Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM II – Elektřina a magnetismus

Úloha č. IX.

Název: Charakteristiky termistoru

Pracoval: Radim Pechal stud. skup. F – 11 dne 11. listopadu 2008

Odevzdal dne: ....

Hodnocení:..

Připomínky:

Kapitola referátu	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0 – 3	
Výsledky měření	0 – 9	
Diskuse výsledků	0 – 5	
Závěr	0 – 2	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Pracovní úkol

1. Změřte statickou charakteristiku termistoru pro proudy do 25 mA a graficky ji znázorněte.
2. Změřte teplotní závislost odporu termistoru v teplotním intervalu přibližně 180 až 380 K.
3. Graficky znázorněte závislost logaritmu odporu R termistoru na $1/T$ a vyhodnoťte velikost materiálových veličin R_∞ a B, aktivační energie ΔU a teplotního součinitele odporu α při pokojové teplotě.
4. Stanovte teplotu termistoru v maximu charakteristiky, případně v některých dalších bodech a tepelný odpor K.

Teoretický úvod

Termistor je polovodičová součástka, jejiž odpor výrazně závisí na okolní teplotě. V oblasti teplot v níž převládá příměsová vodivost je možné dle [1.] vyjádřit vztah odporu součástky na teplotě vztahem:

$$R = R_\infty \exp \frac{B}{T}, \tag{1}$$

kde R_∞ je veličina závislá na materiálu a rozměrech použitého polovodiče v termistoru. Veličina B udává tzv. teplotní citlivost termistoru. Pro kovalentní polovodiče (polovodiče pro které platí, že se vzrůstající teplotou přibývá nosičů) je teplotní citlivost termistoru dána vztahem:

$$B = \frac{\Delta U}{2 \cdot k}, \tag{2}$$

kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$ je Boltzmanova konstanta a ΔU je aktivační energie. Pro výpočet aktivační energie při známé hodnotě teplotní citlivosti termistoru je nutno upravit vztah do podoby:

$$\Delta U = 2 \cdot k \cdot B. \tag{3}$$

Teplotní součinitel odporu α je možno obecně vyjádřit vztahem:

$$\alpha = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{\mathrm{d}R(T)}{\mathrm{d}T}. \tag{4}$$

Zderivováním a dosazením vztahu (1) je možno upravit vztah (4):

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

Je tedy vidět, že teplotní součinitel odporu α závisí na teplotě.

Materiálovou veličinu B, která charakterizuje teplotní citlivost termistoru je možné určit z dvou měření elektrického odporu polovodiče R_1 a R_2 při různých teplorách T_1 a T_2.

$$B = \frac{2,3 \cdot \log\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \tag{6}$$

Pokud vyneseme závislost $\log(R) = f(\frac{1}{T})$, dostaneme vztah:

$$\log(R) = \log(R_\infty) + 0,434 \cdot \frac{B}{T}. \tag{7}$$

Fitováním tohoto vztahu naměřenými hodnotami je možné určit hodnoty materiálových konstant B a R_∞.

Pokud je známa veličina B je možné vypočítat aktivační energii ΔU ze vztahu (3). Výsledná hodnota v jednotkách $\mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ by byla však velmi malá. Proto se obvykle výsledek uvádí v elektronvoltech. Pro aktivační energii v elektronvoltech je pak hodnota Boltzmanovy konstanty $k = 0,8617 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{eV}$. Pokud chceme vyjádřit aktivační energii v jednotkách $\mathrm{J} \cdot \mathrm{mol}^{-1}$, musíme výsledek ve vztahu (2) přenásobit Avogadrovou konstantou. Situace je pak ekvivalentní případu, kdy bychom vztah (2) upravili na:

$$\Delta U = 2 \cdot R \cdot B, \tag{8}$$

kde $R = 8,314\mathrm{J} \cdot \mathrm{mol}^{-1}$ je tzv. plynová konstanta.

