

UNIVERZITET U NOVOM SADU PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Instrumentalni profili optičkog sistema sa ICCD kamerom za snimanje optičkih spektara

- MASTER RAD -

Mentor: Doc. dr Igor Savić Kandidat: Lazar B. Gavanski

Novi Sad, 2011.

## Sadržaj

Uvod		2
1 Spe	ktralni uređaji	4
2 Mo	nohromator	8
2 WIU		0 0
<b>2.1</b> D	Red difrakcije	δ ο
2.1.1	Preklananje različitih spektara	9 10
2.1.2	Disperzija	
2.1.4	Moć razlaganja	11
2.1.5	Spektralni opseg (Bandpass)	12
2.1.6	Fokalna dužina	12
2.2 N	Ionohromatori Černi-Tarnerovog (Czerny-Turner) tipa	12
2.2.1	Monohromator McPherson 2061 A	13
3 Def	ektori	17
		····· 1/
3.1 F	otomultiplikator	17
3.2 I	CCD kamera	18
3.2.1	Pojačavač slike (intensifier)	18
3.2.2	Sistem sočiva za spregu	21
3.2.3	CCD senzor	
3.2.4	Video jedinica i veza kamere sa računarom	23
4 Izv	ori svetlosti	25
<b>4.1</b> G	aislerova cev	25
42 0	ay so čunliom katodom	25
4.2 C	ev så supijom katodom	23
5 Eks	sperimentalna postavka, postupak snimanja i rezultati merenja	27
51 D	astunal: spimania profile spelttralpih linija	27
<b>5.1</b> P	Snimanja spektralnih profila fotomultinlikatorom	
512	Snimanje spektralnih profila ICCD kamerom	27 28
5.1.2		
5.2 R	ezultati merenja i diskusija	
5.2.1	Uticaj korekcije na spektralnu osetljivost sistema na polusirinu instrumentalnog profila	29
5.2.2	Zavisnost poluširine spektralne linije od vremena ekspozicije kamere	
524	Uticaj napona MCP-a na oblik eksperimentalnog profila spektralne linije	
5.2.5	Upoređivanje profila linije snimljene kamerom i fotomultiplikatorom	
5.2.6	Uticaj smajling efekta na instrumentalni profil	
7. aklin	čak	/10
Zaniju	Cur	······ 47
Literat	ura	51
Diame	6:10	En
Diogra	цја	

## Uvod

Spektroskopija je oblast u prirodnim naukama (fizika, astrofizika, hemija, biologija, itd.), koja se bavi ispitivanjem spektralnih karakteristika zračenja. Osnovna eksperimentalna postavka za spektroskopska merenja obuhvata izvor zračenja, spektralni uređaj i detektor. Spektroskopskim eksperimentalnim tehnikama se, na osnovu ispitivanja zračenja, utvrđuju karakteristike izvora zračenja i dobijaju informacije o fundamentalnim procesima u izvoru, u kojima dolazi do emisije zračenja.

Jedna od glavnih delatnosti Laboratorije za fizičku elektroniku novosadskog Prirodnomatematičkog fakulteta je spektroskopija plazme. U spektroskopiji plazme se ispituju karakteristike plazme na osnovu analize zračenja koje se emituje u atomskim procesima u plazmi. Razlaganjem emitovanog zračenja na monohromatske komponente (tj. spektralne linije) i ispitivanjem svojstava tih komponenti, se može utvrditi temperatura i koncentracija pojedinačnih konstituenata plazme. Dakle, u osnovi dijagnostike plazme leže spektroskopske tehnike.

Tema ovog rada je instrumentalni profil spektralnih linija. Instrumentalni profil može biti od značaja za spektroskopiju plazme.

Spektralne linije koje se emituju iz plazme, i dovode na ulaz spektralnog uređaja, nisu beskonačno uske, već podležu raznim mehanizmima širenja. Jedan od mehanizama širenja linija u samoj plazmi je tzv. širenje usled pritiska i posledica je interakcije emitera sa okolnim naelektrisanim i neutralnim česticama. U opštem slučaju, širenju usled pritiska doprinose Štarkov (Stark) efekat, rezonantno širenje i Van der Valsovo (van der Waals) širenje, sve u zavisnosti od toga da li emiter interaguie sa naelektrisanim česticama, emiterima iste vrste ili neutralima. U slučaju izvora plazme novosadske laboratorije se širenje usled pritiska često svodi na Štarkovo širenje. U slučaju da su spektralne linije emitovane od strane jona, Štarkov profil je simetričan, tzv. Lorencov (Loretz) profil. Ako emisija zračenja potiče od neutralnih atoma, tada spektralne linije imaju asimetričan profil, tzv. j(x) profil. Drugi značajan mehanizam širenja spektralnih linija je Doplerovo širenje, koje je posledica termičkog kretanja emitera i zasniva se na Doplerovom efektu. Ukoliko bi bilo prisutno jedino Doplerovo širenje, spektralna linija bi imala Gausov profil, što je u direktnoj vezi sa Maksvelovom (Maxwell) raspodelom atoma emitera po brzinama. Treći mehanizam širenja spektralnih linija je prirodno širenje linije i on je posledica neodređenosti energetskih nivoa u emiteru, koji učestvuju u emisiji fotona. Prirodna širina linije je zanemarljiva u prisustvu Štarkovog i Doplerovog širenja.

Prisustvo mehanizama širenja linija u plazmi i instrumentalnog širenja linija, dovodi do toga, da snimljena spektralna linija nekog jona ima Vojtov (Voigt) profil. Vojtov profil je posledica konvolucije Lorencovog profila (usled Štarkovog efekta) i Gausovog profila (koji rezultuje iz pojedinačnih Gausovih profila Doplerovog i instrumentalnog širenja). Međutim, kako bi se izdvojio Štarkov profil, koji je neophodan za ispitivanje Štarkovog efekta, neophodno je izvršiti dekonvoluciju eksperimentalnog, tj. Vojtovog profila. Dekonvolucija se zasniva određivanju poluširine eksperimanetalno dobijenog (Vojtovog) profila i poznavanju poluširina konvoluiranih Lorencovog i Gausovog profila. U izrazu za poluširinu rezultujućeg Gausovog profila, pored poluširine Doplerovog profila, figuriše i poluširina instrumentalnog profila. Napred navedeno važi i u slučaju zračenja emitovanog od strane neutralnih atoma, sa tom razlikom što se umesto Lorencovog profila, koristi j(x) profil. Prema tome, instrumentalni profil je od velike važnosti i u ispitivanju Štarkovog efekta.

Cilj ovog rada je utvrđivanje oblika, eventualnih deformacija, uzroka tih deformacija i zavisnosti parametara instrumentalnog profila od uslova snimanja optičkim sistemom koji se koristi u spektroskopiji plazme. Za snimanje instrumentalnog profila treba koristiti izvore kod kojih se napred pomenuti mehanizmi širenja mogu zanemariti. Na taj način se izoluju karakteristike instrumentalnog profila i njegovo ponašanje pri promeni parametara eksperimentalnog sistema, sa cilljem da u budućim eksperimentima spektroskopije plazme, doprinos instrumentalnog profila i njegovih deformacija rezultujućem profilu linije bude poznat.

U prvoj glavi je opisana konstrukcija spektralnog uređaja u opštem slučaju. Druga glava sadrži detaljan opis monohromatora sa difrakcionom rešetkom koji je korišćen u eksperimentima.

Treća glava je posvećena detektorima koji su koriščeni, tj. fotomultiplikatoru i ICCD kameri, njihovim tehničkim karakteristikama i načinu korišćenja. Opisani monohromator i detektori čine stalnu eksperimentalnu postavku za plazma spektroskopiju. U četvrtoj glavi je dat opis korišćenih izvora zračenja i načina njihovog korišćenja. Peta glava sadrži opise izvršenih eksperimenata, kao i interpretaciju dobijenih rezultata i odatle izvedene zaključke. Eksperimentalno je ispitan uticaj korekcije intenziteta spektralne linije na spektralnu osetljivost sistema, na poluširinu instrumentalnog profila, zatim zavisnost poluširine spektralne linije od položaja linije na čipu, kao i zavisnost poluširine spektralne linije. Pored toga je ispitan i uticaj napona MCP-a na oblik eksperimentalnog profila spektralne linije. Profil linije snimljene kamerom je upoređen sa profilom iste linije, koji je snimljen fotomultiplikatorom. Na kraju rada je posmatran uticaj smajling efekta na instrumentalni profil.

## 1 Spektralni uređaji

Pod spektralnim uređajem se podrazumeva uređaj koji ulazno polihromatsko zračenje razlaže po talasnim dužinama na monohromatske komponente. Razlaganje, odnosno disperzija, polihromatskog zračenja se ostvaruje prelamanjem, difrakcijom ili višezračnom interferencijom. U skladu sa time se vrši podela spektralnih uređaja na osnovu principa razlaganja zračenja, na uređaje sa prizmama, uređaje sa difrakcionom rešetkom i interferencione uređaje.

Spektralni uređaj se, u opštem slučaju, sastoji od sistema za osvetljavanje, ulazne pukotine, disperzionog sistema, sistema za fokusiranje i izlaznog sistema. Šematski prikaz je dat na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz spektralnog uređaja.

Ulaznim otvorom u vidu pukotine se dobija uski lik izvora svetlosti. Visina i širina ulazne pukotine se mogu menjati, a zavisnost širine lika (D) od širine pukotine (d) je data na slici 2.



Širina lika je linearno srazmerna širini ulazne pukotine, počevši od minimalne vrednosti širine

pukotine  $d_0$ . Za manje širine pukotine od  $d_0$ , širina lika je konstantna  $(D_0)$ , s obzirom da sužavanjem pukotine dolazi do difrakcije koja postaje izraženija sa sužavanjem pukotine. Širina pukotine se najčešće menja mikrometarskim zavrtnjem, a visina dijafragmom koja može imati skokovitu (Slika 3.a)) ili kontinualnu (Slika 3.b)) promenu visine.



Slika 3. Princip menjanja visine pukotine.

Sistem za osvetljavanje služi za osvetljavanje disperzionog sistema i sastoji se od sočiva ili ogledala.

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.

U sistemima sa difrakcionom rešetkom, kao što je to npr. monohromator koji je korišćen u eksperimentima u ovom radu, upotrebljavaju se refleksione rešetke. Princip rada difrakcione rešetke je u ovom radu detaljnije opisan u narednoj glavi.

Sistem za fokusiranje služi za fokusiranje dobijenih monohromatskih komponenata razložene svetlosti.

Pod izlaznim sistemom se podrazumeva izlazna pukotina ili otvor na koje se postavlja detektor. U ovom radu su kao detektor korišćeni fotomultiplikator i ICCD kamera. U slučaju kada je kao detektor korišćen fotomultiplikator, širina izlazne pukotine je podešena da bude ista kao i za ulaznu pukotinu, kako bi se izdvojila što uža monohromatska komponenta razloženog svetla. U slučaju kada je kao detektor korišćena ICCD kamera korišćena je samo ulazna pukotina dok je umesto izlazne pukotine korišćen široki otvor koji je veći od ulaznog otvora kamere.

Spektralni uređaji se obično karakterišu veličinama koje se zovu disperzija i moć razlaganja. Disperzija uređaja predstavlja meru prostornog razdvajanja zračenja različitih talasnih dužina datim uređajem. Posebno se definišu ugaona i linearna disperzija.



Slika 4. Elementi potrebni za definisanje disperzije.

Ugaona disperzija je karakteristika samog disperzionog sistema i može se predstaviti u vidu:

$$D_{\beta} = \frac{d\beta}{d\lambda} \tag{1}$$

Linearna disperzija je karakteristika celog sistema i za nju važi da je:

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} \tag{2}$$

Na slici 4 su šematski prikazani svi elementi potrebni za definisanje disperzije. Na osnovu linearne disperzije se spektralni uređaji mogu klasifikovati u uređaje sa malom, srednjom i velikom linearnom disperzijom. Uređaji koji kao disperzioni element koriste prizmu imaju malu ili srednju disperziju, dok uređaji sa difrakcionom rešetkom mogu imati veliku linearnu disperziju. Za opisivanje spektralnih uređaja se često koristi recipročna vrednost linearne disperzije, odnosno veličina intervala talasnih dužina po jedinici dužine spektra  $d\lambda/dl$  [nm/mm].

