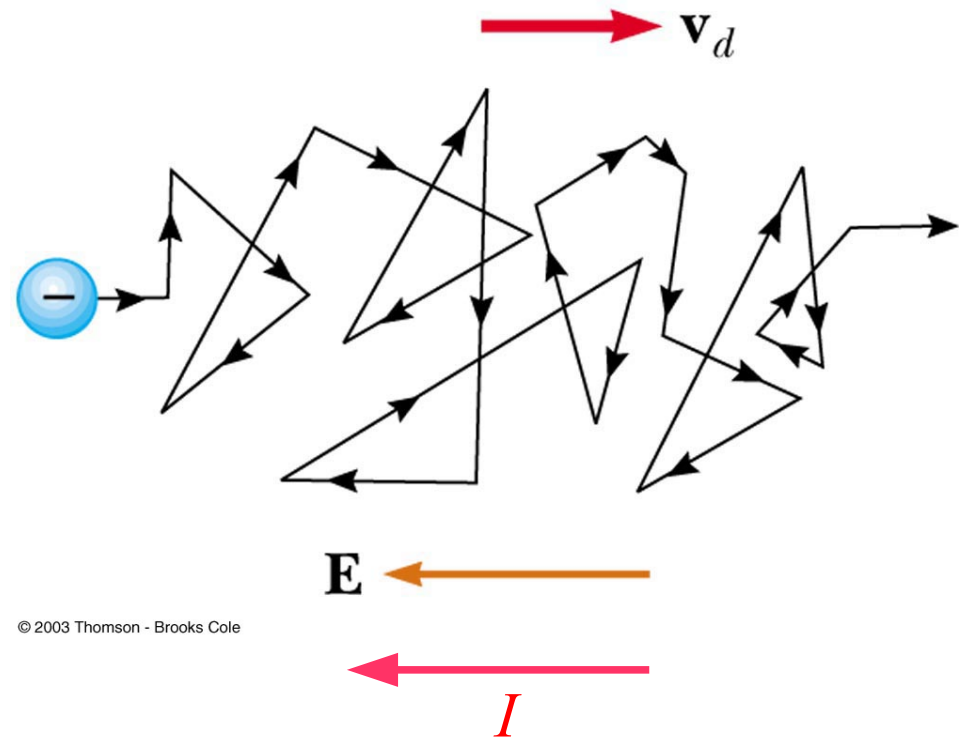
Ruch elektronów w przewodniku pod wpływem pola el.

Prędkość dryfu elektronów jest stosunkowo niewielka, rzędu 10^{-4} m/s

Jednakże w przewodniku pole elektryczne działa na wszystkie elektrony – rozprzestrzenia się w przewodniku z prędkością światła

To nie elektrony poruszają się z prędkością światła ale pole elektryczne rozchodzi się z prędkością światła !

Jeśli podłączamy przewodnik do baterii to bateria dostarcza “siły” aby ładunki elektryczne poruszyć.



© 2003 Thomson - Brooks Cole

Gęstość prądu elektrycznego i przewodność elektryczna

Wielkością związaną z natężeniem prądu jest ***gęstość prądu elektrycznego J***

$$J = I / A = nq v_d$$

$$\vec{J} = nq \vec{v}_d$$

(A – powierzchnia przez którą przepływa prąd
 v_d prędkość dryfu ładunków)

jednostka [A/m²]

Określamy ją wtedy gdy chcemy określić przepływ ładunku lokalnie przez określoną powierzchnię.

Uwaga: wielkość J jest wektorem! Jego kierunek wyznacza kierunek ruchu nośników ładunku (ładunków dodatnich)

Gęstość prądu elektrycznego i przewodność elektryczna

Jeśli przez przewodnik przechodzi pole elektryczne $\vec{E}$ to w danym punkcie tego przewodnika przepływa prąd o gęstości prądu elektrycznego $\vec{J}$:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

przewodność elektryczna
jednostka [1/(Ω m)]

