

Sevanje črnega telesa

Tadej Strah

24. maj 2022

Izvedeno 16.5.2022

1 Uvod

Gostota energije elektromagnetnega valovanja z neko frekvenco ν v votlini pri konstantni temperaturi T je podana s Planckovo formulo:

$$w(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1},$$

kjer je ν frekvenca valovanja, h Planckova konstanta in c hitrost svetlobe v vakuumu. Iz tako votline izhaja skozi majhno luknjo najboljši približek sevanja črnega telesa. Gostota energijskega toka skozi luknjico z neko frekvenco je

$$j(\nu, T) = \frac{1}{4} c w(\nu, T).$$

Iz luknjice svetloba seva v prostor po Lambertovem kosinusnem zakonu. Tudi wolframska nitka v žarnici je dober približek. Za primerjavo, sončna radiacija je približno črno telo pri 5800K. S to vajo bomo merili sevanje wolframske nitke v halogeni žarnici, ki ji lahko spreminjamo temperaturo v zelo širokem obsegu. Z absolutnim merilnikom sevanja bomo določili celoten energijski tok, ki ga seva žarnica in ga primerjali z močjo, ki jo troši.

2 Naloga

1. Izmerite odvisnost svetlobnega toka halogene žarnice v razponu od rahlega žarenja do maksimalne moči. Pri tem merite tudi moč, ki se troši na žarnici.
2. Narišite graf celotne izseva moči kot funkcijo električne moči.
3. Določite električno upornost žarnice kot funkcijo temperature.
4. Narišite graf razmerja j_{Si}/j_0 kot funkcijo temperature žarilne nitke.

3 Potrebščine

- merilec moči (wattmeter in električni multimeter)
- halogena žarnica nazivne moči 30W z nazivno barvno temperaturo 2700K
- nastavljiv transformator - variac
- merilnik sevanja
- plošča iz kristalnega silicija

4 Izvedba meritev, obdelava podatkov in rezultati

Najprej izmerimo upornost hladne žarnice (pri cca. 25°C) - $R_{25C} = 125\Omega$. Nato žarnico priklopimo na njeno nominalno napetost (torej na 220V) in jo postavimo na tako razdaljo, da je meritev svetlobnega toka na bolometru znotraj merilnega območja. Izbrana razdalja je $d = (17.5 \pm 0.5)\text{cm}$. Napaka te meritve izhaja predvsem iz dejstva, da žarilna nitka ni ploščata (oz. okrogla) in tako tudi razdalja ni konstantna, ter nenatančnosti merjenja z navadnim merilnim trakom.

Iz znane površine bolometra ($S_0 = 1\text{cm}^2$), gostote svetlobnega toka na njem in razdalje od svetila lahko iz ohranitve energijskega toka izračunamo celotno izsevano moč žarnice:

$$P = (P_\gamma - P_b) \frac{4\pi d^2}{S_0},$$

kjer je P_γ izmerjena moč na bolometru, P_b pa sevanje ozadja (torej sončna svetloba v prostoru, saj meritve nismo izvajali v temi).

Narišemo graf celotne izsevane moči v odvisnosti od električne moči, ki se troši na žarnici - ta podatek direktno merimo z wattmetrom.

Rezultat vidimo na grafu 1.

Ob predpostavki, da ima izbrana žarnica pri nominalni napetosti temperaturo $T_{max} = 2700\text{K}$, lahko iz Štefanovega zakona izračunamo efektivno površino žarilne nitke

$$S_{nitka} = \frac{P_{max}}{\sigma T_{max}^4} = (1.02 \pm 0.06) \cdot 10^{-5} \text{m}^2.$$

Zdaj lahko v obratni smeri določimo temperaturo nitke pri vseh merskih točkah. Iz meritev napetosti in toka skozi merilno nitko pa določimo upornost wolframske nitke.

Narišemo graf upornosti v odvisnosti od temperature, ki ga vidimo na sliki 2.

