

## Úloha 16

### Voltampérová charakteristika vodiče a termistoru

#### Zadání

- 1) Změřte voltampérovou charakteristiku žárovky v rozsahu napětí 0 – 100mV . V tomto rozsahu sestrojte graf závislosti odporu žárovky na napětí.
- 2) Změřte voltampérovou charakteristiku žárovky v rozsahu napětí 0 – 24V a naměřené hodnoty vynesete do grafu.
- 3) Určete elektrický odpor a elektrický příkon žárovky při napětí 24V včetně nejistot.
- 4) Spočítejte teplotu a rozměry wolframového vlákna žárovky. Vypočtenou teplotu vlákna porovnejte s teplotou tání wolframu (3380°C).
- 5) Změřte voltampérovou charakteristiku termistoru v rozsahu proudu 0 – 260mA .

#### Teorie

##### Teplotní závislost elektrického odporu

Jednou z důležitých fyzikálních charakteristik látek je jejich elektrický odpor. Jeho velikost i teplotní závislost souvisí s elektronovou strukturou látky, která obecně dělí látky na izolanty, kovy a polovodiče. Nebudeme-li detailně rozebírat důvody odlišného chování těchto tří skupin látek, můžeme ve většině případů říci, že zatímco u kovů elektrický odpor s teplotou roste, elektrický odpor polovodičů naopak klesá (roste konduktivita). Protože uvedená závislost je pro danou látku vždy charakteristická, lze ji využít i pro technické účely, např. pro konstrukci přesných teploměrů. Zatímco kovové odporové teploměry se vyznačují vysokou stabilitou parametrů, zvláště, jsou-li zhotoveny z ušlechtilých kovů (Pt), polovodičové mají většinou stabilitu horší, avšak mají mnohem silnější závislost na teplotě a tím i vyšší rozlišovací schopnost. Polovodičové teploměry, nazývané také jinak **termistory**, mají většinou tvar malé kuličky (mnohdy menší než 1 mm) polovodičového materiálu, opatřené kovovými vývody tvořenými tenkými drátky. Takováto konstrukce má velmi malou vlastní tepelnou kapacitu a je proto vhodná např. pro měření rychlých teplotních změn.

Matematicky lze teplotní závislost elektrického odporu **kovů** popsat přibližně lineárním vztahem

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (1)$$

kde  $R$  je odpor za teploty  $T$ ,  $R_0$  odpor za teploty  $T_0$  a  $\alpha$  teplotní součinitel elektrického odporu daného kovu.

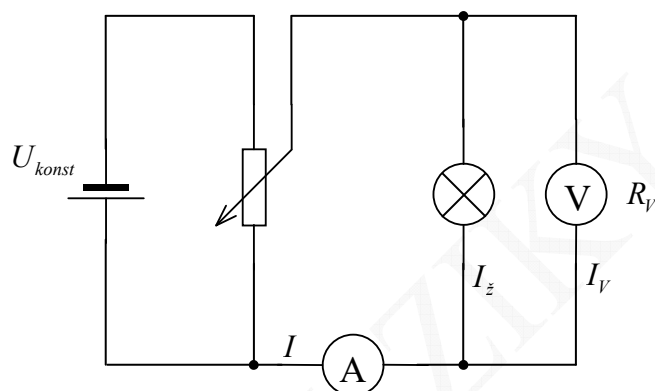
Závislost elektrického odporu **polovodičů** (případně i některých izolantů) na teplotě je dána složitějším vztahem, který lze popsat exponenciální funkcí

$$R = R_0 e^{-B \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (2)$$

kde teploty  $T$  a  $T_0$  jsou termodynamické teploty a veličinu  $B$  můžeme pro malý rozsah běžných teplot pokládat za konstantní.