Weźmy jeszcze raz pod uwagę wyrażenie

$$J = n q v_d$$

Definicja: stosunek prędkości dryfowej do natężenia pola elektrycznego nazywamy **ruchliwością nośników ładunku**

$$\mu = \frac{v_d}{E}$$

$$J = n q \mu E$$

Zatem przewodność elektryczna określana jest przez zależność:

$$\sigma = n q \mu$$

Prawo Ohma

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- Ta zależność jest tzw. **Prawem Ohma**:
Dla wielu materiałów gęstość prądu rośnie proporcjonalnie do przyłożonego natężenia pola elektrycznego (stała proporcjonalności to przewodność σ)
- Materiały w których obowiązuje prawo Ohma nazywane są “omowymi”.
- Prawo Ohma jest prawem doświadczalnym (tylko!) dla pewnej grupy materiałów (nie wszystkich).
- Definicja:

oporność elektryczna właściwa

jednostka [$\Omega \cdot m$)]

$$\rho = 1 / \sigma$$

oporność elektryczna R

przewodnika o długości Δx i przekroju poprzecznym A

jednostka [Ω]

$$R = \rho \frac{\Delta x}{A}$$

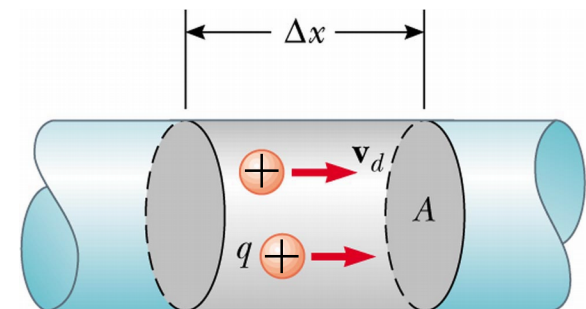


Table 27.1**Resistivities and Temperature Coefficients of Resistivity
for Various Materials**

Material	Resistivity ^a ($\Omega \cdot \text{m}$)	Temperature Coefficient ^b $\alpha[(^{\circ}\text{C})^{-1}]$
Silver	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Copper	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Gold	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminum	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsten	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Iron	10×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Platinum	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Lead	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nichrome ^c	1.50×10^{-6}	0.4×10^{-3}
Carbon	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanium	0.46	-48×10^{-3}
Silicon	640	-75×10^{-3}
Glass	10^{10} to 10^{14}	
Hard rubber	$\sim 10^{13}$	
Sulfur	10^{15}	
Quartz (fused)	75×10^{16}	

^a All values at 20°C.

^b See Section 27.4.

^c A nickel–chromium alloy commonly used in heating elements.

Prawo Ohma

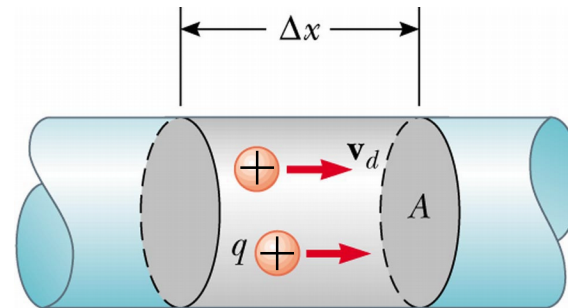
Jeśli na długości Δx przewodnika obserwujemy spadek napięcia ΔV gdy przez przewodnik płynie prąd I wówczas Prawo Ohma przyjmuje bardziej znaną postać:

$$J = \sigma E$$

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta x}{\sigma A} = R$$

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$



A – powierzchnia przez którą przepływa prąd

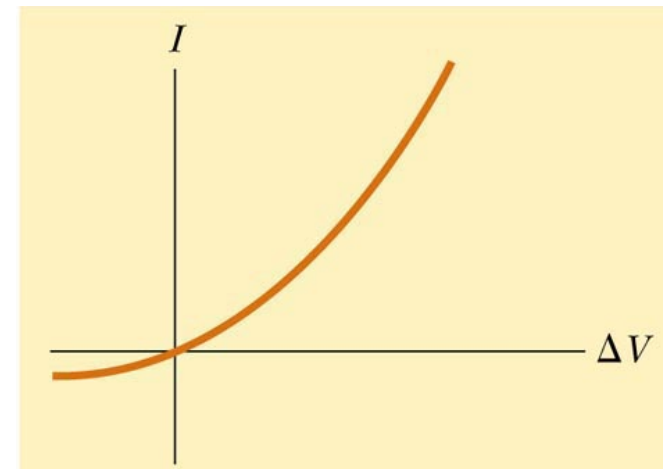
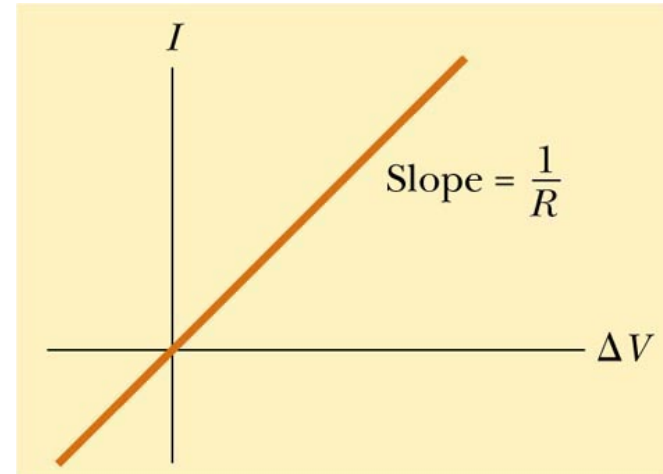
Δx – długość elementu przewodnika

