



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Određivanje osetljivosti optičkog sistema sa ICCD kamerom
- diplomski rad -

Mentor: Dr Igor Savić

Kandidat: Šandor Hegediš

Novi Sad, 2009

Ovaj rad je rađen u Laboratoriji za fizičku elektroniku (LFE) na Departmanu za fiziku Prirodnog matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Rad je rađen pod rukovodstvom docenta Savić Dr Igora.

Sadržaj

Uvod.....	1
Glava 1: Opis sistema za snimanje optičkih spektara.....	3
Spektroskopski sistemi.....	3
Karakteristike disperzionog sistema.....	3
Monohromatori.....	5
McPherson 2061 monohromator.....	7
CCD i ICCD kamere.....	8
Fotokatoda.....	8
Mikrokanalska ploča.....	10
Fosforni ekran.....	11
Optički sistem između pojačivača i CCD kamere.....	11
Glava 2: Postupak snimanja.....	12
Glava 3: Rezultati i diskusija.....	16
Odziv sistema na uskom intervalu talasnih dužina.....	16
Promena intenziteta detektovanog zračenja u zavisnosti od vremena ekspozicije.....	20
Određivanje osetljivosti sistema korišćenjem standardne lampe.....	23
Zaključak.....	39
Literatura.....	40
Biografija.....	41

Uvod

Spektroskopija se primenjuje za ispitivanje raspodele intenziteta zračenja po talasnim dužinama. Ako ovo zračenje emituju atomi i molekuli pod različitim fizičkim uslovima onda govorimo o emisionoj spektroskopiji. Ako se proučava apsorbcija, odnosno spektri nastali pri prolasku zračenja kroz materiju u različitim oblicima onda govorimo o apsorbionoj spektroskopiji. Prikaz svih mogućnost za primenu spektroskopije bio bi suviše dug, ali mogu biti nabrojane najosnovnije.

U fizici je lista spektroskopskih otkrića duža nego u bilo kojoj drugoj nauci. Uz pomoć spektroskopije se npr. može uraditi kvalitativna i kvantitativna analiza, odnosno mogu se odrediti vrste i zastupljenosti atoma i molekula, koje ulaze u sastav ispitivanog materijala. Najveći deo saznanja o elektronskim strukturama ali i o hiperfinoj strukturi atoma takođe dugujemo spektroskopiji. Spektroskopijom se takođe mogu dobiti i informacije o brzini emitera elektromagnetskog zračenja. Spektroskopija se takođe koristi i u fizici čvrstog stanja.

S obzirom da se svaka vrsta atoma ili molekula može dovedesti u stanje da pokaže svoj karakteristični emisioni ili apsorpcioni spektar, spektroskopija se može primeniti za proučavanje svih izvora zračenja, bilo da su to laboratorijski ili prirodni izvori zračenja. Tako se npr. u astronomiji spektralna analiza koristi za kvalitativne i kvantitativne analize zvezda. Kao dobar primer se može uzeti analiza površine Sunca, koja je po svojoj prilici, potpunija od analize bilo koje druge zvezde. Astrofizičari su uspeli da dokažu da u sastav Sunca, zvezda i vrlo udaljenih maglina, ulazi većina istih hemijskih elemenata koji su već nađeni na Zemlji. U spektrima Sunčeve korone i raznih maglina nađene su neke spektralne linije, koje dugo godina nisu mogle da budu identifikovane. Takođe, treba napomenuti da su u spektrima pojedinih astrofizičkih objekata i danas mnoge spektralne karakteristike ostale neidentifikovane.

Posebno treba istaći i značaj fizike jonizovanog gasa i plazme, jer se njihovim proučavanjem i proučavanjem procesa koji se u njima odvijaju dolazi se do saznanja o vasioni. Takođe, fizika jonizovanog gasa i plazme je i od velikog značaja za nove visoke tehnologije koje idu od izrade poluprovodničkih elemenata pa sve do dobijanja energije. Na ovom mestu se kao primer može spomenuti dobijanje čiste energije iz fuzione plazme.

Generalno, spektroskopija je od izuzetnog značaja za sve prirodne nauke (pre svega fiziku, hemiju, biologiju) ali njena primena u tehničkim i tehnološkim naukama je takođe od ogromnog značaja.

U spektrokopiji je pre svega potrebno snimiti raspodelu intenziteta zračenja po talasnim dužinama te je pored izvora zračenja koji se proučava neophodno imati i sistem za snimanje spektara. Većina spektroskopa sastoji se iz tri glavna dela: optičkog sistema, disperzionog elementa, koji služi za razlaganje zračenja po talasnim dužinama, i detektora. Optički sistem služi pre svega da se divergentno zračenje od izvora dovede u obliku paralelnog snopa na disperzionalni sistem koji ga onda razlaže na komponente. Kao disperzionalni elementi se koriste optičke prizme ili difrakcione rešetke. Po izlasku iz disperzionalnog sistema, potrebno je još i detektovati intenzitet spektralnih komponenti uz npr. pomoć fotomultiplikatora.

Jedan od ranije korišćenih metoda za beleženje spektara je fotografisanje razloženih spektara na fotografsku ploču ili film. Kod još jednostavnijih uređaja, vizuelno se posmatra spektar kroz durbin i upoređuju linije. Danas se za registraciju umesto filma koriste visoko osetljive digitalne kamere (EMCCD, CCD, ICCD kamere), radi što tačnijih merenja i olakšane i tačnije dalje analize dobijenih podataka.

Sistem koji je ranije korišćen za snimanje emisionih spektara iz izvora plazme, u laboratoriji za fizičku elektroniku u Novom Sadu, sastojao se od monohromatora McPherson 2061 sa step motorom, a kao detekcioni sistem se koristio fotomultiplikator koji pretvara svetlosne signale u električne. Signal sa fotomultiplikatora se usrednjavao pomoću digitalnog osciloskopa. U ovakovom sistemu sa korišćenjem preciznog step motora za pomeranje difrakcione rešetke i korišćenjem računara za prikupljanje podataka postizala se visoka preciznost merenja. Iako je veoma precizan, manja ovog sistema jeste da je proces snimanja spektara dugotrajan.

U spektroskopskom sistemu koji je sada na raspolaganju u novosadskoj laboratoriji, izmenjen je detektor, tj. fotomultiplikator je zamjenjen +4 Quik Edig ICCD kamerom.

Jedan od ciljeva ovog diplomskog rada je karakterizacija samog CCD čipa u smislu određivanja relativnog odziva pojedinih piksela pri njihovom osvetljavanju monohromatskom svetlošću kontsantnog intenziteta. Drugi, ne manje bitni cilj je određivanje zavisnosti izmerenih intenziteta od vremena ekspozicije i određivanje granice linearnosti odziva. Treći cilj ovog diplomskog rada je određivanje osetljivosti sistema.

GLAVA 1:

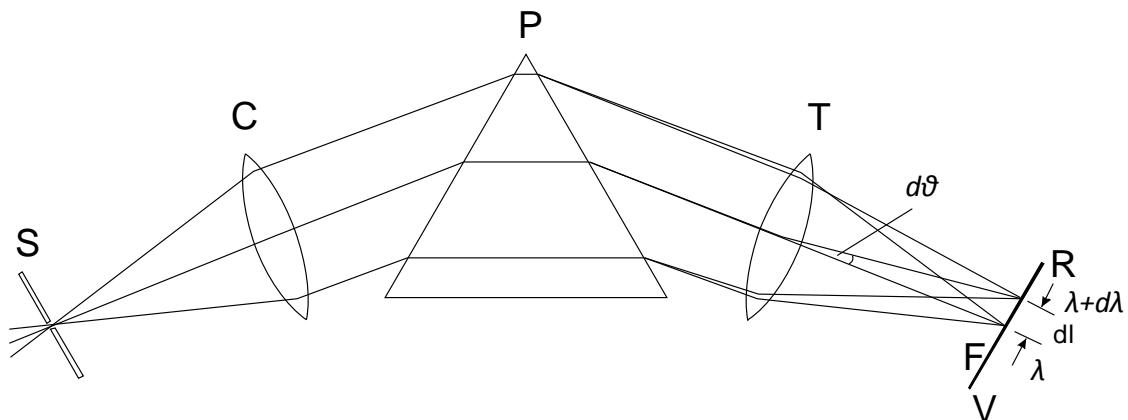
Opis sistema za snimanje optičkih spektara

Spektroskopski sistemi

Svaki instrument, koji se upotrebljava za dobijanje spektra elektromagnetskog zračenja, naziva se spektroskop. Najvažniji elementi ovog sistema su:

- ulazna pukotina
- disperzionalni sistem za razlaganje zračenja
- optički sistem za registraciju spektara

Najjednostavniji oblik spektroskopa je šematski prikazan na Slici 1. čiji je disperzionalni element prizma.



Slika 1. Opšta šema spektroskopa: S-ulazna pukotina, C-kolimatorsko sočivo, P-optička prizma, T-kamerno sočivo, F-kriva duž koje su različite talasne dužine spektra u žiži, V-ljubičasti ili kratkotalasni deo spektra, R-crveni ili dugotalasni deo spektra.

Karakteristike disperzionog sistema

Ulezna pukotina - jedan od najvažnijih delova spektroskopa pošto je spektralna linija u stvari monohromatska slika ulazne pukotine ili njenog dela. Tačnost sa kojom je ona napravljena i sa kojom se može podešavati, određuje svojstva dobijenih spektralnih linija. Zbog toga ulazna

pukotina može znatno da utiče na razlaganje ali i na formu spektralnih linija. Da bi razmak između čeljusti ulazne pukotine davao linije pravilnog oblika, neophodno je da ivice čeljusti budu strogo pravolinijske, potpuno paralelne i da prednje površine čeljusti leže u istoj ravni.

Disperzionalni sistem - dva najznačajnija načina za razlaganje zračenja na svoje sastavne delove su korišćenjem optičke prizma i difrakcione rešetke. Disperzija pokazuje u kojoj meri dotični aparat razlaže svetlost prema talasnim dužinama. Disperzija se može izraziti kao ugaona ili kao linearna disperzija. Osnovna je ugaona disperzija ($d\theta/d\lambda$), koja meri promenu ugla skretanja θ upadnog zraka svetlosti sa promenom talasne dužine λ . U praksi se često koristi i linearna disperzija ($dl/d\lambda$) koja daje stvarnu razliku dl između dveju bliskih linija u spektru, čija je razlika talasnih dužina $d\lambda$. Druga važna karakteristika disperzionih elemenata je moć razlaganja, koja pretstavlja odnos $\lambda/d\lambda$, pri čemu je $d\lambda$ razlika talsnih dužina između dve bliske linije sličnih intenziteta, koje još može da razdvajaju instrument pri talasnoj dužini λ .

Iako su prizmu, kao disperzionalni element, uglavnom zamenile difrakcione rešetke i interferometri, one se još uvek koriste u spektroskopiji i pokazuju dobre osobine što se tiče razlaganja i rezolucije. Njihov glavni nedostatak sastoji se u tome što se njihova disperzija znatno menja sa talasnom dužinom i kao posledica toga svaki pojedini instrument može da se upotrebi samo u relativno ograničenoj oblasti talasnih dužina. Često je i do 20 puta veća na jednom kraju spektralne oblasti, u kojoj prizma može da se primeni, nego na drugom kraju.

Ugaona disperzija prizme je približno data obrazcem

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}$$

gde je θ ugao između zraka koji pada na prizmu i zraka koji izlaze iz prizme, n je indeks prelamanja materijala prizme, a α ugao prizme.

Moć razlaganja R je definisana kao $\lambda/d\lambda$, a za odgovarajuću prizmu je

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda}$$

gde je b širina osnovice prizme, a n takođe indeks prelamanja.

Difrakcionalna rešetka se sastoji u od velikog broja blisko poređanih zareza. Što je veći broj zareza N , teorijski je veća i moć razlaganja, pod uslovom da svetlost pada na sve zareze. Ukoliko

su zarezi bliži jedni drugima, utoliko je veća i disperzija rešetke. Zarezi mogu biti na transparentnoj površini ili na refleksionoj. Visokodisperzionate rešetke imaju i do 12 000 zareza po santimetru. Uobičajeno je da se koriste refleksione rešetke. Spektroskopi sa difrakcionom rešetkom imaju mnogo ujednačeniju disperziju nego aparati sa prizmom, a jedna jedina rešetka može se upotrebiti da obuhvati vrlo široku spektralnu oblast. Dobra rešetka daje veću disperziju i veću moć razlaganja nego prizma slične aperture. Iz ovog razloga spektrografi sa rešetkom imaju široku primenu u istraživačkim laboratorijama, naročito za emisionu spektroskopiju.

Ugao pod θ kojim se svetlost bilo koje talasne dužine λ odbija od rešetke, se može dobiti iz jednačine

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \theta)$$

gde je α upadni ugao, θ izlazni ugao, oba merena u odnosu na normalu, m je red difrakcije, a d je razmak između zareza.

Ugaona disperzija difrakcione rešetke je

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}$$

Moć razlaganja rešetke ima sledeći oblik

$$R = mN$$

gde je N ukupan broj ureza, a m je dalje red difrakcije.

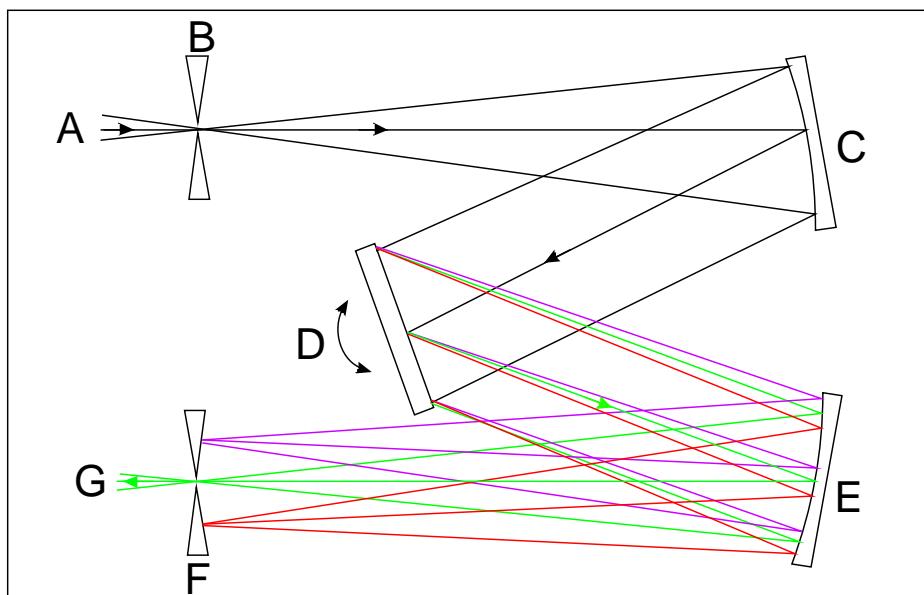
Kombinacija disperzionog elementa i ulazne pukotine zajedno sa sistemom za kolimaciju zraka, koji mogu biti sočiva ili konkavna ogledala, pretstavlja uređaj koji se zove monohromator. Na njegovom izlazu se dobija monohromatska slika ulazne pukotine. Monohromator sa sistemom za snimanje ili sistemom za registraciju spektra čini spektroskopski sistem.

Monohromatori

Uopšte govoreći, monohromator pretstavlja optički uređaj koji vrši selekciju svetlosti po talasnim dužinama iz šireg opsega talasnih dužina na svom ulazu. Za ovu selekciju monohromatori koriste disperzionate elemente.

Disperzija ili difrakcija se može potpuno kontrolisati samo ako su zraci koliminisani, odnosno samo ako su ti zraci paralelni. Pri laboratorijskim uslovima, uglavnom zračenje koje se vodi na monohromator divergira. Zato optički sistem u monohromatoru konvertuje divergentne zrake u paralelne pomoću sočiva ili konkavnih ogledala. Za dobijanje paraljenih zraka se daleko češće koriste refleksione površine jer one nemaju dodatnu disperziju kajу imaju sočiva.

Generalno gledano, postoje mnoge konfiguracije monohromatora, a samo jedna od njih je tzv Czerny-Turner tip. Monohromator marke McPherson 2061 koji se koristi u novosadskoj laboratoriji je upravo Czerny-Turner-ovog tipa. Šematski prikaz monohromatora Czerny-Turner-ovog tipa je predstavljen na Slici 2.



