



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Kalibracija optičkog sistema za spektroskopiju plazme

- diplomski rad -

Mentor: Doc. dr Lazar Gavanski

Kandidat: Bellona Bles

Novi Sad, 2019.

Uvod	3
1. Spektralni uređaji	4
1.1 Ulazni otvor	5
1.2 Disperzioni element	6
1.3 Spektrometar Czerny-Turnerovog tipa	7
1.4 Oblik spektralnih linija	8
2. Detektor	9
2.1 ICCD kamera	9
2.1.1 Pojačavač slike	10
2.1.2 Sistem sočiva za spregu	11
2.1.3 CCD čip	11
3. Izvori zračenja korišćeni za kalibraciju	14
3.1 Helijum – neonski laser	14
3.2 Cev sa šupljom katodom	15
4. Kalibracija optičkog sistema po talasnim dužinama	17
4.1 Kalibracija pomoću He-Ne lasera	17
4.2 Kalibracija po talasnim dužinama pomoću molibdenske šuplje katode	20
4.3 Rezultati kalibracije	26
Zaključak	28
Literatura	29

Uvod

Oblast nauke koja se bavi analizom elektromagnetnog zračenja naziva se spektroskopija [1]. Emiteri elektromagnetnog zračenja su pobuđeni molekuli i atomi kako u neutralnom tako i u jonizovanom stanju. U ovom radu se govori o optičkom sistemu za snimanje spektara elektromagnetnog zračenja emitovanog iz plazme. Na osnovu snimljenog spektra ili delova spektra i profila spektralnih linija mogu se dobiti različite informacije o plazmi. Osnovni parametri su elektronska temperatura i elektronska koncentracija. Osim toga mogu se dobiti i podaci o različitim atomskim procesima u plazmi. U Laboratoriji za fizičku elektroniku Departmana za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu se najviše radi na ispitivanju Starkovog efekta na spektralne linije. Koriste se dva izvora plazme: zidom stabilisani električni luk i elektromagnetna udarna T-cev. Električni luk radi u kontinualnom režimu, a plazma se formira električnim pražnjenjem između elektroda. Po potrebi se na kontinualni režim mogu superponirati strujni impulsi. T-cev je impulsni izvor plazme u kojem se za kratko vreme oslobodi velika količina energije u cevi. To se postiže brzim pražnjenjem četiri paralelno vezana kondenzatora, pojedinačnog kapaciteta od 1 μF , između elektroda T-cevi.

Ovi izvori emituju izrazito linijsko zračenje superponirano na kontinualno zračenje koje je znatno manjeg intenziteta. Ovde treba naglasiti da spektralne linije emitivane iz ovakvih izvora plazme nisu strogo monohromatske već imaju određenu raspodelu intenziteta duž relativno uskog intervala talasnih dužina.

U snimljenom spektru je pre analize neophodno prvo identifikovati spektralne linije. Potrebno je odrediti njihovu talasnu dužinu tj. njihov polužaj u spektru. Na osnovu toga se zatim može utvrditi koje linije pripadaju kojim emiterima. Da bi to bilo moguće prethodno je potrebno kalibrisati ceo optički system po talasnim dužinama, što je i cilj ovog rada.

U nekim prethodnim radovima [2 - 4] su već rađene različite vrste kalibracija. ICCD kamera koja se koristi kao optički detektor je nakon toga bila na popravci. Pri tome je izvršeno i refokusiranje CCD čipa kamere, tako da su promenjeni optički parametri celog sistema. Iz tog razloga je bilo potrebno izvršiti novu kalibraciju optičkog sistema. Optički sistem koji je korišćen u ovom radu se upotrebljava za spektroskopiju u oblasti vidljivog spektra, tako da je i kalibracija izvršena u ovom radu ograničena na tu spektralnu oblast.

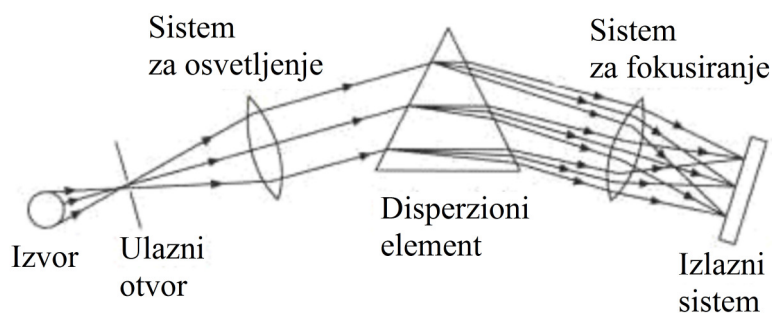
U prvom poglavlju ovog rada su opisani sastavni delovi spektralnog uređaja, njihove osobine, a navedene su i osobine spektralnih linija. U drugom poglavlju je detaljno opisana ICCD kamera koja je korišćena kao detektor. Navedeni su njeni sastavni delovi i njihove funkcije. Svetlostni izvori koji su korišćeni za kalibraciju optičkog sistema su opisani u trećoj glavi ovog rada. Eksperimentalna postavka i postupak kalibracije su predstavljeni u četvrtoj glavi. Dati su i rezultati kalibracije kao i primeri snimljenog spektra.

1. Spektralni uređaji

Uređaji koji ulazno polihromatsko zračenje razlažu po talasnim dužinama na monohromatske komponente nazivaju se spektralni uređaji. Na osnovu principa razlaganja, odnosno disperzije se vrši i njihova podela na uređaje sa prizmom, difrakcionom rešetkom i interferencione uređaje.

Instrument pomoću kojeg se posmatra svetlosni spektar naziva se spektroskop. Instrument sa skalom talasnih dužina naziva se spektrometar. Ako se na izlazu instrumenta izdvaja veoma uzani deo spektra onda je to monohromator. Kada postoji mogućnost snimanja šireg dela spectra takav uređaj se naziva spektrograf.

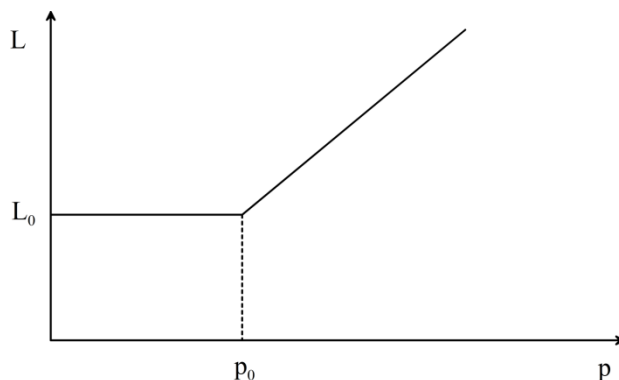
Spektralni uređaj se u principu sastoji od ulaznog otvora, sistema za osvetljavanje, disperzionog sistema, sistema za fokusiranje i izlaznog sistema. Na izlazni sistem spektralnog uređaja se montira odgovarajući optički ili fotoelektrični detektor. Principijelna šema uređaja je prikazana na Slici 1.



Slika 1. Principijelna šema spektralnog uređaja. [3]

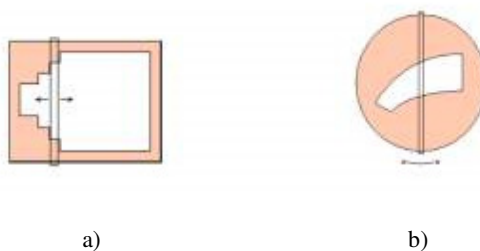
1.1 Ulazni otvor

Spektralna linija je monohromatska slika ulaznog otvora ili njenog dela. Visina i širina ulaznog otvora se mogu menjati, obično između 10 i 100 μm . Zavisnost širine lika L od širine ulaznog otvora p je data na Slici 2.



Slika 2. Zavisnost širine lika od širine ulaznog otvora.

Širina lika je linearno srazmerna širini ulazne pukotine, počevši od minimalne vrednosti širine pukotine p_0 . Za manje širine pukotine od p_0 , širina lika je konstantna (L_0), s obzirom da prilikom sužavanjem pukotine dolazi do povećanja difrakcije. Širina pukotine se najčešće menja pomoću mikrometarskog zavrtnja i u ovom radu je podešena na 30 μm . Visina ulaznog otvora se menja pomoću dijafragme koja može imati skokovitu (Slika 3.a) ili kontinualnu (Slika 3.b) promenu visine.



Slika 3. Dijafragme za promenu visine ulaznog otvora. [2]

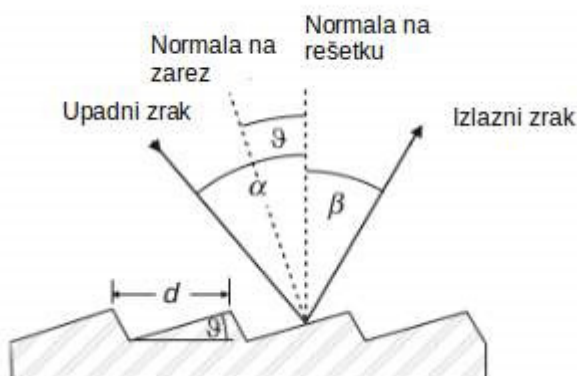
1.2 Disperzioni element

Disperzioni sistem razlaže upadno zračenje po talasnim dužinama na osnovu prelamanja kod disperzionih sistema sa prizmom, difrakcije kod sistema sa difrakcionom rešetkom, ili interferencije kod interferometara. Disperzija pokazuje u kojoj meri spektralni uređaj razlaže svetlost prema talasnim dužinama. Može se 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 . Može se definisati i linearna disperzija $d/d\lambda$, koja daje stvarnu razliku d između dveju bliskih linija u spektru, čija je razlika talasnih dužina $d\lambda$. U praksi se međutim, obično koristi inverzna linearna disperzija $d\lambda/d$ izražena u Å/mm ili nm/mm. Druga važna karakteristika disperzionih elemenata je moć razlaganja λ/d , pri čemu je $d\lambda$ razlika talasnih dužina između dve bliske linije sličnih intenziteta, koje još može da razdvoji dati instrument pri talasnoj dužini λ .

U spektralnom uređaju korišćenom u ovom radu, disperzioni element je refleksiona difrakciona rešetka. Difrakciona rešetka se sastoji od velikog broja blisko poređanih zarezova. Što je veći broj zarezova po jedinici dužine, veća je i moć razlaganja. Visokodisperzione rešetke se obično izrađuju sa 600, 1200 i 2400 nareza po milimetru. Uslov za konstruktivnu interferenciju zračenja na refleksionoj rešeci je dat jednačinom [5]:

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

gde je α upadni ugao, β izlazni ugao, pri čemu su oba merena u odnosu na normalu na rešetku što je prikazano na Slici 4. Red difrakcije je m , a d je razmak između zarezova [5].



