

Měření teploty wolframového vlákna

Abstrakt: Úloha je zaměřena na měření teplot pomocí měření celkového záření vysílaného tělesem. Tělesa při zvyšování teploty nejprve vyzařují jen neviditelné dlouhovlnné tepelné záření, které přechází při teplotě okolo 500°C do tmavorudé barvy, pak přechází barva tělesa ke žluté, která se stává stále světlejší, až se barva světla při několika tisících stupních již téměř neliší od barvy slunečního světla.

1 Pracovní úkoly

1. DŮ: Z Planckova vyzařovacího zákona odvoďte Stefan-Boltzmannův zákon a určete tvar konstanty σ pomocí c , k a \hbar .

2. Ocejchujte referenční žárovku pomocí měření odporu. Diskutujte, zda α v rovnici (9) je konstanta. Výsledky zpracujte graficky. Ověřte správnost výsledků pomocí závislosti výkonu na čtvrté mocnině teploty. Pomocí fitu určete konstantu β .

3. Ověřte Stefan-Boltzmannův zákon (7), výsledky vyneste do grafu a určete konstantu ϵ .

4. Zjistěte teplotu žárovky připojené k neznámému zdroji (alespoň 6 měření) pomocí závislosti transmise na vlnové délce. Graficky zpracujte a teplotu získejte pomocí aritmetického průměru z fitů závislosti intenzity na vlnové délce $I = I(\lambda)$.

2 Pomůcky

Pomůcky: Pulfrichův fotometr, zdroj napětí 0 - 30 V, wolframová vlákna (dvě světelné žárovky), multimetr, ohmmetr, zdroj referenčního napětí.

3 Základní pojmy a vztahy

Fotometrie zkoumá viditelné světlo a jeho působení na oko. Základními fotometrickými veličinami jsou světelný tok, svítivost, osvětlení, jas a světelná účinnost.

Světelný tok Φ vyjadřuje množství světelné energie, kterou zdroj vyzáří za časovou jednotku s přihlédnutím k citlivosti oka na různé vlnové délky světla. Jednotkou je lumen: $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$. Oproti tomu **zářivý tok** je energie vyzářená za čas ve všech možných vlnových délkách.

Osvětlení E je světelný tok dopadající na jednotku plochy. Jednotkou je lux: $\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$.

Svítivost I vyjadřuje prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. Jednotkou je kandela: cd . Kandela je základní jednotkou SI.

Jas L je osvětlení vztažené na plochu. Jednotkou je $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Světelná účinnost K vyjadřuje poměr mezi vstupní energií a výtěžkem viditelného světla. Jednotkou je $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$.

Transmise (*propustnost*) T je poměr světelných intenzit před a po absorpci tělesem. S využitím absorpčního koeficientu δ_λ a znalosti tloušťky vrstvy l , skrz kterou světlo prochází, ji můžeme vypočítat jako:

$$T = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} = \exp(-\delta_\lambda l) . \quad (1)$$

Extinkce (*pohltivost*) E je záporný dekadický logaritmus transmise.

$$E = -\log(T) = \log\left(\frac{I_{0\lambda}}{I_\lambda}\right) . \quad (2)$$

3.1 Planckův vyzařovací zákon

Uvažujme zdroj vyzařující elektromagnetickou energii. Tato energie se může vyzařovat pouze po kvantech. Tato kvanta jsou úměrná frekvenci. Označíme-li energii jednoho kvanta e , platí

$$e = h\omega = \frac{\hbar c}{\lambda} , \quad (3)$$

kde ω je úhlová frekvence záření, λ vlnová délka záření a h (\hbar) je (redukováná) planckova konstanta. Pro absolutně černé těleso lze z těchto předpokladů odvodit následující vztah pro závislost intenzity záření I_ω na frekvenci:

$$dI_\omega = \frac{\hbar}{4\pi^3 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} d\omega , \quad (4)$$

kde T je teplota absolutně černého tělesa, c rychlost světla ve vakuu a k Boltzmannova konstanta.