Slika 2. Šematski prikaz monohromatora Czerny-Turner-ovog tipa

Ovi uređaji su obično tako izgrađeni da je izvor zračenja (A), postavljen prema ulaznoj pukotini (B), tako da zraci mogu da uđu u monohromatorski sistem. Količina zračenja koja se pušta u monohromator određena je pre svega otvorom ulazne pukotine. Ulazna pukotina je smeštena u efektivni fokus konkavnog ogledala, tj. kolimatora (C), tako da su zraci koje ulaze kroz pukotinu a nakon reflektovanja od ogledala, paralelni. Tako kolimisani snop svetlosti se reflektuje od difrakcione rešetke (D). Ovi zraci su već razloženi na svoje komponente i skupljeni pomoću drugog konkavnog ogledala (E). Fokus ovog ogledala je na izlazu monohromatora, tako da nakon reflektovanja sa ogledalske površine zraci padaju na izlaznu pukotinu (F). Pošto je elektromagnetno zračenje razloženo, svaki opseg talasne dužine pada na različite tačke u ravni gde se nalazi izlazna pukotina. Tako se dobija serija slika ulazne pukotine u ovoj ravni. Zraci koji napuštaju monohromator kroz izlaznu pukotinu (G) sadrže celokupnu sliku ulazne pukotine

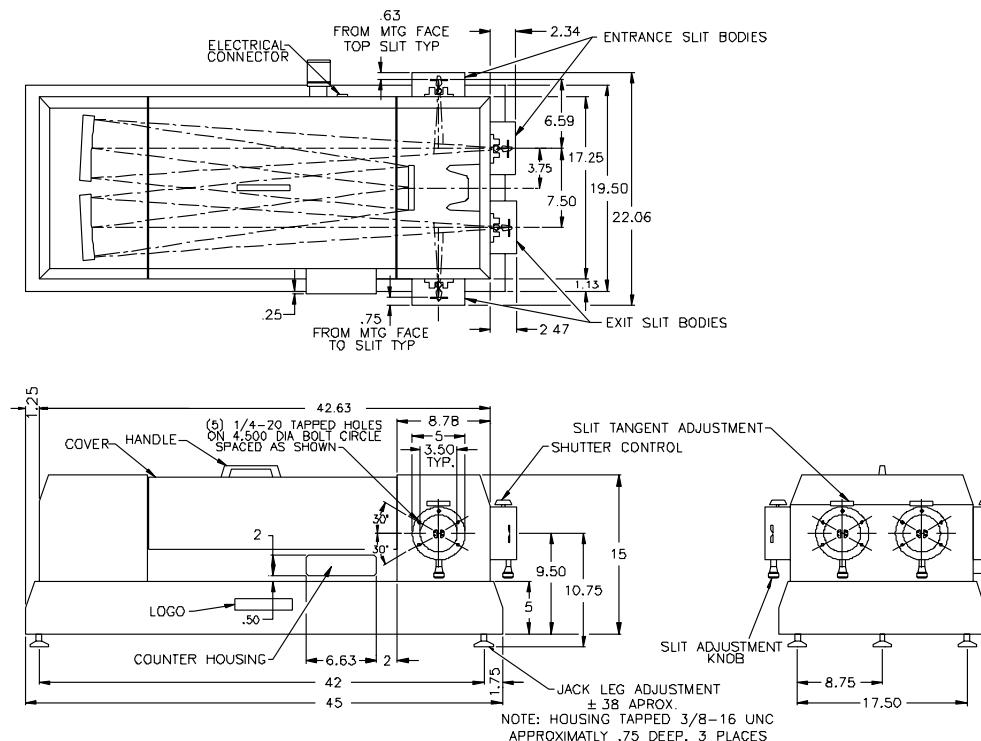
ali samo u datom veoma uskom intervalu talasnih dužina. Zakretanjem disperzionog elementa može da se menja deo onog opsega talasnih dužina koje hoćemo da projektujemo na izlaznu pukotinu. Širina opsega talasanih dužina na izlazu zavisi od širina pukotina. Širine ulazne i izlazne pukotine mogu da se podešavaju posebno.

McPherson 2061 monohromator

Jedan od glavnih elemenata spektroskopskog sistema u laboratoriji za fizičku elektroniku jeste monohromator. Ovaj monohromator, kako je već rečeno, Czerny-Turner-ovog tipa čiji elementi za koliminisanje snopa koristi dva konkavna ogledala žižne daljine od 1 m. McPherson optika je obložena aluminijumom, dok je krajnji sloj magnezijum-florid. Disperzionalni element u monohromatoru je difrakciona rešetka dimenzije 120 x 140 mm, koja ima 1200 ureza po milimetru. Tačnost ovakvog sistema je 0.05 nm, dok mu je linearna disperzija 0.833 nm/mm. Sa ovakvom difrakcionom rešetkom talasni opseg korišćenja je od 185 nm do 1300 nm.

Uređaj sadrži dva ulazna i dve izlazne pukotine. Ulazna pukotina se može podešavati po širini sa mikrometarskom tačnošću od 5 do 4000 μm , a visina od 2 do 20 mm. Na izlaznu pukotinu može se priključiti neki od željenih detektora. Osim navedenih, na monohromator je moguće priključiti i step motor, za što tačnije okretanje difrakcione rešetke.

Šematski prikaz McPherson 2061 monohromatora je dat na Slici 3.



Slika 3. Šema monohromatora McPherson 2061 (peuzeto od proizvođača).

CCD i ICCD kamere

U svojoj osnovi CCD (Charge-coupled Device) pretstavlja pretvarač analognog svetlosnog signala u elektronski signal, koristeći međusobno povezane kondenzatore i integrisana strujna kola. Danas je CCD kamera osnova za svako snimanje, posmatranje ili analiziranje u raznim oblastima. Zato CCD kamere imaju široku primenu u fotografiji, video snimanju, astronomiji, spektroskopiji, itd. Međutim, ovaj tip kamere nailazi na teškoće ako svetlosni intenzitet, tj. količina svetlosti koja pada na CCD čip, nije dovoljno velika. Tada se dobija slika koja nije dovoljno osvetljena i nekorisna je za dalju analizu. Za rešavanje ovog problema koriste se razni pojačavači koji povećavaju količinu svetlosti koja ulazi u kameru. Jedan od načina pojačavanja je umnožavanje upadnih fotona, koje koriste ICCD (intensified charge-coupled device), SIT (silicon intensified target), EB-CCD (electron bombardment CCD) i EM-CCD (electron multiplier CCD) kamere. ICCD kamere mogu da imaju još i brojače fotona, tj. imaju mogućnost da uhvate foton po foton. Ove specijalne kamere su osnovni predstavnici visoko osetljivih kamera.

ICCD kamera nije ništa drugo nego kamera sa CCD čipom koja ispred čipa ima pojačavač. Kako je već rečeno, to pojačavanje se kod ovih kamera vrši umnožavanjem upadnih fotona čime se dobija povećan upadni svetlosni signal na čip. Time obezbeđujemo kameri jako visoku osetljivost, tj. mogućnost da snimi slike u uslovima ekstremno slabog osvetljenja ili jako kratkog vremena trajanja ekspozicije, koje može biti i do 1.5 ns.

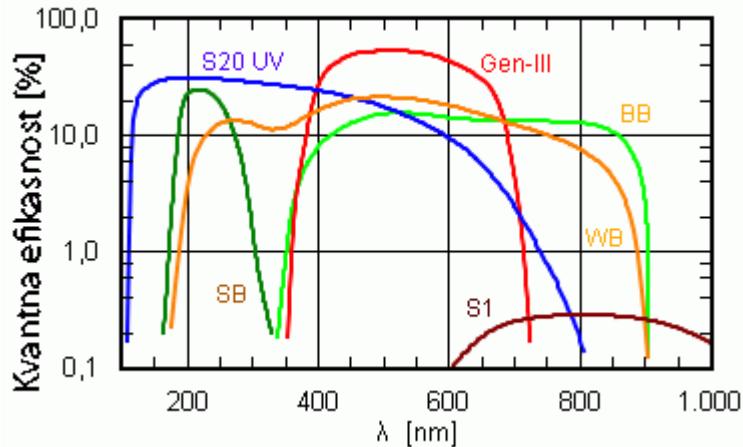
Ovakav pojačivač poseduje i kamera koja je korišćena tokom ovog rada, tj. +4 QuikEdig, proizvođača Stanford Computer Optics. Sledeći podaci su uzeti iz tehničkih podataka dobijenih uz ovu kameru. Deo ove kamere sastoji se iz nekoliko delova:

- Fotokatoda koja pretvara fotone u elektrone
- MCP (micro channel plate – mikrokanalska ploča) za umnožavanje elektrona nastalih na fotokatodi
- Fosforni ekran, čiji je zadatak da elektrone nastalih na MCP pretvara ponovo u fotone
- Optički sistem koji spaja pojačivač i CCD kameru

Fotokatoda

Pre nego što elektromagnetno zračenje uđe u kameru, ono nailazi na prvi element pojačivača, a to je fotokatoda. Uloga fotokatode je da pretvara fotone koji ulaze kroz prozor pojačivača u elektrone pomoću fotoionizacije. Da bi se dobio maksimalni odnos između šuma i

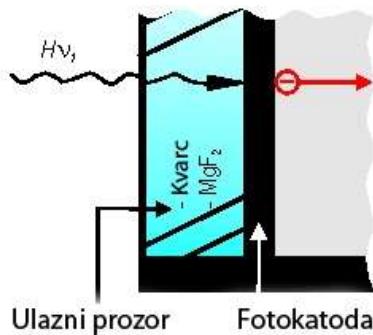
signalna, fotokatodu treba tako izabрати да јој осетљивост буде максимална у спектралном опсегу у којој се користи, јер се на тај начин добија и највише фотонова по упадном фотону. Неколико популарних материјала од којих се праве фотокатоде приказани су на Слици 4.



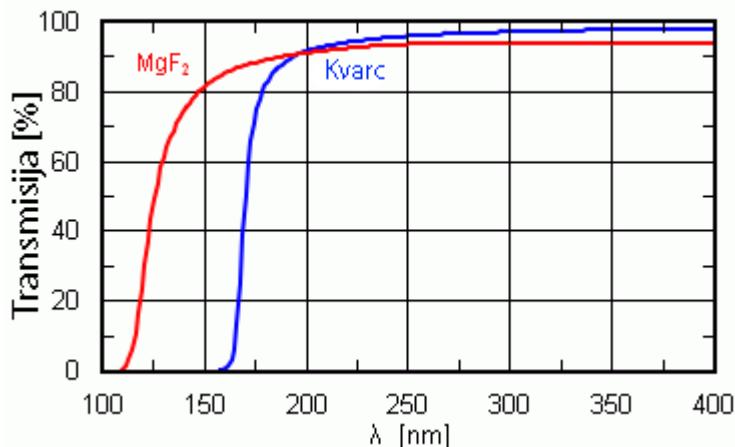
Slika 4. Karakteristike grupe materijala од којег се праве фотокатоде

Ispred fotokatode nalazi се улазни прозор, који може бити изграђен од различитих материјала. Избор материјала зависи од спектралног опсега у којем се камера користи. Кварц је стандардни материјал за израду улазног прозора, али за снимање у UV делу спектра користи се MgF_2 .

Шематски приказ улазног прозора и фотокатоде је дат на Слици 5, док је зависност фактора транспаренције у зависности од таласне дужине за оба материјала приказана на Слици 6.



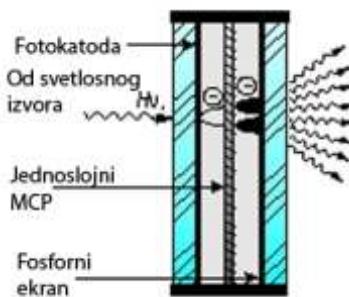
Slika 5. Skica улазног прозора и фотокатоде



Slika 6. Faktor transparencije za kvarc i MgF₂.

Mikrokanalska ploča

Uloga mikrokanalske ploče je da umnožava elektrone koji dolaze od fotokatode. Ovo možemo smatrati kao matricu sitnih kanala uređenih tako, da zaklapaju ugao od nekoliko stepeni sa osom pojačivača. Mehanizam umnožavanja je prikazana na Slici 7.



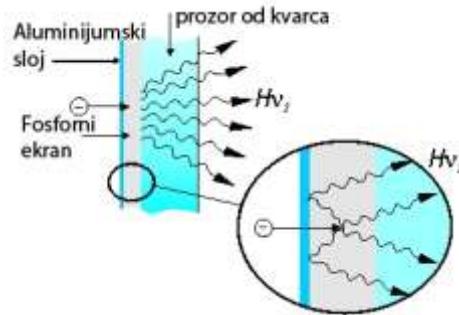
Slika 7. Šematski prikaz jednoslojnog MCP-a i njegove uloge.

Kanali ploče su 4 mm u dijametu, a ukupni dijambetar ploče je 18mm. Korišćena kamera tokom ovog rada ima pojačivač od 18 mm sa kombinacijom CCD čipa koji ima 1/2“, tj. 8 mm po dijagonali, tako da je slika umanjena za faktor 2.25 pomoću sočiva za kuplovanje.

Mikrokanalske ploče mogu biti jednoslojne, dvo- ili troslojne, u zavisnosti od potrebe za veličinom umnožavanja elektrona. Jednoslojne ploče imaju faktor umnožavanja 1000, dvoslojne $1000 \times 1000 = 10^6$, dok su troslojne ograničene na 10^8 zbog saturacije. Treba napomenuti da se izborom višeslojnog MCP-a gubi optički kvalitet slike.

Fosforni ekran

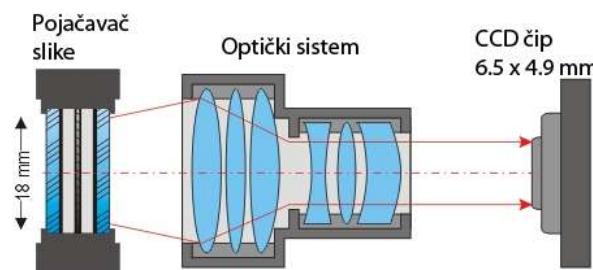
Kao krajnji element u pojačivaču, fosforni ekran pretvara elektrone umnožene pomoću MCP-a nazad u fotone. Fosfora ima više vrsta, u zavisnosti od toga u kojem spektralnom delu emituje zračenje i vremena potrebnog da oslobodi fotone. Obično je faktor umnožavanja između 20 i 200 fotona od jednog elektrona. Da bi se povećao broj fotona emitovanih u pravcu CCD čipa, zadnji deo ploče je obložen slojem aluminijuma, kako bi reflektovao fotone koji idu u suprotnom smeru. Slika 8. prikazuje princip rada fosfornog ekrana.



Slika 8. Šematski prikaz principa rada fosfornog ekrana.

Optički sistem između pojačivača i CCD kamere

Svetlost, odnosno zračenje koji izlazi iz pojačivača, treba dovesti do CCD čipa. Pošto su pojačivač i CCD čip različitih dimenzija, potrebno je staviti sistem sočiva za smanjivanje slike. Kako je već ranije navedeno, dimenzija dijamerta pojačivača je 18 mm, a od CCD čipa je 6.5 x 4.9 mm, dobija se da je to po dijagonali 8 mm, tako da treba koristiti sistem koji smanjuje sliku za faktor 2.25. Optički elementi ovog sistema su tako napravljeni da je distorzija slike minimalna i da je optička rezolucija u potpunosti očuvana. Šematski prikaz ovog dela ICCD kamere je dat na Slici 9.

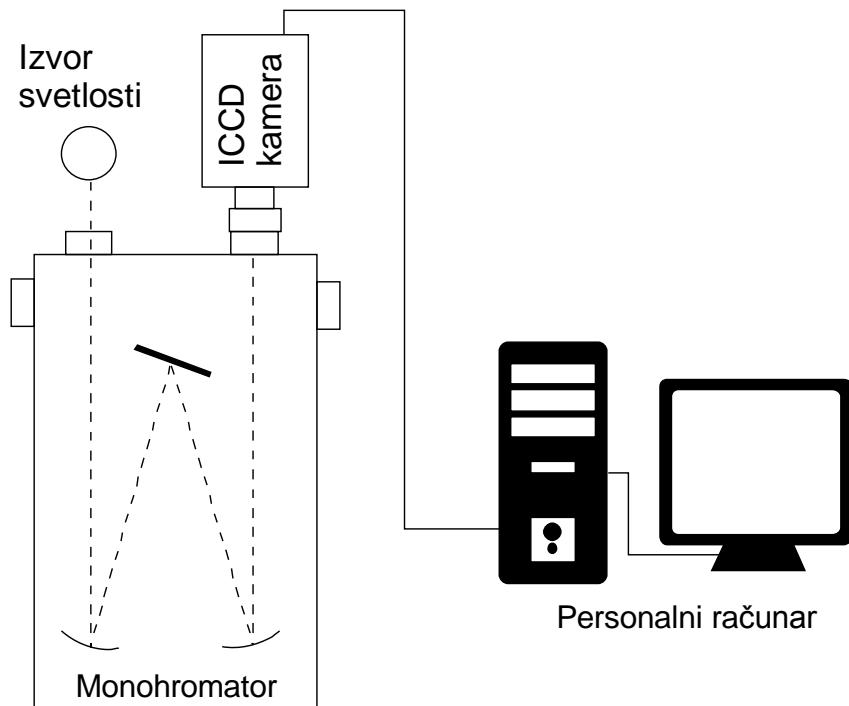


Slika 9. Optički sistem koji spaja pojačivač i CCD kameru.

