



## Fizikalni praktikum IV

### Poročilo

# Vaja: Sevanje črnega telesa

Simon Bukovšek

Datum vaje: 27. februar 2023  
Datum oddaje poročila: 6. marec 2023

## 1 Teoretični uvod

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

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

ker je  $h$  Planckova konstanta,  $k$  Boltzmannova konstanta in  $c$  hitrost svetlobe v vakuumu. Iz take votline izhaja skozi majhno luknjo najboljši približek sevanja črnega telesa. Gostota energijskega toka skozi luknjico z neko frekvenco je

$$j(\nu, T) = \frac{1}{2} cw(\nu, T).$$

Da dobimo celotni izsev, integriramo porazdelitev po vseh valovnih dolžinah:

$$j = P/S = \int_0^\infty j(\nu, T) \nu = \sigma T^4,$$

kjer je  $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta.

## 2 Pripomočki

- Merilec moči – wattmeter in električni multimeter;
- halogena žarnica nazivne moči 30 W z nazivno barvno temperaturo 2700 K;
- nastavljiv transformator – variac;
- merilnik sevanja – bolometer;
- plošča iz kristalnega silicija.

### 3 Meritve

Najprej smo z multimetrom izmerili upornost žarnice pri sobni temperaturi ter nastavili bolometer na tako razdaljo, da je pri največji moči žarnice kazal vrednost v zgornji polovici svoje skale. Nato smo variac priklopili na wattmeter in ga vezali na žarnico. Merili smo tok in napetost na žarnici ter svetlobno moč na bolometru pri različnih električnih močeh na žarnici – od 40 W po korakih približno 2 W do nič moči. Pri vsaki moči smo po meritvi z bolometrom med žarnico in senzor postavili še ploščo iz kristalnega silicija (silicijevo okno) in odmerili, kakšno moč zaznava bolometer, ko meri skozi oviro.

### 4 Izmerjeni podatki

Razdalja med žarnico in senzorjem je bila  $d = (24.0 \pm 0.2)$  cm, upornost žarnice pri sobni temperaturi pa  $R_0 = (120 \pm 1) \Omega$  in velikost senzorja bolometra  $S_0 = 1 \text{ cm}^2$ . Pri različnih električnih močeh na žarnici ( $P_{\text{el}}$ ) smo izmerili napetost ( $U$ ) in tok ( $I$ ) skozi žarnico ter svetlobno moč na senzorju brez ovire ( $P_{\text{sv}}$ ) in skozi silicijevo okno ( $P_{\text{Si}}$ ). Meritve so podane v spodnji tabeli. Zadnja vrstica je bila izmerjena pri ugasnjeni žarnici, torej so meritve na svetlobnem senzorju meritve ozadja.

$n$	$P_{\text{el}}$ [W] ( $\pm 0.1$ W)	$U$ [V] ( $\pm 0.5$ V)	$I$ [mA] ( $\pm 0.5$ mA)	$P_{\text{sv}}$ [mW] ( $\pm 0.01$ mW)	$P_{\text{Si}}$ [mW] ( $\pm 0.01$ mW)
1	39.9	266.0	148.1	6.39	2.70
2	38.0	260.0	146.1	6.19	2.63
3	36.0	251.2	143.3	5.90	2.56
4	33.9	241.6	140.4	5.59	2.47
5	31.9	232.4	137.5	5.13	2.32
6	30.0	222.8	134.3	4.83	2.22
7	27.9	212.5	131.1	4.52	2.13
8	26.0	202.2	127.6	4.23	2.03
9	24.0	192.4	124.3	3.94	1.96
10	22.1	182.9	120.3	3.68	1.86
11	20.1	171.3	116.8	3.37	1.75
12	18.0	159.9	112.6	3.06	1.65
13	16.0	148.1	108.0	2.79	1.54
14	14.0	135.7	103.1	2.49	1.44
15	12.1	123.7	98.2	2.23	1.34
16	10.0	108.5	91.6	1.93	1.22
17	7.9	93.6	84.6	1.64	1.09
18	6.0	78.2	77.0	1.39	0.97
19	4.1	60.7	67.4	1.14	0.85
20	2.0	37.7	52.9	0.90	0.74
21	0.0	0.0	0.0	0.77	0.67

### 5 Analiza podatkov

Od meritev bolometra je bilo najprej treba odšteti svetlost ozadja in nato preračunati na izsev po vseh prostorskih kotih. Ker nismo naredili meritev v različnih smereh bomo predpostavili, da žarnica seva v vse smeri enako, torej velja enačba