Moć razlaganja instrumenta (R) je druga važna karakteristika spektralnog uređaja i opisuje sposobnost instrumenta da dve bliske spektralne linije prikaže kao razdvojene. Ako jedna spektralna linija ima talasnu dužinu  $\lambda$ , a druga linija ima talasnu dužinu  $\lambda + d\lambda$  (Slika 5.), moć razlaganja je bezdimenziona veličina i definiše se kao:

$$R = \frac{\lambda_s}{d\lambda} \tag{3}$$

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

6



Slika 5. Profili dve linije bliskih talasnih dužina.

Prema Rejlijevom kriterijumu se dve bliske linije istog inteziteta (Slika 5.) mogu smatrati razdvojenim, ako je intenzitet između linija manji od intenziteta linija za najmanje 20%:

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \ge 20\% \tag{4}$$

Savremenim tehnikama se ova granica spušta na oko 5%.

Interval talasnih dužina  $\Delta \lambda$  između maksimuma dve najbliže linije koje uređaj još uvek može razlikovati je rezolucija (granica rezolucije).

Ukoliko se posmatra izvor zračenja linijskog spektra, uočava se da spektralne linije emitovane u atomskim deekscitacionim procesima u izvoru, nisu strogo mohohromatske, odnosno liniji ne odgovara jedna vrednost talasne dužine, već izvesni uzani interval talasne dužine. Dakle, intenzitetu spektralne linije doprinose i fotoni iz intervala talasnih dužina  $\Delta\lambda$  oko centralne talasne dužine  $\lambda_0$ . Ukoliko se grafički prikaže zavisnost intenzitet spektralne linije od talasne dužine, dobija se profil spektralne linije (Slika 6.b)). Spektralni intenzitet zračenja je proporcionalan broju fotona te talasne dužine i najveći je u centru linije, a opada ka krilima linije. Poluširina linije  $\Delta\lambda_{1/2}$  je osnovna osobina spektralne linije i definisana je kao širina linije na visini koja odgovara polovini maksimalnog intenziteta linije. Profil spektralne linije ne mora biti simetričan, pa je moguća asimetrija profila jedna od važnih karakteristika. Forma krila linije i eventualni pomak linije kao celine su takođe od velike važnosti u analizi spektra.

Uzrok širenja spektralne linije može biti kretanje atomskih emitera u izvoru zračenja, pri čemu usled Doplerovog efekta spektralna linija poprima Gausov profil. Takođe je moguće i pomeranje energijskih nivoa u atomima emiterima pod dejstvom lokalnog električnog mikro polja. Ova pojava dovodi do Štarkovog efekta. Štarkov i Doplerov efekat se javljaju u plazmi kao izvoru zračenja, i ukoliko su istovremeno prisutni, spektralna linija je konvolucija ova dva efekta.

Ni u slučaju svetlosnih izvora kod kojih se i Štarkov i Doplerov i ostali mehanizmi širenja spektralnih linija mogu zanemariti, spektralna linija nije idealno monohromatska, već poseduje svoju prirodnu širinu. Prirodna širina linije je posledica neodređenosti energijskih nivoa atoma, između kojih se vrši prelaz pri kojem se emituje foton. Ta neodređenost se prenosi na energiju fotona, odnosno na njegovu talasnu dužinu i na taj način izaziva širenje spektralne linije. Prirodna širina linije se ne može izbeći, ali je veoma mala, tako da se može zanemariti. Međutim, čak i ako se iz izvora zračenja emituju spektralne linije prirodne širine, već ulazna pukotina proširuje liniju (Slika 6.a)), a spektalne linije na izlazu spektralnog uređaja sa uskom ulaznom pukotinom imaju Gausov profil (slika 6.b)). Kako ovaj dobijeni profil zavisi od karakteristika uređaja, naziva se instrumentalni profil. Ako bi ulazna pukotina (u slučaju instrumenta sa samo ulaznom pukotinom), ili i ulazna i i izlazna pukotina instrumenta (u slučaju instrumenta sa ulaznom i izlaznom pukotinom), bile šire došlo bi do širenja profila linije koji se detektuje na izlazu spektralnog uređaja (Slika 6.c)).



## 2 Monohromator

Monohromatori su spektralni uređaji pomoću kojih se iz posmatranog spektra izdvaja veoma uzana oblast spektra.

## 2.1 Difrakcione rešetke

Difrakciona rešetka se može predstaviti kao skup reflektujućih (refleksione rešetke) ili transmitujućih elemenata (transmisione rešetke), koji su na međusobnom rastojanju uporedivom sa talasnom dužinom upadnog zračenja. Osnovna fizička karakteristika difrakcione rešetke je prostorna modulacija indeksa prelamanja, koja dovodi do predvidive modifikacije upadnog zračenja pri difrakciji.

Svaka monohromatska komponenta upadnog zračenja difraktuje na rešetci. Pri tome se svaki zarez rešetke ponaša kao novi izvor difraktovanog zračenja. Za datu talasnu dužinu zračenja  $\lambda$ , dati upadni ugao  $\alpha$  i konstantu rešetke *d* (Slika 7.), difraktovano zračenje može konstruktivno interferirati samo pod uglovima difrakcije iz diskretnog skupa vrednosti  $\{\beta_m\}$ , koji je definisan jednačinom rešetke

$$d\left(\sin\alpha + \sin\beta\right) = m\,\lambda\tag{5}$$

Do konstruktivne interferencije dolazi isključivo kada je svetlo koje je difraktovano sa različitih pukotina u fazi. Drugim rečima, konstruktivna interferencija zračenja je moguća samo ako je razlika u putu koji pređu paralelni zraci iste talasne dužine pri refleksiji od susednih zareza, jednaka celobrojnom umnošku talasne dužine tih zraka.

Jedna od najvećih prednosti difrakcione rešetke je upravo pomenuti diskretni skup uglova difrakcije, koji diretkno zavisi od talasne dužine zračenja. Štaviše, iako se položaj izvora i detektora u odnosu na osu rotacije rešetke ne menja, pri zakretanju rešetke se menjaju ulazni i izlazni uglovi u odnosu na površinu rešetke. Dakle, zakretanjem rešetke se menjaju veličine  $\alpha$  i  $\beta$ , pri konstantnom m i d, tako da se mora menjati i  $\lambda$  detektovanog zračenja, s obzirom da postojanje detekcije podrazumeva ispunjenost jednačine rešetke.

Upadni uglovi i uglovi difrakcije se, prema konvenciji, mere od normale na rešetku ka zraku. Svi uglovi koji se mere u smeru kazaljke na satu, počevši od normale rešetke, imaju negativan znak, a uglovi koji se mere smeru suprotnom smeru kazaljke imaju pozitivan predznak (Slika 7.). Kao primer ove konvencije se može navesti specijalni slučaj kada je red difrakcije jednak nuli (m = 0), pa jednačina rešetke prelazi u zakon refleksije  $\alpha = -\beta$ .



Slika 7. Difrakcija na rešetki za planarni talasni front.

Ukoliko upadni i reflektovani zrak ne leže u istoj ravni kao i normala na površinu rešetke, potrebno je modifikovati jednačinu rešetke, tako da ona glasi:

$$d(\sin\alpha + \sin\beta)\cos\varepsilon = m\lambda \tag{6}$$

gde je  $\varepsilon$  ugao upadnog zraka u odnosu na ravan koja sadrži normalu rešetke. Često se koristi i veličina G = 1/d [zareza/mm], koja se naziva gustina ili frekvencija zareza.

U praksi se često koriste konfiguracije monohromatora sa konstatnom devijacijom. U tom slučaju se rešetka obrće oko ose koja je paralelna zarezima, tako da pravci upadnog i difraktovanog svetla ostaju nepromenjeni. Uvođenjem ugla devijacije  $2K = \alpha(\lambda) - \beta(\lambda) = const.$ , koji je konstantna veličina, i ugla skaniranja  $\phi(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$ , jednačina rešetke dobija oblik:

$$m\,\lambda = 2d\,\cos K\sin\phi\tag{7}$$

Iz prethodne jednačine se vidi da je talasna dužina difraktovanog zračenja direktno srazmerna sinusu ugla skaniranja, pa je upotreba sinusne šipke (sine bar) (Slika 8.) za zakretanje rešetke izuzetno pogodna.



Slika 8. Mehanizam sinusne šipke za skeniranje talasnih dužina.

Difrakcione rešetke mogu biti i konkavne, a šematski prikaz jedna takve rešetke sa radijusom krivine R je dat na slici 8. Kod ove rešetke se oštra slika dobija po obodu kruga radijusa R/2.



Slika 8. Konkavna difrakciona rešetka.

## 2.1.1 Red difrakcije

Kao što je već napomenuto, da bi se dobila konstruktivna interferencija pri difrakciji, interferirajući monohromatski zraci difraktovani sa susednih zareza treba da budu u fazi. To znači da njihova fazna razlika treba da bude jednaka razlici pređenih puteva koja je jednaka celobrojnom umnošku njihove talasne dužine.

Ukoliko je ta razlika jednaka jednom iznosu talasne dužine, reč je o pozitivnom (m = 1) ili negativnom (m = -1) prvom redu difrakcije. Prema konvenciji je m > 0, ako se difraktovani zrak nalazi levo od reflektovanog zraka (m = 0), a m < 0 ako difraktovani zrak leži desno od reflektovanog (Slika 9.). Difrakcija drugog reda, pozitivnog i negativnog, se javlja kada putna razlika odgovara dvostrukom iznosu talasne dužine zraka. Po analogiji, difrakcije višeg reda m = k se javljaju kada putna razlika odgovara k-tom umnošku talasne dužine zraka. Ipak, broj redova difrakcije je ograničen. Naime, u skladu sa jednačinom rešetke se može javiti samo difrakcija čiji red zadovoljava uslov:



Slika 9. Konvencija o pozitivnom i negativnom redu difrakcije.

#### 2.1.2 Preklapanje različitih spektara

Postojanje difrakcije viših redova dovodi do preklapanja određenih sukcesivnih talasnih dužina, odnosno spektara (Slika 10.). Iz jednačine rešetke se vidi da je, pri fiksiranim vrednostima upadnog ugla i ugla difrakcije, difraktovano svetlo talasne dužine  $\lambda$  reda m=1, praćeno difraktovanom svetlošću talasne dužine  $\lambda/2$  reda m=2. U tom slučaju detektor registruje oba ova zraka različitih talasnih dužina istovremeno, odnosno na istom mestu. Kako bi se to izbeglo, neophodno je pre detektora isfiltrirati samo ono zračenje koje se želi posmatrati, s obzirom da detektor nije u stanju da razlikuje zračenje različitih talasnih dužina (ukoliko su one u opsegu detekcije).



Slika 10. Preklapanje sukcesivnih talasnih dužina.

#### 2.1.3 Disperzija

Ugaona i linearna disperzija su, kao opšti pojmovi, već ukratko objašnjeni u prethodnom delu teksta. Pošto se rad monohromatora korišćenog u ovom radu zasniva na difrakcionoj rešetci, na ovom mestu će biti detaljnije razmotrena disperzija difrakcione rešetke.

Ugaoni interval  $\Delta\beta$  koji zauzima spektar difrakcionog reda *m*, po intervalu talasnih dužina  $\lambda$  i  $\lambda + \Delta\lambda$  i pri konstantnom upadnom uglu  $\alpha$ , se dobija diferenciranjem jadnačine rešetke. Odatle za ugaonu disperziju rešetke sledi:

$$D_{\beta} = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\beta} = \frac{Gm}{\cos\beta} = \frac{\sin\alpha + \sin\beta}{\lambda\cos\beta}$$
(9)

Iz prethodne jednačine se može zaključiti da je ugaona disperzija srazmerna gustini zareza, odnosno ugaono razdvajanje različitih talasnih dužina se povećava sa G, za dato m. Desna strana jednačine pokazuje da, za datu talasnu dužinu, ugaona disperzija funkcija isključivo upadnog ugla i ugla difrakcije.

Linearna diperzija disperzionog sistema sa difrakcionom rešetkom se, za datu talasnu dužinu i red difrakcije, dobija kao proizvod ugaone disperzije i efektivne fokalne dužine  $r'(\beta)$  sistema:

$$D_{l} = \frac{dl}{d\lambda} = r' D_{\beta} = r' \frac{m}{d\cos\beta} = r' \frac{Gm}{\cos\beta}$$
(10)

Veličina  $\Delta l = r' \Delta \beta$  realna promena položaja u spektru.