GLAVA 2:

Postupak snimanja

Do sada je u ovom radu bilo reči o pojedinim elementima spektroskopskog sistema. U laboratoriji za fizičku elektroniku ovi elementi povezani su u jedan sistem, tj. u sistem koji se sastoji od monohromatora McPehrson 2061 sa preciznim step motorom iste marke a koji služi za pomeranje rešetke i +4 Quik Edig ICCD kamere proizvođača Stanford Computer Optics, čije su karakteristike gore opisane a koja je postavljena na izlaz monohromatora bez izlazne pukotine a koja služi za beleženje uskog dela spektra. ICCD kamera je još povezana i sa personalnim računarcem. Kamera i računar su povezani kablom preko C-link veze. Na računaru je instaliran i poseban softver, 4 Spec E, koji se dobija uz kameru. 4 Spec E služi za komunikaciju sa kamerom, za njeno setovanje i omogućava lakšu obradu slike ili podataka koji se dobijaju snimanjem. Prikaz ovako povezanog sistema je šematski dat na Slici 10.



Slika 10. Šematski prikaz sistema za snimanje spektara.

Svaki element ovog sistema potrebno je priključiti na napajanje pre rada, i to po sledećem redosledu: prvo se uključuje step motor, pa računar na kojem se pokreće softver za kontrolisanje kamere i na kraju kamera. Ovako sistem je spremан за snimanje i podešavanje.

Pre snimanja sa ovakvim sistemom neophodno je izvršiti određena podešavanja, pogotovo što se tiče kamere. Bez ovih podešavanja ne bi se dobili tačni podaci i slike prilikom snimanja. Pod ovim se podrazumeva pravilno postavljanje kamere na njen nosač, postavljanje kamere u fokalnu ravan monohromatora i setovanje kamere.

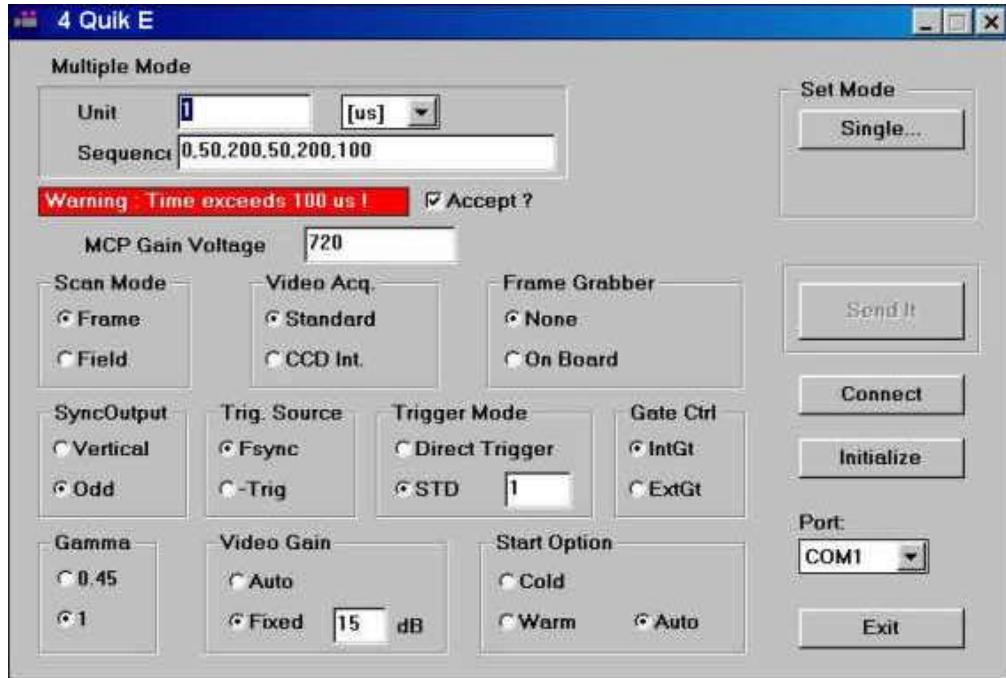
Da bi optički sistem za snimanje spektara bio funkcionalan, neophodno je da se kamera postavi u izlaznu fokalnu ravan monohromatora. To se može postići pomoću nosača za kameru. Sam nosač dozvoljava precizno pomeranje kamere pomoću zavrtanja. Odvrtanjem, odnosno zavrtanjem nožica vrši se promena visine, tako da je na ovaj način moguće postaviti kameru u odgovarajući horizontalni položaj. Tako je moguće i pomeranje kamere u horizontalnom pravcu isto pomoću preciznog sistema navoja, tj. levo-desno i napred-nazad u odnosu na monohromator. Na ovaj način je omogućeno vrlo precizno podešavanje kamere tako da se objektiv kamere nalazi naspram izlaza monohromatora. Posle učvršćivanja kamere na nosač, podešava se i vertikalnost snimljenih linija. To se vrši simultanim odvrtanjem odnosno uvrtanjem nožica sve dok se ne dobije da linija na snimku stoji vertikalno. Sledeći korak podešavanja je postavljanje kamere u fokalnu ravan monohromatora. To je izvršeno pomoću merenja poluširine spektralnih linija, jer je poluširina minimalna kada se kamera nalazi u fokalnoj ravni.

Ova podešavanja bila su ranije izvršena, ali su od zanačaja i za naš kao i za dalji rad sa ovim sistemom.

Setovanje kamere dešava se pomoću za nju namenjenog softvera na računaru. Ovaj deo posla je jako važan, da se ne bi oštetili delovi kamere. Pri uključivanju kamere i pokretanju programa na računaru treba pažljivo pregledati parametre koji su zadati za snimanje. Slika ovog prozora, zajedno sa svim parametrima koji se mogu menjati data je na Slici 11.

Dva parametra su od glavnog interesa, a to su vreme ekspozicije (exposure time) i napon na MCP-u (MCP Gain Voltage). Vreme ekspozicije je ništa drugo nego dužina vremena koliko dugo se pušta da zračenje ulazi u kameru. To se kontroliše preko napona između fotokatode i MCP-a. Ako je napon između ta dva elementa negativan (tipična vrednost je -120 V), fotoelektroni bivaju ubrzani prema MCP-u i konačno su pojačani na izlazu pojačivača. To znači da je kamera gejtovana, odnosno da je zatvarač (šater) otvoren. Dužina vremenskog intervala kada je zatvarač otvoren, odnosno kada je kamera gejtovana, predstavlja vreme ekspozicije. Otvoreni zatvarač (šater) u stvari predstavlja mod kada je pojačivač slike, odnosno kamera operativna. Ako je napon između fotokatode i MCP-a pozitivan (tipična vrednost je 100 V), fotoelektroni bivaju zadržani na fotokatodi, pa je zatvarač zatvoren, tj. kamera nije gejtovana. U ovom slučaju na izlazu kamere nema signala. Ovo predstavlja i glavnu prednost ICCD kamere u

odnosu na kamere drugih vrsta, što pruža mogućnost veoma brzog i kratkog „okidanja“ kamere. Vreme ekspozicije se kreće od 5 ns pa naviše i to zahvaljujući gejtovanju.



Slika 11. Prozor iz softvera za setovanje kamere.

Ova podešavanja su jako važna pri svakom merenju jer inače može doći do ozbiljnog oštećenja CCD čipa, odnosno kamere. Naime, ako se pri dugom vremenu ekspozicije propušta veliki intenzitet zračenja koji pada na CCD čip onda mogu ostati trajna oštećenja pojedinih piksela CCD senzora. Zato je neophodno da se pre snimanja podešavanje uvek kreće sa najmanjim vremenom ekspozicije, a to je u nano sekundskoj oblasti. Npr. kreće se od 5 ns pa se povećava vreme ekspozicije sa korakom od 10 ili 20 i postepeno se povećava ovu vrednost, sve dok se ne dobije dovoljno osvetljena slika iz koje se mogu tačno očitati željeni podaci. Pri slabom izvoru svetlosti koja želi da se snimi, može se iskoristiti i veće pojačanje pojačivača, a to se može uraditi povećanjem napona na MCP-u (MCP gain voltage). Standardno ovaj napon je podešen na 750 V i omogućeno je ga povećavati ga do 1000 V ako je to neophodno. Bitno je da se pri svakom povećanju ove vrednosti kreće od najmanjeg vremena ekspozicije. Visok napon na MCP-u sa kratkim vremenom ekspozicije ne može da ošteti Mikro-Kanalsku Ploču, ali dugačko vreme ekspozicije sa niskim naponom na MCP-u može, iako je dobijena slika prihvatljive osvetljenosti.

U cilju dobijanja što tačnijih podataka neophodno je izvršiti korekciju na pozadinsko svetlost (background korekcija). Korekcija na pozadinu je neophodna zato što, osim svetlosti sa snimanog izvora, na kameru pada i svetlost iz sredine u kojoj se merenje obavlja, kao i zbog

postojanja šuma same kamere. Bitno je da se setovanje kamere optimizuje za snimanje pri uslovima pravog eksperimenta. Potom se izvor svetlosti isključi tako da samo pozadinsko zračenje pada na kameru. Snimi se slika koja kasnije služi kao slika za korigovanje. Potom se istim setovanjem kamere nastavlja snimanje svetlosti koja dolazi sa samog izvora i od pozadine. Softver koji dolazi sa kamerom pruža mogućnost da se izvrši korekcija na pozadinsko zračenje i šum. Tom prilikom softver od očitanog intenziteta sa svakog piksela oduzima odgovarajuću snimljenu vrednost intenziteta sa slike sa čisto pozadinskim svetлом.

Pre ovog rada je urađena kalibracija sistema po talasnim dužinama, ali to nije dovoljno za prava merenja. Naime, neophodno je imati više informacija o samom senzoru ali i celokupnom sistemu. Zato je cilj ovog diplomskog rada prikupljanje dodatnih informacija o karakteristikama same kamere ali i celog sistema. Posle dobijanja i obrade podataka dobijenih u ovom radu njih je potrebno koristiti u daljem radu sa ovim sistemom.

GLAVA 3:

Reslutati i diskusija

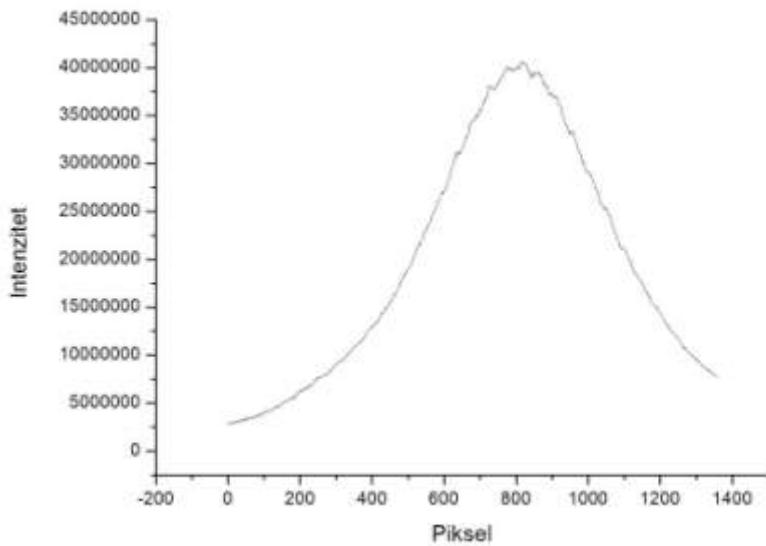
U prethodnom tekstu već je rečeno da je za dalji rad sa ovim sistemom potrebno još informacija o karakteristikama kamere i celog sistema. U ovom radu je određen odziv CCD senzora na određenu talasnu dužinu i to na različitim mestima samog senzora. Potom je okarakterisana promena intenziteta detektovanog zračenja u zavisnosti od vremena ekspozicije a na kraju je određena osetljivost sistema korišćenjem standardne lampe.

Odziv sistema na uskom intervalu talasnih dužina

Cilj ovog eksperimenta je dobijanje informacija o odzivu samog CCD senzora, odnosno dobijanje informacije o visini detektovanog signala na različitim mestima senzora ukoliko se osvetljava svetlošću konstantnog intenziteta i tačno određenog intervala talasnih dužina. Kako je poznato, CCD čip se sastoje od horizontalno i vertikalno postavljenih senzora, piksela. U idealnom slučaju svi pikseli bi trebali imati isti odziv ako se ozrače identičnim zračenjem (isti talasni opseg i isti intenzitet). Međutim, u realnom slučaju to nije tako i zato treba da se snimi i analizira slika istog svetlosnog izvora na različitim mestima čipa.

Ideja ovog eksperimenta je sledeća: pomoću stabilisanog izvora napaja se običan LED, koja zrači u određenom intervalu talasnih dužina, tačnije intenzitet izračene svetlosti ima maksimum na određenoj talasnoj dužini. Takođe je poželjno dobijanje zračenja koje je što višeg stepena monohromatičnosti. U tom cilju je u kombinaciji sa LED-om korišćen i crveni filter, koji smanjuje širinu spektralne oblasti koja je emitovana sa LED-a a koja pada na CCD senzor preko monohromatora. Jedan ovako snimljen profil pokazan je na Slici 12.

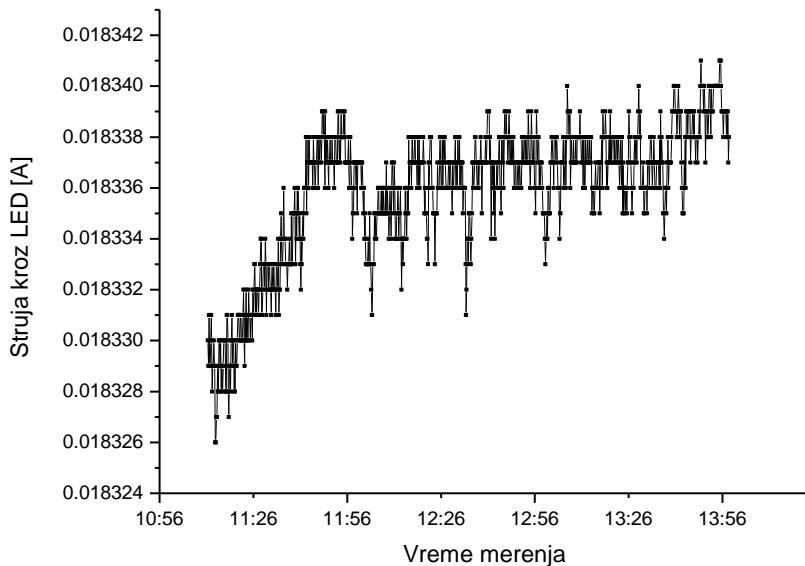
Pošto se želi proveriti kako se menja intenzitet maksimuma ove raspodele na različitim delovima CCD čipa, sva podešavanja koja se tiču LED-a ostavljaju se nepromenjena, dok se položaj krive može pomerati levo ili desno pomoću difrakcione rešetke. Finim rotiranjem difrakcione rešetke, se i kriva se može pomerati u željenim koracima. Tako se iz ove raspodele intenziteta svetlosti a posmatrajući samo maksimume krivih može dobiti procena o odzivu sistema na različitim mestima čipa a na uski interval talasnih dužina.



Slika 12. Snimljeni profil LED-a

Prilikom merenja za ovaj eksperiment korišćen je običan LED. Maksimalna moguća struja kroz diodu je data, i iznosi 20 mA. Pošto je intenzitet zračenja svetlosti kod ovog izvora veoma osetljiv na jačinu struje, nepohodno je da se LED napaja što stabilnijim strujnim izvorom. Zbog ovoga je korišćen stabilisani izvor struje, koja je preko odgovarajućeg otpornika povezan sa diodom. Struja napajanja je stavljena da bude 18 mA a napon 10 V. Stabilnost ovog izvora moguće je pratiti pomoću digitalnog voltmetara povezanog sa računarcem. Primećeno je da se prilikom dužeg vremena zračenja LED-a, njegova temperatura povećava, pa takođe i otpor, a posledica toga je da se i struja menja kroz diodu. Zato je bilo neophodno da se pre merenja uvek sačeka određeno vreme kako bi se temperatura i struja stabilizovale. Ovo vreme iznosilo je približno sat vremena.

Nakon stabilizacije struje moguće je merenje spektara. Prilikom merenja praćena je još i fluktuacija struje iz sledećeg razloga: naime, pri snimanju spektra diode potrebno je snimiti i pozadinsko zračenje, a to je moguće samo ako prekidamo struju kroz diodu tako da ne sija. Međutim, ovakav prekid traje samo nekoliko sekundi, pa se zato temperatura LED-a neće jako smanjiti, niti će se struja previše promeniti. To je potvrđeno snimanjem promene struje koja teče kroz diodu, što se vidi na Slici 13. Sa grafikona se može videti da ova promena iznosi svega 0.082%, jer je maksimalna struja bila 0.018341 A, a minimalna 0.018326 A, što je prihvatljivo za naš eksperiment.



Slika 13. Promena struje kroz diodu tokom merenja.

Bitan deo zadatka pre merenja jeste podešavanje sistema i setovanje kamere. Na monohromatoru je praćen položaj difrakcione rešetke. To je važno da bi se kasnije znalo u kom smeru da se okreće rešetka, jer to određuje i položaj snimljenog profila LED-a na čipu. Za početak je nameštena difrakciona rešetka tako da slika svetlosnog izvora pada otprilike na sredinu, kako bi se podešavali parametri kamere.

