



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET



Snimanje osetljivosti duž piksela CCD kamere ILX526A

Diplomski rad

Mentor:

Doc. dr Teodora Gajo

Student:

Magdalena Rajić

Novi Sad 2020.

1. Uvod.....	3
2. Monohromatori.....	5
2.1. Monohromatori Černi-Tarnerovog tipa	7
2.2. McPherson 2051 monohromator	8
3. Detektori.....	10
3.1. Fotomultiplikatori	10
3.2. CCD kamera	12
4. Izvori svetlosti	17
4.1. Cev sa šupljom katodom	17
5. Eksperimentalna postavka, postupak snimanja i rezultati merenja	19
5.1. Kalibracija po talasnim dužinama.....	20
5.2. Određivanje spektralne osetljivosti pomoću standardne lampe	21
5.3. Određivanje osetljivosti duž niza piksela CCD čipa	22
6. Zaključak.....	24
7. Literatura.....	25
8. Biografija	27

1. Uvod

Spektroskopija predstavlja oblast nauke (fizike, hemije, biologije...) koja se bavi proučavanjem međudelovanja elektromagnetnog zračenja i materije. Ovakva interakcija zavisi od talasne dužine zračenja, prema tome postoje različite vrste spektroskopije. Ako je zračenje emitovano od strane atoma i molekula pod različitim fizičkim uslovima radi se o emisionoj spektroskopiji. Ukoliko su spektri nastali pri prolasku zračenja kroz materiju reč je o apsorpcionoj spektroskopiji.

Istorijski gledano, počeci spektroskopije potiču od proučavanja disperzije vidljive svetlosti na prizmi, koja se vremenom poboljšavala. Danas, eksperimentalna postavka za spektroskopska merenja čini izvor zračenja, spektralni uređaj i detektor.

U Laboratoriji za fizičku elektroniku novosadskog Prirodno-matematičkog fakulteta glavna tema izučavanja je spektroskopija plazme. U spektroskopiji plazme se ispituju karakteristike plazme na osnovu analize zračenja koje se emituje u atomskim procesima u plazmi. Spektralne linije koje se emituju iz plazme podležu raznim mehanizmima širenja. U slučaju izvora plazme novosadske laboratorije širenje usled pritiska se svodi na Štarkovo širenje. U novosadskoj Laboratoriji se koriste 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 $1 \mu F$, između elektroda T-cevi.

Spektroskopski sistem koji se proučava u ovom radu se sastoji od monohromatora McPherson 2051 sa step motorom i linearne CCD kamere ILX526A proizvođača *Sony*. Cilj ovog diplomskog rada jeste dobijanje informacija o odzivu samog CCD senzora, odnosno dobijanje informacije o visini detektovanog signala na različitim mestima senzora ukoliko se osvetljava svetlošću konstantnog intenziteta i tačno određenog intervala talasnih dužina.

U prvoj glavi je detaljno opisan monohromator sa difrakcionom rešetkom, koja se koristi u eksperimentu. Druga glava je posvećena opisu procesa rada detektora (fotomultiplikator i CCD kamera), od kojih je detaljnije opisana karakterizacija i mehanizam rada kod CCD kamere. U trećoj glavi je dat opis cevi sa šupljom katodom, koja je korišćena u ovom eksperimentu. Četvrta glava sadrži opis izvršenog eksperimenta. I na kraju je data interpretacija dobijenih rezultata i odatle izvedeni zaključci.

2. Monohromatori

Monohromator je optički uređaj pomoću kog se može izdvojiti uži opseg svetlosti iz šireg raspona talasnih dužina dostupnih na svom ulazu. Postoje različiti tipovi monohromatora, koji se mogu podeliti na osnovu disperzionog elementa i postavke optičkog sistema.

Jedna od osnovnih optičkih karakteristika disperzionih elemenata jeste disperzija. Ona prikazuje u kojoj meri razlaže svetlost prema talasnim dužinama. Može biti ugaona ili linearna disperzija. Ugaona se definiše kao $\frac{d\theta}{d\lambda}$, koja meri promenu ugla skretanja θ upadnog zraka svetlosti sa promenom talasne dužine λ . Linearna disperzija je definisana kao $\frac{dl}{d\lambda}$, koja daje stvarnu razliku dl između dveju bliskih linija u spektru, čija je razlika talasnih dužina $d\lambda$. Najčešće se u praksi koristi inverzna linearna disperzija $\frac{d\lambda}{dl}$, izražena u $\text{\AA}/mm$ ili nm/mm . Druga bitna karakteristika disperzionih elemenata je moć razlaganja ili rezolucija. Može se izraziti kao bezdimenziona veličina $\frac{\lambda}{d\lambda}$, gde je $d\lambda$ razlika talasnih dužina između dve bliske linije sličnih intenziteta, koje još može da razdvoji dati instrument pri talasnoj dužini λ , ili samo kao $d\lambda$ izražena u nm ili \AA . Za rešetke koje daju sliku i difraktuju ili rasipaju svetlost, koja nije kolimisana može se definisati fokalna (žična) daljina. Ako difraktovani snop talasne dužine λ i reda m konvergira ka žiži, onda je fokalna dužina $r'(\lambda)$ rastojanje između centra rešetke i tačke fokusa. Ako difraktovano zračenje divergira, fokalna dužina se po konvenciji uzima sa negativnim predznakom, i ukazuje na postojanje virtuelnog lika sa druge strane rešetke. Kod spektralnih uređaja sa ulaznom i izlaznom pukotinom, uobičajeno je da se projektovana širina ulazne pukotine poklapa sa širinom izlazne pukotine. Fokalna dužina u velikoj meri određuje dimenzije spektralnog uređaja.

