

RADIOMETER

Uvod

Segreta telesa sevajo elektromagnetno valovanje. Za večino teles v naravi, ki posedujejo neko kompaktnost, rečemo, da sevajo kot črna telesa. Črno telo je teoretični objekt, ki je popoln sevalec kot prejemnik radiacije. Spekter sevanja takšnega telesa močno zavisi od temperature. Noben objekt ni popolno črno telo, ker ne absorbira vse energije in vse prejete energije ne izseva.

Sevanju črnega telesa rečemo večkrat tudi sevanje votline s popolno odbojnimi stenami, saj ima elektromagnetno polje, z minimalno interakcijo, iz te votline enak spekter.

Spekter sevanja, to je porazdelitev gostote svetlobnega toka po valovni dolžini $dj/d\lambda$ ali frekvenci $dj/d\nu$, je za črno telo podan s *Planckovim zakonom* [1]

$$\frac{dj}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/k\lambda T) - 1}, \quad \frac{dj}{d\nu} = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1}. \quad (1)$$

Krivulje $dj/d\lambda$ si lahko ogledamo na sliki 4. Če želimo zvedeti celoten svetlobni tok izsevan pri neki temperaturi j , moramo integrirati porazdelitev $dj/d\lambda$ in dobimo Stefanov zakon

$$j = \int (dj/d\lambda) d\lambda = \sigma T^4$$

pri čemer je $\sigma = 56.7 \text{ nW/m}^2\text{K}^4$. Vrh spektra pri poljubni temperaturi T pa dobimo s pomočjo *Wienovega zakona*

$$\lambda_0 T = C_1, \quad \nu_0 = C_2 T$$

kjer je $C_1 = 0.002898 \text{ mK}$ in $C_2 = 103.448 \text{ MHz/m}$. Pri temperaturi 300 K je vrh spektra izsevanega valovanja pri valovni dolžini $\lambda_0 = 9.7 \text{ }\mu\text{m}$ in večina energijskega toka pade v dolgovalovno infrardeče področje. Vrednosti λ_0 v področju vidne svetlobe ustrezajo telesom s temperaturo okoli 5000 K.

Tabela 1: Nomenklatura območij valovnih dolžin elektromagnetnega valovanja.

interval valovnih dolžin	oznaka področja	okrajšava
25-200 nm	vakuumska ultravijolična svetloba	VUV
200-400 nm	ultravijolična svetloba	UV
400-700 nm	vidna svetloba	VIS
700-1000 nm	bližnje infrardeče področje	NIR
1-3 μm	kratkovalovno infrardeče področje	SWIR
3-5 μm	srednjevalovno infrardeče področje	MWIR
5-14 μm	dolgovalovno infrardeče področje	LWIR
14 -30 μm	zelo dolgovalovno infrardeče področje	VLWIR
30-100 μm	daljne infrardeče področje	FIR
100-1000 μm	submilimetrsko področje	SubMM

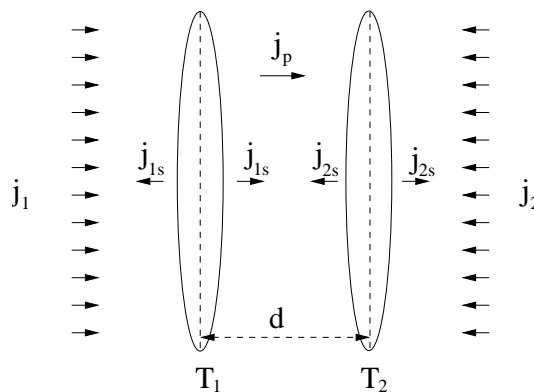
Za detekcijo sevanja v področju valovnih dolžin od 4 do 10 μm uporabljamo predvsem termične detektorje, pri katerih zaznavamo spremembo temperature detektorja

pod vplivom sevanja. Najbolj znani termični detektorji so termočleni, bolometri (termistorji) in piroelektrični senzorji.

Termočlen je sestavljen iz dveh žičk iz različnih kovin, ki sta na koncih spojeni med seboj. Na spoju pride do prelivanja elektronov iz ene kovine v drugo, zato se med njima pojavi napetost. Ta napetost je odvisna od temperature spoja. Če enega od spojev držimo pri standardni temperaturi, drugega pa na merilnem mestu z neznano temperaturo, je razlika napetosti med stikoma v grobem sorazmerna z razliko njunih temperatur. Na ta način dobimo zelo priročen termometer. Če nato enega od stikov primerno oblikujemo in počrnimo, lahko termočlen neposredno uporabimo za detekcijo termičnega sevanja. V principu termočlen dobimo skoraj vedno, ko staknemo dve raznorodni prevodni snovi. Zato poznamo veliko tipov, ki se razlikujejo po natančnostih, območjih delovanja in občutljivosti na zunanje vplive (kemijske, mehanične itd.). V fizikalnih praktikumih se pogosto uporablja termočlen s spojem baker-konstantan znan pod imenom tip T.