Statická charakteristika termistoru určuje závislost napětí U na procházejícím proudu I při konstantní okolní teplotě. Měření se provádí tak, že se termistorem nechá protékat proud a měří se napětí. Průchodem proudu se termistor zahřívá a jeho teplota roste na hodnotu, kdy je roven příkon a tepelný výkon, který odchází zkrs prouzdro termistoru do okolí. Což je možno popsat vztahem:

$$K \cdot P = T - T_0, \tag{9}$$

kde K je tepelný odpor termistoru. T je teplota termistoru a T_0 je teplota okolí. Elektrický výkon je možné vyjádřit vztahem $P = U \cdot I$. Spolu s uvážením Ohmova zákona je možné vyjádřit závislost napětí na teplotě:

$$U = \sqrt{\frac{R_\infty (T - T_0) \exp\left(\frac{B}{T}\right)}{K}}. \tag{10}$$

Analýzou tohoto vztahu je možné stadno určit, že největší hodnota napětí nastane při teplotě T_m dané vztahem:

$$T_m = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot B \cdot T_0}}{2}. \tag{11}$$

Ze vztahu (10) je možné vyjádřit, jak závisí tepelný odpor K na ostatních veličinách:

$$K = \frac{R_\infty (T - T_0) \exp\left(\frac{B}{T}\right)}{U^2}. \tag{12}$$

K měření teploty se používá platinový rezistor, pro který platí:

$$T = \frac{R_P - R_0}{\alpha_P \cdot R_0}, \tag{13}$$

kde R_P je odpor rezistoru při teplotě T. R_0 je odpor při teplotě $T = 0°$ C. U použitého rezistoru platí: $R_0 = 100\,\Omega$. Úpravou tohoto vztahu je možné získat vztah pro výpočet α_P:

$$\alpha_P = \frac{R_T - R_0}{T \cdot R_0}. \tag{14}$$

Výsledky měření

Nejdříve jsem určil pomocí vztahu (14) hodnotu teplotního součinitele odporu α_P platinového rezistoru. Při okolní teplotě $T = (22,4 \pm 0,2)^\circ\,$C byla hodnota odporu rezistoru $R_P = (108,9 \pm 0,3)\,\Omega$. Odtud jsem určil $\alpha_P = (3,98 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}$.

Dále jsem měřil teplotní závislost odporu termočlánku. Teplotu jsem měřil pomocí platinového rezistoru. Změřil jsem odpor platinového rezistoru a pomocí vztahu (13) jsem určil teplotu.