Voltampérovou (V/A) charakteristikou nějakého elektrického prvku rozumíme závislost proudu, který prvkem protéká, na přiloženém napětí na tento prvek, použijeme-li zdroj konstantního napětí. Použijeme-li zdroj konstantního proudu, rozumíme V/A charakteristikou závislost napětí na daném prvku na proudu, který tímto prvkem protéká. Volba mezi použitím prvního nebo druhého způsobu měření je dána typem teplotní závislosti elektrického odporu měřeného prvku.

Směrnice V/A charakteristiky v každém bodě udává odpor měřeného prvku podle Ohmova zákona kromě bodu  $I = 0A$ . V takovémto bodě lze odpor určit pouze extrapolací. Závislost proudu tekoucího žárovkou na přiloženém napětí měříme v zapojení podle obr. 1 se zdrojem konstantního napětí.



Obr. 1 Zapojení pro měření V/A charakteristiky žárovky

V tomto zapojení měří voltmetr pouze napětí  $U$  na žárovce, avšak ampérmetr měří kromě proudu  $I_z$  protékajícího žárovkou i proud  $I_V$ , protékající voltmetrem. Proud  $I$ , který měříme je součtem obou proudů. Proud  $I_V$  je dán vnitřním odporem voltmetru  $R_V$  a z Ohmova zákona plyne  $I_V = U / R_V$ . Proud  $I_z$  lze tedy vyjádřit jako

$$I_z = I - \frac{U}{R_V}. \quad (3)$$

Při měření s voltmetrem, jehož vnitřní odpor je řádově  $10^7 \Omega$ , lze považovat  $I_z = I$ .

Pokud zanedbáme odvod tepla z vlákna žárovky přívodními dráty, tak ze zákona zachování energie plyne, že rozžhavené vlákno žárovky vyzáří právě tolik zářivého výkonu, kolik je jí dodáváno formou elektrického příkonu. Tento zářivý výkon je dán pro černé těleso s povrchem o velikosti plochy  $A$  a termodynamické teplotě  $T$  podle Stefan - Boltzmannova zákona vztahem

$$P = A\sigma T^4, \quad (4)$$

kde  $\sigma$  je Stefanova- Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ). Víme-li, že vlákno má tvar válce s délkou  $l$  a poloměrem  $r$ , můžeme jeho plochu určit jako povrch pláště válce  $A = 2\pi r l$ . Tento zářivý výkon se tedy rovná

$$P = 2\pi r l \sigma T^4. \quad (5)$$

Elektrický příkon je dán hodnotami napětí na žárovce  $U$  a protékajícího proudu  $I$  jako

$$P = UI. \quad (6)$$

Ze zákona zachování energie platí

$$2\pi r l \sigma T^4 = UI \quad (7)$$

Z hodnot napětí na žárovce  $U$  a protékajícího proudu  $I$  můžeme také určit z Ohmova zákona velikost odporu žárovky  $R$  při odpovídající teplotě  $T$ . Ze znalosti rezistivity  $\rho_0$  materiálu vlákna žárovky při pokojové teplotě  $T_0$  můžeme spočítat odpor vlákna  $R_0$  při pokojové teplotě podle vztahu

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{\pi r^2}, \quad (8)$$

kde  $l$  a  $r$  jsou rozměry vlákna žárovky.

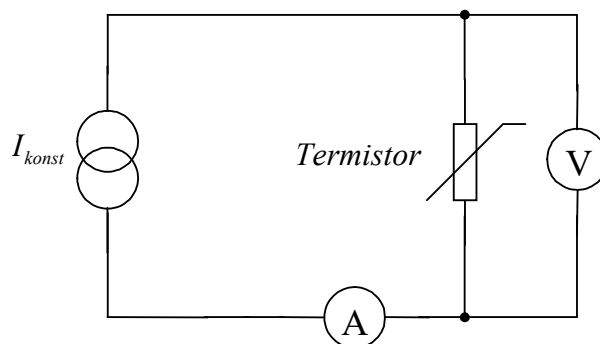
Ze změřených odporů  $R$  a  $R_0$  lze pomocí vztahu (1) určit teplotu vlákna žárovky, do které dodáváme elektrický příkon  $P = UI$ . Hodnotu odporu  $R_0$  nelze určit přímo výpočtem z naměřených hodnot  $U$  a  $I$ , protože odpovídá stavu, kdy není vlákno ohřáto žádným příkonem a tedy  $I = 0\text{A}$ . Odpor  $R_0$  lze určit grafickou extrapolací závislosti  $R = f(I)$  pro  $I = 0\text{A}$  a je tedy vhodné proměřit oblast nejmenších proudů dostatečně detailně.