Termočlene odlikujeta zelo enakomerna spektralna občutljivost in stabilnost. Njihova šibka stran pa je relativno počasen odziv (odzivni čas $\tau \approx 50$ ms), zato so uporabni predvsem za statične meritve, pri katerih se osvetlitev s časom ne spreminja. Če več termočlenov zaporedno zvežemo v verigo, dobimo zelo občutljiv termični detektor (thermopile), ki dosega odzivne napetosti do 1 kV/W.

Radiometer, ki ga uporabljamo pri vaji, deluje na primerjalni način in shema le-tega je prikazana na sliki 1. Z njim zaznavamo razliko med gostoto svetlobnega toka j_1 , ki pada na sprednjo stran in med gostoto svetlobnega toka j_2 , ki pada na zadnjo stran radiometra. Sestavljen je iz dveh vertikalnih črnih plošč, med katerima je zrak. Če gostoti svetlobnih tokov nista enaki, imata črni plošči v ravnovesju različni temperaturi T_1 in T_2 . Razliko temperatur $\Delta T = T_1 - T_2$, ki je v prvem približku sorazmerna razliki gostote svetlobnih tokov $\Delta j = j_1 - j_2$, merimo s termočlenom.



Slika 1: Shema radiometra.

Energija med ploščama se izmenjuje s sevanjem (na sliki j_{1s} in j_{2s}) in s toplotnim tokom zaradi toplotne prevodnosti zraka med ploščama (na sliki j_p). Prevajanje in konvekcijo na zunanji strani plošč zanemarimo. Če privzamemo, da sta obe plošči idealni črni telesi, dobimo za ΔT v stacionarnem stanju izraz (izpelji doma):

$$\Delta T \doteq \frac{\Delta j}{12\sigma\bar{T}^3 + 2\frac{\lambda}{d}}$$

kjer je \bar{T} povprečna temperatura plošč, λ toplotna prevodnost zraka in d razdalja med ploščama. Pri računanju privzamemo, da je $\Delta T \ll \bar{T}$.

Naš radiometer je sestavljen iz dveh črnih ploščic izdelanih iz počrnjenega papirja in pritrjenih v aluminijast obroč. Preko obroča je povezana polietilenska folija, ki preprečuje konvekcijo. Na črn papir sta pritrjena spoja termoelementa: baker-konstantan. Termonapetost ΔU , ki je proporcionalna temperaturni razliki na spojih ΔT , merimo z mikrovoltmetrom. Občutljivost termoelementa je enaka $\Delta U/\Delta T = 41 \mu\text{V/K}$.

Potrebščine

- Radiometer z merilnim termočlenom preko ojačevalca (glej dodatek) vezanim na voltmeter
- žarnica, grelna plošča z merilcem temperature, variak
- ravnilo, multimeter
- okna iz različnih snovi (silicij, teflon, navadno steklo, pleksi steklo in kremenovo steklo)

Naloga

1. Preveri, da gostota svetlobnega toka točkastega svetila pada s kvadratom razdalje od svetila.
2. Preveri temperaturno odvisnost gostote izsevanega svetlobnega toka, da le-ta ustreza Stefanovem zakonu $j^* = \sigma T^4$.
3. Določi prepustnost nekaterih snovi za termično sevanje žarnice in kuhalnika pri dveh različnih temperaturah.

Navodilo

1. Voltmeter kaže za nek faktor (predvidoma 20.000) ojačano napetost ΔU , ki je proporcionalna razliki gostote svetlobnega toka z desne in z leve strani radiometra: $\Delta U = C \Delta j$. Sorazmernostna konstanta C je podana z občutljivostjo termoelementa in lastnostmi ojačevalca ter s prej navedeno zvezo med ΔT in Δj . Odvisna je od povprečne temperature \bar{T} , ki pa je vedno zelo blizu sobne, zato lahko C smatramo za nespremenljivo pri celi meritvi. Ker so naše meritve primerjalne, nam konstante C ni treba kvantitativno določiti.