$T\,[^\circ\mathrm{C}]$	$R\,[\Omega]$	$T\,[^\circ\mathrm{C}]$	$R\,[\Omega]$	$T\,[^\circ\mathrm{C}]$	$R\,[\Omega]$
-118 ± 4	$(10,4 \pm 0,3) \cdot 10^6$	-48 ± 2	$(14,5 \pm 1,1) \cdot 10^3$	23 ± 1	$(0,53 \pm 0,02) \cdot 10^3$
-116 ± 4	$(5,7 \pm 0,2) \cdot 10^6$	-45 ± 2	$(12,5 \pm 1,1) \cdot 10^3$	25 ± 1	$(0,50 \pm 0,02) \cdot 10^3$
-113 ± 4	$(4,1 \pm 0,2) \cdot 10^6$	-43 ± 2	$(10,7 \pm 1,1) \cdot 10^3$	28 ± 1	$(0,46 \pm 0,02) \cdot 10^3$
-110 ± 4	$(3,1 \pm 0,1) \cdot 10^6$	-40 ± 1	$(9,3 \pm 1,1) \cdot 10^3$	30 ± 1	$(0,42 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-108 ± 4	$(2,4 \pm 0,1) \cdot 10^6$	-38 ± 1	$(8,1 \pm 1,1) \cdot 10^3$	33 ± 1	$(0,39 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-105 ± 4	$(1,9 \pm 0,1) \cdot 10^6$	-35 ± 1	$(7,0 \pm 1,1) \cdot 10^3$	35 ± 1	$(0,35 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-103 ± 4	$(1,45 \pm 0,1) \cdot 10^6$	-33 ± 1	$(6,1 \pm 1,1) \cdot 10^3$	38 ± 1	$(0,33 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-100 ± 3	$(1,11 \pm 0,1) \cdot 10^6$	-30 ± 1	$(5,3 \pm 1,1) \cdot 10^3$	40 ± 2	$(0,31 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-98 ± 3	$(0,85 \pm 0,02) \cdot 10^3$	-28 ± 1	$(4,7 \pm 1,1) \cdot 10^3$	43 ± 2	$(0,28 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-95 ± 3	$(0,68 \pm 0,02) \cdot 10^3$	-25 ± 1	$(4,1 \pm 1,1) \cdot 10^3$	45 ± 2	$(0,27 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-93 ± 3	$(0,53 \pm 0,02) \cdot 10^3$	-23 ± 1	$(3,5 \pm 1,1) \cdot 10^3$	48 ± 2	$(0,25 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-90 ± 3	$(0,41 \pm 0,01) \cdot 10^3$	-20 ± 1	$(3,3 \pm 1,1) \cdot 10^3$	50 ± 2	$(0,23 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-88 ± 3	$(0,32 \pm 0,01) \cdot 10^3$	-18 ± 1	$(2,9 \pm 1,1) \cdot 10^3$	53 ± 2	$(0,21 \pm 0,01) \cdot 10^3$
-85 ± 3	$(0,25 \pm 0,01) \cdot 10^3$	-15 ± 1	$(2,6 \pm 1,1) \cdot 10^3$	55 ± 2	198 ± 3
-83 ± 3	$(0,20 \pm 0,01) \cdot 10^3$	-13 ± 1	$(2,3 \pm 1,1) \cdot 10^3$	58 ± 2	185 ± 3
-80 ± 3	$(163 \pm 3) \cdot 10^3$	-10 ± 1	$(2,0 \pm 1,1) \cdot 10^3$	60 ± 2	174 ± 3
-78 ± 3	$(131 \pm 3) \cdot 10^3$	-8 ± 1	$(1,74 \pm 0,03) \cdot 10^3$	63 ± 2	163 ± 3
-75 ± 3	$(106 \pm 2) \cdot 10^3$	-5 ± 1	$(1,57 \pm 0,03) \cdot 10^3$	65 ± 2	152 ± 3
-73 ± 3	$(86 \pm 2) \cdot 10^3$	-3 ± 1	$(1,42 \pm 0,03) \cdot 10^3$	68 ± 2	142 ± 3
-70 ± 2	$(71 \pm 2) \cdot 10^3$	0 ± 1	$(1,28 \pm 0,02) \cdot 10^3$	70 ± 3	131 ± 3
-68 ± 2	$(58 \pm 2) \cdot 10^3$	3 ± 1	$(1,16 \pm 0,02) \cdot 10^3$	73 ± 3	125 ± 3
-65 ± 2	$(48 \pm 2) \cdot 10^3$	5 ± 1	$(1,05 \pm 0,02) \cdot 10^3$	75 ± 3	118 ± 2
-63 ± 2	$(40 \pm 1) \cdot 10^3$	8 ± 1	$(0,94 \pm 0,02) \cdot 10^3$	78 ± 3	111 ± 2
-60 ± 2	$(33 \pm 1) \cdot 10^3$	10 ± 1	$(0,85 \pm 0,02) \cdot 10^3$	80 ± 3	105 ± 2
-58 ± 2	$(28 \pm 1) \cdot 10^3$	13 ± 1	$(0,78 \pm 0,02) \cdot 10^3$	83 ± 3	99 ± 2
-55 ± 2	$(24 \pm 1) \cdot 10^3$	15 ± 1	$(0,71 \pm 0,02) \cdot 10^3$	85 ± 3	94 ± 2
-53 ± 2	$(20 \pm 1) \cdot 10^3$	18 ± 1	$(0,65 \pm 0,02) \cdot 10^3$	88 ± 3	89 ± 2
-50 ± 2	$(17,1 \pm 1,1) \cdot 10^3$	20 ± 1	$(0,60 \pm 0,02) \cdot 10^3$	90 ± 3	84 ± 2

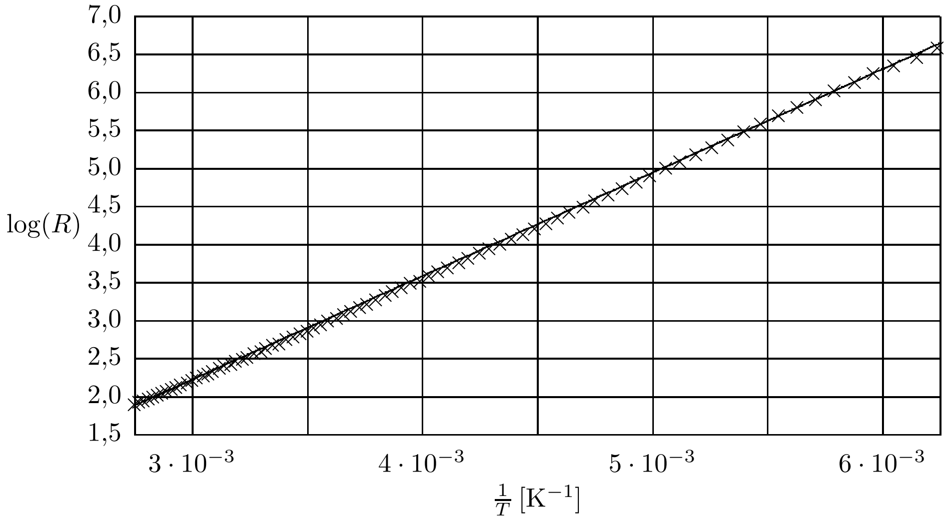
Tabulka 1: Závislost odporu termočlánku na teplotě.

