

UNIVERZITET U NOVOM SADU PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET DEPARTMAN ZA FIZIKU



уНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ «РИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕ»

| ПРИМЉЕНО:    | 3 1. 05. 2009 |
|--------------|---------------|
| ОРГАНИЗ.ЈЕД. | БРОЈ          |
| 0603         | 9/256         |

# Kalibracija optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara

- diplomski rad -

Mentor: Dr Igor Savić

Kandidat: Miloš Mitrović

Novi Sad, 2009

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

# Sadržaj

| Uvod  | 1            |
|---|--------------|
| Glava 1: Snimanje laboratorijskih optičkih spektara                     | 4            |
| Opšti princip za snimanje emisionih spektara                            | 4            |
| Kratak opis i objašnjenje postojećeg sistema za snimanje spektara u LFE | 4            |
| Novi sistem za snimanje spektara u LFE                                  | 6            |
| Glava 2: Sistem sa ICCD kamerom   | 0            |
| Detalini opis sistema   | 0<br>8       |
| Monohromator i rešetka  | 0            |
| ICCD kamera   | <del>ر</del> |
| Pojačavač slike   | 10           |
| Pojačavač slike: Fotokatoda   | 11           |
| Pojačavač slike: Mikro kanalska ploča MCP (micro channel plate)         | 13           |
| Pojačavač slike: Fosforni ekran   | 13           |
| Sistem sočiva i CCD senzor  | 14           |
| Snimanje ICCD kamerom i neophodne korekcije                             | 15           |
| Glava 3: Rezultati i diskusija  | 17           |
| Snimanje pozadinskog svetla i šuma                                      | 17           |
| Procedura za snimanje flat-field-a                                      | 18           |
| Snimanje flat-field-a   | 23           |
| Postavljanje kamere na njen nosač                                       | 25           |
| Podešavanje vertikalnosti snimljenih linija                             | 27           |
| Podešavanje kamere u fokalnu ravan                                      | 29           |
| Zavisnost poluširine linije od položaja na senzoru                      | 30           |
| Kalibracija po talasnim dužinama  | 31           |
| Spektralni region od ~3100 Å do ~3200 Å                                 | 33           |
| Spektralni region od ~4000 Å do ~4200 Å                                 | 35           |
| Spektralni region od ~5500 Å do ~5600 Å                                 | 38           |
| Spektralni region od ~5900 Å do ~6100 Å                                 | 30           |
| Spektralni region od ~7000 Å do ~7100 Å                                 | 40           |
| Analiza parametra P   | 41           |
| Zakliučak   | 40           |
|   | 45           |

# Biografija

44 45

#### UVOD

Istorijski gledano, astronomija je počela kao čisto posmatračka nauka. U samom početku i dugo kroz istoriju je za osmatranja koristila samo vidljivi deo spektra. Tek u devetnaestom i dvadesetom veku, usled razvoja fizike i tehnologije, u astronomiji se za osmatranja koriste i ostali delovi spektra. Razvoj fotografije a pogotovo spektroskopije su doveli do prikupljanja velikog broja potpuno novih podataka o posmatranim objektima. Ovaj novi način prikupljanja podataka o astronomskim objektima transformisao je i astrofiziku koja je do tada predstavljala samo teorijsku nauku. Korišćenje konkretnih, izmerenih podataka sa posmatranih objekata ali i njihovim poređenjem sa podacima dobijenih u eksperimentima izvedenim u laboratorijama pod uslovima od astrofizičkog značaja, omogućilo je razvoj sve preciznijih astrofizičkih modela.

Namena optičkih sistema u astronomiji i astrofizici se pre svega odnosi na omogućavanje prikupljanja svetlosnih signala koji su dovoljno velike jačine da se mogu precizno zabeležiti i izmeriti. Optički sistemi u astronomiji i astrofizici se prvenstveno dele na osnovu tipa teleskopa, ali i po tipovima njihovih dodataka.

Najgrublja podela teleskopa je na refraktorske (sa sočivima kao objektivima) i reflektorske (ogledalima kao objektivima). Refraktorski teleskopi se dalje mogu podeliti na Galilejev, Keplerov, ahromatski i apohromatski. Nadalje, reflektorski telsekopi se dele na podtipove: Njutnov, Šmit-Njutnov, Kasagrenov, Riči-Kretjenov, Dal-Kirkamov, Gregorijev, Heršelov, Šifšpiglerov, Jolo, Nejsmitov i Kudreov.

Na bilo koji od ovi tipova teleskopa se mogu montirati različiti dodaci u zavisnosti od svrhe najčešće su to neke varijacije fotoaparata, kamere ili spektrografa. U poslednje vreme razvojem digitalne tehnike sve se češće koriste DSLR aparati, CCD kamere i moderne verzije spektrografa.

U astrofizici se spektroskopskim merenjima dobijaju najznačajniji podaci o posmatranom objektu. Analizom spektroskopski dobijenih podataka prvenstveno se utvrđuje hemijski sastav posmatranog objekta. Pored toga, mogu se i odrediti i parametri stanja u kojem se objekat nalazi (temperatura, pritisak, nivo jonizacije, itd.). Iz ovako, osmatrački dobijenih podataka dobija se predstava o tome kakvi se procesi odvijaju na ili u posmatranom objektu što onda pomaže u otkrivanju mehanizama koji ovakve procese prouzrokuju. Cilj je



naravno konstruisanje što preciznijeg modela posmatranog objekta a koji služi za predviđanja budućih događaja. Daljim posmatranjima se utvrđuje da li je ustanovljeni model zadovoljavajući ili ne, ali se i određuju dalje korekcije modela.

Prva i osnovna stvar u spektralnoj analizi u astrofizici je indentifikacija izvora datog spektra ali i identifikacija spektralnih linija. Identifikacija spektralnih linija se izvodi poređenjem sa laboratorijski dobijenim spektrima. Ogroman deo ukupne materije u svemiru je u stanju plazme i jonizovanog gasa pa je potpuno jasna neophodnost laboratorijskog proučavanja ovakvih stanja pod uslovima što približnijim onim astrofizičkim, a s ciljem razumevanja astrofizičkih plazmi.

Proučavanjem jonizovanog gasa i plazme i procesa koji se u njima odvijaju dolazi se do saznanja o Vasioni u kojoj živimo ali i do mnogih saznanja o mogućnostima praktične primene pre svega u razvoju novih tehnologija.

Tehnologije zasnovane na plazmi danas imaju veoma široku primenu, od na primer proizvodnje poluprovodničkih komponenti pa sve do proizvodnje površinski tretiranih specijalnih stakala. Za plazmu se vezuje i dobijanje čiste energije, a pod tim se podrazumevaju fuzione plazme gde se procesom fuzije lakih elemenata stvaraju teži elementi uz oslobađanje velike količine energije. To je principski gledano isti mehanizam stvaranja energije kao onaj na zvezdama. Ovakva primena plazme u energetici još uvek nije ostvarljiva zbog nekih nerešenih tehničkih problema u izvođenju kontrolisanog fuzionog procesa, a najveći problem predstavlja način čuvanja plazme u tako ekstremnom stanju u zemaljskim uslovima.

Iz napred iznetih činjenica, vidi se da je laboratorijsko proučavanje jonizovanih gasova i plazme veoma bitno, kako sa astrofizičkog tako i sa stanovišta fundamentalne nauke ali i raznolikih praktičnih primena. Stoga se Laboratorija za fizičku elektroniku (LFE) Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu i bavi proučavanjem plazme. Preciznije rečeno, ova laboratojia se bavi spektroskopijom plazme, odnosno merenjem parametara spektralnih linija emitovanih iz plazme. Kao izvori plazme u ovoj laboratoriji se koriste pre svega zidom stabilisani luk (koji može raditi u kontinualnom i impulsnom režimu) i udarna T-cev (koja je impulsni izvor plazme). Ciljevi istraživanja jesu dijagnostika plazme (određivanje uslova koji vladaju u plazmi) i objašnjavanje raznovrsnih procesa koji se odvijaju u plazmi (pre svega izučavanje zračenja plazme).

Cilj ovog rada je da se uradi deo poslova vezanih za sistem za snimanje spektralnih linija emitovanih iz plazme koji se trenutno pravi u Laboratoriji za fizičku elektroniku Departmana za fiziku PMF-a u Novom Sadu. Svrha novog sistema je da se ubrza proces snimanja spektralnih linija. U tu svrhu je potrebno ICCD kameru povezati sa monohromatorom, odnosno, postaviti kameru u izlaznu fokalnu ravan monohromatora. i izvršiti neke od osnovnih karakterizacija kamere i sistema.

٣

# GLAVA 1:

# **SNIMANJE LABORATORIJSKIH OPTIČKIH SPEKTARA**

#### Opšti princip za snimanje emisionih spektara

Uopšteno gledano, da bi se detektovao spektar nekog izvora zračenja, snop svetlosti izvora zračenja se propušta kroz veoma uzani prorez (pukotinu). Zatim se svetlost propuštena kroz prorez dovodi na kolimator koji ima ulogu da divergentan snop svetlosti sa pukotine učini paralelnim, u svrhu kolimatora se može koristiti sočivo ili ogledalo. Ovako načinjen paralelan snop svetlosti pada na disperzioni element koji razlaže svetlost po talasnim dužinama. Kao disperzioni elementi se mogu koristiti prizme ili neki od mnogobrojnih tipova difrakcionih rešetki. Razložena svetlost se sa disperzionog elementa potom dovodi na element za fokusiranje koji ima ulogu da fokusira snop na detektor. Kao i kod kolimatora u svrhu fokusiranja mogu se koristiti sočivo ili ogledalo. Na Slici 1. prikazana je principijelna šema ovakvog spektrografa.



Slika 1. Šematski prikaz spektrografa koji koristi prizmu kao disperzioni element. Za kolimatorski i element za fokusiranje element su upotrebljena sočiva.

# Kratak opis i objašnjenje postojećeg sistema za snimanje spektara u LFE

Merni sistem koji je do sada korišćen, šematski je prikazan je na Slici 2., a korišćen je za snimanje profila emisionih spektralnih linija emitovanih iz izvora plazme IP i za odrđivanje parametara merenih spektralnih linija. Položaj ispitivane linije u spektru određivan je na osnovu merenja položaja (talasne dužine) te iste ili neke bliske spektralne linije iz referentnog izvora RI. Ogledalo O je polupropustljivo ogledalo koje istovremeno propušta zračenje iz izvora plazme i reflektuje zračenje iz referentnog izvora. Pomoću čopera C alternativno se propušta zračenje iz jednog ili drugog izvora na ulaznu pukotinu monohromatora M. U ovom slučaju je korišćen 1m monohromator sa difrakcionom rešetkom od 1200 *nareza/mm* i inverznom linearnom disperzijom od 0,833 *nm/mm*. Položaj difrakcione rešetke (izbor talasne dužine) menja se pomoću step motora rezolucije 36000 *koraka/obrtu*, što odgovara minimalnoj promeni talasne dužine (za jedan korak) od 0.005 *nm*. Na izlazu monohromatora (posle izlazne pukotine), koji propušta samo uzan interval talasnih dužina, postavljen je fotomultiplikator FM koji pretvara svetlosne signale u električne. Signali sa fotomultiplikatora se vode na ulaz digitalnog osciloskopa DO koji poseduje mogućnost usrednjaavanja signala. Ceo proces je vođen preko personalnog racunara PR. Postavljanje odgovarajućih parametara osciloskopa i očitavanje signala sa osciloskopa kontrolisano je preko HP-IB interfejsa. Preko HP-IB interfejsa takođe je upravljano i step motorom SM za pokretanje rešetke monohromatora M. Upravljanje kontrolerom čopera KC izvedeno je preko interfejsa RS-232.



Slika 2. Šematski prikaz starog sistema za snimanje spektara.