Slika 4. Difrakcija na refleksionoj rešetki. [5]

Ugaona disperzija difrakcione rešetke je:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta} \quad (2)$$

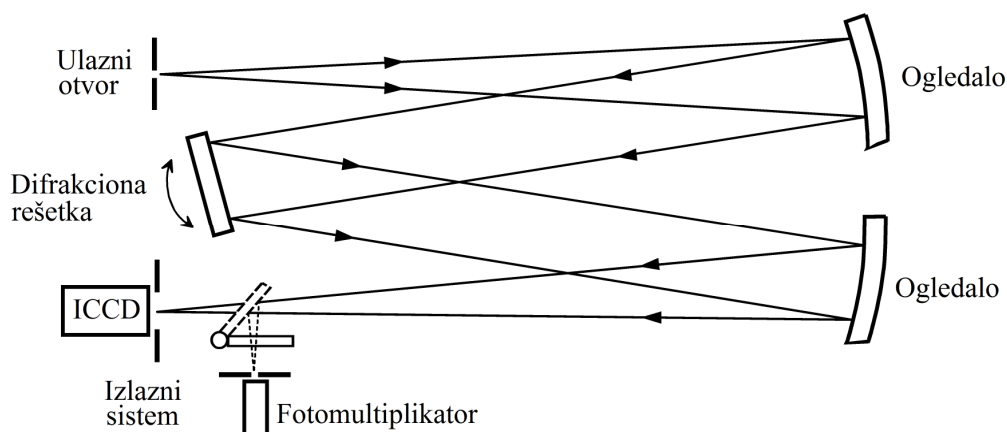
Moć razlaganja rešetke ima oblik:

$$R = mN \quad (3)$$

gde je N ukupan broj zareza, a m je red difrakcije.

1.3 Spektrometar Czerny-Turnerovog tipa

Spektrometar korišćen u ovom radu može da se koristi i kao monohromator i kao spektrograf. Uređaj poseduje dva izlaza, uzani izlazni otvor za snimanje pojedinačnih spektralnih linija pomoću fotomultiplikatora i široki izlazni otvor za snimanje šireg spektralnog interval pomoću ICCD kamere. Šematski prikaz je dat na Slici 5.



Slika 5. Czerny–Turnerov spektrometar.

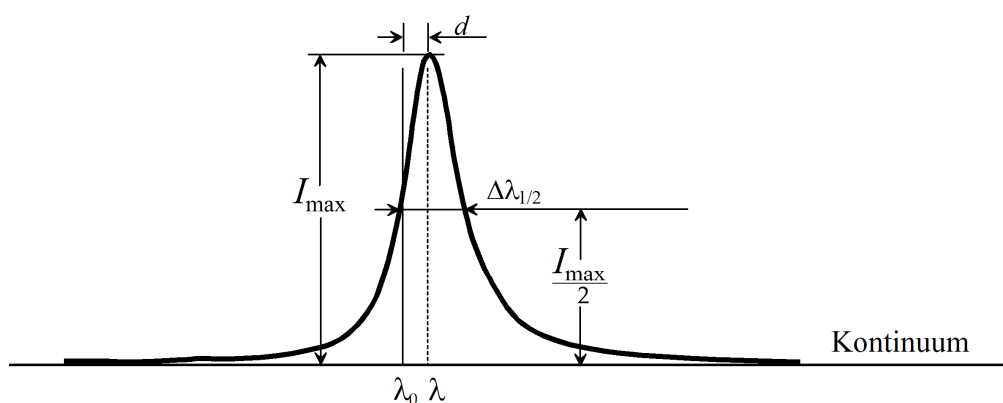
Ulazni otvor se nalazi u fokusu konkavnog ogledala tako da su odbijeni zraci usmereni paralelno na rešetku. Difraktovane zrake sa rešetke drugo ogledalo fokusira u izlaznoj ravni. Zračenje različitih talasnih dužina je raspoređeno na različitim mestima duž izlazne ravni. To u slučaju linijskog emisionog spektra predstavlja seriju slika ulaznog otvora. Zakretanjem difrakcione rešetke, na izlazni sistem se dovode različiti delovi spektra. Pomoću uzanog izlaznog otvora i fotomultiplikatora se snimaju veoma uski spektralni intervali, a pomoću ICCD kamere se snimaju širi intervali spektra.

1.4 Oblik spektralnih linija

Ukoliko se posmatra izvor zračenja linijskog spektra, uočava se da spektralne linije emitovane u atomskim deekscitacionim procesima u izvoru nisu strogo monohromatske, odnosno liniji ne odgovara jedna vrednost talasne dužine, već uzani interval talasne dužine. Intenzitetu spektralne linije doprinose i fotoni iz intervala talasnih dužina $\Delta\lambda$ oko centralne talasne dužine λ_0 . Spektralni intenzitet zračenja je proporcionalan broju fotona i najveći je u centru linije, a opada ka krilima linije.

Širenje spektralnih linija je posledica više mehanizama koji istovremeno utiču na širenje spektralnih linija. U plazmama o kojima se ovde govori najznačajniji je Starkov efekat. Rezonantno i van der Waalsovo širenje su uglavnom zanemarljivi. Osim toga postoji i Dopplerovo širenje koje je posledica kretanja atoma emitera. Prirodno širenje uvek postoji, ali je ono za nekoliko redova veličine manje od pomenutih tako da ovde nema nikakvog uticaja. Starkov profil ima oblik simetrične Lorentzove funkcije ako su emiteri jonizovani atomi, a ako su emiteri neutralni atomi Starkov profil je asimetrični $j(x)$ profil. Dopplerov profil ima oblik Gaussove funkcije. Na sve to treba dodati i instrumentalni profil koji takođe ima oblik Gaussove funkcije. Ukupan tj. rezultatni profil snimljene spektralne linije emitovane od strane jona je tzv. konvolucija Lorentzovog i Gaussovog profila i naziva se Voigtov profil. Rezultatni profil emitovan od strane neutralnih atoma je asimetričan jer nastaje kao konvolucija $j(x)$ i Gaussovog profila. Usled Starkovog efekta dolazi i do pomeranja profila spektralne linije u odnosu na talasnu dužinu λ_0 koju bi emitovali izolovani atomi.

Primer proširenog profila spektralne linije je prikazan na Slici 6.



Slika 6. Profil spektralne linije

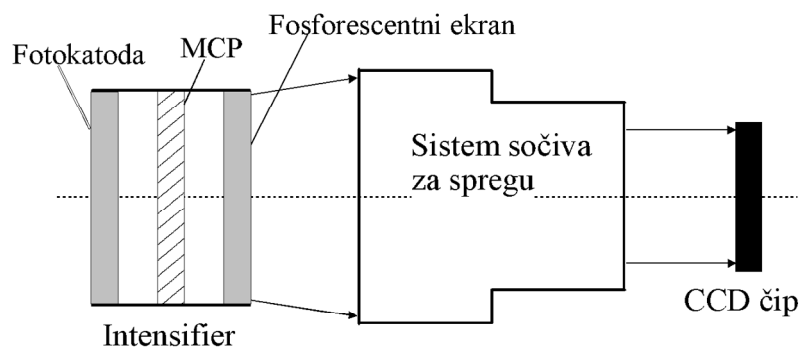
Na Slici 6 su dati i osnovni parametri spektralne linije, poluširina $\Delta\lambda_{1/2}$ i pomeraj d . Poluširina spektralne linije se definiše kao kao širina linije na visini koja odgovara polovini maksimalnog intenziteta linije.

2. Detektor

Detektori zapisuju spektar u spektrografskoj ravni (x, y) i proizvode njegovu digitalnu sliku (x', y') koja se vidi na ekranu i dalje se obrađuje na računaru. Danas su najrasprostranjeniji CCD detektori (charged coupled device). Prostorna rezolucija im je ograničena veličinom zrna, koja se poklapa sa veličinom fotoosetljive ćelije koja se naziva piksel. CCD u svojoj osnovi predstavlja analogno digitalni pretvarač [5]. 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 nije korisna 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.

2.1 ICCD kamera

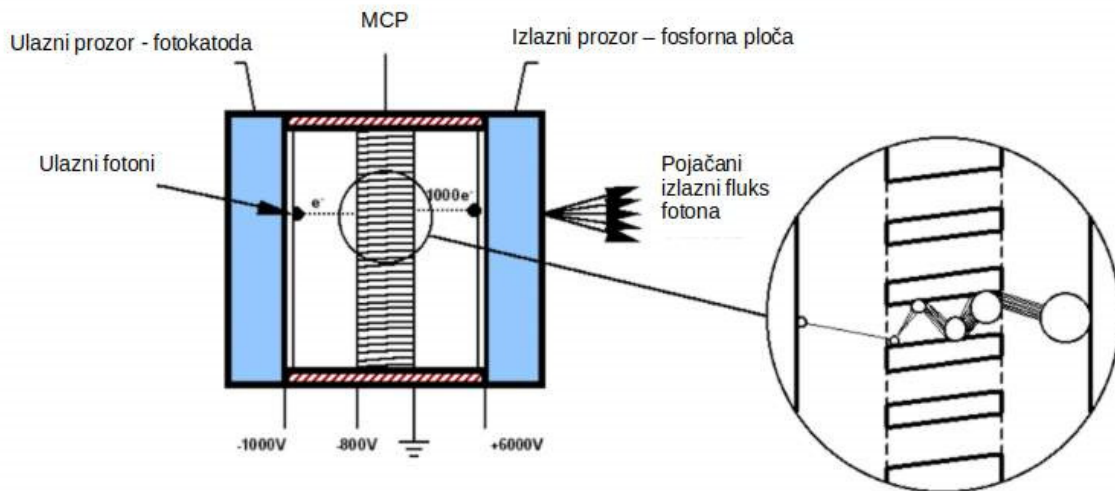
ICCD kamera se sastoji od CCD čipa i pojačavača slike (intensifier). Pojačavač je postavljen ispred CCD senzora, tako da upadno svetlo prvo prolazi kroz pojačavač u kojem se pojačava, a zatim, posredstvom sistema sočiva za sprezanje, pada na CCD čip. Ovo je prikazano na Slici 7. Prednost ove konstrukcije je ta što je svetlost koja pada na CCD već bitno pojačana, pa se time očitavaju jači električni signali. U ovom radu se koristi kamera 4QuikEdig, proizvođača Stanford Computer Optics [6].



Slika 7. Presek ICCD kamere.

2.1.1 Pojačavač slike

Rad pojačavača se zasniva na umnožavanju fotona ulaznog svetlosnog signala. Zahvaljujući tome, postoji mogućnost snimanja pri veoma kratkim vremenima ekspozicije, odnosno mogućnost snimanja veoma brzih procesa. Pojačavač se sastoji od fotokatode, mikrokanalske ploče (MCP) i fosfornog ekrana. Ovo je prikazano na Slici 8.



