6. ZÁVISLOST ODPORU VODIČŮ A POLOVODIČŮ NA TEPLOTĚ

Měřicí potřeby

1) elektromagnetická míchačka
2) RLC měřič E317
3) digitální teploměr
4) vodič v olejové lázni
5) polovodič v olejové lázni

Obecná část

Důležitou charakteristikou pevných látek je konduktivita γ (dříve nazývaná měrná elektrická vodivost), která je definována Ohmovým zákonem v diferenciálním tvaru: $\boldsymbol{j} = \gamma \boldsymbol{E}$ (u anizotropních látek je popsána tenzorem II. řádu). Podle její velikosti lze látky zhruba dělit do tří skupin:

$$\textit{nevodiče} \; < \; 10^{-8}\,(\Omega m)^{-1} \; < \; \textit{polovodiče} \; < \; 10^{6}\,(\Omega m)^{-1} \; < \; \textit{vodiče}$$

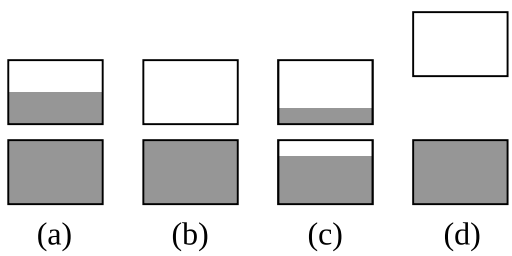
(Uvedené hranice jsou pouze orientační, neboť především u polovodičů závisí konduktivita na teplotě, osvětlení, množství příměsí a dalších faktorech.)

Přímá úměrnost mezi proudovou hustotou $\boldsymbol{j}$ a intenzitou elektrického pole $\boldsymbol{E}$ je důsledkem srážek elektronů s kmitajícími atomy krystalové mříže (fonony) nebo s poruchami (příměsi, dislokace, plošné poruchy). Tyto srážky lze popsat **relaxační dobou** τ, která udává, jak rychle se systém narušený vnějším polem vrací do rovnováhy. V případě srážek elektronů s fonony je relaxační doba totožná se střední dobou mezi dvěma srážkami. Pro konduktivitu lze odvodit [1] vztah:

$$\gamma = \frac{e^2.n.\tau}{m^*} = e.n.\mu_n \quad , \tag{1}$$

kde e je elementární náboj, n je koncentrace elektronů, m^* je efektivní hmotnost elektronů a μ_n je jejich pohyblivost . (V případě polovodičů se zavádí pojem „díry“ a konduktivita je pak $\gamma = en\mu_n + ep\mu_p$, kde p je koncentrace děr a μ_p jejich pohyblivost .)

Obrovské rozdíly v hodnotách konduktivity kovů (vodiče) a polovodičů a rovněž její rozdílnou teplotní závislost vysvětluje kvantová teorie pevných látek existencí pásové struktury. Elektrony obsazují pásy dovolených energií, které jsou od sebe odděleny pásy zakázaných energií (tzv. zakázané pásy) .



Obr. 1 Schéma zaplnění energetických pásů elektrony v jednomocném kovu (a), ve vlastním polovodiči při $T = 0$ °C (b) a při $T \neq 0$ °C (c) a v nevodiči (d). Nevodič (izolátor) se od polovodiče liší jen šířkou zakázaného pásu $E_g > 3$ eV.

Vodiče (kovy)

V kovech je vodivostní pás zaplněn právě do poloviny (alkalické kovy, jednomocné kovy Cu, Ag, Au,..) nebo se dovolené pásy překrývají (dvojmocné kovy).

Teplotní závislost odporu (vodivosti) je **dána teplotní závislostí relaxační doby resp. pohyblivosti**. Se zvyšující se teplotou roste amplituda kmitů iontů a zvyšuje se tak pravděpodobnost srážek elektronů s ionty. Střední doba mezi dvěma srážkami (relaxační doba) klesá, a tedy klesá konduktivita kovu (roste rezistivita ρ). (Teorie [3] poskytuje pro teploty od pokojové výše vztah $1/\gamma = \rho \sim T$ a pro teploty nízké $\rho \sim T^5$.)