Prizma se može koristiti kao disperzioni element kod monohromatora. Prolaskom svetlosti kroz prizmu, ona se prelama pri čemu dolazi do ugaone disperzije. Istorijски rečeno, prvi monohromatori koji su razvijeni su bile prizme, ali su imale mnogo ograničenja. Njihova rezolucija je značajno manja nego kod difrakcione rešetke i razdvajanje spektara po talasnim dužinama je nelinearna (u odnosu na rastojanje duž izlazne pukotine) što stvara mehaničke probleme sa fokusiranjem snopa određene

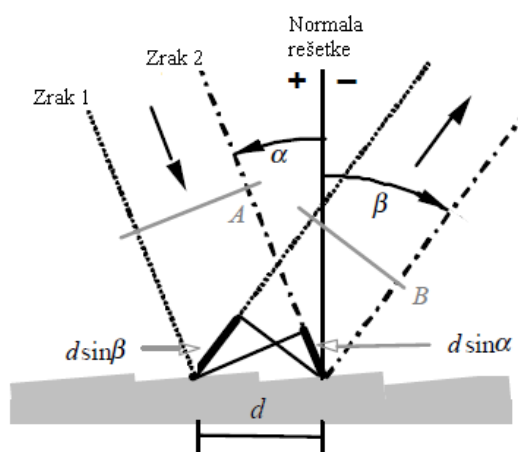
talasne dužine na izlaznu pukotinu. Jedina prednost kod prizmi u odnosu na difrakcione rešetke jeste njihova niska cena proizvodnje.

Difrakciona rešetka je optički element koji razdvaja polihromatsku svetlost na snopove različitih talasnih dužina. Polihromatska svetlost koja pada na rešetku je dispergovana tako da se snopovi svih talasnih dužina reflektuju pod malo drugačijim uglom. Najjednostavniji tip rešetke je ona sa velikim brojem jednako raspoređenih paralelnih proreza i svaki od njih predstavlja novi izvor difraktovanog zračenja. Zbog interferencije talasa koji se emituju iz pojedinih proreza na zaklonu se obrazuje interferencionna slika sa svetlim i tamnim prugama.

Jednačina difrakcione rešetke je:

$$n\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$$

gde n predstavlja red svetlosnih pruga na interferencionoj slici, λ talasnu dužinu, d konstantu rešetke, α upadni ugao snopa svetlosti i β ugao difraktovanog snopa. Dole na Slici 1. je prikazan redosled difraktovane talasne dužine. Upadni uglovi i uglovi difrakcije se mere od normale na rešetku ka zraku. Svi uglovi koji se mere u smeru kazaljke na satu, počevši od normale rešetke, imaju negativan znak (npr. $n=-1$), a uglovi koji se mere smeru suprotnom smeru kazaljke imaju pozitivan predznak (npr. $n=1$). Mogu postojati i viši redovi, ali oni opadaju sa intenzitetom svetlosti. Najintenzivniji su pruge prvog reda.

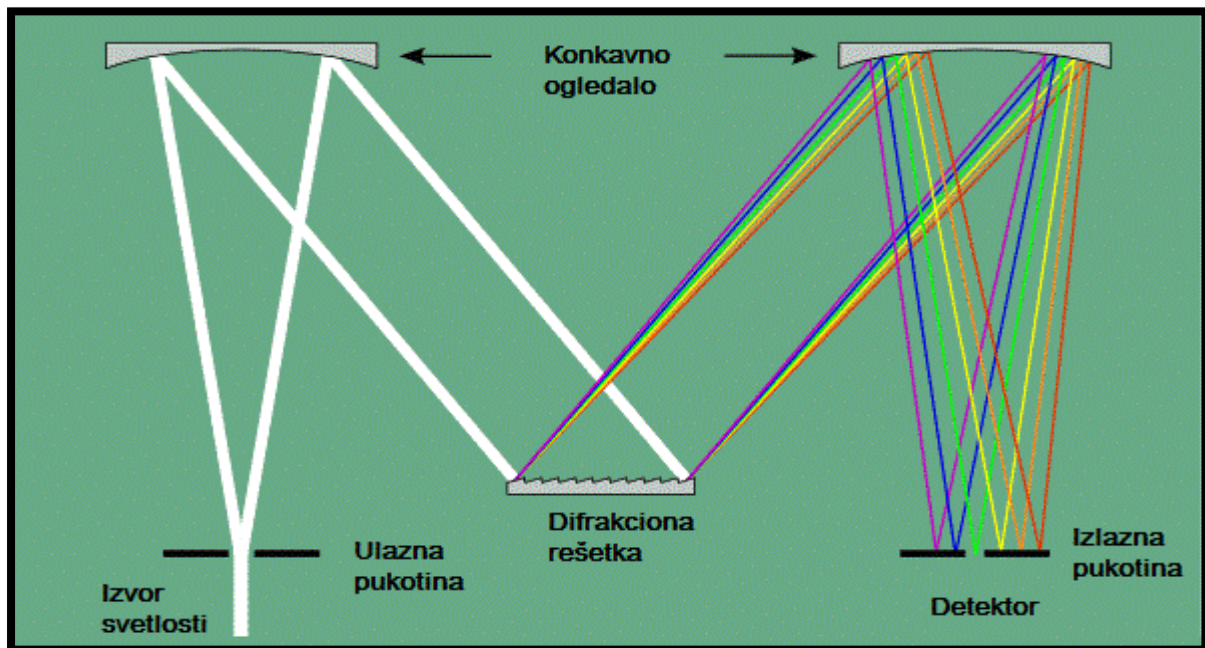


Slika 1. Difrakcija na refleksionoj rešetki

Difrakciona rešetka se koristi kao disperzioni element u modernijim monohromatorima, zbog svojih vrhunskih disperzionih svojstava. Černi-Tarnerov tip je jedan takav monohromator najčešće korišćen u laboratorijama.

2.1. Monohromatori Černi-Tarnerovog tipa

Kod monohromatora Černi-Tarnerovog tipa se koriste difrakcione rešetke kao disperzioni elementi. Monohromator marke McPherson 2051, koji se koristi u novosadskoj laboratoriji za fizičku elektroniku, je upravo Černi-Tarnerovog tipa. Šematski prikaz jednog ovakvog monohromatora je predstavljen na Slici 2.