Slika 8. Šematski prikaz pojačavača slike.[8]

Upadno svetlo prvo pada na fotokatodu, gde dolazi do fotoelektričnog efekta, i na taj način se fotoni upadne svetlosti pretvaraju u slobodne elektrone. Kako bi se obezbedio što veći prinos slobodnih elektrona, potrebno je da materijal fotokatode bude takav, da je za datu talasnu dužinu fotona (odnosno dati deo spektra) efikasni presek za fotoefekat maksimalan. Fotokatoda je sa strane dolazećeg zračenja zaštićena prozorom, kroz koji bi upadni fotoni trebali neometano da prođu. Ovaj prozor se izrađuje od materijala koji je transparentan za zračenje date talasne dužine. Za zračenje iz vidljive oblasti se najčešće izrađuje od kvarca.

Uloga mikrokanalske ploče (MCP) je umnožavanje elektrona koji stižu sa fotokatode. MCP je ploča od materijala visoke otpornosti, u kojoj se nalazi velik broj međusobno paralelnih kristalnih kapilara (mikrokanala), čiji su zidovi sa unutrašnje strane presvučeni slojem poluprovodnika. Mikrokanali su raspoređeni u vidu matrice i prolaze kroz ploču pod određenim uglom u odnosu na njenu površinu. Elektron koji upadne u mikrokanal, zahvaljujući nagibu mikrokanala, neizbežno udara u unutrašnju stranu zida kanala i iz njega izbija sekundarne elektrone. Pošto u svakom mikrokanalu vlada jako električno polje, elektroni se lavinski (kaskadno) umnožavaju (Slika 8.). Prednja i zadnja strana ploče su presvučene slojem metala i predstavljaju elektrode na koje se dovodi napon. Zahvaljujući ovom konstrukcijskom rešenju su svi mikrokanali paralelno vezani, odnosno, između krajeva svakog kanala vlada isti napon koji ubrzava elektrone u kanalu. Rezultujuće električno polje

između elektroda mikrokanalske ploče obično iznosi 1000 V/mm. Umnožavanje elektrona u mikrokanalima ploče ima za posledicu povećanje struje elektrona, što na izlazu MCP dovodi do povećanja vrednosti signala za nekoliko redova veličine [6].

Poslednji element pojačavača je fosforni ekran koji elektrone koji napuštaju MCP pretvara u fotone. Faktor konverzije se kreće od 20 do 200 fotona po upadnom elektronu, i zavisi od vrste fosforescentnog materijala i napona koji ubrzava elektrone. Strana fosfornog ekrana bliža MCP-u je presvučena slojem aluminijuma, kako bi se fotoni koji se emituju u smeru ka MCP, reflektovali ka CCD čipu.

Važna karakteristika ICCD kamere, za koju je zaslužan pojačavač, je gejting (gating) funkcija. Napon koji se nalazi između fotokatode i MCP se naziva gejting naponom. Naime, ukoliko je kamera gejtovana (gated on), šater (elektronska blenda) je otvoren i upadno svetlo se pojačava. Ovo znači da je napon gejta negativan. Tada se fotoelektroni izbijeni sa fotokatode ubrzavaju ka MCP, i kamera je otvorena (gated on). Ukoliko kamera nije gejtovana (gated off), šater je zatvoren, pa se upadna svetlost ne pojačava i ne prenosi do CCD senzora. U ovom slučaju napon ima malu pozitivnu vrednost koja usporava fotoelektrone i samim tim oni ne stižu do MCP što prouzrokuje da je kamera zatvorena [6].

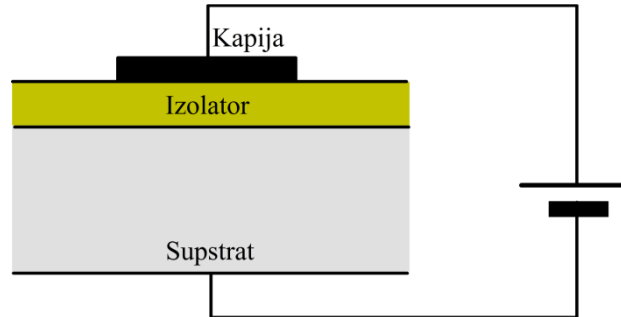
2.1.2 Sistem sočiva za spregu

Svetlo koje se emituje sa fosfornog ekrana je potrebno dovesti do CCD čipa. Kod kamere korišćene u ovom radu to se postiže sistemom sočiva. Moguće je i korišćenje optičkih vlakana (fiber tapping coupling). Oba sistema imaju svoje prednosti i mane. Kod sistema sočiva ne dolazi do fragmentisanja slike, čime je očuvana optička rezolucija i nema distorzije slike. Sistem sočiva je međutim, na nekom konačnom rastojanju od fosforescentnog ekrana, tako da deo emitovanog zračenja neće pasti na sočiva, a samim tim ni na CCD. Taj problem je eliminisan kod snopa optičkih vlakana, ali je u tom slučaju slika fragmentisana, rezolucija smanjena, a javlja se i značajna distorzija. Sistemom sočiva se smanjuju dimenzije slike, tako da odgovaraju dimenzijama čipa. Moderni CCD čip je opremljen mikrosočivima za svaki pojedinačni piksel. Ovo sprečava gubitke, u vidu svetla koje bi padalo na neaktivni međuprostor između piksela CCD čipa.

2.1.3 CCD čip

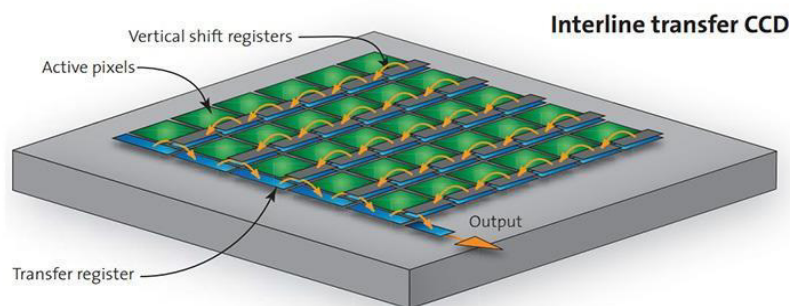
CCD čip se sastoji od više nizova, a svaki niz je sastavljen od više piksela sa zajedničkim substratom. Presek piksela je prikazan na Slici 9. Svaki piksel je MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) kondenzator, tj. sastoji se od tankog sloja izolatora SiO_2 nanešenog na substrat P-tipa i elektrode (kapije) koja naleže na SiO_2 . U odsustvu svetlosti postoji mala i konstantna količina ravnotežnih (tj. termičkih) slobodnih elektrona i šupljina, koji se pod dejstvom napona V_g kreću ka, odnosno od kapije. Kada se piksel osvetli, pod dejstvom

fotona, čija je energija veća od širine zabranjene zone, raskidaju se kovalente veze u poluprovodniku i formira se dodatni broj neravnotežnih slobodnih nosilaca naelektrisanja. Elektroni se grupišu u oblasti ispod kapije, neposredno ispod sloja izolatora. Njihova koncentracija, a time i ukupna količina naelektrisanja u toj oblasti, je (za dati substrat i konstantan napon V_g) srazmerna intenzitetu svetlosti koja pada na piksel.

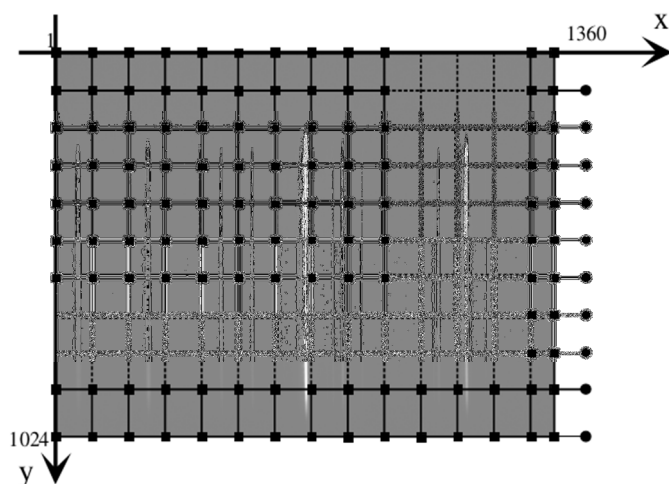


Slika 9. Šematski prikaz piksela.

Stvorena količina naelektrisanja u pojedinačnim pikselima se prikuplja u procesu koji je prikazan na Slici 10, u kojem se periodičnim signalom količina naelektrisanja u diskretnim koracima premešta sukcesivno, od piksela do piksela datog niza, ka izlaznom priključku niza. Očitavanjem signala na izlazu niza u funkciji vremena, se rekonstruiše raspodela generisanog naelektrisanja u pikselima niza, u momentu pre očitavanja. Drugim rečima, generiše se električni signal čija vremenska raspodela odgovara prostornoj raspodeli intenziteta svetlosti koja je padala na taj niz. Ako se uzmu u obzir svi nizovi koji čine čip, dobija se raspodela intenziteta upadne svetlosti po površini CCD čipa. Za kameru upotrebljenu u eksperimentima, izgled čipa je šematski prikazan na Slici 11. Radi lakše orijentacije, pikselima su pridružene x- i y-koordinate [2].



Slika 10. Prikupljanje naelektrisanja iz piksela [10].



Slika 11. Ilustracija matrice piksela CCD čipa. [2]

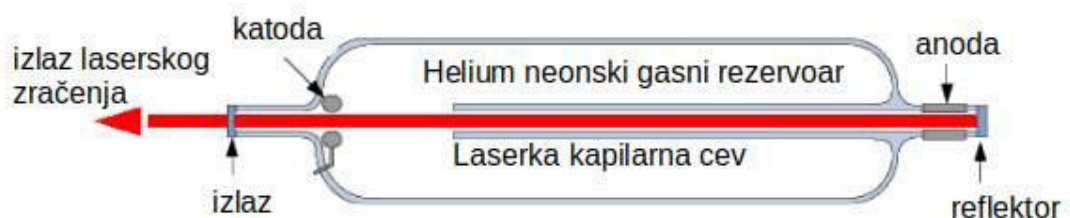
CCD čip se može predstaviti kao matrica svetlosno osetljivih piksela, kao što je prikazano na Slici 11. CCD čip korišćene kamere 4QuikEdig ima 1360 piksela po horizontali (u daljem tekstu se taj pravac smatra x-osom) i 1024 piksela po vertikali (y-osa u daljem tekstu). Pikseli duž x-ose, u stvari, odgovaraju različitim talasnim dužinama zračenja. Pikseli duž y-ose odgovaraju različitim mestima po visini ulazne pukotine. Kada se očitava intenzitet linije na određenoj talasnoj dužini, odnosno pikselu na x- osi, sabiraju se količine naelektrisanja iz svih odabranih piksela koji leže na toj vertikali. Ta, sumarna, količina naelektrisanja čini neki električni signal čija je visina srazmerna intenzitetu zračenja na tom položaju, tj. talasnoj dužini. Dakle, intenzitet detektovanog zračenja na određenom x-pikselu, odnosno talasnoj dužini, je srazmeran ukupnoj količini naelektrisanja u svim odabranim pikselima duž vertikale sa tom x-koordinatom. Ukoliko se iščitavanje izvrši po svim pikselima x-ose, dobija se celokupni deo spektra koji pada na CCD čip.

