

UNIVERZITET U NOVOM SADU

Prirodno-matematički fakultet

grupa FIZIKA

E K S P E R I M E N T A L N A S T U D I J A O R G A N S K O G
T E Č N O G L A S E R A

-diplomski rad-

Kobilarov Radomir

Rad na realizaciji ove teme odvijao se u laboratoriji za ispitivanje karakteristika lasera Instituta za fiziku u Beogradu.

Zahvaljujem se Dr Nikoli Konjeviću, Docentu prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, na predloženoj temi i nesebičnoj pomoći u toku njene izrade, kao i Ružici Konjević, Asistentu prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu. Koristim priliku da se zahvalim i Branku Lončareviću, Višem tehničkom saradniku Instituta za fiziku u Beogradu, na nesebičnoj pomoći koju mi je pružio u toku eksperimentalnog rada.

Радомир Кончарев



S A D R Ž A J

strana

Teorijski deo	
1.1. Opšte karakteristike tečnih lasera	1
1.2. Osobine rastvora organskih boja	3
1.2.1. Hemijska svojstva organskih boja	3
1.2.2. Spektralne osobine	4
1.3. Princip stimulacije svetlosti u tečnim laserima	5
1.3.1. Šema energetskih nivoa organskih boja u tečnim laserima	6
1.3.2. Zavisnost laserske emisije od frekvencije	7
1.3.3. Vremenska zavisnost	12
1.3.4. Tehnika optičkog pobuđivanja tečnih lasera	13
1.4. Osobine tečnih lasera	14
1.4.1. Biranje talasnih dužina tečnih lasera	14
1.5. Primena tečnih lasera u spektroskopiji	16
1.5.1. Primena tečnih lasera u rezonantnoj spektroskopiji ..	16
Eksperimentalni deo	
2.1. Opis aparature	19
2.1.1. Tečni laser	19
2.1.10. Sklop tečnog lasera	19
2.1.11. Sistem za napajanje električnom energijom i okidanje lasera	23
2.1.12. Uređaj za napajanje bojom tečnog lasera	24
2.1.2. Sistem za spektralnu analizu laserskog zračenja	26
2.2. Merenje spektralno i vremenski razlučeno spektra emisije tečnog lasera	27
2.3. Određivanje spektralne karakteristike fleš lampe	37
2.4. Promena intenziteta fleš lampe pri promeni energije napajanja	41
2.5. Pomeranje talasne dužine laserske emisije usled promene koncentracije rastvora i vrste rastvarača	42
2.6. Promena spektralne širine laserske emisije usled promene energije fleš lampe	44
2.7. Promena vremena trajanja laserskog impulsa pri promeni energije fleš lampe	45
2.8. Određivanje kritične inverzne naseljenosti singletnog stanja i naseljenosti tripletnog stanja	46
Z a k l j u č a k	52
L i t e r a t u r a	53

I T E O R I J S K I D E O

1. Tečni laseri sa organskim bojama

1.1. Opšte karakteristike tečnih lasera

Brock (1), Rautian i Sobelmann (2) su 1961. god., predložili da bi se organske boje mogle iskoristiti kao aktivne sredine kod tečnih lasera. Pet godina kasnije, 1966. god., Sorokin i saradnici su ostvarili lasersku emisiju organskih molekula. Ovi autori su iskoristili impuls gigantskog rubinskog lasera za pobuđivanje rastvora boje hloraluminijum ftelocijamina (CAP) (3) i 3,3 dietiltijatrikarbocijanin jodida (4) u optičkoj kiveti. Nezavisno od ovih autora, slične rezultate su dobili Schafer, Schmidt i Volze (5) kao i Spaeth i Bortfield (6), koji su koristili nekoliko boja cijanina čija je struktura slična DTTC.

Koristeći se prethodnim rezultatima, kada se laserska emisija dobijala pobuđivanjem impulsom rubinskog lasera, Sorokin, Lankard, Hammond i Moruzzi (7) su predložili da bi i impuls fleš lampe mogao biti iskorišćen za dobijanje emisije tečnog lasera. Oni su dali i zahteve koje mora da ispunjava fleš lampa da bi mogla omogućiti lasersku emisiju.

Taorija i tehnika lasera sa bojama razvija se vrlo brzo. Shank i saradnici (8), Röhr (9), Stepanov i Rubinov (10), Spaeth i Bortfeld (6), Schäfer, Schmidt i Marth (11), kod nas N. i R. Konjević i Lj. Ćirković (12) takođe su se bavili detaljnim ispitivanjima mogućnosti primene različitih organskih boja, kao i karakteristika lasera sa tim bojama.

