



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Spektralna karakteristika optičkog sistema sa fotomultiplikatorom proširenog opsega

- diplomski rad -

Mentor: prof. dr Zoran Mijatović

Kandidat: Kristina Vučković

Novi Sad, 2015

Ovaj rad je rađen na Katedri za fizičku elektroniku na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, pod rukovodstvom dr Zorana Mijatovića. Ujedno, zahvaljujem se mentoru, prof. Mijatoviću, na svesrdnoj podršci i pomoći pri izradi diplomskog rada.

SADRŽAJ

UVOD.....	5
1 SPEKTRALNI UREĐAJI.....	6
1.1 Karakteristike disperzionog sistema	7
1.1.1 Disperzija	8
1.1.2 Moć razlaganja.....	9
1.1.3 Preklapanje različitih spektara	10
1.1.4 Spektralni opseg.....	10
1.1.5 Fokalna dužina i fokalni odnosi	10
1.2 Monohromatori	11
1.2.1 McPherson 2061.....	11
2 FOTOMULTIPLIKATOR	13
2.1 Prozor fotomultiplikatora	13
2.2 Fotokatoda.....	14
2.2.1 Kvantni prinos fotokatode.....	14
2.2.2 Radijaciona osetljivost fotokatode	14
2.2.3 Tamna struja fotokatode.....	16
2.3 Elektronski multiplikator	17
2.3.1 Pojačanje elektronskog multiplikatora.....	17
2.3.2 Struktura elektronskog multiplikatora.....	18
2.4 Anoda i razdelnik napona.....	19
2.5 Hamamatsu R636-10.....	19
3 FILTERI	21
3.1 Opšte osobine	21
3.1.1 Širina na polovini visine.....	21
3.1.2 Centralna talasna dužina	21
3.1.3 Blokirani opseg i optička gustina	21
3.1.4 Cut-on i cut-off talasna dužina i širina ivice	22
3.2 Načini filtriranja	22
3.2.1 Apsorpcioni filteri	22
3.2.2 Dihromatski filteri.....	22
3.3 Tipovi optičkih filtera	23
3.3.1 Dugopropusni filteri N-WG-320 i GG-395.....	25

4	POSTAVKA EKSPERIMENTA	26
4.1	Merenje spektralne osetljivosti optičkog sistema	26
4.2	Merenje transparencije filtera	27
5	REZULTATI MERENJA	29
5.1	Spektralna osetljivost optičkog sistema	29
5.1.1	Naponski signal na fotomultiplikatoru	29
5.1.2	Spektralna karakteristika standardne lampe	30
5.1.3	Spektralna osetljivost optičkog sistema i diskusija	32
5.2	Transparencija filtera	33
	ZAKLJUČAK	35
	LITERATURA	36
	BIOGRAFIJA	37

UVOD

Spektroskopija je naučni metod koja ima za cilj da ispita spektralne karakteristike zračenja, na osnovu čega se potom dolazi i do zaključaka o samom izvoru kao i o procesima koji se u njemu zbivaju. Pri ovome se mogu ispitivati emisioni ili apsorpcioni spektri. Kako svaka vrsta atoma, jona ili molekula ima svoj karakteristični spektar, njegovom analizom može se kvalitativno odrediti sastav izvora. Sa druge strane, zahvaljujući činjenici da je količina svetlosti koju emituje neki element pri niskim koncentracijama u uzorku srazmerna broju njegovih atoma, moguće je izvršiti i kvantitativnu analizu.

Spektroskopija nalazi primenu u svim prirodnim naukama, a pre svega u fizici, astrofizici, hemiji i biologiji. Što se fizike tiče, spektroskopski podaci daju npr. precizne etalone dužine, informacije o elektronskoj strukturi atoma i o hiperfinoj strukturi, itd. Međutim, jedna od najznačajnijih uloga spektroskopije jeste dijagnostika plazme. Ispitivanjem emitovanog zračenja može se odrediti koncentracija naelektrisanih i nanaelektrisanih konstituenata plazme i njihova temperatura.

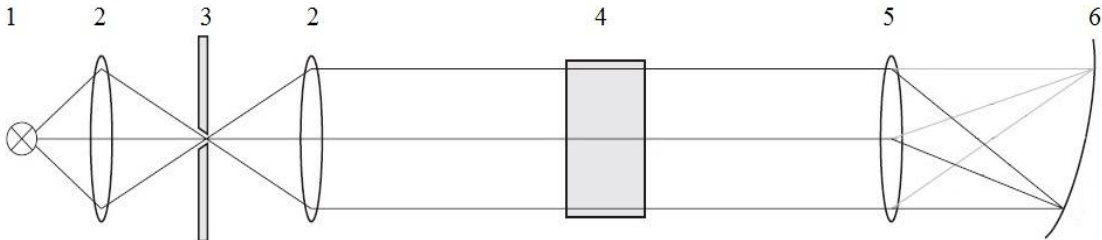
Za sve tipove navedenih ispitivanja, neophodno je pre svega snimiti raspodelu intenziteta zračenja po talasnim dužinama. Dakle, osim izvora zračenja neophodan je i sistem za snimanje spektara, koji se sastoji iz tri osnovna dela: optičkog sistema, disperzionog elementa i detektora.

Cilj ovog rada je određivanje spektralne karakteristike, tj. kalibrisanje spektrometra koji se koristi na novosadskoj Katedri za fizičku elektroniku. Kao izvor svetlosti korišćena je standardna lampa, monohromator marke McPherson 2061 korišćen je za razlaganje složenog zračenja a ulogu detektora imao je fotomultiplikator Hamamatsu R636-10. Krajnji rezultat je određivanje relativnog odziva celokupnog sistema u zavisnosti od talasne dužine zračenja. Nakon toga, izvršeno je ispitivanje transparentije dva dugopropusna filtera N-WG-320 i GG-395.

U prvoj glavi dat je uopšten opis spektralnih uređaja, uz poseban osvrt na pomenuti tip korišćenog monohromatora, njegovu strukturu i princip rada; druga glava detaljno govori o detekcionom sistemu, tj. fotomultiplikatoru a treća prikazuje opšte osobine filtera i njihovu primenu. Postavka eksperimenata objašnjena je u četvrtoj glavi, dok su konačni rezultati obrađeni i prodiskutovani u petoj glavi ovoga rada.

1 SPEKTRALNI UREĐAJI

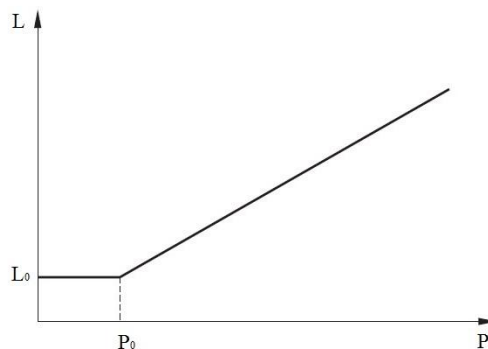
Uređaji koji služe za razlaganje (disperziju) složenog, polihromatskog zračenja po talasnim dužinama nazivaju se spektralnim uređajima. Oni se u opštem slučaju sastoje od sistema za osvetljavanje, ulaznog otvora, disperzionog sistema, sistema za fokusiranje i izlaznog sistema. Principijelna šema prikazana je na slici 1.



Slika 1. Opšta šema spektralnog uređaja, gde je: 1 – izvor svetlosti, 2 – sistem za osvetljavanje, 3 – ulazna pukotina, 4 – disperzioni sistem, 5 – sistem za fokusiranje, 6 – izlazni sistem

Sistem za osvetljavanje se sastoji od sočiva ili ogledala, koja se koriste za sabiranje veće količine svetlosti zarad boljeg osvetljavanja disperzionog sistema.

Ulazni otvor je pukotina kojom se dobija uzak lik na zaklonu. Visina i širina otvora se mogu menjati, tako da dimenzije lika i otvora ne moraju biti iste. Zavisnost širine lika od širine otvora prikazana je na grafiku 1. Za širine otvora manje od P_0 širina lika je konstantna, dok za vrednosti veće od granične P_0 ovaj odnos postaje linearan. Osim toga, ulazni otvor utiče i na formu spektralnih linija. Da bi se dobile linije pravilnog oblika razmak između čeljusti ulaznog otvora mora biti pravilnog oblika, ivice strogo pravolinijske, potpuno paralelne i da prednje površine čeljusti leže u istoj ravni.



Grafik 1. Zavisnost širine lika od širine pukotine

Disperzioni sistem razlaže upadno zračenje po talasnim dužinama. Razlaganje složenog zračenja se vrši refrakcijom (prelamanjem) svetlosti, difrakcijom ili višezračnom interferencijom. Upravo se na ovim optičkim pojavama zasniva podela spektralnih uređaja prema principu razlaganja svetlosti na: uređaje sa prizmama, uređaje sa difrakcionom rešetkom i interferencione uređaje.

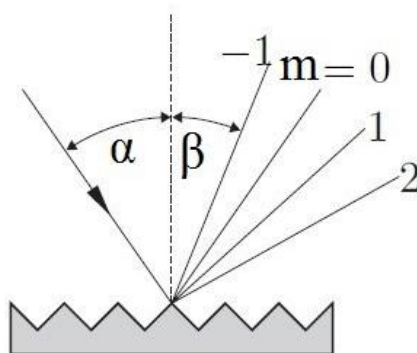
Sistem za fokusiranje koncentriše dobijene monohromatske komponente u žižnoj ravni, formirajući pri tome spektar.

Izlazni sistem čini izlazni otvor na koji se postavlja neki tip detektora (film, fotoploča, fotodetektor, ...). Ukoliko je izlazni otvor u obliku uske pukotine, kroz njega će prolaziti snop svetlosti uskog talasnog intervala (kada je spektar kontinualan). Takav se sistem naziva monohromatorom; za razliku od njega, polihromatorom je moguće istovremeno dobiti nekoliko uskih oblasti ili nekoliko spektralnih linija. Sa druge strane, širok izlazni otvor se koristi kod spektrografa i spektroskopa. Kada se kao detektor koristi fotomultiplikator, širina izlaznog otvora se podešava da bude ista kao i ulazna, da bi se dobila što uža monohromatska komponenta.

Kada se iza izlaznog otvora kod monohromatora postavi neki fotodetektor dobija se spektrometar. Spektrometri su značajni jer se skeniranjem spektra pomoću njih može snimiti zavisnost intenziteta zračenja od talasne dužine, tj. spektralna distribucija zračenja.

1.1 Karakteristike disperzionog sistema

Kao što je prethodno pomenuto, složena svetlost se može razložiti koristeći prizme, difrakcione rešetke ili interferencione uređaje. Kako se na novosadskoj Katedri za fizičku elektroniku koristi monohromator marke McPherson 2061 čiji je disperzioni element difrakciona rešetka, u ovom poglavlju biće opisane opšte karakteristike difrakcionih rešetki, a u narednom osobine samog monohromatora.



Slika 2. Difrakciona rešetka

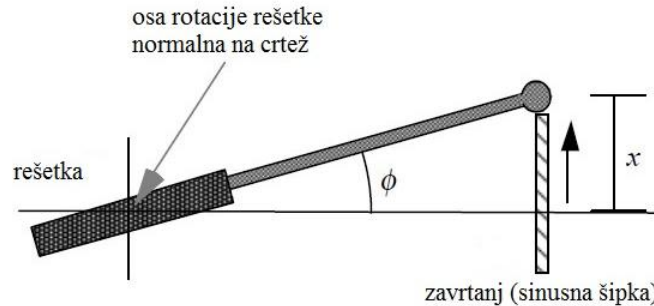
„Niz propusnih pukotina, razdeljenih jednakim neprovidnim prostorima, naziva se difrakciona rešetka“ [1]. Svaka od pukotina ponaša se kao izvor talasa, koje se prostiru pod različitim uglovima β , tako da je pojava difrakcije ovde praćena i interferencijom više zraka. Da bi se ostvarila konstruktivna interferencija, odnosno javili difrakcioni maksimumi i minimumi, mora biti ispunjen uslov:

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda \quad (1)$$

gde je: d – konstanta rešetke, α - upadni ugao, β – prelomni ugao, m – red maksimuma, λ – talasna dužina zračenja.

Odnosno, putna razlika koju pređu paralelni zraci iste λ pri refleksiji od susednih zarezata mora biti jednaka celobrojnom umnošku talasne dužine tih zraka. Imajući ovo u vidu, ukoliko se položaj izvora i detektora u odnosu na osu rotacije rešetke ne menja, pri zakretanju rešetke se menjaju veličine α i β tako da se mora menjati λ detektovanog zračenja (podrazumeva se da su m i d konstantni).

U praksi se češće koriste konfiguracije monohromatora sa konstantnom devijacijom, kada su pravci upadnog i difraktovanog zračenja nepromenjeni. To se postiže obrtanjem rešetke oko ose koja je paralelna zarezima (tj. normalno na difraktovani zrak) uz pomoć zavrtnja, tzv. "sinusne šipke" (slika 3.).



Slika 3. Skeniranje talasnih dužina metodom sinusne šipke

Ako se uvede ugao devijacije $2K = \alpha(\lambda) - \beta(\lambda) = \text{const.}$ i ugao skeniranja $\phi(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$, uz pomoć trigonometrijskih transformacija se jednačina rešetke svodi na oblik:

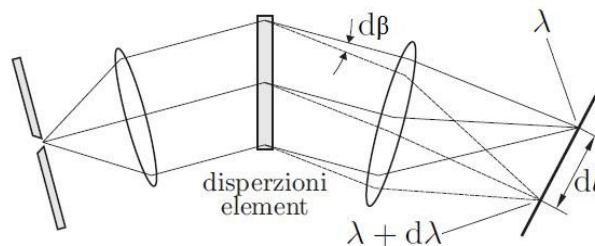
$$2d \cos K \sin \phi = m\lambda \quad (2)$$

Odakle se vidi da je λ difraktovanog zračenja direktno srazmerna sinusu ugla skeniranja.