Závislost odporu kovů na teplotě lze v širokém teplotním oboru (s výjimkou nízkých teplot) dosti přesně popsat polynomem druhého stupně. Často dokonce postačí (pro nepříliš široké intervaly teplot) uvažovat pouze lineární závislost a odpor měřeného vzorku vyjádřit pomocí vztahu:

$$R = R_0.[1 + \alpha.(t - t_0)]\,, \tag{2}$$

kde R_0 je odpor při teplotě t_0 = 0 °C a α je teplotní součinitel odporu.

Polovodiče

U polovodičů se kromě teplotní závislosti pohyblivosti (jako u kovů) uplatňuje velmi výrazně **změna koncentrace nosičů náboje způsobená tepelnou aktivací**. U vlastních polovodičů elektrony přecházejí do vodivostního pásu z valenčního pásu za vzniku děr. Lze například ukázat [2], že u vlastních polovodičů platí pro koncentraci nosičů náboje:

$$n_i = p_i \sim T^{3/2} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{E_g}{2kT}}\,,$$

kde k je Boltzmannova konstanta a E_g je energie zakázaného pásu. Protože pohyblivost $\mu \sim T^{-3/2}$ (pro mřížový rozptyl) dostáváme dosazením do vztahu (1):

$$\gamma \sim \mathrm{e}^{-\frac{E_g}{2kT}} \tag{3}$$

Podobnou exponenciální závislost konduktivity dostaneme i pro příměsové polovodiče, jen aktivační energií je zde energie příměsové hladiny [2].

Termistory (**THERM**al res**ISTOR** = teplotně závislý rezistor) jsou polovodičové součástky, které využívají výrazné závislosti odporu na teplotě. Tuto závislost charakterizuje teplotní součinitel odporu, definovaný vztahem

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT}$$

Již v roce 1834 zjistil Faraday velký záporný teplotní součinitel odporu u sirníku stříbrného. Většina termistorů pracuje s **tepelným vybuzením nosičů proudu** (viz výše) a proto mají záporný teplotní součinitel. Takové termistory označujeme NTC (**N**egative **T**hermal **C**oefficient) na rozdíl od PTC (Positive TC), u kterých v určitém teplotním oboru má teplota vliv jen na pohyblivost nosičů a tedy odpor s teplotou roste podobně jako u kovů. Dále se budeme zabývat jen NTC termistory.

Jelikož se termistory nevyrábějí z monokrystalických materiálů, pro které platí výše uvedené vztahy, ale vyrábějí se spékáním různých kysličníků (Ni, Mn, Co, Fe, Ti, …), vyjadřuje se závislost odporu na teplotě obecnějším vztahem:

$$R = R_a \cdot \mathrm{e}^{-B(1/T_a - 1/T)} \tag{4}$$

kde R_a je odpor termistoru při absolutní teplotě T_a, a B je konstanta související s aktivační energií nosičů náboje a se složením a zpracováním použitého polovodičového materiálu. Zlogaritmujeme-li vztah (4), zjistíme, že se jedná o přímkovou závislost, kde veličina $1/T$ představuje nezávisle proměnnou a veličina $\ln R$ je závisle proměnná. Můžeme tedy vynést naměřené hodnoty jako závislost $\ln R$ na $1/T$ do grafu a pokud se měřený polovodič skutečně řídí vztahem (4), bude tato závislost přímková. Pak můžeme z parametrů proložené přímky snadno získat konstanty B a R_a (teplotu T_a volíme – obvykle 273,15 K). Derivováním vztahu (4) dostáváme pro teplotní součinitel odporu:

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \tag{5}$$

Měření a zpracování naměřených hodnot

Měřené vzorky v baňkách s olejem jsou vychlazeny v lednici v místnosti UC103. Vezměte si příslušnou baňku vždy těsně před měřením. **POZOR - zátky nejsou v baňkách upevněny!**

Sondu teploměru zasuňte do otvoru v zátce a vzorek připojte k RLC měřiči do zdířek „L“ a „H“. Zvolte nejmenší možný rozsah přístroje, abyste tak plně využili jeho citlivosti. (Je-li měřený odpor větší než použitý rozsah, bliká na displeji údaj „999“.)

