

Klíčová slova

Vyzařování černého tělesa, termoelektrický jev, závislost odporu na teplotě.

Princip

Podle Stefanova-Boltzmannova zákona vyzařování na jednotku plochy a času černého tělesa roste se čtvrtou mocninou absolutní teploty tělesa. Stefanův-Boltzmannův zákon platí i pro tzv. šedé těleso, jehož povrch vykazuje emisivitu nezávislou na vlnové délce a hodnota této emisivity je menší než 1. V tomto pokusu je šedé těleso reprezentováno vláknem žárovky, jehož vyzařování je zkoumáno jako funkce teploty.

Pomůcky

Termočlánek	08479.00	1
Stínící tubus pro 08479.00	08479.01	1
Univerzální zesilovač	13626.93	1
Zdroj proměnný 15 VAC/12 VDC/5 A	13530.93	1
Držák žárovky E 14	06175.00	1
Žárovka 6V/5A, E14	06158.00	3
Propojovací box	06030.23	1
Rezistor, 100Ω	06057.10	1
Optická lavice, l = 60 cm	08283.00	1
Stavitelný podstavec pro opt. lavici	08284.00	2
Držák přístrojů pro opt. lavici, h 30 mm	08286.01	2
Digitální multimetr	07134.00	3
Propojovací kabel, 500 mm, modrý	07361.04	4
Propojovací kabel, 500 mm, červený	07361.01	4

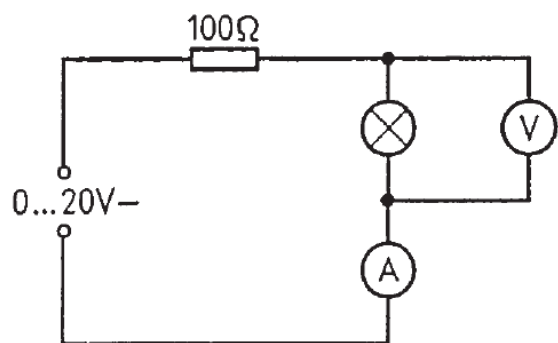
Úkoly

1. Změřit odpor vlákna žárovky při pokojové teplotě a zjistit odpor tohoto vlákna při 0 °C.
2. Změřit intenzitu záření vlákna při různých napětích. Odčíst proud při každém napětí a vypočítat odpovídající odpor daného vlákna. Z předpokládané závislosti odporu na teplotě druhého řádu vypočítat příslušné teploty vlákna.