Ze vztahů (7) a (8) lze poté vypočítat délku  $l$  a poloměr  $r$  vlákna žárovky. Pro vlákno tvořené wolframem jsou hodnoty rezistivity  $\rho_0$  a teplotního součinitele odporu  $\alpha$  následující:

$$\rho_0 = 53 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

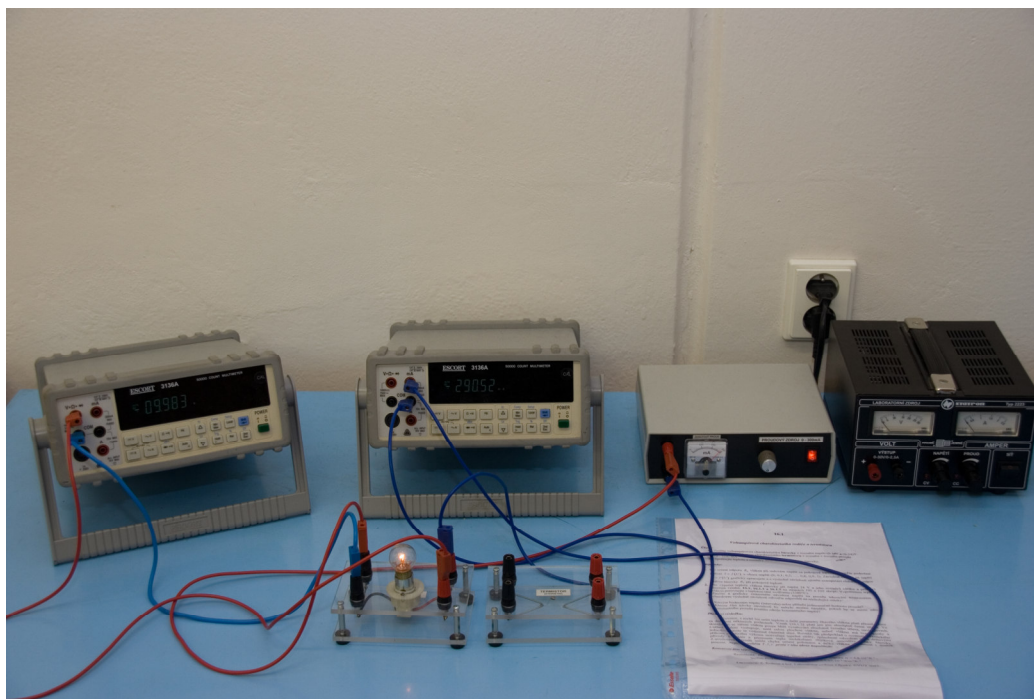
$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}.$$

Pro měření voltampérové charakteristiky termistoru použijeme zapojení podle obr. 2 s regulovatelným zdrojem konstantního proudu.