3. Izvori zračenja korišćeni za kalibraciju

U ovom radu su kao izvori zračenja korišćeni helijum - neonski laser i cev sa molibdenskom šupljom katodom. Ovi izvori su odabrani usled odsustva mehanizama širenja spektralnih linija koje se emituju iz njih. Zahvaljujući tome profil snimljenih spektralnih linija odgovara instrumentalnom profilu korišćenog spektrometra. Kalibracija koja je izvršena u ovom radu podrazumeva da se, za dati položaj difrakcione rešetke, uspostavi veza između položaja spektralne linije na CCD čipu i njene talasne dužine.

3.1 Helijum – neonski laser

Radni gas u helijum - neonskim laserima je mešavina ova dva atomska gasa koji među sobom ne interaguju i samim tim se ne javljaju molekuli, već ostaju u obliku mešavine atoma. Šematski prikaz konstrukcije He - Ne lasera je dat na Slici 12.



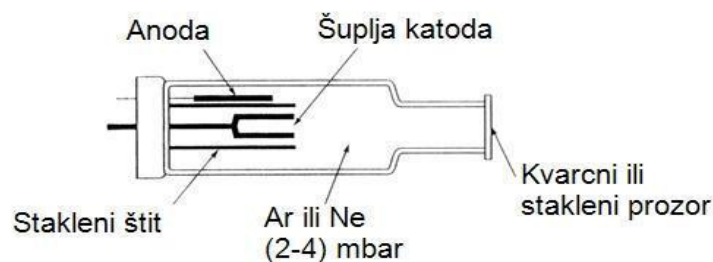
Slika 12. Konstrukcija He - Ne lasera. [11]

Lasersko zračenje nastaje u staklenoj cevi koja duž svoje centralne ose ima kapilarnu cev. Ona služi za usmeravanje električnog pražnjenja. Kao što se vidi na Slici 12, polupropusno i visoko reflektivno ogledalo se nalaze na različitim krajevima cevi, dok je tok struje od katode ka anodi. Lasersko zračenje napušta cev kroz polupropusno ogledalo (izlaz). Mešavina helijuma i neona se nalazi na niskom pritisku. Njihov odnos je obično od 5:1 do 20:1, dok se najčešće koristi srednji odnos od 8:1 [11].

Proces dobijanja svetlosti se zasniva na prelazima unutar atoma Ne. Energija se u cev dovodi pomoću sistema za električno pražnjenje. Usled velikog efikasnog preseka atomi helijuma u sudaru sa elektronima se veoma lako pobuđuju u dva najniža energijska stanja. Sudari elektrona sa atomima neona su neefikasni zbog malog sudarnog preseka. Kako u atomima neona postoje dva energijska nivoa koja su bliska nivoima ekscitovanog helijuma pri međusobnim sudarima dolazi do rezonantnog prenosa energije sa atoma helijuma na atome neona. Sada pobuđeni atomi He prelaze u osnovno stanje, a nakon ponovnog sudara sa elektronim opet prelaze u pobuđeno stanje [12]. Ceo proces se ciklično ponavlja dok traje električno pražnjenje kroz cev. Na taj način se u određenim energijskim stanjima postiže inverzna naseljenost u odnosu na niža stanja atoma neona. Zahvaljujući tome ispunjen je uslov za stimulisanu emisiju tako da nastaje lasersko zračenje. U ovom slučaju se iz rezonatora propušta samo zračenje talasne dužine 632.8 nm.

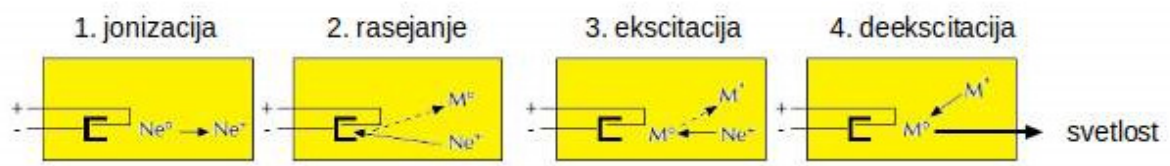
3.2 Cev sa šupljom katodom

Šematski prikaz cevi sa šupljom katodom je prikazan na Slici 13. Ovaj svetlosni izvor se sastoji od katode i anode koje su smeštene u staklenu cev ispunjenu inertnim gasom [13]. U slučaju cevi korišćene u ovom radu, to je bio neon. Katode se izrađuju od materijala čiji atomi emituju zračenje u različitim spektralnim oblastima. Nasuprot katode se nalazi kvarcni prozor, za one elemente koji emituju u bliskoj ultraljubičastoj oblasti, ili stakleni prozor, za one elemente koji emituju u vidljivoj oblasti spektra.



Slika 13. Šematski prikaz cevi sa šupljom katodom. [14]

Usled razlike potencijala između anode i katode, dolazi do jonizacije inertnog gasa. Stvoreni joni „bombarduju“ unutrašnju površinu šuplje katode, te dolazi do izbivanja atoma ispitivanog elementa [14]. Na taj način se formira oblak atoma materijala katode unutar šupljine. Usled međusobnih sudara atoma u oblaku i sudara sa jonima inertnog gasa, dolazi do ekscitacije, a zatim deekcitacije i emisije zračenja. Ovaj proces je prikazan na Slici 14.



Slika 14. Proces emisije svetlosti u cevi sa šupljom katodom. [15]

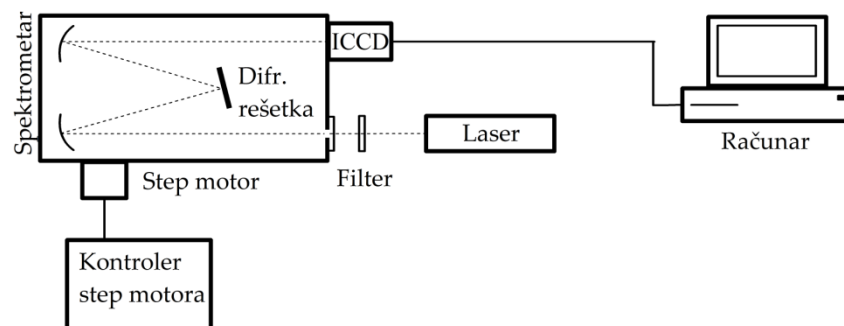
Postoje cevi sa šupljom katodom od različitih elemenata, metala i oksida metala. U ovom radu je korišćena cev sa katodom od molibdena punjena neonom. Pri radu sa cevi sa šupljom katodom treba voditi računa o maksimalnoj dozvoljenoj jačini struje, koja je navedena na samoj cevi i ne sme se prekoračiti.

4. Kalibracija optičkog sistema po talasnim dužinama

Kalibracija je izvršena u dva koraka. Prvo je sistem kalibrisan pomoću He-Ne lasera u uskom opsegu talasnih dužina, a zatim je izvršena kalibracija pomoću cevi sa molibdenskom šupljom katodom u celoj oblasti vidljivog spektra.

4.1 Kalibracija pomoću He-Ne lasera

Šematski prikaz eksperimentalne postavke je dat na Slici 15. Zračenje iz He-Ne lasera prolazi kroz neutralni filter radi slabnjenja intenziteta, vodi se na ulaz spektrometra i nakon prolaska kroz spektrometar pada na ICCD kameru. Napon na MCP je iznosio 760 V, a naponsko pojačanje 10 dB. Vreme ekspozicije je bilo 10 μ s.

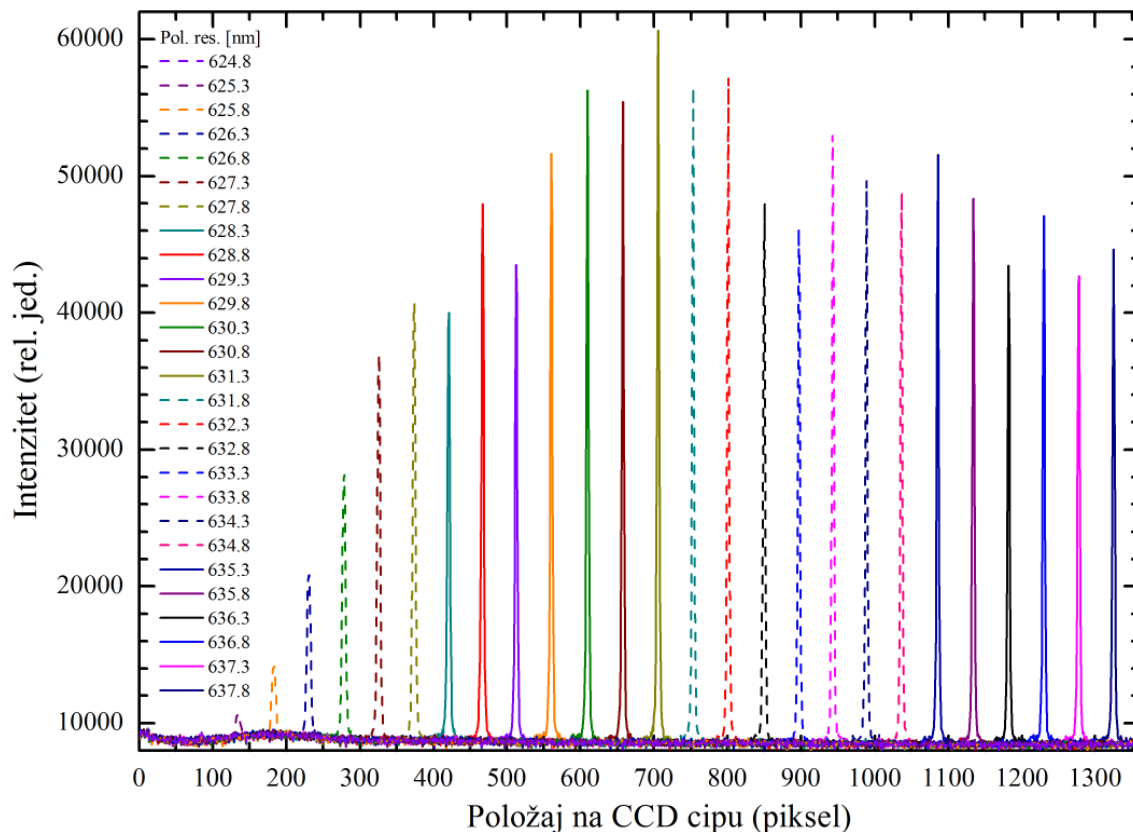


Slika 15. Eksperimentalna postavka korišćena za kalibraciju sistema pomoću He-Ne lasera.