Slika 2. Šema Černi-Tarnerovog monohromatora

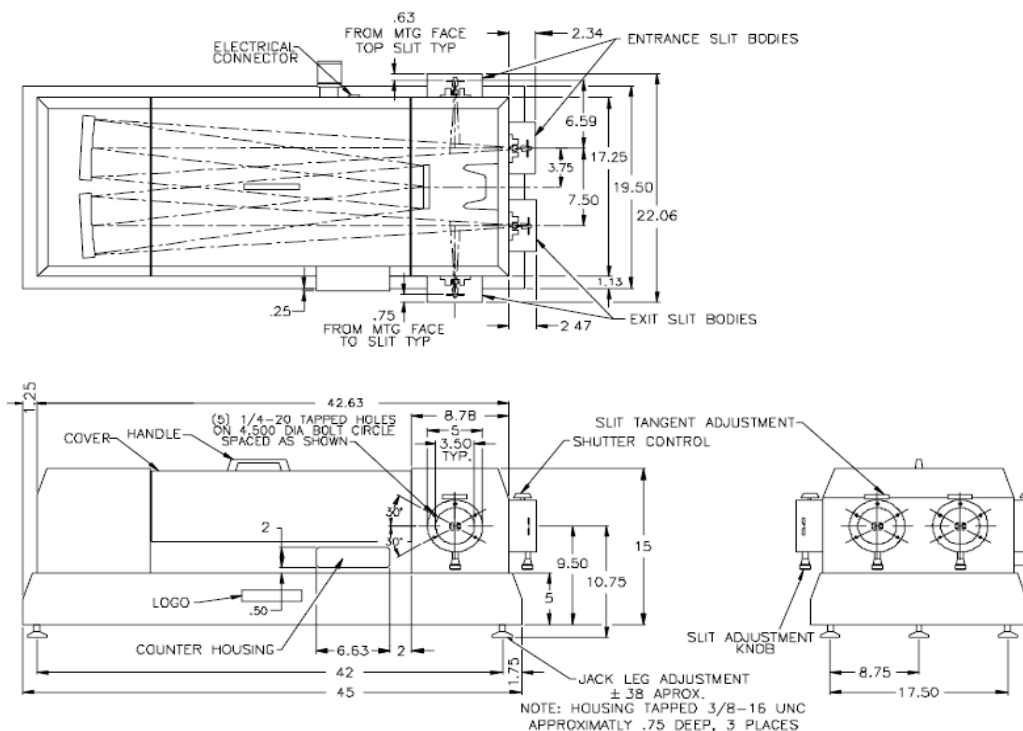
Izvor svetlosti je postavljen tačno ispred ulazne pukotine, tako da upadni zrak svetlosti prolazi kroz nju i pada na konkavno ogledalo pri čemu se reflektovani snop kolimiše. Tako kolimisani snop pada na difrakcionu rešetku i razlaže se na komponente različitih talasnih dužina, koje se dalje reflektuju o konkavno ogledalo. Njen fokus je

usmeren na izlaznu pukotinu monohromatora. Zakretanjem difrakcione rešetke komponente spektra različitih talasnih dužina se mogu dovesti na izlaz monohromatora. Širina opsega talasnih dužina na izlazu zavisi od širine pukotine. Širina pukotina na ulazu i izlazu se mogu podešavati posebno. Na kraju komponente spektra različitih talasnih dužina registruje detektor, koje se skeniraju pri čemu se dobija posmatrani spektar.

2.2. McPherson 2051 monohromator

Monohromator koji je korišćen za eksperiment, koji će biti kasnije objašnjen, je model McPherson 2051. Ovaj monohromator je Černi-Tarnerovog tipa, čija je fokalna dužina 1 m. Disperzioni element je difrakciona rešetka čije su dimenzije 120 x 140 mm, sa 1200 zarezova po milimetru. Opseg talasnih dužina iznosi 185 – 1300 nm. Rezolucija monohromatora iznosi 0,018 nm, dok je linearna disperzija 0,83 nm/mm

Šematski je prikazan model ovog monohromatora na Slici 3.



Slika 3. Šema McPherson 2051 monohromatora

Ovaj uređaj sadrži dve ulazne i dve izlazne pukotine. Širina ulazne pukotine se može menjati u opsegu od $5\ \mu\text{m}$ do $4000\ \mu\text{m}$, a visina od $2\ \text{mm}$ do $20\ \text{mm}$. Na izlaznu pukotinu se mogu priključiti neki od željenih detektora (npr. CCD kamera). Na monohromator je moguće priključiti i step motor za što tačnije okretanje difrakcione rešetke.

3. Detektori

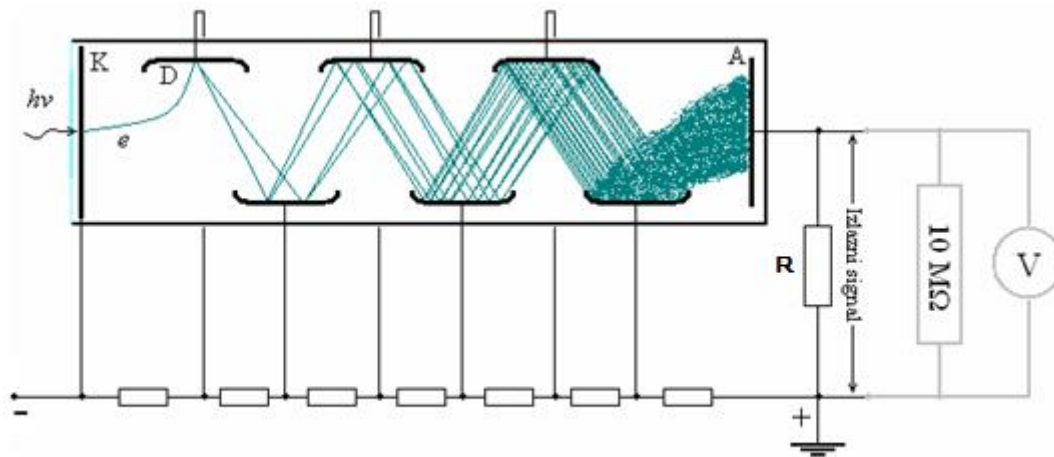
Detektor je uređaj za određivanje svojstava ili prepoznavanje čestica i zračenja. Prilikom merenja korišćena je CCD kamera . Fotomultiplikator nije obavezno korišćen za ovaj eksperiment.

3.1. Fotomultiplikatori

Fotomultiplikator predstavlja veoma osetljivi detektor, koji registruje spektre iz područja vidljivog, ultraljubičastog i bliskog infracrvenog zračenja. Električni signal, koji nastaje na fotoosetljivoj površini, se pojačava do 100 miliona puta što omogućava registrovanje pojedinačnih fotona.

