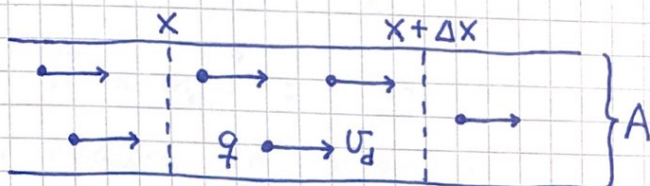


Elektrisk strøm [OS2 9,10 ; YF 25,26 ; LHL 21,22] (89)

Strøm. Strømtetthet [OS2 9.1-9.2 ; YF 25.1 ; LHL 21.1]

Leder, n frie ladninger q pr volumenhet med midlere driftshastighet v_d langs ledaren :



strøm $\stackrel{\text{def}}{=} \text{ladning gjennom tverrsnitt av leder pr tidsenhet}$

$$\Rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow Q} \frac{dQ}{dt} \quad [I] = \frac{C}{s} = A \text{ (ampere)}$$

På tida $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_d}$ passerer all fri ladning $q \cdot n \cdot A \cdot \Delta x$ i volumet $A \cdot \Delta x$ ved $x + \Delta x$

$$\Rightarrow I = \frac{q n A \Delta x}{\Delta x / v_d} = n q v_d A$$

strømtetthet $\stackrel{\text{def}}{=} \text{strøm pr flateenhet}$

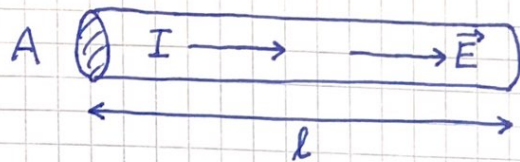
$$\Rightarrow j = I/A = n q v_d ; \quad \vec{j} = n q \vec{v}_d \quad [j] = A/m^2$$

$$\text{Metaller : } q = -e \Rightarrow \vec{j} = -n e \vec{v}_d$$



Ohms lov [OS2 9.2-9.4 ; YF 25.2, 25.6 ; LHL 21.2, 21.4] (90)

Spenning V over leder med lengde l :



$$V = E \cdot l$$

$$j = I/A$$

N2 : $\vec{F} = m_e \vec{a}$; pga kollisjoner blir $\vec{v}_d = \vec{a} \cdot \tau$, der τ er midlere tid mellom kollisjoner. Med $\vec{F} = -e\vec{E}$ og $\vec{j} = -ne\vec{v}_d$ får vi Ohms lov på mikroskopisk form

$$\boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

$$\sigma = ne^2\tau/m_e$$

= materialets konduktivitet
(elektrisk ledningsevne)

(Paul Drude, ca 1900)

Med $j = I/A$ og $E = V/l$:

$$\boxed{V = R \cdot I ; R = \frac{l}{\sigma A} = \text{motstand}}$$

Ohms lov

Resistivitet : $\rho = \sigma^{-1} \Rightarrow \vec{j} = \vec{E}/\rho$

Konduktans : $G = R^{-1} \Rightarrow I = G \cdot V ; G = \frac{\sigma \cdot A}{l}$

Enheter: $[R] = V/A = \Omega$ (ohm) ; $[G] = \Omega^{-1} = S$ (siemens)

$$[\rho] = \Omega \cdot m ; [\sigma] = \Omega^{-1} \cdot m^{-1} = S/m$$

Merk : σ og ρ er materialegenskaper.

G og R avhenger også av lengde og tverrsnitt.

Kretssymbol :



(eller)

Eks: Estimer elektronfart v_T , veilengde d og tid τ mellom kollisjoner, og driftshastighet v_d i en kobberledning der strømstyrken er 1 A.

