22 Tepelné žiarenie

Autor pôvodného textu: **Ondrej Foltin**

Úloha: Z nameranej teplotnej závislosti vyžarovania molybdénového pásika určiť hodnotu Stefanovej – Boltzmannovej konštanty.

Teoretický úvod

Je všeobecne známe, že zohriate telesá vyžarujú elektromagnetické žiarenie. Čím vyššia je teplota telesa, tým viac energie za sekundu vyžiari. **Žiarenie** zohriatych telies nazývame **tepelné**. Pri teplotách telies do ≈ 300 K (telesná teplota) toto žiarenie ešte našimi zmyslami nevnímame, ale citlivé detektory infračerveného žiarenia ho dokážu zaregistrovať. Keď teplota telies začína prevyšovať 300 K, začíname vnímať ich tepelné žiarenie ako sálanie. Pri teplotách presahujúcich ≈ 800 K, ho začiname vnímať ako viditeľné žiarenie.

Tepelné žiarenie telies je dôsledkom pohybu jeho atómov skladajúcich sa z elektricky nabitých častíc.V tuhých látkach atómy kmitajú okolo svojich rovnovážnych polôh tým intenzívnejšie, čím vyššia je teplota telesa. Pri kmitaní sa pohybujú zrýchleným pohybom, a takéto nabité častice vždy vyžarujú elektromagnetické žiarenie. Spektrum tepelného žiarenia je spojité, na rozdiel od čiarového spektra, ktoré je charakteristické pre atómy zriedených plynov, a ktoré vzniká prechodmi elektrónov z vyšších na nižšie hladiny energie.

Tepelné žiarenie telies s teplotou nad 1000 K obsahuje zložku infračervenú (vlnové dĺžky $\lambda > 750$ nm), viditeľnú ($\lambda \approx 350$ nm až 750 nm) a ultrafialovú ($\lambda < 350$ nm).

Pred kvantitatívnym opisom žiarenia je nevyhnutné zaviesť niektoré veličiny.

Žiarivý tok (Φ) predstavuje energiu prenesenú žiarením cez danú plochu za jednu sekundu. Meria sa vo wattoch.

Intenzita vyžarovania (M) vyjadruje energiu vyžiarenú telesom za jednu sekundu z jedného štvorcového metra povrchu. Pritom ide o úhrnnú energiu vyžiarenú na všetkých vlnových dĺžkach. Ak žiarivú energiu označíme písmenom W, potom

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta t \, \Delta S} \tag{22.1}$$

kde ΔS je obsah plochy, z ktorej bola v časovom intervale Δt vyžiarená energia ΔW. Jednotkou intenzity vyžarovania je W/m^2 (watt na štvorcový meter).

Telesá nevyžarujú na všetkých vlnových dĺžkach rovnako, preto bolo potrebné zaviesť veličinu ***spektrálna intenzita vyžarovania*** (M_λ), definovanú vzťahom

$$M_\lambda = \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\lambda} \;. \tag{22.2}$$

Vyjadruje intenzitu vyžarovania pripadajúcu na jednotkový interval vlnovej dĺžky.

Zohriate telesá energiu nielen vyžarujú, ale aj absorbujú, ale nie všetky rovnako. Vo všeobecnosti časť energie dopadajúceho žiarenia sa od povrchu telesa odrazí, časť energie telesom prejde a časť teleso absorbuje. Špeciálnym prípadom by bolo teleso, ktoré by všetko dopadajúce žiarenie pohlcovalo, neodrážalo by ho, ani neprepúšťalo. Takéto fiktívne teleso sa nazýva **absolútne čierne teleso**. Jeho najlepšou realizáciou je malý otvor v telese s dutinou. Žiarenie ktoré otvorom vojde do dutiny sa iba s veľmi malou pravdepodobnosťou dostane otvorom von, takže akoby sa otvorom úplne absorbovalo.

Pomer telesom absorbovaného žiarivého toku a toku naň dopadajúceho, sa nazýva ***absorptancia*** (α). Z tejto definície vyplýva, že absorptancia absolútne čierneho telesa $\alpha_o = 1$. Absorptancia iných telies je menšia ako 1. V stave termodynamickej rovnováhy sa teplota, a teda ani vnútorná energia telesa nemení. Koľko energie pohltí, toľko musí vyžiariť. Preto absolútne čierne teleso, v porovnaní s inými telesami ktoré majú rovnakú teplotu, pohlcuje ale aj vyžaruje najviac energie. Presnejšie, má najvyššiu intenzitu vyžarovania. Pomer intenzít vyžarovania nejakého telesa a absolútne čierneho telesa (pri rovnakej teplote) sa nazýva ***emisivita*** (ε)**.** Pre všetky telesá je menšia ako 1, iba pri absolútne čiernom telese $\varepsilon_o = 1$. V stave termodynamickej rovnováhy sa emisivita každého telesa rovná jeho absorptancii.