Prižgi žarnico, postavljeno na razdalji $d = 1$ m od radiometra, počakaj približno 1 minuto, da se vzpostavi ravnovesje in ponovno odčitaj vrednost, ki jo kaže mikrovoltmeter. Ponovi meritev pri razdaljah $d = 0.2, 0.23, 0.27, 0.32, 0.38, 0.44, 0.52, 0.61, 0.72, 0.85$ in 1 m. Nariši diagram gostote svetlobnega toka v odvisnosti od obratne vrednosti kvadrata razdalje.

2. Počrnjeno grelna ploščo postavi približno 30 cm od radiometra in jo segrej do največ 250 °C. Temperaturo grelne plošče razbereš iz dodatnega merilca temperature – multimeter s termoelementom in pretvornikom napetosti iz termoelementa v temperaturo. Termoelement pripadajoč multimetru je tipa K, ki predstavlja spoj zlitin cromel-a (90/10 Ni/Cr) in alumel-e (95/5 Ni/Al) z občutljivostjo 41 $\mu\text{V/K}$ in je splošno uporaben ter zelo razširjen. Merjenje temperature poteka z natančnostjo podano v spodnji tabeli:

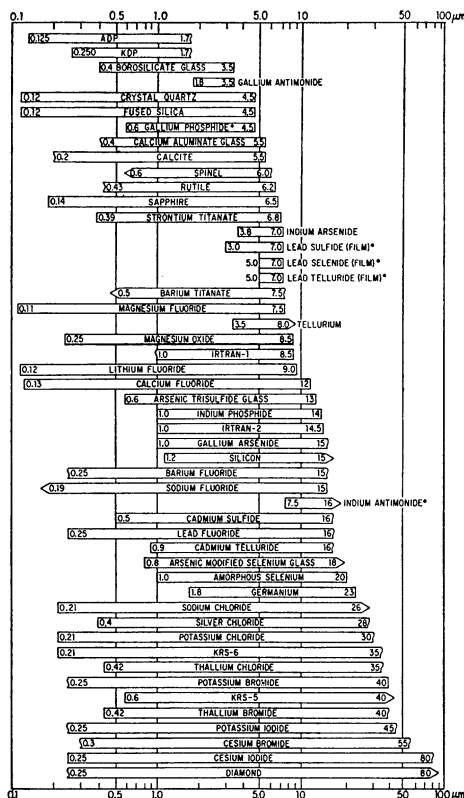
temperaturni intervali [°C]	natančnost	resolucija [°C]
-50 do 400	$\pm 0.75 \%$, ± 3 °C	1
400 do 1000	$\pm 1.5 \%$, ± 15 °C	1
0 do 40	± 2 °C	1

Pri segrevanju nastavi variabilni transformator (variak) na največ 140 V. Pri ohlajanju naj bo variac nekaj časa na 70 V, nato pa na nič. Med ohlajanjem si zapisuj vrednosti obeh termonapetosti. Nariši diagram gostote svetlobnega toka $j(T)$, ki ga seva grelna plošča, v odvisnosti od $T^4 - T_0^4$, pri čemer je T_0 sobna temperatura, T pa temperatura plošče (v K).

3. Med grelna ploščo in radiometer postavi plošče iz različnih materialov (steklo, pleksi steklo, papir ...) in določi njihovo prepustnost. Gostota svetlobnega toka j pri dani valovni dolžini λ se ob prehodu skozi snov debeline L spremeni iz začetne vrednosti j_0 v j_1 po formuli

$$j_1(\lambda) = j_0(\lambda) T(\lambda, L), \quad T(\lambda, x) = t(\lambda) e^{-\mu(\lambda)x}$$

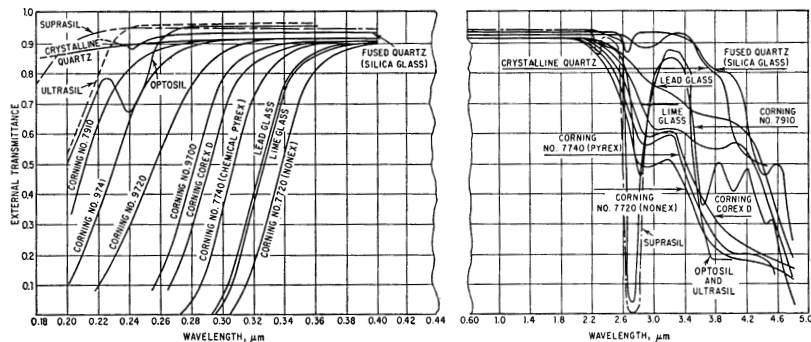
kjer je $t(\lambda)$ koeficient transmitivnosti - količnik koliko svetlobnega toka se ne odbije, in μ absorpcijski koeficient. Tukaj je smiselno uvesti izraza zunanja prepustnost in interna prepustnost. Prvi je rezultat refleksije kot absorpcije in definiran s $T(\lambda, L)$, drugi pa je odvisen le od absorpcije in dan z $e^{-\mu(\lambda)L}$. Območja večje prepustnosti za različne snovi so prikazana na sliki 3.