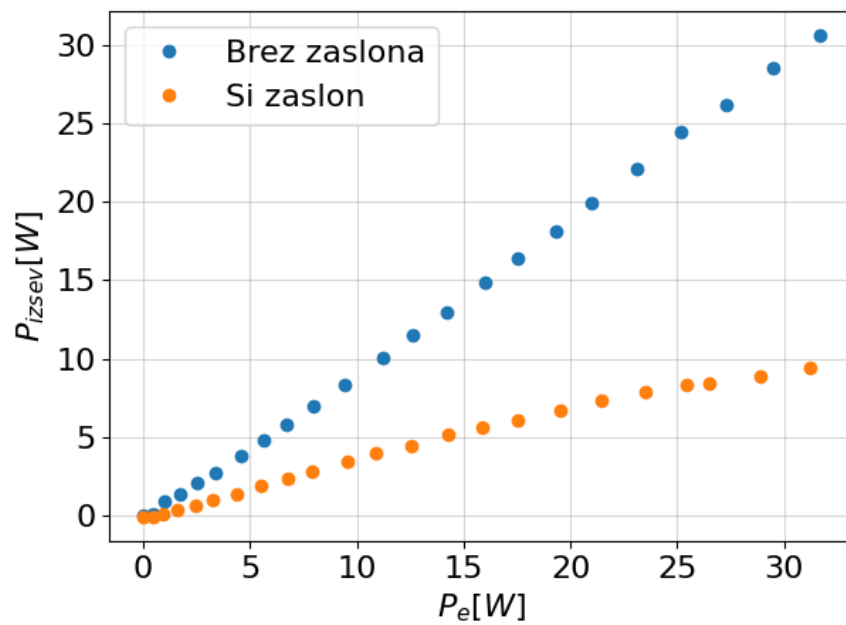
Odvisnost je linearna pri visokih temperaturah, in malo odstopa pri nizkih. Večje odstopanje bi tudi pričakovali pri zelo nizkih temperaturah blizu absolutne ničle, saj trenuten trend nakazuje, da bi pri absolutni ničli izmerili negativno upornost, kar pa ni fizikalno smiselno.

Sedaj med detektor in žarnico postavimo silicijev zaslon. Predpostavimo, da je prepustnost Si stopničasta funkcija s stopnico pri 1.1eV (valovna dolžina cca. 1100nm). Primer meritve prepustnosti prikazuje graf 3. Planckov zakon lahko integriramo numerično od 0 do mejne frekvence ν_0 , ko Si ne prepušča več svetlobe. To naredimo tako, da vpeljemo novo spremenljivko $y = h\nu/kT$ in dobimo prepuščeno moč kot integral v obliki

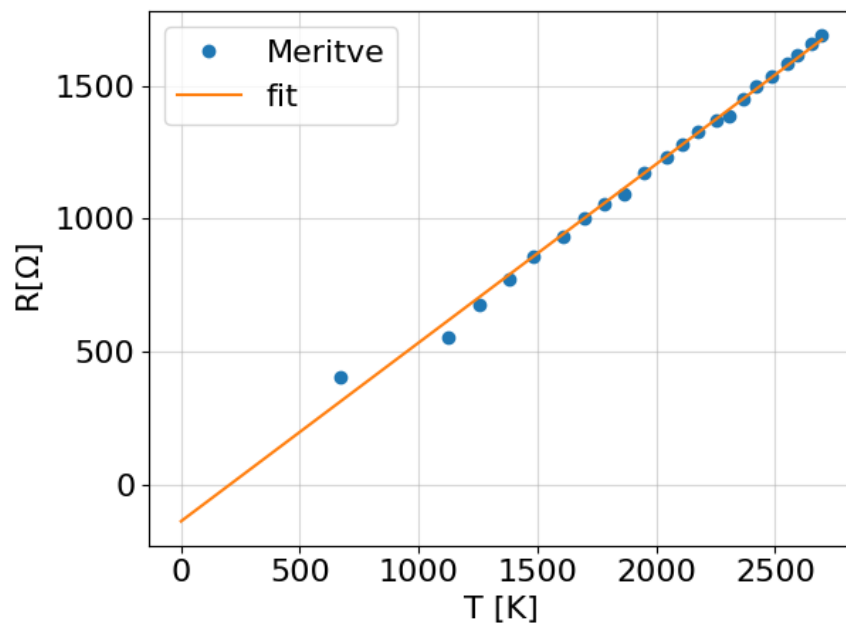
$$P(T) = P \int_0^{h\nu_0/kT} \frac{y^3}{\exp(y) - 1} dy.$$