Obr. 2 Zapojení pro měření V/A charakteristiky termistoru

Protékající proud způsobuje ohřev termistoru, a proto musíme při měření vyčkat na ustálení teploty. Ustálený stav je dán elektrickým příkonem termistoru (závisí na elektrickém odporu, který je funkcí okamžité teploty) a odvodem vzniklého tepla. Protože s rostoucí teplotou odpor polovodičů klesá, musíme při měření použít zdroje konstantního proudu, aby k ustálení vůbec mohlo dojít. Při užití zdroje konstantního napětí by ohřev způsobený protékajícím proudem vedl k poklesu odporu termistoru a tím k dalšímu růstu proudu a tím k dalšímu ohřevu atd. V oblasti charakteristiky, kde vyššímu proudu termistorem odpovídá nižší napětí, by k ustálení nemohlo dojít.



Obr. 3 Fotografie pracoviště úlohy

## **Měření**

- 1) Změříme voltampérovou charakteristiku **žárovky** v rozsahu napětí 0–100mV po kroku cca 10mV. Není nutné se zdržovat přesným nastavováním „hezkých hodnot“. V případě měření voltampérové charakteristiky žárovky v rozsahu 0–100mV je možné a dokonce výhodnější použít proudový zdroj z důvodu jemnější regulace proudu a tím i napětí na žárovce. Před zapnutím napájecího zdroje si zkontrolujeme, zda jsou potenciometry nastaveny na nulové hodnoty. Je důležité postupovat od nulové hodnoty k maximální, aby i změna teploty vlákna začínala z pokojové teploty. V tomto rozsahu sestrojíme graf závislosti odporu žárovky na napětí. Pomocí programu lineární regrese určíme odpor vlákna žárovky při pokojové teplotě, tedy pro  $U = 0V$  a  $I = 0A$ .

- 2) Změříme voltampérovou charakteristiku **žárovky** v rozsahu napětí 0 – 24V po kroku cca 1V a naměřené hodnoty vyneseme do grafu.
- 3) Určíme elektrický odpor a elektrický příkon žárovky při napětí 24V včetně nejistot.
- 4) Spočítáme teplotu a rozměry wolframového vlákna žárovky. Vypočtenou teplotu vlákna porovnáme s teplotou tání wolframu (3380°C).
- 5) Změříme voltampérovou charakteristiku **termistoru** v rozsahu proudu 0 – 260mA .  
Krok nastavování proudu je vhodné volit následovně:

0 – 50mA po cca 5mA ,

50 – 100mA po cca 10mA ,

100 – 260mA po cca 20mA .

Opět není nutné se zdržovat přesným nastavování „hezkých hodnot“.

- 6) Z charakteru výsledné závislosti najdeme odpovědi na následující otázky:

Kterým hodnotám napětí (intervalu) nelze přiřadit jednoznačně hodnotu proudu?

Kterou část křivky závislosti by nebylo možno naměřit, pokud by se místo zdroje konstantního proudu použilo zdroje konstantního napětí?

### **Nejistoty měření**

Rovnice, z nichž lze určit teplotu a další parametry žhavého vlákna platí přesně pouze za dodržení některých podmínek. Vztah (4) platí jen pro černé těleso. Ve skutečnosti se záření vlákna pouze blíží vyzařování černého tělesa, navíc povrch, z něhož záření vystupuje, není celou plochou vlákna, neboť vlákno má tvar spirály a jednotlivé závity se vzájemně částečně stíní. Rovněž tak předpoklad o rovnosti elektrického příkonu a zářivého výkonu neuvažuje tepelné ztráty, způsobované odvodem tepla drátovými přívody k vláknu a přenosem tepla molekulami zbytkové atmosféry baňky žárovky.

Z uvedených důvodů může chyba určení poloměru a délky vlákna dosáhnout i desítek procent. Nejistoty teploty vlákna žárovky a rozměrů vlákna žárovky nebudeme určovat.

Nejistoty typu B elektrického odporu a elektrického příkonu žárovky získáme aplikací vztahu pro funkci ve tvaru součinu a podílu.

**Literatura:** Kohout Z., Budinská Z., Králová R., Pospíšil J., Bláhová I., Solar M.: *Laboratorní cvičení z fyziky*. 1vyd. Praha: ČVUT 2003.