Recipročna linearna disperzija  $P = 1/D_l$ , je mera promene talasne dužine koja odgovara promeni položaja duž spektra odnosno na zaklonu. Ukoliko zaklon odnosno detektor na kojem se posmatra spektar nije normalan na pravac zraka koji se posmatra, linearnu disperziju je potrebno korigovati i to tako što se P množi sa uglom koji ravan ekran zaklapa sa pravcem zraka.

## 2.1.4 Moć razlaganja

Teorijska moć razlaganja ravne difrakcione rešetke je data izrazom:

$$R = mN = \frac{N d \left(\sin \alpha + \sin \beta\right)}{\lambda} \tag{11}$$

gde je N ukupni broj zareza na površini rešetke koji su osvetljeni. Za negativne vrednosti m se uzima apsolutna vrednost moći razlaganja. Ako je rastojanje između zareza konstantno duž rešetke, za širinu rešetke se može pisati W = N d, pa moć razlaganja dobija formu:

$$R = \frac{W\left(\sin\alpha + \sin\beta\right)}{\lambda} \tag{12}$$

Maksimalna moć razlaganja je:

$$R_{\rm max} = \frac{2W}{\lambda} \tag{13}$$

Merenjem razlike optičkih puteva dva zraka koji difraktuju na suprotnim krajevima rešetke se dobija maksimalni fazni pomeraj. Ako se ovaj broj podeli sa talasnom dužinom zračenja, dobija se moć razlaganja.

Stepen primenjivosti teorijske moći razlaganja zavisi od uglova  $\alpha$  i  $\beta$ , ali i od optičkog kvaliteta površine rešetke, uniformnosti rastojanja između zareza i kvaliteta ostale optike u sistemu.

Praktična moć razlaganja je ograničena širinom spektralnih linija koja zavisi od karakteristika izvora svetlosti. U dosta slučajeva i nije potrebna velika moć razlaganja, osim za npr. posmatranje oblika spektralnih linija, proučavanja Zemanovog ili Štarkovog efekta, itd.

## 2.1.5 Spektralni opseg (Bandpass)

Spektralni opseg B spektroskopskog sistema se definiše kao interval talasne dužine koji prolazi kroz izlaznu pukotinu. U sistemu u kojem je širina ulazne pukotine približno jednaka širini izlazne pukotine, spektralni opseg se može proceniti kao proizvod širine izlazne pukotine w' i recipročne linearne disperzije P:

$$B \approx w' P \tag{14}$$

Instrument sa manjim B može da razlikuje bliže linije (odnosno talasne dužine) od instrumenta sa većim B. Sužavanjem izlazne pukotine do neke granice se može smanjiti B, ali na račun intenziteta svetla.

### 2.1.6 Fokalna dužina

Za rešetke koje daju sliku i difraktuju svetlost ili rasipaju svetlost koja nije kolimisana može se definisati fokalna (žižna) dužina. Ako difraktovani snop talasne dužine  $\lambda$  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.

Slično tome, upadno svetlo može divergirati ka rešetci pa se može definisati incidentno rastojanje (rastojanje ulazne pukotine)  $r(\lambda) > 0$ . Upadno svetlo može takođe konvergirati ka fokusu iza rešetke pa je u tom slučaju  $r(\lambda) < 0$ . Uobičajano je da se rešetke koriste na takav način, da r ne zavisi od talasne dužine.

Ulazni (input) i izlazni (output) f/brojevi, tj. fokalni odnosi se uvode kao:

$$f / no_{INPUT} = \frac{r}{W}$$
(15)

$$f / no_{OUTPUT} = \frac{r'(\lambda)}{W}$$
(16)

i obično su međusobno jednaki.

Odnos ulaznih i izlaznih fokalnih dužina određuje projektovanu širinu ulazne pukotine. Kod spektralnih uređaja sa ulaznom i izlaznom pukotinom, uobičajeno je da se projektovana širina ulazne pukotine poklapa sa širinom izlazne pukotine. Fokalna dužina je bitna i iz tog razloga, što u velikoj meri određuje dimenzije spektralnog uređaja.

## 2.2 Monohromatori Černi-Tarnerovog (Czerny-Turner) tipa

Rad monohromatora Černi-Tarnerovog tipa se zasniva na korišćenju ravne difrakcione rešetke. Upadno zračenje divergira počevši od samog izvora zračenja, a zatim i nakon prolaska kroz ulaznu pukotinu, pa se prvo kolimiše konkavnim kolimatorskim ogledalom, a zatim pada na difrakcionu rešetku. Svetlost difraktovana od rešetke pada na drugo konkavno (kamerno) ogledalo, odakle se usmerava ka izlaznoj pukotini (Slika 15.).



Slika 11. Konfiguracija Černi-Tarnerovog tipa monohromatora.

Komponente spektra različitih talasnih dužina se pojedinačno dovode na izlaz monohromatora zakretanjem difrakcione rešetke. Na taj način se skenira posmatrani spektar. Rotiranje rešetke se vrši oko ose koja je normalna na ravan u kojoj leže upadni i difraktovani zrak. Pošto je konstanta rešetke d konstantna veličina, a posmatra se određeni red difrakcije m, rotiranje rešetke uslovljava promenu talasne dužine zračenja koja zadovoljava jednačinu rešetke. Na taj način je promenjena talasna dužina zračenja koje pada na drugo konkavno ogledalo. Pošto je upadno i difraktovano svetlo kolimisano, spektar ostaje fokusiran na izlaznoj pukotini, a rotiranjem rešetke se menja jedino talasna dužina zračenja koja zadovoljava uslov za konstruktivnu interferenciju na rešetci i zatim pada na izlaznu pukotinu.

#### 2.2.1 Monohromator McPherson 2061

Monohromator koji je korišćen u svrhe ovog rada je model 2061 (Slika 12.) proizvođača McPherson. To je monohromator Černi-Tarnerovog tipa, fokalne dužine 1 m. Disperzioni element je difrakciona rešetka površine 120 mm × 140 mm, sa 1200 zareza po milimetru. Rezolucija monohromatora sa ovom rešetkom iznosi 0,018 nm (na talasnoj dužini od 313,1 nm), a linearna disperzija je 0,83nm/mm. Opseg talasnih dužina iznosi od 185 nm do 1300 nm.

Ovaj monohromator standardno ima dve ulazne i dve izlazne pukotine. Širina otvora ulazne pukotine se može menjati u opsegu od  $5\,\mu$ m do  $4000\,\mu$ m, a visina u diskretnim koracima u intervalu od 2mm do 20mm. Položaj rešetke se menja step motorom. Na jednoj izlaznoj pukotini je, u ulozi detektora, postavljen fotomultiplikator a na drugoj ICCD kamera.



Slika 12. Šema monohromatora McPherson 2061.

CCD detektori su, pored spektralnih, uveli mogućnost merenja prostornih osobina zračenja. Kao posledica, javila se potreba za korekcionom optikom, koja bi umanjila deformacije slike na krajevima čipa, s obzirom da se pri imidžingu (imaging) ne koristi samo centralni deo čipa, već celokupna njegova površina. Nasuprot tome, kod skening (scanning) tehnika snimanja (gde se kao detektor koristi fotomultiplikator) se koristi samo uzani deo slike, pa optičke deformacije nemaju značajnog uticaja na rezoluciju.

Kod optičkih sistema se od većih aberacija izdvajaju sferna aberacija i astigmatizam, a pokušaji korekcije jednog efekta neminovno povećava drugi. Na primer, popravke astigmatizma dovode do narušavanja rezolucije.

U zavisnosti od toga da li se monohromator želi koristiti za skening ili imidžing, mora se koristiti optimizovana optika za jedan ili drugi slučaj.

U svrhu optimizacije za potrebe imidžinga se može koristi dodatno korekciono cilindrično ogledalo, koje se postavlja na ulazni deo spektrometra i koje onda snabdeva oba izlazna otvora spektrima. Tada selektor signala na izlazu uređaja, na jedan od izlaznih otvora dovodi imidžing spektar, a na drugi spektar sa optimalnom rezolucijom.

Jedan od bitnih koraka u optimizaciji optičkog sistema monohromatora jeste i izbor vrste rešetke odnosno ogledala.

Na slikama su prikazani dijagrami na kojima su prikazane tačke koje predstavljaju položaje zraka (ray traced spot diagrams). Jasno se uočava razlika između sistema podešenog na dobru rezoluciju (Slika 13.a) i sistema u kojem je pomoću korekcione optike postignut kompromis rezolucije i prostornog imidžinga (Slika 13.b).



Funkcija prostorne distribucije tačaka je grafički prikazana na slici 14 (point spread function).



Slika 14. Funkcija prostorne distribucije tačaka.

Ovi podaci se zasnivaju na ray trace analizi na 600 nm, sa rešetkom od 2400 zareza/mm u McPhersonovom monohromatoru 207, sa fokalnom dužinom od 0.67m, f/4.7 sistemom sa 100  $\mu$ m širokom ulaznom slikom.

Dijagram na slici 15 je dobijen korišćenjem sfernih ogledala sa korekcionim cilindrom. Grupacije tačaka su relativno nepravilne, što je posledica optike, koja je dizajnirana tako da izbalansira najbolju moguću rezoluciju sa što manje astigmatizma. Ovako podešen monohromator se se može koristiti i za imidžing i za skening.



Slika 15. Ray trace analiza za slučaj korišćenja sfernih ogledala sa korekcionim cilindrom (srednja veličina slike 130 × 130 μm (poluširina), pri slici dimenzija 100 × 100 μm na ulazu, za McPherson model 2061).

Parabolična ogledala su odlična za imidžing na osi, tj. na veoma ograničenom polju (Slika 16.). Međutim, pomeranjem van ose (kao što je to slučaj kod disperzije ili prostorne ravni) se njihova sposobnost imidžinga smanjuje za faktor 10. Ova monohromatorska ogledala su idealna za male visine pukotine, ali nisu dobra za imidžing.



Slika 16. Ray trace analiza za slučaj korišćenja paraboličnih ogledala (srednja veličina slike je 153 × 153 μm (poluširina), pri slici dimenzija 100 × 100 μm na ulazu, za McPherson model 2061).

Toroidna ogledala unose najmanji astigmatizam duž izlazne ravni (Slika 17.), ali ne daju dobru rezoluciju.



Slika 17. Ray trace analiza za slučaj korišćenja toroidalnih ogledala (srednja veličina slike je 139 × 139 μm (poluširina), pri slici dimenzija 100 × 100 μm na ulazu, za McPherson model 2061).

## 3 Detektori

Pri izradi ovog rada su kao detektori zračenja korišćeni fotomultiplikator i ICCD (intensified charge-coupled device) kamera pa će stoga na ovom mestu biti ukratko opisani.

## 3.1 Fotomultiplikator

Fotomultiplikator (Slika 18.) je često cilindrične geometrije. Sadrži prozor koji je transparentan za upadne fotone i naslanja se na izlaznu pukotinu monohromatora. Ispod prozora se nalazi fotokatoda (K) iz koje upadni fotoni iz monohromatora izbijaju elektrone. Talasna dužina fotona treba da odgovara maksimumu spektralne osetljivosti fotokatode, kako bi transformacija signala bila što efikasnija.

Fotoelektroni se kreću ka najbližoj dinodi (D) koja je na nešto većem potencijalu od katode i načinjena je od materijala iz kog se lako izbijaju elektroni. Dakle, mali početni broj fotoelektrona koji pada na prvu dinodu iz nje 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 (A), koja je na najvišem potencijalu i do nje dospeva veoma veliki broj elektrona, kao posledica lavinskog umnožavanja elektrona pri udarima o sukcesivne dinode. Sakupljeni elektroni čine izvesnu električnu struju (fotostruju) koja dovodi do pada napona na otporniku.

Pad napona na otporniku se registruje kao električni signal i srazmeran je intenzitetu svetlosti. To je razumljivo, s obzirom da je intenzitet svetlosti koja pada na fotokatodu proporcionalan 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. Naravno, 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.



Slika 18. Fotomultiplikator.

## 3.2 ICCD kamera

ICCD kamera, korišćena pri izradi ovog rada, je 4QuikEdig, proizvođača Stanford Computer Optics. U sledećem tekstu će biti objašnjen princip rada kamere ovog tipa i osnovne karakteristike.