Delež prepuščenega toka je za temperature nižje od 3000K podan z oceno

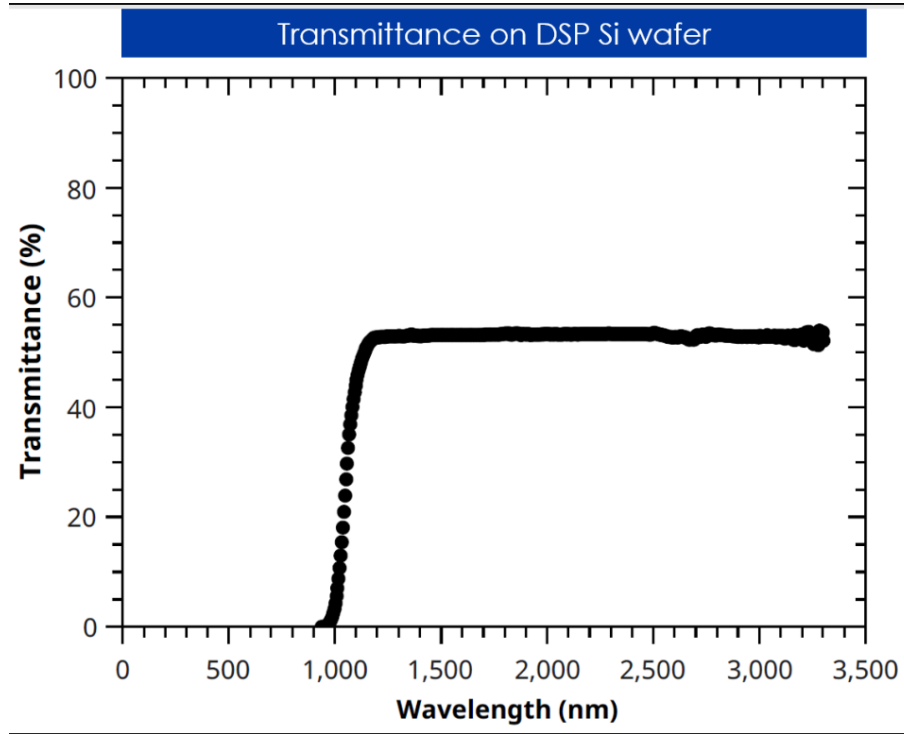
$$\frac{P(T)}{P} = 1 - \frac{15}{\pi^4} [-y^3 \ln(1 - e^{-y}) + (6 + 6y + 3y^2)e^{-y}] + O(e^{-y}), \quad y = \frac{1.1\text{eV}}{kT}$$



Slika 1: Izmerjena izsevna moč v odvisnosti od trošene električne moči.



Slika 2: Odvisnost upornosti od temperature.



Slika 3: Prepustnost silicijeve plasti

Prepustnost se manjša z večanjem temperature, saj se glavnina Planckove porazdelitve premika izven frekvenčnega okna prepustnosti Si.

Za bolj natančen model moramo upoštevati še izgube zaradi loma na površinah zaslona; podaja jih faktor

$$T = \frac{2n}{n^2 + 1},$$

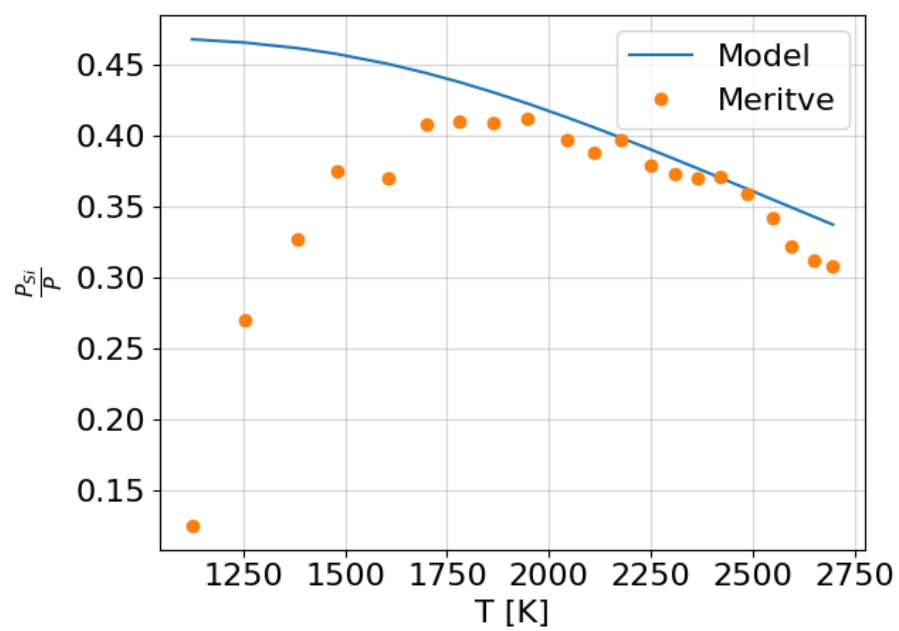
kjer je T transmissivnost ali prepustnost, n pa lomni količnik.

Celotna prepustnost je tedaj enaka

$$\frac{P_{Si}}{P} \approx \frac{2n}{n^2 + 1} \left(1 - \frac{15}{\pi^4} [-y^3 \ln(1 - e^{-y}) + (6 + 6y + 3y^2)e^{-y}] \right)$$

Izmerjen prepuščen svetlobni tok skozi silicijev zaslon vidimo poleg meritev nemotenega svetlobnega toka na grafu 1, njuno razmerje pa na grafu 4

Imamo meritve P in P_{Si} v odvisnosti od temperature, na katere lahko prilagodimo modelsko krivuljo in izračunamo lomni količnik : $n = 4.6$.



Slika 4: Razmerje tokov j/j_{Si} v odvisnosti od temperature.