Fotomultiplikator je obično cilindričnog oblika. Na jednom kraju se nalazi prozor koji je transparentan za fotone i naslanja se na izlazu monohromatora. Ispod prozora se nalazi fotokatoda iz koje upadni fotoni iz monohromatora izbijaju elektrone. Talasna dužina fotona treba da odgovara maksimumu spektralne osetljivosti fotokatore, kako bi transformacija signala bila što efikasnija.

Fotoelektroni se kreću ka najbližoj dinodi, koja je na nešto većem potencijalu od katode i napravljena je od materijala iz kog se lako izbijaju elektroni. Mali početni broj fotoelektrona koji pada na prvu dinodu iz koje izbija veći broj sekundarnih elektrona. Sekundarni elektroni se ubrzavaju ka sledećoj dinodi i iz nje izbijaju još više elektrona. Ovaj proces se ponavlja od dinode do dinode, od kojih je svaka sledeća na višem potencijalu od prethodne. Poslednja u nizu je anoda, koja je na najvišem potencijalu. Posledica lavinskog umnožavanja elektrona pri udarima o sukcesivne dinode, do anode stiže veliki broj elektrona. Sakupljeni elektroni čine izvesnu električnu struju (fotostruju) koja dovodi do pada napona na otporniku R .



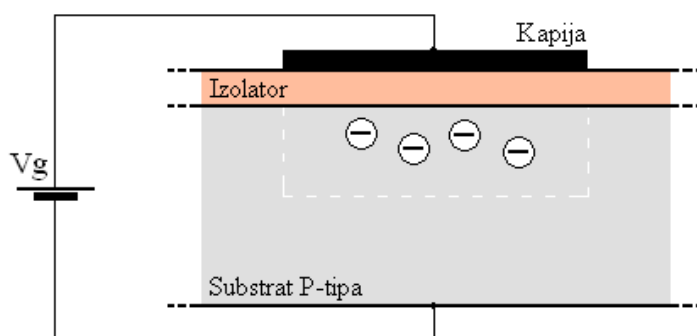
Slika 4. Šematski prikaz fotomultiplikatora

Pad napona na otporniku se registruje kao električni signal i srazmeran je intenzitetu svetlosti. Intenzitet svetlosti koja pada na fotokatodu proporcionalan je broju fotona koji u jedinici vremena padaju na nju. Veći broj fotona u jedinici vremena, izbija veći broj fotoelektrona, od kojih se svaki lavinski umnožava u cevi fotomultiplikatora. To znači da je broj elektrona koji dospevaju do anode srazmeran broju fotoelektrona, pa je i visina dobijenog električnog signala na otporniku srazmerna broju upadnih fotona. Ne detektuju se svi fotoni koji padnu u prostorni ugao fotomultiplikatora, ali je verovatnoća detekcije (tj. sopstvena efikasnost detektora) ista za sve fotone date talasne dužine, tako da je broj detektovanih fotona srazmeran broju upadnih fotona[1].

3.2. CCD kamera

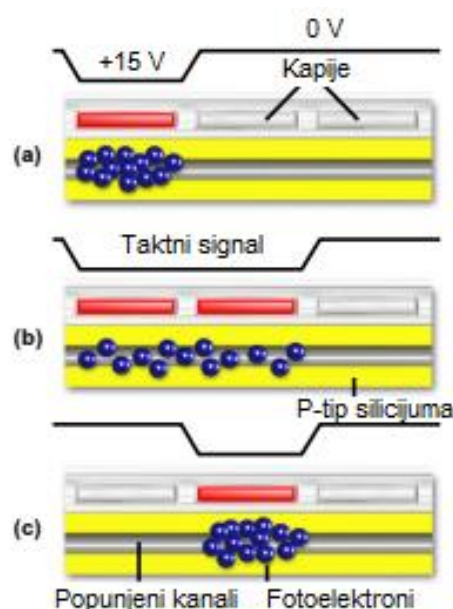
U svojoj osnovi CCD (Charge-Coupled Device) predstavlja pretvarač analognog svetlosnog signala u elektronski signal. CCD detektor ima izgled integrisanog elektronskog kola. Sastoji se od keramičkog kućišta sa pinovima koji predstavljaju električne konekcije. Na kućištu postoji stakleni prozor sa čije se unutrašnje strane nalazi CCD čip. CCD čip može da se sastoji od jednog niza ili od matrice fotoosetljivih elektronskih mikroćelija. Te mikroćelije se nazivaju pikseli. Princip rada CCD kamere se zasniva na pretvaranju svetlosne energije u odgovarajuću količinu naelektrisanja. Količina stvorenog naelektrisanja zavisi od intenziteta i talasne dužine svetlosti kao i od trajanja izlaganja svetlosti pri merenju.

Presek piksela je prikazan na Slici 5. Svaki piksel je MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) kondenzator, odnosno 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 termičkih slobodnih elektrona i šupljina, koji se pod dejstvom napona V_g kreću ka, tj. 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 slobodnih nosilaca naelektrisanja. Elektroni se grupišu u oblasti ispod kapije, neposredno ispod sloja izolatora. Njihova koncentracija, kao i ukupna količina naelektrisanja u toj oblasti, je (za dati substrat i konstantan napon V_g) srazmerna intenzitetu svetlosti koja pada na piksel[1].



Slika 5. Presek jednog piksela

Po isteku definisanog perioda integracije (kod ovih uređaja to je vreme ekspozicije – otvaranja zaslona) stvorena količina naelektrisanja u pojedinačnim pikselima se prikuplja u procesu, 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. Dakle, 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, tj. slika izvora[1].



Slika 6. Sukcesivno pomeranje stvorene količine naelektrisanja od piksela do piksela u CCD senzoru

Neke karakteristike CCD kamere:

Kvantna efikasnost. Faktor koji opisuje efikasnost apsorpcije fotona od strane CCD čipa, naziva se kvantna efikasnost (Quantum Efficiency - QE) i predstavlja odnos broja detektovanih fotona i broja upadnih fotona. Prilikom upada fotona određene energije, foton predaje energiju valentnom elektronu poluprovodnika i on prelazi u provodnu zonu. Međutim, svaki upadni foton neće prevesti elektron u provodnu zonu (određeni broj upadnih fotona može da se reflektuje). Ljudsko oko ima kvantnu efikasnost od oko 20%, dok fotografski film aproksimativno 10%, a današnje CCD kamere imaju preko

90% kvantne efikasnosti. Ona varira u zavisnosti od talasne dužine i može se proširiti na sve talasne dužine kroz razne inovacije, kao što su pozadinsko slabljenje ili pozadinsko osvetljenje.