ΔV – spadek napięcia obserwowany na długości Δx

I – natężenie prądu w przewodniku

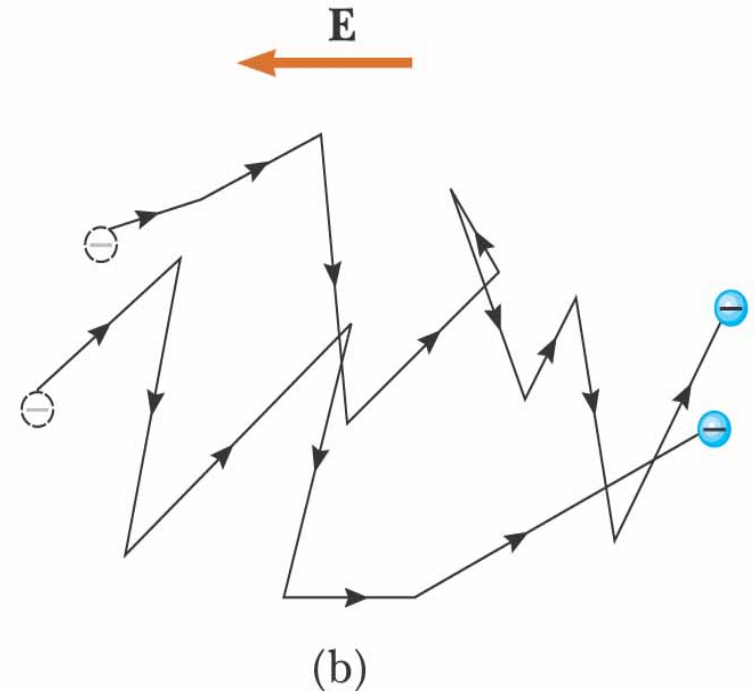
Prawo Ohma

- Materiały w których obowiązuje prawo Ohma tzn obserwowany jest proporcjonalny wzrost wartości przepływającego prądu przy wzrastającej różnicy potencjału, nazywane są “omowymi”.
- Przykładem w którym nie obowiązuje prawo Ohma (tzn. zależność między prądem przepływającym a różnicą potencjału nie jest liniowa) jest element elektroniczny zwany diodą



Klasyczny model przewodnictwa w metalach – model swobodnych elektronów

- Elektrony przewodnictwa dla metalu tworzą tzw. “gaz elektronowy”
- Elektrony poruszają się chaotycznie (ruchy termiczne), ulegają zderzeniom z atomami sieci krystalicznej
- Zewnętrzne pole elektryczne E modyfikuje chaotyczny ruch elektronów powodując ich stopniowe przemieszczanie się z prędkością dryfową v_d
- Pole elektryczne przyspiesza elektrony, ale gdy nastąpi zderzenie część energii elektronu przekazywana jest sieci krystalicznej, na skutek tego temperatura przewodnika wzrasta (drgania sieci krystalicznej rosną, od nich zależy temperatura przewodnika)
- Elektron doznaje przyspieszenia:



