

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO - MATEMATIČKI FAKULTET**

Diplomski rad

**MERENJE SPEKTRALNE RASPODELE
ZRAČENJA SVETLOSNOG IZVORA U APSOLUTNIM
JEDINICAMA**

Nataša Žikić

Novi Sad, 1995.

Ovaj rad je rađen u Laboratoriji za fizičku elektroniku Instituta za fiziku u Novom Sadu, pod rukovodstvom dr Stevice Đurovića, vanrednog profesora PMF.

SADRŽAJ

UVOD.....	1
-----------	---

GLAVA I

1.1 Priroda i definisne svetlosti.....	3
1.2 Fotometrijske veličine.....	3
1.2.1 Intenzitet svetlosnog izvora.....	4
1.2.2 Emisiona sposobnost.....	6
1.2.3 Sjaj svetlosnog izvora (luminancija).....	6
1.2.4 Jačina osvetljenosti.....	7
1.3 Toplotno zračenje.....	9
1.3.1 Kirchhoffov zakon.....	9
1.3.2 Apsolutno crno telo.....	10
1.3.3 Zakoni zračenja apsolutno crnog tela.....	11
1.4 Emisioni spektri.....	13
1.4.1 Analiza emisionih spektara.....	13

GLAVA II

2.1 Izvori svetlosti.....	17
2.1.1 Toplotni izvori svetlosti.....	17
2.1.2 Luminescentni izvori svetlosti.....	19
2.1.3 Plazmeni izvori svetlosti.....	20
2.2 Standardna lampa.....	21
2.2.1 Kalibracija standardne lampe.....	23
2.2.2 Raspodela intenziteta zračenja duž volframske trake.....	29
2.2.3 Strujni izvor i stabilnost jačine struje kroz standardnu lampa.....	31

GLAVA III

3.1 Postavka mernog sistema.....	34
3.1.1 Optički sistem.....	34
3.1.2 Elementi optičkog sistema.....	35
Standardna lampa.....	35
Ogledala.....	36
Optički filter.....	36
Monohromator.....	40
Fotomultiplikator.....	41
3.1.3 Sistem za prikupljanje podataka.....	43

GLAVA IV

4.1 Spektralna raspodela zračenja halogene sijalice.....	45
4.2 Intenzitet zračenja spektralne linije Cd I 467.8nm.....	62
ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	68

UVOD

Cilj ovog rada je eksperimentalna postavka i provera sistema za merenje spektralne raspodele intenziteta svetlosnog izvora , izraženog u absolutnim jedinicama.

Izmeriti absolutni intenzitet svetlosti znači izmeriti intenzitet koji izrači izvor u određenom pravcu sa jedinice površine po jedinici prostornog ugla, što znači izmeriti ga u $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$ ili spektralnu raspodelu intenziteta izvora izmeriti u $\text{W}/\text{m}^3 \text{sr}$.

Merenje intenziteta zračenja u absolutnim jedinicama sa stanovišta naučnih istraživanja su od izuzetnog značaja za testiranje različitih modela koji opisuju fizičke procese unutar supstance koja zrači, u fizici plazme ili u astrofizici, na primer. Sa druge strane, ona su od posebnog značaja i za druge oblasti nauke, tehnike, tehnologije, zatim u medicini, biologiji itd. Osim već pomenutog, rezultati ovakvih merenja su takođe od velikog značaja za proizvođače svetlosnih izvora i njihove korisnike. Pri tome, po pravilu, nije dovoljno znati samo absolutni intenzitet, već treba znati i spektralni sastav emitovane svetlosti.

Intenzitet svetlosti utiče na brzinu rasta biljaka, na količinu hlorofila u listovima, na fotosintezu i proces cvetanja i aktivaciju enzima [1,2,3,4].

Svetlost tačno određene talasne dužine i intenziteta koristi se u procesu polimerizacije zubnih plombi kada filtrirano zračenje halogene lampe, snage 100W i talasne dužine između 400-500nm, aktivira inicijatore polimerizacije.

Najizraženija terapijska svojstva imaju zraci iz oblasti 280-320nm. Da ne bi došlo do oštećenja na ljudskom telu, kvarcne lampe moraju imati tačno određen intenzitet i spektralni sastav [5].

Jedna od osobina veštačkih izvora svetlosti je mogućnost izmene njihovog spektralnog sastava. Na ovaj način se postiže da veštačka svetlost ima spektralni sastav približno jednak spektralnom sastavu sunčeve svetlosti koja najbolje odgovara ljudskom oku. Ovo se koristi pri veštačkom osvetljavanju prostorija kada je potrebno obezbediti dobru oštrinu vida, viđenje predmeta u prirodnoj boji i brzinu zapažanja. Osvetljenje ima važan fiziološki značaj, jer povećava tonus centralnog nervnog sistema i na taj način aktivira metaboličke procese, krvotok, disanje i druge važne funkcije organizma. Zbog toga se, u zavisnosti od vrste proizvodnog procesa i vidnih zahteva, koristi svetlost odgovarajuće boje i jačine [6].

Jugoslovenski standard za dnevno i električno osvetljenje u prostorijama i zgradama sadrži minimalne zahteve za jačinu osvetljenosti radnih prostorija i služi za ocenu, projektovanje, održavanje i ispitivanje dnevnog i električnog osvetljenja. Vrlo mali zahtevi postavljaju se u slučaju osvetljenja sporednih i podrumskih prostorija, skladišta, bioskopskih i pozorišnih dvorana; mali zahtevi kod osvetljenja glavnih prolaza, stepeništa, garaža, grubih radova u industriji; srednji u slučaju osvetljenja kancelarija, učionica, stambenih prostorija, pri montaži, štampanju i sl.; veliki zahtevi u slučaju laboratorijskih radova pri očitavanju instrumenata, kontrole proizvoda; veoma veliki zahtevi postavljaju se pri izradi i montaži instrumenata u finoj mehanici, tehničkom crtanju, a maksimalni zahtevi prilikom izrade preciznih mernih instrumenata, pri graviranju i zlatarskim radovima u metalurgiji, izradi i montaži minijaturnih elektronskih elemenata u elektroindustriji, brušenju dragulja, u operacionim dvoranama, prostorijama za obdukciju i instrumentarij [7].

Iz prethodnih primera se jasno vidi da postoji veoma izražena potreba za razvojem metoda i merenjem apsolutnog intenziteta svetlosti.

Ovaj rad osim uvoda sadrži četiri poglavља, zaključak i spisak korišćene literature.

U prvoj glavi je opisana priroda svetlosti i definisane su odgovarajuće veličine. Takođe su opisani toplotno zračenje i emisioni spektri.

U drugoj glavi su opisani različiti izvori svetlosti, a kao poseban izvor standardna lampa.

U trećoj glavi je data postavka mernog sistema.

U četvrtoj glavi su prikazani rezultati merenja za jedan izvor sa kontinualnim i jedan izvor sa linijskim spektrom zračenja.



GLAVA I

1.1 PRIRODA I DEFINISANJE SVETLOSTI

Sa stanovišta moderne fizike priroda svetlosti je dualistička [8,9,10,11]. Svetlost se može posmatrati kao prostiranje elektromagnetskih talasa ili snopa čestica, tj. fotona. Međutim, savremena teorija o strukturi materije potvrđuje da su elektromagnetsko polje i supstanca dva različita oblika postojanja materije i da postoji određena veza između elektromagnetskog polja i čestica [8]. Talasna optika obuhvata sve pojave koje objašnjava talasni model - polarizaciju, interferenciju, difraciju, difuziju itd., i odnosi se na klasične optičke fenomene koji se proučavaju u okviru teorije elektromagnetskog polja. Sa druge strane, kvantna optika obuhvata kvantne interakcije elektromagnetskog zračenja sa materijom i kao takva uklapa se u atomsku fiziku, predstavljenu zakonima kvantne mehanike.

Prema talasnem modelu zračenja svetlost se prostire kroz prazan prostor brzinom od oko $3 \cdot 10^8$ m/s, kao oscilujuće električno i magnetno polje. Spektar elektromagnetskih talasa koji se javljaju u prirodi obuhvata veoma širok interval talasnih dužina, odnosno frekvencija. Do talasne dužine 0.01 nm su γ -zraci, od 0.01 do 10 nm su rendgenski zraci, od 10 do 400 nm su ultraljubičasti zraci, od 400 do 800 nm je vidljivi deo spektra (svetlost), od 800 nm do 100 μ m su infracrveni zraci, a od 100 μ m pa nadalje su radio talasi.

Ovaj rad se, međutim, uglavnom odnosi samo na vidljivi deo spektra elektromagnetskog zračenja.

1.2 FOTOMETRIJSKE VELIČINE

Oblast fizike koja se bavi proučavanjem karakteristika izvora zračenja i merenjem fizičkih veličina koje karakterišu elektromagnetsko zračenje naziva se radiometrija, a oblast koja se bavi samo vidljivim delom elektromagnetskog spektra naziva se fotometrija [8].

Fotometrija se bavi kako karakteristikama izvora svetlosti tako i karakterističnim veličinama emitovane svetlosti nezavisno od spektralnog sastava. Analiza spektralne raspodjеле i pojedinih monohromatskih komponenata spada u oblast spektrofotometrije.

Fotometrijske veličine se izražavaju u jedinicama energije ili snage, tj. u apsolutnim fizičkim jedinicama, ili u fiziološkim, tj. subjektivnim jedinicama. Na primer, svetlosni fluks koji se definiše kao količina energije koja se emituje u jedinici vremena u dati prostorni ugao izražava se u vatima (W) ili u lumenima (lm) [8,11]. Energija elektromagnetskih talasa različitih talasnih dužina različito deluje na ljudsko oko, a u uskom intervalu talasnih dužina oko 555nm, tj. u intervalu gde je oko najosetljivije, jednom lumenu odgovara 0.00155W [11,12].

Prema svojoj prirodi fotometrijske veličine se mogu podeliti u dve grupe: na veličine koje se odnose na emitovanu svetlost, tj. na izvore zračenja, i veličine koje se odnose na prijem svetlosne energije.

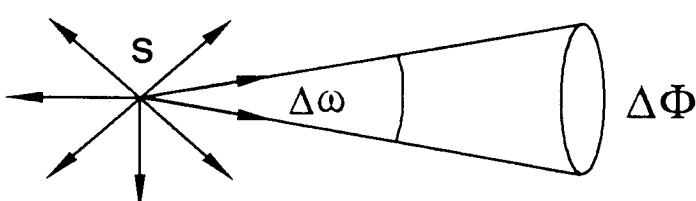
Iako je predmet ovog rada samo merenje intenziteta izvora svetlosti, biće dat pregled i ostalih fotometrijskih veličina.

1.2.1 Intenzitet svetlosnog izvora

Intenzitet tačkastog svetlosnog izvora S u nekom pravcu brojno je jednak fluksu $\Delta\Phi$ po jediničnom prostornom uglu $\Delta\omega$ [8,11]:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega} \quad (1.2.1.1)$$

Što je ilustrovano na slici 1.2.1.1.



Slika 1.2.1.1- Ilustracija uz definiciju svetlosnog fluksa

Međutim, kada se radi o izvoru svetlosti konačnih dimenzija, pogodno je uvesti veličinu definisanu preko gustine fluksa po jedinici prostornog ugla:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \Delta \omega} \quad (1.2.1.2)$$

koja se takođe naziva intenzitet svetlosnog izvora. S obzirom na definiciju fluksa prethodni izraz se može napisati kao [13]:

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta S \Delta \omega} = \frac{\Delta P}{\Delta S \Delta \omega} \quad (1.2.1.3)$$

tj. kao energija ΔE u jedinici vremena Δt odnosno snaga ΔP izračena sa jedinice površine ΔS normalne na pravac zračenja po jedinici prostornog ugla $\Delta\omega$. Ovo je ukupan ili integralni intenzitet po svim talasnim dužinama:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (1.2.1.4)$$

gde je sa I_{λ} označen spektralni intenzitet svetlosnog izvora na dатој talasnoј дужини λ . Prema tome intenzitet ΔI izračen u intervalu talasne дужине између λ и $\lambda + \Delta\lambda$ је сразмеран са $\Delta\lambda$ и изнosi:

$$\Delta I = I_{\lambda} \Delta\lambda \quad (1.2.1.5)$$

a prema (1.2.1.2) i (1.2.1.4) spektralni intenzitet svetlosnog izvora:

$$I_{\lambda} = \frac{\Delta P}{\Delta S \Delta \omega \Delta \lambda} \quad (1.2.1.6)$$

je snaga zračenja emitovana sa jedinice površine normalne na pravac zračenja po jedinici prostornog ugla i talasne dužine i izražava se u $\text{W/m}^3 \text{sr}$ ili u $\text{Im/cm}^3 \text{sr}$ (Im/sr naziva se kandela cd).

1.2.2 Emisiona sposobnost

Kod izvora zračenja konačnih dimenzija takođe se definiše i veličina

$$R = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.2.2.1)$$

i naziva se emisiona sposobnost [8,11]. Emisiona sposobnost R je brojno jednaka ukupnom svetlosnom fluksu emitovanom sa jedinice površine tела koje svetli u polusferi na sve strane, tj. u granicama prostornog ugla 2π . Ovo je ukupna emisiona sposobnost izvora po svim talasnim dužinama

$$R = \int_0^{\infty} R_{\lambda} d\lambda \quad (1.2.2.2)$$

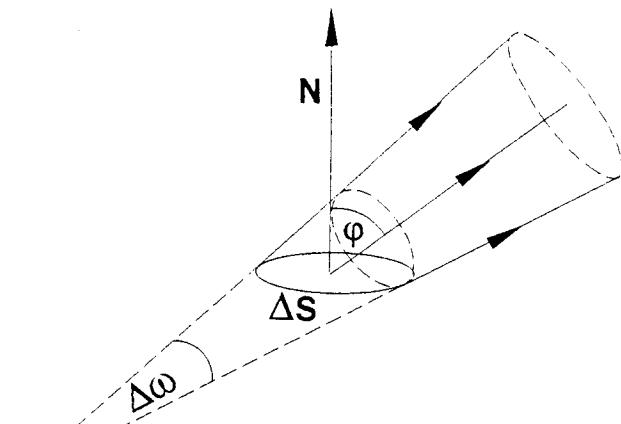
gde je R_{λ} spektralna emisiona sposobnost. Emisiona sposobnost se izražava u W/m^2 ili u Im/cm^2 (fot).

1.2.3 Sjaj svetlosnog izvora (luminancija)

Sjaj svetlosnog izvora konačnih dimenzija u datom pravcu ϕ definiše se kao odnos intenziteta svetlosnog izvora i površine projekcije izvora na ravan normalnu na dati pravac [8,11]:

$$B = \frac{I}{\Delta S \cos \phi} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \omega \Delta S \cos \phi} \quad (1.2.3.1)$$

što je ilustrovano na slici 1.2.3.1.



Slika 1.2.3.1- Ilustracija uz definiciju
sjaja svetlosnog izvora

Prema (1.2.3.1) sjaj svetlosnog izvora zavisi od posmatranog pravca, tj. od ugla φ . Međutim, ukoliko se radi o telima koja emituju izotropno (crno telo, mutne površine), tj. telima kod kojih se svetlost emituje jednakom na sve strane, sjaj svetlosnog izvora ne zavisi od pravca posmatranja, što se formuliše kao Lambertov zakon. U slučaju kada važi Lambertov zakon, veza između emisione sposobnosti i sjaja svetlosnog izvora data je sledećom relacijom [8,11]:

$$R = \pi \cdot B \quad (1.2.3.2)$$

Izrazom (1.2.3.1) dat je ukupan sjaj svetlosnog izvora, koji je funkcija spektralnog sjaja B_λ :

$$B = \int_{\text{o}}^{\infty} B_\lambda d\lambda \quad (1.2.3.3)$$

Sjaj svetlosnog izvora se izražava u $\text{W/m}^2\text{sr}$ ili u cd/cm^2 (stilb).

1.2.4 Jačina osvetljenosti

Do sada definisane veličine odnosile su se na izvor svetlosti. Međutim, potrebno je takođe znati i fluks, odnosno energiju u jedinici vremena koja padne na određenu površinu nekog tela. Zbog toga se uvodi veličina [8,11]:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \quad (1.2.4.1)$$

koja se naziva jačina osvetljenosti date površine. Jačina osvetljenosti koja potiče od tačkastog izvora opada sa kvadratom rastojanja i zavisi od kosinusa ugla φ između pravca svetlosnih zraka i normale osvetljene površine:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi \quad (1.2.4.2)$$

Za izračunavanje jačine osvetljenosti koja potiče od izvora konačnih dimenzija, treba poći od pojedinih tačaka izvora i sumirati dejstvo. Ovo je takođe, kao i u prethodnim slučajevima, ukupna jačina osvetljenosti za sve talasne dužine:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (1.2.4.3)$$

gde je E_λ spektralna jačina osvetljenosti. Jačina osvetljenosti neke površine se izražava u W/m^2 ili u lm/cm^2 (luks).

Osim ove veličine na isti način kao u 1.2.2 i 1.2.3 definišu se emisiona sposobnost R i sjaj B ali koji se odnose na reflektovanu svetlost sa neke površine. Veza između emisione sposobnosti i jačine osvetljenosti je data relacijom:

$$R = k_r E \quad (1.2.4.4)$$

gde se koeficijent proporcionalnosti k_r naziva koeficijent refleksije površine.

1.3 TOPLITNO ZRAČENJE

Sva tela mogu da emituju i apsorbuju elektromagnetsko zračenje u širokom intervalu talasnih dužina. Uzroci zračenja mogu biti različiti, na primer prethodna apsorpcija svetlosti, hemijske reakcije, prolazak električne struje kroz telo i dr. Međutim, ako je uzrok zračenja unutrašnja toplotna energija tela, onda je to toplotno zračenje. Deo spektra toplotnog zračenja je i svetlost koju zrače čvrsta i tečna tela, na primer, na temperaturama iznad 500-550°C [10].

Niz pojava u vezi sa toplotnim zračenjem može se analizirati ne ulazeći u mehanizam interakcije između zračenja i čestica tela koje zrači, već razmatrajući ih samo sa energetske, odnosno termodinamičke tačke gledišta [11].

Svako zračenje tela je praćeno gubitkom energije. Zato se zračenje može vršiti samo na račun gubitka energije samog tela ili na račun energije koju telo dobija spolja. Ako telo apsorpcijom zračenja ili apsorpcijom toplotne energije od okoline dobija onoliku količinu energije koliku i gubi usled sopstvenog zračenja, taj proces će se onda odvijati ravnotežno, tj. stacionarno. Pri tome stanje tela koje zrači može biti okarakterisano određenom konstantnom temperaturom T . Treba napomenuti da je pojam temperature primenjiv samo u slučaju kada postoji termodinamička ravnoteža. Kada je količina energije koju telo dobija od okoline nedovoljna za potpunu kompenzaciju energije zračenja, telo zrači delom na račun unutrašnje energije. U tom slučaju se narušava ravnotežno stanje. Međutim, ako telo zrači dovoljno sporo, raspodela unutrašnje energije u svakom trenutku će uspeti da se izjednači, pa će zračenje i dalje imati ravnotežni karakter. Temperatura tela će padati ali u svakom trenutku stanje tela se može razmatrati kao ravnotežno pa mu se može pripisati i određena temperatura.

1.3.1 Kirchhoffov zakon

Uobičajena oznaka za spektralnu emisionu sposobnost (R_λ), definisanu u 1.2.2, kada se razmatra toplotno zračenje, je:

$$e(\lambda, T) = \frac{d\Phi_\lambda}{dS} \quad (1.3.1.1)$$

i osim talasne dužine zavisi i od temperature T . Fluks $d\Phi_\lambda$ je fluks po jediničnom intervalu talasnih dužina.

Ako na neko telo pada fluks zračenja $d\Phi_\lambda$, jedan deo toga fluksa telo će propustiti, drugi deo reflektovati, dok će ostatak apsorbovati. Kada se posmatra samo apsorbovani deo, uvodi se veličina [11]:

$$a(\lambda, T) = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda} \quad (1.3.1.2)$$

koja se naziva spektralna apsorpciona sposobnost tela. Sa $d\Phi'_\lambda$ je označen apsorbovani deo fluksa zračenja. Ogledi sa različitim telima su pokazali da postoji određena zavisnost između spektralne emisione sposobnosti $e(\lambda, T)$ i spektralne apsorpcione sposobnosti $a(\lambda, T)$.

Kirchhoff je utvrdio da ova zavisnost ima sledeći oblik:

$$\frac{e_1(\lambda, T)}{a_1(\lambda, T)} = \frac{e_2(\lambda, T)}{a_2(\lambda, T)} = \dots = f(\lambda, T) \quad (1.3.1.3)$$

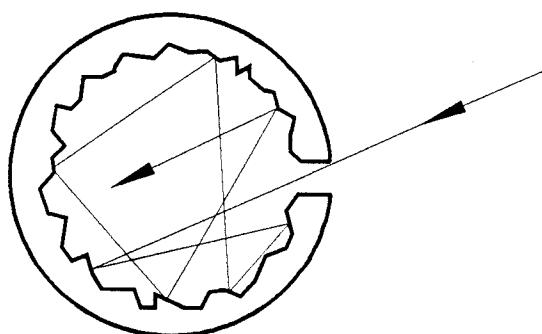
Odnos emisione i apsorpcione sposobnosti ne zavisi od prirode tela i za sva tela predstavlja jednu istu funkciju talasne dužine i temperature $f(\lambda, T)$.