Difrakcione rešetke se opisuju i gustinom zarezata: $G = 1/d$ [zarezata/mm]. Kako se najčešće izrađuju od metala ili stakla i aluminijuma, one se narezuju sa po 1200-2400 zarezata/mm. Koriste se refleksione i transparente rešetke, a po obliku osim ravnih mogu biti i konkavne.

1.1.1 Disperzija

Disperzija uređaja pokazuje sposobnost razlaganja zračenja različitih λ u prostoru. Razlikuju se ugaona i linearna disperzija.



Slika 4. Elementi za definisanje ugaone i linearne disperzije

Ugaoni interval $d\beta$ koji zauzima spektar difrakcionog reda m , po intervalu talasnih dužina λ i $\lambda + d\lambda$ i pri konstantnom upadnom uglu α dobija se diferenciranjem jednačine rešetke. Na taj način se za ugaonu disperziju rešetke dobija izraz:

$$D_{\beta} = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} = \frac{Gm}{\cos \beta} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\lambda \cos \beta} \quad (3)$$

Za razliku od ugaone disperzije, koja je karakteristika samog disperzionog sistema, linearna disperzija je karakteristika celog uređaja. Ona predstavlja broj milimetara koji dolaze po 1 nm intervala spektra i dobija se kao proizvod ugaone disperzije i efektivne fokalne dužine $r'(\beta)$ sistema:

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} = r' D_\beta = r' \frac{Gm}{\cos\beta} \quad (4)$$

U praksi se obično koristi recipročna linearna disperzija $P=1/D_l$ [nm/mm], a određuje veličinu intervala talasnih dužina koji dolazi po 1 mm dužine spektra – na zaklonu. Prema linearnoj disperziji razlikuju se uređaji sa malom, srednjom i velikom linearnom disperzijom. Malu ili srednju linearnu disperziju imaju uređaji sa prizmom (1 – 10 nm/mm), dok uređaji sa rešetkom imaju veliku linearnu disperziju (0,01 – 1 nm/mm). Linearna disperzija kod interferencionih uređaja je veoma visoka (0,01 – 0,001 nm/mm).

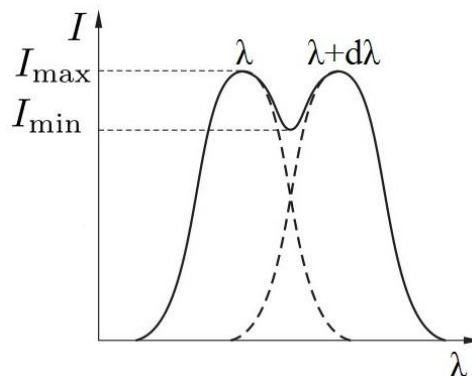
1.1.2 Moć razlaganja

Moć razlaganja pokazuje koje dve bliske talasne dužine uređaj može pokazati kao razdvojene, a izražava se odnosom:

$$R = \frac{\lambda_s}{d\lambda} \quad (5)$$

gde je $\lambda_s = (\lambda + \lambda + d\lambda)/2$ srednja talasna dužina (slika 5.).

Po Rejljevom kriterijumu, dve bliske spektralne linije se mogu smatrati razdvojenima ako je najniži intenzitet između njih manji od maksimalnog intenziteta bar za 20%. Današnjom tehnikom se uočavaju razlike i od 5% ili manje. Minimalni interval $d\lambda$ između dve talasne dužine, koji uređaj može razlikovati naziva se rezolucija.



Slika 5. Spektralne linije bliskih talasnih dužina

Teorijska moć razlaganja ravne difrakcione rešetke data je izrazom:

$$R = m N \quad (6)$$

gde je N ukupan broj osvetljenih zarezova na površini rešetke. Za širinu rešetke pri konstantnom razmaku zarezova važi $W = N d$, te se moć razlaganja može zapisati kao:

$$R = \frac{W(\sin\alpha + \sin\beta)}{\lambda} \quad (7)$$

Pri tome je maksimalna moć razlaganja:

$$R_{max} = \frac{2W}{\lambda} \quad (8)$$

Moć razlaganja se može izračunati ako se maksimalni fazni pomeraj¹ podeli sa talasnom dužinom.

¹ Maksimalni fazni pomeraj je razlika optičkih puteva dva zraka koji difraktuju na suprotnim krajevima rešetke.

1.1.3 Preklapanje različitih spektara

Iz jednačine rešetke (1) se može zaključiti da je pri fiksiranom upadnom uglu i uglu difrakcije, difraktovano svetlo talasne dužine λ i reda $m = 1$ takođe praćeno i difraktovanom svetlošću talasne dužine $\lambda/2$ i reda $m = 2$. Kako bi se izbeglo registrovanje dva zraka različitih talasnih dužina na istom mestu, potrebno je pre detektora isfiltrirati samo željeno zračenje. U ovu svrhu se koriste gorepomenuti sistemi za fokusiranje. Osim njih, u ovu svrhu mogu da posluže i filteri.

1.1.4 Spektralni opseg

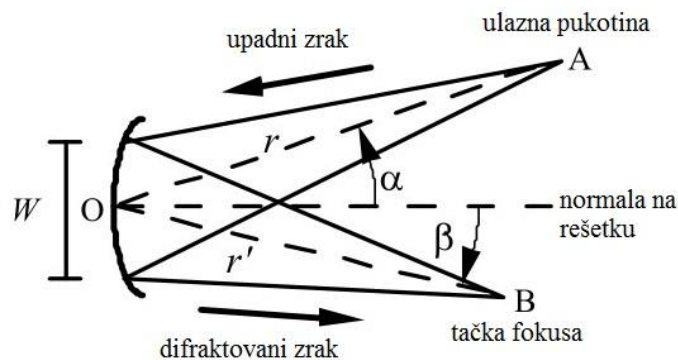
Interval talasne dužine koji prolazi kroz izlazni otvor je spektralni opseg B (bandpass, engl.). Kada su širine ulaznog i izlaznog otvora približno jednake, B se može približno izračunati kao proizvod širine izlaznog otvora w' i recipročne linearne disperzije P:

$$B \cong w' P \quad (9)$$

Što je B manje, uređaj može razlikovati bliže talasne dužine. Sužavanjem izlaznog otvora može se smanjiti B, ali se to odražava i na smanjenje intenziteta svetla.

1.1.5 Fokalna dužina i fokalni odnosi

Fokalna dužina može biti definisana za rešetke koje daju sliku i difraktuju svetlost ili rasipaju nekolimisanu svetlost. Kada difraktovani snop talasne dužine λ i reda m konvergira ka žiži, fokalna dužina predstavlja rastojanje $r'(\lambda)$ između centra rešetke i tačke fokusa (slika 6.). Ako difraktovani snop divergira, fokalna dužina ima negativni predznak i ukazuje na postojanje virtuelnog lika sa druge strane rešetke.



Slika 6. Geometrija za fokalne dužine i fokalne odnose

S druge strane, kada upadno svetlo divergira ka rešetki može se definisati incidentno rastojanje ulazne pukotine $r(\lambda) > 0$, a ako upadno svetlo konvergira ka fokusu iza rešetke incidentno rastojanje je $r(\lambda) < 0$. Međutim, rešetke se koriste tako da r ne zavisi od λ .

Ulazni i izlazni fokalni odnosi su obično međusobno jednaki i uvode se kao:

$$f/n_{o_{input}} = \frac{r}{W} \quad (10)$$

$$f/n_{o_{output}} = \frac{r'}{W} \quad (11)$$

Odnos ulaznih i izlaznih fokalnih dužina određuje projektovanu širinu ulazne pukotine, i uobičajeno je da se ona poklapa sa širinom izlazne pukotine. Osim toga, fokalna dužina određuje dimenzije spektralnog uređaja.

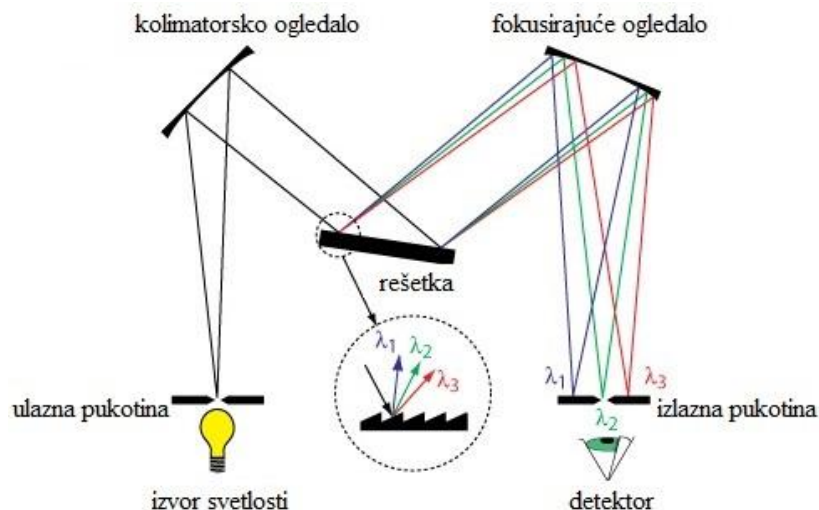
1.2 Monohromatori

Monohromator je optički uređaj koji iz šireg opsega talasnih dužina na svom ulazu izdvaja užu spektralnu oblast ili spektralnu liniju željene talasne dužine. Na izlazu se dobija monohromatska slika ulazne pukotine. Predstavlja kombinaciju disperzionog elementa i ulazne pukotine sa sistemom za kolimaciju zraka, a zajedno sa sistemom za detekciju čini spektroskopski sistem.

Disperzija se može kontrolisati samo ako su zraci kolimisani, međutim u laboratorijskim uslovima zračenje koje se vodi na monohromator uglavnom divergira. U tu svrhu se koristi pomenuti optički sistem u monohromatoru, koji konvertuje divergentne zrake u paralelne pomoću sočiva ili konkavnih ogledala.

1.2.1 McPherson 2061

Postoje razne konfiguracije monohromatora, a jedna od njih koja je od značaja za ovaj rad je Černi-Tarner konfiguracija. Konkretnije, uređaj ovog tipa koji se koristi u laboratoriji na Katedri za fizičku elektroniku je marke McPherson 2061. Šematski prikaz monohromatora Černi-Tarnerovog tipa dat je na sledećoj slici:

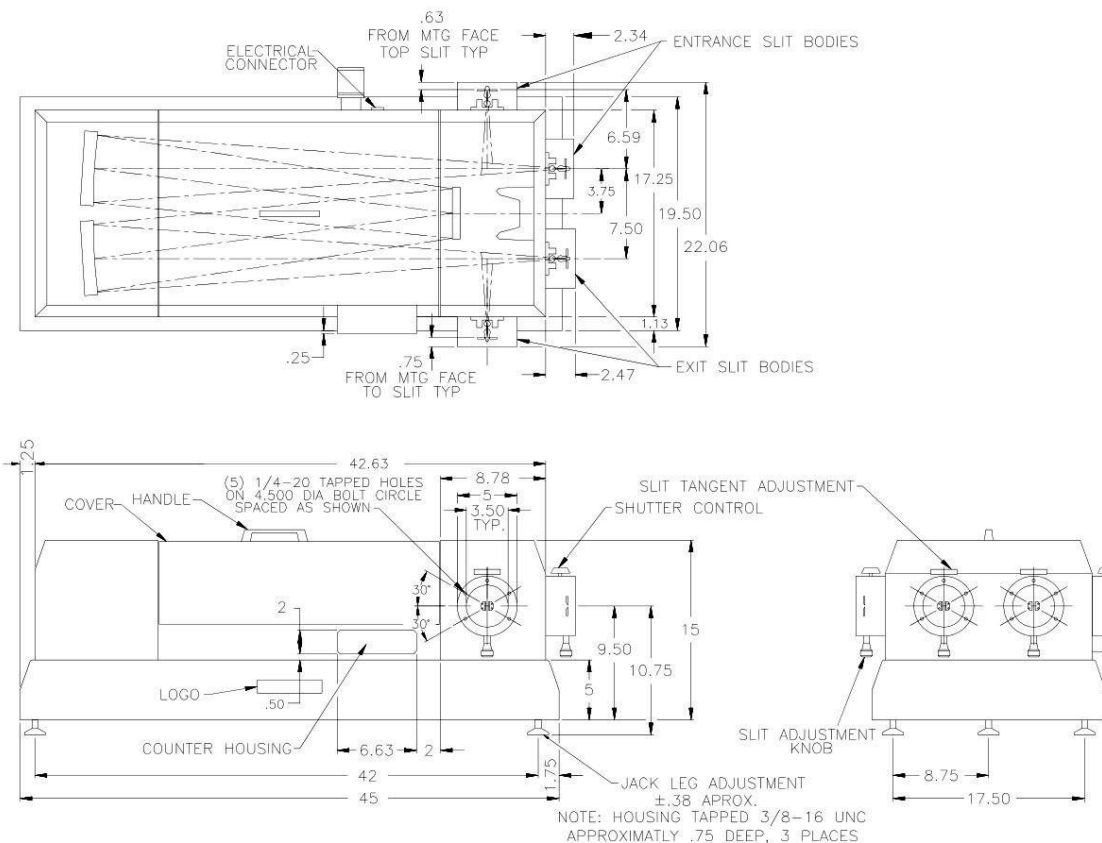


Slika 7. Šema monohromatora Černi-Tarnerovog tipa

U osnovi ovakve postavke je ravna difrakciona rešetka. Izvor zračenja je postavljen ispred ulaznog otvora, a sama količina zračenja je određena otvorom pukotine. Efektivna pukotina se postavlja u fokus konkavnog kolimatorskog ogledala, tako da zranci nakon odbijanja od njega padaju paralelno na difrakcionu rešetku. Difraktovani zranci, razloženi na svoje komponente, sakupljaju se pomoću drugog konkavnog ogledala čiji je fokus na izlazu monohromatora. Komponente spektra različitih talasnih dužina padaju na različite tačke u ravni otvora i na taj način se dobija serija likova ulazne pukotine u ovoj ravni, a podešavanjem širine izlaznog otvora određujemo koliki talasni opseg želimo posmatrati. Zakretanjem difrakcione rešetke se ove komponente pojedinačno dovode na izlaz monohromatora i na taj način se spektar skenira. Rešetka rotira oko ose koja je normalna na ravan upadnog i difraktovanog zraka. Pošto se posmatra samo određeni red difrakcije m , a konstanta rešetke d je konstantna veličina, u skladu sa jednačinom rešetke će se pri zakretanju iste menjati samo λ zraka koji padaju na drugo konkavno ogledalo odnosno izlazni otvor.