Lasersko zračenje je izabrano za kalibraciju usled vrlo male širine spektralne linije, tako da je snimljeni profil spektralne linije isključivo instrumentalni. Kako He-Ne laser emituje samo spektralnu liniju 632.8 nm, u snimljenom spektru se ne mogu javiti dodatne spektralne linije koje bi otežavale identifikaciju. Osim toga profil ove linije je praktično samo instrumentalni profil.

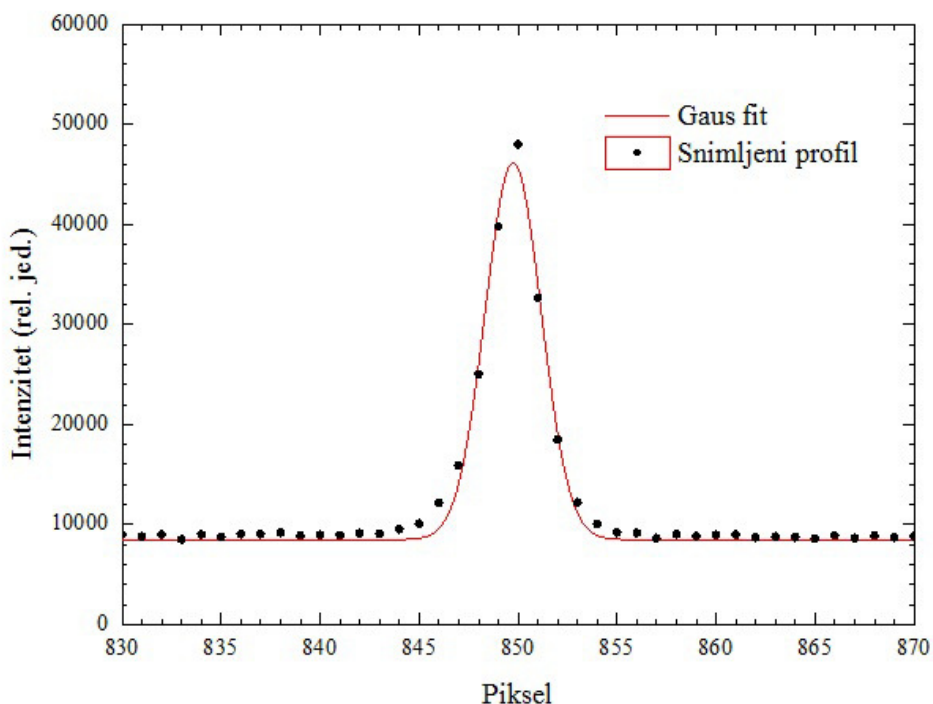
Navedena spektralna linija je snimana pri različitim položajima difrakcione rešetke i na taj način je pomerana duž CCD čipa. Početna pozicija rešetke je odgovarala talasnoj dužini ove spektralne linije, a maksimum profila linije je bio na 850. pikselu. Počevši od te pozicije, rešetka je pomerana u 11 koraka ka većim i u 16 koraka ka manjim talasnim dužinama. Pomeranje rešetke je vršeno step motorom, a korak pomeranja je bio 0.5 nm, što je podešeno

na kontroleru step motora. Položaj rešetke je očitavan na brojaču monohromatora. Za svaku poziciju difrakcione rešetke je načinjeno 100 snimaka spektralne linije, a rezultujući profil je srednja vrednost tih snimaka. Intenzitet svakog snimka je očitavan iz visinskog intervala od 375. do 398. piksela. Profili spektralnih linija, snimljeni na navedenim položajima difrakcione rešetke su prikazani na Slici 16. Na ovoj slici se može primetiti da se sa pomeranjem položaja difrakcione rešetke ka većim talasnim dužinama, profil posmatrane spektralne linije pomera ka većim rednim brojevima piksela na CCD čipu. Osim toga sa slike se vidi i da osetljivost različitih kanala CCD čipa nije jednaka.



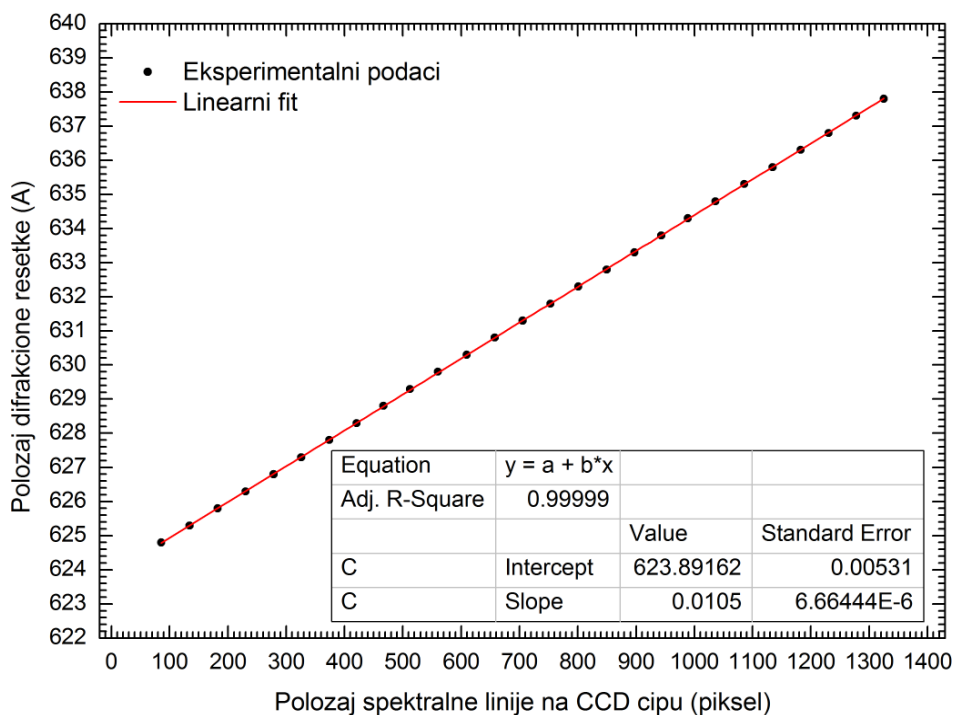
Slika 16. Spektralna linija Ne 632.8 nm na različitim položajima na CCD čipu.

Intenziteti snimljenih profila nisu normirani, s obzirom da je u ovom delu rada bilo potrebno odrediti samo položaj centra linije. Da bi se to postiglo, na svaki snimljeni profil spektralne linije je fitovana Gausova funkcija. Kao rezultat fita se tada dobija vrednost položaja centra spektralne linije, izražena u pikselima. Primer fitovanog profila, za položaj rešetke od 632.8 nm, je dat na Slici 17.



Slika 17. Fitovan profil spektralne linije, pri položaju rešetke od 632.8 nm.

S obzirom da su položaji difrakcione rešetke u nm poznati, a iz fita određene vrednosti centra linije u pikselima, tj. njen položaj na CCD čipu, moguće je grafički predstaviti međusobnu zavisnost ove dve veličine, što je prikazano na Slici 18.



Slika 18. Zavisnost talasne dužine od rednog broja piksela na CCD čipu.

Fit eksperimentalnih vrednosti pokazuje linearnu zavisnost, sa vrlo malim odstupanjem podataka. Osim toga, nagib fitovane linearne funkcije predstavlja količnik vrednosti nekog spektralnog intervala u nm i vrednosti istog tog intervala u pikselima. Ovaj parametar je u daljem tekstu označen sa P , izražen je u nm po pikselu. Na osnovu dobijene zavisnosti prikazane na Slici 18, parametar P iznosi 0.0105 nm/piksel. Vrednost parametra P zavisi od položaja difrakcione rešetke, pa dobijena vrednost važi samo za uzak interval talasnih dužina koje su posmatrane u ovom delu rada, tj. za položaj difrakcione rešetke u okolini 632.8 nm.

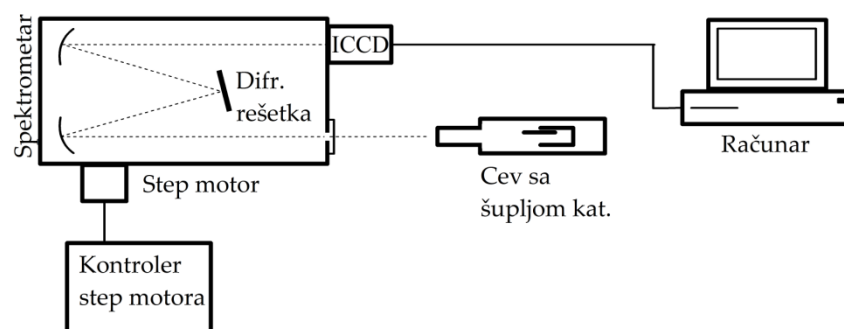
Pošto je poznata vrednost parametra P , moguće je napisati jednačinu:

$$\lambda = (x - 680.5) \cdot P + \lambda_R \quad (4)$$

pomoću koje se na osnovu položaja spektralne linije na CCD čipu, x , uz poznat položaj difrakcione rešetke, λ_R , može izračunati talasna dužina te spektralne linije, λ [3].

4.2 Kalibracija po talasnim dužinama pomoću molibdenske šuplje katode

Da bi se izvršila kalibracija optičkog sistema sa ICCD kamerom po talasnim dužinama u celom spektralnom opsegu za koji se ovaj sistem koristi, korišćene su spektralne linije emitovane iz cevi sa molibdenskom šupljom katodom. Šematski prikaz korišćene eksperimentlane postavke je dat na Slici 19.