1.3.2 Apsolutno crno telo

Za telo koje u potpunosti apsorbuje zračenje svih talasnih dužina na bilo kojoj temperaturi važi da je $a(\lambda, T) = 1$; takvo telo naziva se absolutno crno telo. Spektralna emisiona sposobnost absolutno crnog tela prema Kirchhoffovom zakonu (1.3.1.3) je:

$$E(\lambda, T) = f(\lambda, T) \quad (1.3.2.1)$$

U prirodi ne postoje tela koja bi po svojim osobinama odgovarala absolutno crnom telu. Međutim, moguće je napraviti telo koje će po svojim osobinama biti vrlo blisko absolutno crnom telu. To je obično dobro izolovan sud kome su unutrašnji zidovi nagravljeni i koji ima samo jedan mali otvor (slika 1.3.2.1).



Slika 1.3.2.1- Model absolutno crnog tela

Zračenje koje prođe kroz otvor suda biće apsorbovano nakon niza refleksija unutar suda. Osim toga ako se posmatrani sud nalazi na nekoj temperaturi T iz njega će se kroz otvor emitovati zračenje koje je po svojim karakteristikama veoma blisko zračenju absolutno crnog tela na istoj temperaturi T .

1.3.3. Zakoni zračenja apsolutno crnog tela

Čisto termodinamičkim razmatranjem zračenja absolutno crnog tela nije moguće naći izraz za spektralnu emisionu sposobnost, tj. za funkciju $f(\lambda, T)$. Međutim, na ovaj način se ipak mogu utvrditi neke zakonitosti koje važe za zračenje apsolutno crnog tela.

Ukupna emisiona sposobnost apsolutno crnog tela je proporcionalna četvrtom stepenu temperature [11]:

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (1.3.3.1)$$

Navedena relacija se naziva Stefan - Boltzmannov zakon. Konstanta proporcionalnosti σ ima vrednost $5.6692 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ [14].

Talasna dužina λ_{\max} koja se odnosi na maksimum spektralne emisione sposobnosti $E(\lambda, T)$ obrnuto je proporcionalna temperaturi [11]:

$$\lambda_{\max} = \frac{C'}{T} \quad (1.3.3.2)$$

Ova relacija se naziva Wienov zakon pomeranja. Konstanta proporcionalnosti C' ima vrednost $2898 \mu\text{mK}$ [14].

Maksimalna vrednost spektralne emisione sposobnosti apsolutno crnog tela proporcionalna je petom stepenu temperature [11]:

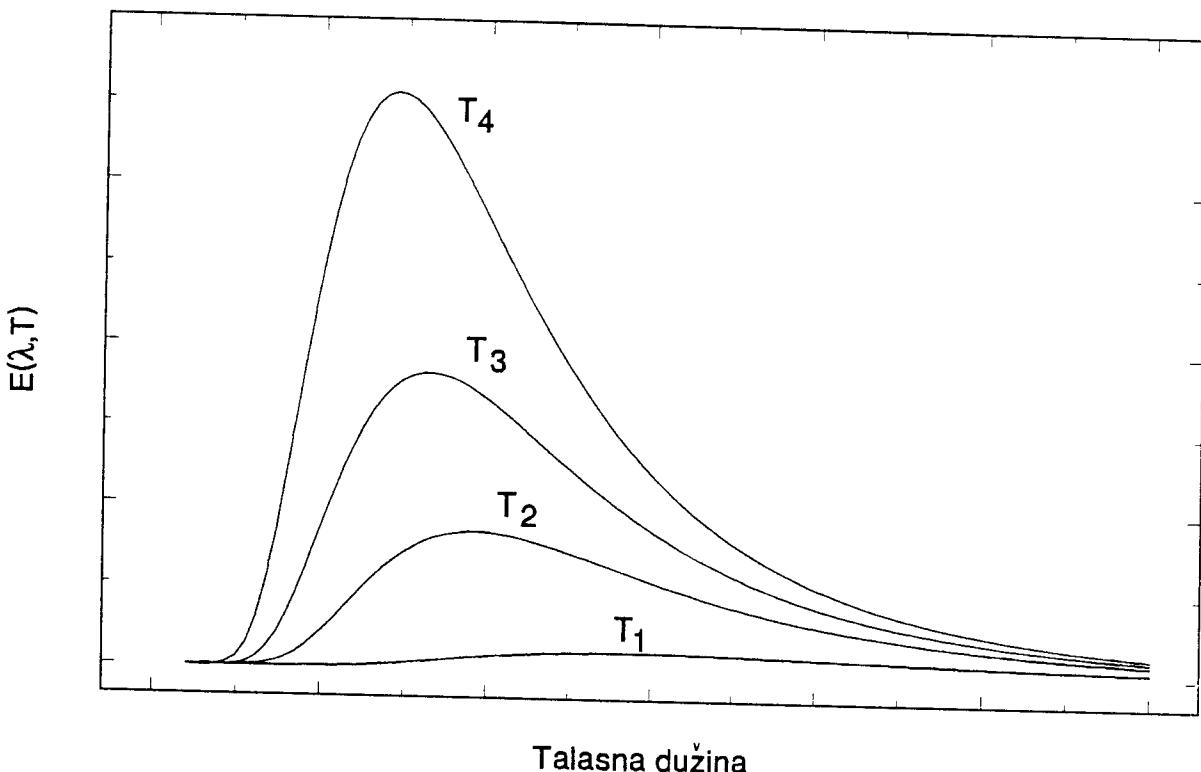
$$E(\lambda, T)_{\max} = C'' T^5 \quad (1.3.3.3)$$

gde konstanta proporcionalnosti C'' ima vrednost $1.301 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^3\text{K}^5$ [11].

Problem nalaženja funkcije $f(\lambda, T)$ rešio je Planck uvođenjem hipoteze da se zračenje energije ne odvija kontinualno, već u određenim iznosima energije (kvantima) $h\nu$. Konstanta h se naziva Planckova konstanta i ima vrednost $6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ [14], a sa v je obeležena frekvencija zračenja. Na osnovu uvedene hipoteze Planck je uspeo da dobije izraz za spektralnu emisionu sposobnost apsolutno crnog tela [11]:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} \quad (1.3.3.4)$$

gde je c brzina svetlosti u vakuumu ($2.9997929 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) [14], a k je Boltzmannova konstanta ($1.38046 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) [14]. Ovakav oblik funkcije $f(\lambda, T)$ tj. $E(\lambda, T)$, prikazan na slici 1.3.3.1, u potpunosti se slaže sa eksperimentalno dobijenim podacima. Na slici je prikazana zavisnost $E(\lambda, T)$ za četiri različite temperature $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.



Slika 1.3.3.1- Planckova raspodela emisione sposobnosti
apsolutno crnog tela u funkciji talasne dužine i temperature.

Iz izraza za spektralnu emisionu sposobnost (1.3.3.4) slede neposredno, kao posebni slučajevi, tri prethodno opisana termodinamička zakona (1.3.3.1), (1.3.3.2) i (1.3.3.3).

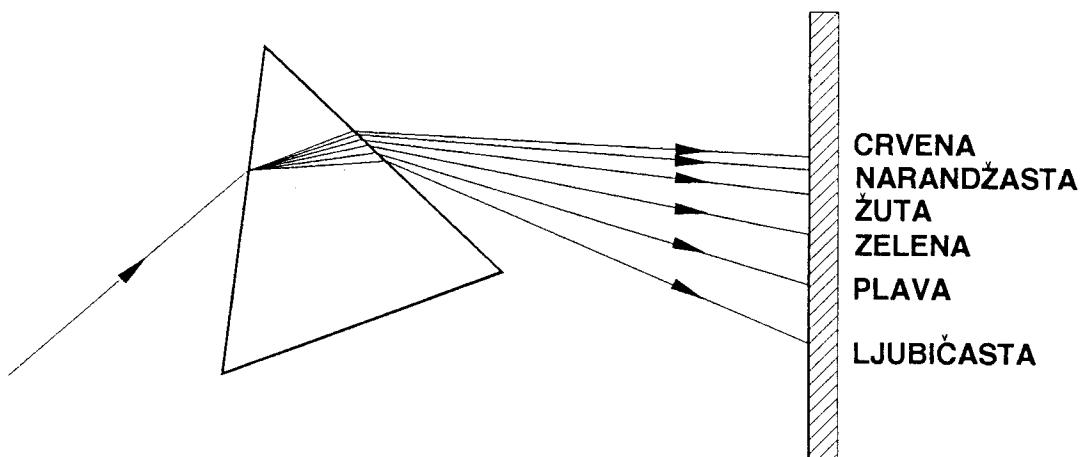
1.4 EMISIONI SPEKTRI

Usijana čvrsta, tečna i gasovita tela emituju zračenje u vidljivom delu spektra. Ovakvo elektromagnetno zračenje, odnosno svetlost, složeno je od zračenja različitih talasnih dužina odnosno frekvencija. Skup zračenja svih talasnih dužina ili određenog intervala talasnih dužina naziva se spektar.

1.4.1 Analiza emisionih spektara

Kada snop polihromatske (bele) svetlosti padne na disperzionalni elemenat, na primer na prizmu ili na difrakcionu rešetku, svetlost se

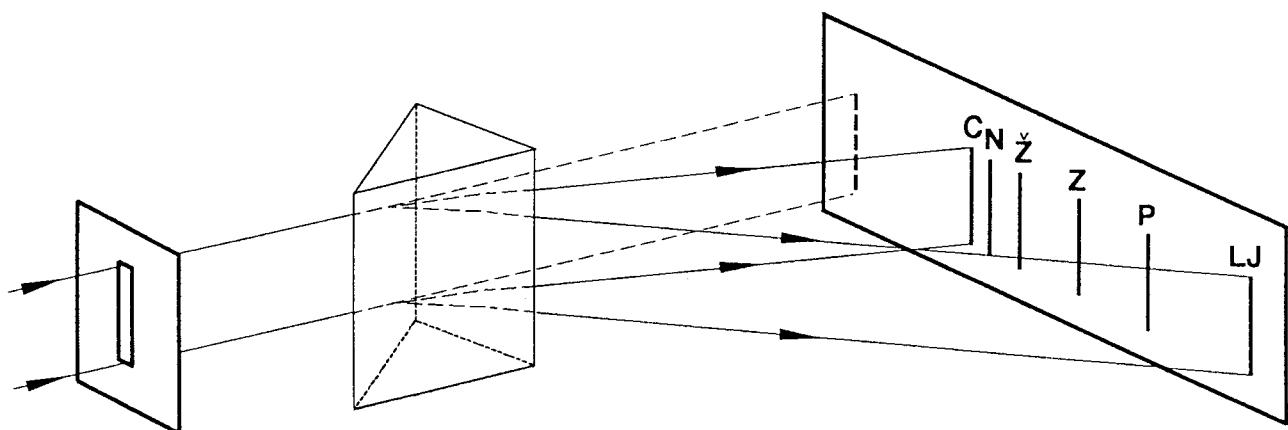
razlaže na sastavne komponente, a spektar tako razložene svetlosti može se videti na ekranu iza disperzionog elementa (slika 1.4.1.1).



Slika 1.4.1.1- Ilustracija uz definiciju spektra zračenja

Ako se ovako razloženo zračenje fotografiše ili snimi na pisaču ili osciloskopu, dobija se slika koja se takođe naziva spektar.

Za analizu spektra zračenja koriste se spektralni uređaji koji se u principu sastoje od ulazne pukotine, disperzionog elementa i detektora, što je prikazano na slici 1.4.1.2.



Slika 1.4.1.2 - Ilustracija uz definiciju spektralnog uređaja

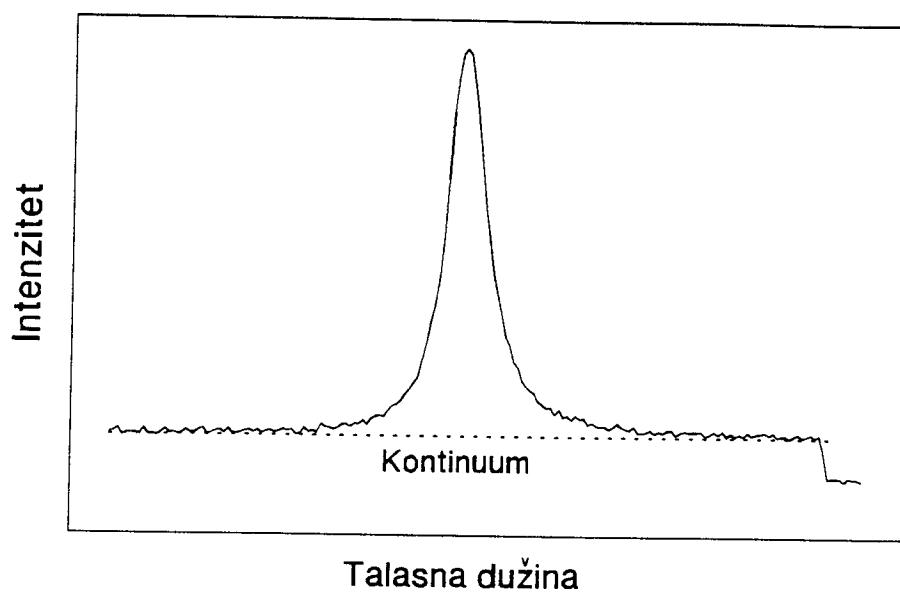
Na ekranu iza prizme vide se različito obojene linije. Ove linije su u stvari likovi ulazne pukotine i nazivaju se spektralne linije. Kada se kao disperzionalni element koristi prizma, dobija se spektar kod kojeg je ljubičasti deo više razvučen od crvenog. Kada se koristi disperzionalna rešetka, spektar je podjednako razvučen [15].

Uredaj kod kojeg se kao detektor koristi samo ekran za posmatranje spektra naziva se spektroskop, a ako ima i skalu za očitavanje talasnih dužina spektrometar. Kada se kao detektor koristi fotoploča, spektralni uređaj se naziva spektrograf. Ako uređaj pre detektora ima i izlaznu pukotinu kojom se izdvaja uski deo spektra razložene svetlosti, naziva se monohromator. Kod monohromatora se kao detektor obično koristi fotomultiplikator.

Ako se spektar sastoji samo od spektralnih linija, takav spektar se naziva linijski, a ako svetlost sadrži neprekidan niz talasnih dužina u širem spektralnom intervalu, onda se linije u spektru slijavaju u neprekidni niz te se dobija kontinualni spektar. Kada se linije u spektru grupišu u užim talasnim intervalima tako da čine trake, dobija se emisioni spektar koji se naziva trakasti.

Različiti svetlosni izvori daju i različite vrste spektra. Kontinualne spekture emituju usijana čvrsta i tečna tela i usijani gasovi pod vrlo visokim pritiskom. Trakasti spektri potiču od pobuđenih molekula, odnosno od usijanih para i gasova u molekulskom stanju. Linijske spekture daju usijani gasovi na nižim pritiscima ako se nalaze u atomskom stanju. Spektralne linije ili trake ne dobijaju se nikad potpuno izdvojeno već su uvek superponirane na kontinualni spektar.

Osim toga, spektralna linija nije beskonačno uska već uvek ima određen profil, odnosno nekakvu raspodelu intenziteta zračenja u određenom intervalu talasnih dužina i zbog toga uvek ima konačnu širinu (slika 1.4.1.3).



Slika 1.4.1.3 - Profil spektralne linije

Na oblik i širinu spektralne linije utiču prirodno širenje, fizički uslovi unutar supstance koja zrači i karakteristike spektralnog uređaja i detektora.

GLAVA II

2.1 IZVORI SVETLOSTI

Izvori svetlosti mogu se klasifikovati na više načina. Na primer prirodni izvori, kao što su Sunce i druge zvezde, atmosferska pražnjenja i dr., i razni veštački izvori svetlosti. Ovde će biti reči samo o veštačkim izvorima svetlosti koji se opet mogu podeliti na različite načine. Na primer, prema spektralnom sastavu, infracrveni, vidljivi, ultraljubičasti itd., prema procesu emisije zračenja, koherentni i nekoherentni, prema načinu rada, kontinualni i impulsni, prema nameni, za osvetljenje, spektralni izvori, izvori specijalne namene za laboratorijsku upotrebu, za kalibraciju itd.

Ovde će biti napravljena podela prema određenim termodinamičkim svojstvima tela koje zrači, i to na: topotne izvore, kao što su zagrejana tela u termodinamičkoj ravnoteži, luminescentne, kod kojih tela koja zrače nisu u termodinamičkoj ravnoteži, i na plazmene izvore, koji u zavisnosti od parametara plazme i spektralnog intervala mogu biti ravnotežni i neravnotežni, tj. topotni i luminescentni [16].

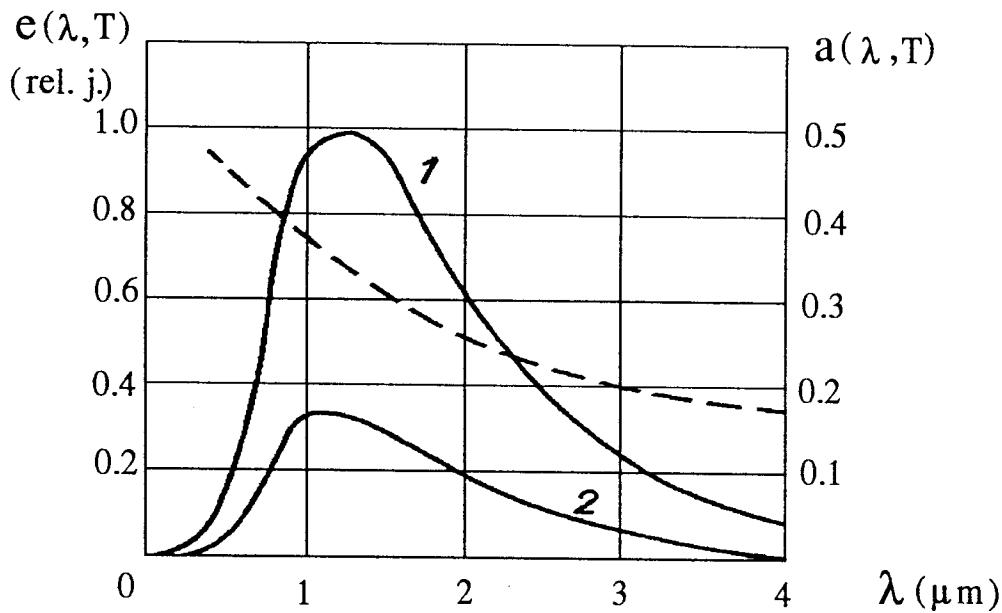
2.1.1 Topotni izvori svetlosti

Topotni izvori svetlosti imaju kontinualan spektar koji se opisuje zakonima topotnog zračenja gde se kao osnovni parametri javljaju spektralna emisiona sposobnost $e(\lambda, T)$ i temperatura T . Apsolutno crno telo ne postoji, ako se izuzmu posebno konstruisani izvori, koji emituju približno kao i apsolutno crno telo, ili Sunce, koje takođe ima karakteristike bliske karakteristikama apsolutno crnog tela. Prema Kirchhoffovom zakonu (1.3.1.3) spektralna emisiona sposobnost nekog tela se može izraziti kao:

$$e(\lambda, T) = a(\lambda, T)E(\lambda, T) \quad (2.1.1.1)$$

gde je spektralna apsorpciona sposobnost uvek manja od 1 ($a(\lambda, T) < 1$). Tela kod kojih $a(\lambda, T)$ ne zavisi od talasne dužine nazivaju se siva tela [11]. Kod sivog tela raspodela energije zračenja se poklapa sa raspodelom

zračenja absolutno crnog tela, samo je snaga zračenja sa jedinice površine manja. Međutim, ne postoji ni tela koja u potpunosti odgovaraju definiciji sivog tela, ali za ograničenu oblast talasnih dužina mogu biti vrlo bliska sivom telu. Na slici 2.1.1.1 je dat primer upoređivanja spektralne emisione sposobnosti absolutno crnog tela, izražene u relativnim jedinicama na temperaturi od 2100K i spektralne emisione sposobnosti volframa na istoj temperaturi.



Slika 2.1.1.1 - Upoređivanje raspodele emisione sposobnosti absolutno crnog tela (1) i volrama (2). Isprekidanom linijom je data apsorpciona sposobnost volframa.

Na slici je takođe data i spektralna apsorpciona sposobnost volframa, koja opada sa porastom talasne dužine. U skladu s ovim spektralna emisiona sposobnost volframa se bolje slaže sa emisionom sposobnošću absolutno crnog tela na kraćim talasnim dužinama.

Tela koja služe kao topotni izvori zagrevaju se protokom električne struje ili hemijskim reakcijama, a intenzitet zračenja raste sa porastom temperature tela.

Kod električnih sijalica sa usijanim metalnim vlaknom, vlakna se zagrevaju protokom električne struje. Osim toga, vlakno je obično u staklenom balonu koji je vakuumiran ili punjen inertnim gasom. Sijalice sa

volframskim vlaknom, u zavisnosti od konstrukcije, koriste se za osvetljenje, signalizaciju, kao etaloni u pirometriji itd. Sijalice, tj. izvori zračenja kod kojih se vlakno nihroma ili volframa nalazi u balonu od kvarcnog stakla koriste se kao izvori infracrvenog zračenja; na primer u medicini za terapeutske svrhe, u industriji za termičku obradu materijala itd. Kao materijal za sijalična vlakna mogu se takođe koristiti ugljenik, molibden, tantal, platina i dr.

Halogene sijalice su izvori svetlosti kod kojih je u kvarcni balon, napunjen ksenonom, u kome svetli usijano volframsko vlakno, dodat i neki halogeni elemenat, na primer jod ili brom. Ovakvi izvori se koriste za osvetljenje, za projektore, za optičko pumpanje kontinualnih lasera, u termografiji itd.