Pokud nyní bude úhlová frekvence ω brána jako funkce vlnové délky λ , můžeme po jednoduché substituci vyjádřit intenzitu záření jako:

$$dI_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{\hbar c}{\lambda kT}} - 1} d\lambda . \quad (5)$$

Tato závislost je zobrazena na Obrázku 1. Správné popisky os zde neuvádíme záměrně - jedním z úkolů je je proměřit. Jak je vidět, s rostoucí teplotou se zvětšuje intenzita záření a maximum se posouvá ke kratším vlnovým délkám. Tuto skutečnost lze vyjádřit i pomocí tzv. *Wienova posunovacího zákona*:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (6)$$

kde b je Wienova konstanta, $b \cong 2,898 \text{ K} \cdot \text{mm}$. Tento zákon říká, že záření absolutně černého tělesa se s rostoucí teplotou posouvá k nižším vlnovým délkám.

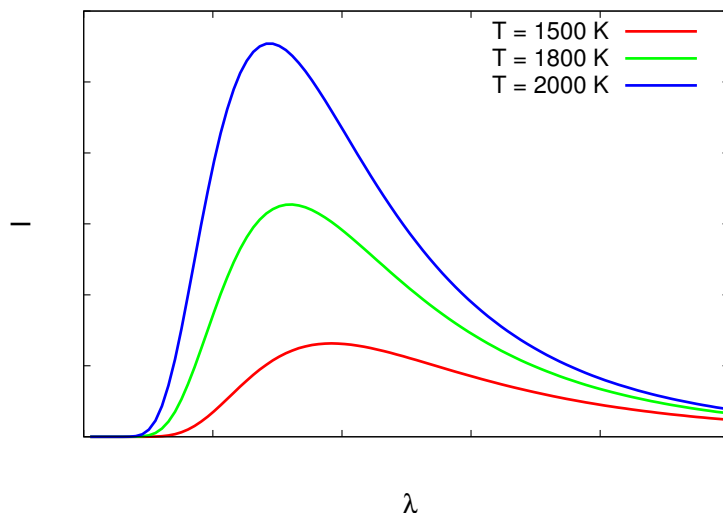
Pokud přintegrujeme rovnici (4) před všechny vlnové délky, dostaneme Stefan-Boltzmannův zákon:

$$I = \sigma T^4 \quad \text{resp.} \quad I = \epsilon \sigma T^4 , \quad (7)$$

kde $\sigma \cong 5,76 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta a ϵ je emisivita povrchu tělesa, vyjadřující korekci na skutečnost, že nepracujeme s absolutně černým tělesem. Tuto rovnici lze snadno přepsat pomocí výkonu P , což je součin napětí U a proudu I :

$$P = UI = \beta T^4 , \quad (8)$$

kde β je konstanta.



Obrázek 1: Planckův zákon.

3.2 Závislost odporu vodiče na teplotě

Pokud do vodiče přivádíme konstantní proud a napětí, jeho odpor R se bude měnit s teplotou T . Mějme referenční hodnotu odporu R_0 při teplotě T_0 . Při zahřívání vodiče jeho odpor roste. Pro každý vodič máme jeho charakteristický *teplotní součinitel elektrického odporu* α . V případě wolframu jde o hodnotu $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Závislost odporu na změně teploty $\Delta T = T - T_0$ lze vyjádřit jako:

$$R = R_0(\alpha \Delta T + 1). \quad (9)$$

Což je ovšem vztah platný pouze pro malé ΔT . Pokud jsou změny teploty velké, teplotní součinitel elektrického odporu α začíná neznedbatelně záviset na teplotě a vztah (9) je nepřesný. Další možností postupu je využít závislosti odporu na rezistivitě ρ , délce l a obsahu S kolmého průřezu vodiče:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (10)$$

Teplotu je možné potom určit z teplotní závislosti rezistivity wolframu. V rozmezí teplot od 90 K až po 750 K pak pro rezistivitu platí vztah:

$$\rho_{90-750} = -1.06871 + 2.06884 \cdot 10^{-2}T + 1.27971 \cdot 10^{-6}T^2 + 8.53101 \cdot 10^{-9}T^3 - 5.16195 \cdot 10^{-12}T^4. \quad (11)$$