ICCD kamera se u osnovi sastoji od CCD (charge-coupled device) senzora 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 (Slika 19.). Prednost ove konstrukcije je ta što je svetlost koja pada na CCD već bitno pojačana, pa se time očitavaju visoki električni signali, čiji su intenziteti znatno veći od šuma kamere.



Slika 19. Šematski prikaz ICCD kamere.

#### 3.2.1 Pojačavač slike (intensifier)

Pojačanje svetlosnog signala u pojačavaču se zasniva na umnožavanju fotona ulaznog svetlosnog signala. Zahvaljujući tome, kamera može da razaznaje sliku i pri veoma niskim intenzitetima upadnog svetla. To otvara i mogućnost snimanja pri veoma kratkim vremenima ekspozicije. Korišćenje kratke ekspozicije omogućava snimanje veoma brzih procesa. Takođe, korišćenje kratke ekspozicije omogućava i snimanje velikog broja slika (frame) u kratkom vremenskom intervalu.

Još jedna važna karakteristika ICCD kamere, za koju je direktno zaslužan pojačavač, je gejting (gating) funkcija. Naime, ukoliko je kamera gejtovana (gated on), šater (elektronska blenda) je otvoren i upadno svetlo se pojačava. Ukoliko kamera nije gejtovana (gated off), šater je zatvoren, pa se upadna svetlost ne pojačava i ne prenosi do CCD senzora. Vreme ekspozicije se setuje i može iznositi od nekoliko nanosekundi pa do na desetine ili hiljade sekundi.

Pojačavač se sastoji od fotokatode, mikrokanalske ploče (MCP) i fosfornog ekrana (Slika 20.). Pri prikazanom rasporedu elemenata podrazumeva se prostiranje upadnog svetla sa leve strane ka desnoj.



Na gornjoj slici se uočavaju tri vrednosti napona, između različitih delova pojačavača koji označeni

sa A, B i C. Napon na delu A (između fotokatode i mikrokanalske ploče) je gejting (gating) napon  $U_c$ . Ako je on negativan, fotoelektroni izbijeni sa fotokatode se ubrzavaju ka MCP, i tada je kamera otvorena (gated on) (Slika 21.a)). Ukoliko je napon  $U_c$  negativan, fotoelektroni se usporavaju i ne stižu do MCP, pa je tada kamera zatvorena (gated off) (Slika 21.b)).



Slika 21. Princip rada pojačavača slike i šater funkcija.

## 3.2.1.1 Fotokatoda

Od nabrojanih elemenata pojačavača, upadno svetlo prvo pada na fotokatodu (Slika 22.). Na fotokadoti 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. Iz tog razloga se prozor izrađuje od materijala koji je transparentan za zračenje date talasne dužine. Za zračenje iz vidljive oblasti se najčešće izrađuje od kvarca. Za upadno zračenje iz vakuumske ultraljubičaste oblasti koristi se prozor od MgF<sub>2</sub>. Na slici 23 su prikazane karakteristike prozora od ova dva materijala.



#### 3.2.1.2 Mikrokanalska ploča

Uloga mikrokanalske ploče (MCP) je umnožavanje elektrona koji stižu sa fotokatode. MCP (Slika 24.) 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 25.). 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, što i jeste razlog korišćenja mikrokanalske ploče. Pojačanje MCP-a se može predstaviti relacijom:

$$g = \exp\left(G\frac{L}{D}\right) \tag{17}$$

gde je D prečnik mikrokanala, L njegova dužina, a G faktor pojačanja-umnožavanja. Faktor pojačanja je karakteristika materijala zidova kanala iz kog se izbijaju elektroni a zavisi od jačine primenjenog električnog polja.

Vremenska rezolucija MCP je određena vremenom trajanja lavinskog efekta u kanalima i zavisi od odnosa dužine i prečnika kanala.

MCP može biti jednostepeni (Slika 26.), dvostepeni (Slika 27.) ili trostepeni. Uobičajeni faktor umnožavanje elektrona za jednostepeni MCP je 1000, za dvostepeni  $10^6$ , a za trostepeni je ograničen na  $10^8$  usled saturacije. S druge strane, što je MCP višeg stepena, optička rezolucija i odnos signala prema šumu opadaju.



#### 3.2.1.3 Fosforni ekran

Fosforni ekran pretvara sekundarne elektrone sa MCP u fotone (Slika 28.). 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, je presvučena slojem aluminijuma, kako bi se fotoni koji se emituju u smeru ka MCP, reflektovali ka CCD kameri.



Slika 28. Fosforni ekran.

#### 3.2.2 Sistem sočiva za spregu

Svetlo koje se emituje sa fosfornog ekrana je potrebno sprovesti do CCD čipa. To se može postići sistemom sočiva ili snopom optičkih vlakana (fiber taping coupling). Oba sistema imaju svoje prednosti i mane. Kod sistema sočiva ne dolazi fragmentisanja slike, očuvava se optička rezolucija i nema distorzije slike. Međutim, sistem sočiva je na nekom konačnom rastojanju od fosforescentnog ekana, tako da deo emitovanog zračenja neće pasti na sočiva, a samim tim neće pasti 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. Kamera korišćena u eksperimantima koristi sistem sočiva (Slika 29.). Ovim sistemom sočiva se ujedno 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.



Slika 29. Sistem sočiva za spregu.

## 3.2.3 CCD senzor

CCD čip se sastoji od više nizova, a svaki niz je sastavljen od više piksela sa zajedničkim substratom. Presek piksela je prikazan na slici 30. Svaki piksel je MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) kondenzator, tj. sastoji se od tankog sloja izolatora  $S_iO_2$  nanešenog na substrat P-tipa i elektrode (kapije) koja naleže na  $S_iO_2$ . 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 30. Prikaz jednog piksela.

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 pikseilima 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, dakle slika izvora. Za kameru upotrebljenu u eksperimentima, izgled čipa je šematski prikazan na slici 31. Radi lakše orijentacije, pikselima su pridružene x- i y-koordinate.



Slika 31. Šematski prikaz rasporeda piksela na čipu, sa pridruženim koordinatnim sistemom. Pikseli su predstavljeni kvadratima. Svetle linije na fotografiji predstavljaju linije jednog spektra.

Dakle, CCD čip se može predstaviti kao matrica svetlosno osetljivih piksela. CCD čip korišćene kamere 4QuikEdig ima 1360 piksela po horizontali (u daljem tekstu se taj pravac smatra xosom) 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 xosi, 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. U programu 4Spec je moguće zadati visinski interval piksela u kojem se vrši sumiranje naelektrisanja, odnosno očitava intenzitet linija u spektru. U sledećem izlaganju će često biti spominjano takvo iščitavanje intenziteta u zadatom visinskom intervalu CCD čipa, i upravo taj postupak će se podrazumevati pod izrazom "uzorkovanje intenziteta duž visinskog pojasa".

Kako bi se izbegle neželjene promene na slici, neophodno je sprečiti osvetljavanje CCD piksela za vreme trajanja očitavanja. Najjednostavnije rešenje je upotreba funkcije šatera. Međutim, i sam CCD čip, u zavisnosti od konstrukcije, doprinosi rešenju ovog problema.

## 3.2.4 Video jedinica i veza kamere sa računarom

Video jedinica predstavlja sistem koji čine sam CCD senzor i elektronika kojom se formira izlazni signal. Video jedinice mogu biti analogne ili digitalne. CCD senzor je, sam po sebi, analogan, pa je razlika jedino u vrsti izlaznog signala koji se sa video jedinice šalje ka računaru.

Kamera koja je korišćena u eksperimentima vezanim za ovaj rad je digitalna. A/D konverzija se vrši u samoj kameri a digitalni signal se šalje ka računaru. Veza sa računarom (Slika 32.) je uspostavljena posredstvom CameraLink interfejsa, koji zahteva jedan kabel i frejm greber (frame grabber) karticu na ulazu računara. CamerLink interfejs je odabran umesto USB 2.0 konekcije zbog pet puta veće brzine protoka podataka.



Slika 32. Veza kamere sa računarom.

Za upravljanje kamerom i očitavanje snimaka u izvršenim eksperimentima, korišćen je računarski program 4 Spec, koji je deo kompleta kamere.

## 4 Izvori svetlosti

U ovom radu su korišćene dve vrste svetlosnih izvora: Geislerova cev i šuplja katoda. Treba istaći da su korišćeni svetlosni izvori koji emituju spektralne linije izuzetno male širine, reda veličine prirodne širine. U skladu sa tim su svi snimljeni profili posledica isključivo instrumentalnog širenja linije. Stoga je u ovom radu reč samo o instrumentalnim profilima.

## 4.1 Gajslerova cev

Gajslerova cev je staklena cev za pražnjenje, sa proširenim delovima na krajevima i uskim delom u sredini. Na proširenim krajevima cevi se nalaze otvori za dovod i odvod gasa. Osim toga se u prošireni delovima cevi nalaze zatopljene elektrode između kojih se vrši električno pražnjenje. Pražnjenje je kontinualno i posmatra se na središnjem delu cevi, pa se upravo taj deo cevi postavlja ispred ulazne pukotine monohromatora (Slika 33.).



Slika 33. Šematski prikaz električnog i gasnog sistema Gajslerove cevi.

## 4.2 Cev sa šupljom katodom

Cev sa šupljom katodom je zatvorena staklena cev, sa dve zatopljene elektrode, od kojih je katoda posebno konstruisana i šuplja (Slika 34.). Unutrašnjost cevi je ispunjena nosećim gasom kroz koji se vrši pražnjenje kada se na elektrode priključi napon. Pozitivni stub pražnjenja je smešten u šupljini katode, a spektralne linije koje se emituju iz njega pretežno potiču iz deekscitacionih procesa neutralnih atoma u stubu. Atomi koji učestvuju u emisiji su atomi materijala katode i atomi nosećeg gasa. Cevi sa šupljom katodom se koriste kao izvori veoma uskih spektralnih linija.



U eksperimentima je korišćena cev sa šupljom bakarnom katodom i cev sa šupljom olovnom katodom.



Cevi sa šupljom katodom su vezivane na izvor jednosmernog napona marke Bertran associates inc., model 205A-01R, prema gornjoj šemi (Slika 35.). Ovo napajanje omogućuje menjanje jačine struje kroz kolo za pražnjenje, kao i očitavanje njene vrednosti na ampermetru samog napajanja.

# 5 Eksperimentalna postavka, postupak snimanja i rezultati merenja

Pojedinačni elementi, koji su opisani u prethodnom tekstu, su povezani u jednu funkcionalnu celinu eksperimentalnog sistema. U eksperimentima se na ulaz monohromatora dovodi svetlost sa izvora. Kao svetlosni izvori, u ovom radu, korišćeni su Gajslerova cev i šuplja katoda. Za zakretanje rešetke monohromatora je korišćen step motor proizvođača McPherson. Na jednom od izlaza monohromatora je postavljena ICCD kamera, a na drugom fotomutiplikator. Zakretanjem selekcionog ogledala se bira da li se kao detektor koristi ICCD kamera ili fotomultiplikator. Signal sa fotomultiplikatora je očitavan digitalnim voltmetrom povezanim USB konekcijom sa računarom. Na računaru je instaliran, kako softver za upravljanje kamerom, tako i softver za upravljanje digitalnim voltmetrom. Šematski prikaz eksperimentalne postavke je dat na slici 36.



Slika 36. Šematski prikaz eksperimentalne postavke.

## 5.1 Postupak snimanja profila spektralnih linija

Kao što je ranije rečeno, profili spektralnih linija se mogu snimati korišćenjem dva detektora: ICCD kamere ili fotomultiplikatora. U ovom radu su korišćena oba načina te će u daljem tekstu ovi postupci biti ukratko opisani.

#### 5.1.1 Snimanje spektralnih profila fotomultiplikatorom

Svetlosni signal sa difrakcione rešetke se dovodi na fotomultiplikator tako što se selekciono ogledalo u monohromatoru zakrene u odgovarajući položaj. Fotomultiplikator je napajan naponom od 600 V. Signal sa fotomultiplikatora je preko otpornika vrednosti 10 M $\Omega$  (Slika 18.) meren digitalnim voltmetrom vezanim za računar. Pri svim merenjima su, širine ulazne i izlazne pukotine

iznosile 30  $\mu$ m. Vrednost otvora ulazne pukotine od 30  $\mu$ m je odabrana jer se minimalna vrednost poluširine instrumentalnog profila pri radu sa ICCD kamerom dobija upravo za ovu vrednost pukotine. Da bi se dobila minimalna vrednost poluširine linije pri snimanju fotomultiplikatorom, za zadatu vrednost ulazne pukotine se bira istovetna vrednost izlazne pukotine.