Postoje i izvori kod kojih svetli usijana elektroda ili šupljina unutar elektrode, a koji služe kao izvori svetlosti u fotometriji i spektroskopiji.

Izvor svetlosti može biti i plamen, dobijen hemijskom reakcijom kiseonika sa drugim gasovima ili metalnim prahom. Plameni izvori se koriste za spektralnu analizu metodom plamene fotometrije u pirotehnici itd.

U toplotne izvore spadaju i razni modeli sivih i apsolutno crnih tela koji služe kao etaloni odnosno izvori pomoću kojih se može vršiti kalibracija ostalih izvora svetlosti.

2.1.2 Luminescentni izvori svetlosti

Luminescentni izvori svetlosti su čvrsta, tečna ili gasovita tela koja, pobuđena fluksom fotona, elektrona i drugih čestica ili električnim poljem, emituju svetlost. Spektar i intenzitet zračenja ovakvih izvora zavisi od fluksa i energije upadnih čestica ili od jačine električnog polja.

Izvori koji emituju svetlost pod uticajem upadne svetlosti nazivaju se fotoluminescentni izvori. Koriste se za promenu talasne dužine zračenja u odnosu na upadnu svetlost i kao izvori za blisku ultraljubičastu oblast. Fluorescentne rezonantne lampe koriste se kao izvori za vrlo uske spektralne linije koje nastaju pri fotopobuđivanju para metala ili gasova.

Kod katodolumeniscentnih izvora zračenje nastaje pod dejstvom snopa elektrona velike energije. Obično su to impulsni izvori zračenja. Pobuđeni inertni gasovi, na primer, emituju molekulski kontinuum. Snopovi atoma

pobuđeni elektronima emituju vrlo uske spektralne linije. U ovu vrstu izvora spada i katodna cev.

Kod elektroluminescentnih izvora svetlosti uzrok zračenja je električno polje, na primer kod samostalnog pražnjenja. U ovakav tip izvora takođe spada i poluprovodnička svetleća dioda.

Pobudivanjem zračenja produktima radioaktivnog raspada dobijaju se radioluminescentni izvori. Na ovaj način se može dobiti rezonantno zračenje inertnih gasova. U ovakav oblik zračenja spada i zračenje Čerenkova.

U luminescentne izvore zračenja spadaju sinhrotroni, gde zračenje emituju ubrzani elektroni koji se kreću spiralno duž linija sila magnetnog polja.

2.1.3 Plazmeni izvori svetlosti

U ovom slučaju je izvor svetlosti plazma koja se obično dobija elektrodnim ili bezelektrodnim pražnjenjem kroz gas. Oblik spektra i intenzitet zračenja zavise od sastava, pritiska i temperature plazme. Pri niskim temperaturama i pritiscima zračenje pretežno sadrži uske rezonantne linije i molekulske trake. Sa porastom temperature počinje da raste intenzitet kontinualnog zračenja, tj. zakočnog i rekombinacionog zračenja. Sa porastom pritiska dolazi i do proširenja spektralnih linija. Plazmeni izvori se uglavnom koriste kao laboratorijski izvori u spektroskopiji, a neki se mogu koristiti i za osvetljenje.

U kontinualne izvore plazme ubrajaju se spektralne lampe niskog pritiska kod kojih se koristi tinjavo ili lučno pražnjenje. Ove lampe sadrže različite gasove ili metalne pare i služe kao referentni spektralni izvori. U zavisnosti od konstrukcije mogu se koristiti i za osvetljenje i kao indikatori.

Lampe visokog pritiska se koriste za osvetljenje u projekcionim aparatima itd.

Slobodno goreći lukovi se koriste za emisionu spektralnu analizu, dok se za spektroskopiju plazme koriste zidom stabilisani lukovi. Lukovi spadaju u niskotemperaturne izvore plazme.

Niskotemperaturna neravnotežna plazma koja se koristi kao svetlosni spektroskopski izvor dobija se bezelektrodnim radiofrekventnim pražnjenjem.

Impulsni plazmeni izvori se ostvaruju električnim pražnjenjem, obično brzih kondenzatora kroz gas, zatim formiranjem udarnog talasa kroz gas ili snažnim laserskim impulsima.

Varnica se koristi kao izvor svetlosti za impulsnu fotoanalizu i emisionu spektroskopiju.

Impulsne lampe se koriste kod stroboskopa, za fotolitografiju, optičko pumpanje impulsnih lasera itd.

U impulsne izvore spadaju i z-pinč, kod koga se plazma dobija elektrodnim pražnjenjem, i Θ -pinč, kod koga se plazma dobija bezelektrodnim pražnjenjem kroz gas. Ovi izvori prvenstveno služe za izučavanje spektara atoma i jona.

Plazma-fokus je izvor koji daje vrlo intenzivno kontinualno rekombinaciono zračenje u ultraljubičastom delu spektra i koristi se u spektroskopiji plazme.

Kapilarnim pražnjenjem dobija se plazma velike elektronske gustine, koja se takođe koristi kao laboratorijski plazmeni izvor.

Impulsno zračenje se dobija i brzim sabijanjem gasa pomoću udarnog talasa u tzv. udarnim cevima. Ovakvi izvori se koriste, kao i većina izvora plazme, za određivanje atomskih i molekulskih parametara.

Laserski proizvedena plazma nastaje fokusiranjem snažnog laserskog impulsa na gasnu ili čvrstu metu. Koristi se u apsorpcionoj i emisionoj spektroskopiji.

Ovako velik broj izvora svetlosti i još veći broj mogućnosti njihove primene povećava i potrebu za kalibracijom ovih izvora, odnosno za merenjem apsolutnog intenziteta i spektralnih karakteristika zračenja čime se još više proširuje mogućnost korišćenja svetlosnih izvora.

2.2 STANDARDNA LAMPA

Apsolutno crno telo, tj. različiti modeli apsolutno crnog tela su u principu najbolji izvori koji se koriste kao standard za kalibraciju ostalih izvora svetlosti. Međutim, apsolutno crno telo kao radni standard ima nekoliko nedostataka. Obično se koriste cilindrična ili sferna šuplja tela zagrejana u peći ili istopljenom metalu [17]. Da bi se što više smanjio

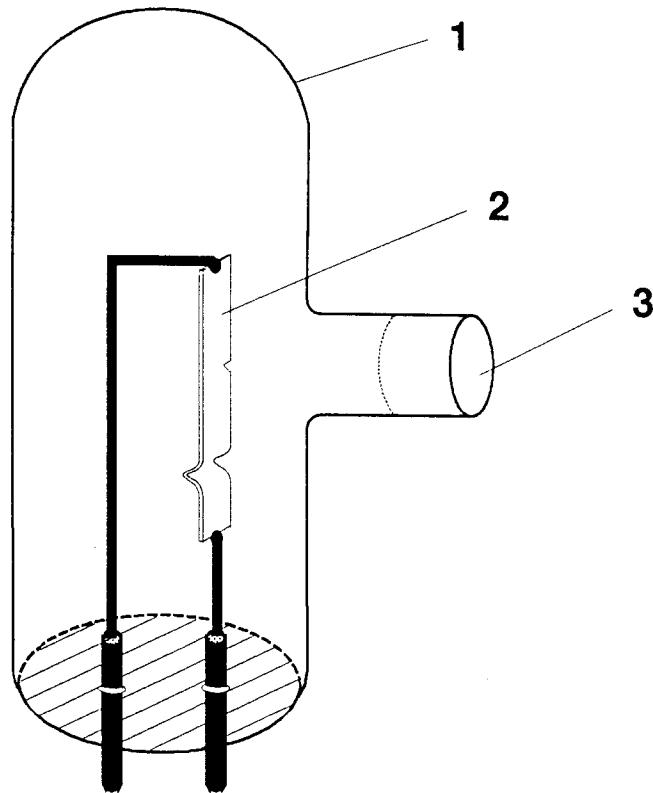
gradijent temperature, peći moraju biti masivne i dobro izolovane. Zagrevanje takođe zahteva posebnu opremu, pa je konstrukcija i održavanje ovako napravljenog apsolutno crnog tela vrlo skupa. Zbog oksidacije i isparavanja šupljeg tela na visokoj temperaturi teško je dobiti potreban intenzitet zračenja u širokom intervalu spektra, naročito u ultraljubičastom delu. Osim toga temperatura se mora održavati dovoljno konstantnom jer promena temperature od 0.1% može dovesti do promene intenziteta zračenja od nekoliko procenata.

Iz navedenih razloga model apsolutno crnog tela se koristi samo kao osnovni tj. primarni standard u vrlo retkim i za tu svrhu posebno opremljenim radiometrijskim laboratorijama.

Kao radni standard vrlo je pogodna lampa sa volframskim vlaknom ili volframskom trakom. Prednosti ove lampe u odnosu na crno telo su višestruke. Grejanje vlakna električnom strujom je mnogo jednostavnije i omogućava lakše podešavanje, ali i visoku tačnost održavanja intenziteta zračenja. Kako se vlakno ili traka nalaze u vakuumu ili u atmosferi inertnog gasa lako se postiže visoka temperatura. Osim toga volfram je metal koji ima visoku tačku topljenja (3655K) tako da na visokoj temperaturi veoma sporo isparava što opet uslovjava da prozor lampe kroz koji se emituje zračenje ostane čist za dug period vremena korišćenja ovakve lampe.

Međutim, raspodela raspodela intenziteta zračenja volframskog vlakna ili uopšte necrnih tela ne može se dobiti teorijski, pa se koriste odgovarajuće empirijske formule izvedene na osnovu formula za zračenje apsolutno crnog tela [18].

Standardna lampa sa dugačkom volframskom trakom koja je u ovom radu korišćena za kalibraciju drugih izvora svetlosti prikazana je na slici 2.2.1.



Slika 2.2.1 - Standardna lampa sa dugačkom trakom.

1- stakleni balon, 2- volframska traka, 3- kvarcni prozor.

Volframska traka se nalazi u staklenom balonu iz kojeg je evakuisan vazduh. U pravcu normalnom na površinu trake i u visini sredine trake nalazi se izduženi cilindrični stakleni deo na čijem se kraju nalazi kvarcni prozor kroz koji se posmatra emitovano zračenje. Sredina trake je označena "V" zarezom. U donjem delu traka je savijena zbog amortizovanja termičkog naprezanja.

2.2.1 Kalibracija standardne lampe

Standardna lampa sa dugačkom volframskom trakom, korišćena u ovom radu, kalibrirana je u laboratoriji za plazma spektroskopiju odeljenja za atomsku fiziku američkog Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST) pomoću standardne lampe istog tipa koja se u ovoj laboratoriji koristi kao sekundarni standard. Ova druga lampa, tj. sekundarni standard kalibrirana je pomoću modela apsolutno crnog tela u laboratoriji za kalibraciju spektralnog zračenja takođe u NIST-u [19]. Kalibracija sekundarnog standarda urađena je 1982. godine i data je u tabeli 2.2.1.1.

Tabela 2.2.1.1.- Kalibracija sekundarnog standarda. λ - talasna dužina, T-temperatura crnog tela, I_λ^S - izmereni spektralni intenzitet sekundarnog standarda, I_λ^{SE} - spektralni intenzitet sekundarnog standarda izračunat prema [20], G- relativna greška računata u odnosu na izmereni spektralni intenzitet

λ (Å)	T (K)	I_λ^S (W / cm ³ sr)	I_λ^{SE} (W / cm ³ sr)	G (%)
2250.000	2645.70	6.623E+00	6.823E+00	3.41
2300.000	2644.80	9.948E+00	1.029E+01	3.40
2400.000	2643.90	2.138E+01	2.207E+01	3.22
2500.000	2642.80	4.277E+01	4.410E+01	3.11
2600.000	2641.40	8.030E+01	8.272E+01	3.01
2700.000	2639.20	1.420E+02	1.461E+02	2.92
2800.000	2636.60	2.389E+02	2.455E+02	2.78
2900.000	2634.30	3.860E+02	3.964E+02	2.71
3000.000	2631.20	5.976E+02	6.130E+02	2.57
3250.000	2622.50	1.538E+03	1.575E+03	2.42
3500.000	2613.30	3.355E+03	3.430E+03	2.23
3750.000	2603.00	6.393E+03	6.530E+03	2.14
4000.000	2592.10	1.098E+04	1.119E+04	1.95
4500.000	2569.50	2.553E+04	2.598E+04	1.76
4750.000	2557.80	3.552E+04	3.612E+04	1.70
5000.000	2545.20	4.700E+04	4.775E+04	1.60
5500.000	2521.20	7.395E+04	7.502E+04	1.45
5750.000	2508.80	8.848E+04	8.974E+04	1.42
6000.000	2496.00	1.032E+05	1.046E+05	1.35
6546.000	2468.30	1.348E+05	1.364E+05	1.25
6750.000	2457.70	1.457E+05	1.475E+05	1.22
7000.000	2444.40	1.583E+05	1.601E+05	1.16
7500.000	2417.80	1.801E+05	1.821E+05	1.11
8000.000	2390.40	1.967E+05	1.987E+05	1.03
9000.000	2334.40	2.145E+05	2.166E+05	0.96
10500.000	2249.40	2.117E+05	2.135E+05	0.83

Temperatura crnog tela je merena pomoću fotoelektričnog pirometra, ugrađenog u spektroradiometar. Ovo je temperatura boje i predstavlja onu temperaturu crnog tela za koju se u posmatranom intervalu talasnih dužina spektralna raspodela volframske trake najbolje slaže sa raspodelom crnog tela.

Jačina struje kroz volframsku traku sekundarnog standarda bila je 39.35A . Procenjena greška kod određivanja I_λ^S je 1.3% na 2600\AA , 1.0% na 3000\AA i 0.5% na 8000\AA .

Rezultati merenja spektralnog intenziteta zračenja upoređeni su sa računskim vrednostima na osnovu empirijske formule [20]:

$$I_\lambda \approx \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{1.438}{\lambda T}\right)} \left(1 + \frac{C_2}{\lambda}\right) \quad (2.2.1.1)$$

gde su C_1 i C_2 konstante koje imaju vrednosti $1.19096 \cdot 10^{-12} \text{Wcm}^2 / \text{sr}$ i $0.00616 \cdot 10^{-4} \text{cm}$. Talasna dužina zračenja λ izražena je u cm, a temperatuta T u K, tako da je I_λ izraženo u $\text{W/cm}^3\text{sr}$.

Pomoću sekundarnog standarda kalibrisana je standardna lampa korišćena u ovom radu. Kalibracija je izvršena pri temperaturi okoline od $28 \pm 3^\circ\text{C}$, a rezultat je dat u tabeli 2.2.1.2.

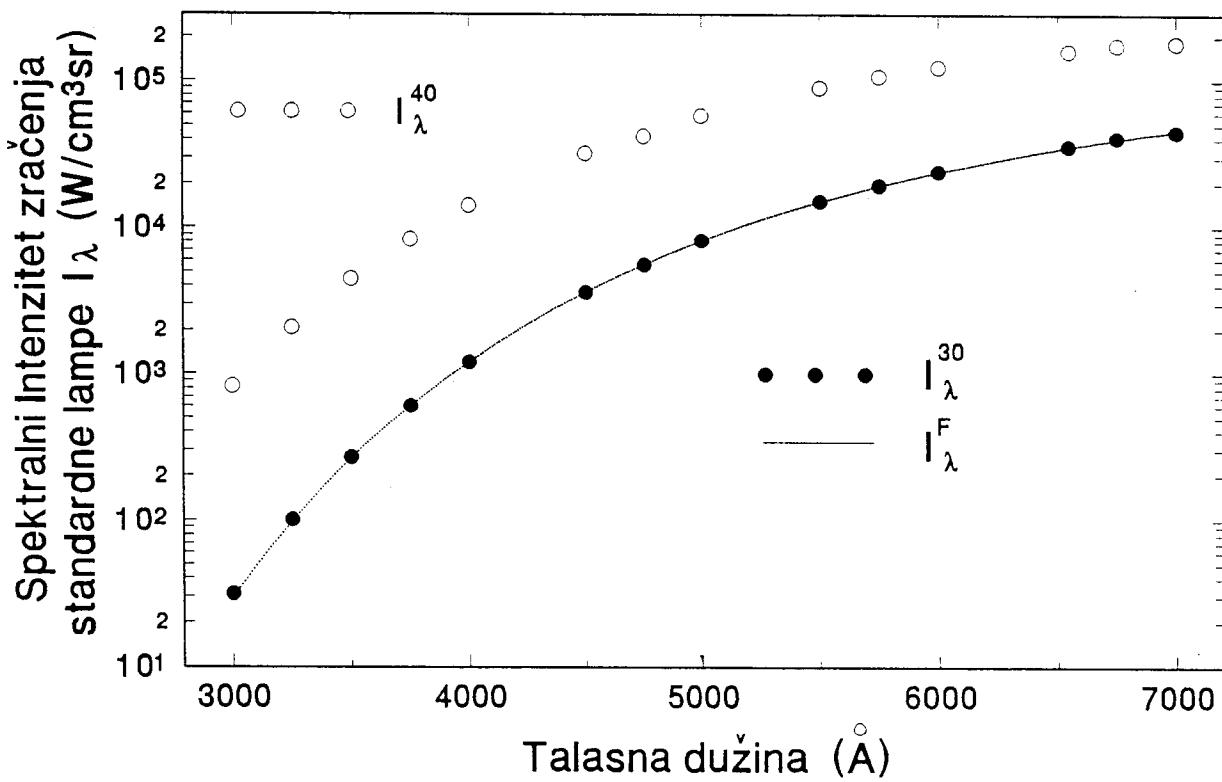
Tabela 2.2.1.2 - λ -talasna dužina, T- odgovarajuća temperatura crnog tela računata prema (2.2.1.1), I_{λ}^{40} i I_{λ}^{30} - spektralni intenziteti standardne lampe za jačine struja kroz lampu 40 i 30A. I_{λ}^F - fitovane vrednosti na I_{λ}^{30} , G- relativna greška izmerenih i fitovanih vrednosti I_{λ}^{30}

λ (Å)	T^{40} (K)	I_{λ}^{40} (W / cm ³ sr)	T^{30} (K)	I_{λ}^{30} (W / cm ³ sr)	I_{λ}^F (W / cm ³ sr)	G (%)
2500	2568	6.202E+01	2171	1.026E+00	-	-
2600	2562	1.148E+02	2173	2.409E+00	-	-
2700	2555	2.002E+02	2173	5.112E+00	-	-
2800	2549	3.336E+02	2174	1.037E+01	-	-
2900	2543	5.358E+02	2168	1.841E+01	-	-
3000	2536	8.233E+02	2162	3.131E+01	2.908E+01	-7.12
3250	2517	2.074E+03	2148	1.010E+02	9.812E+01	-2.85
3500	2499	4.449E+03	2134	2.677E+02	2.644E+02	-1.38
3750	2478	8.327E+03	2119	6.061E+02	6.007E+02	-0.89
4000	2459	1.416E+04	2105	1.208E+03	1.204E+03	-0.34
4500	2419	3.206E+04	2076	3.625E+03	3.633E+03	0.23
4750	2390	4.222E+04	2061	5.594E+03	5.600E+03	0.01
5000	2378	5.804E+04	2047	8.173E+03	8.167E+03	-0.01
5500	2340	9.049E+04	2018	1.519E+04	1.515E+04	-0.30
5750	2322	1.080E+05	2004	1.962E+04	1.942E+04	-1.03
6000	2302	1.251E+05	1989	2.437E+04	2.414E+04	-0.95
6546	2258	1.606E+05	1958	3.607E+04	3.577E+04	-0.83
6750	2246	1.754E+05	1949	4.126E+04	4.031E+04	-2.32
7000	2217	1.822E+05	1927	4.528E+04	4.609E+04	1.79
7500	2186	2.166E+05	1907	5.853E+04	-	-
8000	2148	2.292E+05	1878	6.885E+04	-	-

Prilikom kalibracije je korišćena procedura, opisana u Glavi III i IV. U tabeli 2.2.1.2 date su vrednosti spektralnih intenziteta standardne lampe I_{λ}^{40} i I_{λ}^{30} koje se odnose na dve jačine struje kroz standardnu lampu od 40 i 30A. Odgovarajuće temperature crnog tela izračunate su na osnovu izraza (2.2.1.1) kao:

$$T = \frac{1.438}{\lambda \left\{ 1 + \ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 I_{\lambda}} \left(1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \right] \right\}} \quad (2.2.1.2)$$

Rezultati kalibracije standardne lampe, dati u tabeli 2.2.1.2, prikazani su grafički na slici 2.2.1.1. Procenjena greška kalibracije je $\pm 2\%$.



Slika 2.2.1.1- Kalibracija standardne lampe I_{λ}^{40} i I_{λ}^{30} - spektralni intenziteti standardne lampe za jačine struje kroz lampu 40 i 30A. I_{λ}^F - fitovane vrednosti na I_{λ}^{30}

Da bi se standardna lampa mogla koristiti za kalibraciju drugih izvora svetlosti na talasnim dužinama različitih od onih datih u tabeli 2.2.1.2, urađeno je fitovanje metodom najmanjih kvadrata, u ovom slučaju za vrednosti I_λ^F polinomom četvrtog stepena:

$$I_\lambda^F = C_1\lambda^4 + C_2\lambda^3 + C_3\lambda^2 + C_4\lambda + C_5 \quad (2.2.1.3)$$

U ovom slučaju je od interesa opseg talasnih dužina od $3000-7000\text{Å}^0$ tako da je fitovanje izvršeno samo u tom opsegu.