Disperzioni element McPherson 2061 monohromatora je difrakciona rešetka „snap in“ tipa, što omogućuje njenu jednostavnu zamenu. Površina rešetke je 120 mm × 140 mm sa 1200 zareza/mm, a položaj se menja uz pomoć step-motora u intervalu talasnih dužina od 185 nm do 1300 nm sa tačnošću od 0,005 nm. Takođe je moguće menjati i brzinu zakretanja rešetke i to od 0,05 nm/min do 200 nm/min.

Za kolimisanje snopa koriste se dva konkavna ogledala žižne daljine od 1 m, a fokalni odnos je f/7. Rezolucija pri talasnoj dužini od 313,1 nm je 0,018 nm, a linearna disperzija je 0,83 nm/mm. Postoje dve ulazne i dve izlazne pukotine, s tim da se širina otvora ulazne pukotine može menjati u opsegu od 5 μm do 4000 μm a visina u diskretnim koracima u intervalu od 2 mm do 20 mm. Više informacija o ovom uređaju može se naći u specifikaciji proizvođača [10].

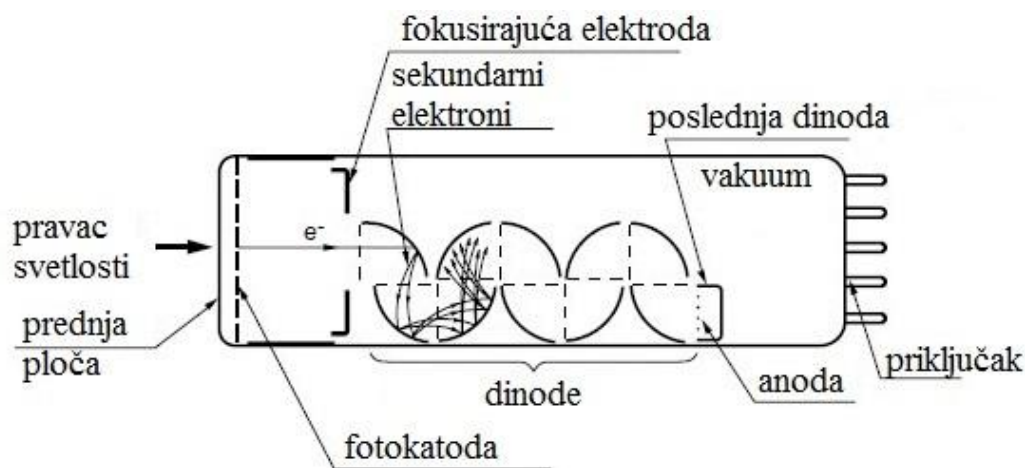


Slika 8. Šema monohromatora McPherson 2061

Na izlazni otvor monohromatora može se priključiti neki od željenih detektora. U ovom slučaju to je fotomultiplikator Hamamatsu R636-10, koji će biti opisan u narednom poglavlju.

2 FOTOMULTIPLIKATOR

Fotomultiplikator je vakuumska staklena cev, koja se sastoji od ulaznog prozora, fotokatode, fokusirajuće elektrode, elektronskog multiplikatora (niza dinoda) i anode. Njegova uloga je da svetlosne signale pretvori u električne.



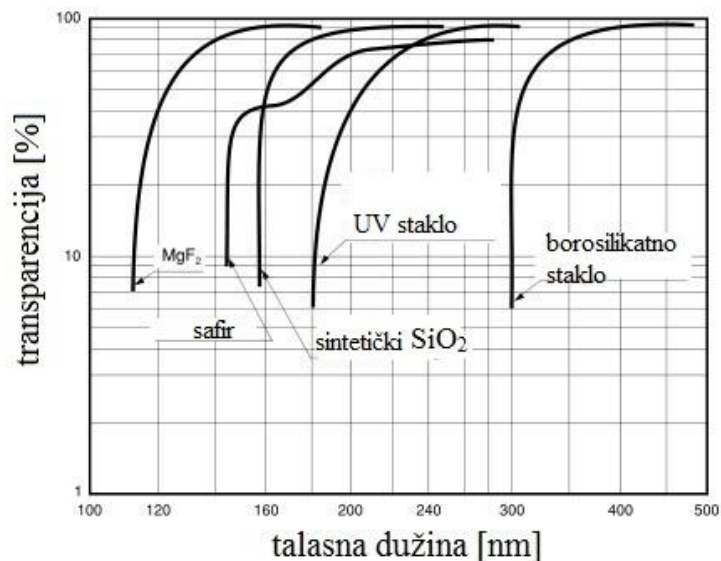
Slika 9. Šematski prikaz fotomultiplikatora

Svetlost koja padne na fotomultiplikatorsku cev prolazi kroz transparentni ulazni prozor i biva usmerena ka fotokatodi, koja je načinjena od metala sa malim izlaznim radom. Putem spoljašnjeg fotoelektričnog efekta elektroni se izbijaju iz fotokatode i emituju u vakuum. Ovi fotoelektroni se ubrzavaju i fokusiraju pomoću fokusirajuće elektrode na prvu od oko 10 do 20 dinoda, koje su poređane od prozora ka suprotnom kraju fotomultiplikatora. Svaka dinoda se nalazi na višem potencijalu od prethodne za oko 100 V, što se postiže razdelnikom napona². Kada elektroni ubrzani električnim poljem padnu na prvu dinodu, oni poseduju dovoljnu energiju da iz nje izbiju nekoliko sekundarnih elektrona. Sekundarna emisija se ponavlja na svakoj od narednih dinoda, pri čemu se ukupan broj elektrona umnožava za nekoliko redi veličine – do 10^8 puta. Nakon umnožavanja na poslednjoj dinodi, svi elektroni se sakupljaju na anodi koja ima najviši potencijal. Elektroni prikupljeni na anodi izazivaju kratkotrajni pad napona na radnom otporniku, što se detektuje kao naponski signal čija visina odgovara količini svetlosti koja je pala na fotokatodu.

2.1 Prozor fotomultiplikatora

Većina fotokatoda ima visoku osetljivost sve do UV dela spektra, ali pošto UV zračenje biva apsorbovano materijalom prozora, na taj način je kratkotalasna granica određena samom transmisivnošću materijala prozora. Na grafiku 2. prikazane su vrste materijala koje se najčešće koriste u izradi prozora kao i njihova transparentcija za različite talasne dužine.

² Razdelnik napona predstavlja niz redno vezanih otpornika, kojim se obezbeđuje odgovarajući naponski gradijent između svakog para dinoda.



Grafik 2. Transparencija materijala prozora fotomultiplikatora

2.2 Fotokatoda

Fotokatoda predstavlja ulazni deo fotomultiplikatora (sa strane ili na čelu staklenog balona) koji putem fotoefekta daje snop fotoelektrona, koji se zatim usmeravaju ka dinodama. Dakle, ona konvertuje energiju fotona u fotoelektrone. Efikasnost konverzije (osetljivost fotokatode) zavisi od talasne dužine upadne svetlosti. Ona se može definisati kao veličina odziva sistema na zračenje određenog intenziteta pri određenoj talasnoj dužini. Spektralni odziv se obično opisuje terminima kvantnog prinosa i radijacionom osetljivošću fotokatode.

2.2.1 Kvantni prinos fotokatode

Broj emitovanih fotoelektrona N_e zavisi od broja apsorbovanih fotona N_a i od talasne dužine svetlosti λ , kojom se fotokatoda osvetljava. U slučaju monohromatske svetlosti gubi se zavisnost od talasne dužine, tako da je broj emitovanih fotoelektrona srazmeran samo broju apsorbovanih fotona. Faktor proporcionalnosti, tj. odnos broja emitovanih fotoelektrona i broja apsorbovanih fotona, naziva se kvantnim prinosom fotokatode:

$$Q(\lambda) = \frac{N_e}{N_a} [\%] \quad (12)$$

Upadni fotoni predaju energiju elektronima u valentnoj zoni fotokatode, međutim ne emituju se svi ovi elektroni kao fotoelektroni. Fotoemisija se dešava sa određenim procentom verovatnoće, tj. fotoni manje λ nose više energije u poređenju sa onima na višim λ i tako doprinose većoj verovatnoći fotoemisije. Posledica ovoga je to što se maksimum kvantne efikasnosti javlja na nešto nižim talasnim dužinama od maksimuma radijacione osetljivosti. Pored talasne dužine, kvantni prinos zavisi i od temperature.

2.2.2 Radijaciona osetljivost fotokatode

Imajući u vidu prethodnu jednačinu (12), može se napisati da je broj fotoelektrona koji su emitovani u jedinici vremena (n_e) srazmeran broju apsorbovanih fotona u jedinici vremena (n_a):

$$n_e = Q(\lambda)n_a \quad (13)$$

To znači da će se sa katode emitovati fotostruja intenziteta:

$$I_k = en_e \quad (14)$$

gde je: e - elementarno naelektrisanje.

Sa druge strane, snaga apsorbovane svetlosti biće:

$$P = \frac{hc}{\lambda} n_a \quad (15)$$

gde je: h - Plankova konstanta, c - brzina svetlosti u vakuumu. Koristeći (13), (14) i (15) dobija se izraz za intenzitet fotostruje:

$$I_k = \frac{e\lambda Q(\lambda)}{hc} P \quad (16)$$

što se može zapisati kao:

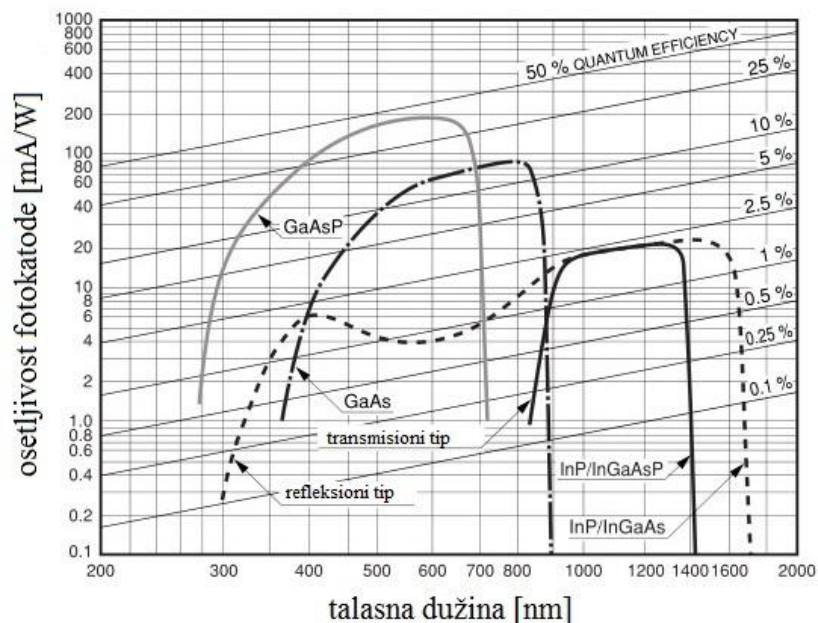
$$I_k = E(\lambda)P \quad (17)$$

pri čemu je:

$$E(\lambda) = \frac{e\lambda Q(\lambda)}{hc} \quad (18)$$

Veličina $E(\lambda)$ data jednačinom (18) opisuje osetljivost fotokatode. Dakle, ona predstavlja odnos fotoelektrične struje koju stvara fotokatoda i upadnog fluksa zračenja pri određenoj talasnoj dužini. Izražava se u jedinicama A/W, ali obično se koriste normirane vrednosti relativne osetljivosti.

Većina fotokatoda se pravi od smeša poluprovodničkih materijala, u koje su dopirani alkalni metali sa niskim izlaznim radom. Postoji oko deset vrsta fotokatoda koje se praktično primenjuju, a svaka je dostupna kao transmisiona (poluprovidna) ili refleksiona (neprovidna). Kombinacije materijala koji se danas koriste za izradu fotokatoda su: Cs-I, Cs-Te, Sb-Cs, Sb-Rb-Cs i Sb-K-Cs, Sb-Na-K, Sb-Na-K-Cs, Ag-O-Cs, GaAsP(Cs), GaAs(Cs), InGaAs(Cs), InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs). Svaka kombinacija ovih materijala ima svoju karakterističnu primenu, pa se biraju zavisno od potrebe eksperimenta. Osetljivost na zračenje kristalnih fotokatoda u zavisnosti od talasne dužine prikazana je na grafiku 3.