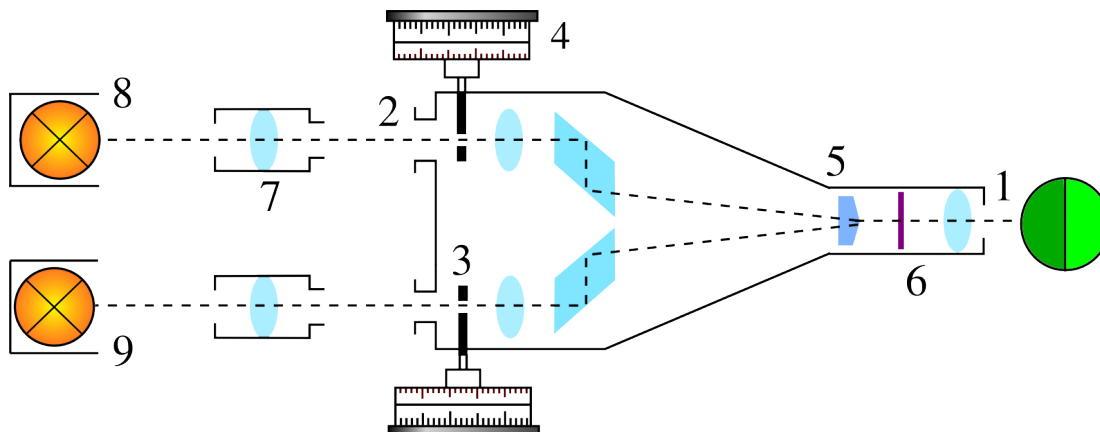
V rozmezí od 750 K až po 3600 K je tento vztah pak modifikován na:

$$\rho_{750-3600} = -1.73573 + 2.14350 \cdot 10^{-2}T + 5.74811 \cdot 10^{-6}T^2 - 1.13698 \cdot 10^{-9}T^3 + 1.1167 \cdot 10^{-13}T^4. \quad (12)$$

Přičemž oba tyto vztahy zahrnují korekci na teplotní roztažnost vodiče a proto již v rovnici (10) je možné brát člen $\frac{l}{S}$ jako konstantní. Zde podotýkáme, že je vhodné aby si čtenář sám rozmyslel, který z postupů je vhodnější. Výpočet Stefan-Boltzmannova zákonu by potom měl logicky probíhat s lepším cejchováním žárovky.

4 Postup měření

4.1 Princip fotometru



Obrázek 2: Popis Pulfrichova fotometru.

Pulfrichův fotometr je znázorněn na Obrázku 2. Skládá se v principu ze dvou rovnoběžně postavených dalekohledů se společným okulem (1). Těsně před objektivy (2) jsou umístěny clony (3). Jejich otvory lze měnit otáčením měřících bubnů (4), opatřených podrobnou stupnicí. Černá stupnice značí hodnoty transmise, červená extince. Tyto clony tvoří pupily objektivů. Zorným polem je dvojhranol (5). Změnou otvorů v clonách se mění vjem jasu obrazu. Filtry (6) jsou vloženy mezi dvojhranol a okulár. Optické osy filtrů jsou vzájemně rovnoběžné, jejich vzdálenost je 7 cm. Světelné paprsky vycházejí ze dvou žárovek (8), (9) a procházejí kondenzory (7), které slouží ke kolimaci svazku. Střední paprsky se protínají ve středu dvojhranolu, jež je zaostřen na okulár (1). Tím vzniká kruhové zorné pole, rozdělené jemnou dělicí čarou, přičemž každá polovina je osvětlena jedním z paprsků.