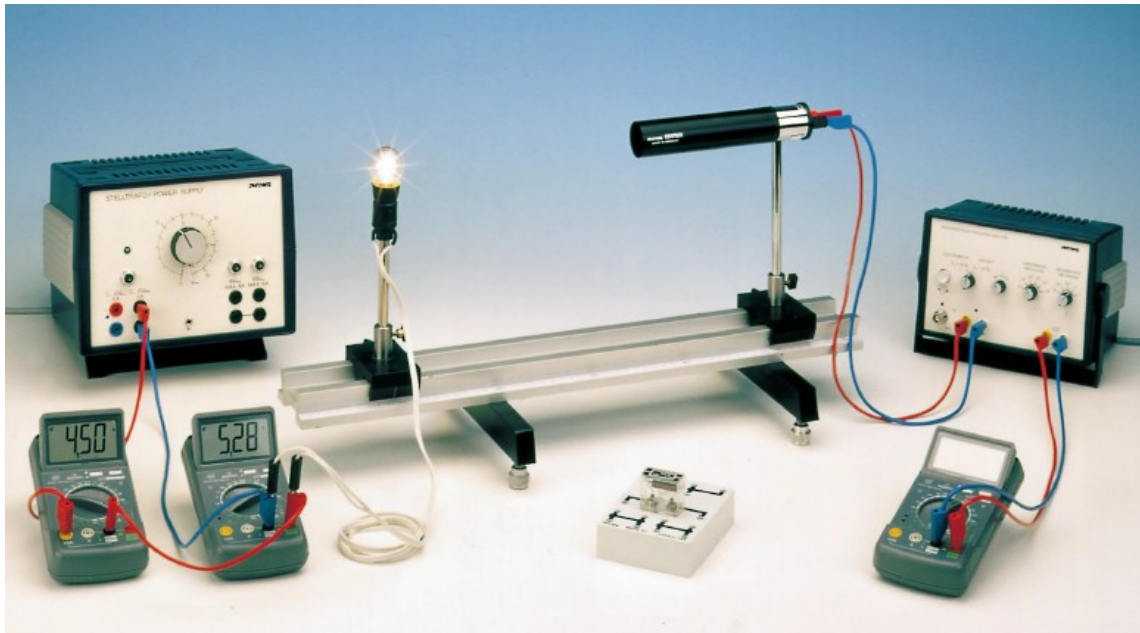
Sestavení a provedení experimentu

Začneme sestavením obvodu podle obr. 1, měříme odpor vlákna při pokojové teplotě. Rezistor (100Ω) je připojen k žárovce sériově, což umožňuje jemné upravování proudu. Odečítáme úbytek napětí na vlákně pro stejnosměrné proudy $I_1=100\text{mA}$ a $I_2=200\text{mA}$. Z těchto dat pak vypočítáme odpor při pokojové teplotě. Hodnoty proudu jsou dostatečně malé na to, abychom mohli zanedbat ztráty způsobené ohřevem vlákna.

Poté sestavíme samotný experiment podle obr. 2. Rezistor z předchozího měření už v obvodu není zapojen. Žárovka je nyní připojena ke zdroji měnitelného střídavého napětí přes ampérmetr, který umožňuje měření měnícího se proudu (až do 6 A). Voltmetr připojíme paralelně k žárovce a poté krokově zvyšujeme napětí od 1 až do 8 V, vždy po 1 V.



Obrázek 1: Schéma zapojení obvodu pro měření odporu vlákna



Obrázek 2: Sestavení experimentu

Nejprve nastavíme napětí 1 V. Čidlo s termočlánkem je pevně fixováno k lavici ve vzdálenosti 30 cm od žárovky. Žárovka je následně postupně vytáčena lehce vpravo a vlevo, dokud nenajdeme pozici, ve které je vyzařování maximální. Osa vlákna by měla být kolmá na osu optické lavice. Protože termoelektrický jev se dává napětí v řádu jednotek milivoltů, je nutné pro přesné měření použít zesilovač. Zesílení nastavíme na 10^2 až 10^3 s ohledem na to, že připojený voltmetr budeme mít nastaven na rozsah 10 V. Pro dosažení stabilního údaje čidla a přesné „nuly“, sundáme žárovku na několik minut z optické lavice. Zesilovač nastavíme na mód LOW DRIFT ($10^4 \Omega$) s časovou konstantou 1s.

Poté nasadíme žárovku zpátky a započneme měření. Odečítání hodnot musí být provedeno, až se termočlánek ustálí, což trvá přibližně 1 minutu. Musíme dát pozor na to, aby měření neovlivňovalo jiné záření, než vycházející ze žárovky.

Poznámka: Napětí dodávané žárovce by nemělo být vyšší než 6 V. Napětí v rozmezí 6-8V může být aplikováno pouze pro dobu několika minut.

Teorie a vyhodnocení

Pokud je intenzita vyzařování černého tělesa (emitovaná energie na jednotku plochy a času, při teplotě T a vlnové délce λ na intervalu $d\lambda$) je stanovena jako $dL(T, \lambda)/d\lambda$.

Podle Planckova zákona:

$$\frac{dL(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2c^2 h \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}}$$

kde:	$c=3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost světla
	$h=6,62 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s}$	Planckova konstanta
	$k=1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$	Boltzmanova konstanta

Integrováním předchozího vztahu přes celkovou vlnovou délku od $\lambda=0$ do $\lambda=\infty$ dostáváme intenzitu vyzařování $L(T)$ (Stefan-Boltzmannův zákon).

$$L(T) = \frac{2\pi^4}{15} \cdot \frac{k^4}{c^2 h^3} \cdot T^4$$

$$L(T) = \sigma \cdot T^4$$

kde: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Úměrnost $L \sim T^4$ je platná také pro tzv. šedé těleso, které vykazuje emisivitu nezávislou na vlnové délce menší než 1.