Grafik 3. Tipični spektralni odziv kristalnih fotokatoda

2.2.3 Tamna struja fotokatode

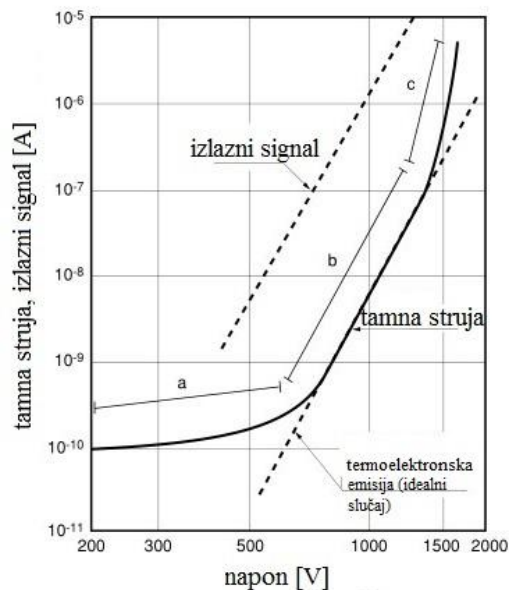
Mali protok elektrona u fotomultiplikatorskoj cevi postojaće čak i kada je fotokatoda u potpunom mraku. Ova izlazna struja naziva se tamnom strujom. Postoji više uzroka njenom postojanju, a najznačajnija je termoelektronska emisija sa fotokatode (i dinoda). Ona se dešava i na sobnoj temperaturi usled malog izlaznog potencijala materijala fotokatode. Ovaj efekat je proučavao V. Ričardson i došao je do sledeće zavisnosti [2,5]:

$$i_s = C T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \quad (19)$$

gde je: i_s – gustina struje, C – konstanta, T – apsolutna temperatura, ϕ – izlazni rad materijala fotokatode, e – naelektrisanje elektrona, k – Bolcmanova konstanta.

Kao što se može videti, termoelektronska emisija je funkcija izlaznog rada materijala fotokatode i apsolutne temperature. Kada je izlazni rad fotokatode mali, spektralni odziv se proširuje i do većih talasnih dužina, ali dolazi i do uvećanja termoelektronske emisije. Ovo se može rešiti hlađenjem fotomultiplikatorske cevi, pri čemu se struja termoelektronske emisije može spustiti na nivo omske struje curenja (do 100 μA ili čak nekoliko nA). Iako se termoelektronska emisija javlja i sa fotokatode i sa dinoda, uticaj fotokatode je mnogo izraženiji jer je ona mnogo veća od svih ostalih elektroda. Protok elektrona tamne struje se takođe multiplicira na dinodama, pa se na anodi javlja kao dodatak signalu.

Tamna struja se povećava sa povećanjem radnog napona, ali funkcija ovog porasta nije konstantna i prikazana je na grafiku 4.



Grafik 4. Karakteristična zavisnost tamne struje od napona

Sa grafika se vidi da postoje tri karakteristične oblasti: a – oblast niskog napona gde prevladava tamna struja od omskog curenja, b – oblast srednjeg napona gde prevladava termoelektronska tamna struja, c – oblast visokog napona gde tamna struja potiče od emisije samog elektrostatičkog polja. Generalno gledano, oblast b obezbeđuje najbolji odnos visine izlaznog signala i šuma. Da bi se izmerila najtačnija vrednost tamne struje, očitavanje se vrši nakon što je fotomultiplikator ostavljen u mraku na oko trideset minuta, a potom se ta vrednost može oduzeti od signala dobijenih pri eksperimentima.

2.3 Elektronski multiplikator

Fotoelektroni emitovani sa fotokatode se umnožavaju od prve do poslednje dinode između 10 i 10^8 puta, i naposljetku se šalju na anodu. Dinode se izrađuju tako što se elektrode (načinjene od nikla, čelika ili legure bakra i berilijuma) oblažu materijalom koji je pogodan za sekundarnu emisiju: alkalni antimonidi, BeO, MgO, GaP, GaAsP. Najvažnije osobine jednog elektronskog multiplikatora su visoko pojačanje struje odnosno protoka elektrona, visoka vremenska rezolucija pojačane struje, linearnost u širokom vremenskom intervalu pojačane izlazne struje i mali šum.

2.3.1 Pojačanje elektronskog multiplikatora

Kada primarni elektron udari o površinu dinode, δ sekundarnih elektrona se emituje. Ovo δ , tj. broj sekundarnih elektrona po jednom primarnom, naziva se koeficijent sekundarne emisije. U idealnom slučaju, faktor multiplikacije fotomultiplikatora sa n dinoda i prosečnom sekundarnom emisijom δ bio bi $\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n$ tj. δ^n . Ako je N_k broj elektrona emitovan sa k -te dinode, u tom slučaju je N_{k+1} broj elektrona emitovanih sa naredne dinode, odnosno:

$$N_{k+1} = \delta N_k \quad (20)$$

Ovaj izraz napisan za jačine struje ima sledeći oblik:

$$I_{k+1} = \delta I_k \quad (21)$$

U praksi situacija nije ovako idealna: prihvatanje elektrona od strane $(k+1)$ -te dinode nije potpuno, te se desne strane jednačina (20) i (21) moraju pomnožiti koeficijentom prihvatanja g (nešto manji od jedinice). Uzimajući ovo u obzir, za struju poslednje n -te diode može se pisati:

$$I_n = (g\delta)^n I_k \quad (22)$$

Dalje, pod uslovom da je prihvatanje elektrona emitovanih sa n -te dinode od strane anode potpuno, važi da je:

$$I_a = I_n \quad (23)$$

to jest:

$$I_a = (g\delta)^n I_k \quad (24)$$

Pri ovome se smatra da su koeficijenti prihvatanja sekundarnih elektrona od strane dinoda i anode jednaki. Međutim, ovaj izraz se mora korigovati jer se koeficijent prihvatanja prve dinode f razlikuje od ostalih. Ova razlika u efikasnosti prihvatanja dinoda je posledica fokusirajuće elektrode, koja se nalazi samo ispred prve dinode. Kod ostalih dinoda dolazi u određenoj meri do rasipanja elektrona, te im je i koeficijent prihvatanja manji od koeficijenta prihvatanja prve dinode. Uzevši to u obzir, izraz (24) poprima oblik:

$$I_a = f(g\delta)^n I_k \quad (25)$$

Jednostavnije:

$$I_a = G I_k \quad (26)$$

Pojačanje fotomultiplikatora je ovde obeleženo sa G i predstavlja odnos izlazne struje I_a po jedinici ulazne struje I_k , odnosno:

$$G = f(g\delta)^n \quad (27)$$

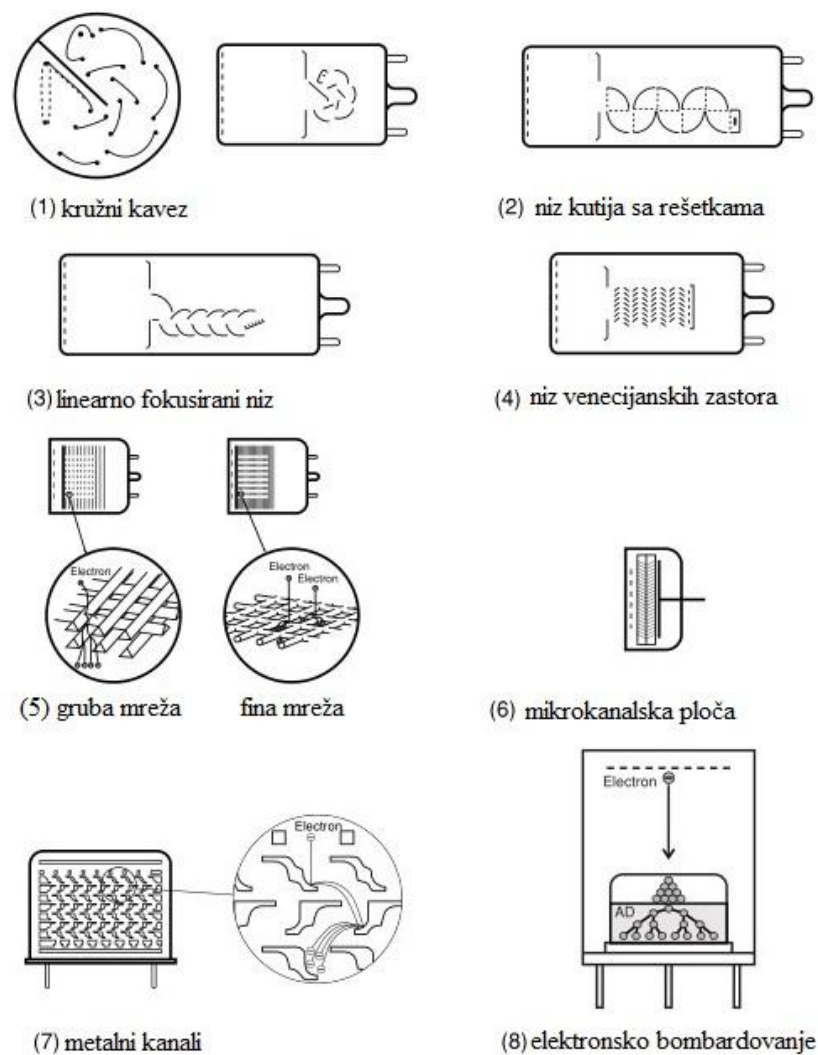
Uz pretpostavku da koeficijenti prihvatanja fotoelektrona f i g ne zavise od napona među dinodama, važi sledeća relacija:

$$\frac{\Delta G}{G} = n \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (28)$$

Dakle, relativna promena pojačanja je n puta veća od relativne promene koeficijenta multiplikacije.

2.3.2 Struktura elektronskog multiplikatora

Prema rasporedu i konstrukciji niza dinoda između katode i anode, fotomultiplikatori se mogu podeliti na mnogo različitih tipova. Svaki od njih nosi određene karakteristike, te se tip bira u zavisnosti od potreba praktične primene. Neki od najučestalijih su šematski prikazani na slici 10.

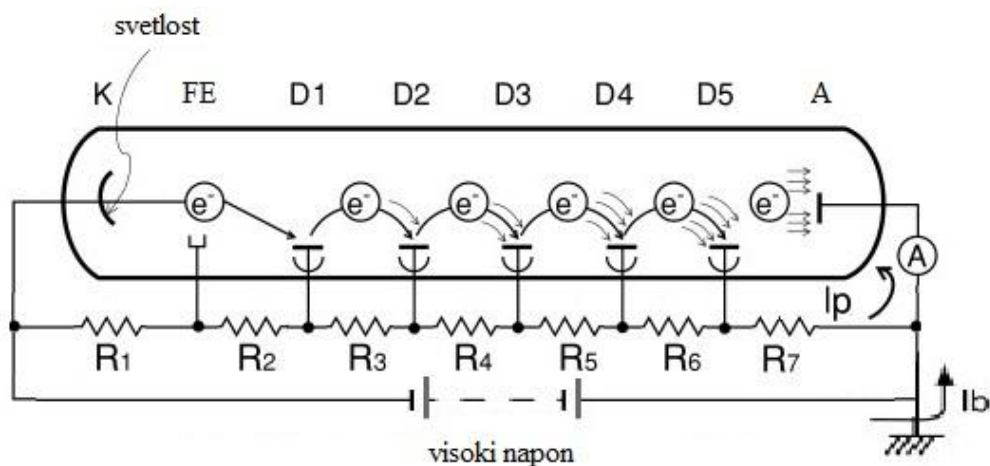


Slika 10. Šematski prikaz različitih struktura fotomultiplikatora

2.4 Anoda i razdelnik napona

Anoda fotomultiplikatorske cevi je elektroda koja sakuplja sekundarne elektrone umnožene u kaskadnom prosecu i usmerava ovu struju elektrona u spoljašnje kolo. Pri konstruisanju anode mora se postići adekvatna potencijalna razlika između poslednje dinode i same anode, kako bi se izbegli efekti prostornog naelektrisanja i održala visoka izlazna struja.

Obično se primenjuje visok radni napon od 500 V do 3000 V od katode do anode, sa odgovarajućim naponskim gradijentom između fokusirajuće elektrode, dinoda i akceleratorne elektrode (ukoliko postoji). Naponski gradijent se može postići koristeći nezavisne izvore, ali ovaj metod nije praktičan. U praksi se svaka elektroda napaja pomoću razdelnika napona, tj. otpornika od oko 100 k Ω do 1 M Ω koji se redno povezuju između anode i katode što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Razdelnik napona, gde je: K – katoda, FE – fokusirajuća elektroda, D1-D5 – dinode, A – anoda, R1-R7 – radni otpornici

Pored otpornika, nekad se u kolo razdelnika napona dodaju i Zener diode [5].

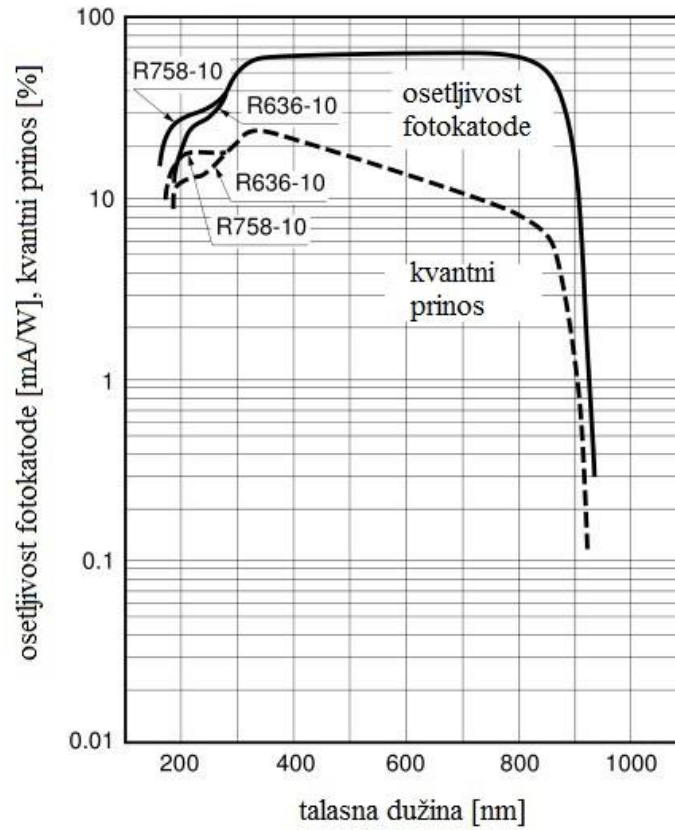
Da bi omogućio lako funkcionisanje fotomultiplikatora proizvođač, u ovom slučaju je to Hamamatsu, obezbeđuje u sklopu uređaja izvore za priključivanje.