Opseg talasnih dužina. CCD kamera može imati širok opseg detektovanih talasnih dužina koji se proteže od oko 0,1 nm (x-zraci) do 400 nm (vidljivi plavi deo spektra) pa sve do oko 1000 nm (bliski infracrveni deo spektra) sa pikom osetljivosti od oko 700 nm. Detekcija kraćih x-zraka i ultravioletnih zraka je moguće ostvariti preko pozadinskog osvetljenja, a povećana osetljivost na dužim talasnim dužinama bliskog infracrvenog dela spektra se može ostvariti pomoću silikona visoke otpornosti i niskog šuma.

Dinamički opseg. Sposobnost pravilnog pregleda svetlih i slabih izvora na jednoj istoj slici je veoma korisno svojstvo detektora. Razlika između najsvetlijeg mogućeg izvora i najslabijeg mogućeg izvora koju detektor može tačno da vidi na jednoj istoj slici predstavlja dinamički opseg. Dinamički opseg se definiše kao odnos kapaciteta piksela i šuma koji potiče od šuma tamne struje (Dark Current Noise) i šuma koji se javlja prilikom iščitavanja (Readout Noise).

Kapacitet piksela (Full Well Capacity). Predstavlja maksimalnu količinu naelektrisanja koja može da se akumulira u pikselu. U slučaju kada broj generisanih elektrona prevaziđe kapacitet jednog piksela, piksel biva u stanju saturacije i dolazi do prelivanja elektrona na susedne piksele (tzv. "Blooming" efekat). Za tipičan CCD čip, koji se koristi za naučne svrhe, ovo se može dogoditi za oko 150 000 elektrona.

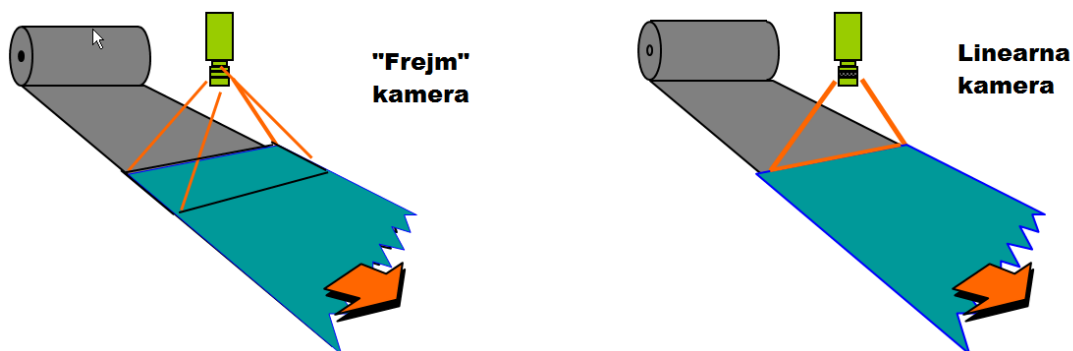
Tamna struja. Posledica termalnog kretanja elektrona u poluprovodniku (termalni šum). Elektroni usled termalnog kretanja mogu da pređu u provodnu zonu i time predstavljaju lažnu detekciju sa izvora koji se posmatra. Termalni šum se najčešće eliminiše snižavanjem temperature same kamere sistemom kao što je Peltijeov hladnjak.

Šum iščitavanja. Posledica same elektronike usled očitavanja snimka. Pri konvertovanju u digitalni signal, sama elektronika čipa i konektora sa računarom može u signal dodati elektrone i time napraviti lažnu detekciju. Kada svetlost pada na CCD senzor fotoni se konvertuju u elektrone.

Linearnost. Bitno svojstvo detektora je linearni odziv, tj. da je izlazni signal srazmeran broju upadnih fotona. Linearni odziv je koristan, jer nije potrebna dodatna obrada slike kako bi se utvrdio "stvaran" intenzitet, na primer, različitih predmeta na slici.

Linearnost detektora, sem šuma, može da naruši i nejednaka osetljivost svih piksela. Razlike u osetljivosti pojedinačnih piksela i zona čipa prouzrokovani su greškama u procesu izrade čipa, česticama prašine na senzoru, elementima optike i sl. Da bi se ovo eliminisalo, vrši se snimanje tačno određene standardne slike i na osnovu dobijenog snimka se utvrđuje se da li su neki pikseli manje osetljivi. Na osnovu ovoga se uvodi korekcija očitanih podataka.

CCD kamere na osnovu konstrukcije čipa mogu biti linearne i sa površinskim CCD sensorom ("frejm" kamere). Linearni senzori se sastoje od jednog niza piksela dok su kod površinskih senzora pikseli raspoređeni u obliku matrice. Po načinu snimanja "frejm" kamere stvaraju dvodimenzionalne slike, dok se pomoću linearnih kamera dvodimenziona slika dobija skeniranjem liniju po liniju. Ukoliko je predmet veliki, ili se konstantno kreće ili je potrebna velika rezolucija za njegovo prikazivanje najbolje je koristiti linearnu CCD kameru.



Slika 7. Šematski prikaz načina skeniranja predmeta linearnom (desno) i "frejm" (levo) CCD kamerom

Danas je CCD kamera osnova za svako snimanje, posmatranje ili analiziranje u raznim oblastima. Zato CCD kamere imaju široku primenu u fotografiji, video snimanju, astronomiji, spektroskopiji, itd. Međutim, ovaj tip kamere nailazi na teškoće ukoliko 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 ovakvog 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.

Kao što je spomenuto, u ovom eksperimentu je korišćena linearna CCD kamera. Ima 3000 fotoosetljivih piksela, veličine $7 \times 200 \mu\text{m}$, i talasnog opsega spektralne osetljivosti 350 – 1060 nm.