Zbog oblika funkcije $I_\lambda = f(\lambda)$ mereni opseg talasnih dužina je podeljen na tri dela. Za opseg od 3000Å^0 do 4000Å^0 koriste se koeficijenti polinoma:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2.315 \cdot 10^{-10} \\ C_2 &= -2.3484658 \cdot 10^{-8} \\ C_3 &= 8.9896237478 \cdot 10^{-3} \\ C_4 &= -1.5374042511 \cdot 10^1 \\ C_5 &= 9.90165918 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

za opseg od 4000Å^0 do 5000Å^0 koristi se polinom trećeg stepena sa koeficijentma:

$$\begin{aligned} C_1 &= 7.990815 \cdot 10^{-7} \\ C_2 &= -6.579451 \cdot 10^{-3} \\ C_3 &= 1.743383 \cdot 10^1 \\ C_4 &= -1.440138 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

i za opseg od 5000Å^0 do 7000Å^0 koriste se koeficijenti:

$$\begin{aligned} C_1 &= -1.026 \cdot 10^{-10} \\ C_2 &= 1.7465619 \cdot 10^{-6} \\ C_3 &= -6.17722422 \cdot 10^{-3} \\ C_4 &= -6.0628 \cdot 10^0 \\ C_5 &= 3.8810152344 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Rezultati procedure fitovanja dati su u tabeli 2.2.1.2, a prikazani su i na slici 2.2.1.1. Greška fitovanih vrednosti u odnosu na merene vrednosti

spektralnog intenziteta I_λ kreće se u intervalu od $\pm 2\%$ ako se izuzmu prve dve tačke na 3000 i 3250 \AA^0 , što pokazuje da se fitovane vrednosti I_λ mogu koristiti u proceduri kalibracije drugih spektralnih izvora. Ako je potrebana veća tačnost, raspodela intenziteta zračenja u posmatranom intervalu talasnih dužina može se izdeliti na četiri ili pet delova, što će sniziti grešku fitovanja na ispod $\pm 0.5\%$.

Zračenje, emitovano iz centra trake, posmatrano kroz kvarerni prozor (slika 2.2.1) je slabo polarizovano.

$$P = \frac{I_\lambda(\max) - I_\lambda(\min)}{I_\lambda(\max) + I_\lambda(\min)} \quad (2.2.1.4)$$

Stepen polarizacije određen na talasnoj dužini 5000 \AA^0 iznosi 0.034 , tako da polarizacija praktično nema uticaja na kalibraciju.

Pri upotrebi standardne lampe treba voditi računa o vremenu rada standardne lampe. Korekcija spektralnog intenziteta zračenja u funkciji vremena rada lampe može se izraziti kao [21]:

$$\delta I_{\lambda_0} = H(-0.061\%) \quad (2.2.1.5)$$

za talasnu dužinu $\lambda_0 = 6546 \text{ \AA}^0$. Vreme rada lampe H je izraženo u časovima. Korekcija za druge talasne dužine, izražena u procentima, izračunava se iz [21]:

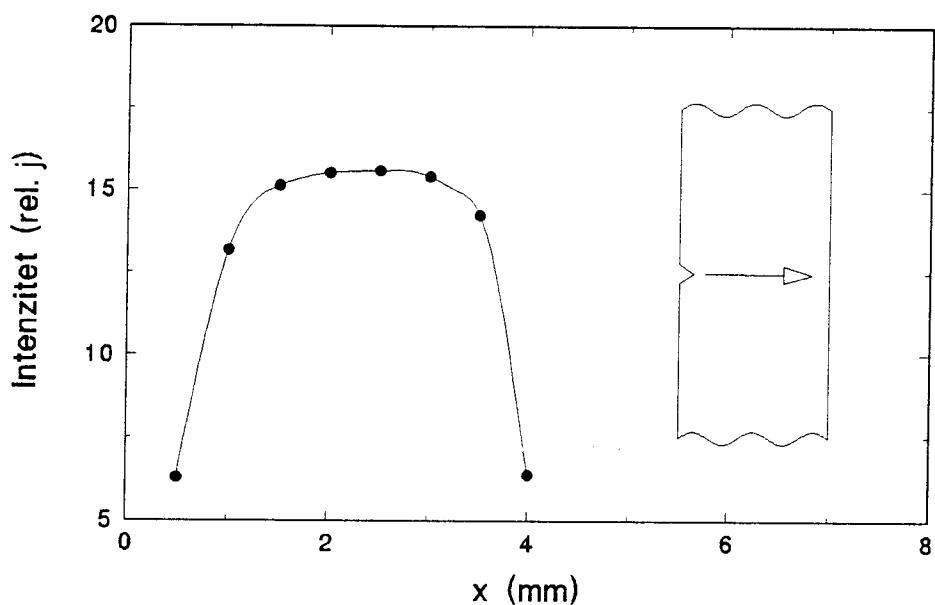
$$\delta I_\lambda = \frac{6546}{\lambda} \delta I_{\lambda_0} \quad (2.2.1.6)$$

gde je talasna dužina λ izražena u \AA^0 .

2.2.2 Raspodela intenziteta zračenja duž volframske trake

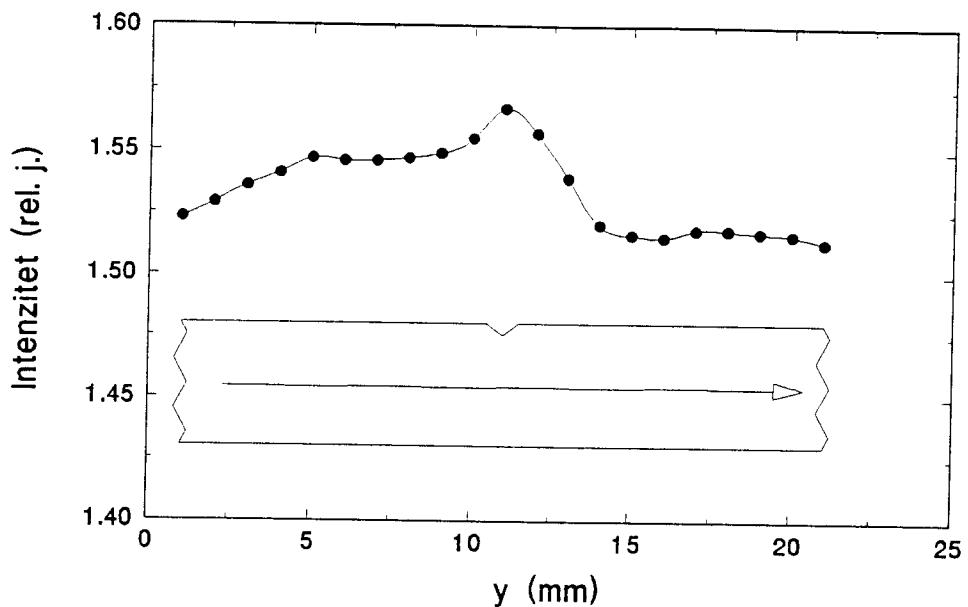
Na sredini volframske trake standardne lampe nalazi se zarez u obliku slova V. Na tom mestu je smanjen presek trake, što znači da je povećan otpor, a time i zagrevanje trake usled protoka struje. Povećanje

temperature u centralnom delu ima za posledicu i veći intenzitet zračenja sa toga mesta. U tom cilju je izvršeno merenje intenziteta zračenja poprečno i uzduž volframske trake. Merenje je izvršeno na talasnoj dužini 6500\AA , a jačina struje je bila 35A. Lik usijane volframske trake, projektovan je u odnosu 1:1 na ulaznu pukotinu monohromatora, tako da je posmatran isečak trake visine 0.8mm i širine 0.6mm. Na slici 2.2.2.1 prikazana je raspodela intenziteta zračenja, gledana poprečno u odnosu na traku i to u smjeru od "V" zareza.



Slika 2.2.2.1- Raspodela intenziteta zračenja
poprečno na volframsku traku

Na slici 2.2.2.2 prikazana je raspodela intenziteta zračenja duž volframske trake u smjeru od gore prema dole (slika 2.2.1).



Slika 2.2.2.2- Raspodela intenziteta zračenja
duž volframske trake

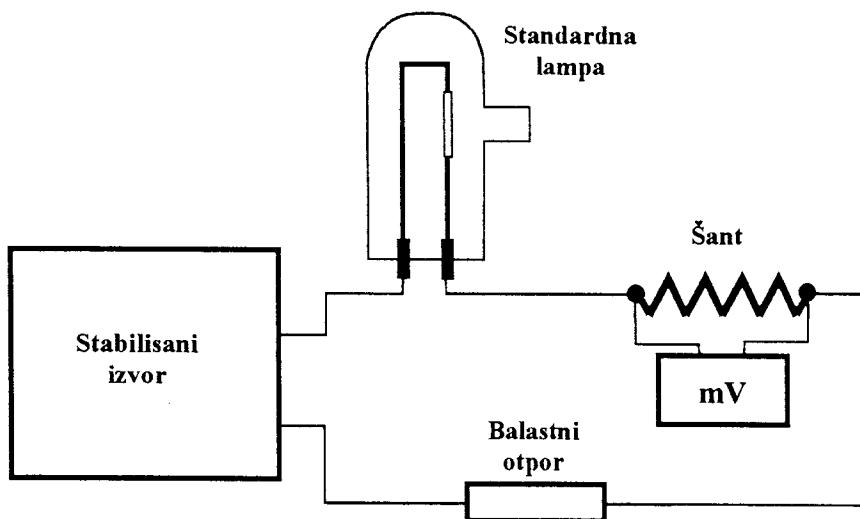
Sa slike 2.2.2.1 i 2.2.2.2 vidi se porast intenziteta zračenja emitovanog sa centralnog dela volframske trake. Upravo je zračenje sa centralnog dela trake korišćeno za kalibraciju standardne lampe. O ovome treba voditi računa prilikom korišćenja standardne lampe za kalibraciju drugih izvora svetlosti, što znači da ne treba posmatrati površinu veću od $2 \times 2\text{mm}$ u oblasti "V" zareza.

2.2.3 Strujni izvor i stabilnost jačine struje kroz standardnu lampu

Od jačine struje koja protiče kroz volframsku traku standardne lampe zavisi temperatura trake, a time i intenzitet zračenja. Promena jačine struje od 1mA pri jačini struje od 40A prouzrokuje promenu u spektralnom intenzitetu zračenja I_λ od približno 0.013%. Merenje je izvršeno na talasnoj dužini 6546\AA . Promena δI_λ izražena u procentima po mA za različite talasne dužine može se izračunati kao [21]:

$$\frac{\delta I_\lambda}{\delta I} = \frac{6546}{\lambda} \times 0.013 \quad (2.2.3.1)$$

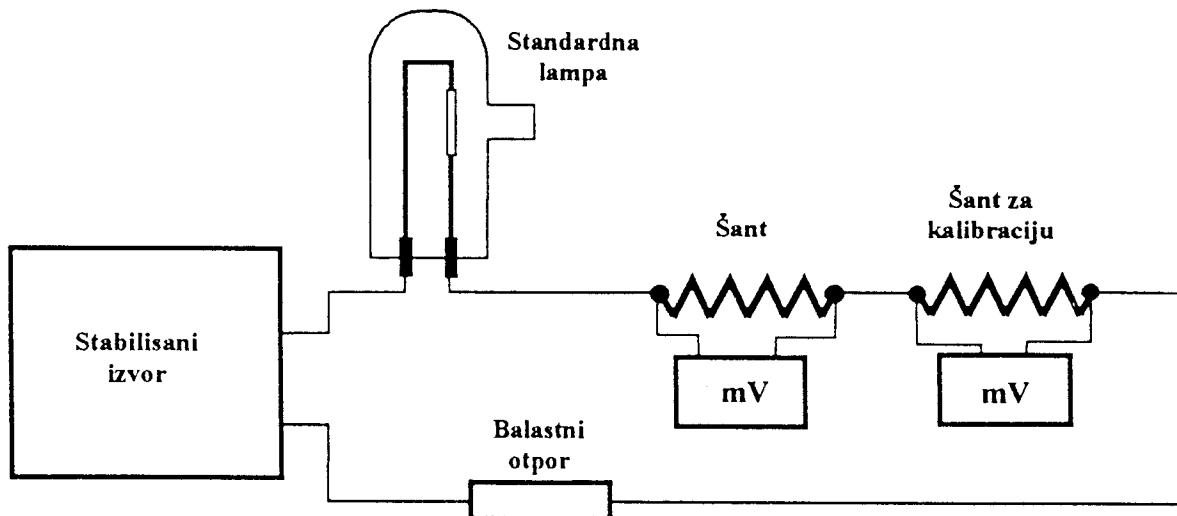
Ovo ukazuje da je prilikom merenja sa standardnom lampom potrebno koristiti visoko stabilan izvor struje. Precizno merenje jačine struje je od velike važnosti. Na slici 2.2.3.1 prikazano je kolo za električno napajanje standardne lampe.



Slika 2.2.3.1- Šema kola za električno napajanje standardne lampe

Kao izvor struje koristi se jednosmerni stabilisani izvor, posebno konstruisan za ovakve namene. Izvor daje maksimalnu jačinu struje od 30A sa stabilnošću od 0.3%. Jačina struje se meri i kontroliše pomoću šant otpornika i milivoltmetra. U kolu se još nalazi i balastni otpornik od 1.8Ω jer je otpor volframske trake standardne lampe veoma mali, 0.006Ω , u nezagrejanom stanju.

Šant za merenje jačine struje napravljen je od komada bakarne žice 0.045Ω i pre upotrebe je kalibriran. Kalibracija je izvršena pomoću standardnog šanta i instrumenta, pozajmljenih iz Laboratorije za kalibraciona merenja Elektrotehničkog fakulteta. Način kalibracije je prikazan na slici 2.2.3.2.



Slika 2.2.3.2- Kalibracija šanta za merenje
jačine struje

Za jačinu struje od 30A koja protiče kroz kolo milivoltmetar, priključen na šant koji služi za kalibraciju, pokazivao je 100mV, a milivoltmetar na šantu koji je kalibriran pokazivao je 24.5mV.

Prilikom uključenja standardne lampe u kolo struje treba početi sa jačinom struje ne većom od 5A i nakon svakih 5min povećavati jačinu struje sa korakom ne većim od 5A da bi se izbeglo veliko termičko naprezanje volframske trake. Nakon dostignute jačine struje od 30A treba sačekati oko 30min da se temperatura lampe stabilizuje pa tek posle toga početi sa merenjem.

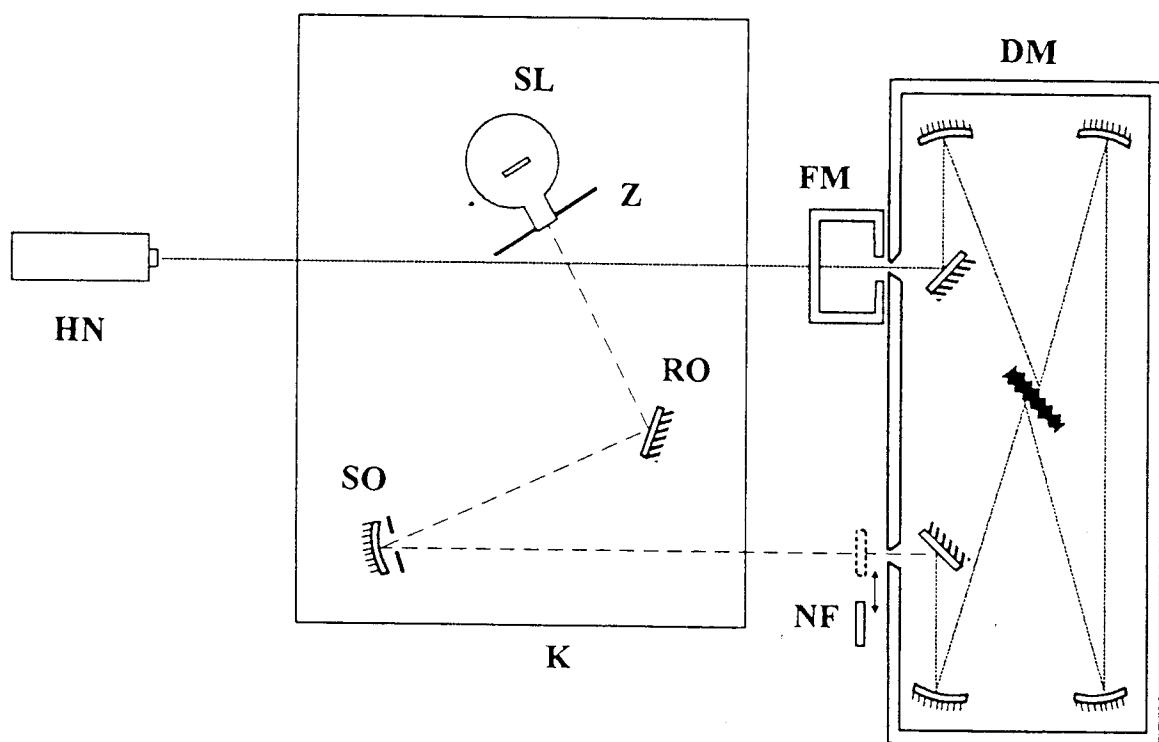
GLAVA III

3.1 POSTAVKA MERNOG SISTEMA

Kalibracija nekog svetlosnog izvora tj. merenje intenziteta ili spektralnog intenziteta svetlosnog izvora u absolutnim jedinicama svodi se na upereditvanje intenziteta zračenja standardnog izvora i intenziteta zračenja posmatranog izvora svetlosti. U tom cilju postavljen je merni sistem koji se sastoji od optičkog sistema i sistema za prikupljanje podataka.

3.1.1 Optički sistem

Na slici 3.1.1 dat je šematski prikaz optičkog sistema.



Slika 3.1.1- Optički sistem

Lik standardne lampe SL se preko ravnog ogledala RO i sfernog ogledala SO žižne daljine 60cm dovodi na ulaznu pukotinu monohromatora DM u

razmeri 1:1. Ispred standardne lampe nalazi se zaklon Z, kojim se obezbeđuje da na ogledala RO i SO padne samo zračenje koje je prošlo kroz kvarcni prozor standardne lampe. Na sfernom ogledalu SO postavljena je blenda prečnika 10mm da bi se ograničio prostorni ugao posmatranja. Oko standardne lampe i ogledala postavljen je zaklon K radi zaštite od velikog intenziteta svetlosti. U slučaju kada je intenzitet upadne svetlosti velik, ispred ulazne pukotine monohromatora postavlja se filter NF kako bi se obezbedilo da jačina struje kroz fotomultiplikator FM ne pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost. Signal sa fotomultiplikatora se vodi na odgovarajući merni instrument.

Nakon merenja signala koji potiču od standardne lampe, na mesto standardne lampe postavlja se izvor svetlosti koji je potrebno kalibrirati.

Optičko poravnavanje sistema vrši se pomoću He-Ne lasera HN. Potrebno je obezrediti da na ulaznu pukotinu monohromatora padne zračenje sa centralnog dela volframske trake. Postupak poravnавanja je sledeći. Prvo se sa izlazne pukotine monohromatora skine fotomultiplikator. Zatim se He-Ne laser podesi tako da laserski zrak koji padne na izlaznu pukotinu izade kroz ulaznu pukotinu monohromatora. Izlazni laserski zrak služi za podešavanje visine i položaja centra ogledala i standardne lampe. Ovim se postiže da zračenje iz centralnog dela volframske trake, koje pada na ulaznu pukotinu, prelazi isti put kao i laserski zrak samo u suprotnom smeru, tako da posle prolaska kroz monohromator pada na izlaznu pukotinu, tj. na fotomultiplikator.

3.1.2 Elementi optičkog sistema

Svaki od elemenata optičkog sistema mora zadovoljiti određene uslove kako bi se mogao koristiti za ovakva merenja.

Standardna lampa

Karakteristike standardne lampe i zahtevi u vezi sa stabilnim električnim napajanjem opisani su u Glavi II (2.2, 2.2.1, 2.2.2 i 2.2.3).

Ogledala

Za kalibraciona optička merenja koriste se kvalitetna laboratorijska ogledala. Ova ogledala su obično načinjena od tankog sloja aluminijuma naparenog na debelu staklenu podlogu koja je otporna na termičke deformacije.

Optički filter

Kako se ovde radi o merenju spektralnog intenziteta, tj. o raspodeli intenziteta zračenja po talasnim dužinama u širem intervalu spektra, potpuno je jasno da se za sniženje nivoa signala moraju koristiti tzv. neutralni filtri. Ovo su filtri kod kojih transparencija slabo zavisi od talasne dužine. Postoji više vrsta neutralnih filtera, međutim za ovakva merenja mogu se koristiti samo kvalitetni neutralni metal film filtri. Na primer, neutralni filtri načinjeni od stakla koje sadrži organske boje dobri su samo za niske intenzitete svetlosti, međutim za intenzitete svetlosti koje daje standardna lampa oni postaju optički aktivni, što znači da im se transparencija menja u zavisnosti od intenziteta upadne svetlosti, i time postaju potpuno neupotrebljivi u postupku kalibracije.

U ovom slučaju je u opsegu talasnih dužina od 357nm do 625nm korišćen neutralni metal film filter. Pre upotrebe izvršena je kalibracija filtra, tj. određena je transparencija filtra u pomenutom opsegu talasnih dužina. U tabeli 3.1.2.1 dati su rezultati kalibracije . Sa $I_{\lambda BF}$ i $I_{\lambda SF}$ označeni su signali sa fotomultiplikatora bez filtra i kada je na ulaznu pukotinu postavljen neutralni filter. Veličina ovih signala je proporcionalna odgovarajućim spektralnim intenzitetima i nazvana je relativni spektralni intenzitet i izražena je u relativnim jedinicama .