U toku snimanja, u uskom intervalu talasnih dužina, gde se nalazi referentna linija znatno uža od posmatrane spektralne linije, pri određenom položaju difrakcione rešetke monohromatora prvo se očita intenzitet zračenja iz plazme (položaj čopera A), zatim se preko intrefejsa RS-232 pošalje signal kontroleru čopera tako da čoper zatvori prolz zračenja iz plazme, a otvori prolaz zračenju iz referentnog izvora (položaj čopera B) i očita intenzitet

zračenja iz referentnog izvora. Nakon toga menja se položaj rešetke slanjem signala na kontroler step motora KSM preko HP-IB interfejsa i zatim ponovo očita intenzitet zračenja iz plazme i referentnog izvora. Ceo postupak se ponavlja sve dok se ne završi interval talasnih dužina koji je od interesa za referentnu liniju.

U ovakvom sistemu, korišćenjem metoda usrednjavanja signala pomoću digitalnog osciloskopa, korišćenjem preciznog step motora za pomeranje difrakcione rešetke i korićenjem personalnog računara za prikupljanje podataka i vođenje eksperimenta, postiže se visoka preciznost, odnosno iznos greške je veoma mali. Sa druge strane, na ovaj način se spektralna linija odnosno spektralne linije snimaju metodom skeniranja. Pod ovim se podrzumeva da se profil linije dobija merenjem intenziteta svetlosti na tačno određenim talasnim dužinama (koji odgovaraju pojedinačnim položajima difrakcione rešetke) u nekom intervalu talasnih dužina. Dakle, ovakav metod snimanja spektralnih profila, iako veom precizan jeste izuzetno dugotrajan.

# Novi sistem za snimanje spektara u LFE

Da bi ubrazalo snimanje spektralnih profila i time otklonio glavni nedostatak gore opisanog sistema, postojeći sistem je neophodno modifikovati. Ideja je da se u stvari postojeći sistem nadogradi i to tako da se u budućnosti može koristiti i stari ali i novi sistem snimanja. Samim tme, neophodna promena se odnosi na promenu metoda detektovanja signala. Korišćeni monohromator originalno ima dva izlaza, do sada je korišćen samo jedan i to tako da je iza pukotine postavljen fotomulplikator za detekciju signala. Drugi izlaz koji je predviđen da se na njega montira držač filma nije korišćen. Ideja je da se na upravo ovaj drugi izlaz umesto filma kao detektora, postavi ICCD (intensified CCD) kamera čiji se rad kontroliše pomoću personalnog računara PR i posebnog softvera. Tada se izgled novog sistem može šematski prikazati kao na Slici 3.

Ovakav sistem omogućava snimanje relativno širokog intervala spektra (otprilike 10 nm) pri jednom fikisranom položaju rešetke što drastično smanjuje vreme snimanja. Takođe, iz jednog snimka je moguće dobiti i prostornu raspodelu intenziteta zračenja što do sada nije bio slučaj.



Slika 3. Šematski prikaz novog sistema za snimanje spektara.

r.

# **GLAVA 2:**

#### SISTEM SA ICCD KAMEROM

#### Detaljni opis sistema

Kao što je pomenuto u prethodnoj glavi, novi sistem za snimanje spektara se sastoji od monohromatora i ICCD kamere koja je montirana na izlaz datog monohromatora. Koristi se monohromator tipa Černi-Tarner (Czerny-Turner) dok je upotrebljeni model ICCD kamere 4 Quik Edig proizvođača STANFORD COMPUTER OPTICS. Rad same kamere se kontroliše pomoću računara i posebnog softvera.

Zračenje koje dolazi na ulaznu pukotinu monohromatora kolimiše se i usmerava na disperzionu rešetku. Pozicija rešetke se kontroliše pomoću preciznog step motora čiji jedan korak odgovara minimalnoj promeni talasne dužine od 0.005nm.

Difraktovana svetlost sa rešetke se ogledalom fokusira na izlaz monohromatora gde je montirana kamera. Svetlosni signal pri prolasku kroz ulaz kamere prvo nailazi na tzv. pojačavač slike (*the image intensifier*), koji ima ulogu da pojača ili blokira ulazni signal kamere. Ovaj deo optičkog sistema kamere moguće je kontrolisati pomoću računara i posebnog softvera, ali treba imati na umu da preveliko pojačanje ulaznog signala može trajno oštetiti CCD čip kamere.

Ovako pojačan signal se sistemom kuplovanih sočiva dovodi na CCD čip. Signal sa CCD čipa je moguće očitati na računaru i to na više različitih načina:

- signal je moguće očitati kao fotografiju

- signal je moguće očitati kao spektar intenziteta za svaki horizontalni red piksela posebno

- signal je moguće očitati kao spektar intenziteta intrgaljenh po vertikali CCD čipa

- signal je moguće očitati kao spektar intenziteta za svaki vertikalni red piksela posebno

- signal je moguće očitati i za svaki piksel posebno

Ovakvim načinom merenja moguće je u samo jednom snimku kamere očitati širok interval spektra talasnih dužina emitovanih iz određenog izvora. Promena intervala talasnih dužina koji se želi snimati vrši se pomeranjem difrakcione rešetke pomoću preciznog step motora.

#### Monohromator i rešetka

Monohromator koji se koristi u sistemu za snimanje je McPherson 2061. Ovaj monohromator je Černi-Tarner konfiguracije, sa žižnom daljinom od 1m. Kod ovog tipa monohromatora kao kolimator i element za fokusiranje koriste se konkavna ogledala. Kao disperzioni element se koristi refleksiona rešetka dimenzija  $120 \times 140 \text{ }mm$  sa 1200 nareza/mm i tačnost je 0.05nm. Talasni opseg monohromatora sa ovakvom rešetkom je od 185 nm do  $1.3 \mu$ m, a može se promeniti izborom druge rešetke. Moguće razlike uglova između ulaznog i izlaznog zraka su 0°, 90° i 180°. Korišćenjem date rešetke, reproducibilnost talasnih dužina datog monohromatora iznosi ±0.005nm, linearna disperzija je 0.833 nm/mm a talasni opseg na fokalnoj ravni je 41.5 nm. Šematski prikaz konstrukcije ovog tipa monohromatora dat je na Slici 4.



Slika 4. Šematski prikaz monohromatora tipa Černi-Tarner

Ostale tehničke pojedinosti o monohromatoru sa različitim rešetkama se mogu naći u tehničkoj dokumentaciji.

#### **ICCD** kamera

Ovaj tip kamere, u za razliku od obične CCD kamere (charge-coupled device), sadrži tzv. pojačavač slike (*image intensifier*) koji se nalazi ispred CCD čipa i ima ulogu pojačanja ulaznog signala. Ovako pojačan upadni svetlosni signal prenosi se do CCD čipa sistemom sočiva. Samo setovanje kamere kao i kontrola pojačanja ulaznog signala vrši se preko personalnog računara na kome su instalirani poseban hardver i softver koji omogućavaju povezivanje i komunikaciju sa kamerom.

Kamera je dimenzija 110 x 135 x 248 mm i teži oko 3 kg. Na Slici 5. je šematski prikazana ICCD kamera.



Slika 5. Šematski prikaz glavnih delova ICCD kamere.

#### Pojačavač slike

Pojačavač slike, pored samog CCD senzora, predstavlja glavnu komponentu ICCD kamere. Glavna funkcija pojačavača slike je umnožavanje upadnih fotona tj. pojačanje upadnog svetlosnog signala. Ovo omogućava kameri da snimi slike u uslovima ekstremno slabe osvetljenosti ili u uslovima ekstremno kratkog vremena trajanja ekspozicije (do 1.5 ns). Pojačavač slike, šematski prikazan na Slici 6., se sastoji iz tri dela:

- Fotokatoda koja pretvara upadne fotone u elektrone,
- MCP (*micro channel plate* Mikro kanalska ploča) koji povećava broj elektrona nastalih na fotokatodi,
- Fosforni ekran koji elektrone koji dolaze sa MCP-a pretvara ponovo u fotone.



**Slika 6.** Šematski prikaz pojačavača slike. A predstavlja promenljivi napon gejta koji iznosi do 200V. B predstavlja napona na MCP-u i može imati vrednost do 1000V za jednostruki MCP. C predstavlja napon za ubrzanje i on iznosi 6kV.

Na pojačavač slike su priključena tri napona. Prvi napon je napon između fotokatode i MCP-a i to je napon gejta (na Slici 6. je označen sa A). Drugi napon je napon na

MCP-u i na Slici 6. je označen sa B. Treći napon je napon između MCP-a i fosfornog ekrana (napon za ubrzavanje) i na Slici 6. je označen sa C.

Ako je napon između fotokatode i MCP-a negativan (tipična vrednost je -120 V), fotoelektroni bivaju ubrzani prema MCP-u (levi deo Slike 7.) i konačno su pojačani na izlazu pojačavača slike. Ovo znači da je kamera *gejtovana*, odnosno da je šater (zatvarač) je otvoren. Dužina vremenskog intervala kada je šater otvoren odnosno kada je kamera gejtovana u stvari predstavlja vreme ekspozicije. Otvoreni šater u stvari predstavlja mod kada je pojačavač 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 šater zatvoren odnosno kamera nije *gejtovana* (desni deo Slike 7.). U ovom slučaju na izlazu pojačavača slike nema signala.

Nije teško primetiti da je jedinstvena prednost ICCD kamera sa gejtingom u odnosu na kamere drugih vrsta je ta što se pruža mogućnost ultra brzog i kratkog "okidanja" kamere. Vremena ekspozicije od 5 ns do 10 ns danas predstavljaju standard kod ICCD kamera sa gejtingom.



Slika 7. Slika levo prikazuje stanje pojačavača slike kada je šater otvoren. Tada se na izlazu pojačavača dobija pojačan signal. Slika desno prikazuje stanje pojačavača slike kada je šater zatvoren. Tada na izlazu pojačavača nema signala.

#### Pojačavač slike: Fotokatoda

Svetlost koja pada na kameru, prvo prolazi kroz ulazni prozor. Ulazni prozor može biti izrađen od različitih materijala. Izbor materijala od koga se prozor pravi pre svega zavisi od spektralnog intervala za koji će se kamera koristiti. Cilj je da spektralni interval od interesa, ulazni prozor što manje reflektuje ili apsorbuje, odnosno da ga što je moguće više propusti. Kao standardni materijal za ulazni prozor se koristi kvarc. U slučaju za primene u UV delu spektra, uobičajeno je da se koristi MgF<sub>2</sub>. Potom upadni fotoni padaju na fotokatodu pojačavača slike ICCD kamere. Fotokatoda pretvara upadne fotone u fotoelektrone procesom foto jonizacije. Da bi se obezbedio maksimalni odnos signal-šum, spektralna osetljivost fotokatode treba da što veća u spektralnom opsegu koji se snima jer se na taj način dobija najviše fotoelektrona po upadnom fotonu. Na Slici 8. su šematski prikazani ulazni prozor i fotokatoda, a na Slici 9. je prikazan spektralni odziv fotokatoda od različitih fotomaterijala. Kod date kamere je ugrađena fotokatoda S25.







Slika 9. Spektralni odziv fotokatode od različitih materijala (4 Quik E dig, Operating Manuel, Stanford Computer Optics, Inc.).

# Pojačavač slike: Mikro kanalska ploča MCP (micro channel plate)

Uloga MCP-a je da multiplicira broj elektrona koji dolaze sa fotokatode. Mehanizam multiplikacije elektrona je šematski prikazan na Slici 10. Postoje tri vrste MCP-a jednostruki, dvostruki i trostruki. Tipična elektronska multiplikacija jednog MCP-a iznosi 1000 sekundarnih elektrona za jedan upadni electron. Kod dvostrukog MCP-a multiplikacioni faktor iznosi  $1000 \square 1000 = 10^6$ . U slučaju trostrukog MCP-a je maksimalni multiplikacioni faktor ograničen na manje od  $10^8$  usled efekta zasićenja.



Slika 10. Multiplikacija (umnožavanje) elektrona na MCP-u. Sa leve strane je prikazan jednostruki MCP a na desnoj strani dvostruki MCP.

Treba napomenuti da se upotrebom višestrukih MCP-a dobija veći signal ali da se znatno smanjuje optički kvalitet slike.

Kod korišćene kamere, pojačanje slike se kontroliše menjanjem primenjenog napona na MCP-u. Za kameru sa jednostrukim MCP-om, napon na MCP-u se može menjati između 0 i 1000 V. Tipično je da naponu od oko 300 V odgovara jedinično pojačanje. Pojačanje dalje raste sa porastom napona i menja se eksponencijalno, za faktor 10 na svakih sledećih 150 V. Na 900 V se dobija pojačanje struje od oko  $10^4$  što odgovara povećanju osvetljenosti za faktor  $10^6$ .