Pri snimanju linije fotomultiplikatorom, vrši se skeniranje linije zakretanjem difrakcione rešetke u diskretnim koracima. Naime, na svakom datom položaju rešetke, očitava se vrednost intenziteta zračenja sa fotomultiplikatora. Rešetka se zakreće step motorom. Korišćeno je zakretanje rešetke koje odgovara koracima od 0,05 Å. Profil linije se dobija tako što se svakom položaju rešetke, odnosno talasnoj dužini, dodeljuje njemu odgovarajuća visina signala sa fotomultiplikatora.

## 5.1.2 Snimanje spektralnih profila ICCD kamerom

Svetlosni signal sa difrakcione rešetke se dovodi na ICCD kameru tako što se selekciono ogledalo u monohromatoru zakrene u odgovarajući položaj. Pri svim merenjima je širina ulazne pukotine iznosila 30 µm. Treba naglasiti da pri snimanju ICCD kamerom, izlazne pukotine uopšte nema. Programom 4 Spec se setuje kamera i kontroliše proces snimanja. Pre početka snimanja se mora izvršiti setovanje kamere. Najbitniji parametri pri radu sa kamerom su setovanje vremena ekspozicije i napona na MCP-u. Izbor ovih parametara je ujedno i najkritičniji deo rada sa ovakvim kamerama, jer ako su pojačanje i vreme ekspozicije suviše veliki, može doći do trajnih oštećenja kamere. S druge strane, ako nisu dovoljno veliki, signal sa kamere će biti mali, a odnos signal/šum veoma loš. U samom procesu snimanja, uobičajeno je da se prikuplja više desetina ili stotina frejmova na osnovu kojih se onda može izvršiti usrednjavanje. Takođe, pre svakog snimanja spektra, snima se bekgraund (background) koji predstavlja signal koji kamera detektuje u odsustvu zračenja izvora. Bekgraund je u stvari šum koji potiče od pozadinskog svetla i šum koji potiče od same kamere. Pri snimanju spektara se onda vrši automatska korekcija snimaka na bekgraund. Da bi se dobio spektar zračenja, nakon snimanja je potrebno očitati dobijene fotografije, odnosno dobiti zavisnost intenziteta od horizonatlne pozicije piksela, kojima se kasnije pridružuju odgovarajuće talasne dužine.

U prvom koraku je potrebno očitati intenzitete snimljenih spektralnih linija u odabranom visinskom intervalu CCD čipa (gledano duž y-ose). Ovo znači da na svakom kanalu, odnosno na svakom položaju duž x-ose, treba očitati intenzitete duž tog kanala, u odabranom visinskom opsegu. Potom se očitani intenziteti duž tog kanala sumiraju, te se na taj način dobija intenzitet duž datog kanala (intenzitet na datoj poziciji duž y-ose). Očitavanjem svih kanala se dobija zavisnost intenziteta od horizontalnog položaja piksela na CCD čipu.

Kako bi se položaji piksela preračunali u odgovarajuće vrednosti talasnih dužina, potrebno je prvo uraditi kalibraciju po talasnim dužinama, što nije bio cilj ovog rada. Ova kalibracija je urađena ranije. Kao rezultat ove kalibracije dobija se jednačina, kojom se pozicije piksela preračunavaju u odgovarajuće vrednosti talasnih dužina date u angstremima:

$$\lambda_{\rm A} = (\lambda_{\rm P} - 680.5) \cdot (0.1186 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot R - 2.7 \cdot 10^{-10} \cdot R^2) + R \quad (18)$$

gde je  $\lambda_A$  talasna dužina izražena u angstremima,  $\lambda_P$  talasna dužina očitana sa snimka (u pikselima), R položaj difrakcione rešetke (u angstremima) pri kome je vršeno snimanje i očitan je sa monohromatora. Treba napomenuti da tačnost vrednosti talasne dužine u angstremima, izračunate na ovaj način, najviše zavisi od tačnosti očitavanja položaja difrakcione rešetke, pri kojem je izvršeno snimanje. U principu je svejedno da li se obrada podataka radi u prostoru talasnih dužina izraženim u pikselima ili angstremima. Naime, poznavanjem vrednosti parametra P, koji pokazuje koliko angstrema iznosi rastojanje od jednog piksela, uvek se može preći iz jednog prostora talasnih dužina u drugi. Parametar P je dat izrazom:

$$P = 0.1186 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot R - 2.7 \cdot 10^{-10} \cdot R^2 \tag{19}$$

Nakon snimanja spektara, potrebno ih je obraditi na spektralnu osetljivost sistema, kako bi se dobili pravilni odnosi intenziteta snimljenih linija u spektru.

Osetljivost sistema je mera odziva sistema na zračenje date talasne dužine. Shodno tome, ukoliko je osetljivost sistema na datoj talasnoj dužini mala, čak i zračenje velikog intenziteta će biti detektovano kao zračenje sa malim intenzitetom. Odnosno, zračenje niskog intenziteta će biti detektovano kao intenzivno, ukoliko je osetljivost sistema velika na toj talasnoj dužini. Dakle, snimljena raspodela intenziteta po talasnim dužinama ne mora odgovarati stvarnom spektru, ako nije izvršena korekcija na osetljivost sistema. Ovo je posebno izraženo ako se snima širi spektralni interval, jer se osetljivost uglavnom menja u širim intervalima talasnih dužina. Odatle prozilazi da je u većini slučajeva, neophodno izvršiti korekciju, kojom bi se povećali intenziteti u oblasti spektra male osetljivosti sistema, a smanjili u oblasti velike osetljivosti. Međutim, da bi se izvršila takva korekcija, potrebno je znati osetljivost sistema.

U postupku određivanja osetljivosti sistema se snima spektar kalibrisanog izvora svetlosti, tj. izvora čija je spektralna raspodela emitovanog zračenja poznata. U tu svrhu je korišćena kalibrisana standardna lampa sa volframskim vlaknom. Osetljivost sistema, na pojedinačnim talasnim dužinama, se izračunava kao odnos snimljenih intenziteta standardne lampe i intenziteta kalibracionog spektra te lampe, na tim talasnim dužinama.

Kada je poznata osetljivost sistema, moguće je izvršiti korekciju dela spektra proizvoljnog izvora na osetljivost sistema. Korekcija na osetljivost sistema se vrši, tako što se eksperimentalno dobijeni intenzitet (na određenoj talasnoj dužini) podeli sa osetljivosti sistema, na istoj talasnoj dužini.

## 5.2 Rezultati merenja i diskusija

# 5.2.1 Uticaj korekcije na spektralnu osetljivost sistema na poluširinu instrumentalnog profila

Jedan od zadataka ovog rada je da se utvrdi koliki je uticaj korekcije na osetljivost sistema na instrumentalne profile spektralnih linija snimljenih ICCD kamerom.

U ovom eksperimentu je kao izvor svetlosti korišćena Gajslerova cev u protočnom režimu, gde je kao gas korišćen argon. Sistem je prvo evakuisan vakuum pumpom prikačenom na otvor za odvođenje gasa iz cevi, a zatim je u njega pušten argon. Argon se u cev za pražnjenje dovodi iz boce, a protok gasa se reguliše igličastim ventilom. Pritisak argona u cevi je meren, i u toku merenja održavan na vrednosti od 100 mtor.

U električno kolo za pražnjenje mora biti redno vezan balastni otpor, kako naponsko-strujna karakteristika pražnjenja ne bi bila negativna. Na Gajslerovu cev i balastni otpornik se dovodi visoki jednosmerni napon sa visokonaponskog transformatora, a vrednost napona se reguliše autotransformatorom.

Gajslerova cev se greje u toku rada, pa je hlađena strujanjem vazduha oko suženog dela.

U izvršenom eksperimentu je snimana spektralna linija neutralnog argona, talasne dužine  $\lambda$ =4300.101 Å. Linija je snimljena pri konstantnom pritisku gasa i tri jačine struje pražnjenja, od 10 mA, 15 mA i 17 mA. Položaj rešetke monohromatora je iznosio 4300 Å. Vreme ekspozicije kamere je bilo 500 µs, a napon MCP-a 900 V. Snimci dobijeni na različitim strujama pražnjenja su rezultat 100 usrednjavanja. Spektar je dobijen iščitavanjem CCD čipa u intervalu od 500. do 600. piksela po y-osi. Dobijeni delovi spektra, odnosno spektralne linije, su prikazani na slici 37. Sa ove slike se može uočiti da sa porastom jačine struje pražnjenja raste i intenzitet spektralne linije, što je i bilo za očekivati.



Slika 37. Snimljeni instrumentalni profili Ar I λ=4300.101 Å linije pri struji pražnjenja od 10, 15 i 17 mA. Profili nisu korigovani na osetljivost sistema.

Instrumentalni profili su potom korigovani na spektralnu osetljivost sistema. Korigovani i nekorigovani instrumentalni profili linije su radi poređenja fitovani na Gausov profil i normirani. Pri fitovanju je korišćena jednačina Gausovog profila oblika:

$$I(\lambda) = I_c + \frac{A}{\frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\sqrt{\ln 4}}\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-2\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{\left(\frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\sqrt{\ln 4}}\right)^2}}$$
(20)

gde je I( $\lambda$ ) intenzitet na talasnoj dužini  $\lambda$ , I<sub>c</sub> ofset odnosno nivo kontinuuma, A površina profila,  $\lambda_0$  centralna talasna dužina, a  $\Delta\lambda_{1/2}$  poluširina profila (širina na polovini maksimalnog intenziteta). Na slikama 38, 39 i 40 su redom prikazani ovako obrađeni profili, za struje pražnjenja od 10, 15 i 17 mA.



Slika 38. Poređenje nekorigovanog i korigovanog na spektralnu osetljivost sistema instrumentalnog profila Ar I  $\lambda$ =4300.101 Å linije pri struji pražnjenja od 10 mA.



Slika 39. Poređenje nekorigovanog i korigovanog na spektralnu osetljivost sistema instrumentalnog profila Ar I  $\lambda$ =4300.101 Å linije pri struji pražnjenja od 15 mA.



Slika 40. Poređenje nekorigovanog i korigovanog na spektralnu osetljivost sistema instrumentalnog profila Ar I  $\lambda$ =4300.101 Å linije pri struji pražnjenja od 17 mA.

Cilj ovog eksperimenta je poređenje poluširina instrumentalnih profila korigovanih i nekorigovanih na spektralnu osetljivost sistema. Vrednosti poluširina dobijene fitovanjem ovih profila su prikazane na slikama 38, 39 i 40 i tabeli 1. Razlike u poluširinama linija korigovanih i nekorigovanih na spektralnu osetljivost, za jednu datu vrednost struje  $I_{mA}$  pražnjenja, se može dati procentualnim odstupanjem  $\delta_{cc}^{I_{mA}}$ :

$$\delta_{\%}^{I_{mA}} = \frac{\Delta \lambda_{1/2}^{korigovano} - \Delta \lambda_{1/2}^{nekorigovano}}{\Delta \lambda_{1/2}^{korigovano}} 100\%$$
(21)

gde je  $\Delta \lambda_{1/2}^{\text{korigovano}}$  poluširina profila korigovanog na spektralnu osetljivost, a  $\Delta \lambda_{1/2}^{\text{nekorigovano}}$  poluširina profila nekorigovanog na spektralnu osetljivost.

I <sub>mA</sub> (mA) - struja pražnjenja	$\Delta\lambda_{1/2}^{\text{korigovano}}$ (piksel)	$\Delta\lambda_{1/2}^{nekorigovano}$ (piksel)	$\delta^{\mathrm{I}_{\mathrm{ma}}}_{\%}\left(\% ight)$
10	6.9534±0.0004	6.8988±0.0004	0.79
15	6.8919±0.0003	6.8370±0.0009	0.80
17	6.88442±0.00002	6.8293±0.0006	0.80

Tabela 1. Izmerene poluširine profila korigovanih i nekorigovanih na spektralnu osetljivost i vrednost procentualnog odstupanja  $\delta_{\alpha}^{I_{ma}}$ 

Analizom rezultata iz tabele 1 se vidi da su procentualna odstupanja poluširina profila, korigovanih i nekorigovanih na osetljivost, veoma mala (ispod 1%), tako da se može zaključiti da korekcija intenziteta spektralne linije na osetljivost sistema praktično ne utiče na poluširinu instrumentalnog profila. Ovo je željeni i očekivani zaključak, jer korekcijom na osetljivost treba da se koriguje intenzitet linije, bez promene njene poluširine.