Setovanja kamere je pažljivo određeno tako je napon na MCP-u podešen na 900 V, CCD gain 10 dB (pojačanje CCD-a) a vreme ekspozicije najmanje, što iznosi 5 ns. Na ovako dobijenoj slici se ne vidi profil LED-a, jer je količina svetlosti koja je puštena u kameru jako mala. Postepenim povećanjem vremena ekspozicije svaki put je dobijena jasnija slika o raspodeli intenziteta svetlosnog izvora. Znajući maksimalni intenzitet pri kojem ne dolazi do oštećenja senzora, tj. granicu do koje bezbedno može da se koristi kamera, povećano je vreme ekspozicije do 200 μ s. Za još tačnija merenja, podešeno je da prilikom svakog snimanja kamera napravi po 100 slika i da se na kraju dobije raspodela koja predstavlja srednju vrednost intenziteta u svakoj tački. To znači da se intenzitet svake tačke na grafiku dobija kao suma intenziteta od 100 puta osvetljeno jednog istog piksela, a sve to podeljeno sa 100. Jedan ovako dobijen profil prikazan je na Slici 12. i predstavlja raspodelu intenziteta svetlosti po pikselima senzora. Time je kamera setovana i spremna za dalji rad.

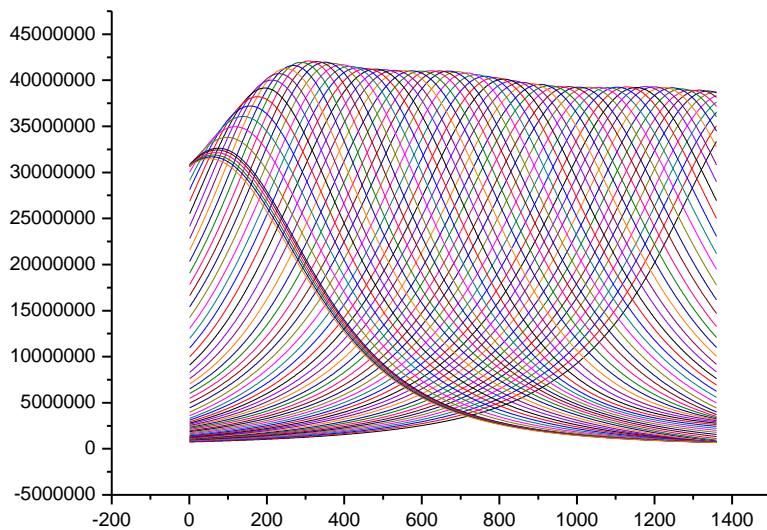
Sledeći korak je da se pomoću step motora rotira difrakciona rešetka monohromatora sve dok maksimum svetlosnog izvora, tj. LED-a ne pada na kraj senzora kamere. Tu je resetovan brojač step motora i označen je kao nulti položaj. Znajući odnos između koraka step motora, položaja rešetke monohromatora i broja piksela, izračunato je koliki treba da bude korak step motora da bi se dobio dovoljan broj snimaka za dalju obradu. Izuzeci su napravljeni pri snimanju

na početku i kraju. Tu su, u cilju dobijanja više informacija, uzeti su još manji koraci, odnosno rastojanja između dve susedne krive raspodele su još manja.

Ovako je snimljeno ukupno 66 slika, na kojima se vidi da se najsvetlijia tačka postepeno pomera po horizontali slike. Grafici raspodele intenziteta zračenja po horizontali (za svaku sliku) se dobijaju iščitavanjem pomoću softvera koji dolazi uz kameru. Pošto raspodela intenziteta prati određenu pravilnost, može se aproksimirati odgovarajućom matematičkom funkcijom. Od analiziranih funkcija ispostavilo se da funkcija Pearson VII najbolje opisuje raspodele:

$$y = a + \frac{b}{1 + 4 * \left(\frac{x - c}{d}\right)^2} * \left(2^{\frac{1}{e}-1}\right)^e$$

U prethodnoj jednačini su a , b , c , d , i e parametri spomenute funkcije. Za svaku od 66 snimljenih raspodela intenziteta zračenja po pikselima, fitovanjem su dobijene vrednosti parametara a , b , c , d , e . Korišćenjem gornje funkcije i određenih fit parametara a , b , c , d , e funkcije raspodele intenziteta zračenja po pikselima a za 66 različitih položaja rešetke su prikazani na Slici 14.

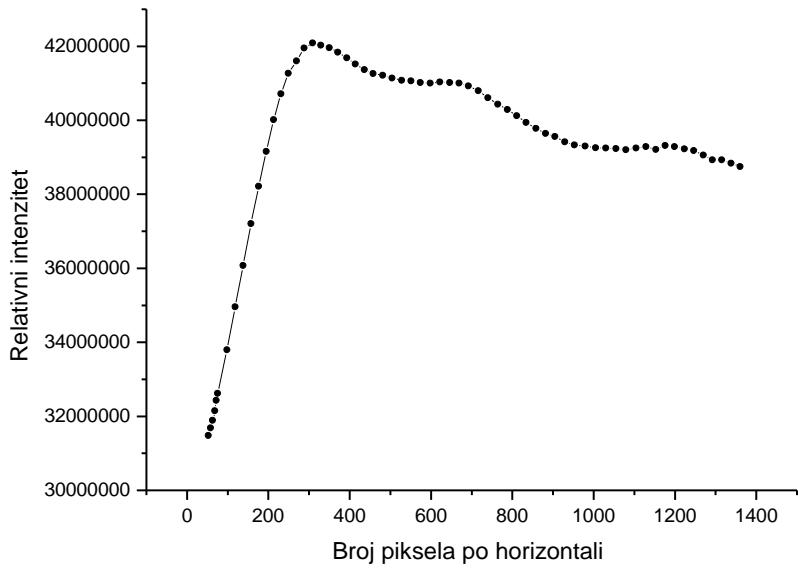


Slika 14. Aproksimacija snimljenih profila.

Sa prethodne slike se vidi da sistem različito reaguje na isti izvor u različitim tačkama. Da bi se dobila još jasnija slika o ovome, napravljen je drugi grafik prikazan na Slici 15. a na koji su stavljeni samo maksimum ovih raspodela. Treba napomenuti da poslednjih pet tačaka ne treba uzimati u razmatranje, jer je sa Slike 14. očigledno da maksimumi ovih krivih padaju van čipa.

Posmatranjem Slike 15. se odmah vidi da na levoj strani čipa brzo opada inenzitet sa približavanjem ivici čipa. Ovo se dešava otprilike na prvih 300 piksela i prati određenu nepravilnost koja se može smatrati kao neodstatak kamere. Analizirajući dalje, vidi se da je

promena izmerenog maksimalnog intenziteta po ostalom delu nije ravnomerna. Bez obzira na to, ne posmatrajući prvih 300 piksela, ova promena ne prelazi 8.1%, što je prihvatljivo. Kako je već rečeno, u idealnom slučaju ne bi se javila nikakva promena po celoj dužni čipa, već bi se na prethodnom grafiku videla ravna horizontalna linija. Međutim, vidi se da je to u realnom slučaju sasvim drugačija. Postojanje ovakve karakteristike sistema treba uzeti u obzir prilikom daljeg merenja sa ovim sistemom.



Slika 15. Raspodela maksimuma intenziteta po horizontali senzora.

Promena intenziteta detektovanog zračenja u zavisnosti od vremena ekspozicije

Eksperiment se odnosi na određivanje zavisnosti detektovanog intenziteta zračenja od vremena ekspozicije ICCD kamere. Poznato je da prilikom povećavanja vremena ekspozicije u kameru ulazi više zračenja, pa će i intenzitet biti veći. Zavisnost bi trebalo da bude linearna do određene granice, a onda bi trebala da pokazuje efekte zasićenja.

Za ovaj deo rada korišćen je isti izvor svetlosti kao u prethodnom eksperimentu, odnosno LED. Da bi dobili što tačnije rezultate i ovoga puta je dioda napajena stabilisanim izvorom struje, a potom se čekalo da se dioda zagreje i da se struja stabilizuje kroz nju. Sledеći korak je bio podešavanje položaja difrakcione rešetke tako da se maksimum krive raspodele zračenja po pikselima nalazi na sredini CCD senzora.

Prilikom setovanja kamere stavljeno je da napon na MCP-u (MCP gain) bude 900 V, a posle je postepeno povećano vreme ekspozicije, krećući se od 5 ns pa sve do 100 μs. Rezultati

merenja su dati u Tabeli 1. Pod intenzitetom se ovde podrazumeva intenzitet očitan na maksimum krive raspodele.

Vreme ekspozicije [ns]	Intenzitet
50	793
200	3328
500	7608
1000	15103
5000	79749
10000	159122
20000	328283
25000	411178
30000	501448
40000	672088
50000	846906
60000	1017940
70000	1176550
80000	1323870
90000	1437030
100000	1519870
75000	1259160
95000	1483480
85000	1392760

Tabela 1. Rezultati merenja zavisnosti intenziteta od vremena ekspozicije (na sredini senzora).

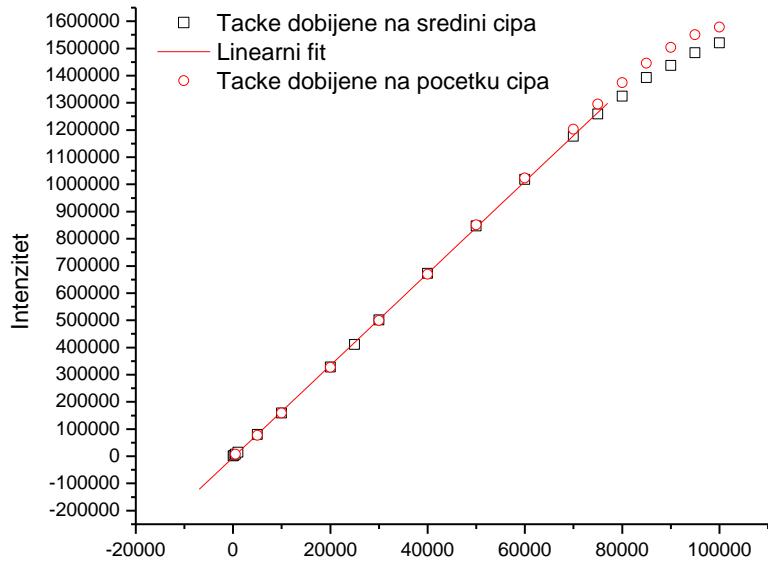
Isti postupak merenja je napravljen i za deo čipa gde postoji određena nepravilnost u osetljivosti. Ovaj deo se odnosi na prvih 300 piksela koji je primećen i u prethodnom delu rada.

Pomoću step motora difrakciona rešetka je zaokrenuta, tako da maksimum krive raspodele pada na spomenuti deo senzora kamere. Zatim su opet snimljene slike sa postepenim povećavanjem vremena ekspozicije kamere. Rezultati dobijeni prilikom ovog merenja prikazani su u Tabeli 2.

Vreme ekspozicije [ns]	Intenzitet
5	0
500	7680
5000	76496
10000	158937
20000	326717
30000	498734
40000	669798
50000	850767
60000	1023470
70000	1202660
75000	1295270
80000	1374240
85000	1445520
90000	1503840
95000	1550690
100000	1578010

Tabela 2. Rezultati merenja odnosa intenziteta od vremena ekspozicije na početku čipa.

Radi lakše analize rezultata predstavljenih u Tabeli 1 i Tabeli 2 rezultati su prikazani grafički na Slici 16. Analizirajući dobijene podatke vidi se da se u oba slučaja detektovani intenzitet poroporcionalno povećava sa povećavanjem vremena ekspozicije a potom odstupa od linerne funkcije i pokazuje znake zasićenja, što je i bilo za očekivati.



Slika 16. Zavisnost detektovanog intenziteta od vremena ekspozicije na sredini i na početku čipa.

Pošto je odnos intenziteta i vremena ekspozicije linearan do određene tačke, za karakterizaciju ove zavisnosti urađeno je fitovanje na funkciju

$$y = a + b \cdot x$$

a rezultati fitovanja su

$$a = -3767.914$$

$$b = 16889.481$$

Ova prava je jako važna za dalji rad, tj. za korekciju na vreme ekspozicije. Naime, za poređenje intenziteta snimljenih korišćenjem različitih vremena ekspozicije, poznavanje gornje jednačine je neophodno.

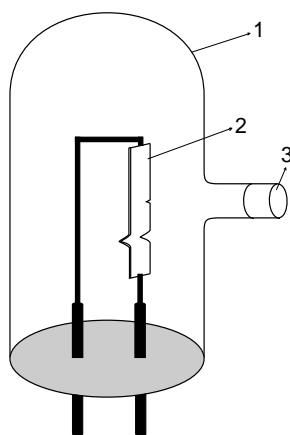
Određivanje osetljivosti sistema korišćenjem standardne lampe

Cilj ovog eksperimenta jeste određivanje osetljivosti sistema na različitim talasnim dužinama i to pomoću standardne lampe.

Osetljivost se može definisati kao veličina odziva sistema na zračenje određenog intenziteta pri određenoj talasnoj dužini. Naime, iako je zračenje velikog intenziteta, ukoliko je osetljivost mala onda će biti detektovan mali intenzitet na datoј talasnoj dužini. Iz navedenog razloga potrebno je odrediti osetljivost mernog sistema. Za određivanje osetljivosti odnosno kalibracije mernog sistema koristi se odgovarajući kalibrirani svetlosni izvor.

Najbolji izvori koji se koriste kao standard za kalibraciju je apsolutno crno telo ili različiti modeli apsolutno crnog tela. Međutim, ovakva kalibracija uopšte nije jednostavan proces, zato se modeli apsolutno crnog tela koriste samo ako je dostupan osnovni tj. primarni standard. Kao radni standard vrlo je pogodna lampa sa volframskom trakom. Glavna prednost ovakve lampe jeste da se traka greje pomoću električne struje i tako se i obezbeđuje visoka tačnost održavanja intenziteta zračenja. Kako se traka nalazi u vakuumu ili u atmosferi inertnog gasa lako se postiže visoka temperatura. Osim toga volfram je metal koji ima visoku tačku topljenja (3655 K) tako da na visokoj temperaturi veoma sporo isparava, što opet uslovljava da prozor lampe za dug period vremena ostane čist.

Standardna lampa sa volframskom trakom koja je u ovom radu korišćena za kalibraciju prikazana je na Slici 17.



Slika 17. Standardna lampa sa volframskom trakom, 1-stakleni balon, 2-volframska traka, 3-kvarcni prozor.

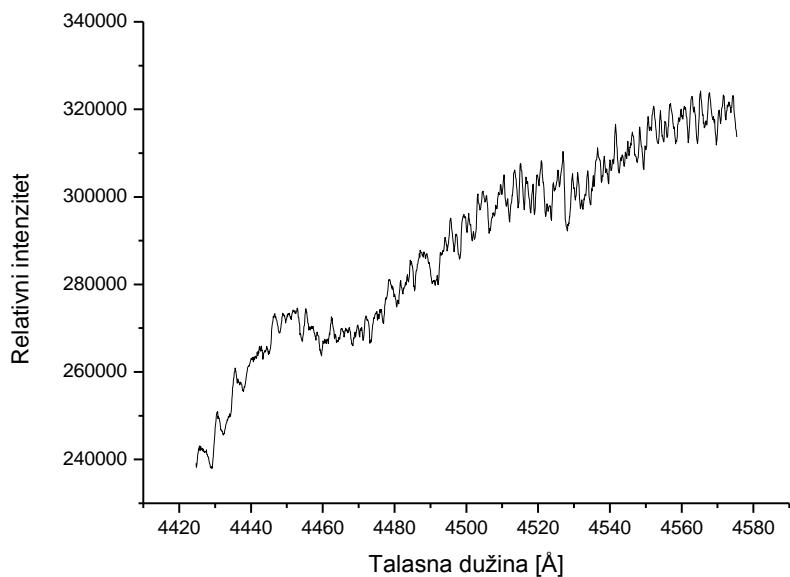
Standardna lampa sa volframskom trakom, korišćena u ovom radu, kalibrirana je u laboratoriji za plazma spektroskopiju američkog Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST) pomoću standardne lampe istog tipa i koristi se kao sekundarni standard.

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 tog mesta. Ovo znači da od jačine struje koja protiče kroz volframsku traku zavisi temperatura trake, a time i intenzitet zračenja. Promena jačine struje od 1 mA pri jačini struje od 40 A prouzrokuje promenu intenziteta od približno 0.013%. Ovo ukazuje da je prilikom merenja sa standardnom lampom potrebno koristiti visoko stabilan izvor struje. Zato kao izvor struje koristi se jednosmerni stabilisani izvor, posebno konstruisan za ovakve namene. Jačina struje se meri ampermetrom.