©2004 Thomson - Brooks/Cole

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$$

Klasyczny model przewodnictwa w metalach

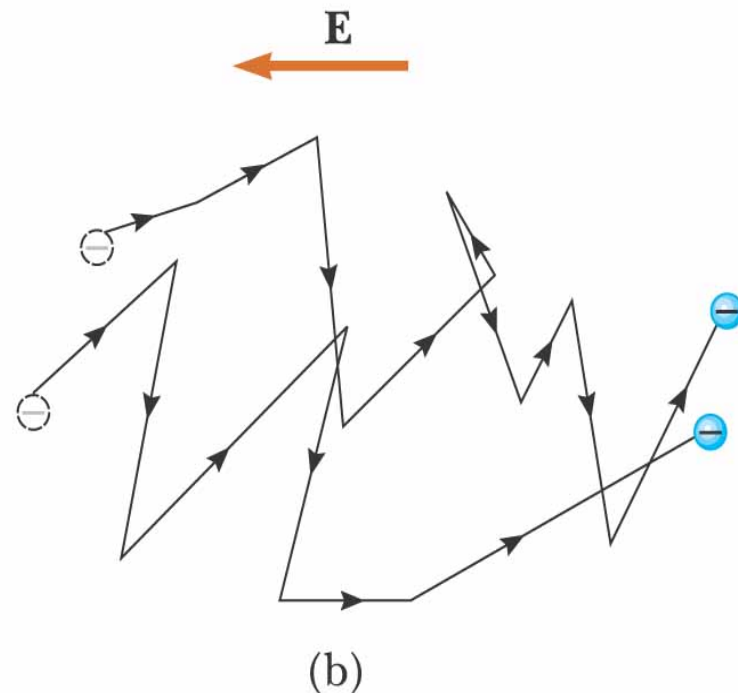
- Po zderzeniu elektron traci prędkość dryfową, odzyskuje ją gdy jest przyspieszany ponownie przez pole el.
- Średni czas między zderzeniami elektronu z atomami sieci wynosi τ
- Średnio po czasie τ elektron odzyskuje prędkość dryfową v_d

$$v_d = \tau a = \frac{eE\tau}{m_e}$$

uwzględniając : $\vec{J} = ne\vec{v}_d$

otrzymujemy : $v_d = \frac{J}{ne} = \frac{eE\tau}{m_e}$

$$E = \left(\frac{m_e}{e^2 n \tau} \right) J \quad \text{albo} \quad J = \left(\frac{e^2 n \tau}{m_e} \right) E$$



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Klasyczny model przewodnictwa w metalach

Porównując

$$J = \left(\frac{e^2 n \tau}{m_e} \right) E$$

z wyrażeniem

$$J = \sigma E$$

otrzymujemy

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_e}$$

lub

$$\rho = \frac{m_e}{e^2 n \tau}$$

przewodność

oporność właściwa

- Wielkości e , n , m_e , τ nie zależą od pola E
- Parametr τ zależy od temperatury – w klasycznej teorii gazów jest proporcjonalny do $1/\sqrt{T}$
- Doświadczalnie σ jest proporcjonalne do odwrotności temperatury $1/T$
- Tą nieścisłość wyjaśnia dopiero mechanika kwantowa, zatem klasyczny model gazu doskonałego jest niewystarczający

$$\longrightarrow \sigma \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$$

$$\longrightarrow \sigma \sim \frac{1}{T}$$

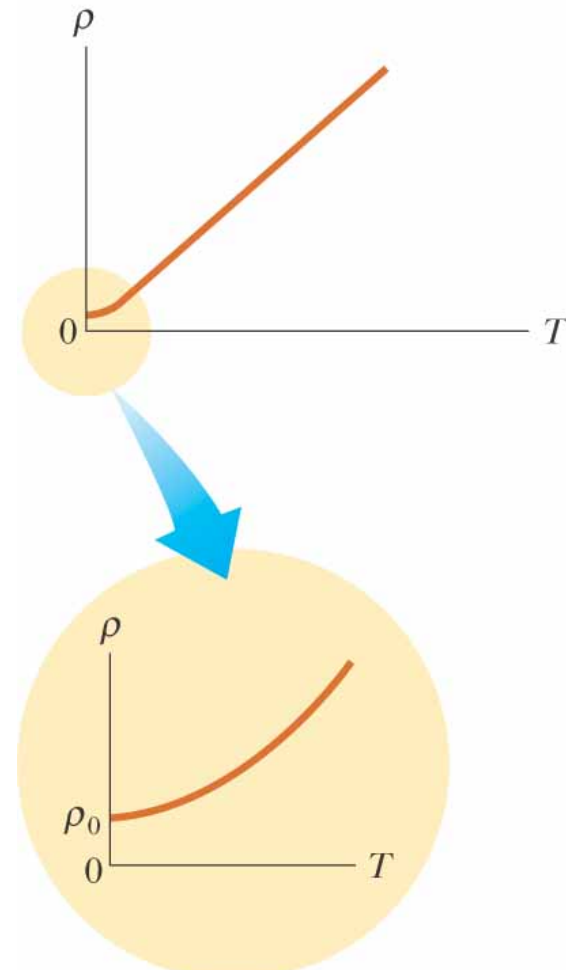
Zależność przewodności metali od temperatury

