

LINEARNI MONOHROMATSKI OPTIČKI PIROMETAR - SEKUNDARNI ETALON TEMPERATURE U OPSEGU OD 800 °C DO 2500 °C

Stevan Stojadinović, Ljubiša Zeković, Ivan Belča, Nikola Sučević, Bečko Kasalica, Fizički fakultet u Beogradu

Sadržaj - U ovom radu je opisan linearni monohromatski optički pirometar - sekundarni etalon temperature u opsegu od 800 °C do 2500 °C, koji je realizovan u laboratoriji za metrologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu. Prikazan je njegov optičko - elektronski sistem, kalibracija i metrološka svojstva. Rezultati poređenja sa primarnim etalonom temperature Saveznog zavoda za mere i dragocene metale pokazuju da pomenuti uređaj ne zaostaje za sličnim uređajima koji su razvijeni u laboratorijama metrološki najrazvijenijih zemalja [1,2], a znatno prevazilazi zakonom predviđenu tačnost u našoj zemlji [3].

1. UVOD

Linearni monohromatski optički pirometar - sekundarni etalon temperature je uređaj čija se metrološka svojstva utvrđuju u odnosu na primarni etalon temperature i upotrebljava se, metodom direktnog poređenja, za utvrđivanje metroloških svojstava temperaturnih lampi - radnih etalona i metodom modela crnog tela, za utvrđivanje metroloških svojstava radijacionih pirometara - radnih etalona temperature.

U laboratoriji za metrologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu je isprojektovan, izrađen i ispitani linearni monohromatski optički pirometar - sekundarni etalon temperature u opsegu od 800 °C do 2500 °C. Linearni monohromatski optički pirometar - sekundarni etalon temperature je po prvi put realizovan u SRJ, što je omogućilo da Savezni zavod za mere i dragocene metale poveri Laboratoriji za optičku pirometriju Fizičkog fakulteta u Beogradu vršenje pregleda i kalibracije optičkih pirometara, kao jedinoj u zemlji. Ovo posebno dobija na značaju kada se uzme u obzir činjenica da u SRJ postoji velika potreba za tačnim i pouzdanim merenjem visokih temperatura beskontaktnim metodama (crna i obojena metalurgija, livarstvo, energetika, staklarstvo itd).

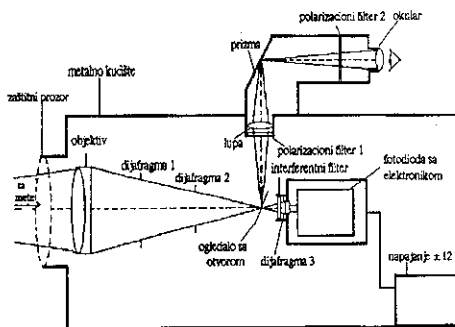
2. OPTIČKI I ELEKTRONSKI SISTEM

Optički sistem, fotodioda sa pojačavačkom elektronikom i stabilisani izvor jednosmernog napona linearnog monohromatskog optičkog pirometra smešteni su u metalno kućište dimenzija 650mm x 165mm x 200mm.

Optički sistem linearnog monohromatskog optičkog pirometra prikazan je na slici 1. Objektiv je sistem sočiva (ahromat) efektivne žižne daljine $f = 135 \text{ mm}$, čijim se pomeranjem fokusira zračenje koje emituje meta na ogledalo sa otvorom. Ogledalo

sa otvorom dijametra $\phi = 0,5 \text{ mm}$, postavljeno je pod uglom od 45° u odnosu na optičku osu sistema. Zračenje koje je prošlo kroz otvor ogledala, prolazi kroz interferentni filter koji ima maksimalnu transmitansu na 900 nm i pada na silicijumsku fotodiodu koja radi u fotoprovodnom režimu. Fotostruja diode se strujno - naponskim pretvaračem (slika 2) prevodi u odgovarajući napon koji se meri direktno sa visokopreciznim digitalnim multimetrom. Dijafragma 1, dijametra $\phi_1 = 16 \text{ mm}$, koja se nalazi 130 mm ispred ogledala sa otvorom i dijafragma 2, dijametra $\phi_2 = 5 \text{ mm}$, koja se nalazi 37 mm ispred ogledala sa otvorom, omogućavaju da se sa promenom rastojanja meta - objektiv ne menja fluks zračenja koji pada na fotodiodu, održavajući izlazni prostorni ugao zračenja konstantnim. Dijafragma 3, dijametra $\phi_3 = 2 \text{ mm}$ koja se nalazi ispred fotodiode eliminiše uticaj eventualne rasejane svetlosti na signal fotodiode.