#### Pojačavač slike: Fosforni ekran

Fosforni ekran ima ulogu da konvertuje multiplicirane elektrone, prispele sa MCP-a, u fotone. Postoje nekoliko vrsta fosfora koji se koriste u ovu svrhu, a oni se razlikuju po emitovanom spektru i fluorescentnom vremenu života.

Tipični konverzioni faktor se nalazi između 20 i 200 fotona po elektronu, u zavisnosti od vrste fosfora i kinetičke energije elektrona tj. vrednosti napona za ubrzavanje. Da bi se povećao broj fotona emitovan u pravcu CCD senzora, zadnja strana fosfora je obložena aluminijumskim slojem koji reflektuje fotone u smeru CCD senzora, kao što je i prikazano na Slici 11.



Slika 11. Fosforni ekran koji konvertuje elektrone u fotone.

#### Sistem sočiva i CCD senzor

Fosforni ekran pojačavača slike emituje pojačanu svetlost slike objekta. Ova svetlost mora biti prenešena na CCD senzor koji je manjih dimenzija. To se onda vrši sistemom sočiva kao što je prikazano na Slici 12. Na taj način sočiva optički spajaju pojačavač slike sa senzorom pa se još i zovu kapling sočiva. Dobre strane ovakvog načina kuplovanja su što se u potpunosti očuvava optička rezolucija, distorzija slike je zanemarljiva, nema dodatne pojave saćastog efekta kao kad se kuplovanje izvodi uz pomoć sistema svetlovoda, nema optičkog vinjeting efekta mada je prirodni vinjeting efekat prisutan. Nedostatak ovakvog kuplovanja je što se bočno emitovana svetlost sa fosfornog ekrana gubi, usled razmaka između fosfornog ekrana i sočiva.





CCD senzor koji se koristi u datoj kameri je dimenzija  $6.5 \times 4.9$  mm i rezolucije  $1360 \times 1024$  piksela dok je dijametar MCP-a 25 mm

#### Snimanje ICCD kamerom i neophodne korekcije

Prilikom snimanja spektara ICCD kamerom kao rezultat se dobija digitalna slika (fotografija). Tačnije rečeno, kao rezultat se dobija intenzitet osvetljenosti svakog pojedinačnog piksela. Pridruživanjem intenziteta (osvetljenosti) poziciji piksela na CCD senzoru, formira se digitalna fotografija. Drugim rečima rečeno, dalje se može raditi sa matricom čiji svaki element sadrži informacije o horizontalnoj i vertikalnoj poziciji piksela ali i intenzitetu signala. Korišćenjem odgovarajućeg softvera, ova matrica se može očitavati na mnogo načina ali jedinstveno za sve je da se kao rezultat dobija raspored intenziteta po različitim pozicijama piksela.

Da bi se izvelo precizno snimanje kamerom, neophodno je izvršiti korekcije slike na pozadinu (*background*) i *flat-field* korekciju .

Korekcija na pozadinu-*background* je neophodna iz razloga što osim svetlosti sa snimanog izvora, na kameru pada i svetlost iz sredine u kojoj se merenje obavlja, kao i zbog postojanja šuma same ICCD kamere. Bitno je da se setovanje kamere optimizuje za snimanje pri uslovima pravog eksperimenta. Potom se izvor svetlosti isključi tako da sad samo pozadinsko zračenje pada na kameru. Snimi se fotografija koja onda kasnije služi kao fotografija za korigovanje pozadinske svetlosti. Potom se sa istim setovanjem kamere nastavlja snimanje svetlosti koja dolazi sa izvora svetlosti i od pozadine a u softveru za snimanje se setuje da vrši korekciju na pozadinu. Tom prilikom softver od očitanog intenziteta sa svakog pojedinačnog piksela oduzima odgovarajuću snimljenu vrednost intenziteta sa slike sa čisto pozadinskim svetlom.

Takođe se mora voditi računa da odziv svih piksela kamere nije jednak čak i kad se senzor homogeno osvetli. Rečeno drugim rečima, ne proizvede svaki piksel isti broj elektrona čak iako se kamera homogeno osvetli. Da bi se ovaj nedostatak otklonio, koristi se tzv. *flat-fild* korekcija. Da bi se ona izvršila neophodno je unifromno osvetliti senzor i snimiti takvu sliku. Kada se snimanje flat-field slike jednom obavi, softver kojim se kontroliše rad kamere se može setovati da kasnije sam vrši korekciju pri svakom sledećem snimanju. Pri tome flat-field slika se koristi za modifikovanje aktivne slike tako što se intenziteti pojedinačnih piksela aktivne slike množe srednjom vrednošću intenziteta piksela flat-field slike a potom dele intenzitetom odgovarajućeg piksela flat-field slike. Nadalje u tekstu će pojam flat-field biti često označavan sa ff a background sa bgr. Ovaj gore opisani metod snimanja ff slike se u principu treba izvršiti sa kompletnom eksperimentalnom postavkom svih optičkih elemenata koji čine sistem. Tek tada se može pravilno primeniti ff korekcija. Ovaj način određivanja ff korekcije se zato najčešće koristi kada se kamera sa nekim optičkim sistemom koristi.



fotografisanje nekih objekata. Ovaj način određivanja je radi same karakterizacije kamere i urađen u ovom radu. Ukoliko je potrebno da se kamera koristi u spektroskopske svrhe još je i potrebno da se izvrši i korekcija intenziteta snimljenih spektara. Naime, u zavisnosti od komponenti sveukupnog sistema, fotoni iz nekih spektralnih oblasti će dati manji a iz nekih drugih oblasti veće ukupne intenzitete signala. Zato je neophodno snimiti spektar standardne kalibracione lampe a potom poredeći ga sa njegovim poznatim spektrom izgenerisati korekcionu krivu za intenzitete.

Već je rečeno da se kao rezultat snimanja dobija raspodela intenziteta po poziciji piksela. Za snimanje spektara je međutim potrebno dobijanje raspodele intenziteta po talasnim dužinama. Prema tome, neophodno je horizontalnim koordinatama piksela pridružiti odgovarajuće vrednosti talasnih dužina odnosno, neophodno je izvršiti kalibraciju po talasnim dužinama i to posebno za svaki položaj difrakcione rešetke.

Kao što je već napomenuto u uvodu, zadatak ovog diplomskog rada je povezivanje ICCD kamere sa monohromatorom, njeno postavljanje u fokalnu ravan izlaznog otvora monohromatora, snimanje flat-field slike za flat-field korekcije i određivanje "rezolucije" (Å / piksel) u različitim spektralnim oblastima. Pojam "rezolucija" će naknadno, u daljem tekstu, biti objašnjen

3

# GLAVA 3:

#### **REZULTATI I DISKUSIJA**

U prethodnom tekstu je objašnjeno zašto je neophodno izvršiti korekciju na pozadinsku svetlost i flat-field korekciju. U daljem tekstu, daleko više pažnje je posvećeno snimanju slike za flat-field korekciju koje je komplikovanije jer je neophodno da se kamera homogeno osvetli.

#### Snimanje pozadinskog svetla i šuma

Bitno je još jednom napomenuti da se snimanje pozadinskog svetla i šuma vrši pri identičnom setovanju kamere i položaju rešetke kao i kad se kamera koristi za snimanje svetlosti izvora. Na taj način se obezbeđuje da bgr fotografija sadrži informacije o pozadinskom svetlu i ukupnom šumu kamere pri identičnim uslovima kao i kod snimanja signala sa svetlosnog izvora.

Tipični izgled bgr fotografije je prikazan na Slici 13. Pri snimanju ove fotografije korišćeno je sledeće setovanje kamere: Exp time = 50ns (vreme ekspozicije), MCP Gain = 850 V (napon na MCP), CCD Gain = 10 db (pojačanje CCD-a)



Slika 13. Tipični snimak pozadine (za detalje videti tekst iznad)

Da bi se dobio utisak o raspodeli intenziteta po pikselima fotografija sa Slike 13 se može očitati i napraviti grafik prikazan na Slici 14. Ovaj grafik je dobijen očitavanjem intenziteta između petstotog i šeststotog reda piksela i njihovim sumiranjem. Znači, intenzitet svake tačke na grafiku je rezultat sumiranja intenziteta 100 piksela koji stoje vertikalno jedan iznad drugog. Sa grafika se može primetiti da postoji karakteristična "grba" koja se proteže između prvog pa sve do tristapedestog piksela. Ovo ukazuje da ovaj deo CCD senzora ne treba koristiti kod snimanja (tačnije rečeno, može se koristiti ali očitavanje intenziteta nije sasvim korektno).



Slika 14. Raspodela intenziteta po pikselima kod tipičnog snimka pozadine (za detalje videti tekst iznad)

#### Procedura za snimanje flat-field-a

Razlog zašto se treba vršiti korekcija na flat-fild je objašnjen u prethodnoj glavi. Već je rečeno i da se pri snimanju ff slike mora snimiti površina koja je homogeno osvetljena, što približnije homogena jer idealno homegeno osvetljena površina se praktično veoma teško realizuje. Upravo je i najveći problem kod snimanja flat-fild-a pronalaženje homogenog izvora svetlosti odnosno homogeno osvetljene površine. Radi testiranja homogenosti različitih izvora svetlosti, pri izradi ovog rada, je konstruisana posebnu aparaturu za ovu namenu.

Sistem za proveru homogenosti izvora sastoji se od optičkog vlakna čiji jedan kraj ima ulogu da prikuplja svetlosni signal sa izvora čija se homogenost proverava. Na ovaj kraj fibera navučena je šuplja čelična igla koja ima ulogu da smanji ugao pod kojim svetlost ulazi u optičko vlakno. Čelična igla se nalazi fiksirana u horizontalnom položaju na pokretnom nosaču koji omogućava precizno pomeranja igle po horizontal i vertikali. Drugi kraj optičkog fibera vodi svetlosni signal na fotomultiplikator koji ima ulogu da svetlosni signal konvertuje u električni, fotomultiplikator se napaja preko stabilisanog izvora visokog napona. Ovako dobijen električni signal sa fotomultiplikatora može se voditi na digitalni voltmetar koji je povezan sa personalnim računarom zbog akvizicije podataka i upravljanja voltmetrom. Takođe je moguće signal sa fotomultiplikatora odvesti i na digitalni osciloskop i pomoću njega očitavati i prikupljati podatke o intenzitetu. Provera homogenosti nekog svetlosnog izvora uz pomoć opisane aparature vrši se tako što se izvor postavi neposredno ispred pokretnog nosača sa iglom, koja skuplja svetlosni signal sa izvora, a zatim se mere intenziteti svetlosti za različite vertikalne i horizontalne pozicije igle.

Prvi izvor čija je homogenost proverena bio je CRT kompjuterski monitor tipa LG Flatron F900P rezolucije 1024 × 768 pri frekvenciji osvežavanja od 60Hz, dok je korišćeni grafički kontroler za monitor tipa INTEL 82852/82855 GM/GMT.

Merenje je vršeno na sledeći način:

Preko cele prednje strane monitora prelepljen je neprozračni karton na kome je napravljen prorez kvadratnog oblika dimenzija  $3.5 \times 3.5$  cm, tako da svetlost emitovana sa ekrana prolazi samo kroz ovaj prorez. Ova površina je dovoljna da pokrije celu ulaznu površinu ICCD kamere. Zatim je monitor postavljen u paralelelan položaj u odnosu na nosač igle, ali tako da se igla nalazi uperena u monitor u gornjem desnom uglu proreza. Igla je nekoliko milimetara udaljena od krajne desne i gornje ivice kartonskog okvira, da bi se izbegao ivični efekat na merenje. Na monitoru je prikazana prazna stranica Microsoft Word-a i paleta boja je setovana na sledeći način: R=100, G=100, B=100. Napon kojim se napaja fotomultiplikator je bio 850V. Prva tačka u kojoj je vršeno merenje intenziteta nalazi se u gornjem desnom uglu proreza. Merenje je vršeno u  $10 \times 10$  tačaka tj. u 10 redova od po 10 horizontalnih tačaka. Rastojanje između dve tačke u redu iznosi 3 mm, a toliko iznosi i rastojanje između dva susedna reda. Za svaku od datih pozicija vršeno je 20 merenja, radi usrednjavanja. Po završetku merenja u svih 100 tačaka monitor je bio iskjučen da bi se izmerilo pozadinsko osvetljenje a u svrhu korigovanja dobijenih rezultata. Na ovaj način se otklanja uticaj svetlosti koja ne potiče sa monitora.