- Oporność właściwa (przewodność) różnych materiałów zmienia się wraz z temperaturą
- W ograniczonym zakresie temperatur dla metali zależność ta jest liniowa :

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0)$$

T_0 ← temperatura odniesienia (np. 20°C)
 ρ_0 ← oporność w temperaturze odniesienia
 α ← temperaturowy współczynnik charakterystyczny dla materiału przewodzącego

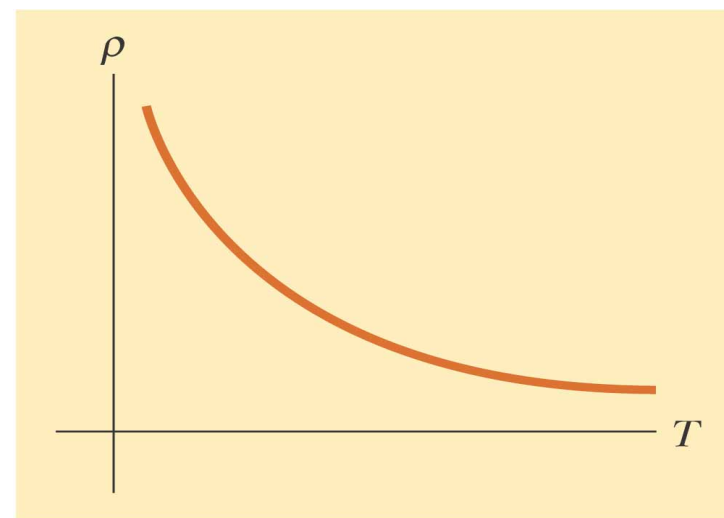
- Dla niskich temperatur liniowość nie jest zachowana
- Dla wysokich temperatur wzrost oporności w funkcji temperatury spowodowany jest wzrostem drgań sieci krystalicznej – prawdopodobieństwo kolizji elektron – sieć zwiększa się



©2004 Thomson - Brooks/Cole

Zależność przewodności „półprzewodników” od temperatury

- Oporność właściwa niektórych materiałów zwanych półprzewodnikami maleje wraz z temperaturą – czyli ich przewodność rośnie - (inaczej niż w metalach!)
 - półprzewodniki nie są tak dobrymi przewodnikami jak metale, ale nie są też izolatorami
 - mogą przewodzić ładunek ujemny (elektrony – typ „n”) lub ładunek dodatni („dziury” elektronowe – typ „p”)
- Dzieje się tak dlatego iż mamy tutaj inny mechanizm przewodzenia ładunku:
 - wraz z temperaturą **rośnie ilość** poruszających się ładunków (rośnie bardziej niż maleje ruchliwość nośników tak jak w metalach)