4. Izvori svetlosti

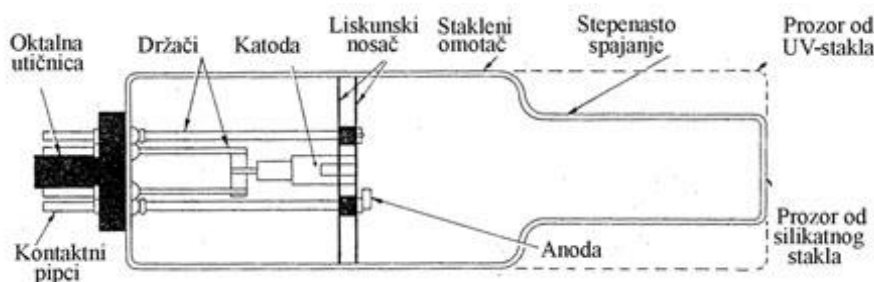
Mala širina spektralnih linija i njihova blizina, pred konstruktorima aparata je postavila dva bitna zadatka:

- proizvesti potrebno zračenje za pobuđivanje i
- odvojiti i izmeriti te uzane signale.

Neophodan je stabilan i intenzivan izvor zračenja koji će emitovati kontinualan spektar[14]. U ovom radu se kao izvor svetlosti koristi cev sa šupljom katodom.

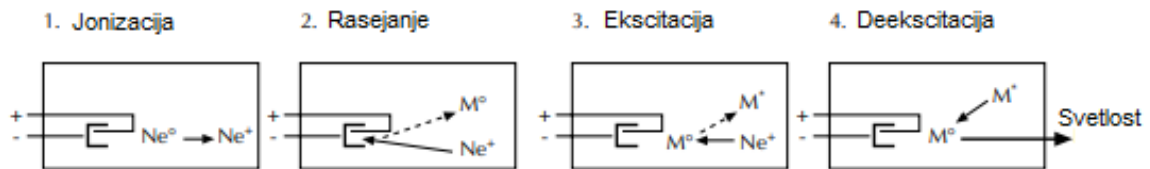
4.1. Cev sa šupljom katodom

Standardni izvor svetlosti u spektroskopiji je cev sa šupljom katodom. Ima oblik šupljeg staklenog cilindra i sa jedne strane je zatopljena katoda u obliku šupljeg cilindra. Anoda je u obliku prstena ili šipke. Katoda je konstruisana od metala ili legure metala, ili je na unutrašnjoj strani šupljine prevučen tanak sloj metala čiji spektar je potreban. Anoda je napravljena od nikla ili volframa. Koncentrisano pražnjenje događa se u šupljini katode, a nastali zraci izlaze kroz prozor od UV-stakla ili kvarcnog stakla na suprotnoj strani. Cev je punjena visoko prečišćenim inernim gasom pod vrlo malim pritiskom. Inertni gas kojim se cev puni može biti neon ili argon. Njegov pritisak, napon i jačina struje odabrani su tako da se pražnjenje dešava samo u šupljini katode. Ono se uglavnom sastoji od lučnog spektra, koji nije proširen usled električnog efekta, Lorencovog ili Doplerovog efekta[14].



Slika 8. Presek cevi sa šupljom katodom

Usled razlike potencijala između anode i katode, dolazi do jonizacije inertnog gasa. Stvoreni joni „bombarduju“ unutrašnju površinu šuplje katode, te dolazi do izbijanja atoma ispitivanog elementa. 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 deekscitacije i emisije zračenja.

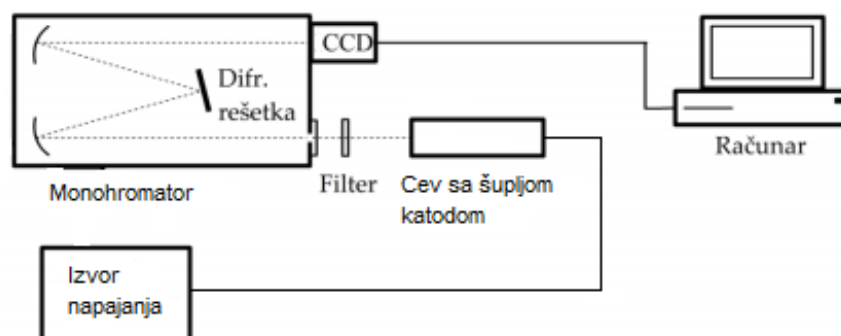


Slika 9. Proces emisije svetlosti u cevi sa šupljom katodom punjenom neonom

5. Eksperimentalna postavka, postupak snimanja i rezultati merenja

Pojedinačni elementi, koji su ranije opisani u ovom radu, su povezani u jedan eksperimentalni sistem. U eksperimentu se na ulaz monohromatora McPherson 2051 dovodi svetlost sa izvora, koja je u ovom slučaju cev sa šupljom katodom. Na izlazu monohromatora je postavljena CCD kamera ILX526A, koja je povezana sa računarom. Na računaru je instaliran softver za upravljanje kamerom.

Šematski prikaz eksperimentalne postavke je prikazana na Slici 9.



Slika 10. Šema eksperimentalne postavke

Prilikom postavljanja novog spektroskopskog sistema neophodno je izvršiti sledeće osnovne kalibracije i provere:

1. Određivanje osetljivosti duž niza piksela
2. Kalibracija po talasnim dužinama
3. Određivanje spektralne osetljivosti sistema pomoću standardne lampe

Kalibracija po talasnim dužinama je neophodna kako bi se snimljeni spektar mogao prevesti iz prostora piksela u prostor talasnih dužina.

Određivanjem osjetljivosti duž niza piksela i spektralne osjetljivosti kao rezultat daje normiranu kalibracionu krivu kojom je pri svakom merenju potrebno pomnožiti snimljeni relativni intenzitet spektra.

5.1. Kalibracija po talasnim dužinama

Pri snimanju spektara u različitim spektralnim regionima, vrednost koliko angstroma vredi jedan piksel nije ista. Da bi se odredila ova karakterizacija, potrebno je uvesti parametar P za svaki spektralni region, koji daje odnos $\text{Å}/\text{pixel}$. Ovaj parametar je definisan kao odnos razlike talasnih dužina dvaju poznatih linija izražene u angstromima i njihovog međusobnog rastojanja na CCD senzoru izraženog u pikselima:

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

gde su λ_{01} - tablična vrednost talasne dužine prve spektralne linije izražena u angstromima, λ_{02} - tablična vrednost talasne dužine druge spektralne linije izražena u angstromima, λ_{0p1} - očitana vrednost talasne dužine (položaja maksimuma spektralne linije na CCD senzoru) prve spektralne linije izražena u pikselima λ_{0p2} - očitana vrednost talasne dužine (položaja maksimuma spektralne linije na CCD senzoru) druge spektralne linije izražena u pikselima.