Nakon izvršenog merenja i obrade podataka dobijeni su rezultati prikazani na Slici 15. Na ovoj slici je prikazan detektovani intenzitet svetlosti u zavisnosti od horizontalne (h) i vertikalne (v) pozicije senzora. Tačka sa koordinatama h = 0, v = 0 predstavlja početnu tačku merenja odnosno tačku u gornjem desnom uglu kvadratnog proreza. Treba primetiti da su merenja prikazana na ovoj slici vršena upotrebom digitalnog voltmetra koji meri napon na fotomultiplikatoru. Prema tome, što je veća apsolutna vrednost inače negativnog napona, utoliko je veći i izmereni intenzitet svetlosti.



Slika 15. Izmereni intenzitet svetlosti u zavisnosti od horizontalne i vertikalne pozicije senzora. Rezultati merenja su predstavljeni simbolom o. Radi lakšeg očitavanje fluktuacija signala, simbolima  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$  su redom prikazane projekcije na v-intenzitet, h-intenzitet i h-v ravnima

Sa Slike 15. se može jasno videti da na relativno malom ispitivanom području monitora postoje dosta velike promene intenziteta svetlosti (oko 10 %), pa se stoga ne može smatrati homogenim svetlosnim izvorom.

Kao drugi potencijalni homogen svetlosni izvor ispitan je TFT monitor prenosivog računara proizvođača Fujitsu Siemens. Za proveru ovog monitor je korišćen već opisan sistem ali je za merenje napona signala sa fotomultiplikatora, umesto digitalnog voltmetra korišćen digitalni osciloskop. Boja na monitoru je setovana na sledeći način: R=250, G=250, B=250.

Pre svega, snimljena je vremenska zavisnost neusrednjene vrednosti signala i to u jednoj tački a prikazana je na Slici 16. Sa ove slike se veoma lepo vidi da se relativni intenzitet svetlosti menja u toku vremena i to periodično a to odgovara frekvenciji osvežavanja. Zaključeno je da zbog ove vremenski zavisne promene intenziteta dalja ispitivanja nisu potrebna a da se ovaj monitor ne treba uzimati kao potencijalni homogeni izvor svetlosti.



Slika 16. Vremenska zavisnost intenziteta svetlsoti snimljena u jednoj tački monitora Fujitsu Siemens računara.

Kao sledeći potencijalni homogeni svetosni izvor ispitan je TFT monitor prenosnog računara proizvođača IBM. Prvo je izvršeno merenje vremenske promene intenzitete u jednoj tački, pomoću digitalnog osciloskopa, na isti način kao i kod prethodnog monitora. Ustanovljeno je da se na ovom monitoru ne može primetiti oscilovanje signala usled osvežavanja. Prisutan je samo visokofrekventni šum. Iz tog razloga je primenjeno usrednjavanje signala pri snimanju (i pri testiranju da li je izvor homogen ali i pri snimanju ff fotografije). Pri merenju intenziteta pomoću osciloskopa primenjeno je usrednjavanje signala i to u okviru 16 semplova. Na taj način se usrednjavanjem dobija signal čiji je tipični izgled prikazan na Slici 17.



Slika 17. Vremenska zavisnost intenziteta svetlsti snimljena u jednoj tački monitora IBM računara.

Sada se iz ovako dobijenog signala, koji odgovara jednoj poziciji na ekranu, lako može naći odgovarajuća srednja vrednost i njena standardna devijacija. Nakon ovoga, testiranje ovog monitora je urađeno procedurom opisanom ranije. Naime, na svakoj poziciji senzora, merenje intenziteta je urađeno korišćenjem digitalnog osciloskopa korišćenjem usrednjavanje preko 16 semplova i naknadnim usrednjavanjem dobijenih 2400 tačaka signala.

Na Slici 18 su prikazani obrađeni rezultati merenja. Svaka tačka predstavlja usrednjenu vrednost.



Slika 18. Izmereni intenzitet svetlosti u zavisnosti od horizontalne i vertikalne pozicije senzora (monitor IBM računara). Rezultati merenja su predstavljeni simbolom o. Radi lakšeg očitavanje fluktuacija signala, simbolima ■, ^, ● su redom prikazane projekcije na v-intenzitet, h-intenzitet i h-v ravnima

Na datom grafiku može se uočiti da po vertikali merenog područja ne postoje značajne razlike u merenim intenzitetima, dok se po horizontali uočava blaga promena intenziteta.

Na Slici 19. prikazan je usrednjen intenzitet po horizontali i to samo za jednu od vertikalnih pozicija. Na slici su takođe označena standardna devijacija u merenim tačkama.

Usrednjene intenzitet na prikazanom grafiku fluktuira oko 1.5 % ali je standardna devijacija za merene pozicije oko 7% što i nije tako malo. Međutim ovaj svetlosni izvor je najhomogeniji od svih izvora koji su bili na raspolaganju pa je uzet za snimanje flat-field-a.

Nakon što je odabran najhomogeniji izvora svetlosti od raspoloživih izvora, urađeno je snimanje flat-filda-a.





#### Snimanje flat-fild-a

Flat-fild slika je snimljena tako što je monitor, koji je uzet kao homogeni izvor (tačnije rečeno, koji je bio najhomogeniji od raspoloživih izvora), postavljen ispred kamere na rastojanju od 30 cm i to tako da se optička osa kamere poklapa sa osom kvadratnog izrezanog otvora na kartonu a koji je nalepljen na monitor.

Prilikom snimanje flat-field slike (ff slike) postavljena je željena boja ekrana koristeći Microsoft Word dokument a potom je korišćen *full screen* mod. Snimanje je izvedeno za četiri različite boje ekrana, i to posebno za crvenu, zelenu, plavu i belu boju. Setovanje parametara ekrana je vršeno setovanjem RGB parametara boje. Parametri setovanja monitora za svaku boju posebno su dati u Tabeli 1. i to za dva sistema – RGB i HSL:

| Boja   |     | Parametri |     |            |     |     |  |  |  |
|--------|-----|-----------|-----|------------|-----|-----|--|--|--|
|        | R   | GB sist   | em  | HSL sistem |     |     |  |  |  |
|        | R   | R G B     |     |            | S   | L   |  |  |  |
| crvena | 255 | 0         | 0   | 0          | 255 | 128 |  |  |  |
| zelena | 0   | 255       | 0   | 85         | 255 | 128 |  |  |  |
| plava  | 0   | 0         | 255 | 170        | 255 | 128 |  |  |  |
| bela   | 255 | 255       | 255 | 170        | 0   | 255 |  |  |  |

Tabela 1. Parametri za podešavanje boje ekrana prilikom snimanja flat-field slike.

Najvažniji parametri setovanja kamere su: Exp time = 50 ns, MCP Gain = 850 V, CCD Gain = 10 dB.

Snimanje je izvedeno noću u potpunom mraku i to tako da je prvo snimljena bgr slika koja je onda korišćena za korigovanje ostalih snimljenih slika. Sama bgr slika je snimana a potom i korišćena za korekciju jer ona u sebi pored pozadinskog svetla sadrži i šum same kamere. Radi dobrog usrednjavanja, prilikom snimanja bgr slike i ff slike iskorišćeno je akumuliranje 1000 frame-ova. Stoga je onda na kraju bilo neophodno intenzitete sa svakog piksela podeliti sa brojem 1000 čime se dobija usrednjena vrednost.

Tipični izgled snimljene ff slike za beli monitor (R = 255, G = 255, B = 255) je prikazan na Slici 20. Sa slike se lepo vidi da je centralni deo slike bitno svetliji nego rubni delovi. Na slici se takođe može primetiti postojanje saćaste strukture koja potiče od MCP-a. Naime sam MCP se može zamisliti kao skup paralelnih vlakana šestougaonog preseka pa je jasno zašto je ovakva struktura vidljiva na prikazanoj slici. Međutim, u najvećem broju primena ove kamere, saćasta struktura uopšte nije vidljiva.



Slika 20. Tipična ff slika (za detalje videti tekst iznad)

Raspodela intenziteta po pikselima sa ff slika za različite boje ekrana se lako može očitati i grafički prikazati. Na Slici 21. je prikazana raspodela intenziteta koja je dobijena sumiranjem intenziteta između petstotog i šeststotog reda piksela i to očitavanjem Slike 20.



Slika 21. Raspodela intenziteta po pikselima (za detalje videti tekst iznad)

Međutim, da bi se ove zavisnosti za različite boje ekrana mogle lako uporediti, potrebno je ove raspodele normirati. Ovo poređenje je prikazano na Slici 22. Rezultati prikazani na ovoj slici su dobijeni očitavanjem intenziteta između petstotog i šeststotog reda piksela i njihovim sumiranjem. Potom je nađen minimum svake krive. Minimalna vrednost krive se potom oduzima od svake tačke krive čime se minimum krive svodi na nulu. Potom je svaka kriva integraljena i podeljena dobijenom vrednošću čime se površina ispod krive svodi na jedinicu. pa su sve četiri krive svedene na jedan od njih.



Slika 22. Raspodela intenziteta po pikselima (za detalje videti tekst iznad)

Sa slike 22 se vidi da su po obliku sve 4 krive veoma slične. Medjutim, da bi se međusobna odstupanja kvantitativno opisala, pre svega treba izabrati referentnu krivu. S obzirom da je bela boja ekrana u stvari kombinacija tri boje u RGB modelu (R = 255, G = 255, B = 255) kao referentna kriva je upravo ona izabrana. Tada se odstupanje na jednoj horizontalnoj poziciji piksela može definisati kao

$$Odstupanje_{x} = \left(\frac{I_{x}}{I_{b}} - 1\right) \cdot 100$$

gde indeks x označava određenu boju (x = r znači da je crvena boja, R = 255, G = 0, B = 0; x = g znači da je zelena boja, R = 0, G = 255, B = 0; x = b znači da je plava boja, R = 0, G = 0, B = 255; x = w znači da je bela boja, R = 255, G = 255, B = 255). Na ovaj način se odstupanje može izračunati na svakoj horizontalnoj poziciji piksela. Rezultat izračunavanja odstupanja je grafički prikazan na Slici 23. Treba napomenuti da su prilikom izračunavanja ovih odstupanja korišćene vrednosti normiranih intenziteta prikazanih na Slici 22. Sa Slike 23. je sada lako primetiti da su na najvećem delu samog CCD senzora odstupanja manja od 3 % (između stotog i hiljadustotridesetog piksela gledano po horizontali) a da izvan ovog regiona odstupanja bivaju veća. Na redovima piksela veoma blizu desne ivice senzora dostižu oko 30 % a na levoj ivici čak i do oko 75 %.



Slika 23. Raspodela odstupanja intenziteta po pikselima (za detalje videti tekst iznad)

#### Postavljanje kamere na njen nosač

Da bi optički sistem za snimanje spektara bio funkcionalan neophodno je da se kamera postavi u izlaznu fokalnu ravan monohromatora. Postavljanje kamere u fokalnu ravan monohromatora izvršeno je na način opisan u tekstu koji sledi.

Kamera se postavlja na nosač kamere koji se nalazi tik uz izlazni otvor monohromatora. Sam nosač dozvoljava precizno pomeranje kamere a šematski je prikazan na Slici 24.



