

R2 ELEKTRICKÝ PROUD

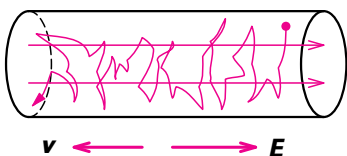
R2.1 Model vedení elektrického proudu v kovovém vodiči

Vedení elektrického proudu v kovových vodičích umožňují elektrony, které jsou v atomech kovu vázány jen slabými silami (valenční elektrony). V krystalu kovu jsou prakticky volné a chaoticky se pohybují mezi kladnými ionty krystalové mřížky. Tento stav vodivostních elektronů se označuje také jako **elektronový plyn** a chaotický pohyb elektronů můžeme přirovnat k tepelnému pohybu molekul plynu. Celkový počet těchto **vodivostních elektronů** je srovnatelný s počtem atomů ve vodiči. Například v mědi, kde na jeden atom připadá přibližně jeden vodivostní elektron, je hustota N_V atomů, tzn. jejich počet v 1 m^3 mědi

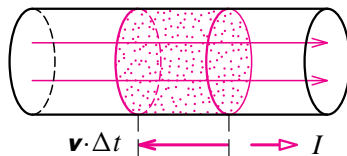
$$N_V = \frac{\rho_{\text{Cu}}}{A_r m_u} = \frac{8930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{63,5 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}.$$

Střední rychlost chaotického pohybu vodivostních elektronů je značná (řádově $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a prakticky nezávisí na teplotě.

Připojíme-li vodič ke svorkám stejnosměrného zdroje, vznikne v celém objemu vodiče elektrické pole. Jeho působením je záporně nabitý elektronový plyn unášen proti směru intenzity pole. Vedle chaotického pohybu vodivostních elektronů nastává jejich uspořádaný **unášivý pohyb**, který je podstatou elektrického proudu v kovu (obr. R2-1). Nepravdivosti krystalové mřížky kovu brzdí uspořádaný pohyb elektronů a projevují se navenek jako odpor vodiče.



R2-1 Pohyb vodivostního elektronu v elektrickém poli uvnitř vodiče



R2-2 Elektrický proud jako uspořádaný pohyb elektronového plynu

Jestliže hustota vodivostních elektronů je N_V a rychlost jejich unášivého pohybu má velikost v (obr. R2-2), projde průřezem vodiče S za dobu Δt náboj

$$\Delta Q = S v \Delta t N_V e$$

a příslušný elektrický proud je

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = S v N_{Ve}.$$

Rychlost uspořádaného pohybu elektronového plynu (*unášivá rychlost*) je na rozdíl od rychlosti tepelného pohybu elektronů velmi malá. Například pro měděný vodič při proudové hustotě

$$\frac{I}{S} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2},$$

která je v technické praxi běžná (odpovídá přibližně proudu 2 A v měděném drátu o průměru 1 mm), dostáváme

$$\begin{aligned} v &= \frac{I}{S N_{Ve}} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = \\ &= 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 0,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}. \end{aligned}$$

Elektrický odpor kovových vodičů je důsledkem srážek elektronů s ionty krystalové mřížky, které mají mnohem větší hmotnosti. Při srážkách se elektrony od iontů pružně odrážejí a předávají jim současně část své energie. U čistých kovů za obvyklých teplot (přibližně 300 K) tento děj ovlivňují tepelné kmity iontů mřížky. S rostoucí teplotou se amplituda kmitů zvětšuje a srážky iontů s elektrony jsou častější – odpor vodiče roste a unášivá rychlost se zmenšuje. Teplotní součinitel odporu má u čistých kovů hodnotu okolo $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Ve slitinách kovů se mnohem více uplatňují trvalé nepravidelnosti mřížky. Rezistivita slitin je proto větší než u čistých kovů, ze kterých je slitina vytvořena. Teplotní součinitel odporu těchto slitin je naopak malý (viz např. konstantan, tab. 2-2, čl. 2.3).