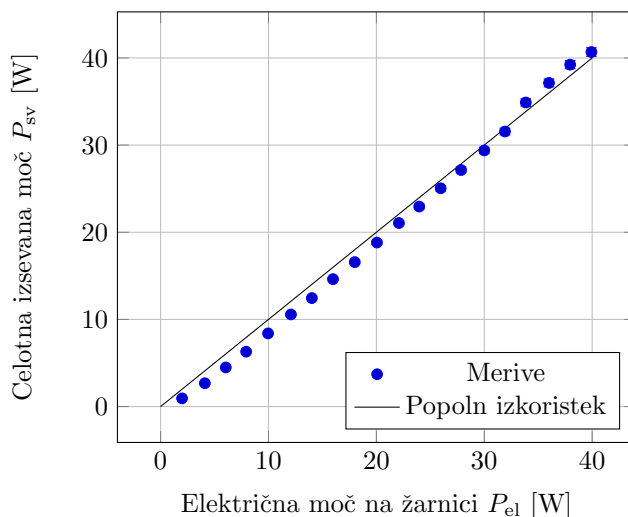
$$P_{\text{sv,tot}} = P_{\text{sv,izm,pop}} \frac{4\pi d^2}{S_0},$$

kjer je  $P_{\text{sv,tot}}$  skupen izsev žarnice,  $P_{\text{sv,izm,pop}}$  za ozadje popravljena meritev na bolometru,  $d$  razdalja od bolometra do žarnice in  $S_0$  površina senzorja. V spodnji tabeli so podane za ozadje popravljene meritve bolometra ( $P_{\text{sv,pop}}$ ,  $P_{\text{Si,pop}}$ ) in preračunani skupni izsevi ( $P_{\text{sv,tot}}$ ,  $P_{\text{Si,tot}}$ ). V zadnjem stolpcu je še razmerje med izmerjenim popravljenim svetlobnim tokom skozi silicijevo okno in mimo njega, ki bo uporabno kasneje.

$n$	$P_{sv,pop}$ [mW] ( $\pm 0.014$ mW)	$P_{Si,pop}$ [mW] ( $\pm 0.014$ mW)	$P_{sv,tot}$ [W]	$P_{Si,tot}$ [W]	$P_{Si,pop}/P_{sv,pop}$
1	5.62	2.03	$40.7 \pm 0.5$	$14.7 \pm 0.2$	$0.361 \pm 0.003$
2	5.42	1.96	$39.2 \pm 0.5$	$14.2 \pm 0.2$	$0.362 \pm 0.003$
3	5.13	1.89	$37.1 \pm 0.4$	$13.7 \pm 0.2$	$0.368 \pm 0.003$
4	4.82	1.80	$34.9 \pm 0.4$	$13.0 \pm 0.2$	$0.373 \pm 0.003$
5	4.36	1.65	$31.6 \pm 0.4$	$11.9 \pm 0.2$	$0.378 \pm 0.003$
6	4.06	1.55	$29.4 \pm 0.4$	$11.2 \pm 0.2$	$0.382 \pm 0.004$
7	3.75	1.46	$27.1 \pm 0.3$	$10.6 \pm 0.2$	$0.389 \pm 0.004$
8	3.46	1.36	$25.0 \pm 0.3$	$9.8 \pm 0.2$	$0.393 \pm 0.004$
9	3.17	1.29	$22.9 \pm 0.3$	$9.3 \pm 0.1$	$0.407 \pm 0.005$
10	2.91	1.19	$21.1 \pm 0.3$	$8.6 \pm 0.1$	$0.409 \pm 0.005$
11	2.60	1.08	$18.8 \pm 0.2$	$7.8 \pm 0.1$	$0.415 \pm 0.006$
12	2.29	0.98	$16.6 \pm 0.2$	$7.1 \pm 0.1$	$0.428 \pm 0.007$
13	2.02	0.87	$14.6 \pm 0.2$	$6.3 \pm 0.1$	$0.431 \pm 0.008$
14	1.72	0.77	$12.4 \pm 0.2$	$5.6 \pm 0.1$	$0.448 \pm 0.009$
15	1.46	0.67	$10.6 \pm 0.2$	$4.8 \pm 0.1$	$0.459 \pm 0.011$
16	1.16	0.55	$8.4 \pm 0.1$	$4.0 \pm 0.1$	$0.474 \pm 0.013$
17	0.87	0.42	$6.3 \pm 0.1$	$3.0 \pm 0.1$	$0.483 \pm 0.018$
18	0.62	0.30	$4.5 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$	$0.484 \pm 0.025$
19	0.37	0.18	$2.7 \pm 0.1$	$1.3 \pm 0.1$	$0.486 \pm 0.042$
20	0.13	0.07	$0.9 \pm 0.1$	$0.5 \pm 0.1$	$0.538 \pm 0.122$

Nekateri skupni izsevi žarnice so bili izračunani večji, kot je bila električna moč na žarnici. To pomeni, da žarnica ne seva povsem izotropno, in da bolj seva v ekvatorialni ravnini, kjer je bil senzor. Prikaz odvisnosti izseva od električne moči je na spodnjem grafu. Na grafu je narisana tudi črta  $y = x$ , ki označuje popoln izkoristek.