Při určování materiálových konstant R_∞ a B jsem vycházel ze vztahu (7). Naměřená data z tabulky 1 jsem jsem fitoval pomocí programu GNUplot vztahem (7) a vyšly mi hodnoty $B = (3136 \pm 62)\,\mathrm{K}$ a $R_\infty = (13,8 \pm 0,3)\,\mathrm{m}\Omega$.

Ze vztahu (3) a (8) pak mohu určit aktivační energii $\Delta U = (5,4 \pm 0,2)\,\mathrm{eV}$, $\Delta U = (52 \pm 2)\,\mathrm{kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1}$.

Dále ze vztahu (5) určím hodnotu teplotního součinitele odporu při pokojové teplotě $T = 20\,°\mathrm{C}$. $\alpha = (-36,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}$.

Graf 1.: Závislost logaritmu R na $1/T$.



Statickou charakteristiku termistoru jsem měřil v rozsahu 0,10 mA až 23,01 mA. Měřil jsem při okolní teplotě $T = (22,4 \pm 0,5)°\mathrm{C}$.

I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,10	$63,2 \cdot 10^{-3}$	0,80	$462,8 \cdot 10^{-3}$	5,99	1,61	12,90	1,64
0,20	$120,0 \cdot 10^{-3}$	0,90	$513,8 \cdot 10^{-3}$	7,04	1,64	14,40	1,63
0,31	$185,6 \cdot 10^{-3}$	1,01	$574,3 \cdot 10^{-3}$	8,07	1,65	17,45	1,60
0,40	$237,6 \cdot 10^{-3}$	1,94	$968,4 \cdot 10^{-3}$	9,14	1,66	19,10	1,58
0,50	$296,7 \cdot 10^{-3}$	3,15	1,33	10,07	1,66	20,09	1,57
0,60	$352,2 \cdot 10^{-3}$	4,00	1,44	11,64	1,65	22,12	1,56
0,70	$407,7 \cdot 10^{-3}$	5,02	1,56	12,19	1,65	23,01	1,53

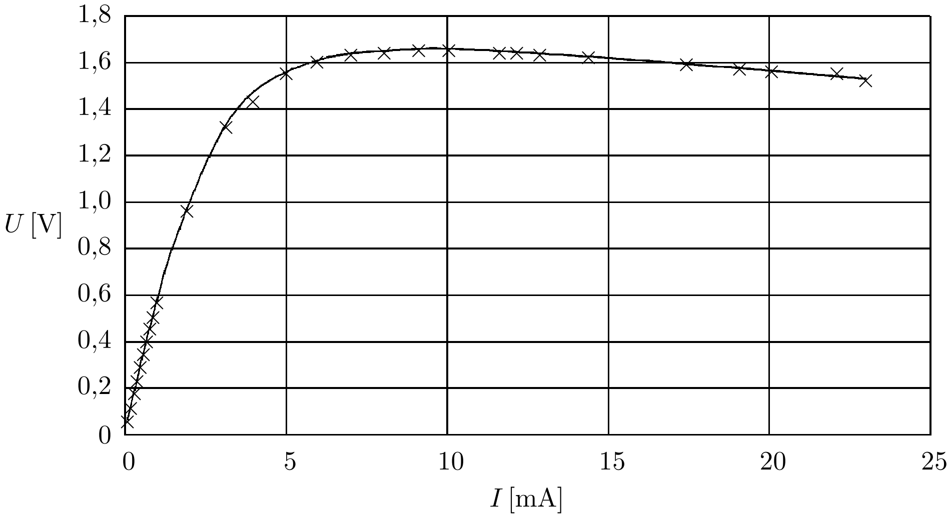
Tabulka 2: Měření statické charakteristiky termistoru.

Pokud použiju naměřené hodnoty z předchozí části úlohy, mohu určit teplotu termistoru v maximu užitím vztahu (11): $T_m = (57 \pm 3)°\mathrm{C}$.

Maximální naměřené napětí je $U_m = (1,66 \pm 0,02) V$.

Dále mohu užitím vztahu (12) vypočítat tepelný odpor $K = (2311 \pm 91)\,\mathrm{K} \cdot \mathrm{W}^{-1}$.