Transparencija filtra je određena kao:

$$T_{\lambda} = \frac{I_{\lambda BF}}{I_{\lambda SF}} \quad (3.1.2.1)$$

i data je u tabeli 3.1.2.1, a takođe i grafički prikazana na slici 3.1.2.1.

Tabela 3.1.2.1- λ -talasna dužina, $I_{\lambda BF}$ - relativni spektralni intenzitet zračenja bez filtra na ulaznoj pukotini monohromatora, $I_{\lambda SF}$ - relativni spektralni intenzitet zračenja sa filtrom na ulaznoj pukotini monohromatora, $T_{r\lambda}$ - transparencija, $T_{r\lambda}^F$ - fit transparencije.

λ (nm)	$I_{\lambda BF}$ (rel.j.)	$I_{\lambda SF}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}$	$T_{r\lambda}^F$
357	11.400	1.801	6.330	6.57
361	14.600	2.200	6.637	6.60
365	17.400	2.601	6.690	6.63
369	19.800	3.000	6.600	6.67
373	22.400	3.402	6.585	6.70
377	26.200	3.869	6.772	6.73
381	28.800	4.201	6.855	6.77
385	30.400	4.534	6.705	6.80
389	33.200	4.864	6.825	6.84
393	35.000	5.002	6.997	6.88
397	37.000	5.265	7.027	6.92
401	38.400	5.464	7.027	6.95
405	39.800	5.598	7.110	6.99
409	40.600	5.734	7.080	7.03
413	41.200	5.801	7.102	7.07
417	38.000	5.333	7.125	7.11
421	42.800	6.001	7.132	7.15
425	56.800	7.800	7.282	7.19
429	67.600	9.132	7.402	7.23
433	66.200	8.998	7.357	7.27
437	60.000	8.333	7.200	7.31
441	58.200	8.067	7.215	7.35
445	62.200	8.532	7.290	7.39
449	67.600	9.331	7.245	7.43
453	77.400	10.595	7.305	7.47
457	87.500	11.737	7.455	7.51
461	98.700	12.864	7.672	7.55
465	106.400	13.602	7.822	7.58

λ (nm)	$I_{\lambda BF}$ (rel.j.)	$I_{\lambda SF}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}$	$T_{r\lambda}^F$
469	111.500	14.462	7.710	7.62
473	115.000	14.673	7.837	7.66
477	117.600	15.005	7.837	7.69
481	118.800	15.071	7.882	7.73
485	118.200	15.198	7.777	7.76
489	117.200	14.997	7.815	7.79
493	116.800	14.527	8.040	7.82
497	114.400	14.404	7.942	7.85
501	111.200	14.134	7.867	7.88
505	109.400	13.866	7.890	7.91
509	107.800	13.794	7.815	7.94
513	106.600	13.537	7.875	7.96
517	102.500	13.003	7.882	7.98
521	98.000	12.798	7.657	8.01
525	93.500	12.467	7.500	8.03
529	89.600	11.935	7.507	8.04
533	85.200	11.337	7.515	8.06
537	85.600	10.996	7.785	8.08
541	81.700	10.267	7.957	8.09
545	77.800	9.596	8.107	8.10
549	73.300	9.134	8.025	8.11
553	69.000	8.663	7.965	8.11
557	67.900	8.200	8.280	8.12
561	66.200	7.931	8.347	8.12
565	63.800	7.469	8.542	8.12
569	60.700	7.131	8.512	8.12
573	57.600	6.667	8.640	8.11
577	54.500	6.335	8.602	8.11
581	50.000	6.066	8.242	8.09
585	45.200	5.400	8.370	8.08
589	39.100	4.735	8.257	8.07
593	32.300	3.999	8.077	8.05
597	26.900	3.400	7.912	8.03
601	22.300	2.800	7.965	8.00

λ (nm)	$I_{\lambda BF}$ (rel.j.)	$I_{\lambda SF}$ (rel.j.)	T_r	T_r^F
605	18.800	2.401	7.830	7.97
609	15.900	2.000	7.950	7.94
613	13.500	1.734	7.785	7.91
617	11.700	1.534	7.627	7.87
621	10.200	1.333	7.650	7.83
625	8.700	1.133	7.680	7.80

Da bi se kalibracija filtra mogla koristiti za bilo koju talasnu dužinu, izmerene vrednosti transparencije su fitovane metodom najmanjih kvadrata polinomom trećeg stepena:

$$T_r^F = C_1 \lambda^3 + C_2 \lambda^2 + C_3 \lambda + C_4 \quad (3.1.2.2)$$

gde je :

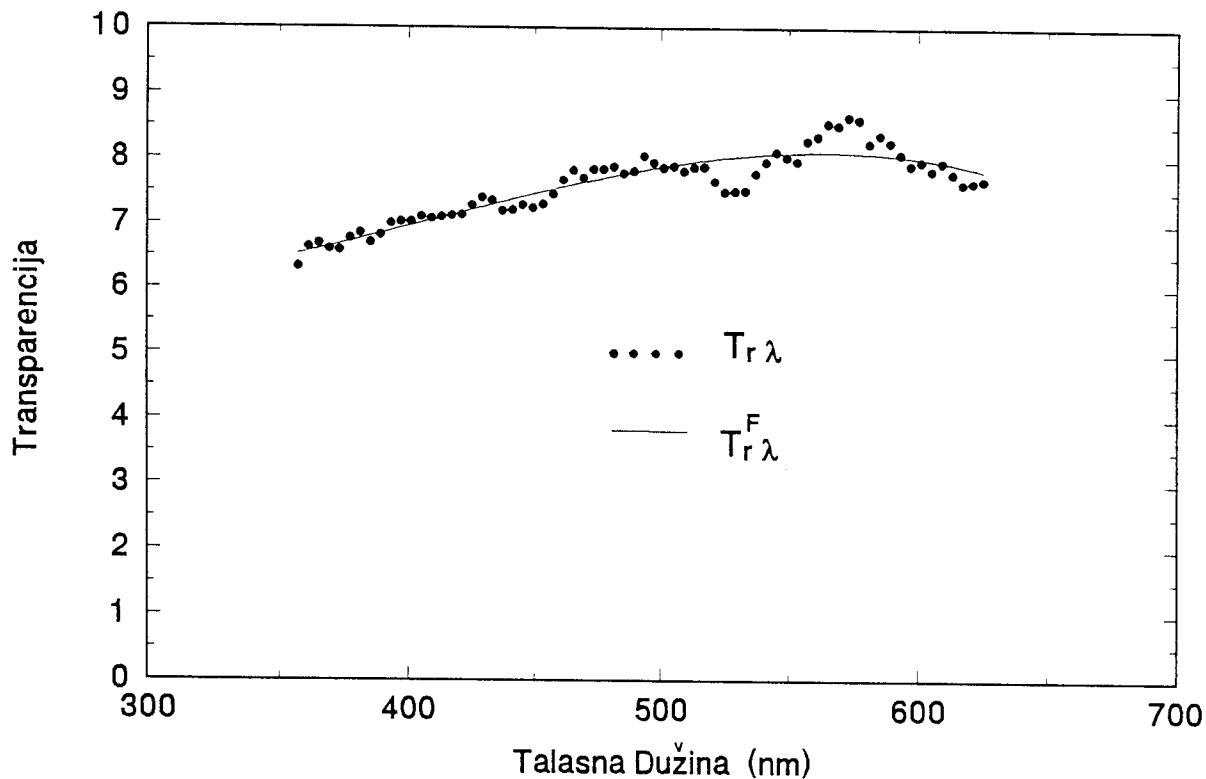
$$C_1 = -1.841713 \cdot 10^{-7}$$

$$C_2 = 2.363465 \cdot 10^{-4}$$

$$C_3 = -9.10612 \cdot 10^{-2}$$

$$C_4 = 1.734045 \cdot 10^1$$

Fitovane vrednosti transparencije date su u tabeli 3.1.2.1 i grafički prikazane na slici 3.1.2.1. Sa slike se vidi da postoji određeno odstupanje mernih tačaka od fitovanih, što je uslovljeno šumom, naročito za niske vrednosti signala. Međutim, ovo odstupanje nije veliko +6.7% i -6.5% u najnepovoljnijem slučaju za svega nekoliko tačaka.



Slika 3.1.2.1- T_{λ} - transparencija (merene vrednosti),
 T_{λ}^F - fit transparencije

Monohromator

Za razlaganje svetlosti po talasnim dužinama korišćen je dvostruki monohromator, tj. monohromator koji ima dve difrakcione rešetke i dva sistema ogledala (slika 3.1.1). U sistemu za kalibraciju svetlosnih izvora pomoću standardne lampe potrebno je koristiti dvostruki monohromator ili monohromator sa predisperzorom koji je korišćen prilikom kalibracije standardne lampe. Ovo je neophodno zbog toga da bi se izbegao uticaj spektra drugog reda i rasejanog zračenja unutar monohromatora jer je intenzitet zračenja standardne lampe relativno velik. Predisperzor ili prva difrakcionala rešetka obezbeđuju da na drugu rešetku padne samo izdvojeni uzani deo spektra koji se trenutno posmatra.

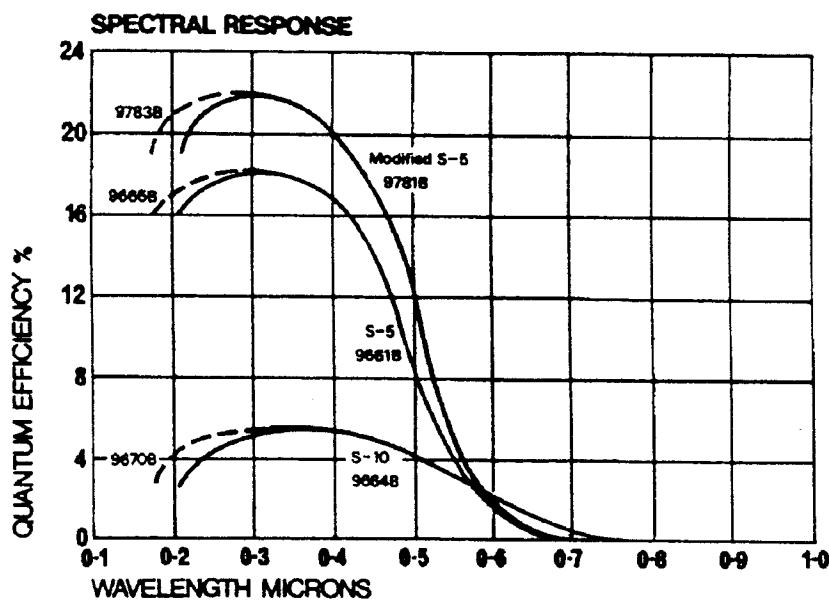
Ponekad se za eliminaciju drugog reda spektra i rasejane svetlosti na ulaznu pukotinu običnog monohromatora stavljaju široki pojasni filtri ili kombinacije ovih filtera. Mogu se koristiti samo interferencijski filtri, a nikako stakleni kolor filtri jer kod njih dolazi do pojave fluorescencije na nekim talasnim dužinama, tj. do promene transparencije u zavisnosti od intenziteta upadne svetlosti [22]. Međutim, za svaku usku oblast talasnih dužina treba koristiti drugu kombinaciju interferencijskih filtera, koji opet unose dodatne greške u merenju spektralnog intenziteta i to različite za različite opsege talasnih dužina. Osim toga, svaku od ovih kombinacija filtera potrebno je prethodno kalibrirati. Ovo je razlog zašto se za kalibraciju svetlosnih izvora koristi dvostruki monohromator.

Inverzna linearna disperzija dvojnog monohromatora korišćenog u ovom radu je 2.5nm/mm. Obe difrakcione rešetke imaju 1200 zareza po milimetru.

Fotomultiplikator

Fotomultiplikator pretvara optički signal sa izlaza monohromatora u električni signal pogodan za merenje. Pretvaranje optičkog signala u električni zasniva se na pojavi fotoefekta. Fotomultiplikator je vakuumска elektronska cev koju sačinjavaju fotokatoda, elektronski multiplikator i anoda [23]. Fotokatoda daje polazni snop fotoelektrona koji se u elektronskom multiplikatoru, sastavljenom od niza elektroda (dinoda), umnožavaju pomoću sekundarne emisije [24], dok anoda služi za prihvatanje pojačanog snopa elektrona na izlazu elektronskog multiplikatora.

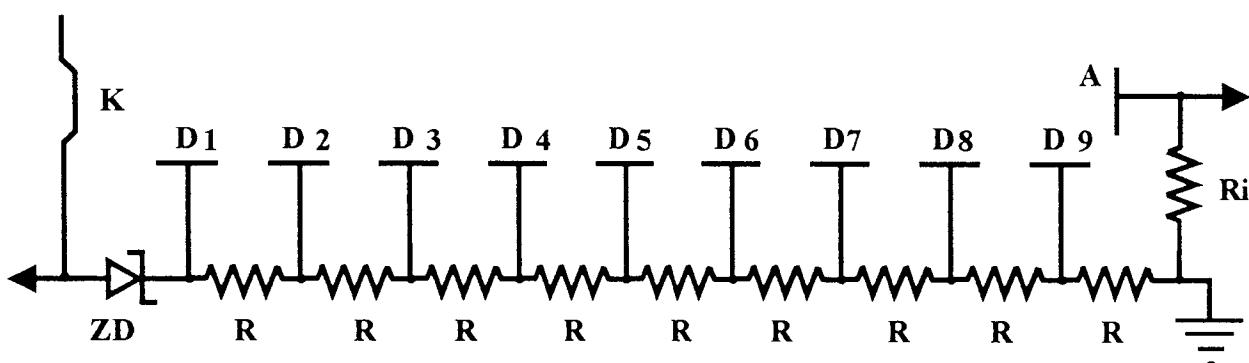
Spektralna karakteristika fotomultiplikatora zavisi od materijala od kojeg se izrađuju fotokatoda i ostale elektrode i od materijala od kojeg je izrađen prozor, kroz koji snop fotona pada na fotokatodu. U ovom radu je korišćen fotomultiplikator RCA 1P28, čija je spektralna karakteristika [25] prikazana na slici 3.1.2.2.



Slika 3.1.2.2- Spektralna karakteristika fotomultiplikatora RCA 1P28

Spektralna karakteristika fotomultiplikatora ima najveći uticaj na spektralnu karakteristiku celog optičkog sistema tako da je ona uslovila opseg talasnih dužina od 300-700nm, korišćen pri ovom merenju.

Umnožavanje sekundarnih elektrona je omogućeno odgovarajućom razlikom potencijala između dinoda. Šema električnog napajanja fotomultiplikatora RCA 1P28 [25] prikazana je na slici 3.1.2.3.



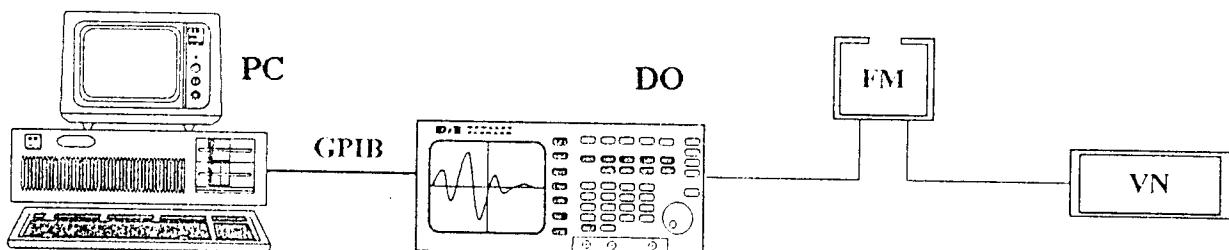
Slika 3.1.2.3- Šema električnog napajanja fotomultiplikatora

Da bi se obezbedio potreban pad napona između dinoda (oko 100V), na fotomultiplikator se dovodi visoki napon do 1200V. Da bi se smanjila fluktuacija signala usled promene napona napajanja, poželjno je između fotokatode i prve dinode održavati stalnim, bez obzira na napon između fotokatode i anode. Zbog toga se vrlo često između fotokatode i prve dinode umesto otpornika vezuje zener dioda. Koeficijent sekundarne emisije, a time i pojačanje elektronskog multiplikatora, zavisi od napona između dinoda. Relativna promena pojačanja je oko deset puta veća od relativne promene napona napajanja. Zbog toga napon izvora visokog napona za napajanje fotomultiplikatora mora imati veliku stabilnost (0.1%).

Električni signal fotomultiplikatora uzima se sa izlaznog otpornika R_i . Vrednost R_i je izabrana tako da za pad napona na otporniku od 5V struja fotomultiplikatora ne pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost od 0.5mA [25].

3.1.3 Sistem za prikupljanje podataka

Način prikupljanja merenih podataka je važan element u celokupnoj proceduri kalibracije svetlosnih izvora sa stanovišta povećanja tačnosti i brzine merenja. Za merenje spektralnog intenziteta zračenja korišćen je sistem prikazan na slici 3.1.3.1.

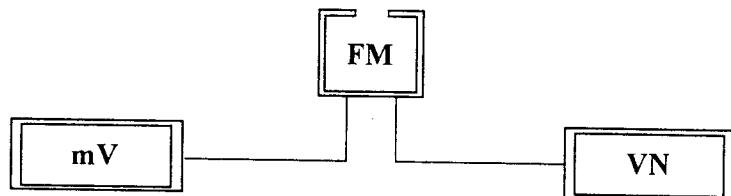


Slika 3.1.3.1- Sistem za merenje spektralnog intenziteta svetlosti

Signal sa fotomultiplikatora FM, koji se napaja pomoću izvora visokog napona VN, vodi se na ulaz digitalnog osciloskopa DO. Ovaj osciloskop ima mogućnost usrednjavanja signala. Kada se radi o impulsima,

rezultujući signal je srednja vrednost od 2^n signala, gde je $n=1,2,\dots,11$. Mada je u ovim kalibracionim merenjima korišćen jednosmerni signal, zbog postojanja šuma i veoma malih ali svakako neizbežnih varijacija u intenzitetu zračenja svetlosnih izvora, uvek postoje varijacije u nivou signala. Srednja vrednost signala dobija se iz 32 očitavanja u toku od 20 ms. Ovako usrednjeni signal se preko HP-IB interfejsa vodi na personalni kompjuter PC (slika 3.1.3.1). Rad osciloskopa i očitavanje signala kontrolisani su personalnim kompjuterom pomoću odgovarajućeg programa napisanog u HP-BASIC-u, i koji je dat u prilogu. Ovakav način prikupljanja podataka je veoma pogodan kada se merenje vrši u širokom intervalu talasnih dužina i kada je potrebno prikupiti veliki broj podataka.

U slučaju pojedinačnog merenja, tj. merenja na jednoj talasnoj dužini, odnosno u veoma uskom intervalu talasnih dužina, na primer kada se meri intenzitet spektralne linije ili kada se radi o nekoliko merenja, umesto sistema osciloskop - kompjuter za merenje izlaznog signala sa fotomultiplikatora može se koristiti univerzalni instrument, što je prikazano na slici 3.1.3.2.



Slika 3.1.3.2- Sistem za pojedinačna merenja intenziteta svetlosti

Srednja vrednost nivoa signala sa fotomultiplikatora u ovom slučaju se dobija usrednjavanjem vrednosti signala dobijenih u više uzastopnih očitavanja instrumenta.

GLAVA IV

4.1 SPEKTRALNA RASPODELA ZRAČENJA HALOGENE SIJALICE

Spektralni intenzitet halogene sijalice, izražen u absolutnim jedinicama, određen je u opsegu talasnih dužina od 300 do 700nm. Merenje spektralnog intenziteta rađeno je tačku po tačku. Na određenoj talasnoj dužini tj. na određenom položaju monohromatora posmatran je veoma uzan interval talasnih dužina od 0.25nm, određen širinom pukotine monohromatora od $100\mu\text{m}$ i linearnom inverznom disperzijom rešetke od 2.5nm/mm. Visina pukotine je bila 2mm.

Prvo je posmatrano zračenje standardne lampe. Snimljen je relativni spektralni intenzitet $J_{SL\lambda}$, tj. intenzitet zračenja standardne lampe koji je prošao kroz optički sistem (napon na izlazu fotomultiplikatora) u posmatranom opsegu talasnih dužina. Ova veličina je nazvana relativni spektralni intenzitet jer je proporcionalana intenzitetu izvora zračenja izraženom u absolutnim jedinicama, a faktor proporcionalnosti je spektralna osetljivost optičkog sistema. Zatim je na mesto standardne lampe (slika 3.1.1.1) postavljena halogena sijalica. Pomoću He-Ne lasera podešeno je da centar vlakna halogene sijalice bude na istom mestu gde je bio centar volframske trake standardne lampe. Na ovaj način je obezbeđen jednak prostorni ugao posmatranja kao i u prethodnom slučaju. Nakon toga snimljen je relativni spektralni intenzitet halogene sijalice $J_{HS\lambda}$ u posmatranom opsegu talasnih dužina. U ovom slučaju je zbog smanjenja intenziteta upadne svetlosti ispred ulazne pukotine monohromatora postavljen neutralni filter (slika 3.1.1.1). Filter je korišćen u opsegu talasnih dužina od 357nm do 625nm.

Rezultati merenja, kao i potrebnih izračunavanja dati su u tabeli 4.1.1.