©2004 Thomson - Brooks/Cole

$$\sigma = n q \mu$$

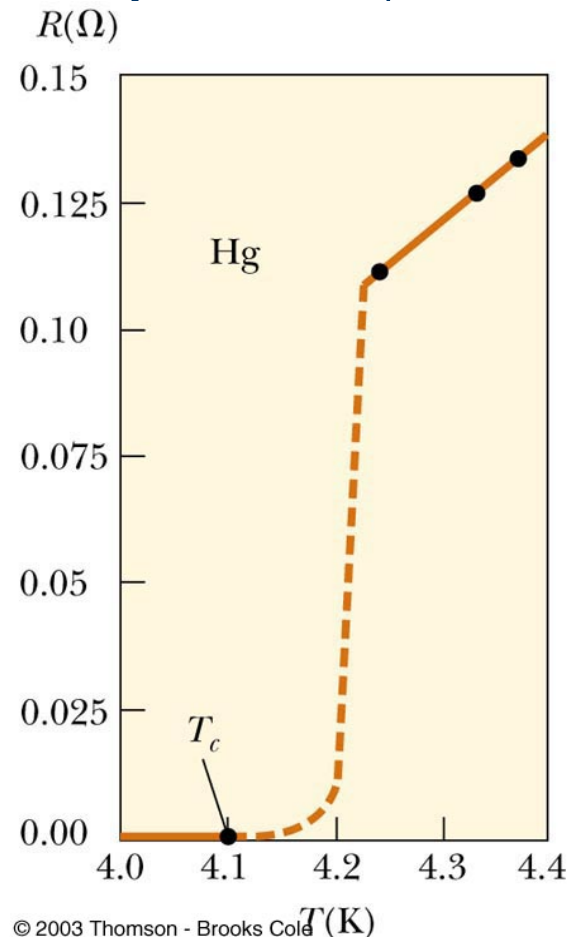
n ← koncentracja nośników
 q ← ładunek nośników
 μ ← ruchliwość nośników

Zależność przewodności „nadprzewodników” od temperatury

- Pewna klasa materiałów wykazuje prawie zerową oporność ($R=0$) poniżej pewnej temperatury zwanej temperaturą krytyczną T_c
- Większość przewodników wykazuje nadprzewodnictwo dopiero w temperaturze bliskiej zera absolutnego, T_c jest stosunkowo niska (kilka Kelwinów)

Metal	T_c [K]	T_c [°C]
Al	1,2	-271,95
In	3,4	-269,75
Sn	3,7	-269,45
Hg	4,2	-268,95
Ta	4,5	-268,65
V	5,4	-267,75
Pb	7,2	-265,95
Nb	9,3	-263,85

- Ostatnio odkryto związki chemiczne które mogą być „nadprzewodnikami” w wyższych temperaturach. Takie właściwości wykazują materiały tlenkowe o charakterze ceramiki i będące nadprzewodnikami II rodzaju. Na razie nie ma uniwersalnej teorii wyjaśniającej to zjawisko. Najwyższa temperatura krytyczna wynosi obecnie **138 K** (-135,15°C) dla związku $(\text{Hg}_{0,8}\text{Ti}_{0,2})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$.



© 2003 Thomson - Brooks Cole

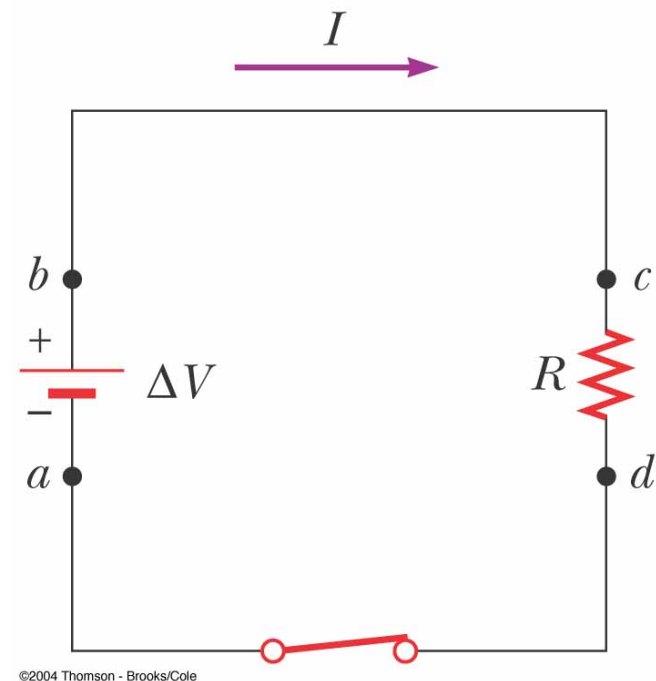
- W takich materiałach kiedy nastąpi przepływ prądu może on płynąć nawet bez przyłożonego napięcia przez długi czas!