Baňku postavte na míchačku a ihned zapněte míchání („STIRRING“). Páčka vpravo od vypínačů („REVOLUTIONS“) slouží k nastavení otáček míchadla. Dbejte na to, aby se míchadlo (kovová tyčka v baňce) otáčelo volně s dostatečnou rychlostí. Pokud jsou otáčky rotujícího magnetu pod plotnou příliš vysoké, nestačí míchadlo sledovat točivé magnetické pole a pohybuje se pomalu a trhaně. V tom případě je třeba míchání vypnout, snížit otáčky a opět zapnout. Topení („HEATING“) zpočátku nemusíte zapínat, vzorky se ohřívají samovolně. **Než zahájíte vlastní odečítání hodnot, ponechejte olej asi dvě minuty promíchávat, aby se teplotní poměry ustálily v celém objemu baňky.**

A. Vodič

Pro zápis naměřených hodnot použijte následující tabulku 1:

t_i [°C]	R_i [Ω]	t_{i+5} [°C]	R_{i+5} [Ω]	α_i [K^{-1}]	$\alpha_i - \overline{\alpha}$ [K^{-1}]	$(\alpha_i - \overline{\alpha})^2$ [K^{-2}]

Prvních pět dvojic naměřených hodnot se zapíše do prvních dvou sloupců, druhých pět dvojic do druhých dvou sloupců. Výpočet je založen na tzv. postupné metodě popsané v úvodní části skript v kapitole „Měřicí metody“.

Hodnoty α_i spočtete podle vztahu $\alpha_i = \dfrac{R_{i+5} - R_i}{R_i \cdot t_{i+5} - R_{i+5} \cdot t_i}$.

B. Polovodič (termistor)

Naměřené hodnoty odporu a teploty zapisujte do následující tabulky 2:

t [°C]	R [Ω]	T [K]	$1/T$ [K^{-1}]	ln$R$

Pracovní úkol

A. Vodič

1) Proměřte závislost odporu vodiče na teplotě tak, že změříte 10 hodnot odporu s teplotním krokem tři stupně.
2) Spočtěte průměrnou hodnotu teplotního součinitele odporu a jeho směrodatnou chybu (viz kapitola „Chyby měření“ v úvodní části skript). Výsledek zapište ve tvaru $\overline{\alpha} \pm \delta\alpha$ a správně zaokrouhlete (viz „Chyby měření“, odst. E).
3) Naměřenou závislost $R(t)$ znázorněte graficky a spočtěte rovnici této přímkové závislosti lineární regresí (viz „Chyby měření“, odst. D). Z koeficientů rovnice ($R = kt + q$) určete srovnáním s rovnicí (2) součinitel α a odpor R_0. **Obě hodnoty teplotního součinitele odporu porovnejte s tabulkovou hodnotou**.

B. Polovodič

1) Proměřte odpor termistoru v teplotním rozmezí 40 °C s teplotním krokem 2 °C. Sestrojte graf závislosti odporu na teplotě $R(t)$.
2) Dále sestrojte graf závislosti ln$R$ na $1/T$ a spočtěte lineární regresí rovnici této přímkové závislosti. Porovnáním se zlogaritmovaným vztahem (4) určete konstantu B a odpor termistoru R_a při teplotě 0 °C.
3) Podle vztahu (5) spočtěte pro teplotu 0 °C teplotní součinitel odporu α.

Literatura:

[1] Charles Kittel: Úvod do fyziky pevných látek, ACADEMIA, Praha 1985

[2] H. Frank, V.Šnejdar: Principy a vlastnosti polovodičových součástek, SNTL, Praha 1976

[3] R. Kužel, M. Saxlová, J. Šternberk: Úvod do fyziky kovů II, SNTL, Praha 1985