Spektrálna intenzita vyžarovania absolútne čierneho telesa ako funkcia vlnovej dĺžky λ a termodynamickej teploty T je vyjadrená **Planckovým zákonom žiarenia**

$$M_{o\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}, \tag{22.3}$$

kde $C_1 = 2\pi hc^2$, $C_2 = hc/k_B$, c je rýchlosť svetla, h Planckova konštanta a k_B Boltzmannova konštanta. Integráciou spektrálnej intenzity vyžarovania cez všetky vlnové dĺžky získame (celkovú) intenzitu vyžarovania absolútne čierneho telesa:

$$M_o = \int_0^\infty M_{o\lambda}\, d\lambda = \ldots = \frac{2\pi^4 k_B^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \tag{22.4}$$

kde $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$ je Stefanova – Boltzmannova konštanta.

Intenzita vyžarovania reálneho telesa je menšia, čo sa vyjadruje pridaním absorptancie telesa (resp. emisivity) do Stefanovho-Boltzmannovho zákona:

$$M = \alpha_t \sigma T^4, \tag{22.5}$$

ale aj v tomto prípade rastie so štvrtou mocninou termodynamickej teploty.

Metóda merania

V laboratóriu nie je k dispozícii absolútne čierne teleso, ale reálne teleso s emisivitou a absorptivitou menšími ako 1. Preto sa pri meraní Stefanovej – Boltzmannovej konštanty musí vychádzať zo vzťahu (22.5). To však znamená, že je nevyhnutné vopred poznať teplotnú závislosť absorptancie príslušného telesa. Ako vyžarujúce teleso slúži molybdénový pásik uložený v sklenej evakuovanej banke. Pásik sa priamo vyhrieva elektrickým prúdom (prechádzajúcim cez pásik) na teploty približne 900 °C až 1400 °C (1200 K až 1700 K). Dodávaný príkon P_E potrebný na udržanie konštantnej teploty je

$$P_E = U\,I\,, \tag{22.6}$$

kde I je prúd prechádzajúci pásikom a U elektrické napätie na pásiku. Výkon P_Z odvádzaný do okolia žiarením je podľa vzťahov (22.1) a (22.5)

$$P_Z = \alpha\, S\, \sigma T^4\,, \tag{22.7}$$

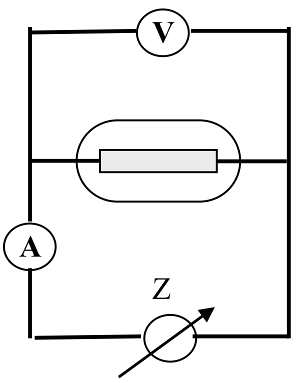
kde $S = 2\,š\,l$ je plošný obsah povrchu pásika (oboch jeho strán – hornej aj spodnej), $š$ jeho šírka a l dĺžka. Vyžarovanie z bočných stien plochého pásika zanedbávme. Z tohto vzťahu, po dosadení ostatných veličín, vypočítame Stefanovu – Boltzmannovu konštantu:

$$\sigma = \frac{UI}{\alpha(T)2\,š\,\ell T^4}\,. \tag{22.8}$$

Opis aparatúry a postup pri meraní

Na obr. 22.1 je schéma zapojenia vyhrievania molybdénového pásika. Regulovateľným zdrojom Z nastavíme takú hodnotu príkonu, aby pásik začal viditeľne žiariť, čo zodpovedá pribl. 900 °C (1200 K). Po nastavení príkonu odčítame hodnoty prúdu I a napätia U. Teplotu pásika odmeriame optickým pyrometrom. Pyrometer zaostríme na meraný pásik, potom stláčaním ovládacích gombíkov (miestnených na čelnej strane pyrometra) meníme žeravenie meracieho vlákna, až kým sa jeho obrysy nestratia na pozadí meraného pásika. Potom na stupnici pyrometra odčítame Celziovu teplotu t_1. Z korekčnej kalibračnej krivky teploty (je umiestnená pri aparatúre) odčítame pre danú teplotu korekciu Δt_1, takže skutočná teplota pásika je

$$t = t_1 + \Delta t_1\,.$$



Obr. 22.1

Termodynamická teplota T pásika (zaokrúhlená) potom je

$$T = t + 273 \text{ (kelvinov).}$$

O presnosti merania teploty sa presvedčíme, keď teplotu pásika zmeriame niekoľkokrát pri nezmenenom príkone.