Moc – ciepło wydzielane przez opornik

- Ładunek porusza się od punktu **a** do **b**, energia potencjalna układu zwiększa się o $Q\Delta V$
 - w tym czasie maleje energia chemiczna ogniwa
- Kiedy ładunek przechodzi przez opornik (od **c** do **d**) wówczas system traci część swojej energii na zderzenia elektronów z atomami opornika
 - wzrasta temperatura opornika (wydziela się na nim ciepło)
- Moc jaka wydziela się na oporniku jest to energia wydzielana w postaci ciepła w jednostce czasu.**
- Def:
- Korzystając z prawa Ohma

$$P = I \Delta V$$

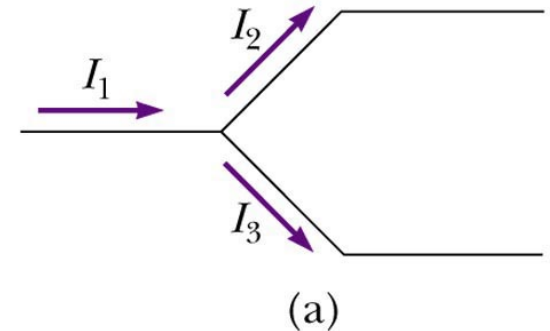
$$P = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{R}$$



Prawa Kirchhoffa

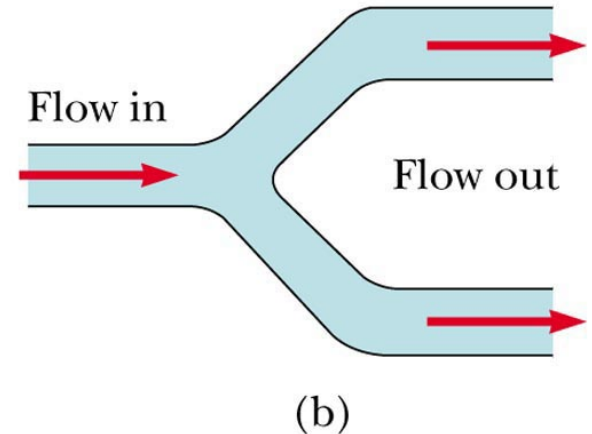
I prawo Kirchhoffa

- W dowolnym węźle algebraiczna suma prądów musi być równa zero
- (ma związek z zasadą zachowania ładunku)



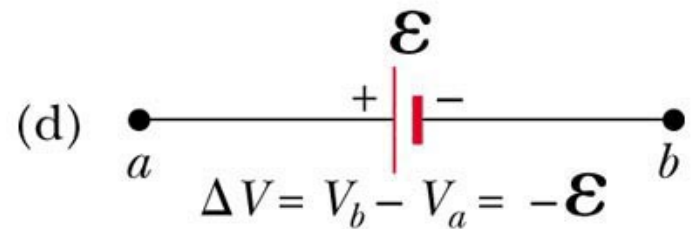
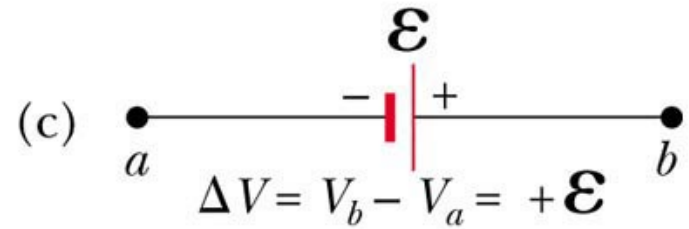
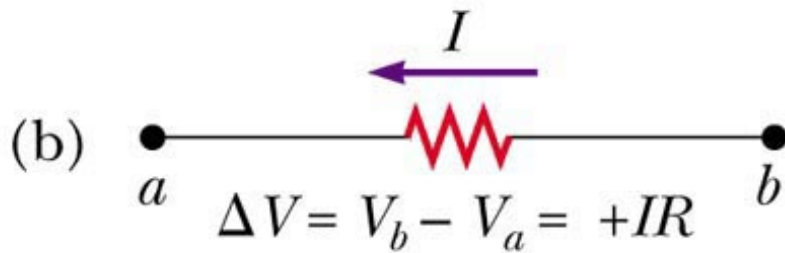
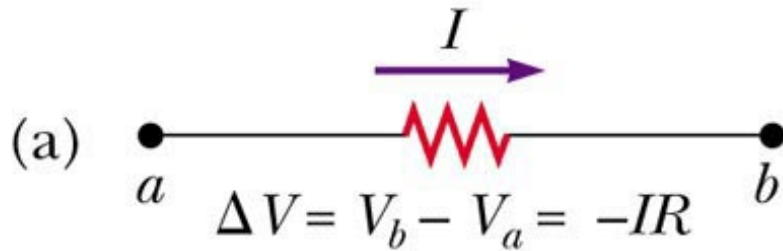
II prawo Kirchhoffa