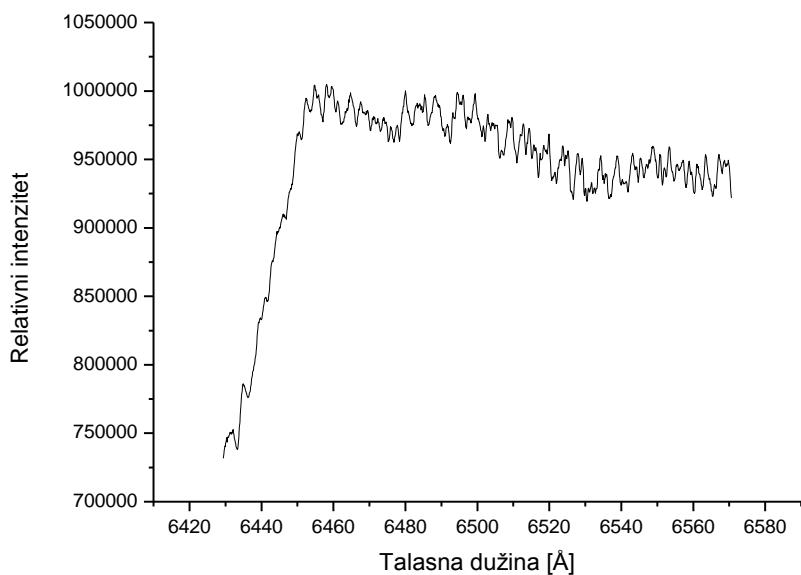
Prilikom uključenja standardne lampe u kolo struje treba početi sa jačinom struje sa korakom ne većim od 5 A i nakon svakih 5 min povećavati jačinu struje sa korakom od 5 A da bi se izbeglo veliko termičko naprezanje trake. Nakon dostignute jačine struje od 30 A treba sačekati oko 30 min da se temperatura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

Tokom merenja standardna lampa se postavlja tako da kvarcni prozor na staklenom balonu bude okrenut prema otvoru monohromatora. Ceo optički sistem se koristi na isti način kako će se i koristiti u budućim pravim eksperimentima. Pomoću step motora podešen je položaj difrakcione rešetke tako da kamera snima opseg talasnih dužina gde se detektuje najveći intenzitet zračenja lampe. Potom se kamera setuje tako da maksimalni signal bude visine od oko 80 % maksimalnog signala gde je još uvek linearan odziv na intenzitet. Na taj način se postiže da se bez menjanja vremena ekspozicije može pravilno snimiti ceo opseg talasnih dužina od interesa. Na ovaj način je određeno setovanje kamere: napon na MCP-u (MCP gain) 900 V, CCD gain 10 dB, vreme ekspozicije 600 μ s.

Posle ovih podešavanja, difrakciona rešetka se okreće na položaj od kojeg se želi meriti spektar. U ovom slučaju je meren kontinualni spektar standardne lampe od 3000 Å do 8000 Å u koracima od 100 Å, tako da se snimljeni profili preklapaju. Za svaki položaj rešetke kamera obuhvata opseg od oko 130 Å a koji je snimljen u 1360 tačaka. Iz položaja rešetke se može raspodela intenziteta po pikselima lako prebaciti u raspodelu intenziteta po talasnim dužinama. Dva tipična snimljena spektra u različitim spektralnim regionima su prikazani na Slici 18a. i 18b.



Slika 18a. Snimljeni spektar standardne lampe u spektralnom opsegu oko 4500 Å.



Slika 18b. Snimljeni spektar standardne lampe u spektralnom opsegu oko 6500 Å.

Već je rečeno da je potrebno raspodelu intenziteta po pikselima preračunati u raspodelu intenziteta po talasnim dužinama. Tačnije, za svaki položaj rešetke treba položaj svakog piksela preračunati u talasnu dužinu. Intenzitet očitan na datom pikselu se zadržava bez korekcija. Preračunavanje položaja piksela u talasnu dužinu se vrši pomoću jednačine:

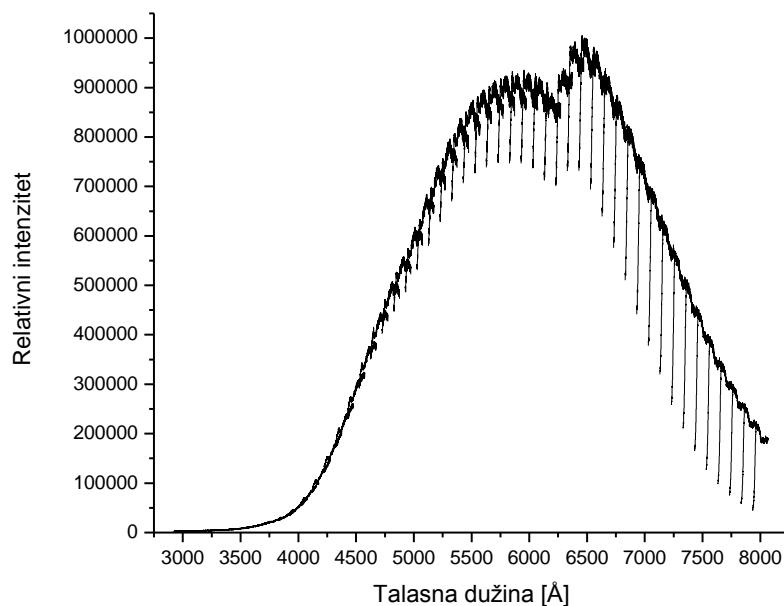
$$\lambda = (x_i - 680)P + A$$

gde je λ talasna dužina, x_i je horizontalna pozicija i-tog piksela, P je parametar koji daje vrednost položaja jednog piksela izraženog u talasnim dužinama pri datom položaju rešetke, a A je položaj rešetke očitan sa monohromatora. Vrednosti parametra P za različite talasne dužine su date u Tabeli 3.

λ [Å]	Parametar P Å/pikselu						
3000	0.11467	4300	0.11146	5600	0.10733	6900	0.1023
3100	0.11446	4400	0.11117	5700	0.10698	7000	0.10187
3200	0.11424	4500	0.11088	5800	0.10662	7100	0.10144
3300	0.11401	4600	0.11059	5900	0.10625	7200	0.101
3400	0.11378	4700	0.11029	6000	0.10588	7300	0.10056
3500	0.11354	4800	0.10998	6100	0.1055	7400	0.10011
3600	0.1133	4900	0.10967	6200	0.10512	7500	0.09966
3700	0.11305	5000	0.10935	6300	0.10473	7600	0.0992
3800	0.1128	5100	0.10903	6400	0.10434	7700	0.09874
3900	0.11254	5200	0.1087	6500	0.10394	7800	0.09827
4000	0.11228	5300	0.10837	6600	0.10354	7900	0.0978
4100	0.11201	5400	0.10803	6700	0.10313	8000	0.09732
4200	0.11174	5500	0.10768	6800	0.10272		

Tabela 3. Vrednosti parametara P za različite regije spektra.

Nakon gore opisanog preračunavanja dobijen je niz krivih koje su prikazane na Slici 19. Slika 19. prema tome predstavlja spektar kalibracione lampe koji je snimljen iz delova i to za opseg od 3000 Å do 8000 Å.



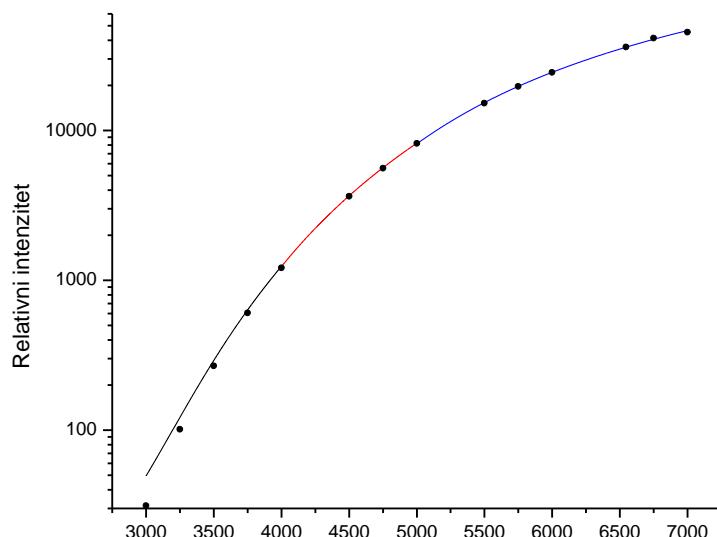
Slika 19. Snimljeni spektar standardne lampe od 3000 Å do 8000 Å.

Za određivanje osetljivosti je potrebno i poznavanje kalibracionog spektra lampe koji je dobijen u spomenutoj laboratoriji u NIST-u. Kalibracioni spektar se dobija fitovanjem tačaka snimljenih u NISTovoj laboratoriji, a koje su date u Tabeli 4:

Talasna dužina [Å]	Log intenzitet
2500	1.026
2600	2.409
2700	5.112
2800	10.37
2900	18.41
3000	31.31
3250	101
3500	267.7
3750	606.1
4000	1208
4500	3625
4750	5594
5000	8173
5500	15190
5750	19620
6000	24370
6546	36070
6750	41260
7000	45280
7500	58530
8000	68850

Tabela 4. Karakteristika standardne lampe snimljena u NIST-u

Fitovanje je urađeno polinomom petog stepena. Radi dobijanja boljeg fita, fitovanje je posebno vršeno u tri spektralna regiona, tj. od 2500 - 4500Å, od 3750 - 5500Å, od 4500 - 8000Å. Rezultati fitovanja za sva tri regiona su prikazana na Slici 20.



Slika 20. Kalibraciona kriva standardne lampe

Dobijeni polinomi za odgovarajuće opsege talasnih dužina su:

Region 2500 - 4500Å:

$$F_1 = 21405.98379 - 33.70959 * x + 0.0206 * x^2 - 5.99765 * 10^{-6} * x^3 + 8.01127 * 10^{-10} * x^4 - 3.53192 * 10^{-14} * x^5$$

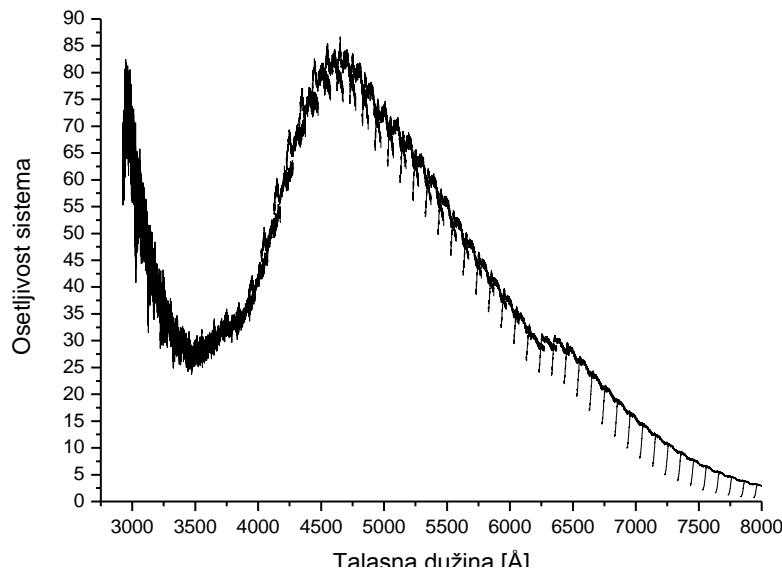
Region 3750 - 5500Å:

$$F_2 = 443867.5428 - 509.33596 * x + 0.23497 * x^2 - 5.44207 * 10^{-5} * x^3 + 6.29252 * 10^{-9} * x^4 - 2.85907 * 10^{-13} * x^5$$

Region 4500 - 8000Å:

$$F_3 = 875873.67143 - 694.87853 * x + 0.2183 * x^2 - 3.44758 * 10^{-5} * x^3 + 2.79237 * 10^{-9} * x^4 - 9.17047 * 10^{-14} * x^5$$

Deljenjem snimljenih intenziteta sa intenzitetima kalibracionog spektra, na odgovarajućim talasnim dužinama, dobija se osetljivost sistema. Dobijena osetljivost sistema u opsegu od 3000 Å do 8000 Å je prikazana na Slici 21.



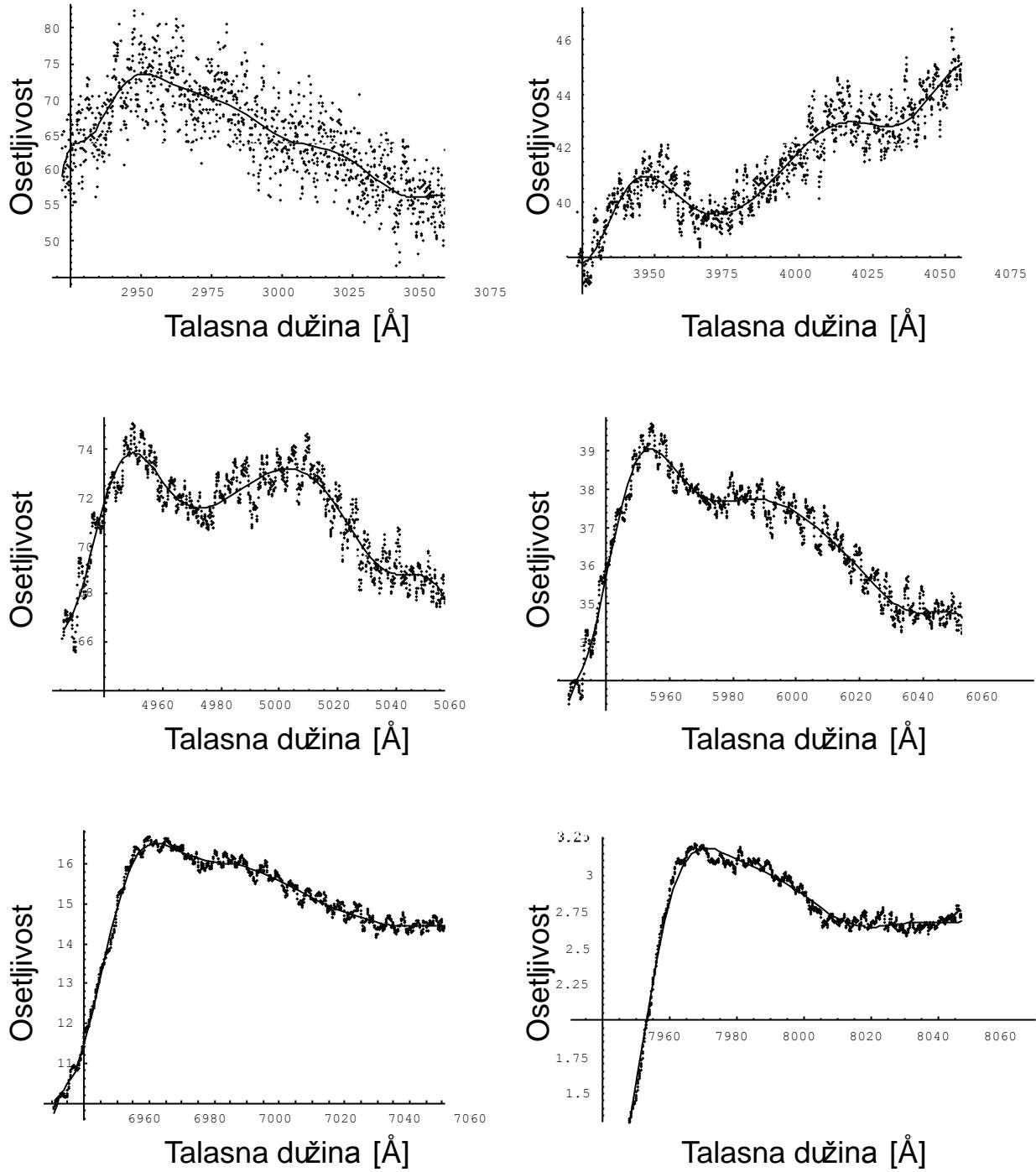
Slika 21. Osetljivost sistema u opsegu od 3000 Å do 8000 Å.

Osetljivost prikazana na Slici 21., predstavlja relativnu osetljivost mernog sistema.

Sa grafika se vidi da se osetljivost sistema menja sa talasnom dužinom i da je najosetljivije između 4500 Å i 5000 Å. Takođe, uzimajući u obzir karakteristike kamere, može se videti da osetljivost neočekivano raste u oblasti između 3500 Å i 3000 Å. To samo znači da kad se rešetka postavi u nulti položaj, odnosno u ravan koja je normalna na pravac zračenja koje pada na ulaznu pukotinu monohromatora, počinje da deluje kao ogledalo odnosno podjednako reflektuje zračenje svih talasnih dužina. Odavde se može zaključiti da je ovaj sistem pogodan za snimanje samo pri talasnim dužinama većim od 3500 Å.

Već je rečeno da se o osetljivosti mora voditi računa odnosno da se posle snimanja spektara mora izvršiti i korekcija na osetljivost. To se vrši tako što se snimljeni intenziteti dele sa

osetljivošću na odgovarajućim talasnim dužinama. Iz tog razloga je neophodno poznavanje osetljivosti sistema.



Slika 22. Osetljivosti za položaje rešetke na 3000 Å, 4000 Å, 5000 Å, 6000 Å, 7000 Å i 8000 Å.