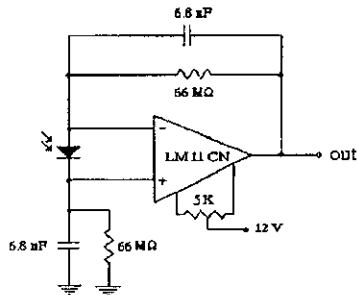
Lik izvora zračenja koji formira objektiv posmatra se kroz okular. Eksperimentator vidi crnu tačku, unutar svetlog kruga, koja predstavlja deo mete čije zračenje pada na silicijumsku fotodiodu. Polarizacioni filtri 1 i 2 sistemom ukrštanja regulišu intenzitet svetlosti koji pada na oko eksperimentatora.



Slika 1. Optički sistem linearnog optičkog pirometra

Električna šema fotodiode u sprezi sa visokostabilnim kolom jednosmerne struje prikazana je na slici 2. Kao fotodetektor korišćena je silicijumska fotodioda S1336-SBK Hamamatsu. Ovu fotodiodu karakteriše visoka linearnost u širokom dijapazonu svetlosnog fluksa, visoka osetljivost kao posledica ekstremno male struje mraka (reda pA) i izvanredna temperaturna stabilnost na 900 nm [4]. Kao operacioni pojačavač korišćen je bipolarni operacioni pojačavač LM 11 CN, koga karakteriše ekstremno niska promena ulaznog ofsetnog napona (ispod 1µV / °C), a ulazna bias struja ne prelazi 25 pA [5]. Fotodioda zajedno sa pojačavačkom elektronikom smeštena je u

poseban metalni blok da bi se minimizirao uticaj elektromagnetnih smetnji na šum fotodiode. Ovakav sistem fotodiode sa pojačavačkom elektronikom omogućava da se sa promenom sobne temperature u granicama od 10 °C do 40 °C, temperaturni drift napona ofseta (koji u sebi uključuje i struju mraka i šum fotodetektora) ne prelazi vrednost naponskog ekvivalenta izlaznog napona koji odgovara vrednosti od 0,1 °C na temperaturi od 900 °C, tako da nije potrebno izvršiti temperaturnu stabilizaciju metalnog bloka.



Slika 2. Električna šema fotodiode sa pojačavačkom elektronikom

3. KALIBRACIJA

Kalibracija linearnog monohromatskog optičkog pirometra izvršena je u odnosu na primarni transfer pirometar Saveznog zavoda za mere i dragocene metale, metodom modela crnog tela.

Crno telo pomoću koga je izvršena kalibracija je industrijsko crno telo Land R1500T. Ovo crno telo ima šupljinu cilindrično konusnog oblika dužine 100 mm i dijametra 45 mm, izrađenu od silicijum karbida, što omogućava ukupnu emisivnost crnog tela veću od 0,99. Primarni transfer pirometar i linearni monohromatski optički pirometar fokusirani su na istu metu u šupljini crnog tela. Kada se postigne željena temperatura crnog tela, sačeka se 30 minuta da se stabilise i zatim se pristupa merenju. Na zadatoj temperaturi crnog tela mere se istovremeno fotonaponi oba pirometra, kao i naponi pirometara u odsustvu upadnog zračenja, pomoću visokopreciznog digitalnog multimetra HP 33401 A koji je preko serijskog interfejsa RS -232 spregnut sa personalnim računarnom (PC 486/133 MHz), čime je omogućeno potpuno automatizovano merenje, prikupljanje i obrada podataka pod kontrolom računarskog programa. Svako merenje je trajalo 2 minuta, a podaci su skupljani sa učestanosti od 1Hz. Zatim se izračunavaju srednje vrednosti pojedinačnih grupa merenja. Konačni rezultati fotonapona pirometara na zadatoj temperaturi crnog tela izračunavaju se iz relacije:

$$U = | \langle U_m \rangle - \langle U_s \rangle | \quad (1)$$

gde je U_m - mereni fotonapon pirometra, a U_s - mereni napon u odsustvu upadne svetlosti, i dati su u tabeli 1.

$U_{\text{prim.etalon}}$ [mV]	$T_{\text{prim.etalon}}$ [K]	$U_{\text{sek.etalon}}$ [mV]	$U_{\text{sek.etal.}} / U_{\text{prim.etal.}}$
3,64937	1072,427	12,53436	3,43476
6,95894	1121,227	23,91361	3,43638
12,65262	1170,522	43,55482	3,44235
21,89424	1219,673	75,24979	3,43696
36,23869	1268,591	124,66617	3,44014
57,72939	1317,386	198,54310	3,43920
88,77908	1365,920	305,39345	3,43990
192,57075	1462,804	662,17607	3,43860
378,73430	1559,330	1301,88368	3,43746
687,64111	1655,590	2363,95469	3,43777
903,94752	1703,795	3104,27870	3,43410