Graf 2.: Statická charakteristika termistoru.



Diskuse výsledků

K měření odporu, napětí a proudu jsem používal digitální multimetr MXD–4660A. Přesnost tohoto měřícího přístroje je udáván pro měření odporu $\pm 0,2\% + 5$ digit v rozsahu do $200\,\Omega$, $\pm 0,15\% +$ 3 digit v rozszích $2\,\mathrm{k}\Omega$ až $2\,\mathrm{M}\Omega$, $\pm 0,5\% + 5$ digit v rozsahu do $20\,\mathrm{M}\Omega$. Měřící přístroj má celkově $5\times$ sedmisegmentových display a na nejvyšším místě má jednotkový display. K měření jsem vždy používal co nejnižší měřící rozsah.

Při měření závislosti odporu termočlánku na teplotě jsem používal výše zmíněné multimetry. K chybám multimetru jsem navíc připočítaval chybu 1%, která byla způsobena tím, že ohmmetry v multimetru nezobrazují okamžitou hodnotu odporu, ale vždy zprůměrovanou hodnotu za určitý čas. Z měřícího přístroje jsem odečítal vždy nejvyšší tři číslice, neboť během odečítání se termočlánek zahříval a hodnota jeho odporu se měnila.

K výpočtu chyby měření u teploty jsem použil kvadratický zákon přenosu chyb. Uvažoval jsem chyby teplotního součinitele a chyby měření ohmmetrem. Při určování chyby měření odporu termočlánku jsem postupoval stejně jako při určování chyby měření odporu platinového rezistoru.

Závislost odporu termočlánku na teplotě jsem fitoval pomocí vztahu (7) programem GNUplot v. 4.0. Statistická chyba u veličin B a R_∞ vyšla řádově 0,5%. Při zohlednění chyb měřících přístrojů mi vyšly chyby $\sigma_B = \pm 62\,\mathrm{K}$, $\sigma_{R\infty} = \pm 0,3\,\mathrm{m}\Omega$.

Dosazením naměřené veličiny B do vztahů (3), (8) a opětovným použitím kvadratického zákona přenosu chyb jsem určil chyby měření aktivační energie. Opětovně jsem postupoval při určení měrného odporu termistoru α.

Při měření statické charakteristiky termistoru jsem používal výše zmíněné multimetru MXD–4660A. Tyto multimetry měří stejnosměrný proud s přesností $\pm 0,3\% + 3$ digit. Stejnosměrné napětí měří s přesností $\pm 0,05\% + 3$ digit. Což je velice malá chyba, proto jsem ji z důvodu přehlednosti neznázorňoval v grafu 2 chybovými čarami. Naměřené hodnoty jsem v grafu 2 prokládal křivkou csplines.

Z naměřených hodnot jsem výpočtem pomocí vztahu (11) určil teplotu termistoru při maximálním napětí. Z kvadratického zákona přenosu chyb jsem dále určil chybu měření. K výpočtu jsem používal hodnoty určené ze závislosti odporu termistoru na teplotě.

Z naměřených hodnot jsem určil maximální napětí. Chybu jsem odhadl z chyby měření multimetrem, ke které jsem připočítal odhadovanou systémovou chybu $\sigma_{sys} = \pm 0,1\,\mathrm{V}$ danou pouze diskrétním proměřením charakteristiky.

Z těchto hodnot jsem pomocí vztahu (12) určil tepelný odpor.

Závěr

Proměřil jsem závislost odporu termistoru na napětí. Závislost logaritmu odporu na převrácené hodnotě teploty je znázorněna v grafu 1. Dále jsem proměřil statickou charakteristiku termistoru, která je znázorněna v grafu 2.

Z naměřených charakteristik jsem určil materiálové konstanty termistoru $B = (3136 \pm 62)\,\mathrm{K}$, $R_\infty (18,8 \pm 0,3)\,\mathrm{m\Omega}$. Dále jsem určil aktivační energii termistoru $\Delta U = (5,4 \pm 0,2)\,\mathrm{eV}$, $\Delta U = (52 \pm 2)\,\mathrm{kJ}$ a teplotní součinitel odporu termistoru $\alpha = (-36,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}$.

Ze statické charakteristiky jsem dále určil tepelný odpor $K = (2311 \pm 91)\,\mathrm{K} \cdot \mathrm{W}^{-1}$.

Seznam použité literatury

[1.] R. Bakule, J. Šternberk: *Fyzikální praktikum II.* Elektřina a magntismus.
Státátní pedagogické nakladatelství, Praha.