2.5 Hamamatsu R636-10

Model fotomultiplikatora ispitivanog u ovom radu je R636-10 proizvođača Hamamatsu, sa očekivanim spektralnim odzivom između 185 nm i 930 nm.

Fotokatoda je površine 3×12 mm i nalazi se sa strane fotomultiplikatora. Materijal od kog je izrađena je kristal GaAs, koji je dopiran cezijumom. Ovaj kristal koristi se i za refleksione i za transmisionne fotokatode. Refleksioni tip GaAs(Cs) fotokatode ima osetljivost na širokom intervalu od UV regije, sve do bliske IC oko 900 nm (grafik 3). Transmisioni tip ima nešto užu interval osetljivosti, jer se zračenja manjih talasnih dužina apsorbuju. Ako se izlože upadnom svetlu jakog intenziteta, ove fotokatode su podložne slabljenju osetljivosti. Prozor ovog fotomultiplikatora je načinjen od UV stakla, čime je produžena kratkotalasna granica u UV oblast do 185 nm.

Elektronski multiplikator se sastoji od devet dinoda sa strukturom kružnog kaveza, radnim naponom do 1500 V i pojačanjem od $4,5 \times 10^5$. Osetljivost i kvantni prinos fotokatode u zavisnosti od talasne dužine prikazani su na grafiku 5. Ostale informacije o ovom fotomultiplikatoru mogu se naći u specifikaciji proizvođača [9].



Grafik 5. Zavisnost osetljivosti i kvantnog prinosa fotokatode od talasne dužine

3 FILTERI

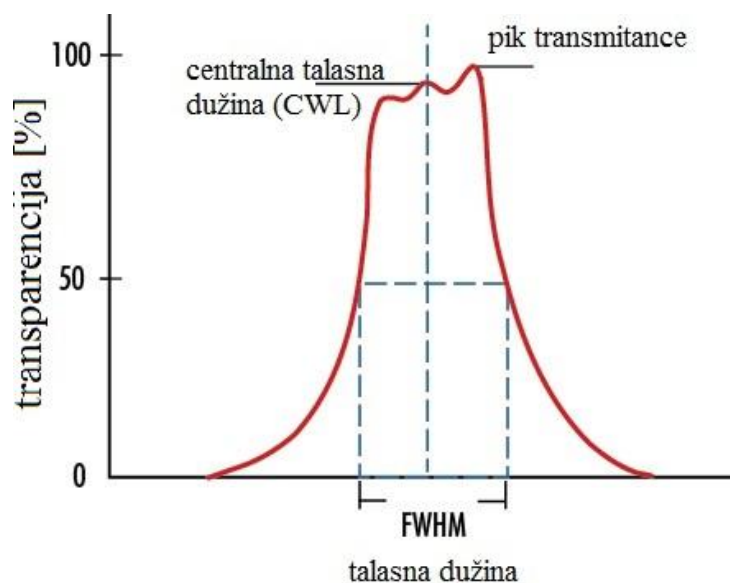
Optički filteri se mogu koristiti da poboljšaju ili ublaže sliku, transmituju ili reflektuju određenu talasnu dužinu ili da podele sliku u dve identične sa kontrolisanim nivoima osvetljenosti jedne u odnosu na drugu. Koriste se i za eliminaciju drugog reda difrakcije. Da bi se pravilno odabrao odgovarajući optički filter u neku svrhu, potrebno je poznavati ključnu terminologiju, način filtriranja i različite tipove filtera dostupnih danas.

3.1 Opšte osobine

Svi filteri, nezavisno od toga kako se proizvode, da li propuštaju, apsorbuju ili reflektuju neke delove upadne svetlosti, dele iste optičke parametre.

3.1.1 Širina na polovini visine

Puna širina na polovini maksimalne visine (FWHM)³ ili propusni opseg predstavlja opseg talasnih dužina u kom filter propušta upadnu svetlost odgovarajuće energije. Granične vrednosti ovog propusnog opsega su određene talasnim dužinama na kojima je transparenција 50%. Ilustracija se može videti na grafiku 6.



Grafik 6. Ilustracija centralne talasne dužine (CWL) i širine na polovini visine (FWHM)

3.1.2 Centralna talasna dužina

Centralna talasna dužina (CWL)⁴ je ona talasna dužina koja se nalazi tačno na sredini FWHM. CWL se ne mora uvek poklopiti sa talasnom dužinom koja odgovara piku transparenćije (grafik 6.).

3.1.3 Blokirani opseg i optička gustina

Blokirani opseg je interval talasnih dužina u kom upadna svetlost odgovarajuće energije biva atenuirana filterom (grafik 7.). Step en atenuacije je određen optičkom gustinom

³ Full width at half maximum, engl.

⁴ Central wavelength, engl.

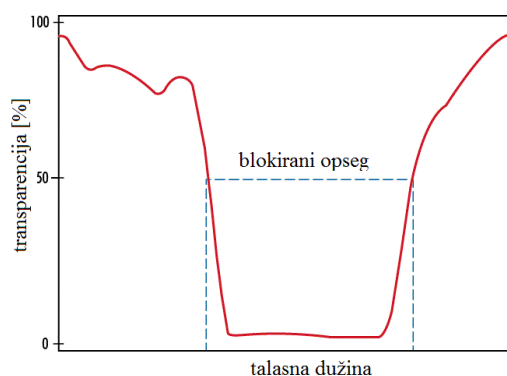
(OD)⁵. Ona određuje do kog procenta će filter zaista zaustaviti zračenje određene talasne dužine i izražava se na sledeći način:

$$T = 100 \times 10^{-OD} \quad (29)$$

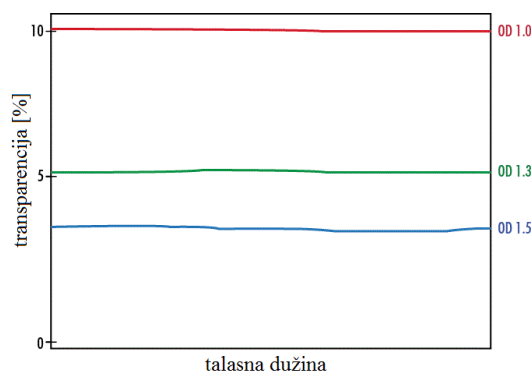
$$OD = -\log\left(\frac{T}{100}\right) \quad (30)$$

gde je: T – transparentija [%], OD – optička gustina.

Dakle, što je veća vrednost optičke gustine manja je transparentija blokirane svetlosti, odnosno manji je „šum“, i obrnuto. Ova zavisnost transparentije od optičke gustine prikazana je na grafiku 8. za različite vrednosti OD.



Grafik 7. Ilustracija blokiranog opsega



Grafik 8. Zavisnost transparentije od različitih vrednosti optičke gustine

3.1.4 Cut-on i cut-off talasna dužina i širina ivice

Talasna dužina na kojoj transparentija poraste na 50% se naziva cut-on talasnom dužinom, dok se talasna dužina kod koje transparentija opadne na 50% naziva cut-off talasnom dužinom. Interval talasne dužine na kojoj transparentija poraste od 5% do 50% (odnosno opadne sa 50% na 5%) naziva se širina ivice (edge width, engl.). Filter se smatra boljim što mu je uža širina ivice, odnosno što je strmiji skok.

3.2 Načini filtriranja

Optički filteri se prema načinu na koji filtriraju svetlost mogu podeliti na apsorpcione i dihromatske filtere.

3.2.1 Apsorpcioni filteri

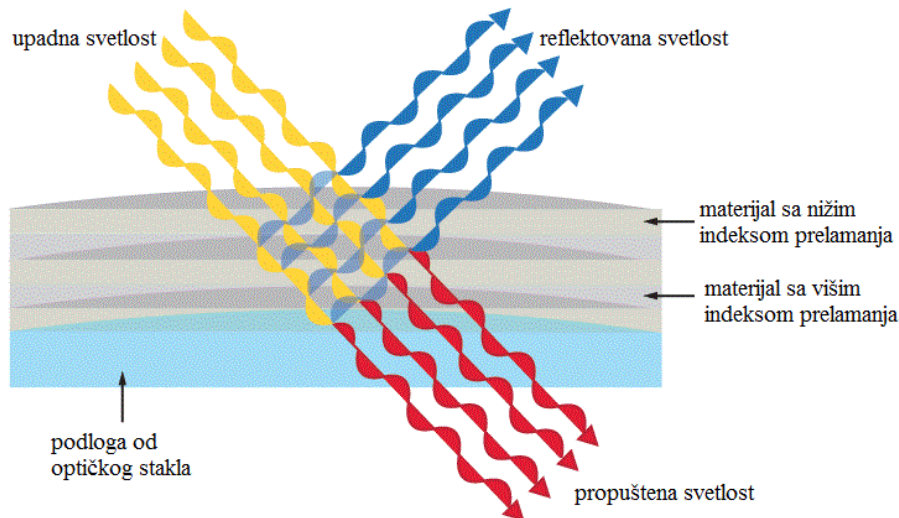
Kod apsorpcionih filtera svetlost se blokira u zavisnosti od apsorpcionih osobina materijala filtera, tj. svetlost se ne blokira reflektovanjem, već se apsorbuje unutar filtera. Oni su idealni u slučaju kada postoji šum neželjene svetlosti, takođe nisu mnogo osetljivi na ugao upadne svetlosti (zadržaće transimisione i apsorpcione osobine u širokom opsegu upadnih uglova).

3.2.2 Dihromatski filteri

Dihromatski filteri reflektuju svetlost neželjene talasne dužine, dok transmituju određene intervale spektra. Ova osobina je korisna kada je potrebno svetlost podeliti prema talasnim dužinama u dva snopa. To se postiže dodavanjem jednog ili više slojeva

⁵ Optical density, engl.

materijala sa različitim indeksom prelamanja, kako bi se iskoristila priroda interferencije svetlosnih talasa. Kod ovakvih interferencionih filtera, svetlost koja dolazi od materijala manjeg indeksa prelamanja biva reflektovana na materijalu većeg indeksa prelamanja. Samo će svetlost određene talasne dužine postići konstruktivnu interferenciju sa nadolazećim zrakom i proći kroz materijal, dok će sva ostala svetlost koja ne zadovoljava uslove interferencije biti reflektovana (slika 12.).



Slika 12. Struktura dihromatskih filtera

Dihromatski filteri su izuzetno osetljivi na ugao upadne svetlosti, povećanjem upadnog ugla oni će pomeriti spektar ka nižim talasnim dužinama, a njegovim smanjenjem pomeriće spektar ka višim talasnim dužinama. Obično se koriste uz kratkopropusne i dugopropusne filtere.

3.3 Tipovi optičkih filtera

U ovom delu opisane su karakteristike nekoliko najznačajnijih tipova filtera, u cilju boljeg razumevanja sličnosti i razlika danas dostupnih filtera.

Pojasni (bandpass) filteri propuštaju određeni interval (pojas) spektra, dok blokiraju sve ostale talasne dužine. Postoje uskopojasni filteri koji propuštaju svetlost u intervalu od 2 nm do 5 nm, oni se uglavnom koriste u zahtevnim radnjama sa laserima. Osim njih postoje i širokopojasni filteri koji propuštaju svetlost u opsegu od 20 nm do 70 nm i najčešće se koriste pri ispitivanju fluorescencije. Osetljivi su na upadni ugao svetlosti, te se mora voditi računa pri njihovom postavljanju.

Dugopropusni (longpass) filteri propuštaju talasne dužine veće od karakteristične cut-on talasne dužine. Koriste se za izolovanje delova spektra u industriji i u nauci (mikroskopska i fluorescentna instrumentacija). Dugopropusni filteri se mogu koristiti u kombinaciji sa kratkopropusnim i na taj način kreirati proizvoljan pojasni filter. Neki dugopropusni filteri se mogu koristiti i kao hladna ogledala, kada je potrebno umanjiti zagrevanje prouzrokovano IC zračenjem. Razlikuju se prema delu spektra za koji su podesni (UV, vidljivi, IC) i prema optičkoj gustini. Dodatni slojevi se koriste za postizanje strmijeg skoka, tj. uže širine ivice. Uobičajena širina ivice dugopropusnih filtera iznosi 10 nm – 15 nm, mada postoje i oni kreirani za specijalne istraživačke poduhvate gde je ova širina samo 1,6 nm.

Kratkopojasni (shortpass) filteri propuštaju talasne dužine manje od karakteristične cut-off talasne dužine. Mogu da se koriste i kao toplata ogledala, kada je potrebno umanjiti zagrevanje prouzrokovano IC zračenjem. Mana im je to što su ponovo propusni za talasne dužine veće od oko $1,33 \times \lambda_{\text{cut-off}}$, tj. opseg blokiranja im je od $\lambda_{\text{cut-off}}$ do oko $1,33 \times \lambda_{\text{cut-off}}$. Da bi se ovo izbeglo, podležu se posebnom prečišćavanju.

Stakla za apsorpciju toplote propuštaju vidljivu svetlost a apsorbuju IC zračenje. Apsorbovana energija se potom oslobađa u vidu toplote u vazduh oko stakla, te se stoga preporučuje dodatno hlađenje. Takođe se mogu koristiti i kao kratkopropusni filteri.