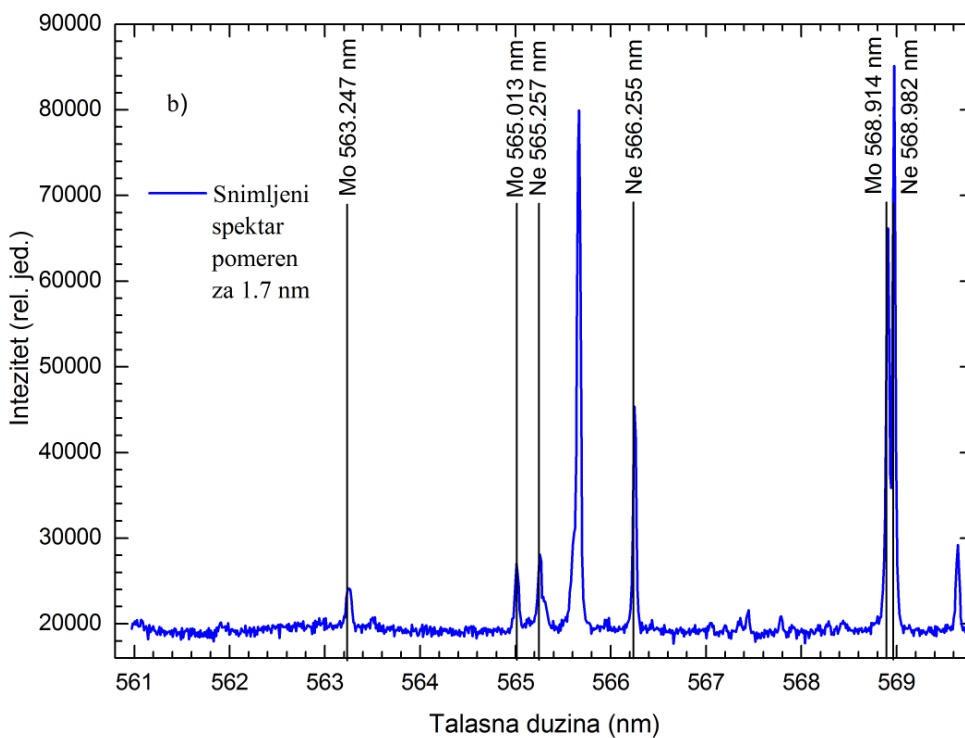
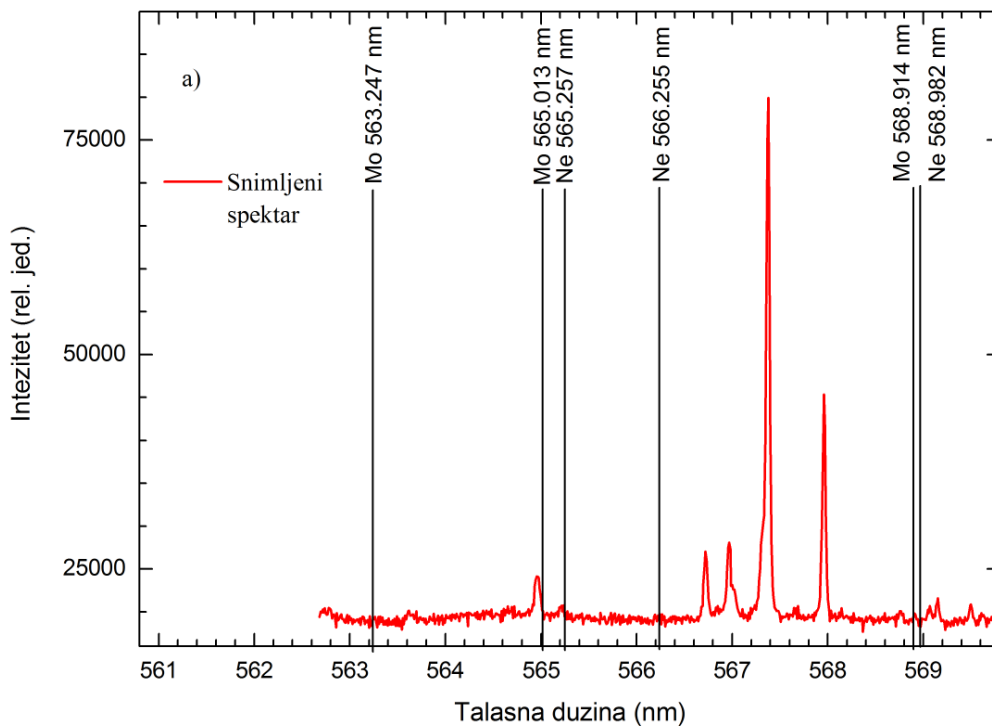
Slika 19. Eksperimentalna postavka korišćena za kalibraciju sistema pomoću cevi sa molibdenskom šupljom katodom.

Spektri molibdenske šuplje katode su snimani pri naponu na mikrokanalnoj ploči od 760 V, pojačanju na CCD čipu od 10 dB, a snimljeni intenziteti su očitavani iz visinskog intervala od 370. do 420. piksela. Spektralni opseg od 300 nm do 720 nm je snimljen u 15

delova, pri čemu je za svaki snimak difrakciona rešetka pomerana za 30 nm. Vreme ekspozicije je menjano u zavisnosti od intenziteta spektralnih linija u datom delu spektra, tako da je izbegnuta saturacija, a postignut dobar odnos signala i šuma. Intenziteti spektralnih linija nisu normirani, niti je uzeta u obzir korekcija na spektralnu osetljivost sistema, jer je za kalibraciju po talasnim dužinama potrebno odrediti samo položaj centra spektralne linije. Za spektralne linije emitovane iz šuplje katode su mehanizmi širenja zanemarljivi, pa snimljeni profili ovih linija predstavljaju instrumentalni profil spektrometra i imaju oblik Gausove funkcije.

Položaji snimljenih spektralnih linija dobija se u pikselima i prvo je to potrebno preračunati u talasne dužine svih snimljenih spektralnih linija. To je učinjeno pomoću kalibracione jednačine (4). Iako ova kalibracija nije precizna u celom opsegu talasnih dužina, u ovom delu postupka su dovoljne i orijentacione vrednosti talasnih dužina spektralnih linija.

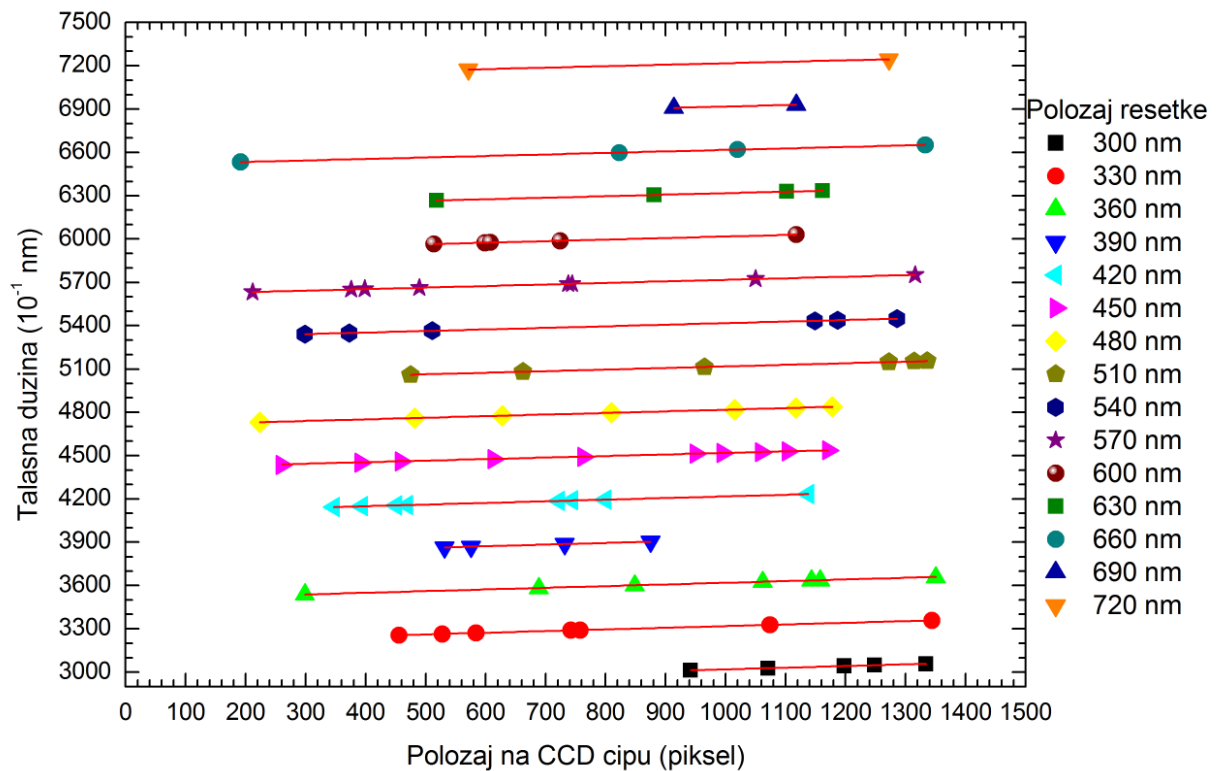
Zatim je potrebno identifikovati snimljene spektralne linije, odnosno utvrditi kojim emiterima pripadaju i koje su njihove tačne talasne dužine. S obzirom da je cev korišćene šuplje katode ispunjena neonom, u snimljenim spektrima se, pored molibdenskih, javljaju i neonove spektralne linije. Tačne vrednosti talasnih dužina spektralnih linija molibdena i neona su preuzete iz NIST-ove baze podataka [16]. Identifikacija snimljenih spektralnih linija je, zatim, izvršena pomoću računarskog programa koji omogućava istovremeni prikaz snimljenog spektra (u prostoru talasnih dužina) i tabličnog položaja spektralnih linija prema [16]. Primer jednog dela spektra, snimljenog na položaju difrakcione rešetke od 570 nm, je dat na Slici 20. Tablične talasne dužine spektralnih linija Mo i Ne su prikazane vertikalnim linijama. Snimljeni profili spektralnih linija ne poklapaju sa tabličnim vrednostima (Slika 20 a). Razlog tome je gruba prvobitna kalibracija i nesavršenost mehaničkog prenosa, odnosno odstupanje brojne skale na monohromatoru od stvarnog položaja difrakcione rešetke. Zato je potrebno pomeriti snimljeni spektar dok se njegove spektralne linije ne poklope sa tabličnim vrednostima svojih talasnih dužina (Slika 20 b). U slučaju primera na Slici 20, spektar je bilo potrebno pomeriti za 1.7 nm.



Slika 20. Deo snimljenog spektra pri položaju difrakcione rešetke od 570 nm, a) pre i b) nakon pomeranja za 1.7 nm.