Abychom dokázali platnost Stefan-Boltzmannova zákona změříme záření emitované vláknem žárovky, které docela dobře reprezentuje šedé těleso. Pro danou vzdálenost mezi vláknem žárovky a termočlánkem platí úměrnost mezi tokem energie Φ a intenzitou vyzařování $L(t)$.

$$\Phi \sim L(T)$$

Jelikož existuje úměrnost mezi Φ a U_{therm} termočládku můžeme psát:

$$U_{\text{therm}} \sim T^4$$

což platí při teplotě 0 K. Protože termočlánek sám o sobě při pokojové teplotě vyzařuje, musíme podle předchozího zákona psát:

$$U_{\text{therm}} \sim (T^4 - T_R^4)$$

Za podmínek našeho pokusu můžeme T_R^4 vzhledem k T^4 zanedbat.

$$\log U_{\text{therm}} = 4 \log T + \text{const}$$

Absolutní teplota $T = t + 273$ je vypočítána s pomocí měřeného odporu $R(t)$ wolframového vlákna žárovky (t je teplota ve °C). Odpor vlákna je závislý na teplotě podle následujícího vztahu:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

kde:

$$\alpha = 4,82 \cdot 10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\beta = 6,76 \cdot 10^{-7} \cdot \text{K}^{-2}$$

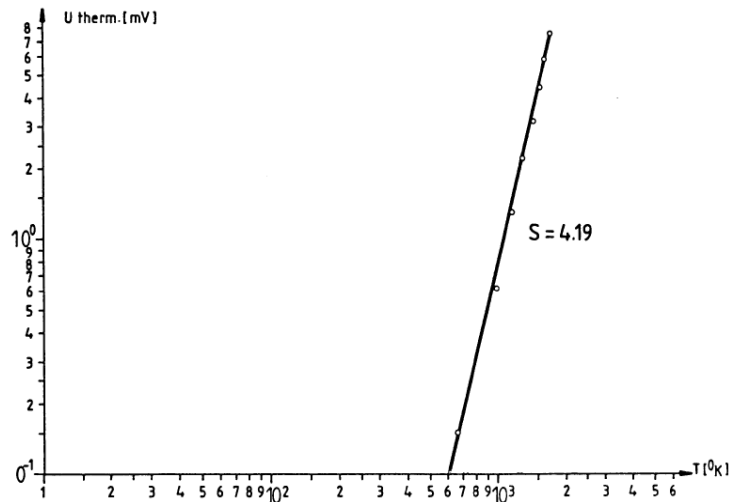
Odpor R_0 při teplotě 0°C pak můžeme vypočítat ze vztahu:

$$R_0 = \frac{R(t_R)}{1 + \alpha t_R + \beta t_R^2}$$

S využitím předchozího vztahu a závislosti $T = t + 273$ dostáváme:

$$T = 273 + \frac{1}{2\beta} \left[\sqrt{\alpha^2 + 4\beta \left(\frac{R(t)}{R_0} - 1 \right)} - \alpha \right]$$

$R(t_R)$ a R_0 vypočítáme za pomoci Ohmova zákona, např. z měření proudu a napětí na vlákně žárovky.



Obrázek 3: Závislost napětí na termočláunku a na absolutní teplotě vlákna žárovky

- Použili jsme stejnosměrného napětí při hodnotách proudu 100 mA nebo 200 mA, který byl dodáván vláknem přes 100 Ω rezistor. Odpovídající úbytky napětí byly 16,5 mV a 33,0 mV. Pokud zdvojnásobíme proud, zdvojnásobí se také úbytek napětí, což dokazuje, že vliv teploty na odpor vlákna je zanedbatelný při zvolených hodnotách stejnosměrného proudu. V tomto případě:

$$R(t_R) = 0,165 [\Omega]$$

a následně:

$$R_0 = 0,15 [\Omega]$$

Malé odchylky R_0 ovlivní sklon křivky, ale jen zanedbatelně.

- V druhém úkolu zvyšujeme střídavé napětí krokově po 1 V od 0 do 8 voltů, což přináší tyto výsledky:

U[V]	I[A]	U _{therm} [mV]	T[K]
1	2,20	0,15	672
2	2,80	0,62	983
3	3,45	1,30	1160
4	4,00	2,20	1300
5	4,45	3,20	1430
6	4,90	4,45	1540
7	5,30	5,90	1630
8	5,70	7,50	1720

Grafické znázornění závislosti vyzařování na teplotě vlákna je znázorněna logaritmicky v grafu (Obr. 3).

Směrnice S je vypočítána s regresí:

$$S = 4,19 \pm 0,256$$

Přesná hodnota S by měla být 4. V našem případě je odchylka v mezích vypočítané chyby.