Tabela 4.1.1- λ - talasna dužina, $J_{SL\lambda}$ - relativni spektralni intenzitet standardne lampe, $I_{SL\lambda}^F$ - spektralni intenzitet standardne lampe izračunat pomoću formule (2.2.1.3), $J_{HS\lambda}$ - relativni spektralni intenzitet halogene sijalice snimljen uz korišćenje neutralnog filtra, T_{λ}^F - transparencija neutralnog filtra uzeta iz Tabele 3.1.2.1, $J_{HS\lambda}$ - relativni spektralni intenzitet halogene sijalice (izvršena korekcija na transparenciju filtra), $I_{HS\lambda}$ - spektralni intenzitet halogene sijalice.

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	T_{λ}^F	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)
300	0.00344	29.08	0.0067	1.00	0.0067	57
301	0.00353	30.68	0.0063	1.00	0.0063	55
302	0.00338	32.36	0.0066	1.00	0.0066	63
303	0.00357	34.12	0.0059	1.00	0.0059	57
304	0.00371	35.95	0.0061	1.00	0.0061	59
305	0.00355	37.87	0.0056	1.00	0.0056	59
306	0.00352	39.87	0.0059	1.00	0.0059	67
307	0.00362	41.96	0.0053	1.00	0.0053	62
308	0.00338	44.14	0.0054	1.00	0.0054	71
309	0.00347	46.41	0.0054	1.00	0.0054	72
310	0.00342	48.77	0.0050	1.00	0.0050	72
311	0.00329	51.24	0.0054	1.00	0.0054	85
312	0.00367	53.82	0.0053	1.00	0.0053	78
313	0.00350	56.49	0.0054	1.00	0.0054	87
314	0.00315	59.28	0.0052	1.00	0.0052	98
315	0.00362	62.19	0.0055	1.00	0.0055	94
316	0.00308	65.20	0.0056	1.00	0.0056	118
317	0.00321	68.33	0.0056	1.00	0.0056	119
318	0.00315	71.58	0.0059	1.00	0.0059	133
319	0.00320	74.97	0.0063	1.00	0.0063	147
320	0.00306	78.48	0.0068	1.00	0.0068	174
321	0.00326	82.13	0.0069	1.00	0.0069	173
322	0.00341	85.91	0.0073	1.00	0.0073	184
323	0.00332	89.83	0.0077	1.00	0.0077	209
324	0.00346	93.90	0.0081	1.00	0.0081	220
325	0.00338	98.12	0.0089	1.00	0.0089	258

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$T_{\rho\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
326	0.00332	102.49	0.0098	1.00	0.0098	301
327	0.00347	107.01	0.0101	1.00	0.0101	310
328	0.00330	111.71	0.0111	1.00	0.0111	377
329	0.00333	116.56	0.0116	1.00	0.0116	407
330	0.00303	121.58	0.0126	1.00	0.0126	507
331	0.00311	126.78	0.0137	1.00	0.0137	558
332	0.00333	132.15	0.0149	1.00	0.0149	593
333	0.00309	137.71	0.0158	1.00	0.0158	701
334	0.00329	143.44	0.0169	1.00	0.0169	737
335	0.00365	149.37	0.0183	1.00	0.0183	749
336	0.00328	155.51	0.0202	1.00	0.0202	957
337	0.00323	161.81	0.0218	1.00	0.0218	1090
338	0.00352	168.36	0.0235	1.00	0.0235	1125
339	0.00324	175.10	0.0321	1.00	0.0321	1737
340	0.00316	182.06	0.0350	1.00	0.0350	2018
341	0.00377	189.22	0.0391	1.00	0.0391	1961
342	0.00372	196.61	0.0413	1.00	0.0413	2183
343	0.00328	204.23	0.0438	1.00	0.0438	2725
344	0.00344	212.09	0.0474	1.00	0.0474	2924
345	0.00342	220.18	0.0509	1.00	0.0509	3276
346	0.00355	228.51	0.0533	1.00	0.0533	3430
347	0.00357	237.10	0.0571	1.00	0.0571	3797
348	0.00365	245.94	0.0614	1.00	0.0614	4141
349	0.00377	255.04	0.0654	1.00	0.0654	4428
350	0.00371	264.40	0.0683	1.00	0.0683	4869
351	0.00362	274.04	0.0707	1.00	0.0707	5348
352	0.00387	283.94	0.0727	1.00	0.0727	5338
353	0.00402	294.12	0.0752	1.00	0.0752	5506
354	0.00395	304.59	0.0768	1.00	0.0768	5918
355	0.00413	315.35	0.0800	1.00	0.0800	6113
356	0.00424	326.42	0.0900	1.00	0.0900	6934
357	0.00426	337.76	0.0154	6.57	0.1011	8015
358	0.00432	349.44	0.0160	6.58	0.1055	8541
359	0.00454	361.40	0.0171	6.59	0.1128	8978
360	0.00445	373.72	0.0173	6.60	0.1142	9602
361	0.00454	386.35	0.0185	6.60	0.1220	10392

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J'_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
362	0.00488	399.30	0.0181	6.61	0.1199	9802
363	0.00462	412.60	0.0189	6.62	0.1251	11165
364	0.00514	426.24	0.0193	6.63	0.1281	10616
365	0.00501	440.24	0.0200	6.63	0.1328	11654
366	0.00509	454.58	0.0202	6.64	0.1344	11995
367	0.00531	469.28	0.0212	6.65	0.1407	12430
368	0.00537	484.37	0.0216	6.66	0.1439	12972
369	0.00567	499.81	0.0218	6.67	0.1453	12813
370	0.00604	515.63	0.0223	6.67	0.1489	12699
371	0.00607	531.86	0.0231	6.68	0.1543	13528
372	0.00586	548.47	0.0235	6.69	0.1571	14700
373	0.00593	565.49	0.0249	6.70	0.1667	15882
374	0.00639	582.89	0.0258	6.71	0.1734	15809
375	0.00630	600.73	0.0271	6.72	0.1819	17341
376	0.00686	619.01	0.0284	6.73	0.1910	17225
377	0.00710	637.69	0.0292	6.73	0.1965	17641
378	0.00694	656.81	0.0292	6.74	0.1967	18620
379	0.00735	676.33	0.0305	6.75	0.2059	18934
380	0.00736	696.36	0.0308	6.76	0.2083	19698
381	0.00736	716.81	0.0308	6.77	0.2084	20306
382	0.00736	737.72	0.0316	6.78	0.2141	21470
383	0.00738	759.10	0.0320	6.79	0.2175	22353
384	0.00792	780.98	0.0315	6.80	0.2143	21119
385	0.00792	803.33	0.0320	6.80	0.2179	22097
386	0.00828	826.18	0.0322	6.81	0.2197	21924
387	0.00836	849.49	0.0325	6.82	0.2218	22537
388	0.00802	873.35	0.0330	6.83	0.2257	24564
389	0.00840	897.72	0.0335	6.84	0.2289	24453
390	0.00869	922.60	0.0340	6.85	0.2326	24684
391	0.00900	948.00	0.0341	6.86	0.2342	24676
392	0.00897	973.93	0.0355	6.87	0.2441	26497
393	0.00896	1000.42	0.0355	6.88	0.2441	27236
394	0.00908	1027.46	0.0357	6.89	0.2458	27819
395	0.00943	1055.04	0.0360	6.90	0.2483	27782
396	0.00996	1083.21	0.0370	6.91	0.2554	27776

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	T_{λ}^F	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
397	0.00988	1111.94	0.0376	6.92	0.2603	29284
398	0.00962	1141.23	0.0377	6.93	0.2614	30998
399	0.01001	1171.15	0.0380	6.93	0.2635	30836
400	0.01031	1203.94	0.0385	6.94	0.2676	30612
401	0.01026	1235.78	0.0373	6.95	0.2592	30284
402	0.01022	1268.23	0.0369	6.96	0.2572	30718
403	0.01073	1301.29	0.0373	6.97	0.2601	30133
404	0.01108	1334.97	0.0379	6.98	0.2644	30237
405	0.01073	1369.26	0.0383	6.99	0.2676	32231
406	0.01089	1404.18	0.0385	7.00	0.2695	32611
407	0.01070	1439.75	0.0384	7.01	0.2691	33829
408	0.01149	1475.93	0.0410	7.02	0.2882	34435
409	0.01171	1512.76	0.0409	7.03	0.2879	34441
410	0.01167	1550.24	0.0410	7.04	0.2887	35411
411	0.01190	1588.37	0.0412	7.05	0.2908	35722
412	0.01187	1627.15	0.0429	7.06	0.3030	38123
413	0.01270	1666.59	0.0432	7.07	0.3054	36703
414	0.01226	1706.69	0.0429	7.08	0.3035	38639
415	0.01186	1747.46	0.0404	7.09	0.2867	38565
416	0.01201	1788.91	0.0403	7.10	0.2864	38881
417	0.01148	1831.04	0.0403	7.11	0.2867	41650
418	0.01173	1873.85	0.0395	7.12	0.2814	40900
419	0.01221	1917.34	0.0404	7.13	0.2880	41131
420	0.01271	1961.54	0.0404	7.14	0.2888	40521
421	0.01282	2006.42	0.0427	7.15	0.3053	43442
422	0.01359	2052.01	0.0442	7.16	0.3163	43411
423	0.01379	2098.32	0.0452	7.17	0.3243	44876
424	0.01440	2145.32	0.0470	7.18	0.3377	45779
425	0.01613	2193.04	0.0505	7.19	0.3632	44961
426	0.01728	2241.49	0.0540	7.20	0.3892	46003
427	0.01842	2290.68	0.0572	7.21	0.4122	46747
428	0.01934	2340.58	0.0583	7.22	0.4210	46519
429	0.02009	2391.21	0.0616	7.23	0.4456	48475
430	0.02075	2442.60	0.0629	7.24	0.4557	49089
431	0.02083	2494.74	0.0641	7.25	0.4648	51020
432	0.02090	2547.61	0.0645	7.26	0.4682	52356
433	0.02106	2601.25	0.0641	7.27	0.4663	52917

λ	$J_{SL\lambda}$	$I_{SL\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$	$I_{HS\lambda}$
(nm)	(rel.j.)	($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	(rel.j.)		(rel.j.)	($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
434	0.02107	2655.66	0.0641	7.28	0.4666	54109
435	0.02117	2710.81	0.0620	7.29	0.4520	53351
436	0.02049	2766.72	0.0624	7.30	0.4558	56798
437	0.02001	2823.00	0.0613	7.31	0.4485	58517
438	0.02037	2880.92	0.0606	7.32	0.4434	58080
439	0.01967	2939.19	0.0583	7.33	0.4275	59250
440	0.02018	2998.25	0.0586	7.34	0.4305	59456
441	0.02049	3058.10	0.0593	7.35	0.4358	60559
442	0.02087	3118.75	0.0590	7.36	0.4345	60541
443	0.02011	3180.20	0.0590	7.37	0.4346	64192
444	0.02142	3242.46	0.0593	7.38	0.4376	61992
445	0.02148	3305.54	0.0592	7.39	0.4378	63172
446	0.02208	3369.43	0.0615	7.40	0.4551	65202
447	0.02264	3434.14	0.0604	7.41	0.4475	63846
448	0.02350	3499.68	0.0620	7.42	0.4597	64520
449	0.02378	3566.06	0.0620	7.43	0.4605	65192
450	0.02461	3633.28	0.0639	7.44	0.4756	66397
451	0.02507	3701.32	0.0657	7.45	0.4896	68479
452	0.02663	3770.22	0.0672	7.46	0.5010	67304
453	0.02739	3839.97	0.0672	7.47	0.5019	66892
454	0.02830	3910.57	0.0698	7.48	0.5219	68683
455	0.02948	3982.04	0.0712	7.49	0.5330	68659
456	0.03037	4054.37	0.0709	7.50	0.5316	67802
457	0.03115	4127.57	0.0725	7.51	0.5441	68977
458	0.03235	4201.64	0.0729	7.52	0.5479	68212
459	0.03306	4276.60	0.0738	7.53	0.5557	68993
460	0.03381	4352.44	0.0746	7.54	0.5622	69578
461	0.03494	4429.18	0.0752	7.55	0.5673	69232
462	0.03565	4506.80	0.0751	7.56	0.5674	69160
463	0.03730	4585.32	0.0764	7.56	0.5778	68589
464	0.03796	4664.77	0.0767	7.57	0.5807	69004
465	0.03854	4745.08	0.0770	7.58	0.5840	69617
466	0.03972	4826.34	0.0773	7.59	0.5866	69116
467	0.04027	4908.50	0.0771	7.60	0.5862	69375
468	0.04042	4991.60	0.0777	7.61	0.5913	70989
469	0.04179	5075.62	0.0780	7.62	0.5940	70233
470	0.04216	5160.57	0.0782	7.63	0.5965	71157

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J'_{HS\lambda}$ (rel.j.)	T_λ^F	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
471	0.04354	5246.46	0.0783	7.64	0.5979	70313
472	0.04364	5333.30	0.0786	7.65	0.6008	71740
473	0.04454	5421.08	0.0784	7.66	0.6002	71463
474	0.04469	5509.82	0.0787	7.67	0.6031	72800
475	0.04626	5599.50	0.0784	7.67	0.6018	71419
476	0.04604	5690.15	0.0790	7.68	0.6068	73598
477	0.04654	5781.77	0.0788	7.69	0.6062	73983
478	0.04714	5874.36	0.0785	7.70	0.6044	74065
479	0.04772	5967.92	0.0790	7.71	0.6088	74938
480	0.04794	6062.47	0.0790	7.72	0.6094	75922
481	0.04821	6157.99	0.0792	7.73	0.6119	77079
482	0.04861	6254.51	0.0790	7.73	0.6114	77628
483	0.04938	6352.05	0.0786	7.74	0.6088	77355
484	0.04908	6450.54	0.0788	7.75	0.6107	79346
485	0.04955	6550.06	0.0789	7.76	0.6126	80100
486	0.05054	6650.59	0.0784	7.77	0.6092	79362
487	0.04954	6752.15	0.0783	7.78	0.6092	82255
488	0.05108	6854.70	0.0786	7.78	0.6116	81374
489	0.05077	6958.28	0.0786	7.79	0.6121	83232
490	0.05105	7062.90	0.0783	7.80	0.6109	83897
491	0.05178	7168.54	0.0784	7.81	0.6122	84188
492	0.05242	7275.23	0.0783	7.82	0.6122	84433
493	0.05181	7382.98	0.0787	7.82	0.6158	87248
494	0.05199	7491.75	0.0787	7.83	0.6161	88316
495	0.05230	7601.58	0.0786	7.84	0.6164	89158
496	0.05230	7712.45	0.0786	7.85	0.6170	90593
497	0.05165	7824.42	0.0785	7.85	0.6167	93054
498	0.05202	7937.41	0.0786	7.86	0.6179	93949
499	0.05215	8051.50	0.0783	7.87	0.6159	94782
500	0.05245	8166.68	0.0781	7.87	0.6150	95473
501	0.05245	8261.35	0.0777	7.88	0.6126	96490
502	0.05364	8380.59	0.0777	7.89	0.6132	95803
503	0.05323	8500.76	0.0775	7.90	0.6116	97677
504	0.05360	8621.88	0.0773	7.90	0.6106	98221
505	0.05295	8743.87	0.0775	7.91	0.6127	101180
506	0.05265	8866.77	0.0774	7.92	0.6131	103251

λ	$J_{S\lambda}$	$I_{S\lambda}^F$	$J'_{H\lambda}$	$T_{r\lambda}^F$	$J_{H\lambda}$	$I_{H\lambda}$
(nm)	(rel.j.)	($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	(rel.j.)		(rel.j.)	($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)
507	0.05285	8990.59	0.0772	7.92	0.6115	104017
508	0.05368	9115.37	0.0771	7.93	0.6111	103780
509	0.05256	9240.98	0.0771	7.94	0.6117	107543
510	0.05363	9367.52	0.0768	7.94	0.6097	106486
511	0.05287	9495.00	0.0766	7.95	0.6086	109306
512	0.05329	9623.33	0.0761	7.95	0.6055	109351
513	0.05315	9752.62	0.0762	7.96	0.6062	111248
514	0.05264	9882.74	0.0754	7.97	0.6006	112757
515	0.05317	10013.82	0.0752	7.97	0.5992	112854
516	0.05249	10145.75	0.0753	7.98	0.6009	116144
517	0.05259	10278.58	0.0747	7.98	0.5962	116532
518	0.05231	10412.28	0.0750	7.99	0.5994	119310
519	0.05237	10546.92	0.0750	8.00	0.5996	120741
520	0.05163	10682.40	0.0740	8.00	0.5923	122545
521	0.05277	10818.74	0.0738	8.01	0.5912	121214
522	0.05136	10956.02	0.0738	8.01	0.5912	126099
523	0.05213	11094.14	0.0730	8.02	0.5852	124538
524	0.05119	11233.17	0.0726	8.02	0.5825	127808
525	0.05194	11373.04	0.0716	8.03	0.5750	125904
526	0.05151	11513.79	0.0713	8.03	0.5724	127960
527	0.05119	11655.39	0.0710	8.04	0.5702	129814
528	0.05056	11797.89	0.0706	8.04	0.5672	132374
529	0.05052	11941.22	0.0700	8.04	0.5627	133000
530	0.05002	12085.38	0.0701	8.05	0.5640	136270
531	0.04996	12230.46	0.0696	8.05	0.5607	137246
532	0.04974	12376.36	0.0694	8.06	0.5592	139127
533	0.05087	12523.14	0.0678	8.06	0.5468	134615
534	0.04976	12670.73	0.0691	8.06	0.5577	142003
535	0.04967	12819.18	0.0687	8.07	0.5543	143038
536	0.04927	12968.48	0.0679	8.07	0.5479	144229
537	0.04873	13118.68	0.0688	8.08	0.5555	149551
538	0.04861	13269.63	0.0687	8.08	0.5552	151557
539	0.04884	13421.48	0.0682	8.08	0.5508	151366
540	0.04848	13574.11	0.0677	8.09	0.5473	153238
541	0.04784	13727.60	0.0666	8.09	0.5390	154656
542	0.04798	13881.91	0.0657	8.09	0.5318	153888
543	0.04748	14037.04	0.0659	8.09	0.5333	157650

λ	$J_{SL\lambda}$	$I_{SL\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$	$I_{HS\lambda}$
(nm)	(rel.j.)	($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)	(rel.j.)		(rel.j.)	($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
544	0.04673	14192.98	0.0649	8.10	0.5257	159678
545	0.04731	14349.76	0.0643	8.10	0.5206	157911
546	0.04683	14507.36	0.0638	8.10	0.5172	160208
547	0.04691	14665.79	0.0629	8.10	0.5098	159370
548	0.04613	14824.99	0.0615	8.11	0.4985	160190
549	0.04711	14985.02	0.0611	8.11	0.4955	157607
550	0.04552	15145.86	0.0620	8.11	0.5025	167215
551	0.04493	15307.46	0.0605	8.11	0.4904	167076
552	0.04491	15469.88	0.0593	8.11	0.4811	165723
553	0.04533	15633.10	0.0595	8.11	0.4832	166637
554	0.04512	15797.08	0.0586	8.12	0.4757	166538
555	0.04459	15961.92	0.0578	8.12	0.4694	168003
556	0.04459	16127.46	0.0588	8.12	0.4774	172667
557	0.04442	16293.82	0.0578	8.12	0.4692	172112
558	0.04379	16460.96	0.0564	8.12	0.4582	172237
559	0.04329	16628.91	0.0571	8.12	0.4638	178171
560	0.04332	16797.55	0.0561	8.12	0.4557	176719
561	0.04279	16967.03	0.0557	8.12	0.4521	179254
562	0.04304	17137.26	0.0558	8.12	0.4535	180580
563	0.04293	17308.26	0.0557	8.12	0.4521	182290
564	0.04280	17480.00	0.0549	8.12	0.4455	181938
565	0.04205	17652.47	0.0544	8.12	0.4419	185508
566	0.04280	17825.73	0.0538	8.12	0.4371	182042
567	0.04156	17999.75	0.0517	8.12	0.4197	181810
568	0.04187	18174.52	0.0509	8.12	0.4134	179411
569	0.04160	18350.00	0.0509	8.12	0.4136	182460
570	0.04114	18526.22	0.0504	8.12	0.4090	184198
571	0.04089	18703.13	0.0492	8.12	0.3992	182572
572	0.04004	18880.84	0.0492	8.11	0.3994	188315
573	0.04077	19059.24	0.0498	8.11	0.4038	188774
574	0.03989	19238.43	0.0482	8.11	0.3913	188702
575	0.03933	19418.25	0.0473	8.11	0.3835	189347
576	0.03804	19598.84	0.0481	8.11	0.3902	201023
577	0.03852	19780.12	0.0466	8.11	0.3780	194139
578	0.03851	19962.13	0.0456	8.10	0.3695	191521
579	0.03821	20144.85	0.0453	8.10	0.3672	193567
580	0.03759	20328.22	0.0451	8.10	0.3654	197623