S obzirom da je spektar kalibracione lampe snimljen iz puno delova (pri različitim položajima difrakcione rešetke kojih je bilo 51), potrebno je za svaki pojedinačni deo spektra odnosno za svaki položaj rešetke odrediti osetljivost što je i urađeno. Sada je još neophodno da se svih 51 „parčadi“ matematički opiše. Za matematički opis osetljivosti u ovim uskim

intervalima talasnih dužina je odlučeno da se koriste polinomi dvanaestog stepena. Naime, svaki interval talasnih dužina je preslikan u interval $(-1,1)$ pa je urađeno fitovanje polinomom dvanaestog stepena. Potom je dati fit polinom prebačen u prostor talasnih dužina. Tipične zavisnosti osetljivosti u različitim talasnim opsezima i njihovi fitovi su prikazani na Slici 22. Na ovoj slici je tačkama predstavljena izmerena osetljivost dok su punim linijama predstavljeni polinomi dobijeni fitovanjem.

Fitovanjem dobijeni polinomi za određeni položaj rešetke su prikazani u Tabeli 5.

Položaj rešetke	Polinomi za dati položaj rešetke (gde je x talasna dužina u angstremima)
3000	$64.6434 - 0.198235 (-3000.06 + x) + 0.00657547 (-3000.06 + x)^2 + 0.0000882343 (-3000.06 + x)^3 - 0.0000124536 (-3000.06 + x)^4 - 1.32345 \times 10^{-7} (-3000.06 + x)^5 + 8.75622 \times 10^{-9} (-3000.06 + x)^6 + 6.7617 \times 10^{-11} (-3000.06 + x)^7 - 2.8099 \times 10^{-12} (-3000.06 + x)^8 - 1.30464 \times 10^{-14} (-3000.06 + x)^9 + 4.10197 \times 10^{-16} (-3000.06 + x)^{10} + 8.57122 \times 10^{-19} (-3000.06 + x)^{11} - 2.23037 \times 10^{-20} (-3000.06 + x)^{12}$
3100	$51.0842 - 0.151039 (-3100.06 + x) - 0.00394349 (-3100.06 + x)^2 - 0.0000547169 (-3100.06 + x)^3 + 3.81852 \times 10^{-6} (-3100.06 + x)^4 + 6.09413 \times 10^{-8} (-3100.06 + x)^5 - 1.20165 \times 10^{-9} (-3100.06 + x)^6 - 2.22231 \times 10^{-11} (-3100.06 + x)^7 + 8.91415 \times 10^{-14} (-3100.06 + x)^8 + 3.97196 \times 10^{-15} (-3100.06 + x)^9 + 8.37462 \times 10^{-18} (-3100.06 + x)^{10} - 2.74344 \times 10^{-19} (-3100.06 + x)^{11} - 8.68744 \times 10^{-22} (-3100.06 + x)^{12}$
3200	$39.9284 - 0.102541 (-3200.06 + x) - 0.00173967 (-3200.06 + x)^2 - 0.0000130296 (-3200.06 + x)^3 + 6.65139 \times 10^{-7} (-3200.06 + x)^4 + 3.10186 \times 10^{-8} (-3200.06 + x)^5 + 3.44537 \times 10^{-10} (-3200.06 + x)^6 - 1.55147 \times 10^{-11} (-3200.06 + x)^7 - 2.19044 \times 10^{-13} (-3200.06 + x)^8 + 3.14622 \times 10^{-15} (-3200.06 + x)^9 + 3.24255 \times 10^{-17} (-3200.06 + x)^{10} - 2.17498 \times 10^{-19} (-3200.06 + x)^{11} - 1.27669 \times 10^{-21} (-3200.06 + x)^{12}$
3300	$33.9441 - 0.0677253 (-3300.06 + x) - 0.00395552 (-3300.06 + x)^2 + 0.0000358451 (-3300.06 + x)^3 + 3.40502 \times 10^{-6} (-3300.06 + x)^4 - 5.24597 \times 10^{-8} (-3300.06 + x)^5 - 9.71197 \times 10^{-10} (-3300.06 + x)^6 + 2.47332 \times 10^{-11} (-3300.06 + x)^7 + 5.23437 \times 10^{-14} (-3300.06 + x)^8 - 4.43861 \times 10^{-15} (-3300.06 + x)^9 + 1.32559 \times 10^{-17} (-3300.06 + x)^{10} + 2.74323 \times 10^{-19} (-3300.06 + x)^{11} - 1.36263 \times 10^{-21} (-3300.06 + x)^{12}$
3400	$29.7752 + 0.00765538 (-3400.06 + x) - 0.00164924 (-3400.06 + x)^2 - 0.0000673403 (-3400.06 + x)^3 + 5.73497 \times 10^{-7} (-3400.06 + x)^4 + 3.80889 \times 10^{-8} (-3400.06 + x)^5 + 3.60305 \times 10^{-10} (-3400.06 + x)^6 - 1.17084 \times 10^{-11} (-3400.06 + x)^7 - 1.95725 \times 10^{-13} (-3400.06 + x)^8 + 2.044 \times 10^{-15} (-3400.06 + x)^9 + 2.67916 \times 10^{-17} (-3400.06 + x)^{10} - 1.4311 \times 10^{-19} (-3400.06 + x)^{11} - 9.64006 \times 10^{-22} (-3400.06 + x)^{12}$
3500	$27.8834 + 0.0238962 (-3500.06 + x) - 0.00340188 (-3500.06 + x)^2 + 5.30092 \times 10^{-6} (-3500.06 + x)^3 + 4.36998 \times 10^{-6} (-3500.06 + x)^4 - 5.18888 \times 10^{-8} (-3500.06 + x)^5 - 1.96707 \times 10^{-9} (-3500.06 + x)^6 + 2.92341 \times 10^{-11} (-3500.06 + x)^7 + 4.14217 \times 10^{-13} (-3500.06 + x)^8 - 5.74993 \times 10^{-15} (-3500.06 + x)^9 - 4.23611 \times 10^{-17} (-3500.06 + x)^{10} + 3.80267 \times 10^{-19} (-3500.06 + x)^{11} + 1.70982 \times 10^{-21} (-3500.06 + x)^{12}$
3600	$28.9518 + 0.0399118 (-3600.06 + x) - 0.0000399258 (-3600.06 + x)^2 - 0.0000505312 (-3600.06 + x)^3 - 1.14331 \times 10^{-6} (-3600.06 + x)^4 + 2.12127 \times 10^{-8} (-3600.06 + x)^5 + 1.52746 \times 10^{-9} (-3600.06 + x)^6 - 4.37333 \times 10^{-12} (-3600.06 + x)^7 - 6.25943 \times 10^{-13} (-3600.06 + x)^8 + 6.13335 \times 10^{-16} (-3600.06 + x)^9 + 1.03429 \times 10^{-16} (-3600.06 + x)^{10} - 4.31119 \times 10^{-20} (-3600.06 + x)^{11} - 6.06207 \times 10^{-21} (-3600.06 + x)^{12}$
3700	$31.6137 + 0.0546114 (-3700.06 + x) - 0.00120462 (-3700.06 + x)^2 - 0.0000488157 (-3700.06 + x)^3 + 7.84308 \times 10^{-7} (-3700.06 + x)^4 + 1.66959 \times 10^{-8} (-3700.06 + x)^5 + 9.19033 \times 10^{-11} (-3700.06 + x)^6 - 2.27021 \times 10^{-12} (-3700.06 + x)^7 - 1.12138 \times 10^{-13} (-3700.06 + x)^8 + 1.762 \times 10^{-16} (-3700.06 + x)^9 + 1.72612 \times 10^{-17} (-3700.06 + x)^{10} - 1.06195 \times 10^{-20} (-3700.06 + x)^{11} - 6.43903 \times 10^{-22} (-3700.06 + x)^{12}$
3800	$32.9733 + 0.0656212 (-3800.06 + x) - 0.000520039 (-3800.06 + x)^2 - 0.000130413 (-3800.06 + x)^3 - 8.20801 \times 10^{-7} (-3800.06 + x)^4 + 8.40111 \times 10^{-8} (-3800.06 + x)^5 + 1.43736 \times 10^{-9} (-3800.06 + x)^6 - 2.64838 \times 10^{-11} (-3800.06 + x)^7 - 6.04919 \times 10^{-13} (-3800.06 + x)^8 + 4.15978 \times 10^{-15} (-3800.06 + x)^9 + 1.0038 \times 10^{-16} (-3800.06 + x)^{10} - 2.54083 \times 10^{-19} (-3800.06 + x)^{11} - 5.88759 \times 10^{-21} (-3800.06 + x)^{12}$
3900	$35.5809 + 0.103181 (-3900.06 + x) - 0.000824283 (-3900.06 + x)^2 - 0.00015989 (-3900.06 + x)^3 - 5.15265 \times 10^{-7} (-3900.06 + x)^4 + 1.15168 \times 10^{-7} (-3900.06 + x)^5 + 1.19492 \times 10^{-9} (-3900.06 + x)^6 - 4.00005 \times 10^{-11} (-3900.06 + x)^7 - 4.74641 \times 10^{-13} (-3900.06 + x)^8 + 6.71648 \times 10^{-15} (-3900.06 + x)^9 + 7.08275 \times 10^{-17} (-3900.06 + x)^{10} - 4.29927 \times 10^{-19} (-3900.06 + x)^{11} - 3.62806 \times 10^{-21} (-3900.06 + x)^{12}$

4000	$41.897 + 0.113422 (-4000.06 + x) - 0.00135447 (-4000.06 + x)^2 - 0.000109864 (-4000.06 + x)^3 + 3.80235 \times 10^{-8} (-4000.06 + x)^4 + 6.48027 \times 10^{-8} (-4000.06 + x)^5 + 1.09795 \times 10^{-9} (-4000.06 + x)^6 - 1.99048 \times 10^{-11} (-4000.06 + x)^7 - 5.32547 \times 10^{-13} (-4000.06 + x)^8 + 3.1623 \times 10^{-15} (-4000.06 + x)^9 + 9.15759 \times 10^{-17} (-4000.06 + x)^{10} - 1.98226 \times 10^{-19} (-4000.06 + x)^{11} - 5.4196 \times 10^{-21} (-4000.06 + x)^{12}$
4100	$50.152 + 0.100355 (-4100.06 + x) - 0.00188903 (-4100.06 + x)^2 - 0.0000586254 (-4100.06 + x)^3 + 4.21749 \times 10^{-7} (-4100.06 + x)^4 + 1.00529 \times 10^{-8} (-4100.06 + x)^5 + 1.07754 \times 10^{-9} (-4100.06 + x)^6 + 2.51802 \times 10^{-12} (-4100.06 + x)^7 - 5.75955 \times 10^{-13} (-4100.06 + x)^8 - 6.78703 \times 10^{-16} (-4100.06 + x)^9 + 1.02574 \times 10^{-16} (-4100.06 + x)^{10} + 3.43889 \times 10^{-20} (-4100.06 + x)^{11} - 6.18045 \times 10^{-21} (-4100.06 + x)^{12}$
4200	$59.4462 + 0.119034 (-4200.06 + x) - 0.00278952 (-4200.06 + x)^2 - 0.000102756 (-4200.06 + x)^3 + 4.87774 \times 10^{-7} (-4200.06 + x)^4 + 4.13093 \times 10^{-8} (-4200.06 + x)^5 + 1.63498 \times 10^{-9} (-4200.06 + x)^6 - 8.51474 \times 10^{-12} (-4200.06 + x)^7 - 8.70015 \times 10^{-13} (-4200.06 + x)^8 + 1.15557 \times 10^{-15} (-4200.06 + x)^9 + 1.57343 \times 10^{-16} (-4200.06 + x)^{10} - 7.79321 \times 10^{-20} (-4200.06 + x)^{11} - 9.68339 \times 10^{-21} (-4200.06 + x)^{12}$
4300	$67.9728 + 0.0949943 (-4300.06 + x) - 0.00208693 (-4300.06 + x)^2 - 0.0000852998 (-4300.06 + x)^3 - 8.46822 \times 10^{-7} (-4300.06 + x)^4 + 3.66355 \times 10^{-8} (-4300.06 + x)^5 + 2.49048 \times 10^{-9} (-4300.06 + x)^6 - 9.90142 \times 10^{-12} (-4300.06 + x)^7 - 1.1063 \times 10^{-12} (-4300.06 + x)^8 + 1.83676 \times 10^{-15} (-4300.06 + x)^9 + 1.86011 \times 10^{-16} (-4300.06 + x)^{10} - 1.44687 \times 10^{-19} (-4300.06 + x)^{11} - 1.09311 \times 10^{-20} (-4300.06 + x)^{12}$
4400	$75.0754 + 0.0842799 (-4400.06 + x) - 0.00350785 (-4400.06 + x)^2 - 0.000095747 (-4400.06 + x)^3 - 2.85448 \times 10^{-7} (-4400.06 + x)^4 + 3.77598 \times 10^{-8} (-4400.06 + x)^5 + 2.76773 \times 10^{-9} (-4400.06 + x)^6 - 8.39248 \times 10^{-12} (-4400.06 + x)^7 - 1.31805 \times 10^{-12} (-4400.06 + x)^8 + 1.33027 \times 10^{-15} (-4400.06 + x)^9 + 2.28287 \times 10^{-16} (-4400.06 + x)^{10} - 9.96686 \times 10^{-20} (-4400.06 + x)^{11} - 1.36678 \times 10^{-20} (-4400.06 + x)^{12}$
4500	$80.1407 + 0.0408889 (-4500.06 + x) - 0.00286674 (-4500.06 + x)^2 - 0.0000541643 (-4500.06 + x)^3 - 1.54825 \times 10^{-6} (-4500.06 + x)^4 + 1.44434 \times 10^{-8} (-4500.06 + x)^5 + 3.57898 \times 10^{-9} (-4500.06 + x)^6 - 3.66079 \times 10^{-12} (-4500.06 + x)^7 - 1.58314 \times 10^{-12} (-4500.06 + x)^8 + 1.12038 \times 10^{-15} (-4500.06 + x)^9 + 2.70599 \times 10^{-16} (-4500.06 + x)^{10} - 1.17712 \times 10^{-19} (-4500.06 + x)^{11} - 1.62644 \times 10^{-20} (-4500.06 + x)^{12}$
4600	$82.5733 + 0.0506411 (-4600.06 + x) - 0.00459688 (-4600.06 + x)^2 - 0.000121902 (-4600.06 + x)^3 + 1.45435 \times 10^{-6} (-4600.06 + x)^4 + 6.52466 \times 10^{-8} (-4600.06 + x)^5 + 1.39987 \times 10^{-9} (-4600.06 + x)^6 - 1.9789 \times 10^{-11} (-4600.06 + x)^7 - 8.67803 \times 10^{-13} (-4600.06 + x)^8 + 3.42594 \times 10^{-15} (-4600.06 + x)^9 + 1.61334 \times 10^{-16} (-4600.06 + x)^{10} - 2.4007 \times 10^{-19} (-4600.06 + x)^{11} - 9.94401 \times 10^{-21} (-4600.06 + x)^{12}$
4700	$82.6204 + 0.00342684 (-4700.06 + x) - 0.00203631 (-4700.06 + x)^2 - 0.0000486615 (-4700.06 + x)^3 - 3.50091 \times 10^{-6} (-4700.06 + x)^4 + 6.60611 \times 10^{-9} (-4700.06 + x)^5 + 4.72607 \times 10^{-9} (-4700.06 + x)^6 + 1.68386 \times 10^{-12} (-4700.06 + x)^7 - 1.89998 \times 10^{-12} (-4700.06 + x)^8 - 2.19429 \times 10^{-16} (-4700.06 + x)^9 + 3.11976 \times 10^{-16} (-4700.06 + x)^{10} - 6.81161 \times 10^{-21} (-4700.06 + x)^{11} - 1.8331 \times 10^{-20} (-4700.06 + x)^{12}$
4800	$80.7719 - 0.00151425 (-4800.05 + x) - 0.00365243 (-4800.05 + x)^2 - 0.0000834445 (-4800.05 + x)^3 - 1.2537 \times 10^{-6} (-4800.05 + x)^4 + 4.26065 \times 10^{-8} (-4800.05 + x)^5 + 3.43207 \times 10^{-9} (-4800.05 + x)^6 - 1.25306 \times 10^{-11} (-4800.05 + x)^7 - 1.56796 \times 10^{-12} (-4800.05 + x)^8 + 2.2481 \times 10^{-15} (-4800.05 + x)^9 + 2.73771 \times 10^{-16} (-4800.05 + x)^{10} - 1.64588 \times 10^{-19} (-4800.05 + x)^{11} - 1.67608 \times 10^{-20} (-4800.05 + x)^{12}$
4900	$76.7296 - 0.0422722 (-4900.05 + x) - 0.00341267 (-4900.05 + x)^2 - 0.0000324693 (-4900.05 + x)^3 - 7.06511 \times 10^{-7} (-4900.05 + x)^4 + 5.32475 \times 10^{-9} (-4900.05 + x)^5 + 2.69752 \times 10^{-9} (-4900.05 + x)^6 + 7.42788 \times 10^{-13} (-4900.05 + x)^7 - 1.26718 \times 10^{-12} (-4900.05 + x)^8 + 1.0815 \times 10^{-16} (-4900.05 + x)^9 + 2.22686 \times 10^{-16} (-4900.05 + x)^{10} - 3.79043 \times 10^{-20} (-4900.05 + x)^{11} - 1.36353 \times 10^{-20} (-4900.05 + x)^{12}$