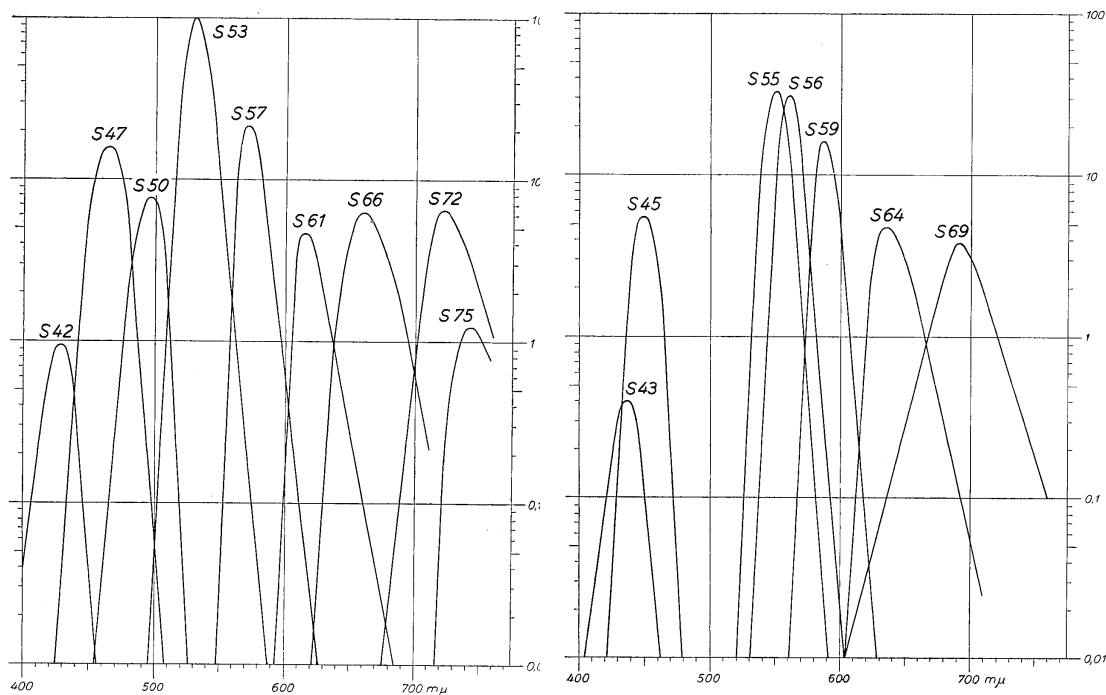
4.1.1 Filtry

Aby bylo možno zjistit závislost transmise na vlnové délce, je fotometr opatřen tzv. S-filtry. Filtry připouštějí pouze velmi úzký obor vlnových délek v rozsahu 20 - 40 nm. Proto je možno pro každý filtr uvést tzv. efektivní vlnovou délku filtru, která je uvedena na jeho obrubě za značkou s dvouciferným znakem. Přidáme-li k číslicím tam uvedeným nulu, dostaneme vlnovou délku v nanometrech. Pulfrichův fotometr má v normálním vybavení filtry uvedené v Tab. 1.

Každý filtr má různé propustné vlastnosti. Příslušné závislosti propustnosti jsou zobrazeny na Obrázku 3.

Číslo filtru	Filtr
1	S - 42
2	S - 43
3	S - 47
4	S - 50
5	S - 53
6	S - 57
7	S - 61
8	S - 66
9	S - 72
10	S - 75

Tabulka 1: Popisek filtrů. Po přenásobení desíti vyjadřuje propuštěnou vlnovou délku.



Obrázek 3: Propustnost filtrů v závislosti na vlnové délce.

4.2 Experimentální uspořádání

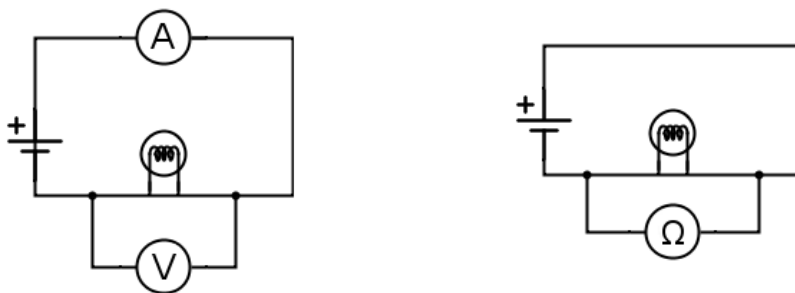
Na optickou lavici umístíte Pulfrichův fotometr, kondenzory a obě žárovky. Žárovky zapojte dle zapojení na Obrázku 4. Držáky kondenzorů zdroje vysunujte nebo zasunujte tak, abyste dostali dva ostré obrazy vlákna žárovky. Pro tyto účely nastavte stupnici filtrů 11 a 12 (budete pozorovat obraz bez filtru). Přitom dbejte, aby výřezy na kondenzorech byly stále otočeny směrem nahoru, abyste do nich mohli po seřízení vsunout matné desky bez dalších manipulací. Celé uspořádání zafixujte pomocí šroubů.