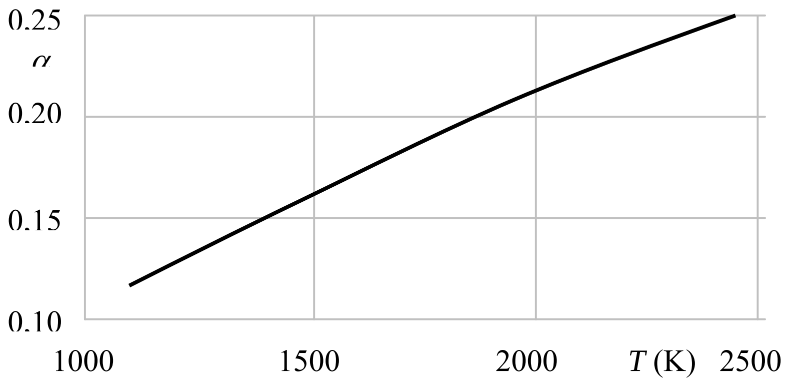
Z druhého grafu nachádzajúceho sa pri aparatúre, odčítame pre danú teplotu príslušnú absorptanciu $\alpha(T)$ molybdénového pásika (schématický obrázok 22.2). Všetky údaje zapíšeme do tabuľky. Meranie opakujeme pri postupne sa zvyšujúcich teplotách pásika, pričom dbáme, aby jeho teplota neprekročila 1400 °C (1700 K).

Tab. 22.1

U (V)	I (A)	t_1 (°C)	Δt_1 (°C)	t (°C)	T (K)	α	σ	δ_S

Pre každú teplotu vypočítame na základe vzťahu (22.8) Stefanovu - Boltzmannovu konštantu a jej relatívnu chybu δ_S, ktorú uvedieme v percentách:

$$\delta_S = \frac{\sigma_{\mathrm{vyp}} - \sigma_{\mathrm{tab}}}{\sigma_{\mathrm{tab}}} \cdot 100 \ .$$



Obr. 22.2

Po vypočítaní všetkých hodnôt si všimneme, či jestvuje súvis medzi veľkosťou chyby a teplotou meranej vzorky. Potom vypočítame aritmetický priemer nameraných hodnôt Stefanovej – Boltzmannovej konštanty a určíme smerodajnú odchylku s_σ aritmetického priemeru.

Výpočet smerodajnej odchýlky

Smerodajnú odchýlku s_σ aritmetického priemeru $\overline{\sigma}$ vypočítame pomocou vzťahu

$s_\sigma = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(\sigma_i - \overline{\sigma})^2}{n(n-1)}}$, kde n je počet nameraných hodnôt, a σ_i je i – ta nameraná hodnota Stefanovej – Boltzmannovej konštanty.

Otázky

1. Meranie ktorej veličiny najviac ovplyvňuje presnosť výsledku?
2. Zmenil by sa výsledok merania, keby závislosť $\alpha(T)$ bola strmšia?
3. Bolo by možné zabepečiť vyhrievanie vzorky menším napätím, ale väčším prúdom?

Meno: Krúžok: Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy 22
Tepelné žiarenie

Stručný opis metódy merania:

Vzťahy ktoré sa používajú pri meraní:

Schéma zapojenia:

Prístroje a pomôcky:

Tab. 22.1

U (V)	I (A)	t_1 (°C)	Δt_1 (°C)	t (°C)	T (K)	α	σ ( )	δ_S
Aritmetický priemer nameraných hodnôt $\overline{\sigma}$								

Výpočet

Tu vpíšte jeden konkrétny výpočet s uvedením hodnôt a rozmerov veličín:

$\sigma\ =$

Výpočet smerodajnej odchýlky s_σ :

Tu uveďte výpočet s rozmermi a číselnými hodnotami veličín:

$s_\sigma =$

Výsledok merania: aritmetický priemer s uvedením neistoty merania:

$\sigma\ =$

Slovné zhodnotenie výsledkov merania:

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta: **Podpis učiteľa:**