Slika 24. Šematski prikaz nosača kamere koji je postavljen tik uz monohromator

Pokretni stalak se sastoji iz sledećih delova: rotacione ploče, pomične ploče i statične ploče koja se oslanja na četiri nožice. Odvrtanjem odnosno zavrtanjem nožica vrši se

promena visine nožica stalka tako da je na ovaj način moguće postavljanje statične ploče u odgovarajući horizontalni položaj ali njeno vertikalno pomeranje. Na statičnoj ploči stalka monirana je pomična ploča koju je moguće precizno pomerati duž horizontalnih pravaca A (levo-desno u odnosu na monohromator) i B (napred-nazad u odnosu na monohromator )uz pomoć preciznog sistema navoja. Rotacionu ploču koja je montirana na pomičnoj ploči stalka moguće je okretati oko svoje ose. Kamera je učvršćena na rotacionoj ploči nosača kamere. Na ovaj način je omogućeno vrlo precizno pomeranje kamere u odnosu na izlazni otvor monohromatora.

Kamera je u prvom koraku postavljena tako da se objektiv kamere nalazi naspram izlaza monohromatora i da leži približno paralelno ravni u kojoj leži izlazni otvor monohromatora. Potom su nožice nosača kamere podešene tako da kada je kamera pomerena uz monohromator, svojojom prednjom površinom (kroz koju ulazi snop svetlosti), potpuno naleže na prednju ploču monohromatora.

#### Podešavanje vertikalnosti snimljenih linija

Posle učvršivanja kamere na nosač, neophodno je još i fino podešavanje nosača sa ciljem da je spektralna linija koja se vidi kao linija na snimku bude vertikalna a ne iskošena. Ovaj korak je posebno bitan jer ako linija na snimku nije vertikalna, prilikom očitavanja raspodele intenziteta po piskelima sa snimka, dobio bi se profil spektralne linije koji je dodatno proširen usled nevertikalnosti. Ovo podešavanje je urađeno tako što je ispred ulazne pukotine monohromatora postavljena šuplja katoda kao izvor svetlosti. Kamera je u koracima pomerana od i ka monohromatoru (duž ose B na Slici 24.) tako da se na snimku dobije što je moguće uža linija što odgovara položaju kada je kamera postavljena približno u fokalnu ravan izlaza monohromatora. Kada je položaj nađen, parovi nožica na bokovima (na levoj strani odnosno desnoj strani nosača kamere) su simultano uvrtani odnosno odvrtani sve dok nije dobijeno da linija na snimku stoji vertikalno. Vertikalnost linije na snimku je dodatno proverena i očitavanjem i poređenjem profila linije na različitim redovima samog CCD senzora. Naime, u idealnom slučaju bi položaj maksimuma spektralne linije trebao biti u jednoj te istoj koloni piksela na CCD senzoru. Naravno ovi nije lako postići, posebno što sama linija na snimku nikada nije idealno prava linija već ima veoma blagu srpastu formu zbog nedostataka optičkog sistema monohromatora. Na Slici 25. je dat primer kako izgleda fotografija jedne spektralne linije. Na ovoj slici, svetla linija predstavlja samu spektralnu liniju a tamna vertikalna linija je veštački dodana radi dobijanja utiska o vertikalnosti snimljene linije i njenom obliku.



Slika 25. Snimak jedne spektralne linije posle podešavanja vertikalnosti linije. Svetla linija predstavlja samu spektralnu liniju a tamna vertikalna linija je veštački dodana radi dobijanja utiska o vertikalnosti snimljene linije i njenom obliku

Jedan od načina za kvantitativnu proveru vertikalnosti snimljene linije na fotografiji i njenog oblika je npr. očitavanjem raspodele intenziteta po pikselima i to posebno za svaki red CCD senzora i nalaženjem maksimuma. Ukoliko se ovi maksimumi onda prikažu u funkciji od horizontalne pozicije na CCD senzoru (kolona senzora) može se dobiti oblik snimljene linije. Ovakva analiza je urađena upravo za snimak prikazan na Slici 25. a raspodela je prikazana na Slici 26.





Na Slici 26. a) je prikazana raspodela intenziteta po celom senzoru a na Slici 26. b) samo jedan njen deo ali onaj od interesa. Sa ove slike se vidi nekoliko veoma bitnih stvari. Srpasta forma snimljene linije se prostire između 677. i 682. kolone senzora što znači da je linija raspoređena preko ukupno 6 kolona senzora. S obzirom da je planirano da se intenziteti spektralnih linija snimaju u maksimalno 100 piksela duž kolone i to između 500tog i 600tog

reda (znači koristeći 100 redova), znači da će linija u proseku padati preko 2 kolone piksela. Što se tiče same vertikalnosti, sa ove slike se takođe vidi da su donje i gornje tačke raspodele međusobno pomerene za 1 piksel (što znači za  $\approx 4.7 \ \mu m$ ) što je dokaz da je kamera vrlo dobro postavljena.

#### Postavljanje kamere u fokalnu ravan

Posle postavljanja kamere u položaj tako da je snimljena linija vertikalna, kameru je potrebno postaviti u fokalnu ravan monohromatora. Jedan od načina da se ovo uradi je korišćenje profila spektralnih linija. Ideja se sastoji u tome da se poluširina spektralne linije (širina spektralnog profila na polovini maksimalnog intenziteta) između ostalog menja i u zavisnosti od rastojanja kamere od izlazne fokalne ravni monohromatora. Naime, poluširina linije je minimalna kada se kamera nalazi u fokalnoj ravni a raste sa porastom rastojanja kamere od fokalne ravni.

Korišćenjem ove ideje, relativno je jednostavno postaviti kameru u fokalnu ravan. Naime, kamera se postavi na poziciju tako da leži što bliže monohromatoru (da svojim kućištem naleže na oklop monohromatora), snimi se spektralna linija i odredi njena poluširina. Potom je neophodno kameru pomerati u malim koracima od monohromatora (duž pravca B na Slici 24.) i na svakoj poziciji snimiti profil linije i očitati poluširinu. Pozicija kamere na nosaču se očitava na nonijusu nosača. Koristeći ovu proceduru dobijen je set podataka (zavisnost poluširine spektralne linije od položaja kamere) čiji je grafički prikaz dat na Slici 27. Kamera je postavljena u položaj koji odgovara minimumu funkcije prikazane na Slici 27. Potom je kamera oko ove tacke pomerana u veoma malim koracima sve dok je dobijena minimalna poluširina linije čime je i postavljena u fokalnu ravan monohromatora. U čitavoj ovoj proceduri je kao izvor svetlosti korišćena šuplja katoda a korišćena je linija neutralnog olova i to talasne dužine  $\lambda = 405.7807$  nm. Poluširina linije je određena iz fita profila spektralne linije i to korišćenjem Lorentz-ovog profila. Korišćeni Lorentzov profil je oblika

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \frac{2\mathbf{A}}{\pi} \frac{\Delta \lambda_{1/2}}{4(\lambda - \lambda_{0p})^2 \Delta \lambda_{1/2}^2}$$

gde su

I intenzitet na talasnoj dužini  $\lambda$ 

Io ofset ili intenzitet daleko van linije

 $\Delta \lambda_{1/2}$  poluširina linije – širina linije na polovini maksimalnog intenziteta

 $\lambda_{0p}$  talasna dužina koja odgovara maksimumu intenziteta

A površina profila linije

# Zavisnost poluširine linije od položaja na senzoru

Nakon što je kamera postavljena u fokalnu ravan, potrebno je izvršiti karakterizaciju sistema u smislu određivanja zavisnosti poluširine linije od položaja na samom CCD senzoru. Ovo je urađeno snimanjem profila jedne spektralne linije na različitim pozicijama CCD senzora i određivanjem njegove poluširine fitovanjem na Lorentzov profil. Ovo je urađeno na dva načina. Prvi način je bio takav da je pomeranje ljinije po CCD senzoru vršeno pomeranjem rešetke monohromatora. Drugi način je bio takav da je linija pomeranjem rešetke postavljena na sredinu senzora, i potome rešetka nije dalje pomerana već je pomerana sama kamera i to duž pravca A sa Slike 24., koristeći precizni doboš nonijusa. Pri ovoj karakterizaciji, kao izvor svetlosti je korišćena šuplja katoda a korišćena je linija neutralnog olova i to talasne dužine  $\lambda = 405.7807$  nm.



Slika 27.Vrednosti poluširine spektralne linije u zavisnosti od relativne udaljenosti kamere od izlaza monohromatora. Za detalje pogledati tekst iznad.

Na Slici 28. su prikazani rezultati ove karakterizacije (zavisnost poluširine linije od položaja na CCD senzoru) i to za slučaj kada je prilikom snimanja rađena samo bgr korekcija.

Takođe je urađeno snimanje i sa ff i bgr korekcijom a rezultati se od prethodnih samo neznatno razlikuju što ukazuje da ff korekcija samo malo utiče na poluširinu profila linije. Osim same karakterizacije (zavisnost poluširine od položaja na senzoru), sa slike se vidi veoma lepo slaganje između dva korišćena metoda (pomeranja rešetke i pomeranja kamere). Ovo ukazuje da je kamera stvarno postavljena u izlaznu fokalnu ravan monohromatora jer bi se u suprotnom ove dve krive razlikovale.



Slika 28. Vrednosti poluširine spektralne linije u zavisnosti od položaja na CCD senzoru.

Veliki porast poluširine profila linije idući od četiristotog piksela ka prvom pikselu još ukazuje i na anomaliju samog CCD senzora u ovoj oblasti koja se vidi još i na Slici 13. i Slici 14. pa nije preporučljivo koristiti ovaj deo čipa.

Da bi se dobile prave vrednosti poluširina linija a koje su izražene u nm odnosno u angstremima, neophodno je naći koliko nm odnosno angstrema vredi jedan piksel. Rezultati ova kalibracije su dati u tekstu koji sledi. Iz praktičnih razloga tehničke prirode, korišćena je veličina angstrem po pikselu.

#### Kalibracija po talasnim dužinama

Pri snimanju spektara u različitim spektralnim regionima, vrednost koliko angstrema vredi jedan piksel nije ista. Ova vrednost će u sledećem tekstu biti uslovno nazvana rezolucijom sistema, iako to strogo gledano nije. U cilju određivanja rezolucije, snimljene su spektralne linije Mo I i Ne I emitovane iz izvora šuplje katode i to u različitim spektralnim regionima (pri različitim položajima difrakcione rešetke monohromatora). Spektralne linije su identifikovane korišćenjem podataka iz baze NIST-a. Identifikovane linije su fitovane na Lorentzov profil a parametri fita su sačuvani jer su potrebni za kalibraciju.

U cilju ove karakterizacije, odnosno određivanje rezolucije, za svaki spektralni region je uveden parametar P koji daje odnos Å/piksel. Parametar P je definisan kao odnos razlike talasnih dužina dvaju poznatih linija izražene u angstremima i njihovog međusobnog rastojanja na CCD senzoru izraženog u pikselima:

$$\mathbf{P} = \left| \frac{\lambda_{02} - \lambda_{01}}{\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1}} \right|$$

gde su

 $\lambda_{01}$  tablična vrednost talasne dužine prve spektralne linije izražena u angstremima

 $\lambda_{0p1}$  očitana vrednost talasne dužine (položaja maksimuma spektralne linije na CCD senzoru) prve spektralne linije izražena u pikselima

 $\lambda_{02}$  tablična vrednost talasne dužine druge spektralne linije izražena u angstremima

 $\lambda_{0p2}$  očitana vrednost talasne dužine (položaja maksimuma spektralne linije na CCD senzoru) druge spektralne linije izražena u pikselima

U svakom spektralnom regionu je dakle neophodno snimiti najmanje dve spektralne linije da bi se parametar P mogao odrediti. U slučaju kada je snimljeno više spektralnih linija, najbolje je odrediti parametar P za sve moguće kombinacije linija a potom naći srednju vrednost.