4.3 Cejchování žárovky

Nejprve ocejchujte referenční žárovku s využitím rovnice (9). Pomocí regulovatelného zdroje měňte proud a napětí a měřte odpor žárovky. Výchozí bod R_0 změřte při pokojové teplotě, tedy ještě před zapnutím žárovky. Žárovku ocejchujte pro proud něco málo přes 6 A a nepřekračujte napětí 24 V. Vždy dbejte na to aby výkon (viz rovnice 8), který do žárovky použijete byl menší jak 50 W, jinak žárovka může prasknout!

4.4 Měření teploty žárovky

Do výřezů na kondenzorech vložte desetičky z matného skla. V zorném poli při tom zmizí obrazy vláken a pole se rovnoměrně osvětlí beze stopy struktury vlákna nebo matného skla. Referenční žárovku připojte ke zdroji referenčního napětí (zdroj kterým se žárovka cejchovala). Do druhé žárovky přivádějte 'neznámé' napětí. Na referenčním zdroji nastavte postupně různá napětí a proudy tak, aby třikrát referenční žárovka zářila více než měřená a třikrát méně. Clonku u měření



Obrázek 4: Schéma zapojení žárovky.

žárovky nastavte na vhodnou hodnotu transmise, která je vyznačena černou stupnicí. Tuto hodnotu musíte mít pro všechny filtry konstantní. Postupně měňte filtry 1 - 10 a pro každý filtr postupně měňte otevření clonky příslušející referenční žárovce tak, aby barvy v obou polovinách zorného pole byly stejné a zaznamenejte si hodnoty transmise.

Oko pozorovatele má být při měření přitlačeno těsně k mušli okuláru a má být při všech měřeních přesně v této poloze. Správné poloze hlavy napomáhá slepý okulár pro druhé oko, který se dá přenastavit na levou nebo na pravou stranu.

5 Poznámky

1. Pro měření teplot používejte pouze filtry označené čísly 1 - 10. Rozžhavené žárovky nikdy nepozorujte přes filtry označené 11 a 12! Před každým měřením se rozhodněte, zda-li je potřeba nastavit referenční clonku na hodnotu 100 a případně ji nastavte na hodnotu vhodnou k měření.
2. Filtry označené čísly 1, 2 a 10 nejsou pro měření ideální, zohledněte tuto skutečnost v diskuzi.
3. Nezapomeňte, že Pulfrichův fotometr zobrazuje předmět umístěný na pravé straně do levé poloviny zorného pole.
4. Vada oka do tří dioptrií při měření Pulfrichovým fotometrem se dá vyrovnat okulárem. Při větší vadě by bylo třeba užít předsádkové čočky, která se našroubuje k okuláru.
5. Bod tání wolframu je 3600°C , což je jedna z nejvyšších hodnot pro kovy. Wolfram se používá jako normál, jeho vlastnosti jsou dobře proměřeny a jsou snadno dohledatelné v tabulkách.
6. Při zapnutých žárovkách na vyšší výkon dejte pozor, aby se vám nepálila guma u vodičů.

6 Umím odpovědět na:

1. Jak vypadá Planckův zákon vyjádřený pro vlnové délky?
2. Jaký je tvar konstanty σ v Stefan-Boltzmannově zákonu?
3. Který ze vzorců pro teplotní závislost odporu použijeme a proč?
4. Proč nejsou filtry 1, 2 a 10 ideální pro měření?
5. Kterou část Planckova zákona budeme proměřovat? Rostoucí, okolí maxima, klesající nebo asymptotickou?

7 Literatura:

[1] Kol. katedry fyziky: Fyzikální praktikum II, skriptum, ČVUT, Praha, 1989