Supravodivost

Zkoumání elektrických vlastností kovů při termodynamických teplotách blízkých 0 K vedlo k objevu supravodivosti – jednoho z nejprekvapivějších jevů ve fyzice pevných látek. Holandský fyzik HEIKE KAMERLINGH-ONNES (1853–1926) v roce 1908 zkapalnil helium, jehož teplota varu je 4,2 K. Při experimentech s kapalným heliem r. 1911 zjistil, že odpor rtuti ochlazené pod kritickou teplotu 4,15 K klesá náhle na neměřitelnou hodnotu. U olova nastává supravodivý stav už při poklesu teploty pod 7,2 K. U mědi, železa a stříbra se supravodivost nezjistila.

U supravodičů se vodivostní elektrony spojují do párů a pohybují se bez

jakýchkoliv srážek s krystalovou mříží. Elektrický proud vyvolaný v prstenci ze supravodiče by se udržel bez pozorovatelného útlumu po dobu několika let.

V supravodivých kabelech ze slitin NbTi nebo Nb₃Sn chlazených kapalným heliem je možno dosáhnout proudové hustoty větší než $10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Toho se využívá ve speciálních elektromagnetech k získání velmi silných magnetických polí, například pro potřeby výzkumu elementárních částic. Intenzivně se studují možnosti využití supravodičů při výrobě a přenosu elektrické energie, ale i v mikroelektronice.

Převrat v oblasti supravodivých materiálů nastal v roce 1987, kdy byla objevena keramická sloučenina, u níž supravodivý stav vzniká již při teplotě kolem 90 K. To znamená, že k získání supravodivosti látky není třeba používat nákladné zařízení s kapalným heliem, ale lze použít snadno dostupný kapalný dusík s kritickou teplotou 77 K. Tím se otevřely další možnosti využití supravodivosti v technické praxi. Např. byly zkonstruovány supravodivé elektromagnety s tak silným magnetickým polem, že se v něm v malé vzdálenosti nad magnety vznášejí a pohybuje bez tření velkou rychlostí speciální vlak. Např. letiště v Šanghaji spojuje s centrem města vlak Maglev, jehož název vznikl spojením slov *magnetická levitace* (obr. R2-3). Vlak může dosáhnout rychlost přesahující $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



R2-3 Japonský vlak Maglev vznášející se v magnetickém poli supravodivých magnetů

Úlohy

- 1** Jak závisí rychlost uspořádaného pohybu elektronů při určitém proudu na průřezu vodiče? Porovnejte elektrický proud v kovovém vodiči s pohybem kapaliny v potrubí.
- 2** Vysvětlete, proč se žárovka připojená ke zdroji vodiči dlouhými několik metrů rozsvítí okamžitě po uzavření obvodu, když rychlost uspořádaného pohybu elektronů je menší než $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

- 3** Na internetu najdete informace o možnostech praktického využití supra-vodivosti.

R2.2 Zdroje elektrického napětí

Druhy zdrojů elektrického napětí

Zdroje elektrického napětí se liší podle toho, jaká energie se v nich přeměňuje na energii elektrickou:

a) **Elektrochemický článek**, označovaný také jako galvanický článek, je založen na využití energie uvolněné při chemické reakci kovových elektrod s vodivou kapalinou – elektrolytem (viz čl. 4.3). Tento typ zdroje napětí je v podobě tzv. monočlánků, popř. baterií široce využíván zejména k napájení přenosných elektronických zařízení.

b) **Fotoelektrický zdroj napětí** využívá přeměnu energie světla ve speciální polovodičové součástce – *fotočlátku*. Fotočlánky jsou základními prvky tzv. *fotovoltaických* nebo *solárních panelů*, které jsou významnými alternativními zdroji elektrické energie (obr. R2-4).



R2-4 Solární panely

c) **Termoelektrický zdroj napětí** využívá *termoelektrický jev*. Spojíme-li dva různé kovové vodiče, přejde část elektronů z jednoho kovu do druhého a na spoji obou kovů vznikne malé kontaktní napětí, jehož velikost závisí na teplotě spoje. Takovou dvojici vhodně zvolených kovů nazýváme *termočlánek*. Na obr. R2-5 je zobrazena demonstrace vzniku elektrického napětí v termočlátku tvořeném dvojicí kovů měď a konstantan (slitina mědi a niklu). Spoj termočlátku zahřejeme plamenem a vzniklé napětí měříme voltmetrem připojeným