## 5.2.2 Zavisnost poluširine spektralne linije od položaja linije na čipu

Sledeći cilj ovog rada je bio da se utvrdi da li se poluširina iste spektralne linije menja sa promenom njenog mesta detektovanja na CCD čipu. Drugim rečima, bilo je potrebno utvrditi zavisnost poluširine instrumentalne linije u zavisnosti od njenog položaja na čipu.

Kod ovog eksperimenta je kao izvor svetlosti korišćena cev za pražnjenje tipa šuplje katode, a posmatrana je spektralna linija neutralnog bakra talasne dužine 5105.54 Å. Jačina struje u kolu za pražnjenje je iznosila 10 mA, a napon na MCP-u 900 V. Vreme ekspozicije kamere je podešeno na 400 µs, a pojačanje samog CCD čipa (CCD gaine) na 10 dB. Svaki snimak je dobijen kao rezultat 200 usrednjavanja. Spektralna linija je pomerana po CCD čipu kamere rotiranjem difrakcione rešetke step motorom. Početna pozicija spektralne linije je bila na desnom kraju čipa, pri položaju rešetke od 5033 Å. Zatim je u 40 diskretnih koraka step motora od po 2 Å, linija dovedena u krajnji položaj na levom kraju čipa, pri položaju rešetke od 5173 Å. Dakle, načinjeno je 40 snimaka date spektralne linije na odgovarajućim položajima duž čipa (tj. duž x-ose). Iz ovih snimaka, je bilo potrebno odrediti poluširine instrumentalnog profila linije u svakom od položaja na čipu.

U prvom koraku obrade podataka su očitani intenziteti snimljenih spektralnih linija u dva visinska intervala CCD čipa: od 440. do 515. piksela i od 500. do 600. piksela. Potom su svi dobijeni profili spektralne linije korigovani na spektralnu osetljivost sistema. Nakon korekcije na spektralnu osetljivost su svi profili pojedinačno fitovani na Gausov profil. Među rezultatima fita svakog od profila se dobijaju i poluširina fitovanog instrumentalnog profila te linije, kao i položaj njenog centra na CCD čipu. Iz tog razloga su obe veličine izražene u pikselima. Naravno, poluširine se mogu preračunati u angstreme.

Fitovanje je vršeno u programu razvijenom u Laboratoriji za fizičku elektroniku. U ovom programu je na grafičkom prikazu spektralne linije neophodno odrediti i obeležiti položaj njenog centra, granica i maksimuma, kako bi se zadali što precizniji početni parametri i povećala brzina i preciznost fitovanja. Odabrano je da se, gde god je to moguće, donja i gornja granica linije obeleže na rastojanju od 30 piksela od centra linije. Osim toga je, za potrebe izračunavanja kontinuuma na koji je superponirana linija, potrebno obeležiti dva intervala spektra.

Za visinski pojas od 440. do 515. piksela su za svaku liniju urađena po dva fita. Kod jednog od ta dva fita su oba intervala kontinuuma zadata na velikom rastojanju od centra linije, a u drugom fitu su intervali kontinuuma iznosili po 20 piksela, a nastavljali su se neposredno na granice linije, simetrično sa leve i sa desne strane. Ovakav pristup je omogućio poređenje i utvrđivanje eventualnog uticaja položaja intervala kontinuuma na poluširinu linije. Dobijena zavisnost poluširine spektralne linije od njenog položaja na čipu, za visinski interval od 440. do 515. piksela i pri različitim položajima intervala kontinuuma je prikazana na slici 41.



Slika 41. Poluširina instrumentalne linije u zavisnosti od položaja na CCD čipu. Crvenim tačkama su prikazane poluširine profila u slučaju kada je izabran kontinuum blizu linije. Crnim tačkama su prikazane poluširine profila u slučaju kada je izabran kontinuum daleko od linije. Intenziteti linija su dobijeni za visinski opseg od 440. do 515. piksela.

Primećuje se da rastojanje odabranog intervala za kontinuum od centra linije nema velikog uticaja na poluširinu linije. To postaje očigledno, ako se prikaže procentualno odstupanje poluširina, koje proizilaze iz fita sa dalekim kontinuumom u odnosu na bliski, u funkciji položaja (Slika 42.). Procentualno odstupanje poluširina, koje je prikazano na slici 42, je računato kao:

$$\delta_{\Delta\lambda 1/2} = \frac{\left|\Delta\lambda_{1/2}^{bliski \, kontinuum} - \Delta\lambda_{1/2}^{daleki \, kontinuum}\right|}{\Delta\lambda_{1/2}^{bliski \, kontinuum}} 100\%$$
(22)



Slika 42. Procentualno odstupanje poluširina instrumentalnih profila određenih uzimanjem dalekog kontinuuma od poluširina određenih uzimanjem bliskog kontinuuma u zavisnosti od položaja na CCD čipu.

Izražena promena poluširine linije sa položajem, odnosno porast poluširine linije sa približavanjem krajevima čipa, koja se vidi na slici 41, je od velikog značaja. Prema tome, pri snimanju spektralnih linija na položajima koji su udaljeni od centra čipa javlja se širenje linije.

Nadalje, ukoliko se posmatraju pojedinačni profili koji su snimljeni u blizini sredine čipa, može se videti da se ti profili veoma dobro slažu sa Gausovim profilom (npr. profili sa slika 38, 39 i 40). Profili na krajevima čipa pokazuju drastično odstupanje od Gausovih profila. Ilustracije dva ovakva profila je data na slici 43. Dakle, idući od centra ka krajevima čipa, instrumentalni profili su sve širi, a odstupanja od Gausovog profila sve veća.



Slika 43. Instrumentalni profili snimljeni u blizini ivica čipa. Profil snimljen na levoj ivici čipa pokazuje drastično odstupanje od Gausovog oblika.

U slučaju profila dobijenih očitavanjem intenziteta u visinskom pojasu od 500. do 600. piksela, pri fitovanju na Gausove profile, oba intervala kontinuuma su bila postavljena daleko od centra linije. Dobijena zavisnost poluširine instrumentalne linije od položaja na čipu je prikazana na slici 44. Rezultati dobijeni za ovaj visinski pojas su skoro identični onima za pojas od 440. do 515. piksela, pa se može zaključiti da visinski pojas uzorkovanja linije ne utiče na oblik zavisnosti poluširine linije od položaja linije na CCD čipu.



Slika 44. Poluširina instrumentalne linije u zavisnosti od položaja na CCD čipu. Tačkama su prikazane poluširine profila u slučaju kada je izabran kontinuum daleko od linije. Intenziteti linija su dobijeni za visinski opseg 500.-600. piksela.

S obzirom da se najbolja ocena poluširine spektralnih profila dobija kada se uzme bliski kontinuum, na slici 45 je posebno prikazana zavisnost poluširine instrumentalnog profila od položaja centra profila na CCD čipu, za visinski interval od 440. do 515. piksela. Ovaj visinski pojas je odabran, jer se intenziteti linija u eksperimentima koji se trenutno vrše u laboratoriji očitavaju u ovom visinskom pojasu. Na slici su prikazane i standardne devijacije za odabrane tačke. Standardne devijacije ilustruju veličinu greške poluširine profila. Zavisnost poluširine instrumentalnih profila od njihovog položaja na CCD čipu se može lepo fitovati polinomom petog stepena oblika:

$$\Delta\lambda_{1/2} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5$$
(23)

gde je x položaj linije, odnosno njen centar na CCD čipu dat u pikselima. a, b, c, d, e, f su koeficijenti. Kao rezultat ovakvog fitovanja dobijaju se koeficijenti sledećih vrednosti:

$$\begin{split} a &= 12.353740668208593 \\ b &= -0.010447487283931703 \\ c &= -0.000011257305058671223 \\ d &= 3.000530015733352\cdot 10^{-8} \\ e &= -1.8776897979247575\cdot 10^{-11} \\ f &= 4.060910821490467\cdot 10^{-15} \end{split}$$

Dati polinom petog stepena je na slici 45 prikazan punom linijom.



Slika 45. Najbolja ocena poluširine instrumentalne linije u zavisnosti od položaja na CCD čipu.

Već je rečeno da zavisnost poluširine instrumentalnog profila od položaja na CCD čipu pokazuje minimum. Taj minimum se nalazi u okolini 850. piksela po x-osi. Sa slike 45 se vidi da se ova oblast minimuma prostire, otprilike, od 700. do 1000. piksela. Pri snimanju uskih spektralnih profila je najuputnije koristiti upravo ovu oblast. Sa ove slike se takođe može primetiti da se prema krajevima čipa povećavaju i vrednost poluširine i vrednost standardne devijacije za poluširinu. To znači da linija ka krajevima čipa, sve više odstupa od Gausovog profila. Primeri ovakvih odstupanja od Gausovog profila su već pokazani na slici 43. Primer na levoj strani ove slike, koji je snimljen pri levoj ivici čipa, pokazuje znake jake rasfokusiranosti u ovoj oblasti. Slična situacija je i pri desnoj ivici čipa, ali je daleko manje izražena. Razlog ove pojave leži u tome, da korišćeni monohromator ima zakrivljenu fokalnu ravan. Naime, ovaj monohromator je izvorno optimizovan za korišćenje i ulazne i izlazne pukotine, uz korišćenje fotomultiplikatora kao detektora. U tom slučaju zakrivljenost fokalne ravni ne igra nikakvu ulogu zbog prisustva izlazne pukotine koja prostorno ograničava fokalnu ravan. Nasuprot tome, pri snimanju ICCD kamerom, izlazni spektar pada na ravnu površinu detektora, odnosno CCD čipa. Drugim rečima, samo jedan deo ravni CCD čipa je u fokusu i poklapa se sa centrom zakrivljene fokalne ravni. Periferni delovi ravni CCD čipa se ne poklapaju sa krajevima zakrivljene fokalne ravni, pa delovi spektra koji padaju na njih nisu fokusirani. Ovo je ilustrovano na slici 46. Ova činjenica se može lako proveriti pomeranjem kamere ka i od monohromatora, što je i učinjeno. Naime, pomeranjem kamere ka monohromatoru i snimanjem zavisnosti poluširine od položaja na čipu, dobijaju se gotovo iste minimalne vrednosti za poluširinu, ali je minimum krive zavisnosti pomeren ka jednoj od ivica čipa.



Slika 46. Ilustracija uzroka nastanka dobijene zavisnosti poluširine instrumentalnih profila od položaja na CCD čipu.

#### 5.2.3 Zavisnost poluširine spektralne linije od vremena ekspozicije kamere

Pri proučavanju instrumentalnih profila je potrebno znati da li poluširina zavisi od visine detektovanog signala. Stoga je sniman intenzitet spektralne linije CuI talasne dužine 5105.54 Å, pri različitim vremenima ekspozicije kamere. Osim vremena ekspozicije kamere i položaja difrakcione rešetke, svi uslovi i parametri eksperimenta su bili isti kao u prethodno opisanom eksperimentu.

Za potrebe ovog snimanja je rešetka postavljena na položaj od 5103 Å, kako bi spektralna linija bila pozicionarana na centralnom delu CCD čipa. U toku merenja rešetka nije rotirana, odnosno linija nije bila pomerana po čipu. Intenzitet spektralne linije je sniman pri vremenima ekspozicije kamere od 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500 i 600 mikrosekundi, tako da je načinjeno 11 snimaka.

Intenzitet linije je za svaki snimak određen u visinskom pojasu od 500. do 600. piksela. Zatim su ti intenziteti korigovani na osetljivost sistema i fitovatni na Gausov profil. Snimljeni profili pri različitim vremenima ekspozicije su dati na slici 47.



Slika 47. Profil linije Cu I 5105,54 Å pri različitim vremenima ekspozicije.

Očigledno je da intenzitet spektralne linije raste sa vremenom ekspozicije. To je i bilo za očekivati, s obzirom da u toku dužeg vremenskog intervala veći broj fotona date talasne dužine pada na detektor, a samim time se povećava odbroj, koji u stvari predstavlja intenzitet linije.