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)
581	0.03680	20512.33	0.0436	8.09	0.3530	196751
582	0.03672	20697.14	0.0429	8.09	0.3469	195531
583	0.03590	20882.62	0.0417	8.09	0.3371	196094
584	0.03458	21068.77	0.0401	8.09	0.3242	197523
585	0.03398	21255.64	0.0391	8.08	0.3157	197475
586	0.03376	21443.19	0.0367	8.08	0.2969	188550
587	0.03248	21631.40	0.0367	8.07	0.2960	197106
588	0.03178	21820.29	0.0356	8.07	0.2876	197483
589	0.03105	22009.77	0.0347	8.07	0.2796	198137
590	0.02895	22200.00	0.0322	8.06	0.2597	199125
591	0.02860	22390.84	0.0312	8.06	0.2514	196776
592	0.02793	22582.38	0.0307	8.05	0.2469	199648
593	0.02611	22774.54	0.0295	8.05	0.2375	207110
594	0.02641	22967.37	0.0274	8.04	0.2206	191889
595	0.02479	23160.83	0.0263	8.04	0.2117	197802
596	0.02413	23354.93	0.0254	8.03	0.2036	197131
597	0.02289	23549.67	0.0246	8.03	0.1972	202820
598	0.02184	23745.00	0.0238	8.02	0.1913	207917
599	0.02156	23941.02	0.0227	8.01	0.1817	201774
600	0.02067	24137.58	0.0213	8.01	0.1702	198783
601	0.01962	24334.82	0.0209	8.00	0.1670	207171
602	0.01952	24532.63	0.0202	7.99	0.1617	203152
603	0.01862	24731.07	0.0197	7.99	0.1575	209192
604	0.01801	24930.12	0.0190	7.98	0.1513	209311
605	0.01729	25129.76	0.0179	7.97	0.1425	207130
606	0.01694	25329.99	0.0178	7.97	0.1419	212131
607	0.01661	25530.80	0.0177	7.96	0.1411	216793
608	0.01560	25732.26	0.0168	7.95	0.1332	219685
609	0.01520	25934.20	0.0159	7.94	0.1261	215280
610	0.01451	26136.82	0.0159	7.93	0.1260	226929
611	0.01422	26339.89	0.0147	7.93	0.1168	216377
612	0.01407	26543.59	0.0143	7.92	0.1128	212795
613	0.01362	26747.88	0.0135	7.91	0.1070	210120
614	0.01272	26952.73	0.0132	7.90	0.1046	221631
615	0.01266	27158.16	0.0138	7.89	0.1087	233278
616	0.01234	27364.05	0.0129	7.88	0.1020	226070
617	0.01219	27570.55	0.0131	7.87	0.1029	232849
618	0.01188	27777.53	0.0129	7.86	0.1012	236458

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^6 \frac{W}{m^3 sr}$)
619	0.01152	27985.17	0.0128	7.85	0.1007	244649
620	0.01149	28193.20	0.0119	7.84	0.0931	228458
621	0.01140	28401.79	0.0113	7.83	0.0885	220425
622	0.01130	28610.89	0.0114	7.82	0.0891	225510
623	0.01057	28820.58	0.0106	7.81	0.0830	226186
624	0.00995	29030.76	0.0733	7.81	0.0733	213867
625	0.00993	29241.38	0.0724	7.80	0.0724	213370
626	0.00958	29452.55	0.0702	1.00	0.0702	216008
627	0.00959	29664.24	0.0692	1.00	0.0692	214029
628	0.00906	29876.41	0.0677	1.00	0.0677	223282
629	0.00916	30089.00	0.0657	1.00	0.0657	215612
630	0.00838	30302.11	0.0648	1.00	0.0648	234155
631	0.00839	30515.73	0.0633	1.00	0.0633	230370
632	0.00851	30729.75	0.0619	1.00	0.0619	223647
633	0.00798	30944.31	0.0599	1.00	0.0599	232460
634	0.00804	31159.30	0.0583	1.00	0.0583	225693
635	0.00762	31374.75	0.0562	1.00	0.0562	231521
636	0.00773	31590.66	0.0545	1.00	0.0545	222569
637	0.00763	31807.02	0.0527	1.00	0.0527	219658
638	0.00740	32023.80	0.0513	1.00	0.0513	222037
639	0.00696	32241.05	0.0490	1.00	0.0490	226734
640	0.00704	32458.70	0.0477	1.00	0.0477	220174
641	0.00683	32676.74	0.0460	1.00	0.0460	220133
642	0.00639	32895.27	0.0454	1.00	0.0454	233641
643	0.00649	33114.13	0.0425	1.00	0.0425	216691
644	0.00639	33333.47	0.0430	1.00	0.0430	224215
645	0.00617	33553.25	0.0424	1.00	0.0424	230819
646	0.00612	33773.30	0.0409	1.00	0.0409	225731
647	0.00608	33993.82	0.0389	1.00	0.0389	217425
648	0.00595	34214.72	0.0380	1.00	0.0380	218282
649	0.00559	34436.03	0.0360	1.00	0.0360	221884
650	0.00581	34657.70	0.0358	1.00	0.0358	213271
651	0.00588	34879.71	0.0336	1.00	0.0336	198918
652	0.00547	35102.12	0.0322	1.00	0.0322	206452
653	0.00553	35324.89	0.0315	1.00	0.0315	200992
654	0.00521	35547.98	0.0316	1.00	0.0316	215456
655	0.00498	35771.45	0.0297	1.00	0.0297	213393

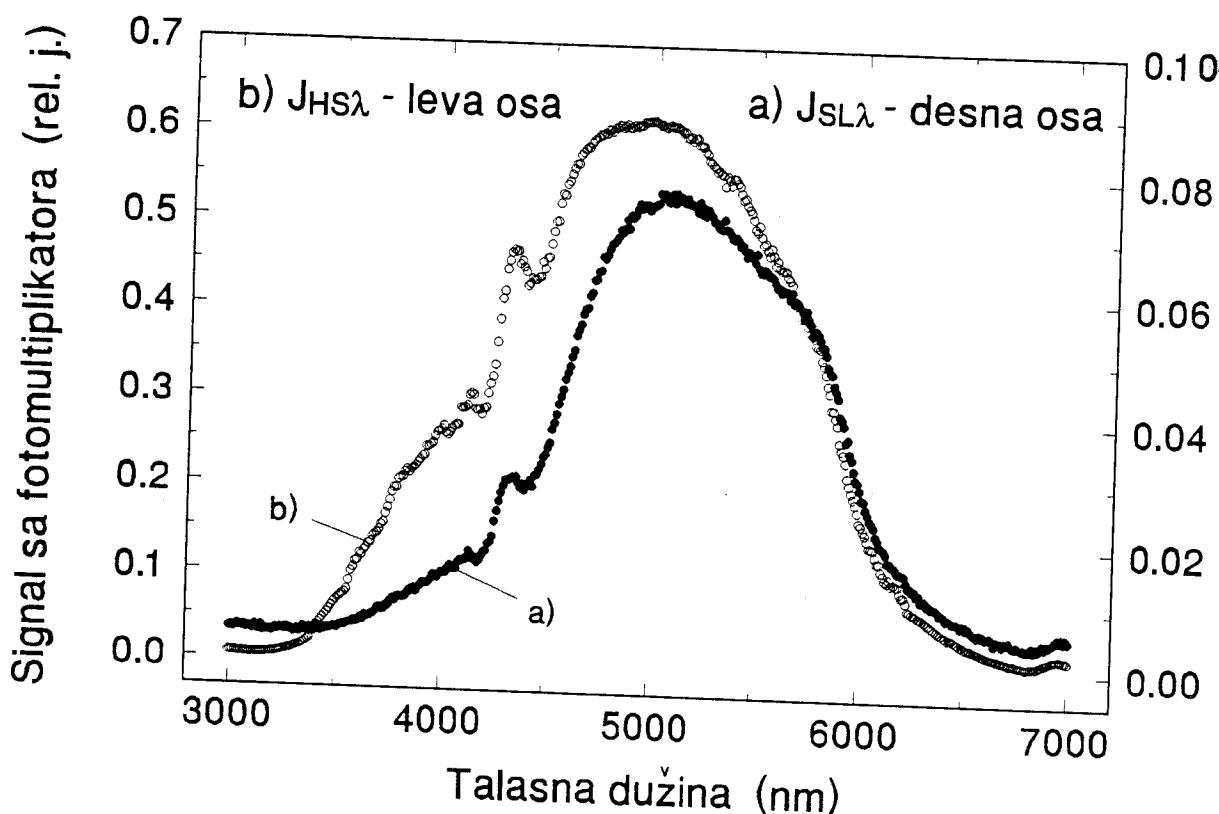
λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$T_{r\lambda}^F$	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)
656	0.00486	35995.20	0.0294	1.00	0.0294	217691
657	0.00462	36219.35	0.0283	1.00	0.0283	221812
658	0.00498	36443.85	0.0276	1.00	0.0276	201886
659	0.00466	36668.69	0.0260	1.00	0.0260	204820
660	0.00477	36893.75	0.0253	1.00	0.0253	196044
661	0.00446	37119.18	0.0242	1.00	0.0242	201333
662	0.00449	37344.90	0.0234	1.00	0.0234	194574
663	0.00467	37570.96	0.0228	1.00	0.0228	183466
664	0.00436	37797.27	0.0220	1.00	0.0220	191198
665	0.00376	38023.86	0.0217	1.00	0.0217	219193
666	0.00427	38250.79	0.0206	1.00	0.0206	184847
667	0.00415	38477.98	0.0200	1.00	0.0200	185342
668	0.00415	38705.51	0.0191	1.00	0.0191	177609
669	0.00372	38933.16	0.0188	1.00	0.0188	197007
670	0.00411	39161.16	0.0177	1.00	0.0177	169126
671	0.00388	39389.40	0.0176	1.00	0.0176	178475
672	0.00420	39617.93	0.0161	1.00	0.0161	151699
673	0.00382	39846.62	0.0160	1.00	0.0160	166864
674	0.00360	40075.61	0.0159	1.00	0.0159	177497
675	0.00354	40304.83	0.0155	1.00	0.0155	176718
676	0.00373	40534.27	0.0145	1.00	0.0145	157890
677	0.00348	40763.89	0.0137	1.00	0.0137	160411
678	0.00343	40993.82	0.0133	1.00	0.0133	158454
679	0.00346	41223.88	0.0130	1.00	0.0130	154444
680	0.00322	41454.04	0.0123	1.00	0.0123	158832
681	0.00330	41684.63	0.0123	1.00	0.0123	155218
682	0.00322	41915.21	0.0128	1.00	0.0128	166047
683	0.00366	42146.02	0.0131	1.00	0.0131	150926
684	0.00317	42377.05	0.0132	1.00	0.0132	177021
685	0.00359	42608.18	0.0130	1.00	0.0130	154299
686	0.00331	42839.61	0.0139	1.00	0.0139	179913
687	0.00350	43071.07	0.0153	1.00	0.0153	188439
688	0.00398	43302.70	0.0165	1.00	0.0165	179182
689	0.00357	43534.41	0.0174	1.00	0.0174	212804
690	0.00400	43766.35	0.0183	1.00	0.0183	199939
691	0.00379	43998.44	0.0195	1.00	0.0195	225930
692	0.00399	44230.56	0.0204	1.00	0.0204	225960
693	0.00413	44462.87	0.0212	1.00	0.0212	227773

λ (nm)	$J_{SL\lambda}$ (rel.j.)	$I_{SL\lambda}^F$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	T_α^F	$J_{HS\lambda}$ (rel.j.)	$I_{HS\lambda}$ ($10^8 \frac{W}{m^3 sr}$)
694	0.00444	44695.27	0.0220	1.00	0.0220	221584
695	0.00469	44927.83	0.0224	1.00	0.0224	214848
696	0.00438	45160.33	0.0225	1.00	0.0225	232181
697	0.00478	45393.05	0.0219	1.00	0.0219	208093
698	0.00427	45625.82	0.0212	1.00	0.0212	226227
699	0.00473	45858.73	0.0212	1.00	0.0212	205909
700	0.00430	46091.63	0.0202	1.00	0.0202	216504

Da bi se dobio stvarni relativni spektralni intenzitet halogene sijalice $J_{HS\lambda}$, izvršena je korekcija na transparenciju neutralnog filtra:

$$J_{HS\lambda} = T_{r\lambda}^F J'_{HS\lambda} \quad (4.1.1)$$

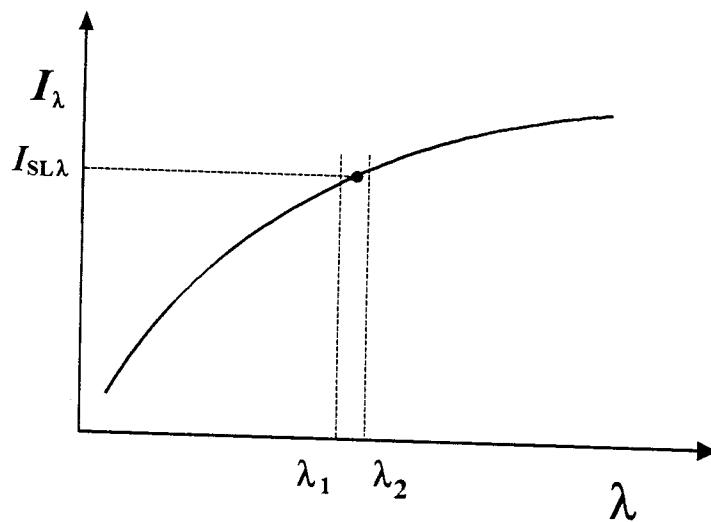
Transparencija neutralnog filtra $T_{r\lambda}^F$ uzeta je iz tabele 3.1.2.1. Na slici 4.1.1 dat je grafički prikaz relativnih spektralnih intenziteta standardne lampe i halogene sijalice.



Slika 4.1.1- Relativni spektralni intenziteti standardne
lampe $J_{SL\lambda}$ i halogene sijalice $J_{HS\lambda}$.

Relativni spektralni intenziteti standardne lampe i halogene sijalice imaju sličan oblik zato što su izvori svetlosti usijana volframska traka odnosno usijano volframsko vlakno.

Relativni spektralni intenzitet zračenja J_λ na dатој таласној дужини се мери тако што се посматра мали интервал таласних дужина $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ око посматране таласне дужине λ . Мерена вредност relativnog spektralnog



Slika 4.1.2- Ilustracija uz definiciju merenog relativnog spektralnog intenziteta zračenja

intenziteta zračenja J_λ у интервалу таласних дужина између λ_1 и λ_2 , пропорционална је површини испод криве spektralnog intenziteta I_λ (слика 4.1.2), израžеног у absolutnim јединицама и описаног функцијом $f(\lambda)$:

$$J_\lambda = kS = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda \quad (4.1.2)$$

Kako je $\delta\lambda$ vrlo uzan interval, može se smatrati da je za standardnu lampu $f(\lambda) = I_{SL\lambda}$, a za halogenu sijalici $f(\lambda) = I_{HS\lambda}$. Na osnovu toga izraz (4.1.2) postaje znatno jednostavniji tako da se za standardnu lampu može napisati:

$$J_{SL\lambda} = kI_{SL\lambda}\delta\lambda \quad (4.1.3)$$

a za halogenu sijalicu:

$$J_{HS\lambda} = kI_{HS\lambda}\delta\lambda \quad (4.1.4)$$

Deljenjem izraza (4.1.3) i (4.1.4) dobija se:

$$I_{HS\lambda} = I_{SL\lambda} \frac{J_{HS\lambda}}{J_{SL\lambda}} \quad (4.1.5)$$

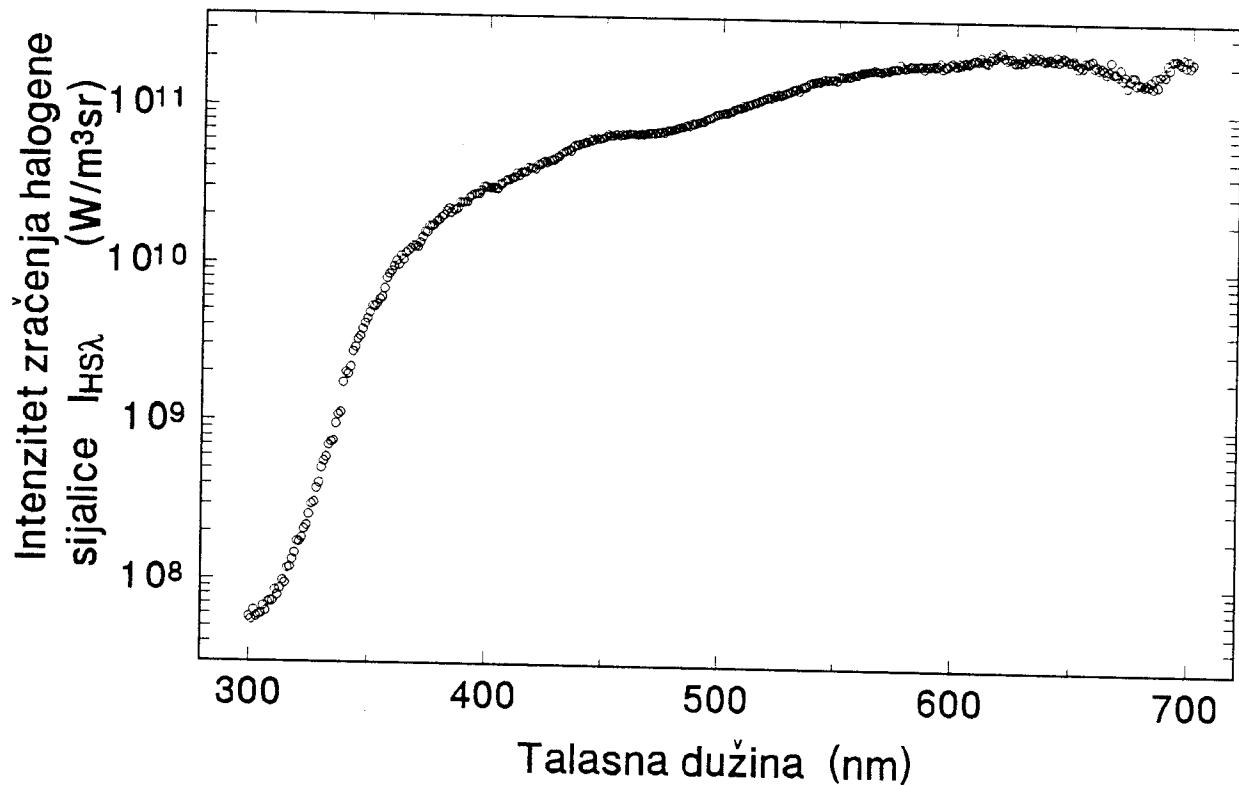
Na osnovu prethodnog izraza može se izračunati spektralni intenzitet halogene sijalice $I_{HS\lambda}$ u apsolutnim jedinicama. Relativni spektralni intenziteti $J_{SL\lambda}$ i $J_{HS\lambda}$ su merene veličine, a umesto $I_{SL\lambda}$ korишćene su fitovane vrednosti $I_{SL\lambda}^F$. Vrednosti svih ovih veličina date su u tabeli 4.1.1. Kako se spektralni intenzitet $I_{HS\lambda}$ izračunava deljenjem $J_{HS\lambda}$ i $J_{SL\lambda}$, eliminisan je uticaj spektralne osetljivosti optičkog sistema.

Izračunate vrednosti $I_{HS\lambda}$ date su u tabeli 4.1.1, a grafički prikazane na slici 4.1.3.

Vrednosti spektralnog intenziteta halogene sijalice veće su od spektralnog intenziteta standardne lampe zbog više temperature volframskog vlakna halogene sijalice. Rezultati ovog merenja prikazani su u radu [26].

Procenjena greška merenja je različita za različite intervale talasnih dužina. U intervalu od 300 do 350 nm greška merenja spektralnog intenziteta halogene sijalice kreće se od ± 6 do $\pm 8\%$, u širokom intervalu od 350 do 650 nm greška merenja se kreće od ± 3.2 do $\pm 5\%$, a u intervalu od 650 do 700 nm greška je od ± 5 do $\pm 7\%$. Nešto veće greške na krajevima posmatranog intervala talasnih dužina, gde su signali vrlo mali,

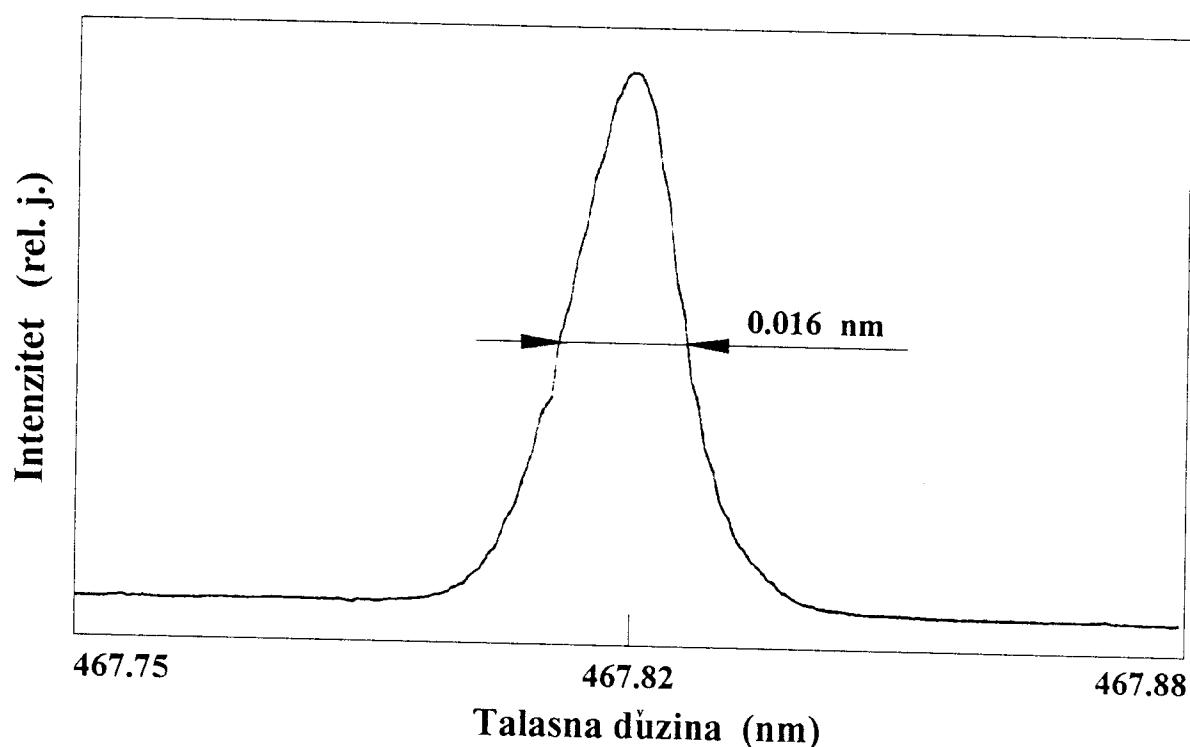
Iako se mogu smanjiti promenom osetljivosti osciloskopa. U ovom slučaju je korišćena jedna osetljivost za ceo opseg talasnih dužina.