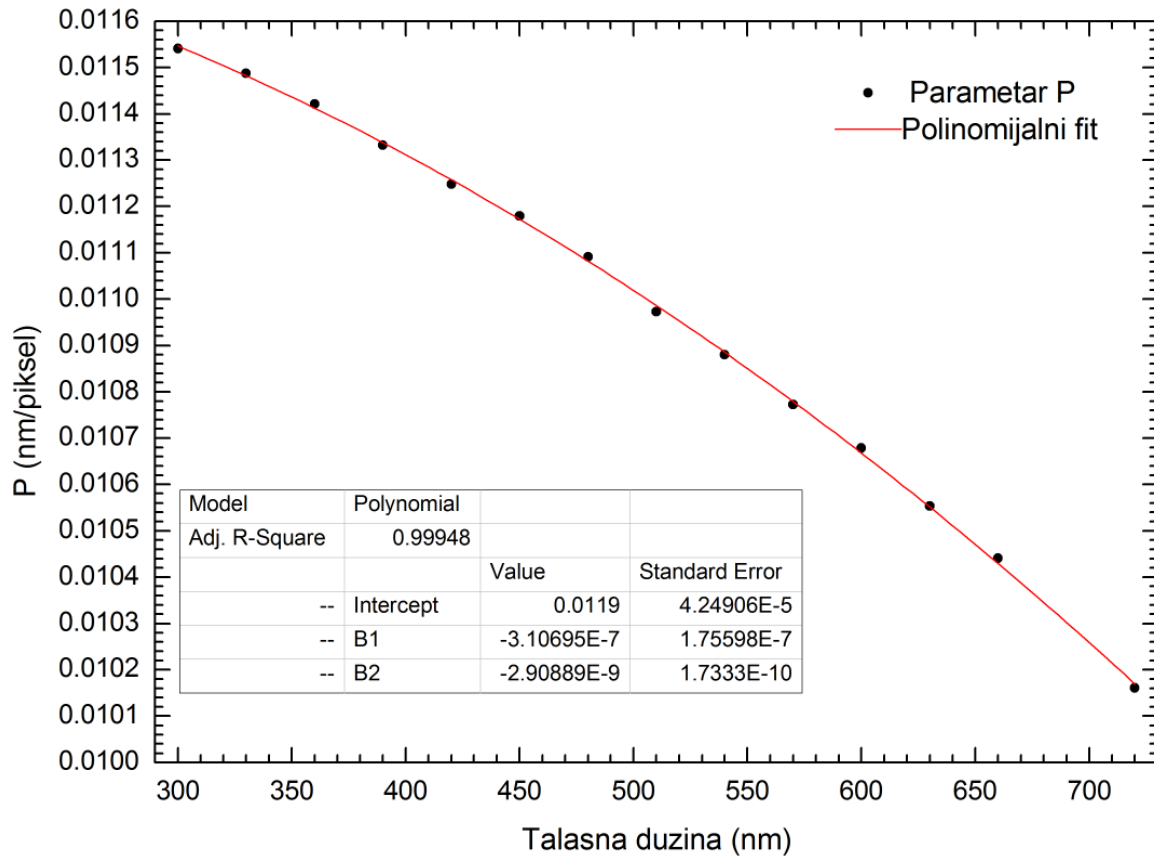
Na ovaj način je izvršena identifikacija spektralnih linija Mo i Ne u spektrima snimljenim pri svakom položaju difrakcione rešetke, od 300 nm do 720 nm.

Da bi se izvršila kalibracija po talasnim dužinama, potrebno je odrediti položaj centra svih identifikovanih linija u pikselima u snimljenim spektrima. Ovo je postignuto fitovanjem Gausove funkcije na njihove eksperimentalne profile, isto kao što je to učinjeno i kod kalibracije pomoću He-Ne lasera. Zatim je za svaki položaj difrakcione rešetke nacrtana zavisnost talasne dužine identifikovanih spektralnih linija (izražene u nm) od njihovih položaja u pikselima. Dobijene zavisnosti su potom fitovane linearnim funkcijama, što je prikazano na Slici 21.



Slika 21. Zavisnost talasnih dužina identifikovanih spektralnih linija od njihovih položaja na CCD čipu, pri različitim položajima difrakcione rešetke. Punim linijama su predstavljeni linearni fitovi dobijenih zavisnosti.

Na osnovu nagiba fitovane linearne funkcije se za svaki položaj rešetke dobija vrednost parametra P , tj. broj nm po jednom pikselu. Zavisnost parametra P od talasne dužine je prikazana na Slici 22.



Slika 22. Zavisnost parametra P od talasne dužine.

Na dobijenu zavisnost je fitovan polinom drugog reda. Iz parametara fita se dobija jednačina pomoću koje se za bilo koji položaj difrakcione rešetke, λ_R , (u opsegu od 300 nm do 720 nm) može izračunati vrednost parametra P :

$$P = 0.011901 - 3.107 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda_R - 2.909 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_R^2 \quad (5)$$

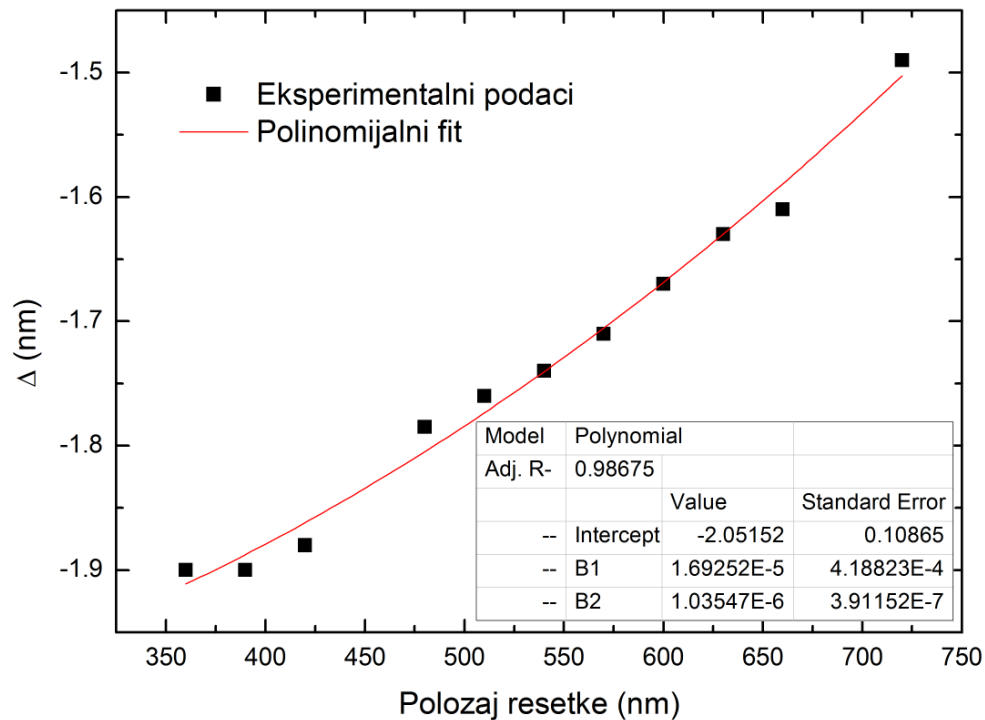
Kada se vrednost P uvrsti u jednačinu (4) dobija se izraz:

$$\lambda = (x - 680.5) \cdot (0.011901 - 3.107 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda_R - 2.909 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_R^2) + \lambda_R \quad (6)$$

Ovaj izraz omogućava da se spektar, koji je snimljen pri datom položaju rešetke, iz piksela prevede u talasne dužine. Na taj način je izvršena kalibracija optičkog sistema po talasnim dužinama.

Ova kalibracija, međutim, ne koriguje pomeraj spektra, Δ , u odnosu na prave vrednosti talasnih dužina, kao što je to bio slučaj u primeru na Slici 20. Ovo je posledica pozicioniranja CCD čipa u izlaznoj ravni spektrometra. U ovom radu je učinjen pokušaj da se taj pomeraj koriguje. Ukoliko se uzme da prosečna vrednost parametra P iznosi oko 0.0105 nm/pixel, a CCD čip ima 1360 piksela po x-osi, može se proceniti da ceo čip obuhvata spektralni opseg od oko 14 nm. Prosečna vrednost za koju je potrebno pomeriti snimljeni spektar da bi se poklopilo sa stvarnim vrednostima talasnih dužina je oko 1.7 nm. U poređenju sa spektralnim intervalom CCD čipa to je relativno velika vrednost pomeraja i može da oteža identifikaciju

spektralnih linija. Ovde je za svaki položaj difrakcione rešetke utvrđen iznos za koji je bilo potrebno pomeriti spektar. Dobijena zavisnost tog pomeraja od položaja difrakcione rešetke, tj. talasne dužine, je prikazana na Slici 23.



Slika 23. Zavisnost pomeraja snimljenog spektra od položaja difrakcione rešetke.

Da bi se dobijena zavisnost aproksimirala matematičkom formulom, na eksperimentalne tačke je fitovan polinom drugog reda. Parametri fita su prikazani na Slici 23. Na osnovu parametara fita se može napisati jednačina koja omogućava približno izračunavanje pomeraja za željeni položaj difrakcione rešetke:

$$\Delta = -2.05152 + 1.6925 \cdot 10^{-5} \lambda_R + 1.0355 \cdot 10^{-6} \lambda_R^2 \quad (7)$$

Ova jednačine ne daje potpuno tačne vrednosti potrebnog pomeraja, ali ga značajno smanjuje, tako da potrebne korekcije spektra ne prevazilaze nekoliko delova nm, što olakšava identifikaciju spektralnih linija.

Potpuna jednačina za kalibraciju sistema po talasnim dužinama tada glasi:

$$\lambda = (x - 680.5) \cdot (0.011901 - 3.107 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda_R - 2.909 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda_R^2) + \lambda_R + \Delta \quad (8)$$

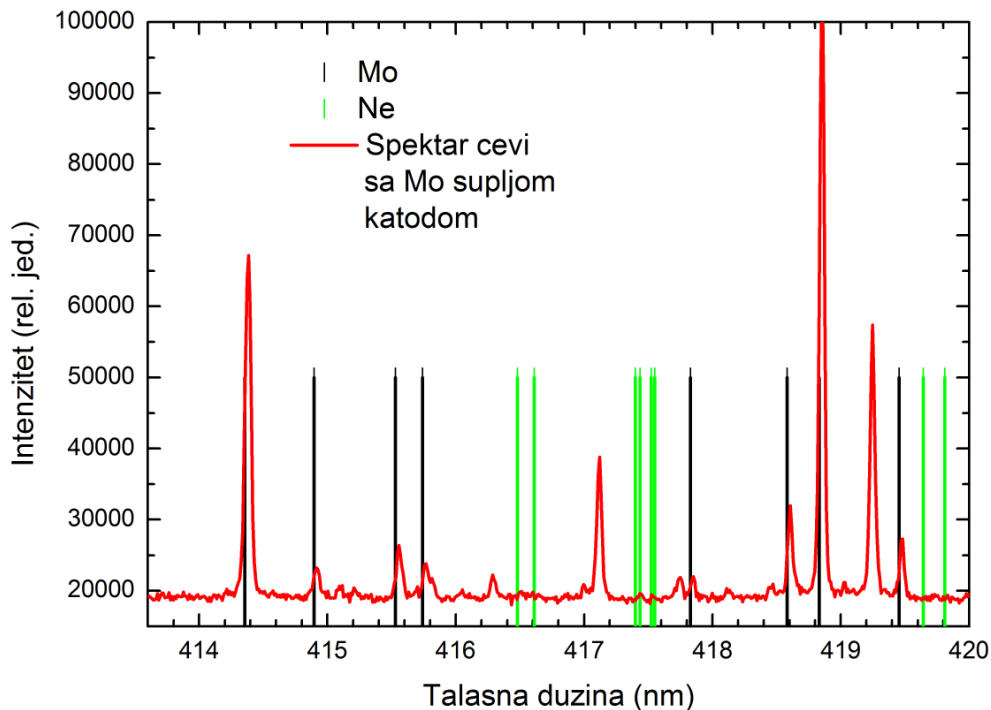
Ova kalibracija se može koristiti u širokom spektralnom intervalu, od 300 nm do 720 nm, u velikoj meri koriguje pomeranje spektra i precizno pretvara interval u pikselima na CCD u interval talasnih dužina.