Poluširine posmatrane linije pri različitim vremenima ekspozicije su dobijene fitovanjem. Ukoliko se na ordinatu nanesu vrednosti poluširine snimane linije, a na apscisu njima odgovarajuća vremena ekspozicije, dobija se grafik prikazan na slici 48.



Slika 48. Zavisnost poluširine instrumnetalnog profila od vremena ekspozicije kome je direktno proporcionalna visina signala.

Sa grafika se vidi da poluširina ostaje konstantna (odstupanja su u domenu greške), pri svim vremenima ekspozicije, što znači da ne postoji funkcionalna zavisnost između ove dve veličine. Ovo se može pokazati fitovanjem podataka na linearnu funkciju:

 $y = A x + B \tag{24}$ 

Kao rezultat fita dobijene su vrednosti parametara A=0.00011 i B=5.78446. Izuzetno mala vrednost parametra A, odnosno nagiba prave, potvrđuje zaključak da se poluširina može smatrati konstantnom.

#### 5.2.4 Uticaj napona MCP-a na oblik eksperimentalnog profila spektralne linije

Jedan od zadataka ovog rada je bio da se ispita da li napon na MCP-u utiče na oblik instrumentalnog profila. U tu svrhu je snimana linija CuI talasne dužine 5105.54 Å, pri položaju rešetke od 5103 Å. Osim vremena ekspozicije i napona na MCP-u, svi ostali parametri eksperimenta su isti kao kod prethodnog eksperimenta.

Ideja ovog eksperimenta je bila da vidi eventualni uticaj napona na MCP-u, ako se intenzitet snimljene linije održava približno konstantnim. Ovo se može postići ako se, istovremeno, pri povećanju napona na MCP-u smanjuje vreme ekspozicije. U tu svrhu je pomenuta linija snimljena za četiri različite kombinacije vremena ekspozicije i napona. Korišćene su sledeće kombinacije vremena ekspozicije i napona. Korišćene su sledeće kombinacije vremena ekspozicije i napona: 100µs i 950V, 190µs i 900V, 830µs i 800V i 1850µs i 750V. Intenziteti linije na svakom od snimaka su očitavani u visinskom intervalu od 500. do 600. piksela, pa su korigovani na spektralnu osetljivost sistema, čime su dobijena četiri eksperimentalna instrumentalna profila.

Profili su potom fitovani na Gausov profil. Korišćenjem dobijenih parametara fita, na istim mestima gde su izmereni intenziteti linije, generisane su i vrednosti Gausovih intenziteta. Na taj način je za svaki profil dobijen eksperimentalni  $(I_{exp})$  i Gausov  $(I_{Gaus})$  intenzitet.

U svrhu opisivanja odstupanja izmerenih eksperimentalnih profila od Gausovih, računat je parametar R:

$$R = \frac{I_{exp}^{i} - I_{Gaus}^{i}}{I_{Gaus}^{i}} 100\%$$
<sup>(25)</sup>

gde je  $I_{exp}^{i}$  vrednost eksperimentalnog intenziteta na i-tom pikselu duž x-ose, a  $I_{Gaus}^{i}$  vrednost Gausovog intenziteta na i-tom pikselu duž x-ose.

Dobijeni profili, sa njima odgovarajućom raspodelom R, su za razne kombinacije vremena ekspozicije i napona na MCP-u prikazani na slikama 49-52.



Slika 49. Instrumentalni profil CuI 5105.54 Å, snimljen pri naponu MCP-a od 750V i sa vremenom ekspozicije od 1850 µs i parametar R koji opisuje odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila.



Slika 50. Instrumentalni profil CuI 5105.54 Å, snimljen pri naponu MCP-a od 800V i sa vremenom ekspozicije od 830 µs i parametar R koji opisuje odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila.



Slika 51. Instrumentalni profil CuI 5105.54 Å, snimljen pri naponu MCP-a od 900V i sa vremenom ekspozicije od 190 µs i parametar R koji opisuje odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila.



Slika 52. Instrumentalni profil CuI 5105.54 Å, snimljen pri naponu MCP-a od 950V i sa vremenom ekspozicije od 100 µs i parametar R koji opisuje odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila.

Kao što se sa slika 49-52 može videti, intenzitet linije je približno konstantan na svim snimcima. Pored toga se primećuje i da postoji izvesno odstupanje eksperimentalnog profila od Gausovog. Analizom sve četiri slike se vidi da ovo odstupanje raste sa porastom napona na MCP-u. Odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila je izraženo na krilima linije, dok je u oblasti centra linije i oblasti poluširine zanemarljivo. Ovo je olakšavajuća okolnost, jer se u izučavanju linija najviše koriste upravo centar linije i oblast poluširine linije. Pored toga, može se primetiti da je levo krilo linije podignuto u odnosu na desno krilo, pa je uočljiva asimetrija krila linije. Dakle, nameće se zaključak da je u cilju manje asimetrije snimljenog profila preporučljivo koristiti veće vrednosti ekspozicije u kombinaciji sa manjima naponima na MCP-u.

## 5.2.5 Upoređivanje profila linije snimljene kamerom i fotomultiplikatorom

S obzirom da je primećeno postojanje blage asimetrije krila instrumentalnih profila, logično je utvrditi šta je uzrok ove asimetrije. Jedan od uzroka bi mogao biti da distorziju unosi MCP ali iz napred prikazanih rezultata se to ne može sa sigurnošću reći. Iz tog razloga su i poređeni eksperimentalno dobijeni profili date linije, kada je ona snimljena kamerom i kada je snimanje izvršeno fotomultiplikatorom. Ovo poređenje je izvršeno za dve spektralne linije koje se znatno razlikuju po talasnoj dužini. Prva spektralna linija je već snimama u prethodnim eksperimentima, i to je linija Cu I na 5105.54 Å, emitovana iz cevi za pražnjenje sa šupljom katodom. Druga linija je takođe snimljena iz cevi sa šupljom katodom i to je linija neona talasne dužine 6929.4672 Å.

#### 5.2.5.1 Spektralna linija Cu I

Spektralna linija Cu I je snimljena ICCD kamerom iz 1000 usrednjavanja, pri položaju rešetke od 5103 Å (pri vremenu ekspozicije od 400 µs i napona na MCP-u od 900 V za visinski opseg od 500. do 600. piksela) i korigovana na spektralnu osetljivost sistema.

Pri snimanju linije fotomultiplikatorom (pri naponu napajanja od 900 V) je vršeno skeniranje linije zakretanjem difrakcione rešetke u diskretnim koracima od po 0.05 Å. Svaka tačka profila je rezultat od 200 usrednjavanja. Liniju snimljenu fotomultiplikatorom nije bilo potrebno korigovati na spektralnu osetljivost sistema, jer je u snimanom opsegu talasnih dužina osetljivost praktično konstantna.

S obzirom da je pri merenju fotomultiplikatorom korak pomeranja rešetke bio dat u Angstremima, radi poređenja profila sa profilom dobijenim kamerom, piksele treba preračunati u angstreme. Talasne dužine u oba snimka je tada potrebno usaglasiti. Ovo je urađeno tako što su oba profila fitovana na Gausov profil i onda pomerena, tako da maksimum fita odgovara tabličnoj talasnoj dužini linije. Radi poređenja, oba profila su potom normirana po intenzitetu.

Normirani eksperimentalni profili linije sa odgovarajućim fitovima, snimljeni fotomultiplikatorom i kamerom su zajedno prikazani na slici 53. Sa slike se vidi da se korišćenjem kamere dobija profil koji je širi od profila dobijenog korišćenjem fotomultiplikatora.



Slika 53. Instrumentalni profili Cu I 5105.54 A, dobijeni korišćenjem ICCD kamere odnosno fotomultiplikatora kao detektora.

Asimetrija profila sa kamere i multiplikatora će biti detaljnije analizirana u sledećem odeljku, na primeru neonove linije.

#### 5.2.5.2 Spektralna linija Ne I

Spektralna linija Ne I 6929.4672 Å je snimljena ICCD kamerom pri položaju rešetke od 6929 Å, iz 1000 usrednjavanja (pri vremenu ekspozicije od 100  $\mu$ s i napona na MCP-u od 900 V za visinski opseg 500.-600. piksela) i korigovana na spektralnu osetljivost sistema.

Pri snimanju linije fotomultiplikatorom (pri naponu napajanja od 900 V) je vršeno skeniranje linije zakretanjem difrakcione rešetke u diskretnim koracima od po 0.05 Å. Svaka tačka profila je rezultat 200 usrednjavanja. Liniju snimljenu fotomultiplikatorom nije bilo potrebno korigovati na spektralnu osetljivost sistema jer je u snimanom opsegu talasnih dužina osetljivost praktično konstantna.

Postupak snimanja ove linije (kako fotomultiplikatorom, tako i kamerom) i obrade podataka je potpuno isti kao i za liniju CuI  $\lambda$ =5105.54 Å i opisan je u prethodnom tekstu. Normirani eksperimentalni profili linije sa odgovarajućim fitovima, snimljeni fotomultiplikatorom i kamerom, su zajedno prikazani na slici 54.



Slika 54. Instrumentalni profili Ne I 6929.4672 Å, dobijeni korišćenjem ICCD kamere odnosno fotomultiplikatora kao detektora.

Kao što se i moglo očekivati, oblik profila je veoma sličan obliku profila za liniju CuI  $\lambda$ =5105.54 Å.

U svrhu analize asimetrije instrumentalnog profila, a polazeći od eksperimentalnih profila prikazanih na slici 54, izvršeni su određeni koraci u daljoj obradi. Kod svakog profila je od talasne dužine oduzet položaj centra linije, čime je postignuto da se centri oba eksperimentalna profila poklapaju i leže na nuli. Na taj način je izvršen prelaz sa  $\lambda$  na  $\Delta\lambda$ . Potom su oba profila fitovana na Gausovu raspodelu. Nakon toga su i eksperimentalni i Gausovi profili normirani tako što su intenziteti deljeni maksimumom odgovarajućih Gausovih profila. U sledećem koraku je izvršen prelaz sa  $\Delta\lambda$  u oblast "redukovanih"  $\Delta\lambda$  odnosno  $\Delta\lambda_r$ . Ovo je izvedeno tako što je  $\Delta\lambda$  podeljeno sa polovinom poluširine profila  $\Delta\lambda_{1/2}$ . U poslednjem koraku su, na prethodno opisan način, dobijeni profili fitovani na Gausovu raspodelu. Rezultati ovog postupka su prikazani na slici 55.



Slika 55. Poređenje instrumentalnih profila Ne I 6929.4672 Å, dobijenih korišćenjem ICCD kamere, odnosno fotomultiplikatora, u prostoru  $\Delta\lambda_r$ .

Na slici 55 se odmah uočava da se Gausovi profili u potpunosti preklapaju, što i jeste bio cilj opisanog postupka. Zahvaljujući ovome se može kvantifikovati odstupanje eksperimentalnih profila od Gausovih, računanjem parametra R koji je definisan u tekstu ispred. Zavisnost R od  $\Delta\lambda_r$  je za oba eksperimentalna profila data na slici 56.



Slika 56. Parametar R koji opisuje odstupanje eksperimentalnog od Gausovog profila za NeI liniju (λ=6929.4672 Å), snimljenu ICCD kamerom odnosno fotomultiplikatorom, u prostoru Δλ<sub>r</sub>.

Na slici se vidi da su odstupanja levog i desnog krila oba profila od Gausove raspodele različita, što znači da su profili asimetrični. Nadalje, vidi se da je odstupanje eksperimentalnih profila od Gausovih veoma sličnog oblika, ali i da je nešto izraženije kod ICCD kamere. S obzirom da je ICCD kamera daleko osetljivija od fotomultiplikatora, razlog veće izraženosti ovog efekta kod kamere može biti posledica veće osetljivosti. Sam uzrok asimetrije bi mogao biti u optičkom sistemu monohromatora, a ne u kameri, pre svega u neparalelnosti ivica ulazne pukotine ili male razdešenosti sistema ogledala.