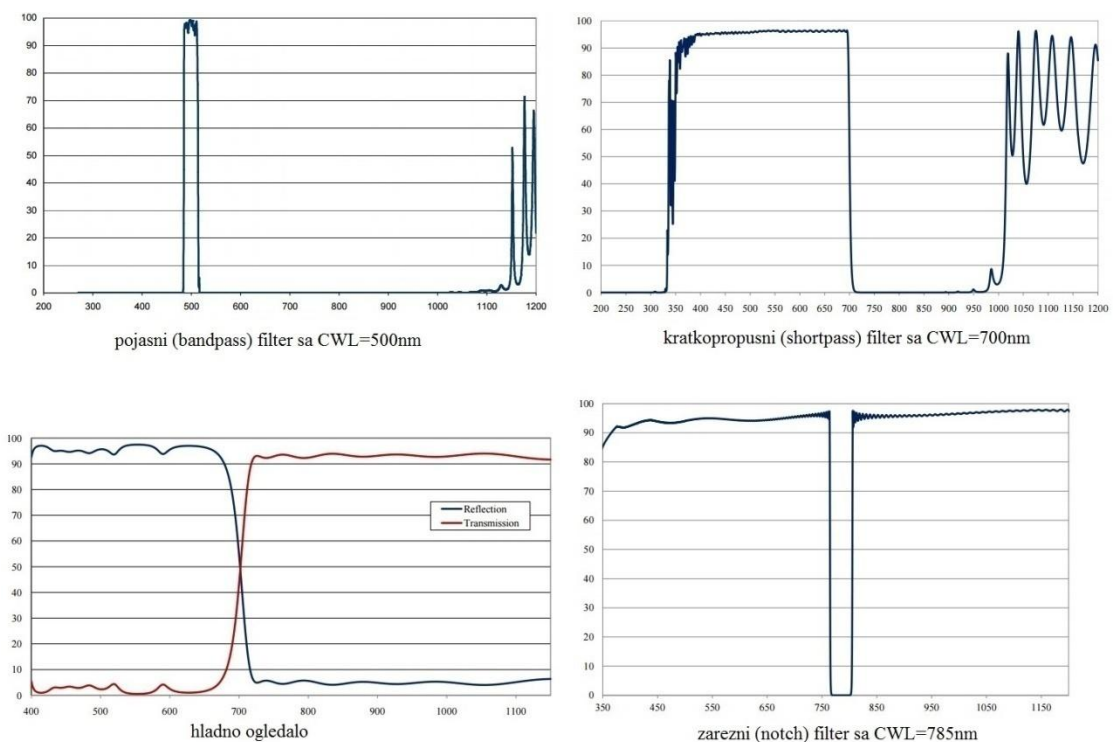
Hladna ogledala su poseban tip dihromatskih filtera sa visokom refleksijom u vidljivom delu spektra i visokom transparentijom u IC delu spektra. Koriste se u sistemima gde je zagrevanje mogući uzrok štete.

Topla ogledala su poseban tip dihromatskih filtera sa visokom refleksijom u IC delu spektra i visokom transparentijom u vidljivom delu spektra. Koriste se u sistemima za projekciju i osvetljavanje.

Zarezni (notch) filteri blokiraju samo vrlo uzak opseg talasnih dužina a propuštaju svo ostalo zračenje. Oni se obično koriste da uklone pojedinačne laserske zrake određene talasne dužine, ili uske intervale, iz optičkog spektra.

Filteri boja se koriste za izdvajanje ili pojačavanje određenih boja/talasnih dužina. Koriste se i kao dugotalasni ili kao pojasni filteri. Nemaju oštru granicu između transmisije i refleksije, jednostavni su i bez dodatnih slojeva. Međutim, širina ivice im se kreće od 40 nm – 60 nm. Podesni su za temperature do 100°C, lako se čiste i koriste.

Filteri neutralne gustine (ND) umanjuju propustljivost podjednako duž određenog intervala talasnih dužina ili apsorpcijom ili refleksijom.



Slika 13. Zavisnost transparentije [%] od talasne dužine [nm] za neke od pomenutih tipova filtera

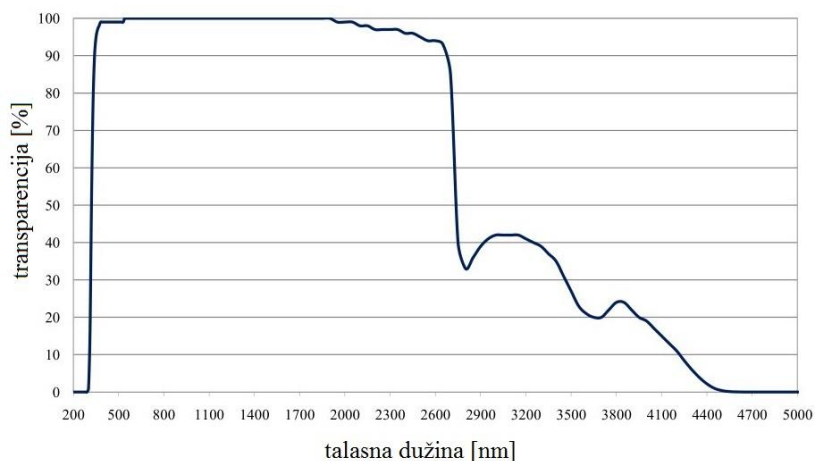
3.3.1 Dugopropusni filteri N-WG-320 i GG-395

Dva filtera, čije su osobine proveravane u ovom radu, su dugopropusni (longpass) modeli N-WG-320 i GG-395 proizvođača Edmund Optics. Neke od njihovih značajnijih karakteristika su date u tabeli 1.

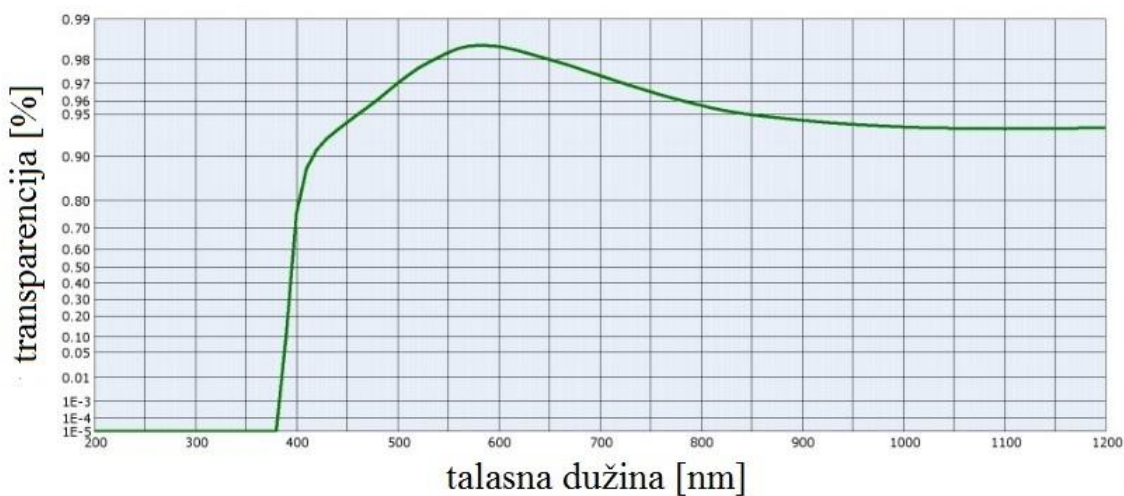
	Model filtera	
	N-WG-320	GG-395
$\lambda_{\text{cut-on}}$	320 nm \pm 6 nm	395 nm \pm 6 nm
Granica nepropusnosti	280 nm	340 nm
Granica propusnosti	470 nm	480 nm
Transparencija	99%	92%

Tabela 1. Neke od karakteristika korišćenih filtera

Ostale karakteristike, koje nisu navedene u tabeli 1. mogu se naći u specifikaciji proizvođača [8]. Zavisnosti transparencije od talasne dužine za ova dva modela, a koje je naveo proizvođač, date su na sledećim graficima:



Grafik 9. Transparencija longpass filtera N-WG-320

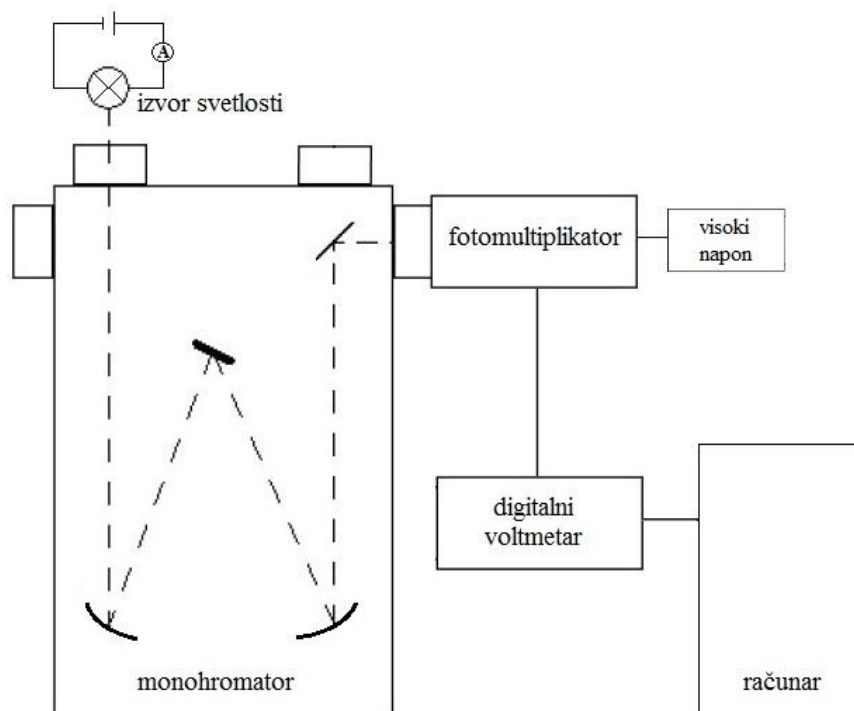


Grafik 10. Transparencija longpass filtera GG-395

4 POSTAVKA EKSPERIMENTA

4.1 Merenje spektralne osetljivosti optičkog sistema

Za merenje spektralne osetljivosti optičkog sistema povezani su prethodno opisani elementi u jednu funkcionalnu celinu prema šemi sa slike 14.



Slika 14. Šematski prikaz mernog sistema

Na ulaz monohromatora dovodi se svetlost sa izvora. U ovom slučaju, kao izvor svetlosti korišćena je standardna lampa sa volframskom trakom, koja vrlo dobro oponaša apsolutno crno telo. Jačina struje koja protiče kroz volframsku traku standardne lampe određuje temperaturu trake, odnosno intenzitet emitovanog zračenja. Kako je spektralni intenzitet zračenja vrlo osetljiv i na male promene struje, pri merenju sa standardnom lampom potrebno je koristiti visoko stabilisan izvor struje. Osim toga, prilikom uključivanja lampe u strujno kolo, jačinu struje treba povećavati postepeno (za 5A na svakih 5min) kako bi se izbeglo veliko termičko naprezanje volframske trake. Kada se dostigne jačina struje od 30A treba sačekati da se temperatura lampe stabilizuje, te se može pristupiti merenju.

Merenje se vršilo na intervalu talasnih dužina od 300 nm do 800 nm, pri širinama ulaznog i izlaznog otvora od 30 μ m. Brzina zakretanja rešetke je podešena step-motorom i iznosi 5 nm/min, sa korakom od 0,417 nm. Radni napon fotomultiplikatora bio je 1000 V, a signal je očitavan digitalnim voltmetrom povezanim sa računarom, gde se u posebnom programu vršilo beleženje visine naponskog signala za svaki položaj rešetke. Nakon prikupljanja podataka, blenda monohromatora se zatvara kako bi se fotomultiplikator našao u mraku. U takvim uslovima izmerena je tamna struja fotokatode fotomultiplikatora.

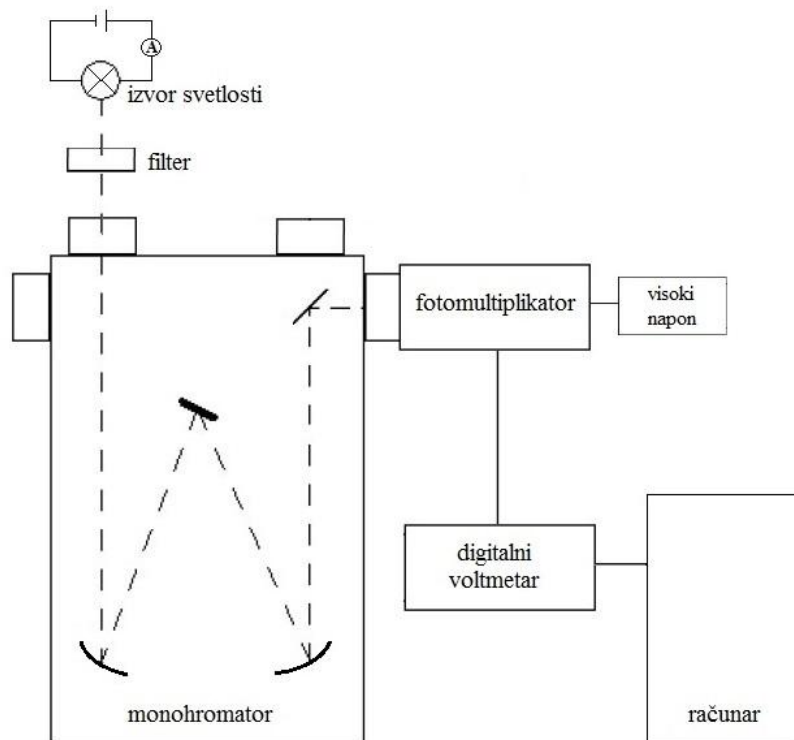
Spektralna osetljivost sistema, tj. kalibraciona kriva, se dobija kada se snimljene vrednosti intenziteta zračenja standardne lampe podele sa intenzitetom koji predstavlja karakteristiku standardne lampe:

$$\frac{\text{napon na fotomultiplikatoru u relativnim jedinicama}}{\text{snaga zračenja sa jedinice površine po jedinici intervala talasne dužine}}$$

Standardna lampa je kalibrisana u laboratoriji za plazma spektroskopiju odeljenja za atomsku fiziku američkog Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST) [7]. Njena spektralna karakteristika je prikazana u poglavlju 5.1, zajedno sa celokupnom obradom podataka.