Tabela 1. Rezultati kalibracije

Funkcionalna zavisnost između temperature sjaja i fotonapona linearnog monohromatskog optičkog pirometra može se aproksimirati relacijom :

$$T = \frac{\ln\left(\frac{U}{3,43796}\right) + 1606,18918}{1,62861 - 0,10018 \cdot \ln\left(\frac{U}{3,43796}\right)} \quad (2)$$

koja važi za temperaturni opseg od 800 °C do 1650 °C, dok za temperaturni opseg od 1650 °C do 2500 °C, kada se merenje vrši uz dodatak sivog filtera faktora atenuacije od 0,0334 ispred objektiva, važi relacija :

$$T = \frac{\ln\left(\frac{U}{3,43796 \cdot 0,0334}\right) + 1606,18918}{1,62861 - 0,10018 \cdot \ln\left(\frac{U}{3,43796 \cdot 0,0334}\right)} \quad (3)$$

Merna nesigurnost u određivanju temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom procenjena je kao kombinovana merna nesigurnost pojedinih veličina koje su dominantne u ukupnoj mernoj nesigurnosti.

Merna nesigurnost u određivanju temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom usled merne nesigurnosti primarnog transfer pirometra u odnosu na koji je izvršena kalibracija je $\sigma_p = \pm (0,1 + 0,3) \text{ } ^\circ\text{C}$.

Merna nesigurnost u određivanju temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom usled merne nesigurnosti fotonapona pirometra, procenjena je preko standardne devijacije fotonapona pirometra i merne nesigurnosti digitalnog multimetra HP 34401 A, kojim se meri fotonapon. Ukupna merna nesigurnost fotonapona, preračunato u mernu nesigurnost u određivanju temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom je $\sigma_f = \pm (0,1 + 0,3) \text{ } ^\circ\text{C}$.

Aproksimacija temperaturno - naponske karakteristike linearnog monohromatskog optičkog pirometra relacijom (2), odnosno (3), dovodi do merne nesigurnosti u određivanju temperature do $\sigma_a = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Ukupna merna nesigurnost u određivanju temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom izračunava se iz sledeće relacije:

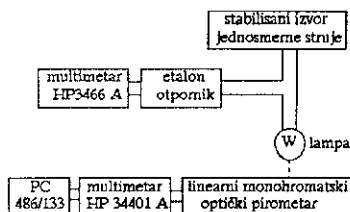
$$\sigma = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_f^2 + \sigma_a^2} \quad (4)$$

i iznosi $\pm (0,2 \div 0,5)^\circ\text{C}$ u celom mernom opsegu.

4. LINEARNOST

Provera linearnosti optičko - elektronskog sistema linearnog monohromatskog optičkog pirometra, zasnovanog na linearnosti same silicijumske fotodiode, izvršena je pomoću temperaturne gasne lampe ORSAM Wi 17/G No 897 - sekundarnog etalona temperature u opsegu od 1000°C do 2600°C .

Temperaturna gasna lampica je priključena na visokostabilisani izvor jednosmerne struje. Merenje struje napajanja lampe, kao parametra u odnosu na koji se koristi temperatura sjaja volframskog vlakna, obavlja se preko pada napona na etalonskom otporniku od $0,01 \Omega$, koji se meri digitalnim multimetrom HP 3446 A. Istovremeno je linearni monohromatski optički pirometar fokusiran na volframsko vlakno temperaturne gasne lampe, a fotonapon pirometra se meri visokopreciznim digitalnim multimetrom HP 34401 A, koji je spregnut sa personalnim računom.



Slika 3. Blok šema merne aparature za proveru linearnosti optičko - elektronskog sistema

Provera linearnosti izvršena je merenjem fotonapona pirometra na temperaturama sjaja vlakna temperaturne gasne lampe od 1267 K , 1730 K i 2039 K , i to prvo sa sivim filterom faktora atenuacije od $0,0334$ a zatim bez njega. Svako merenje je trajalo 2 minuta, a podaci su skupljani sa učestanosti od 1 Hz . Konačni rezultati merenja na svakoj temperaturi sjaja vlakna lampe dobijeni su usrednjavanjem grupe pojedinačnih merenja i dati su u tabeli 2.

T_{stajna} [K]	$U_{\text{bez atenuatora}}$ [mV]	$U_{\text{sa atenuatorom}}$ [mV]	Atenuacioni faktor
1267	122,79023	4,10492	0,033430
1730	3565,16298	119,24459	0,033447
2039	9797,40481	327,61242	0,033439

Tabela 2. Rezultati provere linearnosti

Na osnovu rezultata merenja datih u tabeli 2 može se zaključiti da optičko - elektronski sistem linearnog monohromatskog pirometra ima veoma dobru linearnost, i odstupanje fotonapona usled nelinearnosti je manje od $0,05\%$ u celom mernom opsegu. Provera linearnost izvršena je i posredno iz

odnosa pokazivanja primarnog transfer pirometra i linearnog monohromatskog optičkog pirometra na istoj temperaturi. Iz tabele 1 vidi se da se odnos $U_{\text{sek. etalon}} / U_{\text{prim. etalon}}$ održava u čitavom opsegu merenja temperature, pa se može zaključiti da linearni monohromatski optički pirometar, kao i primarni transfer pirometar imaju veoma dobru linearnost, a takođe i istu efektivnu talasnu dužinu.