Slika 4.1.3- Spektralni intenzitet zračenja halogene sijalice $I_{Hs\lambda}$

4.2 INTENZITET ZRAČENJA SPEKTRALNE LINIJE Cd I 467.8 nm

Kao izvor zračenja koji sadrži spektralne linije korišćena je kadmijumova lampa. Ova lampa radi pod niskim pritiskom tako da su spektralne linije praktično samo prirodno proširene, odnosno eliminisani su ostali uzroci širenja spektralnih linija. To znači da će ovakva spektralna linija, proskanirana pomoću monohromatora, imati oblik instrumentalnog profila. Na slici 4.2.1 prikazan je instrumentalni profil linije Cd I 467.8nm.

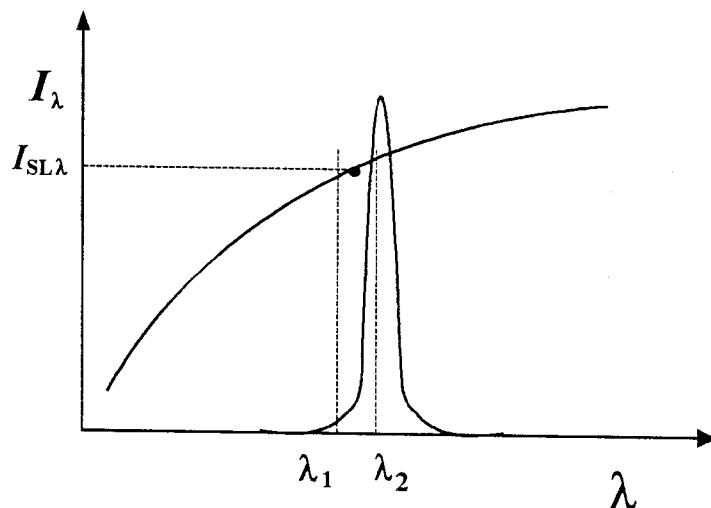


Slika 4.2.1- Instrumentalni profil linije Cd I 467.8nm.

Širina ulazne i izlazne pukotine bila je $20\mu\text{m}$, a profil je snimljen pomoću pisača. Izmerena instrumentalna polusirina posmatrane linije bila je 0.016nm .

Za određivanje spektralnog intenziteta linije ne može se direktno primeniti procedura opisana u 4.1, zbog toga što spektralni intenziteti standardne lampe i spektralne linije imaju potpuno različite oblike. Ovo je ilustrovano na slici 4.2.2. Uvedena aproksimacija u 4.1 (4.1.2), kada je uzeto da je za uzan interval talasnih dužina $f(\lambda) = I_{SL\lambda}$, ne može se

primeniti na spektralnu liniju. Funkcija $f(\lambda)$ je u posmatranom intervalu talasnih dužina za standardnu lampu praktično linearna funkcija, dok za spektralnu liniju to nije slučaj. Osim toga, oblik prirodno proširene spektralne linije opisan je Lorentzovom funkcijom [27], dok je instrumentalni profil opisan tzv. aparatnom funkcijom [15]. Razdvajanje



Slika 4.2.2- Ilustracija upoređivanja spektralnog intenziteta standardne lampe i instrumentalnog profila spektralne linije

ovih profila bilo bi veoma komplikovano. Jednostavnije rešenje je znatno suziti interval talasnih dužina $\delta\lambda$ (bar za red veličine) u kojem se upoređuju spektralni intenziteti standardne lampe i spektralne linije. Međutim, u tom slučaju se zbog vrlo malog signala umesto fotomultiplikatora mora koristiti fotonkaunter.

Iz pomenutih razloga u ovom slučaju je određen ukupan intenzitet spektralne linije. Da bi se kroz monohromator propustila oblast talasnih dužina koja obuhvata celokupan profil spektralne linije, potrebno je prethodno odrediti širine pukotina monohromatora. Prvo se difrakciona rešetka postavi u položaj da na izlaznu pukotinu monohromatora pada zračenje iz centra posmatrane spektralne linije, pri čemu se kreće od male širine ulazne pukotine, npr. $100\mu\text{m}$. Povećanjem širine pukotine raste i signal na izlazu fotomultiplikatora. U jednom trenutku signal sa fotomultiplikatora prestaće da raste, bez obzira na dalje povećanje širine

pukotine. Širina ulazne pukotine monohromatora za koju je signal prestao da raste jeste minimalna širina koja obuhvata ceo profil spektralne linije. Odgovarajuća širina pukotine u ovom slučaju je bila 0.4mm. Širina izlazne pukotine treba da bude jednaka ili nešto veća od širine ulazne pukotine monohromatora.

Zbog veće širine pukotine kroz monohromator se posmatra i širi deo spektra standardne lampe. Međutim i ovako proširen spektralni interval ($\Delta\lambda = 1\text{nm}$) dovoljno je mali tako da i u ovom slučaju za standardnu lampu u potpunosti važi aproksimacija uvedena u 4.1 (4.1.2). To znači da se prema (4.1.3) može napisati:

$$J_{SL\lambda} = kI_{SL\lambda}\Delta\lambda \quad (4.2.1)$$

dok se za spektralnu liniju prema (4.1.2) može napisati:

$$J_{Cd} = kS_{Cd} \quad (4.2.2)$$

gde je sa S_{Cd} označen intenzitet spektralne linije.

Iz prethodna dva izraza dobija se:

$$S_{Cd} = I_{SL\lambda} \frac{J_{Cd}}{J_{SL\lambda}} \Delta\lambda \quad (4.2.3)$$

Kako se ovde radi o pojedinačnom merenju, relativni intenziteti su mereni pomoću univerzalnog instrumenta. Relativni intenzitet spektralne linije je $J_{Cd} = 9.20\text{ rel.j.}$, a relativni spektralni intenzitet standardne lampe je $J_{SL\lambda} = 0.32\text{ rel.j.}$. Spektralni intenzitet zračenja standardne lampe $I_{SL\lambda}$ je izračunat pomoću formule (2.2.1.3) kao $I_{SL\lambda}^F = 4976.17 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3\text{sr.}$

Prema tome, za intenzitet spektralne linije Cd I 467.8 nm se na osnovu (4.2.3) dobija:

$$S_{Cd} = 143.07 \text{ W / m}^2\text{sr}$$

Greška merenja je $\pm 6.4\%$ i može se znatno umanjiti usrednjavanjem izmerenih vrednosti signala.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisana eksperimentalna postavka sistema za merenje spektralnog intenziteta izvora svetlosti u apsolutnim jedinicama. Takođe su prikazani i primeri izvršenog merenja za jedan izvor koji daje kontinualni spektar (halogena sijalica) i jedan izvor koji daje linijski spektar (kadmijumova lampa).

U uvodu su navadeni značaj i mogućnost široke primene ovakvih merenja, od nauke pa sve do primene u industriji ili pri korišćenju različitih izvora svetlosti. Definisane su različite fotometrijske veličine i jedinice, dati su osnovni pojmovi i zakoni toplotnog zračenja i kratak opis karakteristika emisionih spektara. Takođe su dati pregled i klasifikacija različitih izvora svetlosti. Posebna pažnja je posvećena opisu karakteristika, kalibracije i uslova rada standardne lampe koja se ovde koristi kao standard za merenja spektralnih intenziteta zračenja u apsolutnim jedinicama.

Strogi zahtevi u vezi sa postavkom mernog sistema razmatrani su pojedinačno za svaki elemenat sistema. Ovi zahtevi, kao i posedovanje standardnog izvora svetlosti i odgovarajuće opreme čine da su merenja apsolutnog intenziteta svetlosti i kalibriranje raznih izvora svetlosti, bez obzira na značaj, retka pojava i u laboratorijskim uslovima.

Neposredno pre rezultata merenja dat je detaljan opis procedure određivanja spektralnog intenziteta ili intenziteta zračenja odgovarajućeg izvora svetlosti.

Merenje spektralnog intenziteta halogene sijalice izvršeno je u opsegu talasnih dužina od 300 do 700nm. Veće vrednosti spektralnog intenziteta zračenja halogene sijalice u odnosu na vrednosti spektralnog intenziteta zračenja standardne lampe ukazuju na višu temperaturu vlakna halogene sijalice. Greška merenja spektralnog intenziteta je u širokom intervalu talasnih dužina ispod $\pm 5\%$.

Kod kadmijumove lampe koja je korišćena kao izvor linijskog zračenja izmeren je intenzitet zračenja linije Cd I 467.8nm. Greška merenja je $\pm 6\%$.

Merni sistem koji u potpunosti odgovara strogim uslovima kalibracije svetlosnih izvora i male greške izvršenih merenja ukazuju da se postavljeni sistem može vrlo uspešno koristiti za kalibraciona merenja.

Ovakvim sistemom se osim merenja apsolutnog intenziteta svetlosti može takođe kalibrirati spektralna osetljivost optičkih mernih sistema (ogledala ili sočiva - monohromator-fotomultiplikator) ili snimati spektralni sastav zračenja različitih izvora svetlosti.

Literatura

1. M. Čorović, Zbornik za prirodne nauke MS, 13, Novi Sad, 61 (1957).
2. V. Janković, Zbornik za prirodne nauke MS, 13, Novi Sad, 72 (1957).
3. M. Sarić, Zbornik za prirodne nauke MS, 39, Novi Sad, 117 (1970).
4. B. Krstić, Zbornik za prirodne nauke MS, 66, Novi Sad, 73 (1984).
5. L. A. Tumerman, *Svjetlost i njeni izvori*, Radnik, Sarajevo (1950).
6. M. Mikov, Medicina rada, Naučna knjiga, Beograd (1985).
7. Z. Bojković, Elektrotehnika II, Saobraćajni fakultet, Beograd (1993).
8. A. B. Milojević, *Talasna optika*, Zavod za izdavanje udžbenika Socijalističke Republike Srbije, Beograd (1971).
9. V. Vučić, D. Ivanović, *Fizika II, Elektromagnetika i optika*, Naučna knjiga, Beograd (1987).
10. F. W. Sears, Optika, Naučna knjiga, Beograd (1968).
11. S. E. Friš, A. V. Timorjeva, *Kurs opšte fizike, knjiga III*, Zavod za izdavanje udžbenika Socijalističke Republike Srbije, Beograd (1970).
12. B. Ribar, S. Đurović, *Praktikum eksperimentalnih vežbi iz optike*, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad (1978).
13. W. Lochte-Holtgreven, *Plasma Diagnostics*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1968).

14. C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*, University of London, The Athlone Press (1964).
15. V. I. Mališev, *Vvedenie v eksperimentalnuju spektroskopiju*, Nauka, Moskva (1979).
16. A. M. Prohorov (glavni redaktor), *Fizičeskaja enciklopedija 2*, Sovjetskaja enciklopedija, Moskva (1990).
17. J. C. DeVos, *Physica XX*, 690 (1954).
18. G. A. W. Rutgers, J. C. DeVos, *Physica XX*, 715 (1954).
19. J.H. Wolker, R. D. Saunders, A. T. Hattenburg, *Spectral Radiance Calibrations*, NBS, Spec. Publ. 250-1 (1987).
20. W. L. Wiese, *Report of Calibration Tungsten Ribbon Filament Lamp*, National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce, Washington D.C. (1969).
21. H. J. Kostowski, J. H. Walker, *Report of Calibration Tungsten Ribbon Filament Lamp*, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington D.C. (1977).
22. S. Djurović, J. R. Roberts, M. A. Sobolewski, J. K. Olthoff, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 98, 159 (1993)
23. Hamamatsu, *Photomultiplier Tubes*, Tokio
24. A. H. W. Beck, H. Ahmed, *An Introduction to Physical Electronics*, Edward Arnold Ltd, London (1968).
25. EMI, *Photomultiplier Tubes*, EMI Electronics Ltd (1970).
26. S. Djurović, B. Vujičić, M. Pavlov, N. Žikić, *9. kongres fizičara Jugoslavije*, Petrovac (1995) (u štampi)

27. M. Mitchner, C. H. Kruger Jr, *Partially Ionized Gases*, John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, Toronto (1973)

PRILOG

Kompjuterski program za kontrolu digitalnog osciloskopa i očitavanje izmerenih vrednosti relativnih intenziteta zračenja sa osciloskopa. Program je napisan u programskom jeziku HP Basic.

```
10    CLEAR SCREEN
20    ALPHA PEN 3
30    PRINT "PROGRAM ZA SNIMANJE SA STANDARDNOM LAMPOM"
40    ALPHA PEN 4
50    PRINT ""
60    PRINT ""
70    OUTPUT 707;":TIMEBASE:SAMP REP"
80    PRINT "UNESI BROJ TACAKA"
90    INPUT N
100   PRINT N
110   PRINT ""
120   ALLOCATE A(1:N),L(1:N)
130   PRINT "UNESI POCEINU TALASNU DUZINU U ANGSTREMINA"
140   INPUT LO
150   PRINT LO
160   PRINT ""
170   PRINT "UNESI INTERVAL U ANGSTREMINA"
180   INPUT K
190   PRINT K
200   PRINT ""
210   PRINT "UNESI IME DATOTEKE U KOJOJ CE BITI SMESTENI SNIMLJENI PODACI"
220   INPUT US$
230   PRINT US$
240   GINIT
250   L(1)=LO
260   FOR Q=2 TO N
270   L(Q)=L(Q-1)+K
280   NEXT Q
290   OUTPUT 707;":TIM:RANG 20 MS;SAMP REP"
300   OUTPUT 707;":CHAN1:COUP DC"
310   OUTPUT 707;":RUN"
320   OUTPUT 707;":DIGITIZE CHAN1"
330   OUTPUT 707;":ACQ:TYPE AVER;COUN 32;POIN 256"
340   OUTPUT 707;":DIGITIZE CHAN1"
350   OUTPUT 707;":SYSTEM:HEAD OFF;:EOI ON"
360   OUTPUT 707;":WAV:SOUR CHAN1;FORM WORD"
370   OUTPUT 707;":WAV:YINC?"
380   ENTER 707;Yi
390   OUTPUT 707;":WAV:YREF?"
400   ENTER 707;Yr
410   OUTPUT 707;":WAV:YOR?"
420   ENTER 707;Yo
430   OUTPUT 707;":RUN"
440   CLEAR SCREEN
450   R=639/479
460   DEG
470   LDIR 90
480   CSIZE 3
490   MOVE 30,55
500   LABEL "INTENZITET (r.j.)"
510   LORG 4
520   LDIR 0
530   CSIZE 3.2
540   MOVE 85,30
550   LABEL "TALASNA DUZINA (A)"
560   LORG 4
570   MOVE 0,0
580   ALPHA PEN 4
590   VIEWPORT 40,R*100,40,100
600   FRAME
610   ALPHA PEN 2
620   PRINT TABXY(1,1);"MERENJE"
630   PRINT TABXY(1,2);"APSOLUTNOG"
```

```

931 PRINT TABXY(1,3);"INTENZITETA"
940 ALPHA PEN 4
950 PRINT TABXY(1,7);"FILE:"
960 PRINT TABXY(1,9);U$
980 PRINT TABXY(1,15);"BROJ EXP."
990 PRINT TABXY(1,16);"TACAKA (";N;"")
1000 PRINT TABXY(1,26);"TRENUTNA T. D.:""
1050 ALPHA PEN 1
1051 L1=INT(L(1)*100+.05)/100
1052 L21=(L(1)+L(N))/2
1053 L2=INT(L21*100+.05)/100
1054 L3=INT(L(N)*100+.05)/100
1060 PRINT TABXY(25,22);L1
1070 PRINT TABXY(49,22);L2
1080 PRINT TABXY(73,22);L3
1090 PRINT TABXY(21,2);"1.0"
1100 PRINT TABXY(21,11);"0.5"
1110 PRINT TABXY(21,20);"0.0"
1120 X0=5
1130 Xn=91*R+5
1140 Dx=9.1*R
1150 Y0=4
1160 Yn=95
1170 Dy=9.1
1180 FOR I=0 TO 10
1190 MOVE 0,0
1200 PLOT X0+I*Dx,0
1210 PLOT X0+I*Dx,2
1220 IF I=0 OR I=5 OR I=10 THEN
1230 PLOT X0+I*Dx,3
1240 END IF
1250 MOVE 0,0
1260 PLOT 0,Y0+I*Dy
1270 PLOT 2,Y0+I*Dy
1280 IF I=0 OR I=5 OR I=10 THEN
1290 PLOT 3,Y0+I*Dy
1300 END IF
1310 NEXT I
1320 LINE TYPE 3
1330 MOVE 0,4
1340 DRAW 91*R+5,4
1350 LINE TYPE 1
1360 WAIT 0
1380 FOR I=1 TO N
1400 ALPHA PEN 6
1410 PRINT TABXY(1,27);L(I)
1420 PRINT TABXY(9,18);I
1430 ALPHA PEN 4
1530 Z=0
1531 GOTO 2820
1540 OUTPUT 707;":ERASE PMEMORY0"
1580 WAIT 8
1590 OUTPUT 707;":WAV:SOUR CHAN1;FORM WORD"
1600 OUTPUT 707;":WAV:DATA?"
1610 ENTER 707 USING "£,2A,8D";Headers$,Bytes
1620 Length=Bytes/2
1630 ALLOCATE Waveform(1:Length)
1640 ENTER 707 USING "£,W";Waveform(*)
1650 Gg=0
1660 FOR Q=1 TO 256
1670 Gg=Gg+Waveform(Q)
1680 NEXT Q
1690 DEALLOCATE Waveform(*)
1700 Z=Z+Gg

```

```

1830 A(I)=ABS((Z/256-Yr)*Yi)
2020 IF I=1 THEN Imax=A(1)
2030 Im1=0
2040 FOR P=1 TO I
2050 IF Im1>A(P) THEN GOTO 2070
2060 Im1=A(P)
2070 NEXT P
2080 Im=Im1
2200 IF Imax>=Im THEN GOTO 2710
2210 Imax=Im
2220 AREA PEN 0
2230 MOVE 5,5
2240 RECTANGLE 93*R,69*R,FILL
2250 MOVE 0,0
2260 FOR U=1 TO I
2270 X=(L(U)-L(1))*91*R/(L(N)-L(1))+5
2280 Y=A(U)*69*R/Imax+4
2290 MOVE 0,0
2300 PLOT X,Y
2310 FOR P=.3 TO .9 STEP .3
2320 FOR Q=.3 TO .9 STEP .3
2330 PLOT (X+Q-.5),(Y+P-.5)
2340 NEXT Q
2350 NEXT P
2360 NEXT U
2370 GOTO 2792
2710 MOVE 0,0
2720 X=(L(I)-L(1))*91*R/(L(N)-L(1))+5
2730 Y=A(I)*69*R/Imax+4
2740 MOVE 0,0
2750 PLOT X,Y
2760 FOR P=.3 TO .9 STEP .3
2770 FOR Q=.3 TO .9 STEP .3
2780 PLOT (X+Q-.5),(Y+P-.5)
2781 NEXT Q
2782 NEXT P
2792 NEXT I
2800 GOTO 3170
2820 LINE TYPE 1
2841 PRINT TABXY(38,25);"*****"
2850 PRINT TABXY(38,26);"* DALJE *"
2851 PRINT TABXY(38,27);"*****"
2861 PRINT TABXY(63,25);"*****"
2880 PRINT TABXY(63,26);"* STOP *"
2881 PRINT TABXY(63,27);"*****"
2882 BEEP 300,.2
2890 MOVE 0,0
2900 TRACK CRT IS ON
2910 DIGITIZE X,Y
2920 IF X>31.5 AND X<52.5 AND Y>-29.5 AND Y<-18.5 THEN
2930 PRINT TABXY(37,25);"
2940 PRINT TABXY(37,26);"
2950 PRINT TABXY(37,27);"
2980 GOTO 1540
2990 END IF
3000 IF X>91.5 AND X<109.5 AND Y>-29.5 AND Y<-18.5 THEN
3010 PRINT TABXY(62,25);"
3020 PRINT TABXY(62,26);"
3030 PRINT TABXY(62,27);"
3060 GOTO 3420
3070 ELSE
3080 GOTO 2910
3090 END IF
170 MASS STORAGE IS ":DOS,A"

```

```
3180 U$=U$&".DAT"
3190 CREATE U$,1000
3200 ASSIGN @Path_1 TO U$;FORMAT ON
3210 FOR I=1 TO N
3220 OUTPUT @Path_1 USING "K,DDD.DDDDDD";L(I);A(I)
3230 NEXT I
3240 ASSIGN @Path_1 TO *
3420 PRINT TABXY(35,25);"
3421 PRINT TABXY(35,26);"
3422 PRINT TABXY(35,27);"
3423 PRINT TABXY(30,27);"K R A J      S N I M A NJ A"
3430 END
```