- Algebraiczna suma zmian potencjału napotkanych przy całkowitym obiegu obwodu musi być równa zero
- (ma związek z zasadą zachowania energii)

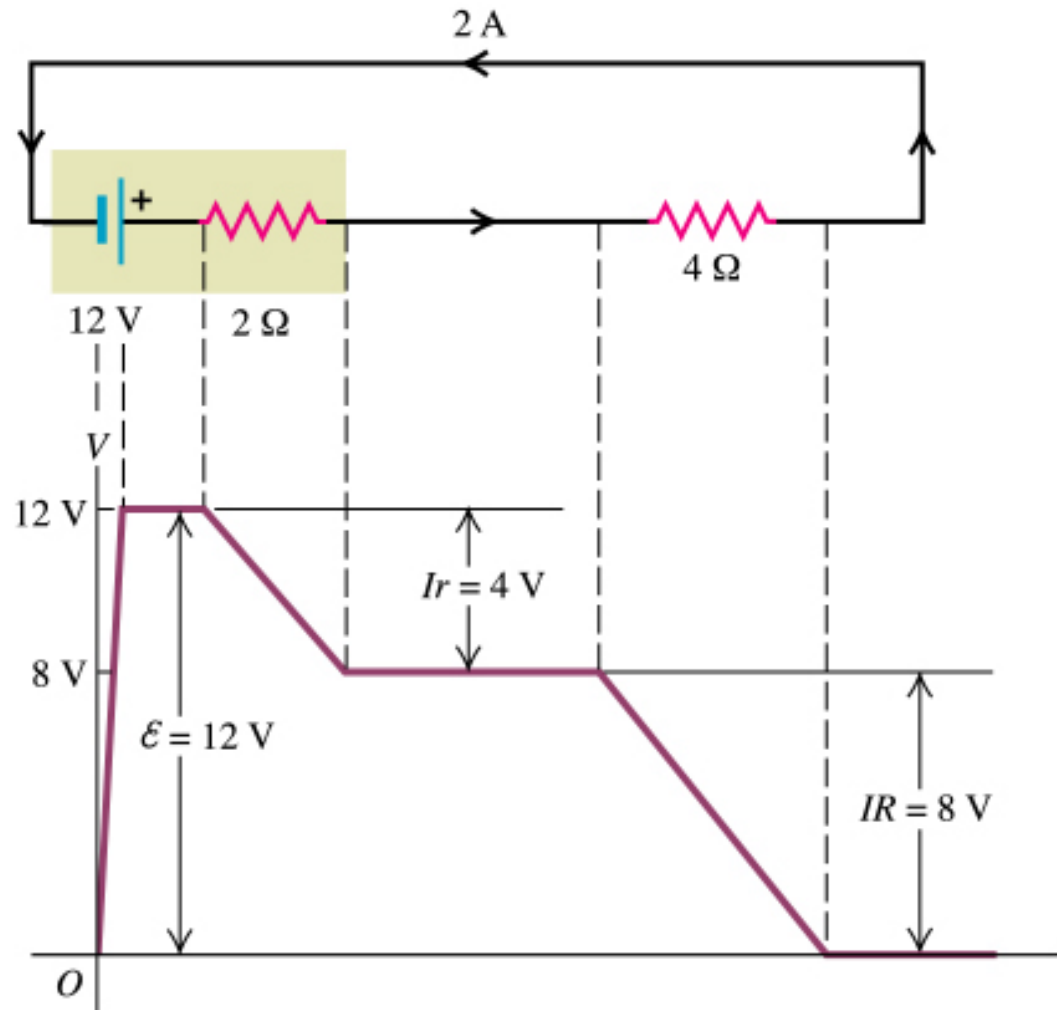


© 2003 Thomson - Brooks Cole

Spadek napięcia na oporniku i ogniwie



Prosty obwód – spadki napięć w obwodzie



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.