S obzirom da su  $\lambda_{01}$  i  $\lambda_{02}$  tablične vrednosti koje se u tabelama date do na dve ili tri decimale (izraženo u angstremima), u ovom radu su radi jednostavnosti uzete kao vrednosti sa nultom greškom. Tada se greška S(p)za parametar P može izračunati kao:

$$\mathbf{S}(\mathbf{P}) = \sqrt{\left(\frac{\delta \mathbf{P}}{\delta \lambda_{0p2}}\right)^2 \cdot \mathbf{S}^2(\lambda_{0p2}) + \left(\frac{\delta \mathbf{P}}{\delta \lambda_{0p1}}\right)^2 \cdot \mathbf{S}^2(\lambda_{0p1})}$$

gde je

$$\frac{\delta P}{\delta \lambda_{0p2}} = (\lambda_{02} - \lambda_{01}) \frac{-1}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^2} = -\frac{\lambda_{02} - \lambda_{01}}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^2}$$
$$\frac{\delta P}{\delta \lambda_{0p1}} = (\lambda_{02} - \lambda_{01}) \frac{1}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^2} = \frac{\lambda_{02} - \lambda_{01}}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^2}$$

Na ovaj način se konačno dobija da je greška za parameter P:

$$S(P) = \sqrt{\frac{(\lambda_{02} - \lambda_{01})^2}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^4}} \cdot S^2(\lambda_{0p2}) + \frac{(\lambda_{02} - \lambda_{01})^2}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^4} \cdot S^2(\lambda_{0p1})$$

odnosno, posle malo sređivanja prethodnih izraza

$$S(P) = \frac{|\lambda_{02} - \lambda_{01}|}{(\lambda_{0p2} - \lambda_{0p1})^2} \sqrt{S^2(\lambda_{0p2}) + S^2(\lambda_{0p1})}$$

U prethodnim izrazima su  $S(\lambda_{0p1})$  i  $S(\lambda_{0p2})$  greške za očitane vrednosti položaja maksimuma spektralnih linija na CCD senzoru. Kao što je već ranije napomenuto, snimljene i identifikovane spektralne linije su fitovane korišćenjem Lorentzove raspodele a rezultati fitovanja za položaj maksimuma linije i njegova greška su uzeti za vrednosti  $\lambda_{0pi}$  i  $S(\lambda_{0pi})$ (i = 1, 2). Kada se odrede parametri P za sve međusobne odnose linija u jedom spektralnom regionu potrebno je izračunati njegovu srednju vrednost  $\overline{P}$ i odgovarajuću grešku. Srednja vrednost parametra P u jednom spektralnom regionu se može izračunati kao:

$$\overline{\mathbf{P}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathbf{P}_{i}}{n}$$

gde je  $P_i$  vrednost i-tog parametra P a n je ukupan broj određenih parametara u posmatranom spektralnom regionu.

Greška srednje vrednosti parametra P odnosno S(P) se može izračunati kao

$$\mathbf{S}(\mathbf{P}) = \sqrt{\left(\frac{\delta\overline{\mathbf{P}}}{\delta \mathbf{P}_{1}}\right)^{2} \cdot \mathbf{S}^{2}(\mathbf{P}_{1}) + \left(\frac{\delta\overline{\mathbf{P}}}{\delta \mathbf{P}_{2}}\right)^{2} \cdot \mathbf{S}^{2}(\mathbf{P}_{2}) + \dots + \left(\frac{\delta\overline{\mathbf{P}}}{\delta \mathbf{P}_{n}}\right)^{2} \cdot \mathbf{S}^{2}(\mathbf{P}_{n})}$$

odnosno

$$S(P) = \frac{1}{n} \sqrt{S^{2}(P_{1}) + S^{2}(P_{2}) + ... + S^{2}(P_{n})}$$

Ova kalibracija, odnosno određivanje parametra P je urađeno za 5 spektralnih regiona:

- ~3100 Å do ~3200 Å
- ~4000 Å do ~4200 Å
- ~5500 Å do ~5600 Å
- ~5900 Å do ~6100 Å
- ~7000 Å do ~7100 Å

Ovaj parametar P je posebno bitan jer poznavanjem talasne dužine jedne snimljene linije i parametra P u datom spektralnom regionu, talasnu dužinu druge snimljene spektralne linije je jednostavno odrediti. Naime, to se lako može uraditi tako što se vrednosti talasne dužine poznate linije doda ili oduzme (u zavisnosti od toga da li je spektralna linija nepoznate talasne dužine pomerena u odnosu na liniju poznate talasne dužine ka većim ili manjim talasnim dužinama) proizvod izmerenog rastojanja između linija u pikselima pomnožen sa parametrom P.

#### Spektralni region od ~3100 Å do ~3200 Å

Prilikom određivanja parametra P u ovom regionu korišćene su spektralne linije Mo I emitovane iz šuplje katode. Izvor svetlosti je postavljen ispred ulazne pukotine monohromatora, a rešetka monohromatora je postavljena na talasnu dužinu od 3130 Å. Kamerom je tada snimljen spektar koji je prikazan na Slici 29. a). Na Slici 29. b) je prikazan samo deo spektra sa Slike 29. a) i to onaj od interesa za kalibraciju. Na Slici 29. b) su simbolima  $\circ$  predstavljene izmerene vrednosti a punom linijom su prikazani fitovi spektralnih linija. Radi preglednosti, linije su numerisane. Dobijene vrednosti fit parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta\lambda_{1/2}$  kao i tablične vrednosti  $\lambda_0$  su prikazane u Tabeli 2. dok su u Tabeli 3. prikazani dobijene vrednosti parametra P za različite kombinacije linija.



Slika 29. Snimljeni spektar Mo pri položaju rešetke od 3130 Å.

| linija | $\lambda_{0p}$ (piksel) | $\Delta\lambda_{1/2}$ (piksel) | $\lambda_0$ (Å) |
|--------|-------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1°     | $496,80415 \pm 0,10746$ | $4,28092 \pm 0,21492$          | 3112,12         |
| 2      | $676,03382 \pm 0,01792$ | $3,80404 \pm 0,03585$          | 3132,59         |
| 3      | $900,08509 \pm 0,04366$ | $3,5584 \pm 0,08731$           | 3158,16         |
| 4      | $1006,9019 \pm 0,02358$ | $3,63536 \pm 0,04716$          | 3170,35         |
| 5      | $1214,0409 \pm 0,02948$ | $4,01488 \pm 0,05895$          | 3193,97         |
| 6      | $1253,8638 \pm 0,53084$ | 5,38991 ± 1,06167              | 3198,85         |
| 7      | $1317,3263 \pm 0,37734$ | $7,71867 \pm 0,75468$          | 3205,88         |
| 8      | $1344,1933 \pm 0,06387$ | $4,44694 \pm 0,12774$          | 3208.83         |

 Tabela 2. Dobijene vrednosti fit parametara (samo onih neophodnih za ovaj rad) i talasnih dužina za linije prikazane na Slici 29. b).

|        | Opseg 3100-3200 Å |            |            |             |            |            |            |  |
|--------|-------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|--|
| linija | 2                 | 3          | 4          | 5           | 6          | 7          | 8          |  |
|        |                   |            | Р          | (Å /piksel) |            |            |            |  |
| 1      | 0,11421(7)        | 0,11416(3) | 0,11415(2) | 0,11412(2)  | 0,11456(8) | 0,11427(5) | 0,11413(2) |  |
| 2      |                   | 0,11413(2) | 0,11412(1) | 0,11409(1)  | 0,1147(1)  | 0,11428(7) | 0,11410(1) |  |
| 3      |                   |            | 0,11412(5) | 0,11406(2)  | 0,1150(2)  | 0,1144(1)  | 0,11409(2) |  |
| 4      |                   |            |            | 0,11403(2)  | 0,1154 (3) | 0,1145(1)  | 0,11409(2) |  |
| 5      |                   |            |            |             | 0,122(2)   | 0,1153(4)  | 0,11417(6) |  |
| 6      |                   |            |            |             |            | 0,111(1)   | 0,1105(7)  |  |
| 7      |                   |            |            |             |            |            | 0,110(2)   |  |

Tabela 3. Dobijene vrednosti parametra P za opseg 3100-3200 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija.

Koristeći gore opisanu proceduru dobija se da je u ovom spektralnom regionu parametar  $\overline{P} = 0.1142 \pm 0.0001$  Å/piksel.

Međutim do bolje ocene parametra P u ovom regionu se može doći detaljnijom analizom rezultata prikazanih na Slici 29., Tabeli 2. i Tabeli 3. Naime, na Slici 29. se vidi da su intenziteti spektralnih linija numerisanih rednim brojevima 6 i 7 daleko manji od ostalih linija. Takođe se sa ove slike vidi da profili linija nisu dovoljno dobro opisani Lorentzianom u dnu profila, odnosno da su tu širi nego što daje model. Iz tog razloga je i nesigurnost određivanja parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta\lambda_{1/2}$  za ove linije daleko veća nego za ostale. Stoga, bolja ocena vrednosti parametra P u ovom regionu se dobija ako se iz razmatranja izbace profili numerisani brojevima 6 i 7. Na ovaj način se lako može dobiti da je ocena za parametar P u ovom spektralnom regionu  $\overline{P} = 0.114119 \pm 0.000009$  Å/piksel.

Treba napomenuti da, iako su neke linije izbačene iz razmatranja za određivanje parametra P, one jesu i te kako važne za identifikaciju spektra.

#### Spektralni region od ~4000 Å do ~4200 Å

Prilikom određivanja parametra P u ovom regionu korišćene su spektralne linije Mo I emitovane iz šuplje katode. Izvor svetlosti je postavljen ispred ulazne pukotine monohromatora, a rešetka monohromatora je postavljena na talasnu dužinu od 4126 Å. Kamerom je tada snimljen spektar koji je prikazan na Slici 30. a). Na Slici 30. b), c), d) su prikazani delovi spektra sa Slike 30. a). Na Slici 30. b), c), d) su simbolima  $\circ$  predstavljene izmerene vrednosti a punom linijom su prikazani fitovi spektralnih linija. Radi preglednosti, linije su numerisane. Dobijene vrednosti fit parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta \lambda_{1/2}$  kao i tablične vrednosti  $\lambda_0$  su prikazane u Tabeli 4 dok su u Tabeli 5. prikazani dobijene vrednosti parametra P za različite kombinacije linija. Koristeći istu proceduru kao i za prethodni spektralni region, dobija se da je u ovom spektralnom regionu parametar  $\overline{P} = 0.1118 \pm 0.0002$  Å/piksel.

Do bolje ocene parametra P u ovom regionu se može doći detaljnijom analizom rezultata prikazanih na Slici 30., Tabeli 4. i Tabeli 5. a koristeći istu metodologiju kao i za prethodni region. Odbacivanjem linija numerisanih brojevima 1, 3, 5, 6, 7, 10 i 12, za bolju ocenu vrednosti parametra P u ovom regionu se dobija takođe  $\overline{P} = 0.1118 \pm 0.0002$  Å/piksel.