4.2 Merenje transparentije filtera

Postavka aparature za merenje transparentije dva pomenuta longpass filtera prikazana je na slici 15.



Slika 15. Šematski prikaz mernog sistema

Kao izvor svetlosti korišćena je halogena sijalica od 250 W, a na put njenom zračenju ispred ulaza u monohromator postavlja se filter čije se osobine žele ispitati. Ostatak postavke i način prikupljanja podataka su isti kao u prethodnom poglavlju.

Halogena sijalica je izvor svetlosti kod kog se u kvarcni balon, napunjen ksenonom i sa usijanim volframskim vlaknom, dodaje još neki halogeni gas (npr. brom ili jod). Ona je dobra zamena standardnoj lampi jer im spektralne karakteristike imaju sličan oblik, ne mora da se vrši postepeno zagrevanje i ekonomičnija je s obzirom na to da daje isti intenzitet svetlosti pri manjoj jačini struje.

Za filter N-WG-320, čija je centralna talasna dužina 320 nm, vršeno je merenje na intervalu talasnih dužina od 290 nm do 630 nm. Brzina zakretanja rešetke je podešena step-motorom i iznosi 12 nm/min, sa korakom od 0,4 nm.

Za filter GG-395, čija je centralna talasna dužina 395 nm, vršeno je merenje na intervalu talasnih dužina od 350 nm do 600 nm. Brzina zakretanja rešetke je podešena step-motorom i iznosi 24 nm/min, sa korakom od 0,4 nm.

U oba slučaja: kada je prikupljanje podataka završeno, filter se uklanja i snima se spektralni intenzitet same halogene sijalice pod istim uslovima; nakon toga, zakreće se blenda monohromatora i snima tamna struja fotokatode.

Transparencija za dva navedena filtera, dobija se kada se snimljene vrednosti intenziteta zračenja halogene lampe sa filterom podele sa snimljenim vrednostima intenziteta zračenja same halogene sijalice. Rezultati merenja prikazani su u poglavlju 5.2.

5 REZULTATI MERENJA

5.1 Spektralna osetljivost optičkog sistema

Cilj ovog merenja je određivanje odziva optičkog sistema sa fotomultiplikatorom na zračenje različitih talasnih dužina u intervalu 300 nm - 800 nm. To se postiže deljenjem snimljenih vrednosti intenziteta zračenja standardne lampe na fotomultiplikatoru sa intenzitetom koji predstavlja karakteristiku standardne lampe. Uz to, osetljivost optičkog sistema je na osnovu dobijenih rezultata proširena na opseg 800 nm - 900 nm, na način koji je opisan u ovom poglavlju.

5.1.1 Naponski signal na fotomultiplikatoru

Dobijene vrednosti napona na fotomultiplikatoru prikazane su na grafiku 11. Treba napomenuti da je od dobijenih vrednosti oduzet napon koji odgovara tamnoj struji fotokatode, odnosno 0,215 mV.

Zbog velikih fluktuacija pri niskim vrednostima napona, urađen je polinomni fit četvrtog stepena na intervalu talasnih dužina od 300 nm do 400 nm, kako bi se otklonile nepravilnosti u daljoj obradi podataka. Osim toga, u cilju produženja intervala talasnih dužina od 800 nm do 900 nm, izvršeno je fitovanje polinomom četvrtog stepena na intervalu od 700 nm do 800 nm, a potom se ta funkcija koristila za ekstrapolaciju napona na intervalu od 800 nm do 900 nm. Obe fitovane funkcije imaju sledeći oblik:

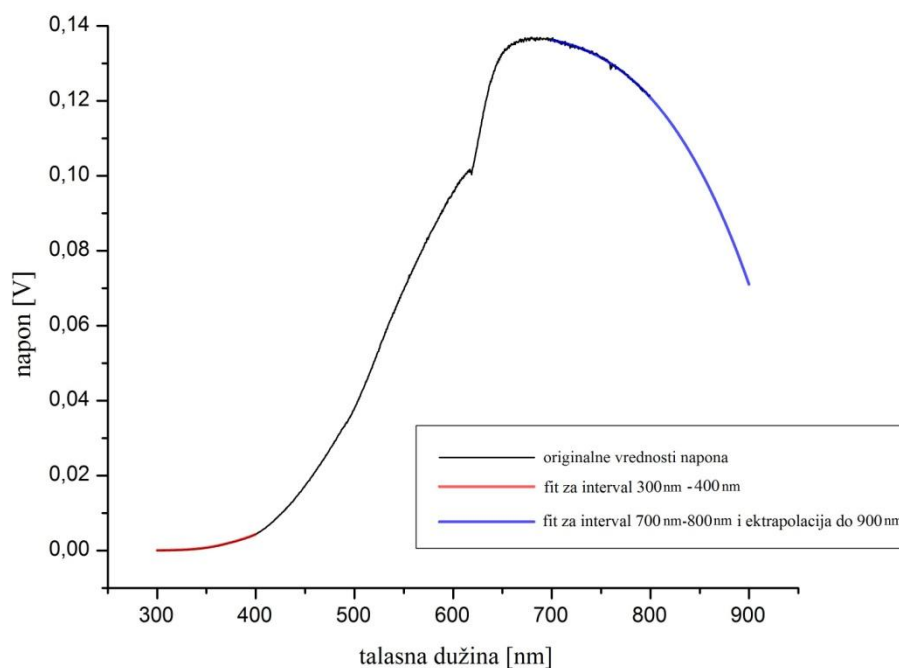
$$U = C + C_1\lambda + C_2\lambda^2 + C_3\lambda^3 + C_4\lambda^4 \quad (31)$$

a odgovarajući koeficijenti fita i koeficijenti korelacija za obe funkcije dati su u tabeli 2.

Koeficijenti	Fitovan interval	
	300 nm - 400 nm	700 nm - 800 nm
C	-0,54017	$6,04087 \times 10^{-8}$
C_1	$6,28554 \times 10^{-4}$	$1,13051 \times 10^{-4}$
C_2	$-2,70593 \times 10^{-7}$	$-3,72302 \times 10^{-8}$
C_3	$5,08472 \times 10^{-11}$	$5,40339 \times 10^{-12}$
C_4	$-3,49418 \times 10^{-15}$	$-2,85003 \times 10^{-16}$
Koeficijent korelacije R^2	0,99927	0,9959

Tabela 2. Koeficijenti funkcija fita i njihovi koeficijenti korelacija

Kada se sve uzme u obzir, fitovanje i ekstrapolacija, zavisnost napona od talasne dužine dobija oblik prikazan na grafiku 11.



Grafik 11. Zavisnost napona od talasne dužine

5.1.2 Spektralna karakteristika standardne lampe

Kao što je prethodno pomenuto, standardna lampa je kalibrisana u radiometrijskom odeljenju u NIST-u, a njena karakteristika je prikazana na grafiku 12. Radi što preciznije obrade podataka njena spektralna karakteristika je parcijalno fitovana, i to na intervalima od 300 nm do 400 nm i od 400 nm do 600 nm polinomom četvrtog stepena, a na intervalu od 600 nm do 800 nm linearnom funkcijom (jer je njen koeficijent korelacije bio bolji u odnosu na koeficijent korelacije polinomne funkcije). Koeficijenti funkcija fita i njihovi koeficijenti korelacije dati su u tabeli 3.

Koeficijenti	Fitovan interval		
	300 nm - 400 nm	400 nm - 600 nm	600 nm - 800 nm
C	2929,8	-272200,56878	-110646,84284
C ₁	-7,2485	241,44457	22,44811
C ₂	0,00545	-0,07934	-
C ₃	-1,66715×10 ⁻⁶	1,12698×10 ⁻⁵	-
C ₄	1,82507×10 ⁻¹⁰	-5,63442×10 ⁻¹⁰	-
Koeficijent korelacije R²	-	0,99999	0,99759

Tabela 3. Koeficijenti funkcija fita i njihovi koeficijenti korelacija

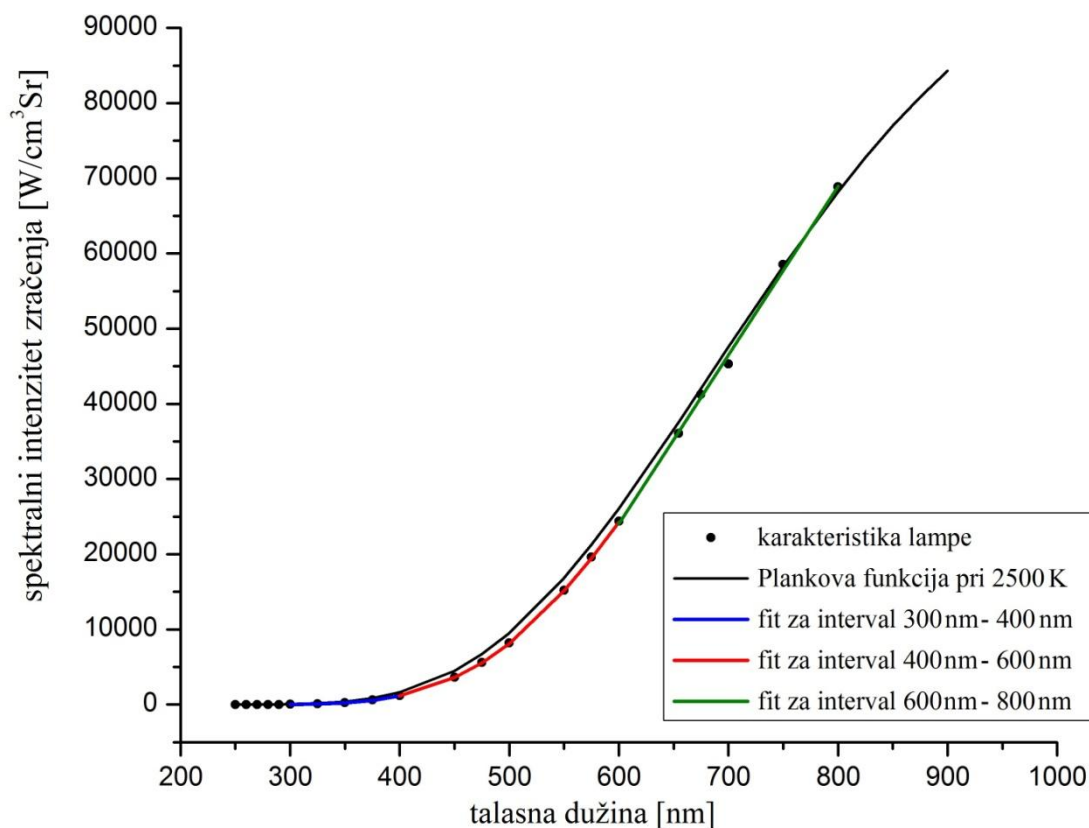
Kako standardna lampa vrlo dobro oponaša crno telo, proširenje opsega od 800 nm do 900 nm je rađeno pomoću Plankovog zakona zračenja crnog tela [1]:

$$E = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (32)$$

gde je: h – Plankova konstanta, c – brzina svetlosti u vakuumu, k – Bolcmanova konstanta, T – apsolutna temperatura na kojoj crno telo zrači, λ – talasna dužina.

S obzirom na to da pri zračenju standardne lampe temperatura volframske niti nije bila poznata, najbolja aproksimacija je nađena za temperaturu od 2500 K. Pored toga, pošto je spektralna emisiona moć Plankovog zakona za crno telo izražena u W/m^3 , a spektralni intenzitet zračenja standarne lampe u W/cm^3Sr , morala je biti izvršena korekcija radi poklapanja jedinica.