U svakom spektralnom regionu je 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.

Kada se odrede parametri P za sve međusobne odnose linija u jednom spektralnom regionu potrebno je izračunati njegovu srednju vrednost P . Srednja vrednost parametra P u jednom spektralnom regionu se može izračunati kao:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

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

Ovaj parametar P je posebno bitan, zato što 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 pomena u odnosu na liniju poznate talasne dužine ka većim ili manjim talasnim dužinama) proizvod izmerenog rastojanja između linija u pikselima pomnožen sa parametrom P [4].

5.2. Određivanje spektralne osetljivosti pomoću standardne lampe

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

Za svaki položaj rešetke potrebno je položaj svakog piksela preračunati u talasnu dužinu. Nakon dobijenih snimljenih vrednosti i preračunavanja iz prostora piksela u prostor talasnih dužina, dobija se spektar kalibracione lampe. Za određivanje osetljivosti potrebno je i poznavanje kalibracionog spektra lampe koja je kalibrisana u laboratoriji za plazma spektroskopiju američkog Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST) pomoću standardne lampe, koja se koristi kao sekundarni standard. Deljenjem snimljenih intenziteta sa intenzitetima kalibracionog spektra, na

odgovarajućim talasnim dužinama, dobija se osetljivost sistema, koja može grafički da se prikaže kao zavisnost osetljivosti od talasne dužine[2].

5.3. Određivanje osetljivosti duž niza piksela CCD čipa

Kao što je ranije rečeno, zadatak ovog eksperimenta je dobijanje informacija o odzivu samog CCD senzora, odnosno dobijanje informacije o visini detektovanog signala na različitim mestima senzora ukoliko se osvetljava svetlošću konstantnog intenziteta i određenog intervala talasnih dužina. Kako je poznato, CCD čip se sastoji od linearnog niza senzora, tj. piksela. U idealnom slučaju svi pikseli bi trebali imati isti odziv ako se ozrače identičnim zračenjem (isti talasni opseg i isti intenzitet). Međutim, u realnom slučaju je potpuno drugačije i zato treba da se snimi i analizira slika istog svetlosnog izvora na različitim mestima čipa.

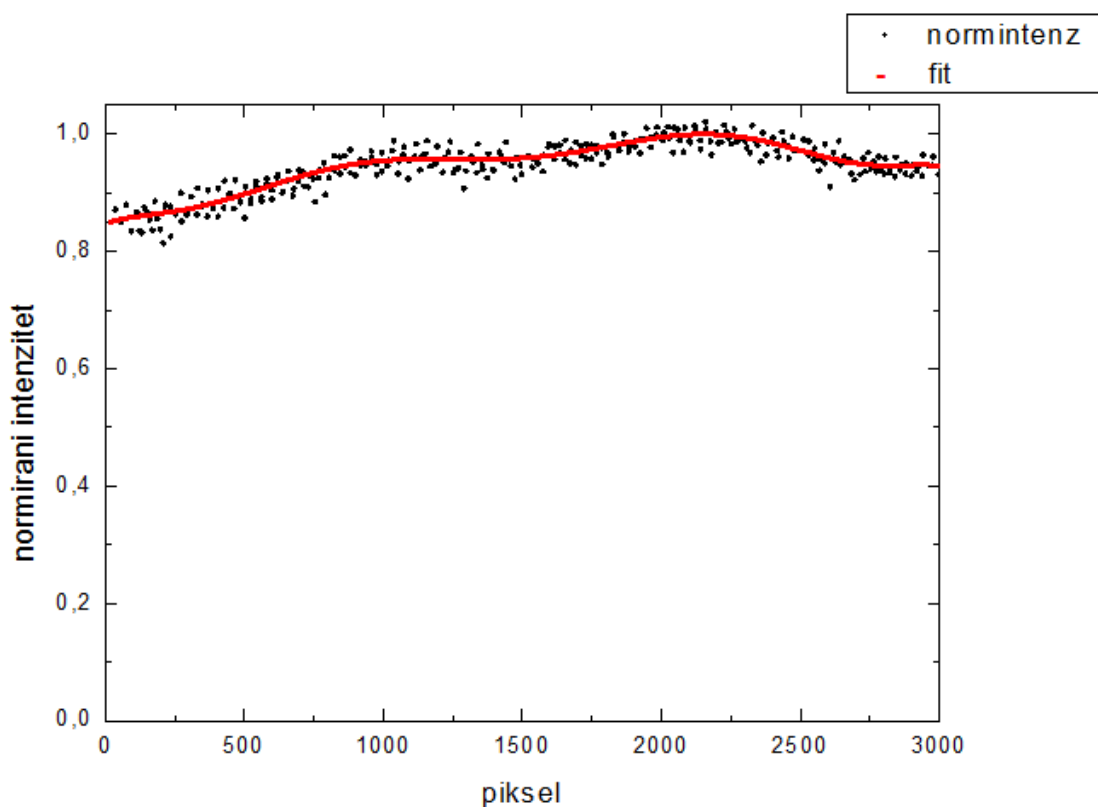
Pri merenjima, širina ulazne pukotine je bila $400 \mu m$. Ova vrednost otvora pukotine je odabrana, zato što je detektovani signal pravougaonog oblika i pogodan je za zadatak ovog rada. Pri snimanju CCD kamerom, izlazne pukotine uopšte nema. Programom *CCD Tool* se setuje kamera i kontroliše proces snimanja. U samom procesu snimanja, uobičajeno je da se prikuplja više desetina ili stotina frejmova na osnovu kojih se onda može izvršiti usrednjavanje. Na početku snimanja spektra, snima se bekground (background), koji predstavlja signal koji kamera detektuje u odsustvu zračenja izvora. Ono u stvari predstavlja šum koji potiče od pozadinskog svetla i šum koji potiče od same kamere. Zatim, se vrši korekcija snimka na bekground, odnosno odstrani se šum i nastavlja se snimanje po pikselima.