Odvisnost celotne izsevane moči na žarnici od električne moči



Upornost na žarnici se izračuna povsem preprosto:  $R = U/I$ . Za izračun temperature pa bi potrebovali površino žarilne nitke, ki bi jo lahko uporabili v Stefan-Boltzmannovem zakonu  $P/S = \sigma T^4$ , kjer je  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Ker površine nimamo, vendar ostaja pri vseh merivah konstantna, lahko uporabimo zvezo  $T^4/P = \text{konst.}$ . Vemo, da ima pri nazivni moči  $P_0 = 30 \text{ W}$  žarnica temperaturo  $T_0 = 2700 \text{ K}$ . Tako temperaturo žarnice izračunamo po formuli

$$T = T_0 \sqrt[4]{\frac{P_{el}}{P_0}}$$

Izračunane temperature ( $T$ ) in upornosti žarnice so podane v spodnji tabeli.

$n$	$T$ [K]	$R$ [ $\Omega$ ]
1	$2900 \pm 7$	$1796 \pm 7$
2	$2864 \pm 8$	$1780 \pm 7$
3	$2826 \pm 8$	$1753 \pm 7$
4	$2783 \pm 8$	$1721 \pm 7$
5	$2742 \pm 9$	$1690 \pm 7$
6	$2700 \pm 9$	$1659 \pm 7$
7	$2650 \pm 10$	$1621 \pm 7$
8	$2604 \pm 10$	$1585 \pm 7$
9	$2553 \pm 11$	$1548 \pm 7$
10	$2501 \pm 11$	$1520 \pm 8$
11	$2441 \pm 12$	$1467 \pm 8$
12	$2376 \pm 13$	$1420 \pm 8$
13	$2307 \pm 14$	$1371 \pm 8$
14	$2232 \pm 16$	$1316 \pm 8$
15	$2151 \pm 18$	$1260 \pm 8$
16	$2050 \pm 21$	$1184 \pm 8$
17	$1936 \pm 24$	$1106 \pm 9$
18	$1809 \pm 30$	$1016 \pm 9$
19	$1642 \pm 40$	$901 \pm 10$
20	$1370 \pm 69$	$713 \pm 12$
21	$294 \pm 2$	$120 \pm 1$

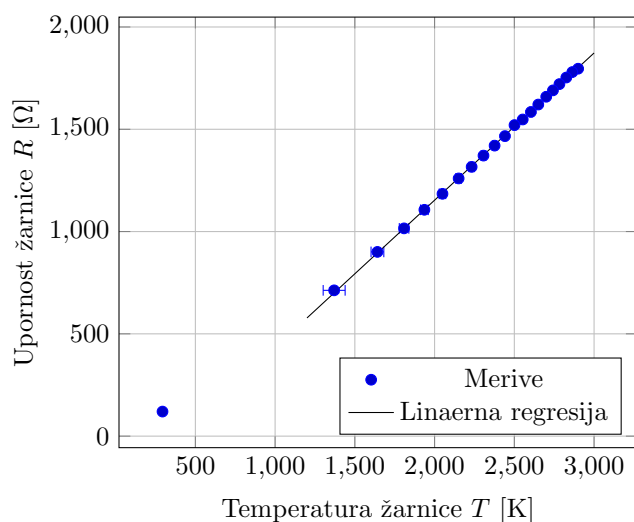
Na spodnjem grafu je prikazana odvisnost upornosti žarnice od njene temperature. Vsi razen zadnjega podatka se zelo dobro prilegajo premici  $R = a + bT$ , kjer sta izmerjeni konstanti enaki

$$a = (-286 \pm 11) \Omega$$

in

$$b = (0.719 \pm 0.004) \Omega \text{ K}^{-1}.$$

Odvisnost upornosti žarnice od njene temperature



Za konec bomo narisali še deleža prepuščene svetlobe skozi silicijevo okno v odvisnosti od temperature in ga primerjali z teoretičnim modelom. V modelu lahko upoštevamo notranje odboje znotraj silicija ali pa ne. Za oba primera so rezultati modelov prikazani v spodnji tabeli in skupaj z meritvami na spodnjem grafu.

Kot je razvidno z grafa, je model z odboji zelo natančen.

$T$ [K]	prepustnost (brez odbojev) $\mathcal{T}_1$	prepustnost (z odboji) $\mathcal{T}_0$
1500	0.98	0.51
1700	0.95	0.5
1900	0.92	0.48
2100	0.88	0.46
2300	0.84	0.44
2500	0.79	0.41
2700	0.74	0.39
2900	0.69	0.36
3100	0.64	0.33

Odvisnost razmerja  $P_{Si}/P_{sv}$  od temperature žarnice