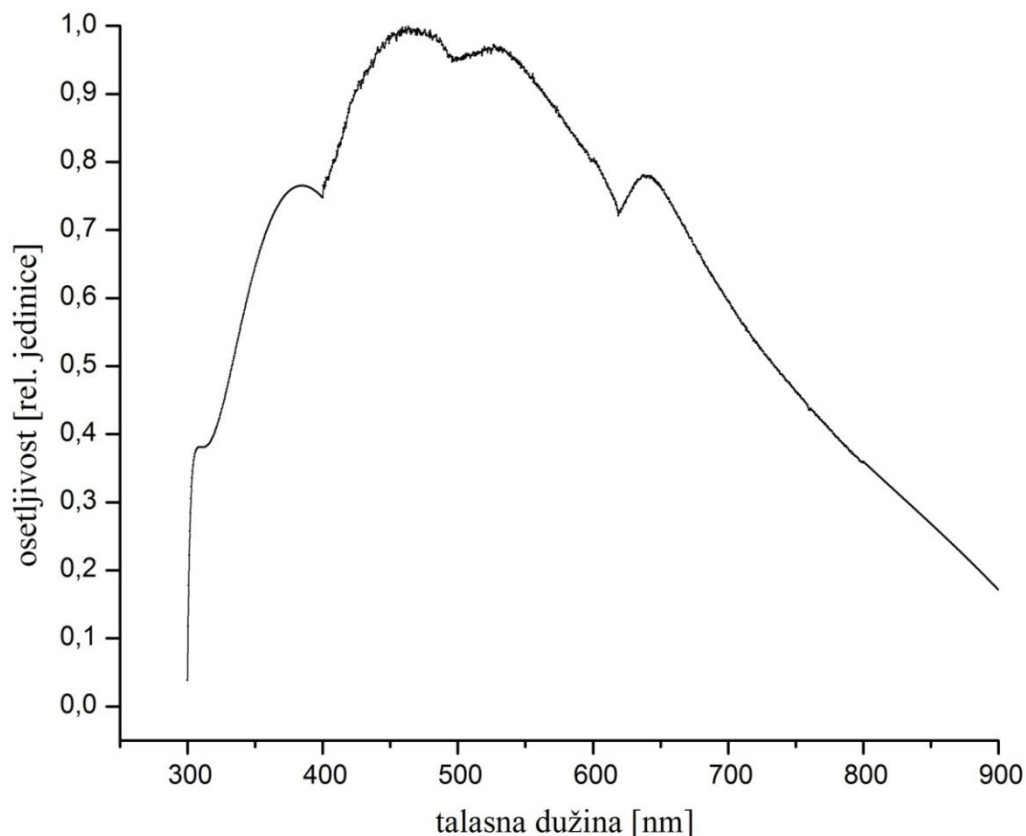
Funkcije fita i ekstrapolacija Plankovom funkcijom prikazane su zajedno sa karakteristikom standardne lampe na grafiku 12.



Grafik 12. Zavisnost spektralnog intenziteta zračenja standardne lampe od talasne dužine

5.1.3 Spektralna osetljivost optičkog sistema i diskusija

Nakon navedene obrade podataka može se pristupiti konačnom izračunavanju spektralne osetljivosti optičkog sistema sa fotomultiplikatorom proširenog opsega na način opisan u poglavlju 4.1. Konačan rezultat prikazan je na grafiku 13.



Grafik 13. Zavisnost osetljivosti od talasne dužine

Kriva relativne osetljivosti sistema u zavisnosti od talasne dužine u intervalu od 300 nm do 900 nm pokazuje da se maksimum javlja za interval talasnih dužina od oko 400 nm do 600 nm. Za talasne dužine manje od 400 nm i veće od 600 nm osetljivost sistema naglo opada, s toga se pri korišćenju sistema u tim opsezima mora uzeti u obzir ova relativna osetljivost. Odnosno, ispitivana osobina se koriguje na datu spektralnu osetljivost, koja velikim delom zavisi i od osobina samog fotomultiplikatora.

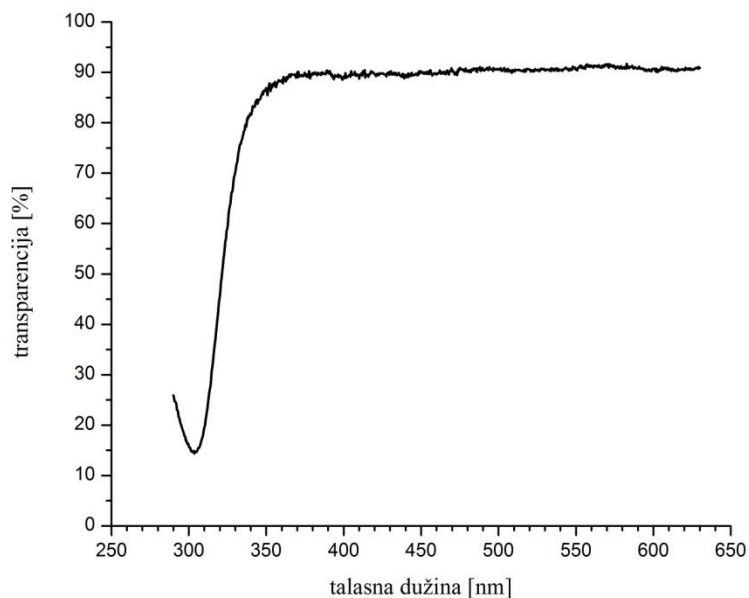
Skokovi relativne osetljivosti na talasnim dužinama od 400 nm i 620 nm se javljaju usled mešovitog sastava fotokatode (kombinacija galijuma i arsena).

U narednom poglavlju opisani optički sistem primenjen je na ispitivanje transparentije dva opisana dugopropusna filtera. Sam uticaj relativne osetljivosti optičkog sistema pokazaće se na primeru razlike dobijenih rezultata i rezultata preuzetih od proizvođača filtera.

5.2 Transparencija filtera

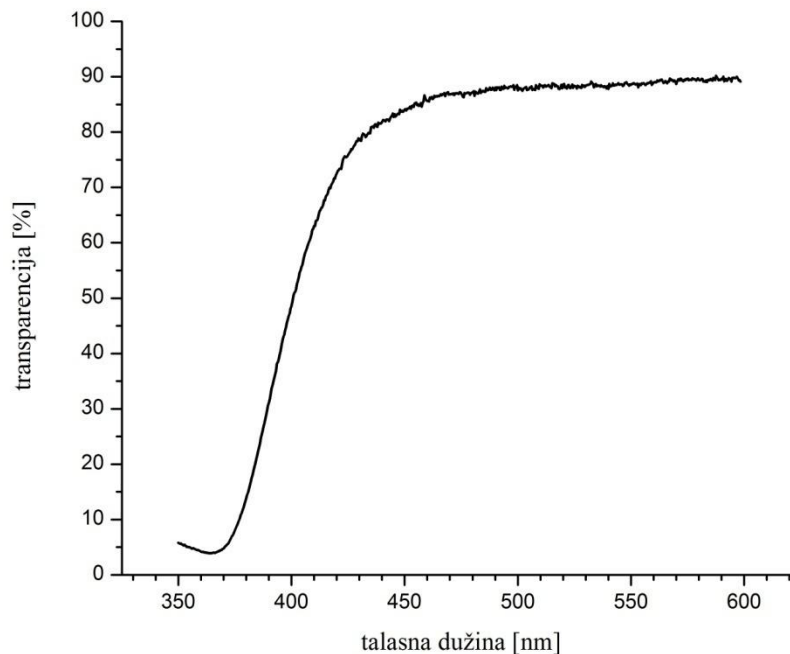
Transparencija filtera nakon izvršenog merenja dobija se na način koji je opisan u poglavlju 4.2. Slede rezultati merenja.

Transparencija dugopropusnog N-WG-320 filtera prikazana je na grafiku 14.



Grafik 14. Zavisnost transparencije filtera N-WG-320 od talasne dužine

Transparencija dugopropusnog GG-395 filtera prikazana je na grafiku 15.



Grafik 15. Zavisnost transparencije filtera GG-395 od talasne dužine

Karakteristične vrednosti očitane sa grafika za ova dva filtera date su u tabeli 4.

	Model filtera	
	N-WG-320	GG-395
$\Lambda_{\text{cut-on}}$	322 nm	400 nm
Granica nepropusnosti	303 nm	364 nm
Granica propusnosti	~380 nm	~460 nm
Transparencija	90%	89%

Tabela 4. Dobijene vrednosti osnovnih osobina korišćenih filtera

Ako se dobijeni rezultati iz tabele 4. uporede sa vrednostima proizvođača iz tabele 1. može se videti da dobijene vrednosti talasnih dužina na 50% transparencije odgovaraju proizvođačkoj, uzimajući u obzir interval greške. Kod ostalih vrednosti dolazi do relativno blagog odstupanja. Međutim, ovde se moraju uzeti u obzir osetljivost našeg optičkog sistema sa fotomultiplikatorom kao i greška pri merenju, jer one svakako utiču na dobijene rezultate transparencije pri nižim talasnim dužinama.

ZAKLJUČAK

Cilj eksperimentalne postavke ovog rada je određivanje odziva optičkog sistema sa fotomultiplikatorom Hamamatsu R636-10 na zračenje različitih talasnih dužina u intervalu 300 nm - 800 nm. To je postignuto deljenjem snimljenih vrednosti intenziteta zračenja standardne lampe na fotomultiplikatoru sa intenzitetom koji predstavlja karakteristiku standardne lampe. Uz to, osetljivost optičkog sistema je na osnovu dobijenih rezultata proširena na opseg 800 nm - 900 nm, uz pomoć Plankove funkcije zračenja crnog tela.

Na osnovu dobijenih rezultata relativne osetljivosti sistema, zaključeno je da se maksimalan odziv javlja na intervalu od 400 nm do 600 nm. Na talasnim dužinama van ovog intervala osetljivost sistema opada, s toga se pri korišćenju sistema u tim opsezima ispitivana osobina mora korigovati na datu spektralnu osetljivost, koja velikim delom zavisi i od osobina samog fotomultiplikatora. Osim toga, na 400 nm i 620 nm javljaju se skokovi relativne osetljivosti usled mešovitog sastava fotokatode fotomultiplikatora.

Opisani optički sistem je potom primenjen na ispitivanje transparentije dva dugopropusna filtera, N-WG-320 i GG-395. Pokazalo se da dobijene vrednosti talasnih dužina na 50% transparentije odgovaraju vrednostima navedenim od strane proizvođača, uzimajući u obzir interval greške. Kod ostalih karakterističnih vrednosti filtera je došlo do relativno blagog odstupanja. Upravo ovde se moraju uzeti u obzir osetljivost našeg optičkog sistema sa fotomultiplikatorom kao i greška pri merenju, jer one svakako utiču na dobijene rezultate transparentije pri nižim talasnim dužinama.

LITERATURA

1. Friš S. E., Timorjeva A. V.: Kurs opšte fizike, Knjiga III, Optika i atomska fizika, Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1970.
2. Hamamatsu Photonics K.K.: Photomultiplier tubes, Basics and applications, Hamamatsu Photonics K.K., 2007.
3. Janić I.: Eksperimentalne vežbe iz atomske fizike, UNS PMF, Novi Sad, 1990.
4. Palmer C., Loewen E.: Diffraction grating handbook, Newport Corporation, Rochester, 2005.
5. Pavlov M.: Elektronika, I deo, Fizička elektronika, UNS PMF, Novi Sad, 1973.
6. Zumbulović Lj.: Merenje spektralnih karakteristika sistema za snimanje spektralnih linija emitovanih iz plazme, Diplomski rad, Novi Sad, 1994.
7. Žikić N.: Merenje spektralne raspodele zračenja svetlosnog izvora u apsolutnim jedinicama, Diplomski rad, Novi Sad, 1995.
8. www.edmundoptics.com, 09.09.2015.
9. www.hamamatsu.com, 08.09.2015.
10. www.lot-qd.com, 09.09.2015.
11. www.mcphersoninc.com, 03.09.2015.

BIOGRAFIJA

Kristina Vučković rođena je 24.01.1991. u Novom Sadu. Osnovnu školu „Petar Kočić” završila je u Temerinu, a potom i Gimnaziju „Svetozar Marković” u Novom Sadu. Po završetku srednje škole, 2010-te godine upisuje studije fizike na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Treću godinu studija provodi na studentskoj razmeni u Trentu, Italija.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>Redni broj:</i>	
RBR	
<i>Identifikacioni broj:</i>	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
TD	
<i>Tip zapisa:</i>	Tekstualni štampani materijal
TZ	
<i>Vrsta rada:</i>	Diplomski rad
VR	
<i>Autor:</i>	Kristina Vučković
AU	
<i>Mentor:</i>	Prof. dr Zoran Mijatović
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Spektralna karakteristika optičkog sistema sa fotomultiplikatorom proširenog opsega
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2015
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Fizika atoma, molekula i jonizovanih gasova
ND	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Spektroskopija, fotomultiplikator, kalibracija, filteri
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	Cilj ovog rada je određivanje spektralne karakteristike optičkog sistema sa fotomultiplikatorom Hamamatsu R636-10 proširenog opsega. Krajnji rezultat je određivanje relativnog odziva celokupnog sistema u zavisnosti od talasne dužine zračenja. Nakon toga, izvršeno je ispitivanje transparentije dva dugopropusna filtera N – WG – 320 i GG – 395.
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	16.09.2015.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	25.09.2015.
DO	

Spektralna karakteristika optičkog sistema sa fotomultiplikatorom proširenog opsega
diplomski rad

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Radomir Kobilarov

član:

Prof. dr Srđan Rakić

član:

Prof dr Zoran Mijatović

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type: Monograph publication
DT

Type of record: Textual printed material
TR

Content code: Final paper
CC

Author: Kristina Vučković
AU

Mentor/comentor: Prof. Dr Zoran Mijatović
MN

Title: Spectral characteristic of the optical system with photomultiplier of extended range
TI

Language of text: Serbian (Latin)
LT

Language of abstract: English
LA

Country of publication: Serbia
CP

Locality of publication: Vojvodina
LP

Publication year: 2015
PY

Publisher: Author's reprint
PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP

Physical description:
PD

Scientific field: Physics
SF

Scientific discipline: Physics of atoms, molecules and ionized gases
SD

Subject/ Key words: spectroscopy, photomultiplier, calibration, filters
SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD

Note: None
N

Abstract: The aim of this paper is to determine the spectral characteristic of the optical system with photomultiplier Hamamatsu R636-10 of extended range. The final result is analysing the relative response of the whole system depending on the wavelength of radiation. Afterwards, the transparency of two longpass filters, N – WG – 320 and GG – 395, has been tested.
AB

Accepted by the Scientific Board: 16.09.2015.
ASB

Defended on: 25.09.2015.
DE

Spektralna karakteristika optičkog sistema sa fotomultiplikatorom proširenog opsega
diplomski rad

Thesis defend board:

DB

President:

Prof. dr Radomir Kobilarov

Member:

Prof. dr Srđan Rakić

Member:

Prof. Dr Zoran Mijatović