## 5.2.6 Uticaj smajling efekta na instrumentalni profil

Smajling (smiling) efekat predstavlja krivljenje linije koja bi na snimku kamerom trebala biti ravna. Ako je prisutan smajling efekat, snimljena linija na fotografiji je blago zakrivljena u vidu isečka kružnice. Smajling efekat je posledica optičkih aberacija spektralnog sistema. U ovom delu rada je provereno prisustvo smajling efekta u korišćenom eksperimentalnom sistemu, kao i njegov uticaj na instrumentalni profil spektralne linije.

U svrhu proučavanja ovog efekta, posmatrana je već spomenuta spektralna linija CuI, talasne dužine 5105.54 Å, emitovana iz cevi za pražnjenje sa šupljom katodom. Snimak linije je načinjen kamerom i preuzet je iz merenja izvršenih za deo eksperimenta opisan u delu 5.2.5.1.

Intenzitet je sa izvornog snimka očitavan duž pojasa visine jednog piksela na svakih 35 piksela visine, počevši od 200. pa do 900. piksela po visini. Na taj način je dobijena 21 spektralna raspodela duž svih 1360 piksela horizontale na zadatim, diskretnim, visinima. Ovi delovi spektra su zatim korigovani na spektralnu osetljivost sistema i fitovani na Gausov profil. Na slici 57 je grafički prikazana veza visine na kojoj je očitan profil i položaja njegovog centra.



Slika 57. Veza visine na kojoj je očitan profil i položaja njegovog centra. Tačke predstavljaju merene vrednosti dok je linijom prikazan fit na kružnicu.

Tačke na grafiku su očigledno raspoređene po krivini velikog radijusa. Fitovanjem ovih tačaka na kružnicu je dobijen radijus kružnice od 34331.3 piksela dok su koordinate centra (35012.8 piksela, 479.304 piksela). Dakle, smajling efekat je prisutan za korišćeni merni sistem. Ipak, postavlja se pitanje u kojoj meri smajling efekat utiče na profil linije. U cilju procene tog uticaja je izvršeno numeričko modeliranje instrumentalnog profila, sa i bez uticaja smajling efekta. Prvo je izgenerisan "elementarni" Gausov profil iz prosečnih vrednosti fitova na raznim visinama. Ovaj profil je onda pridružen svakom redu piksela tako da se centar "elementarnog" profila poklapa sa centrom eksperimentalnog profila na datoj visini čipa. Prostije rečeno, "elementarni profil" je na svim visinima isti, osim po položaju centra. Centar "elementarnog profila, u kojem nije uzet u obzir smajling efekat, centri "elementarnih" profila su isti, odnosno leže duž prave, vertikalne, linije. Da bi se simulirao što realniji profil za visinske intervale od 440. do 515. piksela i od 500. do 600. piksela, intenzitet profila (iz ovih visinskih intervala) koji se simulira, dobijen je sumiranjem intenziteta "elementarnih profila" u ovim visinskim opsezima.

Na slici 58 su prikazani simulirani profili za pojas visine od 440. do 515. piksela sa uračunatim smajling efektom i bez njega.



Slika 58. Simulirani normirani profili za pojas visine od 440. do 515. piksela sa uračunatim smajling efektom i bez njega.



Slika 59. Simulirani normiraniprofili za pojas visine od 500. do 600. piksela sa uračunatim smajling efektom i bez njega.

Sa slika 58 i 59 se ne može primetiti razlika u obliku profila sa uračunatim smajling efektom i bez njega.

Kako bi se dobila kvantitativna mera odstupanja simuliranih profila (sa i bez smajling efekta) od odgovarajućih Gausovih profila, korišćen je gore definisani parametar R gde je umesto  $I_{exp}^{i}$  uziman  $I_{simul}^{i}$ , koji predstavlja vrednost simuliranog intenziteta na i-tom pikselu duž x-ose. Raspodela parametra R duž x-ose čipa je data na slikama 60 i 61.



Slika 60. Raspodela parametra R sa uračunatim smajling efektom i bez njega duž čipa za pojas od 440. do 515. piksela.



Slika 61. Raspodela parametra R sa uračunatim smajling efektom i bez njega duž čipa za pojas od 500. do 600. piksela.

Sa slika 60 i 61 se vidi da je vrednost parametra R duž profila, kako u prisustvu, tako i u odsustvu smajling efekta, skoro jednaka nuli, pa se može zaključiti da je uticaj smajling efekta na instrumentalni profil spektralne linije zanemarljiv. Velike vrednosti R na krajevima profila su najverovatnije posledica nagomilavanja greške na mestima malog intenziteta, pa prema tome nemaju nikakav praktičan značaj.

Zaključak je da smajling efekat postoji gledano duž cele vertikale, ali je u rasponu od 440. do 515., ili od 500. do 600. veoma mali.

## Zaključak

Na ovom mestu su rezimirani zaključci o instrumentalnom profilu linije i njegovom ponašanju pri promeni nekih parametara pri snimanju.

Ispitivanje uticaja korekcije na spektralnu osetljivost sistema na poluširinu instrumentalnog profila je pokazalo da ova korekcija praktično ne utiče na poluširinu linije. To je i bilo za očekivati, s obzirom da korekcija na osetljivost treba da promeni intenzitet instrumentalnog profila, a ne njegovu poluširinu.

Utvrđen je oblik zavisnosti poluširine spektralne linije od položaja linije na CCD čipu. Primećen je značajan porast poluširine linije sa približavanjem krajevima čipa. Osim toga, odstupanja instrumentalnog profila snimljene linije od Gausove raspodele se povećavaju ka krajevima čipa. Razlog tome je zakrivljenost fokalne ravni monohromatora, koji je optimizovan za snimanje fotomultiplikatorom, a ne ICCD kamerom. Dakle, u budućem radu sa ICCD kamerom je preporučljivo snimati spektralne linije tako, da padaju na centralnu oblast čipa. Takođe, zaključeno je da izbor intervala u kome se određuje kontinuum skoro uopšte ne utiče na poluširinu instrumentalnog profila. Nađeno je da visinski pojas u kome se očitava intenzitet instrumentalnog profila ne utiče na oblik zavisnosti poluširne od položaja na čipu.

U ovom radu je pokazano da poluširina spektralne linije praktično ne zavisi od vremena ekspozicije kamere.

Napon MCP-a utiče na oblik eksperimentalnog profila spektralne linije. Naime, odstupanje eksperimentalnog profila od Gausovog raste sa porastom napona na MCP-u. Odstupanje je izraženo na krilima linije, a zanemarljivo u oblasti centra i poluširine linije. Pored toga, levo krilo je podignuto u odnosu na desno, što znači da je eksperimentalni profil blago asimetričan. Kao zaključak ovog dela eksperimenta proizilazi da je, u cilju poboljšanja simetrije linije, preporučljivo vršiti snimanja pri većem vremenu ekspozicije, a manjem naponu na MCP-u.

Poređenjem profila linije snimljene kamerom sa profilom iste linije, koji je snimljen fotomultiplikatorom, je uočeno da je profil linije snimljene kamerom širi od profila linije snimljene fotomultiplikatorom. Uočeno je da je i profil snimljen fotomultiplikatorom takođe blago asimetričan. To znači da bi uzrok asimetrije mogao biti u optičkom sistemu, s obzirom da je on zajednički, i za kameru i za fotomultiplikator. Pomenuta odstupanja su sličnog oblika, ali je odstupanje profila snimljenog kamerom ipak nešto veće, što može biti posledica veće osetljivosti kamere.

U završnom delu ovog rada je pokazano da je uticaj smajling efekat na instrumentalni profil zanemarljiv u ispitivanim visinskim intervalima.

## Literatura

- 1. Đurović S.: Štarkovo širenje i pomeranje spektralnih linija neutralnih halogenih elemenata u plazmi stabilisanog električnog luka, doktorska disertacija, Beograd, 1989.
- 2. Hollas J. M.: Modern spectroscopy, John Wiley & Sons, Chichester, 2004.
- 3. Harrison G. R., Lord R. C., Loofbourow J. R.: Praktična spektroskopija, Naučna knjiga, Beograd, 1962.
- 4. Hegediš Š.: Određivanje osetljivosti optičkog sistema sa ICCD kamerom, diplomski rad, Novi Sad, 2009.
- 5. Kobilarov R.: Uticaj dinamike jona na oblik i pomeraj spektralnih linija u plazmi, doktorska disertacija, Beograd, 1990.
- 6. Loewen E., Palmer C.: Diffraction grating handbook, Newport Corporation, Rochester, 2005.
- 7. Milić B. S.: Osnove fizike gasne plazme, Naučna knjiga, Beograd, 1977.
- 8. Peláez de Fuentes R. J.: Adquisición de espectros de plasmas pulsados utilizando una cámara ICCD, proyecto fin de carrera, Valladolid, 2007.
- 9. <u>www.stanfordcomputeroptics.com</u>, 12.11.2011.
- 10. www.mcphersoninc.com, 12.11.2011.

## Biografija

Lazar B. Gavanski je rođen 01.10.1987. u Novom Sadu, gde je završio osnovnu školu "Petefi Šandor", a zatim prvi razred gimnazije "Svetozar Marković". Nakon toga pohađa benediktinsku gimnaziju "Ettal", u Etalu (Garmiš-Partenkirhen, Nemačka) gde maturira 2006. godine. Te godine upisuje Prirodno-matematički fakultet, odsek za fiziku, smer fizičar istraživač. 2010. godine završava osnovne studije i na istom departmanu upisuje master studije iz oblasti fizike plazme.



Novi Sad, 21.09.2011.

## UNIVERZITET U NOVOM SADU PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

član:

član:

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj:	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
Tip zapisa:	Tekstuaini stampani materijai
	Masterrad
vrsia rada:	Master rad
VR Autom	Lozon Covensiti
	Lazai Gavaliski
AU Mentor:	Dr Igor Saviá
MN	Di igoi Savic
Naslow rada:	Instrumentalni profili entičkog sistema sa ICCD komerom za snimenje
Nasiov raad.	ontičkih spektara
INK Jazik publikacija:	optickii spekiala
ID	sipski (latilica)
Jr Jezik izvoda:	ornoki/engleski
Эелк 12,00аа. П	sipski/eligieski
JI Zemlia nublikovania:	Srbija
<b>7P</b>	Storja
Liže geografsko područje:	Voivodina
LICP	() () () () () () () () () () () () () (
Godina:	2011
GO	2011
Izdavač:	Autorski reprint
IZ.	
Mesto i adresa:	Prirodno-matematički fakultet Tro Dositeja Obradovića 4 Novi Sad
MA	Thous machanesi furanci, The Doshoja Conadovida 1, 11011 Sua
Fizički opis rada:	10/50/61/1
FO	
Naučna oblast:	Fizika
NO	
Naučna disciplina:	Fizika jonizovanih gasova
ND	
Predmetna odrednica/ ključne reči:	Instrumentalni profil, ICCD kamera, spektroskopija
PO	
UDK	
Čuva se:	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
Važna napomena:	nema
VN	
Izvod:	Snimljeni su i analizirani instrumentalni profili optičkog sistema sa ICCD
IZ	kamerom za snimanje optičkih spektara.
Datum prihvatanja teme od NN veća: DP Datum odbrane:	
Članovi komisije: KO	
Predsednik:	Dr Stevica Đurović, redovni profesor, PMF u Novom Sadu

Dr Srđan Rakić, vanredni profesor, PMF u Novom Sadu

Dr Igor Savić, 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:	Master work
CC	
Author:	Lazar Gavanski
AU	
Mentor/comentor:	Dr Igor Savić
MN	
Title:	Instrumental profiles of the optical system with ICCD camera for optical
TI	spectra recording
Language of text:	Serbian (Latin)
LT	
Language of abstract:	English
LA	
Country of publication:	Serbia
СР	
Locality of publication:	Vojvodina
LP	
Publication year:	2011
PY	
Publisher:	Author's reprint
PU	
Publication place:	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
Physical description:	10/50/61/1
PD	
Scientific field:	Physics
SF	
Scientific discipline:	Physics of ionized gasses
SD	
Subject/ Key words:	Instrumental profile, ICCD camera, spectroscopy
SKW	
UC	
Holding data:	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
Note:	none
N	
Abstract:	Instrumental profiles of the optical system with ICCD camera for optical
AB	recording have been measured and analyzed.
Accepted by the Scientific Board: ASB	

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

Dr Stevica Đurović, full professor, Faculty of Sciences, Novi Sad Dr Srđan Rakić, associate professor, Faculty of Sciences, Novi Sad Dr Igor Savić, assistant professor, Faculty of Sciences, Novi Sad