Slika 30. Snimljeni spektar Mo pri položaju rešetke od 4126 Å.

| linija | $\lambda_{0p}$ (piksel) |       |         | $\Delta\lambda_{1/2}$ | $\lambda_0$ (Å) |        |         |
|--------|-------------------------|-------|---------|-----------------------|-----------------|--------|---------|
| 1      | 92,41398                | ±     | 1,07349 | 9,02043               | ±               | 2,147  | 4062,08 |
| 2      | 162,1112                | $\pm$ | 0,55575 | 7,66658               | ±               | 1,1115 | 4069,88 |
| 3      | 218,3594                | ±     | 4,90098 | 19                    | $\pm$           | *      | 4076,19 |
| 4      | 265,172                 | ±     | 0,87851 | 7,29381               | $\pm$           | 1,757  | 4081,44 |
| 5      | 291,2653                | ±     | 1,15613 | 6,85644               | ±               | 2,3123 | 4084,38 |
| 6      | 450,172                 | ±     | 2,73447 | 5,01168               | ±               | 5,469  | 4102,15 |
| 7      | 497,6995                | ±     | 1,12584 | 4,50121               | $\pm$           | 2,2517 | 4107,47 |
| 8      | 610,7182                | ±     | 0,76044 | 4,28295               | ±               | 1,5209 | 4120,1  |
| 9      | 820,926                 | $\pm$ | 0,0554  | 3,64625               | ±               | 0,1108 | 4143,55 |
| 10     | 869,1823                | ±     | 1,07786 | 4,90186               | ±               | 2,1557 | 4148,94 |
| 11     | 926,6971                | ±     | 0,55265 | 4                     | $\pm$           | *      | 4155,28 |
| 12     | 945,2974                | ±     | 1,34896 | 6,75267               | ±               | 2,6979 | 4157,4  |
| 13     | 1200,089                | ±     | 0,4625  | 5,2396                | ±               | *      | 4185,82 |
| 14     | 1222,163                | ±     | 0,05882 | 4,18746               | ±               | 0,1177 | 4188,32 |
| 15     | 1277,922                | ±     | 0,77926 | 5,46372               | ±               | 1,5585 | 4194,56 |

**Tabela 4.** Dobijene vrednosti fit parametara (samo onih neophodnih za ovaj rad) i talasnih dužina za linije prikazane na Slici 30. b), c), d). \* oznaka da program za fitovanje nije mogao da izvrši fitovanje sa poluširinom kao slobodnim parametrom (u takvim slučajevima je taj parametar setovan ručno pa nedostaje ocena za nesigurnost).

|        | Opseg 4000-4200 Å |          |           |               |          |           |           |  |
|--------|-------------------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|-----------|--|
| linija | 2                 | 3        | 4         | 5             | 6        | 7         | 8         |  |
|        |                   |          |           | P (Å /piksel) |          |           |           |  |
| 1      | 0,112(2)          | 0,112(4) | 0,112(1)  | 0,1121(9)     | 0,112(1) | 0,1120(4) | 0,1119(3) |  |
| 2      |                   | 0,112(1) | 0,112(1)  | 0,112(1)      | 0,112(1) | 0,1120(4) | 0,1119(2) |  |
| 3      |                   |          | 0,112(12) | 0,112(8)      | 0,112(3) | 0,112(2)  | 0,112(1)  |  |
| 4      |                   |          |           | 0,113(6)      | 0,112(2) | 0,1119(7) | 0,1119(4) |  |
| 5      |                   |          |           |               | 0,112(2) | 0,1119(9) | 0,1118(5) |  |
| 6      |                   |          |           |               |          | 0,112(7)  | 0,112(2)  |  |
| 7      |                   |          |           |               |          |           | 0,112(1)  |  |

**Tabela 5. a)** Dobijene vrednosti parametra P za opseg 4000-4200 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija.

|        | Opseg 4000-4200 Å |           |           |               |           |            |           |  |  |
|--------|-------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|------------|-----------|--|--|
| linija | 9                 | 10        | 11        | 12            | 13        | 14         | 15        |  |  |
|        |                   |           |           | P (Å /piksel) |           |            |           |  |  |
| 1      | 0,1118(2)         | 0,1118(2) | 0,1117(2) | 0,1118(2)     | 0,1117(1) | 0,1117(1)  | 0,1117(1) |  |  |
| 2      | 0,1118(1)         | 0,1118(2) | 0,1117(1) | 0,1117(2)     | 0,1117(1) | 0,1117(1)  | 0,1117(1) |  |  |
| 3      | 0,1118(9)         | 0,1118(9) | 0,1117(8) | 0,1117(8)     | 0,1117(6) | 0,1117(5)  | 0,1117(5) |  |  |
| 4      | 0,1118(2)         | 0,1118(3) | 0,1116(2) | 0,1117(3)     | 0,1116(1) | 0,1117(1)  | 0,1117(1) |  |  |
| 5      | 0,1117(2)         | 0,1117(3) | 0,1116(2) | 0,1116(3)     | 0,1116(2) | 0,1117(1)  | 0,1117(2) |  |  |
| 6      | 0,1117(8)         | 0,1117(8) | 0,1115(7) | 0,1116(7)     | 0,1116(4) | 0,1116(4)  | 0,1116(4) |  |  |
| 7      | 0,1116(4)         | 0,1116(5) | 0,1114(3) | 0,1116(4)     | 0,1115(2) | 0,1116(2)  | 0,1116(2) |  |  |
| 8      | 0,1116(4)         | 0,1116(6) | 0,1113(3) | 0,1115(5)     | 0,1115(2) | 0,1116(1)  | 0,1116(2) |  |  |
| 9      |                   | 0,112(2)  | 0,1109(6) | 0,111(1)      | 0,1115(1) | 0,11158(2) | 0,1116(2) |  |  |
| 10     |                   |           | 0,110(2)  | 0,111(3)      | 0,1115(4) | 0,1116(3)  | 0,1116(4) |  |  |
| 11     |                   |           |           | 0,114(9)      | 0,1117(3) | 0,1118(2)  | 0,1118(3) |  |  |
| 12     |                   |           |           |               | 0,1115(6) | 0,1117(5)  | 0,1117(5) |  |  |
| 13     |                   |           |           |               |           | 0,113(2)   | 0,112(1)  |  |  |
| 14     |                   |           |           |               |           |            | 0,112(2)  |  |  |

**Tabela 5. b)** Dobijene vrednosti parametra P za opseg 4000-4200 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija.

#### Spektralni region od ~5500 Å do ~5600 Å

Prilikom određivanja parametra P u ovom regionu korišćene su spektralne linije Mo I emitovane iz šuplje katode. Izvor svetlosti je postavljen ispred ulazne pukotine monohromatora, a rešetka monohromatora je postavljena na talasnu dužinu od 5506 Å. Kamerom je tada snimljen spektar koji je prikazan na Slici 31. a). Na Slici 31. b) je prikazan deo spektra sa Slike 31. a). Na Slici 31. b) su simbolima  $\circ$  predstavljene izmerene vrednosti a punom linijom su prikazani fitovi spektralnih linija. Radi preglednosti, linije su numerisane. Dobijene vrednosti fit parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta \lambda_{1/2}$  kao i tablične vrednosti  $\lambda_0$  su prikazane u Tabeli 6 dok su u Tabeli 7. prikazani dobijene vrednosti parametra P za različite kombinacije linija.



Slika 31. Snimljeni spektar Mo pri položaju rešetke od 5506 Å.

| linija | $\lambda_{0p}$ (piksel) |       |         | $\Delta\lambda_{1/2}$ | $\lambda_0$ (Å) |        |         |
|--------|-------------------------|-------|---------|-----------------------|-----------------|--------|---------|
| 1      | 658,7295                | ±     | 0,01412 | 3,75047               | ±               | 0,0282 | 5506,49 |
| 2      | 905,9986                | $\pm$ | 0,01637 | 3,40955               | $\pm$           | 0,0328 | 5533,05 |
| 3      | 1254,797                | ±     | 0,02567 | 3,91292               | ±               | 0,0513 | 5570,45 |

Tabela 6. Dobijene vrednosti fit parametara (samo onih neophodnih za ovaj rad) i talasnih dužina za linijeprikazane na Slici 31. b).

|        | Opseg 5500-5600 Å |            |  |  |  |  |
|--------|-------------------|------------|--|--|--|--|
| linija | 2                 | 3          |  |  |  |  |
|        | P (Å /piksel)     |            |  |  |  |  |
| 1      | 0,10741(1)        | 0,10730(1) |  |  |  |  |
| 2      |                   | 0,10723(1) |  |  |  |  |

Tabela 7. Dobijene vrednosti parametra P za opseg 5500-5600 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija.

S obzirom da su sve tri linije dobro definisane i dovoljno velikih intenziteta, u ovom slučaju nema potrebe za odbacivanjem nekih linija. Stoga je u ovom spektralnom regionu parametar  $\overline{P} = 0.107314 \pm 0.000005$  Å/piksel.

#### Spektralni region od ~5900 Å do ~6100 Å

Prilikom određivanja parametra P u ovom regionu korišćene su spektralne linije Ne I emitovane iz šuplje katode. Izvor svetlosti je postavljen ispred ulazne pukotine monohromatora, a rešetka monohromatora je postavljena na talasnu dužinu od 6007 Å. Kamerom je tada snimljen spektar koji je prikazan na Slici 32. a). Na Slici 32. b), c), d) su prikazani delovi spektra sa Slike 32. a). Na Slici 32. b), c), d) su simbolima  $\circ$  predstavljene izmerene vrednosti a punom linijom su prikazani fitovi spektralnih linija. Radi preglednosti, linije su numerisane. Dobijene vrednosti fit parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta \lambda_{1/2}$  kao i tablične vrednosti  $\lambda_0$  su prikazane u Tabeli 8 dok su u Tabeli 9. prikazani dobijene vrednosti parametra P za različite kombinacije linija.





| linija | $\lambda_{0p}$ (piksel) |       |         | $\Delta\lambda_{1/2}$ | $\lambda_0$ (Å) |        |         |
|--------|-------------------------|-------|---------|-----------------------|-----------------|--------|---------|
| 1      | 61,84032                | $\pm$ | 0,17471 | 8,48179               | $\pm$           | 0,3494 | 5944,83 |
| 2      | 220,0747                | $\pm$ | 31,6652 | 9                     | ±               | *      | 5961,62 |
| 3      | 256,637                 | $\pm$ | 13,8935 | 9,45023               | $\pm$           | 27,787 | 5965,47 |
| 4      | 351,1603                | $\pm$ | 0,52097 | 6,38964               | ±               | *      | 5975,53 |
| 5      | 468,1923                | ±     | 14,7753 | 5,97966               | ±               | 29,551 | 5987,91 |
| 6      | 503,5514                | $\pm$ | 19,286  | 4                     | ±               | *      | 5991,65 |
| 7      | 591,5415                | $\pm$ | *       | 5                     | ±               | *      | 6000,93 |
| 8      | 866,7375                | $\pm$ | 0,23079 | 3,46284               | ±               | 0,4616 | 6030    |
| 9      | 1287,165                | $\pm$ | 0,08031 | 4,04272               | ±               | 0,1606 | 6074,34 |

**Tabela 8.** Dobijene vrednosti fit parametara (samo onih neophodnih za ovaj rad) i talasnih dužina za linije prikazane na Slici 32. b), c), d). \* je oznaka da program za fitovanje nije mogao da izvrši fitovanje sa poluširinom kao slobodnim parametrom (u takvim slučajevima je taj parametar setovan ručno pa nedostaje ocena za nesigurnost).

|        | Opseg 5900-6100 Å |          |           |          |          |           |            |            |
|--------|-------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|------------|------------|
| linija | 2                 | 3        | 4         | 5        | 6        | 7         | 8          | 9          |
|        | P (Å /piksel)     |          |           |          |          |           |            |            |
| 1      | 0,106(21)         | 0,106(8) | 0,1061(2) | 0,106(4) | 0,106(5) | 0,10590 * | 0,10581(4) | 0,10569(2) |
| 2      |                   | 0,11(10) | 0,11(3)   | 0,11(1)  | 0,11(1)  | 0,106 *   | 0,106(5)   | 0,106(3)   |
| 3      |                   |          | 0,11(2)   | 0,11(1)  | 0,11(1)  | 0,106 *   | 0,106(2)   | 0,106(1)   |
| 4      |                   |          |           | 0,11(1)  | 0,11(1)  | 0,1056 *  | 0,1056(1)  | 0,10556(6) |
| 5      |                   |          |           |          | 0,11(7)  | 0,11 *    | 0,106(4)   | 0,106(2)   |
| 6      |                   |          |           |          |          | 0,11 *    | 0,106(6)   | 0,106(3)   |
| 7      |                   |          |           |          |          |           | 0,10563 *  | 0,10553 *  |
| 8      |                   |          |           |          |          |           |            | 0,10546(6) |

**Tabela 9.** Dobijene vrednosti parametra P za opseg 5900-6100 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija. \* je oznaka da nije urađena ocena za nesigurnost.

Odbacivanjem linija numerisanih brojevima 2, 3, 5, 6, i 7, za ocenu vrednosti parametra P u ovom regionu se dobija  $\overline{P} = 0.10571 \pm 0.00004$  Å/piksel.

#### Spektralni region od ~7000 Å do ~7100 Å

Prilikom određivanja parametra P u ovom regionu korišćene su spektralne linije Ne I emitovane iz šuplje katode. Izvor svetlosti je postavljen ispred ulazne pukotine monohromatora, a rešetka monohromatora je postavljena na talasnu dužinu od 7000 Å. Kamerom je tada snimljen spektar koji je prikazan na Slici 33. a). Na Slici 33. b) je prikazan deo spektra sa Slike 33. a). Na Slici 33. b) su simbolima  $\circ$  predstavljene izmerene vrednosti a punom linijom su prikazani fitovi spektralnih linija. Radi preglednosti, linije su numerisane. Dobijene vrednosti fit parametara  $\lambda_{op}$  i  $\Delta \lambda_{1/2}$  kao i tablične vrednosti  $\lambda_0$  su prikazane u Tabeli 10 dok su u Tabeli 11. prikazani dobijene vrednosti parametra P za različite kombinacije linija.