5000	$73.1878 + 0.0253553 (-5000.05 + x) - 0.00398981 (-5000.05 + x)^2 - 0.000105998 (-5000.05 + x)^3 - 1.47742 \times 10^{-7} (-5000.05 + x)^4 + 6.03751 \times 10^{-8} (-5000.05 + x)^5 + 2.63483 \times 10^{-9} (-5000.05 + x)^6 - 1.94475 \times 10^{-11} (-5000.05 + x)^7 - 1.34648 \times 10^{-12} (-5000.05 + x)^8 + 3.58559 \times 10^{-15} (-5000.05 + x)^9 + 2.48546 \times 10^{-16} (-5000.05 + x)^{10} - 2.63422 \times 10^{-19} (-5000.05 + x)^{11} - 1.5834 \times 10^{-20} (-5000.05 + x)^{12}$
5100	$70.5217 + 0.00781249 (-5100.05 + x) - 0.00302644 (-5100.05 + x)^2 - 0.000083745 (-5100.05 + x)^3 - 1.5506 \times 10^{-6} (-5100.05 + x)^4 + 5.03588 \times 10^{-8} (-5100.05 + x)^5 + 3.40116 \times 10^{-9} (-5100.05 + x)^6 - 1.62842 \times 10^{-11} (-5100.05 + x)^7 - 1.55265 \times 10^{-12} (-5100.05 + x)^8 + 2.98793 \times 10^{-15} (-5100.05 + x)^9 + 2.75135 \times 10^{-16} (-5100.05 + x)^{10} - 2.18106 \times 10^{-19} (-5100.05 + x)^{11} - 1.71218 \times 10^{-20} (-5100.05 + x)^{12}$
5200	$67.4764 - 0.0228209 (-5200.05 + x) - 0.00308382 (-5200.05 + x)^2 - 0.0000105766 (-5200.05 + x)^3 - 1.55666 \times 10^{-6} (-5200.05 + x)^4 - 1.88579 \times 10^{-8} (-5200.05 + x)^5 + 3.54855 \times 10^{-9} (-5200.05 + x)^6 + 1.1707 \times 10^{-11} (-5200.05 + x)^7 - 1.652 \times 10^{-12} (-5200.05 + x)^8 - 1.97059 \times 10^{-15} (-5200.05 + x)^9 + 2.97472 \times 10^{-16} (-5200.05 + x)^{10} + 1.00223 \times 10^{-19} (-5200.05 + x)^{11} - 1.87725 \times 10^{-20} (-5200.05 + x)^{12}$
5300	$63.7633 - 0.0250308 (-5300.05 + x) - 0.00277791 (-5300.05 + x)^2 - 0.0000367943 (-5300.05 + x)^3 - 1.5835 \times 10^{-6} (-5300.05 + x)^4 + 8.33575 \times 10^{-9} (-5300.05 + x)^5 + 3.44955 \times 10^{-9} (-5300.05 + x)^6 + 9.75332 \times 10^{-13} (-5300.05 + x)^7 - 1.61886 \times 10^{-12} (-5300.05 + x)^8 - 1.26395 \times 10^{-16} (-5300.05 + x)^9 + 2.95466 \times 10^{-16} (-5300.05 + x)^{10} - 1.55138 \times 10^{-20} (-5300.05 + x)^{11} - 1.89395 \times 10^{-20} (-5300.05 + x)^{12}$
5400	$59.8036 - 0.0422752 (-5400.05 + x) - 0.00214448 (-5400.05 + x)^2 - 7.56842 \times 10^{-7} (-5400.05 + x)^3 - 2.40241 \times 10^{-6} (-5400.05 + x)^4 - 2.44173 \times 10^{-8} (-5400.05 + x)^5 + 4.09935 \times 10^{-9} (-5400.05 + x)^6 + 1.37324 \times 10^{-11} (-5400.05 + x)^7 - 1.882 \times 10^{-12} (-5400.05 + x)^8 - 2.31078 \times 10^{-15} (-5400.05 + x)^9 + 3.45066 \times 10^{-16} (-5400.05 + x)^{10} + 1.20854 \times 10^{-19} (-5400.05 + x)^{11} - 2.23887 \times 10^{-20} (-5400.05 + x)^{12}$
5500	$55.9255 - 0.0416719 (-5500.05 + x) - 0.00209598 (-5500.05 + x)^2 - 0.0000188878 (-5500.05 + x)^3 - 1.66924 \times 10^{-6} (-5500.05 + x)^4 - 3.82575 \times 10^{-10} (-5500.05 + x)^5 + 3.20499 \times 10^{-9} (-5500.05 + x)^6 + 2.99465 \times 10^{-12} (-5500.05 + x)^7 - 1.48147 \times 10^{-12} (-5500.05 + x)^8 - 3.15638 \times 10^{-16} (-5500.05 + x)^9 + 2.68165 \times 10^{-16} (-5500.05 + x)^{10} - 1.21186 \times 10^{-20} (-5500.05 + x)^{11} - 1.70486 \times 10^{-20} (-5500.05 + x)^{12}$
5600	$51.7824 - 0.0490382 (-5600.05 + x) - 0.00173323 (-5600.05 + x)^2 + 7.87372 \times 10^{-6} (-5600.05 + x)^3 - 2.0581 \times 10^{-6} (-5600.05 + x)^4 - 2.96542 \times 10^{-8} (-5600.05 + x)^5 + 3.53978 \times 10^{-9} (-5600.05 + x)^6 + 1.65503 \times 10^{-11} (-5600.05 + x)^7 - 1.63267 \times 10^{-12} (-5600.05 + x)^8 - 3.00407 \times 10^{-15} (-5600.05 + x)^9 + 2.99252 \times 10^{-16} (-5600.05 + x)^{10} + 1.77455 \times 10^{-19} (-5600.05 + x)^{11} - 1.93582 \times 10^{-20} (-5600.05 + x)^{12}$
5700	$47.846 - 0.055149 (-5700.05 + x) - 0.0019366 (-5700.05 + x)^2 + 0.0000294168 (-5700.05 + x)^3 - 1.36038 \times 10^{-6} (-5700.05 + x)^4 - 4.73114 \times 10^{-8} (-5700.05 + x)^5 + 3.01382 \times 10^{-9} (-5700.05 + x)^6 + 2.32486 \times 10^{-11} (-5700.05 + x)^7 - 1.47525 \times 10^{-12} (-5700.05 + x)^8 - 4.19333 \times 10^{-15} (-5700.05 + x)^9 + 2.79621 \times 10^{-16} (-5700.05 + x)^{10} + 2.57147 \times 10^{-19} (-5700.05 + x)^{11} - 1.85538 \times 10^{-20} (-5700.05 + x)^{12}$
5800	$44.1818 - 0.0515707 (-5800.05 + x) - 0.00166243 (-5800.05 + x)^2 + 0.0000181009 (-5800.05 + x)^3 - 1.35342 \times 10^{-6} (-5800.05 + x)^4 - 2.9175 \times 10^{-8} (-5800.05 + x)^5 + 2.87899 \times 10^{-9} (-5800.05 + x)^6 + 1.36607 \times 10^{-11} (-5800.05 + x)^7 - 1.4112 \times 10^{-12} (-5800.05 + x)^8 - 2.10636 \times 10^{-15} (-5800.05 + x)^9 + 2.68407 \times 10^{-16} (-5800.05 + x)^{10} + 9.62659 \times 10^{-20} (-5800.05 + x)^{11} - 1.78729 \times 10^{-20} (-5800.05 + x)^{12}$
5900	$40.6101 - 0.0486059 (-5900.05 + x) - 0.00146747 (-5900.05 + x)^2 + 0.0000192875 (-5900.05 + x)^3 - 1.17575 \times 10^{-6} (-5900.05 + x)^4 - 3.63626 \times 10^{-8} (-5900.05 + x)^5 + 2.62345 \times 10^{-9} (-5900.05 + x)^6 + 1.95545 \times 10^{-11} (-5900.05 + x)^7 - 1.31473 \times 10^{-12} (-5900.05 + x)^8 - 3.70457 \times 10^{-15} (-5900.05 + x)^9 + 2.53714 \times 10^{-16} (-5900.05 + x)^{10} + 2.35485 \times 10^{-19} (-5900.05 + x)^{11} - 1.70732 \times 10^{-20} (-5900.05 + x)^{12}$

6000	$37.3985 - 0.0503722 (-6000.05 + x) - 0.00137915 (-6000.05 + x)^2 + 0.000026082 (-6000.05 + x)^3 - 9.23054 \times 10^{-7} (-6000.05 + x)^4 - 3.82347 \times 10^{-8} (-6000.05 + x)^5 + 2.33962 \times 10^{-9} (-6000.05 + x)^6 + 1.89375 \times 10^{-11} (-6000.05 + x)^7 - 1.20378 \times 10^{-12} (-6000.05 + x)^8 - 3.38888 \times 10^{-15} (-6000.05 + x)^9 + 2.3511 \times 10^{-16} (-6000.05 + x)^{10} + 2.02778 \times 10^{-19} (-6000.05 + x)^{11} - 1.59332 \times 10^{-20} (-6000.05 + x)^{12}$
6100	$34.2422 - 0.0511828 (-6100.05 + x) - 0.00123378 (-6100.05 + x)^2 + 0.000031462 (-6100.05 + x)^3 - 9.11148 \times 10^{-7} (-6100.05 + x)^4 - 4.17351 \times 10^{-8} (-6100.05 + x)^5 + 2.21587 \times 10^{-9} (-6100.05 + x)^6 + 2.03571 \times 10^{-11} (-6100.05 + x)^7 - 1.14163 \times 10^{-12} (-6100.05 + x)^8 - 3.68419 \times 10^{-15} (-6100.05 + x)^9 + 2.23759 \times 10^{-16} (-6100.05 + x)^{10} + 2.24813 \times 10^{-19} (-6100.05 + x)^{11} - 1.52097 \times 10^{-20} (-6100.05 + x)^{12}$
6200	$30.5896 - 0.0349019 (-6200.05 + x) - 0.00110675 (-6200.05 + x)^2 + 0.0000127214 (-6200.05 + x)^3 - 1.65888 \times 10^{-7} (-6200.05 + x)^4 - 3.13045 \times 10^{-8} (-6200.05 + x)^5 + 1.56787 \times 10^{-9} (-6200.05 + x)^6 + 1.82259 \times 10^{-11} (-6200.05 + x)^7 - 9.28299 \times 10^{-13} (-6200.05 + x)^8 - 3.57261 \times 10^{-15} (-6200.05 + x)^9 + 1.93153 \times 10^{-16} (-6200.05 + x)^{10} + 2.31183 \times 10^{-19} (-6200.05 + x)^{11} - 1.36119 \times 10^{-20} (-6200.05 + x)^{12}$
6300	$30.1542 - 0.0302717 (-6300.05 + x) - 0.000843174 (-6300.05 + x)^2 + 0.0000365717 (-6300.05 + x)^3 - 1.32805 \times 10^{-6} (-6300.05 + x)^4 - 5.11836 \times 10^{-8} (-6300.05 + x)^5 + 2.51871 \times 10^{-9} (-6300.05 + x)^6 + 2.6523 \times 10^{-11} (-6300.05 + x)^7 - 1.28444 \times 10^{-12} (-6300.05 + x)^8 - 5.18731 \times 10^{-15} (-6300.05 + x)^9 + 2.5607 \times 10^{-16} (-6300.05 + x)^{10} + 3.47144 \times 10^{-19} (-6300.05 + x)^{11} - 1.783 \times 10^{-20} (-6300.05 + x)^{12}$
6400	$29.6631 - 0.0415764 (-6400.05 + x) - 0.000682802 (-6400.05 + x)^2 + 0.0000458984 (-6400.05 + x)^3 - 1.32588 \times 10^{-6} (-6400.05 + x)^4 - 5.96251 \times 10^{-8} (-6400.05 + x)^5 + 2.42637 \times 10^{-9} (-6400.05 + x)^6 + 3.04307 \times 10^{-11} (-6400.05 + x)^7 - 1.25131 \times 10^{-12} (-6400.05 + x)^8 - 5.95728 \times 10^{-15} (-6400.05 + x)^9 + 2.52368 \times 10^{-16} (-6400.05 + x)^{10} + 4.00383 \times 10^{-19} (-6400.05 + x)^{11} - 1.77556 \times 10^{-20} (-6400.05 + x)^{12}$
6500	$28.0006 - 0.0490421 (-6500.05 + x) - 0.000962572 (-6500.05 + x)^2 + 0.0000441902 (-6500.05 + x)^3 - 6.47055 \times 10^{-7} (-6500.05 + x)^4 - 5.84622 \times 10^{-8} (-6500.05 + x)^5 + 1.93614 \times 10^{-9} (-6500.05 + x)^6 + 3.10311 \times 10^{-11} (-6500.05 + x)^7 - 1.10163 \times 10^{-12} (-6500.05 + x)^8 - 6.25561 \times 10^{-15} (-6500.05 + x)^9 + 2.31831 \times 10^{-16} (-6500.05 + x)^{10} + 4.31093 \times 10^{-19} (-6500.05 + x)^{11} - 1.67177 \times 10^{-20} (-6500.05 + x)^{12}$
6600	$25.4771 - 0.051632 (-6600.05 + x) - 0.00054309 (-6600.05 + x)^2 + 0.0000482815 (-6600.05 + x)^3 - 1.12468 \times 10^{-6} (-6600.05 + x)^4 - 6.30039 \times 10^{-8} (-6600.05 + x)^5 + 2.20224 \times 10^{-9} (-6600.05 + x)^6 + 3.38551 \times 10^{-11} (-6600.05 + x)^7 - 1.19287 \times 10^{-12} (-6600.05 + x)^8 - 6.98665 \times 10^{-15} (-6600.05 + x)^9 + 2.48697 \times 10^{-16} (-6600.05 + x)^{10} + 4.95264 \times 10^{-19} (-6600.05 + x)^{11} - 1.79365 \times 10^{-20} (-6600.05 + x)^{12}$
6700	$22.7428 - 0.0473459 (-6700.05 + x) - 0.000335079 (-6700.05 + x)^2 + 0.0000408213 (-6700.05 + x)^3 - 1.24691 \times 10^{-6} (-6700.05 + x)^4 - 5.6916 \times 10^{-8} (-6700.05 + x)^5 + 2.2119 \times 10^{-9} (-6700.05 + x)^6 + 3.21528 \times 10^{-11} (-6700.05 + x)^7 - 1.1977 \times 10^{-12} (-6700.05 + x)^8 - 6.81602 \times 10^{-15} (-6700.05 + x)^9 + 2.5278 \times 10^{-16} (-6700.05 + x)^{10} + 4.91375 \times 10^{-19} (-6700.05 + x)^{11} - 1.85091 \times 10^{-20} (-6700.05 + x)^{12}$
6800	$20.2453 - 0.0461605 (-6800.05 + x) - 0.000428999 (-6800.05 + x)^2 + 0.0000432269 (-6800.05 + x)^3 - 6.99317 \times 10^{-7} (-6800.05 + x)^4 - 5.97972 \times 10^{-8} (-6800.05 + x)^5 + 1.6464 \times 10^{-9} (-6800.05 + x)^6 + 3.45056 \times 10^{-11} (-6800.05 + x)^7 - 9.77499 \times 10^{-13} (-6800.05 + x)^8 - 7.54917 \times 10^{-15} (-6800.05 + x)^9 + 2.16091 \times 10^{-16} (-6800.05 + x)^{10} + 5.64103 \times 10^{-19} (-6800.05 + x)^{11} - 1.63007 \times 10^{-20} (-6800.05 + x)^{12}$
6900	$17.8197 - 0.0436927 (-6900.05 + x) - 0.000485006 (-6900.05 + x)^2 + 0.0000441937 (-6900.05 + x)^3 - 2.51916 \times 10^{-7} (-6900.05 + x)^4 - 6.06505 \times 10^{-8} (-6900.05 + x)^5 + 1.14688 \times 10^{-9} (-6900.05 + x)^6 + 3.5258 \times 10^{-11} (-6900.05 + x)^7 - 7.70091 \times 10^{-13} (-6900.05 + x)^8 - 7.79149 \times 10^{-15} (-6900.05 + x)^9 + 1.79295 \times 10^{-16} (-6900.05 + x)^{10} + 5.87198 \times 10^{-19} (-6900.05 + x)^{11} - 1.39375 \times 10^{-20} (-6900.05 + x)^{12}$