4.3 Rezultati kalibracije

Kalibracija optičkog sistema, koja je izvršena u ovom radu i predstavljena u poglavljima 4.1. i 4.2 je nekoliko puta proverena u eksperimentalnom radu laboratorije i u potpunosti koriguje nedostatke stare kalibracije koji su se javili nakon servisa ICCD kamere.

Postupak opisan u poglavlju 5.1. je gruba kalibracija i odnosi se samo na položaj difrakcione rešetke od 6328 Å. Dobijeni parametar P , koji u ovom slučaju iznosi 0.0105 nm/piksel, se ipak vrlo dobro slaže sa vrednošću parametra P na istoj talasnoj dužini, koja se dobija iz kalibracije pomoću molibdenske cevi sa šupljom katodom. To se može videti na osnovu zavisnosti prikazane na Slici 22. Kalibracija pomoću He-Ne lasera je dakle precizna, ali primenljiva samo na vrlo uskom spektralnom intervalu.

Kalibracija koja je izvršena pomoću molibdenske šuplje katode je precizna i primenljiva za celokupni spektralni interval koji se koristi u laboratoriji za spektroskopiju plazme. Primer dela spektra koji je preračunat u prostor talasnih dužina primenom kalibracije dobijene u ovom radu (jednačina 8) je dat na Slici 24.



Slika 24. Primer dela spektra (6 nm) snimljenog pri položaju difrakcione rešetke od 420 nm. Spektar je iz prostora piksela preračunat u prostor talasnih dužina pomoću relacije (8). Pomeraj preračunatog spektra u odnosu na stvarne talasne dužine spektralnih linija je 0.045 nm.

Ova kalibracija ispravno pretvara rastojanje između spektralnih linija, pri prevođenju snimljenog spektra iz prostora piksela u prostor talasnih dužina. Osim toga, uključivanjem veličine Δ , koja se interpolira za svaki položaj rešetke (jednačina (7)), u kalibracionu jednačinu (8), se koriguje pomeranje spektra. Kao što se može videti na Slici 24, pomeraj za prikazani položaj difrakcione rešetke sada iznosi 0.045 nm, umesto 1.85 nm koliko je to bio slučaj pre ove kalibracije. Iako ova korekcija nije u potpunosti precizna, i podložna je promenama usled mehaničkog prenosa, ipak u velikoj meri smanjuje iznos za koji je potrebno pomeriti snimljeni spektar pri identifikaciji spektralnih linija (videti Sliku 20). To olakšava postupak identifikacije, pogotovo kada u snimljenom spektru postoji veliki broj spektralnih linija.

Zaključak

U ovom radu je izvršena nova kalibracija optičkog sistema za spektroskopiju plazme u Laboratoriji za fizičku elektroniku, Departmana za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Potreba za novom kalibracijom po talasnim dužinama se javila nakon popravke ICCD kamere koja se koristi kao detektor zračenja. Da bi kamera mogla biti servisirana, bilo je potrebno demontirati je sa spektrometa, a zatim, nakon servisa, ponovo je montirati i postaviti u položaj za snjimanje. Pored toga, pri servisu kamere je izvršeno i refokusiranje CCD čipa, što je poboljšalo osobine kamere, ali ponovo unelo odstupanja u odnosu na prehodno stanje celokupnog optičkog sistema. S obzirom da se pri spektroskopiji plazme posmatraju vrlo uske spektralne linije, čijim širinama znatno doprinosi instrumentalno širenje, kao i njihovi pomeraji, poremećaj optičkog sistema usled montaže kamere i odstupanja njenog novog položaja od starog, mogu znatno uticati na rezultate merenja. Navedene promene su dovele do toga da kalibracija optičkog sistema, koja je izvršena pre servisiranja kamere, a data u radovima [2, 3, 4], više nije bila pogodna za spektroskopska merenja. Jedan od nedostataka koji je bilo potrebno otkloniti je neodgovarajuća kalibracija optičkog sistema po talasnim dužinama, što predstavlja cilj ovog rada.

Radi kalibrisanja optičkog sistema po talasnim dužinama kao izvori svetlosti korišćeni su He-Ne laser i cev sa molibdenskom šupljom katodom. Pomoću He-Ne lasera je izvršena prvobitna kalibracija, na položaju difrakcione rešetke od 632.8 nm. Pri tome je određena vrednost parametra koji pokazuje vrednost jednog piksela u nm i ona iznosi 0.0105 nm/piksel. Ova vrednost se može koristiti samo za navedeni položaj difrakcione rešetke i uski spektralni interval.

Kalibracija pomoću molibdenske šuplje katode je izvršena za širok spektralni opseg (od 300 nm do 720 nm). Emisioni spektar šuplje katode je sniman u koracima od po 30 nm, i za svaki položaj difrakcione rešetke je određena vrednost jednog piksela u nm. Zavisnost ovog parametra od talasne dužine (u celokupnom spektralnom opsegu) je fitovana polinomom drugog reda i dobijena funkcija predstavlja osnovu kalibracije po talasnim dužinama. Osim toga je izvršena i korekcija pomeraja spektra preračunatog u prostor talasnih dužina u odnosu na stvarne talasne dužine.

Literatura

1. G. R. Harrison, R. C. Lord, J. R. Loofbourow, Practical Spectroscopy, Prentice-Hall (1948).
2. Lazar Gavanski: Instrumentalni profili optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara, master rad, Novi Sad, 2011
3. Miloš Mitrović: Kalibracija optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara, diplomski rad, Novi Sad, 2009
4. Šandor Hegediš: Određivanje osetljivosti optičkog sistema sa ICCD kamerom, diplomski rad, Novi Sad, 2009
5. Hans-Joachim Kunze: Introduction to Plasma Spectroscopy, Springer, Berlin – Heidelberg, 2009
6. Operating instructions for digital intensified CCD video camera systems 4 Picos dig 4 Quik E dig, Paul Hoess KG, Stanford Computer Optics, Inc. (08/207)
7. J.M. Lerner and A. Thevenon: The Optics of Spectroscopy – A Tutorial, Jobin Yvon, 1988
8. <https://www.lambertinstruments.com/technologies-1/2014/12/4/second-generation-image-intensifier>
9. <https://stanfordcomputeroptics.com/technology/high-speed-shutter.html>
10. <https://www.stemmer-imaging.com/en-gb/knowledge-base/ccd/>
11. <https://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/He-Ne-laser>
12. <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/heliumneonlaser.html>
13. https://simple.wikipedia.org/wiki/Hollow-cathode_lamp
14. <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/osnovni-principi-atomske-apsorpcione-spektrofotometrije>
15. <http://chem-net.blogspot.com/2013/09/light-sources-for-atomic-absorption.html>
16. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

Biografija

Bellona Bles je rođena 5. 10. 1995. godine u Novom Sadu. Pohađala je osnovnu školu “Sonja Marinković” u Zrenjaninu. Godine 2014. je završila srednju školu “Zrenjaninsku gimnaziju” i upisala Prirodno Matematički fakultet u Novom Sadu, istraživački smer.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR
Identifikacioni broj:
IBR
Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD
Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ
Vrsta rada: Diplomski rad
VR
Autor: Bellona Bles (124/14)
AU
Mentor: Dr Lazar Gavanski
MN
Naslov rada: Kalibracija optičkog sistema za spektroskopiju plazme
NR
Jezik publikacije: srpski (latinica)
JP
Jezik izvoda: srpski/engleski
JI
Zemlja publikovanja: Srbija
ZP
Uže geografsko područje: Vojvodina
UGP
Godina: 2019
GO
Izdavač: Autorski reprint
IZ
Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,
MA Novi Sad
Fizički opis rada: 4 poglavlja/29 stranica/24 slike i grafikona/16 referenci
FO
Naučna oblast: Fizika
NO
Naučna disciplina: Fizika atoma, molekula i jonizovanih gasova
ND
Predmetna odrednica/ ključne
reči: ICCD kamera, spektroskopija plazme, kalibracija
PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: Izvršena je kalibracija po talasnim dužinama optičkog sistema
IZ za spektroskopiju plazme nakon ponovnog pozicioniranja
ICCD kamere.

Datum prihvatanja teme od NN

veća:

DP

Datum odbrane: 29.03.2019.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Prof. dr Stevica Đurović, redovni profesor, PMF u Novom
Sadu

član: Doc. dr Mirjana Šiljegović, docent, PMF u Novom Sadu

član: Doc. dr Lazar Gavanski, docent, PMF u Novom Sadu

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO
Identification number:
INO
Document type: Monograph publication
DT
Type of record: Textual printed material
TR
Content code: Final paper
CC
Author: Bellona Bles (124/14)
AU
Mentor/comentor: Dr Lazar Gavanski
MN
Title: Calibration of the optical system for plasma spectroscopy
TI
Language of text: Serbian (Latin)
LT
Language of abstract: English
LA
Country of publication: Serbia
CP
Locality of publication: Vojvodina
LP
Publication year: 2019
PY
Publisher: Author's reprint
PU
Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića
PP 4, Novi Sad
Physical description: 4 chapters/29 pages/24 figures/16 references
PD
Scientific field: Physics
SF
Scientific discipline: Physics of atoms, molecules and ionized gasses
SD
Subject/ Key words: ICCD camera, plasma spectroscopy, calibration
SKW
UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD
Note: none
N
Abstract: The wavelength calibration of the optical system for plasma
AB spectroscopy, has been done after repositioning the ICCD
camera .

Accepted by the Scientific
Board:

ASB

Defended on: 29.03.2019.

DE

Thesis defend board:

DB

President: Dr Stevica Đurovic, full professor, Faculty of Sciences, Novi
Sad

Member: Dr Mirjana Šiljegović, assistant professor, Faculty of Sciences,
Novi Sad

Member: Dr Lazar Gavanski, assistant professor, Faculty of Sciences,
Novi Sad