Løsning:

$$K_e = \frac{1}{2} m_e v_T^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (\text{fra kinetisk gasteori og ideell gasslov, } p \cdot V = N k_B T)$$

$$\Rightarrow v_T = \sqrt{3 k_B T / m_e} \approx 10^5 \text{ m/s}$$

$$(T = 300 \text{ K, } k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K, } m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$$

Midlere fri veilengde ("mean free path"): $d \approx 1 \text{ nm}$

$$\Rightarrow \text{Midlere tid mellom kollisjoner: } \tau = \frac{d}{v_T} \approx 10^{-14} \text{ s}$$

Med 1 fritt elektron pr Cu-atom, molar masse 63 g og massetetthet ca 9 g/cm^3 :

$$n \approx \frac{9 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3}{63 \text{ g/mol}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \approx 10^{29} \text{ frie elektroner pr m}^3$$

Gir Drude-konduktivit $\sigma = n e^2 \tau / m_e \approx 3 \cdot 10^7 \text{ S/m}$

(Eksperimentell verdi ved 20°C : ca $6 \cdot 10^7 \text{ S/m}$)

Driftshastighet med $I = 1 \text{ A}$ og $A = 2.5 \text{ mm}^2$:

$$v_d = \frac{j}{n \cdot e} = \frac{I}{n \cdot e \cdot A} = \frac{1}{10^{29} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx \frac{1}{4} \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Hvis ledningen er f.eks. 90 cm lang, tar det ca 10 timer for et elektron å komme seg gjennom hele ledningen.

Resistivitet og temperatur [OS2 9.3; YF 25.2; LHL 21.2, 21.5] ⁽⁹²⁾

Drudemodellen: $\sigma = \frac{m_e}{e^2 n \tau} \sim \frac{1}{n \cdot \tau}$

Metaller (Cu, Al, Ag...): Stor n lite avhengig av T .

Kortere tid τ mellom kollisjoner når T øker; $\Rightarrow \sigma$ øker.

Ekspenimenter gir lineær $\sigma(T) = \sigma_0 \{1 + \alpha \cdot (T - T_0)\}$
med $\alpha \approx 0.004 \text{ K}^{-1}$ for Cu, Al, Ag. Referanseverdi σ_0
ved f.eks. $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$.

Halvledere (Si, Ge, GaAs, GaN, ...): Isolator med $n \approx 0$

ved $T \approx 0$. Økt $T \Rightarrow$ elektroner frigjøres $\Rightarrow n$ øker

$\Rightarrow \sigma$ øker med økende T . Også forurensningsatomer
(såkalt doping) gir økt n og redusert ρ .

Anvendelser av halvledere:

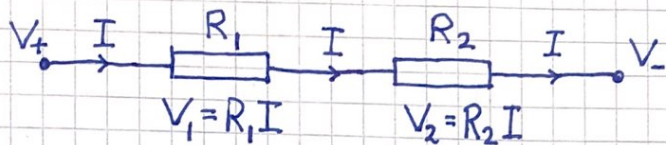
Solceller: Fotoner fra sola frigjør elektroner i halvlederen
 \Rightarrow strøm og spenning

Lysdioder (LED): Frie elektroner i halvlederen fanges i
tilstander med lavere energi ("hull"). Frigjort energi
sendes ut som fotoner.

Eks: Kombinasjon av AlGaAs ($\lambda = 560 - 870 \text{ nm}$;
gult-rødt lys) og InGaN ($\lambda = 360 - 620 \text{ nm}$;
blått-gult lys) gir LED-pærer med hvitt lys.
(Akasaki, Amano, Nakamura, nobelpris fysikk 2014)

Kobling av flere motstander [OS2 10.2; YF 26.1; LHL 21.3] (93)

Seniekobling:

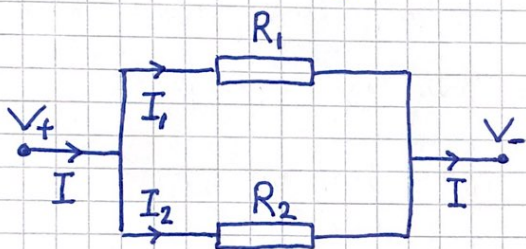


Samme strøm I gjennom R_1 og R_2

$$\text{Total spenning: } V = V_+ - V_- = V_1 + V_2 = (R_1 + R_2) I$$

$$\Rightarrow \underline{R = \frac{V}{I} = R_1 + R_2}$$

Parallellkobling:



$$\text{Total strøm: } I = I_1 + I_2$$

$$\text{Samme spenning over } R_1 \text{ og } R_2: V = R_1 I_1 = R_2 I_2$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) V$$

$$\Rightarrow \underline{\frac{1}{R} = \frac{I}{V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$N \text{ stk. i serie: } \boxed{R = \sum_{j=1}^N R_j}$$

$$i \text{ parallell: } \boxed{R^{-1} = \sum_{j=1}^N R_j^{-1}}$$