Slika 33. Snimljeni spektar Ne pri položaju rešetke od 7000 Å.

| linija | $\lambda_{0p}$ (piksel) |       |         | $\Delta\lambda_{1/2}$ (piksel) |       |        | $\lambda_0$ (Å) |
|--------|-------------------------|-------|---------|--------------------------------|-------|--------|-----------------|
| 1      | 883,7675                | $\pm$ | 0,09853 | 3,5195                         | $\pm$ | 0,1971 | 7024,05         |
| 2      | 966,1244                | ±     | 0,00787 | 3,31951                        | ±     | 0,0157 | 7032,41         |
| 3      | 1229,343                | ±     | 0,39087 | 3,72462                        | ±     | 0,7817 | 7059,11         |

**Tabela 10.** Dobijene vrednosti fit parametara (samo onih neophodnih za ovaj rad) i talasnih dužina za linije prikazane na Slici 33. b).

|        | Opseg 7000-7100 Å |           |  |  |  |
|--------|-------------------|-----------|--|--|--|
| linija | 2                 | 3         |  |  |  |
|        | P (Å /piksel)     |           |  |  |  |
| 1      | 0,1015(1)         | 0,1014(1) |  |  |  |
| 2      |                   | 0,1014(2) |  |  |  |

Tabela 11. Dobijene vrednosti parametra P za opseg 7000-7100 Å i to za različite kombinacije snimljenih linija.

Za ocenu vrednosti parametra P u ovom regionu se dobija  $\overline{P} = 0.10147 \pm 0.00008$  Å/piksel.

#### Analiza promene parametra P

Iz rezultata prikazanim u prethodnom tekstu, vidi se da se parametar P menja sa promenom spektralnog regiona u kome se vrši posmatranje. Analizom prethodno dobijenih podataka može se odrediti kako se menja parametar P u delu spektra između 3000 Å i 7000 Å.

U prethodnom tekstu su date samo približne vrednosti intervala u kome je određen parametar P. Međutim, sada posle završene obrade podataka moguće je dati prave vrednosti. Opsezi talasnih dužina u kojima je određen parametar P se mogu odrediti kao opsezi između talasnih dužina korišćenih spektralnih linija. Intervali talasnih dužina i vrednosti parametra P u njima su sada sumarno prikazani u Tabeli 12. i na Slici 34. Na Slici 34. je  $\lambda$  talasna dužina sredine spektralnog opsega u kome je određen parametar P.

| Spektralni opseg      | Sredina spektralnog opsega (Å) | P (Å/piksel) |
|-----------------------|--------------------------------|--------------|
| 3112.12 Å - 3208.83 Å | 3160.475                       | 0.114119(9)  |
| 4069.88 Å - 4194.56 Å | 4132.22                        | 0.1118(2)    |
| 5506.49 Å - 5570.45 Å | 5538.47                        | 0.107314(5)  |
| 5944.83 Å - 6074.34 Å | 6009.585                       | 0.10571(4)   |
| 7024.05 Å - 7059.11 Å | 7041.58                        | 0.10147(8)   |

Tabela 12. Dobijene vrednosti parametra P za različite opsege talasnih dužina.





Izmerena zavisnost parametra P od središta merenih spektralnih opsega  $\lambda$  je fitovana kvadratnom funkcijom oblika P = a + b $\lambda$  + c $\lambda^2$  a dobijene su sledeće vrednosti fit parametara:

$$a = 0.1186(4)$$
  

$$b = -5(2) \cdot 10^{-7}$$
  

$$c = -2.7(2) \cdot 10^{-10}$$

# ZAKLJUČAK

Snimanje i proučavanje spektara i spektralnih linija emitovanih iz laboratorijskih izvora plazme je od velikog značaja kako za fundamentalnu fiziku tako i za astofiziku. U ovom radu je prikazan sistem za snimanje spektralnih linija koji se trenutno postavlja u Laboratoriji za fizičku elektroniku Departmana za fiziku PMF-a u Novom Sadu. Svrha novog sistema za snimanje koji se može koristiti naporedo sa starim sistemom je da znatno ubrza sam proces snimanja i prikupljanja podataka. U tu svrhu je vrlo sofisticirana ICCD kamera 4 Quik Edig povezana sa monohromatorom McPherson 2061 (koji sadrži difrakcionu rešetku od 1200 zareza/mm). Kamera je postavljena u izlaznu fokalnu ravan monohromatora metodom minimizacije poluširine spektralne linije a izvršena je i osnovna karakterizacija kamere i sistema. Snimljena je flet-field slika sa potrebnom korekcijom na celokupan pozadinski šum. Takođe određeno je koliko iznosi vrednost jednog piksela izražena u angstremima i to za oblast talasnih dužina od ~3000 Å do ~7000 Å. Forma spektralne linije snimljene ovim sistemom je takođe detaljno analizirana.

U daljem radu pri izradi ovog sistema neophodno je još i ujedno odrediti spektroskopsku flat-field korekciju i funkciju korekcije intenziteta po talasnim dužinama korišćenjem kalibrisane standardne lampe.

# LITERATURA

- 1. Z.Mijatović, R.Kobilarov, S.Đurović, N.Konjević i I.Savić: Merenje parametara spektralnih linija emitovanih iz plazme sa poboljšanom tačnošću (1995)
- 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)
- 3. Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc.: 4 Spec E the PC software for Video Spectroscopy, Operating Manual, Part I Guided Tour, (07/2006)
- 4. Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc.: 4 Spec E the PC software for Video Spectroscopy, Operating Manual, Part II Menu Commands, (08/2007)
- 5. Christopher Palmer, Erwin Loewen: Diffraction grating handbook, Newport Corporation (2005)

. .

- 6. McPherson monochromators, models 207, 2061, 209 and 2062
- 7. www.stanfordcomputeroptics.com
- 8. www.dmphotonics.com/MCP\_MCPImageIntensifiers/microchannel\_plates.htm
- 9. http://www.aoe.com.au
- 10. http://astrosurf.com
- 11. http://physics.kenyon.edu
- 12. http://web.mit.edu

# BIOGRAFIJA

Rođen sam 27.08.1983 u Smederevu. Pohađao sam osnovnu školu "Branislav Nušić" u Smederevu. Godine 2002 završio sam srednju stručnu školu "Tehnička Škola" takođe u Smederevu. Iste godine upisao sam Prirodno – matematički fakultet u Novom Sadu, smer Astronomija (sa astrofizikom).





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

#### KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

| Redni broj:                        |   |
|------------------------------------|---|
| KBK<br>Idantifika cioni buoi       |   |
| iaentijikacioni broj:<br>IBD       |   |
| IBR<br>Tin dokumentacije:          | Monografska dokumentacija   |
| TD                                 | monografska dokumentacija   |
| Tin zanisa:                        | Tekstualni štampani materijal   |
| TZ                                 | · ····································  |
| Vrsta rada:                        | Diplomski rad   |
| VR                                 | •   |
| Autor:                             | Miloš Mitrović 226/02   |
| AU                                 |   |
| Mentor:                            | Dr Igor Savić, docent   |
| MN                                 |   |
| Naslov rada:                       | Kalibracija optičkog sistema za snimanje optičkih spektara  |
| NR                                 |   |
| Jezik publikacije:                 | srpski (latinica)   |
| JP<br>Jacih izur dar               |   |
| Jezik izvoaa:                      | srpski/engleski   |
| JI<br>Zamlia publikovania          | Schiig  |
| <b>7P</b>                          | Sibija  |
| Uže geografsko područie:           | Voivodina   |
| UGP                                |   |
| Godina:                            | 2009  |
| GO                                 |   |
| Izdavač:                           | Autorski reprint  |
| IZ                                 |   |
| Mesto i adresa:                    | Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad  |
| MA                                 |   |
| Fizički opis rada:                 | 3/ 44/12/34/0/ 0  |
| FO<br>Naučna oblasti               | Figiles   |
| No                                 | T IZIKA   |
| Naučna disciplina                  | Fizika atoma, molekula i jonizovanog gasa   |
| ND                                 | Tinim atoma, motonara Tjorneo tarog Baoa  |
| Predmetna odrednica/ ključne reči: | Spektroskopija, ICCD kamera, kalibracija  |
| PO                                 |   |
| UDK                                | 2.8   |
| Čuva se:                           | Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu   |
| ČU                                 |   |
| Važna napomena:                    | nema  |
| VN                                 | www.a.s. age and a second s                           |
| Izvod:                             | U radu je prikazan sistem za snimanje spektralnih linija koji se trenutno   |
| 12                                 | u Novom Sadu. ICCD kamera je postavljena u izlaznu fokalnu ravan<br>monohromatora i izvršena je osnovna karakterizacija kamere i sistema. |

Datum prihvatanja teme od NN veća: DP Datum odbrane: DO Članovi komisije: KO

16.04.2009

detaljno analizirana.

Snimljena je flet-field slika sa potrebnom korekcijom na celokupan pozadinski šum. Takođe je određeno koliko iznosi vrednost jednog piksela izražena u angstremima i to za oblast talasnih dužina od ~3000 Å do ~7000 Å. Forma spektralne linije snimljene ovim sistemom je takođe

Predsednik: član: član: Dr Stevica Đurović, redovni profesor Dr Srđan Rakić, docent Dr Igor Savić, docent

. •

#### UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

#### **KEY WORDS DOCUMENTATION**

| Accession number:            |   |
|------------------------------|---|
| ANO                          |   |
| Identification number:       |   |
| <b>INO</b>                   | Managements with the effect   |
| Document type.<br>DT         | Monograph publication   |
| Type of record:<br>TR        | Textual printed material  |
| Content code:                | Final paper   |
| Author:                      | Miloš Mitrović 226/02   |
| ATI                          | Milos Millovic 220/02   |
| Mentor/comentor              | Dr Igor Savić   |
| MN                           |   |
| Title:                       | Calibration of the optical system with ICCD camera for optical spectra  |
| ТІ                           | recording   |
| Language of text:            | Serbian (Latin)   |
| LT                           |   |
| Language of abstract:        | English   |
| LA                           |   |
| Country of publication:      | Serbia  |
| СР                           |   |
| Locality of publication:     | Vojvodina   |
| LP                           |   |
| Publication year:            | 2005  |
| PY                           |   |
| Publisher:                   | Author's reprint  |
| PU                           |   |
| Publication place:           | Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad   |
|                              |   |
| Physical description:        | 3/ 44/12/34/0/ 0  |
| PD<br>Soiontific Galdi       | י ות '  |
| Scientific field:            | Physics   |
| Sr<br>Scientific discipline: | Division of Atomic Medicinal and L. 1.  |
| Scientific discipline,       | Physics of Atoms, Molecules and Ionized Gases   |
| Subject/Key words:           | Spectroscopy ICCD camera calibration  |
| SKW                          | specific scopy, reed camera, canoration   |
| UC                           |   |
| Holding data:                | Library of Department of Physics. Tra Dositeia Obradovića 4   |
| HD                           | Lionary of Department of Thysics, The Doshoja Obradovica 4  |
| Note:                        | none  |
| Ν                            |   |
| Abstract:                    | In this work, the system under development in the Laboratory of Physical  |
| AB                           | Electronics, Department of Physics, Faculty of Sciences Novi Sad, for<br>recording spectral lines is represented. ICCD camera have been placed on<br>the exit focal plane of the monochromator and basic characterization of<br>camera and system have been done. Flet-field image with correction to |
|                              | overall bacground noise have been recorded. Also, the values of one pixel   |

Accepted by the Scientific Board: **ASB** Defended on: **DE** Thesis defend board: **DB** President: Member:

16.04.2003

in details.

Dr Stevica Đurović, full professor Dr Srđan Rakić, assistant professor

represented in angstroms for vawelenghts between  $\sim$ 3000 Å and  $\sim$ 7000 Å have been determined. The form of recorded spectral line has been analyzed

2 N