Slika 2: Območja valovnih dolžin za različne snovi, kjer je zunanja prepustnost 2 mm debele plošče večja od 10 %. Znotraj meja je snov "prozorna", zunaj pa "neprozorna"

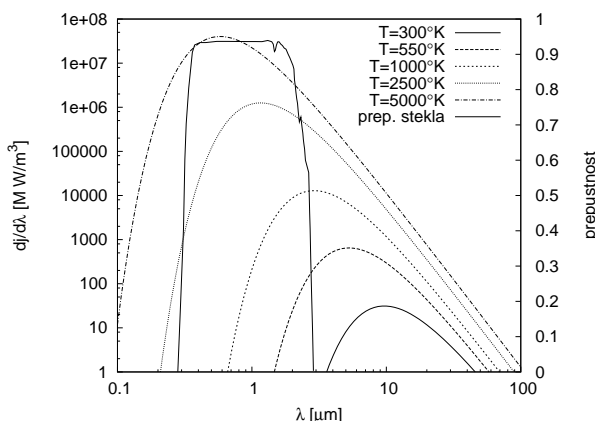
V območju ultravijolične svetlobe ima večina izolatorjev in polprevodnikov velik absorpcijski koeficient ($\mu > 10^5 \text{ m}^{-1}$), zato tam ne prepuščajo elektromagnetnega valovanja. Do absorpcije pride zaradi vzbujanja elektronskih prehodov zunanjih elektronov v atomih oz. zaradi prehoda elektronov iz valenčnega v prevodni pas. Svetloba nekoliko

daljših valovnih dolžin teh prehodov ne more več povzročiti, zato snovi postanejo prozorne. Okno prozornosti se konča v infrardečem področju, ko postane frekvenca svetlobe primerljiva s frekvenco molekularnih in atomskih nihanj, se pravi z vibracijskimi nivoji v snovi. Takrat se absorpcijski koeficient znova močno poveča. Opisano se tudi lepo vidi s slike 2. Prepustnost je v grobem eksponentno pada z večanjem absorpcijskega koeficienta in je zato je kot funkcija valovne dolžine ali frekvence približno škatlaste oblike, kar si lahko za nekaj stekel in prevlek ogledamo na sliki 3.



Slika 3: Zunanja prepustnost $T(\lambda)$ za različna stekla verjetno enakih debelin. [2]

Interval valovnih dolžin, na katerem je material prozoren, se od snovi do snovi močno razlikuje, glej sliko 2. Okensko steklo, denimo, ima prepustnost približno 92% v spektralnem pasu od okoli 350 nm do 4.5 μm , glej sliko 4. Zato prepušča večino energijskega toka termičnega sevanja pri 5000 K, odbija pa skoraj ves energijski tok sevanja pri 300 K. To lastnost izkoriščamo pri rastlinjakih (toplih gredah). Silicij, po drugi strani, pa odbija vso vidno svetlobo in prepušča v infrardečem področju na intervalu od 1.2 μm do 15 μm . Najširše območje prozornosti ima diamant, ki prepušča elektromagnetno valovanje od valovne dolžine 250 nm pa vse do 100 μm .



Slika 4: Spekter termičnega sevanja pri različnih temperaturah podan s Planckovo formulo (1) in prepustnost tipičnega optičnega stekla (BK7 steklo) debeline 10mm.

Ob upoštevanju zapisanega vemo, da z našim radiometrom merimo gostoto svetlobnega toka podano kot

$$j = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dj}{d\lambda} d\lambda,$$

pri čemer sta λ_{\min} in λ_{\max} določeni s prepustnostjo folije, ki obdaja radiometer oz. z barvo, s katero so počrnjene njegove plošče. Izmeri razmerje med gostoto vpadnega in prepuščenega svetlobnega toka skozi različne snovi. Pri isti snovi primerjaj med seboj rezultate, dobljene z različnimi izvori sevanja, denimo z žarnico ($T \approx 2500$ K) in z grelno ploščo ($T \approx 550$ K).

Literatura

- [1] Kuščer I. in Kodre A., *Matematika v fiziki in tehniki* (DMFA, Ljubljana 1994)
- [2] Gray D.E. , *American Institute of Physics handbook* (McGraw-Hill, New York, 1972)

Dodatek: Vezje ojačevalca v uporabi