Kao izvor svetlosti se koristi cev sa šupljom katodom ispunjenom neonskim gasom, koja zrači u određenom intervalu talasnih dužina. Iz neonovog spektra zračenja se odabere spektralna linija koja je izolovana i dovoljno velikog intenziteta za dalja merenja. Kao što je rečeno, odabranu spektralnu liniju je potrebno „prošetati“ kroz ceo niz piksela CCD kamere. Finim podešavanjima na monohromatoru se zaokreće difrakciona rešetka. Položaj difrakcione rešetke se pomera u koracima od 4 \AA . Ovaj korak je izabran tako da se snimci spektralne linije preklapaju pri svakom sledećem

položaju rešetke. Prilikom svake promene položaja se snima spektar koji se vidi u programu na kompjuteru.

Kada se snime različiti položaji difrakcione rešetke, dobija se grafik zavisnosti intenziteta zračenja od piksela. Da bi se dobio ovaj grafik, portebno je za svaki signal uzeti onaj opseg intenziteta signala koji je veoma malog intervala, što je zapravo vrh signala. Utvrđeno je da ovu zavisnost najbolje opisuje polinom 9. reda. Fitovane i izmerene vrednosti intenziteta su zatim normirani, pri čemu se dobija kriva osetljivosti duž niza piksela. Ovaj grafik je dat na Slici 11.

Poznavanje osetljivosti linearne CCD kamere duž niza piksela je bitna za dalje vršenje različitih eksperimenata.



Slika 11. Grafik zavisnosti normiranih intenziteta od niza piksela i njen fitovani oblik

6. Zaključak

Osetljivost se može definisati kao veličina odziva sistema na zračenje određenog intenziteta na određenom kanalu senzora. Međutim, iako je zračenje velikog intenziteta, ukoliko je osetljivost mala onda će biti detektovan mali intenzitet na datom pikselu. Iz navedenog razloga potrebno je odrediti osetljivost mernog sistema.

Kao što je napred već rečeno, cilj ovog diplomskog rada je karakterizacija samog CCD čipa u smislu određivanja relativnog odziva pojedinih piksela pri njihovom osvetljavanju približno monohromatskom svetlošću konstantnog intenziteta. Primećeno je da odziv duž senzora nije jednak već da postoje varijacije što je i za očekivati. Dobijena kriva osetljivosti čipa se, zajedno sa krivom spektralne osetljivosti sistema, mora koristiti prilikom korekcije spektara snimljenih ovim spektroskopskim sistemom. Ova kalibracija CCD čipa je veoma bitna za dalja kalibrisanja optičkog sistema, i prilikom merenja.

7. Literatura

1. Lazar Gavanski: Instrumentalni profili optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara, master rad, Novi Sad, 2011
2. Šandor Hegediš: Određivanje osetljivosti optičkog sistema sa ICCD kamerom, diplomski rad, Novi Sad, 2009
3. Bellona Bles: Kalibracija optičkog sistema za spektroskopiju plazme, diplomski rad, Novi Sad, 2019
4. Miloš Mitrović: Kalibracija optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara, diplomski rad, Novi Sad, 2009
5. Frank M. Dunnivant, Jake W. Ginsbach, Flame Atomic Absorbance and Emission Spectrometry and Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, Witman College, Chemistry Department, 2016
6. Hans-Joachim Kunze: Introduction to Plasma Spectroscopy, Springer, Berlin – Heidelberg, 2009
7. Yi-Chen Chuang, Monochromator, R. Luo (ed.), Encyclopedia of Color Science and Technology, Springer, Science+Business Media New York 2015, DOI 10.1007/978-3-642-27851-8_354-1
8. <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/diffraction-gratings>
9. <https://www.berthold.com/en/bioanalytic/knowledge/glossary/monochromator/>
10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Monochromator>
11. <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/diffraction-gratings>
12. http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html
13. [https://www.mssl.ucl.ac.uk/www_detector/ccdgroup/opttheory/ccdoperation.html#:~:text=A%20Charge%20Coupled%20Device%20\(CCD,a%20highly%20sensitive](https://www.mssl.ucl.ac.uk/www_detector/ccdgroup/opttheory/ccdoperation.html#:~:text=A%20Charge%20Coupled%20Device%20(CCD,a%20highly%20sensitive)

[%20photon%20detector.&text=A%20photon%20of%20light%20which,the%20scene%20at%20each%20pixel.](#)

14. <http://atomspektrometrija.com/index.php/izvodi-iz-knjige/primarni-izvori-zracenja>
15. <http://www.liskeard.cornwall.sch.uk/images/Liskeard-Sixth-Form/Atomic-Absorption-Spectrometry.pdf>

8. Biografija

Magdalena Rajić je rođena 20.7.1995. u Zrenjaninu, Srbiji. Pohađala je osnovnu školu “dr Jovan Cvijić” u Zrenjaninu. Godine 2014. je završila srednju školu “Zrenjaninska gimnazija” i upisala fiziku, istraživački smer na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu.



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: Magdalena Rajić

AU

Mentor: Dr Teodora Gajo

MN

Naslov rada: Snimanje osetljivosti duž niza piksela CCD kamere ILX526A

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2020

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 5 glava/24 strana/11 slika i grafikona/15 referenci

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Fizika atoma, molekula i jonizovanih gasova

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: CCD kamera, spektroskopija plazme, osetljivost

PO

UDK

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

ČU

Važna napomena: Nema

VN

Izvod: Izvršena je kalibracija linearne CCD kamere po pikselima optičkog sistema za spektroskopiju plazme

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

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

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

član: Doc. dr Teodora Gajo, 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: Magdalena Rajić

AU

Mentor/comentor: Dr Teodora Gajo

MN

Title: Measuring sensitivity along a range of pixels of CCD camera ILX526A

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2020

PY

Publisher: Author's reprint

PU

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

PP

Physical description: 5 chapters/24 pages/11 figures/15 references

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Physics of atoms, molecules and ionised gasses

SD

Subject/ Key words: CCD camera, plasma spectroscopy, sensitivity

SKW

UC

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

HD

Note: none

N

Abstract: Calibration of linear CCD camera per pixels of optical plasma spectroscopy was performed

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

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

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

Member: Doc. dr Teodora Gajo, docent, PMF u Novom Sadu