7000	$15.5772 - 0.042579 (-7000.05 + x) - 0.000477005 (-7000.05 + x)^2 + 0.0000501949 (-7000.05 + x)^3 - 2.73987 \times 10^{-8} (-7000.05 + x)^4 - 6.83048 \times 10^{-8} (-7000.05 + x)^5 + 8.48891 \times 10^{-10} (-7000.05 + x)^6 + 3.9843 \times 10^{-11} (-7000.05 + x)^7 - 6.36921 \times 10^{-13} (-7000.05 + x)^8 - 8.98255 \times 10^{-15} (-7000.05 + x)^9 + 1.54443 \times 10^{-16} (-7000.05 + x)^{10} + 6.94918 \times 10^{-19} (-7000.05 + x)^{11} - 1.22604 \times 10^{-20} (-7000.05 + x)^{12}$
7100	$13.5132 - 0.0377223 (-7100.05 + x) - 0.000272393 (-7100.05 + x)^2 + 0.0000391845 (-7100.05 + x)^3 - 3.45098 \times 10^{-7} (-7100.05 + x)^4 - 5.45274 \times 10^{-8} (-7100.05 + x)^5 + 1.11036 \times 10^{-9} (-7100.05 + x)^6 + 3.34425 \times 10^{-11} (-7100.05 + x)^7 - 7.60936 \times 10^{-13} (-7100.05 + x)^8 - 7.7342 \times 10^{-15} (-7100.05 + x)^9 + 1.8339 \times 10^{-16} (-7100.05 + x)^{10} + 6.06673 \times 10^{-19} (-7100.05 + x)^{11} - 1.47565 \times 10^{-20} (-7100.05 + x)^{12}$
7200	$11.6269 - 0.0332317 (-7200.05 + x) - 0.000241106 (-7200.05 + x)^2 + 0.0000359401 (-7200.05 + x)^3 - 1.64666 \times 10^{-7} (-7200.05 + x)^4 - 5.35824 \times 10^{-8} (-7200.05 + x)^5 + 8.25084 \times 10^{-10} (-7200.05 + x)^6 + 3.43828 \times 10^{-11} (-7200.05 + x)^7 - 6.24452 \times 10^{-13} (-7200.05 + x)^8 - 8.22769 \times 10^{-15} (-7200.05 + x)^9 + 1.57446 \times 10^{-16} (-7200.05 + x)^{10} + 6.64793 \times 10^{-19} (-7200.05 + x)^{11} - 1.30309 \times 10^{-20} (-7200.05 + x)^{12}$
7300	$9.94645 - 0.0312651 (-7300.05 + x) - 0.000218893 (-7300.05 + x)^2 + 0.0000335473 (-7300.05 + x)^3 - 4.13874 \times 10^{-8} (-7300.05 + x)^4 - 4.83606 \times 10^{-8} (-7300.05 + x)^5 + 6.54251 \times 10^{-10} (-7300.05 + x)^6 + 3.15819 \times 10^{-11} (-7300.05 + x)^7 - 5.57265 \times 10^{-13} (-7300.05 + x)^8 - 7.68897 \times 10^{-15} (-7300.05 + x)^9 + 1.48253 \times 10^{-16} (-7300.05 + x)^{10} + 6.30778 \times 10^{-19} (-7300.05 + x)^{11} - 1.27268 \times 10^{-20} (-7300.05 + x)^{12}$
7400	$8.46619 - 0.0300758 (-7400.05 + x) - 0.000287443 (-7400.05 + x)^2 + 0.0000346007 (-7400.05 + x)^3 + 3.91424 \times 10^{-7} (-7400.05 + x)^4 - 4.91087 \times 10^{-8} (-7400.05 + x)^5 + 1.11797 \times 10^{-10} (-7400.05 + x)^6 + 3.25029 \times 10^{-11} (-7400.05 + x)^7 - 2.98597 \times 10^{-13} (-7400.05 + x)^8 - 8.08666 \times 10^{-15} (-7400.05 + x)^9 + 9.58917 \times 10^{-17} (-7400.05 + x)^{10} + 6.78056 \times 10^{-19} (-7400.05 + x)^{11} - 8.90474 \times 10^{-21} (-7400.05 + x)^{12}$
7500	$7.14406 - 0.027095 (-7500.05 + x) - 0.000197441 (-7500.05 + x)^2 + 0.0000342678 (-7500.05 + x)^3 + 2.93082 \times 10^{-7} (-7500.05 + x)^4 - 4.86207 \times 10^{-8} (-7500.05 + x)^5 + 1.28922 \times 10^{-10} (-7500.05 + x)^6 + 3.22243 \times 10^{-11} (-7500.05 + x)^7 - 2.93367 \times 10^{-13} (-7500.05 + x)^8 - 8.08855 \times 10^{-15} (-7500.05 + x)^9 + 9.53198 \times 10^{-17} (-7500.05 + x)^{10} + 6.85464 \times 10^{-19} (-7500.05 + x)^{11} - 9.00847 \times 10^{-21} (-7500.05 + x)^{12}$
7600	$5.95761 - 0.0237991 (-7600.05 + x) + 0.0000395832 (-7600.05 + x)^2 + 0.0000262604 (-7600.05 + x)^3 + 2.54775 \times 10^{-8} (-7600.05 + x)^4 - 3.87554 \times 10^{-8} (-7600.05 + x)^5 + 2.24769 \times 10^{-10} (-7600.05 + x)^6 + 2.77348 \times 10^{-11} (-7600.05 + x)^7 - 2.99709 \times 10^{-13} (-7600.05 + x)^8 - 7.29414 \times 10^{-15} (-7600.05 + x)^9 + 9.40003 \times 10^{-17} (-7600.05 + x)^{10} + 6.39289 \times 10^{-19} (-7600.05 + x)^{11} - 8.9017 \times 10^{-21} (-7600.05 + x)^{12}$
7700	$5.00805 - 0.0230766 (-7700.05 + x) - 0.000173435 (-7700.05 + x)^2 + 0.0000310106 (-7700.05 + x)^3 + 5.67885 \times 10^{-7} (-7700.05 + x)^4 - 4.25702 \times 10^{-8} (-7700.05 + x)^5 - 3.21764 \times 10^{-10} (-7700.05 + x)^6 + 2.92556 \times 10^{-11} (-7700.05 + x)^7 - 5.35258 \times 10^{-14} (-7700.05 + x)^8 - 7.6854 \times 10^{-15} (-7700.05 + x)^9 + 4.47201 \times 10^{-17} (-7700.05 + x)^{10} + 6.80324 \times 10^{-19} (-7700.05 + x)^{11} - 5.29433 \times 10^{-21} (-7700.05 + x)^{12}$
7800	$4.16238 - 0.0197228 (-7800.05 + x) - 0.000158613 (-7800.05 + x)^2 + 0.0000243354 (-7800.05 + x)^3 + 6.50249 \times 10^{-7} (-7800.05 + x)^4 - 3.41555 \times 10^{-8} (-7800.05 + x)^5 - 4.8135 \times 10^{-10} (-7800.05 + x)^6 + 2.4959 \times 10^{-11} (-7800.05 + x)^7 + 3.95967 \times 10^{-14} (-7800.05 + x)^8 - 6.81685 \times 10^{-15} (-7800.05 + x)^9 + 2.38483 \times 10^{-17} (-7800.05 + x)^{10} + 6.2089 \times 10^{-19} (-7800.05 + x)^{11} - 3.68045 \times 10^{-21} (-7800.05 + x)^{12}$
7900	$3.45481 - 0.0176572 (-7900.05 + x) - 0.000214059 (-7900.05 + x)^2 + 0.0000196937 (-7900.05 + x)^3 + 8.086 \times 10^{-7} (-7900.05 + x)^4 - 2.59499 \times 10^{-8} (-7900.05 + x)^5 - 6.69708 \times 10^{-10} (-7900.05 + x)^6 + 1.98241 \times 10^{-11} (-7900.05 + x)^7 + 1.3625 \times 10^{-13} (-7900.05 + x)^8 - 5.58101 \times 10^{-15} (-7900.05 + x)^9 + 3.50912 \times 10^{-18} (-7900.05 + x)^{10} + 5.18672 \times 10^{-19} (-7900.05 + x)^{11} - 2.20217 \times 10^{-21} (-7900.05 + x)^{12}$

8000	$2.86341 - 0.0163179 (-8000.05 + x) - 0.00015556 (-8000.05 + x)^2 + 0.0000192178 (-8000.05 + x)^3 + 7.10758 \times 10^{-7} (-8000.05 + x)^4 - 2.48486 \times 10^{-8} (-8000.05 + x)^5 - 6.44726 \times 10^{-10} (-8000.05 + x)^6 + 1.90573 \times 10^{-11} (-8000.05 + x)^7 + 1.55662 \times 10^{-13} (-8000.05 + x)^8 - 5.46884 \times 10^{-15} (-8000.05 + x)^9 - 4.75781 \times 10^{-18} (-8000.05 + x)^{10} + 5.19451 \times 10^{-19} (-8000.05 + x)^{11} - 1.36517 \times 10^{-21} (-8000.05 + x)^{12}$
------	--

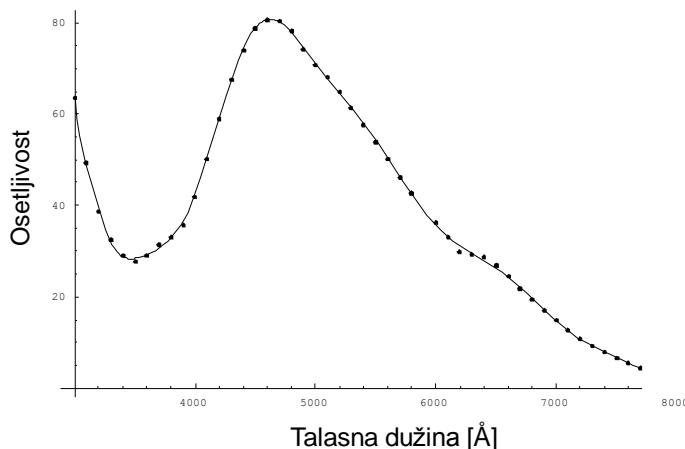
Tabela 5. Polinomi koji opisuju osetljivost sistema za određene položaje difrakcione rešetke.

Gore prikazani metod određivanja osetljivosti je precizan. Dobijeni rezultati su neophodni za sva dalja merenja jer je uvek potrebno vršiti korekciju na osetljivost. Međutim za dobijanje globalnog utiska o osetljivosti izmereni podaci se mogu obraditi na drugačiji način. Ideja ovog drugog metoda je da se dobije jedna funkcija koja prati osetljivost u merenom intervalu talasne dužine, odnosno jedna kriva. Za dobijanje ove krive potrebna je veza osetljivosti i talasne dužine. Pošto za svaki položaj rešetke postoji 1360 tačaka za osetljivost, koja se varira u ovom opsegu, uzeta je samo srednja vrednost ovih tačaka. Za njoj pripadajuću talasnu dužinu je uzet položaj difrakcione rešetke. Na ovaj način se iz svake pojedinačno snimljene raspodele osetljivosti po talasnim dužinama dobija samo jedna tačka koja predstavlja srednju vrednost. Na taj način se dobija toliko tačaka koliko je bilo i položaja difrakcione rešetke na kojim je snimana osetljivost odnosno spektar kalibracione lampe. Podaci sa srednjim vrednostima osetljivosti za odgovarajući položaj rešetke su prikazani u Tabeli 6.

Položaj rešetke	Srednja vrednost osetljivosti						
3000	63.55822	4300	67.53994	5600	50.05669	6900	16.98792
3100	49.23119	4400	73.99677	5700	46.21782	7000	14.77306
3200	38.66118	4500	78.74522	5800	42.73488	7100	12.75717
3300	32.59671	4600	80.57132	5800	42.73488	7200	10.9197
3400	29.02015	4700	80.51162	6000	36.25381	7300	9.27378
3500	27.68546	4800	78.16853	6100	33.16393	7400	7.83859
3600	29.00264	4900	74.29733	6200	29.9348	7500	6.56331
3700	31.43239	5000	70.69084	6300	29.18469	7600	5.46395
3800	33.10043	5100	67.99379	6400	28.67084	7700	4.53917
3900	35.78602	5200	64.93033	6500	27.00197	7800	3.75068
4000	41.94645	5300	61.3746	6600	24.54421	7900	3.09024
4100	50.05821	5400	57.67615	6700	21.86673	8000	2.55101
4200	59.04239	5500	53.98364	6800	19.38766		

Tabela 6. Prikaz podataka sa srednjim vrednostima osetljivosti za dati položaj rešetke.

Podaci iz Tabele 6. su radi preglednosti tačkama prikazani i na slici Slici 23.



Slika 23. Srednje vrednosti osetljivosti u zavisnosti od talasne dužine.

Radi opisivanja snimljene zavisnosti urađen je i fit Chebyshev-ljevim polinomom devetnaestog stepena:

$$y = 54.296 - 0.0372(-5500.053 + x) - 0.00001509(-5500.053 + x)^2 + 7.045 \times 10^{-9}(-5500.053 + x)^3 + 6.582 \times 10^{-11}(-5500.053 + x)^4 - 6.592 \times 10^{-15}(-5500.053 + x)^5 - 9.142 \times 10^{-17}(-5500.053 + x)^6 + 2.43 \times 10^{-20}(-5500.053 + x)^7 + 5.173 \times 10^{-23}(-5500.053 + x)^8 - 1.993 \times 10^{-26}(-5500.053 + x)^9 - 1.469 \times 10^{-29}(-5500.053 + x)^{10} + 7.578 \times 10^{-33}(-5500.053 + x)^{11} + 2.091 \times 10^{-36}(-5500.053 + x)^{12} - 1.568 \times 10^{-39}(-5500.053 + x)^{13} - 1.068 \times 10^{-43}(-5500.053 + x)^{14} + 1.799 \times 10^{-46}(-5500.053 + x)^{15} - 5.284 \times 10^{-51}(-5500.053 + x)^{16} - 1.056 \times 10^{-53}(-5500.053 + x)^{17} + 5.795 \times 10^{-58}(-5500.053 + x)^{18} + 2.378 \times 10^{-61}(-5500.053 + x)^{19}$$

gde je y srednja vrednost osetljivost u datom intervalu talasne dužine, a x je položaj difrakcione rešetke odnosno talasna dužina svetlosti koja pada na sredinu CCD čipa. Na Slici 23 je ovaj polinom prikazan linijom.

I ovaj drugi metod se takođe može koristiti za korekciju budućih eksperimentalnih podataka ali sa daleko manjom tačnošću nego prvi metod. Međutim, ovaj metod je vrlo ilustrativan ako se traži globalna osetljivost sistema.

Zaključak

U ovom radu je urađeno nekoliko veoma bitnih karakterizacija sistema za snimanje spektralnih linija a koji se postavlja u Laboratoriji za fizičku elektroniku (LFE) na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

Kao što je napred već rečeno, jedan od ciljeva ovog diplomskog rada je karakterizacija samog CCD čipa u smislu određivanja relativnog odziva pojedinih piksela pri njihovom osvetljavanju približno monohromatskom svetlošću konstantnog intenziteta. Primećeno je da odziv duž senzora nije podjednak već da postoje varijacije što je i za očekivati. Posebno velike promene su uočene na levom kraju senzora do otprilike tristotog piksela pa se preporučuje da se ovaj deo senzora ne koristi za snimanje u budućim eksperimentima.

Drugi cilj ovog rada je bio određivanje zavisnosti izmerenih intenziteta od vremena ekspozicije i određivanje granice linearnosti odziva. Kao što se i očekivalo, detektovani intenzitet se poroporcionalno povećava sa povećanjem vremena ekspozicije a potom odstupa od linearne funkcije i pokazuje znake zasićenja. Takođe, nađen je i analitički izraz za pravu koja opisuje pomenutu linearnu zavisnost. Takođe, procenjena je granica za linearnost odziva od oko 12000 odbroja po pikselu.

Kao treći veoma važni cilj ovog diplomskog rada je bilo postavljeno određivanje osetljivosti sistema u granicama između 3000 Å i 8000 Å što je i urađeno.

Literatura

1. J. Michael Hollas: Modern spectroscopy, University of reading (1998)
2. George R. Harrison, Richard C. Lord, John R. Loofbourow: Praktična spektroskopija (1962)
3. Hamamatsu Photonics k.k.: High sensitivity cameras: Principle and technology
- 4.
5. Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc.: Operating Instructions for digital intensified CCD video camera systems 4 Picos dig, 4 Quik E dig, 10bit/12bit/14bit (08/2007)
- 6.
7. Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc.: 4 Spec E the PC software for Video Spectroscopy, Operating Manual, Part I Guided Tour, (07/2006)
- 8.
9. Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc.: 4 Spec E the PC software for Video Spectroscopy, Operating Manual, Part II Menu Commands, (08/2007)
10. McPherson monochromators, Research Grade,Czerny-Turner,Spectrometers, model 2061
11. Miloš Mitrović: Kalibracija optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara, završni rad (2009)
 1. www.stanfordcomputeroptics.com
 2. www.dmphotronics.com/MCP_MCPImageIntensifiers/microchannel_plates.htm
 3. www.wikipedia.com

Biografija

Rođen sam 06.05.1982. u Senti. Pohađao sam osnovnu školu „Šamu Mihalj“ u Bačkom Petrovom Selu. Godine 2001 završio sam srednju školu „Gimnazija Bečeј“ u Bečeju. Iste godine upisao sam Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, na smeru diplomirani fizičar.