5. METROLOŠKA SVOJSTVA

- Linearni monohromatski optički pirometar pokriva opseg temperatura od 800°C do 2500°C . Temperaturu od 800°C do 1650°C meri direktno, a od 1650°C do 2500°C uz dodatak sivog filtera faktora atenuacije od $0,0334$ ispred objektivna.
- Tačnost merenja temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom je $\pm (0,2 \div 0,5)^\circ\text{C}$ u celom mernom opsegu.
- Osetljivost linearnog monohromatskog optičkog pirometra je od $0,2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ do $40\text{ mV}/^\circ\text{C}$ u opsegu od 800°C do 1650°C , odnosno od $1,3\text{ mV}/^\circ\text{C}$ do $8\text{ mV}/^\circ\text{C}$ u opsegu od 1650°C do 2500°C .
- Reproducibilnost merenja temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom je između $0,02\%$ i $0,03\%$.
- Promenom rastojanja meta - objektiv u granicama od $0,8\text{ m}$ do $1,9\text{ m}$, greška merenja je manja od $0,1^\circ\text{C}$.

Tačnost merenja temperature linearnim monohromatskim optičkim pirometrom - sekundarnim etalonom temperature za red veličine je veća od zakonom predviđene tačnosti za optičke pirometre iste namene, koja je $\pm (2 \div 5)^\circ\text{C}$ [3]. Po svojim karakteristikama realizovani linearni monohromatski optički pirometar ne zaostaje za sličnim pirometrima koji su razvijeni u laboratorijama metrološki najrazvijenijih zemalja [1,2] i posедуje sva svojstva primarnog etalona [6].

6. ZAKLJUČAK

Realizacijom linearnog monohromatskog optičkog pirometra - sekundarnog etalona temperature, uz postojeći primarni etalon temperature kojim raspolaže Savezni zavod za mere i dragocene metale i radne etalone temperature u opsegu od 250°C do 1600°C , koji su realizovani u laboratoriji za metrologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu [7], u potpunosti je omogućeno uređenje etalonske baze i postignuto je merno jedinstvo u oblasti optičke pirometrije. Time je omogućeno prenošenje jedinice temperature sa jugoslovenskog (primarnog) etalona, preko sekundarnih i radnih etalona, na merila temperature, prema definicijama Međunarodne temperaturne skale iz 1990. godine.

LITERATURA

- [1] F. Sakuma, F. Hatori, "Establishing a practical temperature standard by using narrow-band radiation thermometer with silicon detector", TMCSI 5, Part 1, pp. 421-427, (1982).
- [2] G. Bussolino, F. Righino, A. Roso, "Transfer-standard pyrometry above 1000 K at IMGC", TMCSI 6, Part 1, pp. 654-659, (1991).

- [3] "Pravilnik o klasifikaciji i načinu upotrebe etalona jedinice temperature u oblasti radijacione pirometrije", SZMDM (1997).
[4] Hamamatsu photodiodes - catalog, pp. 14, (1986)
[5] National semiconductor - catalog, pp. 12, (1990).
[6] N.Perović, Lj.Zeković, K.Maglić, "Freezing temperatures of silver and copper as fixed points for optical pyrometers calibration, TEMPMEKO 96, pp. 311-316, (1997).
[7] S.Stojadinović, Magistarski rad, Fizički fakultet u Beogradu (2000).

Abstract - In this work is presented the linear monochromatic optical pyrometer - secondary standard of temperature for range from 800 °C to 2500 °C, realized in laboratory for metrology, Faculty of Physics. Also, it is presented his optical and electronic system, calibration, metrological properties

and results of comparison with Primary standard of temperature, owned by Federal Bureau of Measures and Precious Metals. Realized pyrometer is in range with similar pyrometers witch are made in laboratories of most developed countries [1,2], and it significantly overcomes predicted accuracy by our national metrological laws. [3].

LINEAR MONOCHROMATIC OPTICAL
PYROMETER - SECONDARY STANDARD OF
TEMPERATURE FOR RANGE
FROM 800 °C TO 2500°C

mr Stevan Stojadinović
Prof. dr Ljubiša Zeković
mr Ivan Belča
spec. Nikola Sučević
mr Bečko Kasalica