Jedna od važnih preimุćstava tečnih lasera je mogućnost dobijanja intenzivnog koherentnog zračenja u intervalu talasnih dužina od 3400 do 11750 Å, što se postiže izborom odgovarajuće organske boje. Sem toga, talasnu dužinu emisije datog lasera sa jednom istom bojom je moguće menjati neprekidno u oblasti od nekoliko stotina angstrema, bilo promenom parametara ili rezonatora, bilo uvođenjem selektora talasnih dužina u sam rezonator (npr. difrakcione rešetke).

Maksimalna snaga tečnih lasera u impulsnom režimu je reda 10 MW. Pošto vreme fluorescencije iznosi približno 5×10^{-9} S (taj podatak se odnosi na tipične boje koje se koriste za tečne lasere), to izvori optičkog pumpanja ovih lasera moraju da obezbede veliku brzinu pobuđivanja kako bi se dostigao prag laserske emisije. To se može postići na dva načina :

- korišćenjem intenzivnog zračenja drugog lasera
- pomoću različitih impulsnih lampi

Radi dobijanja potpune predstave o postojećim laserima sa bojama, u tabeli I dati su jnihovi parametri i izlazne karakteristike (prema podacima iz literature (13)).

OSOBINA	TIPIČNA VREDNOST	USLOVI POBUDJIVANJA	NAPOMENA
Talasna dužina	3400-11750 Å	Pumpanje fleš lampama ili laserom	Veliki broj kombinacija boja - rastvrač, omogućava neprekidno prekrivanje širokog opsega talasnih dužina
Izbor tal. dužine	do 400 Å	Prizme, filteri, rešetke	Dužina, koncentracija i temperaturna sredine takođe mogu uticati na talasnu dužinu
Širina spektra	15 - 150 Å 0,5 Å 0,01 Å	Ogledala Rešetka u rezonatoru Rešetka + Fabry - Perot interferometar	
Divergencija	2-5 mrad	Pri pobudjivanju fleš lampama ili laserom	Zavisi od stepena homogenosti pumpanja
Koeficijent korisnog dejstva	Do 25% 0,4 %	Pumpanje laserom Pumpanje fleš lampama	Meri se oduzimajući izlazne energije emisije i utrošene električne energije
Izlaz	Energija	2 J (najviše) 0,1 J (tipična vrednost)	Pumpanje fleš lampama
	Snaga	2 MW	20 MW pumpanje laserom
		0,75 - 2,0 MW	Pumpanje fleš lampama
	Frekvencija	Do 200 Hz	Pumpanje laserom
		20 - 50 Hz	Pumpanje fleš lampama
		1,0 Hz	Prstenaste fleš lampse
Vremenske karakteristike	Dužina impulsa	20 nsec	Pumpanje laserom
		Od 0,5 - 10 nsec	Pumpanje fleš lampama
		Dužina impulsa $< 10^{-9}$ sec	Pumpanje fleš lampama. Pasivni zatvarač urezatoru
		Dužina impulsa $< 10^{-11}$ sec	Pumpanje laserom u režimu sincrone modulacije
			Registruje se metodom dvoftonske luminescencije

TABELA I

Za izradu tečnih lasera sa visokom izlaznom energijom vrlo je važno poznavati hemijska svojstva i tehnologiju spravljanja boja, jer su to faktori koji određuju ne samo osobine stimulisanja emisije, već i stabilnost date boje.

1.2. Osobine rastvora organskih boja

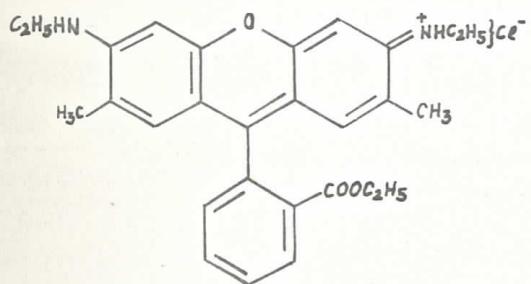
1.2.1. Hemijska svojstva organskih boja

O.N. Witt (14) je 1876. god., ustanovio da organska jedinjenja, nazvana hromogenima, sadrže određene nezasićene hromoforne grupe (npr: -NO_2 , $\text{-N}=\text{N}-$, $=\text{CO}$) koje utiču na boju jedinjenja. Ako ta jedinjenja takođe sadrže i određene auksohromne grupe (na primer: -NH_2 , -OH), tada su ona obojena.

Materije koje se danas nazivaju bojama, mogu da apsorbuju i emituju zračenje od UV, preko vidljive, do bliske IC oblasti spektra. Neke od njih poseduju i sposobnost laserske emisije, čime se primena utoliko više proširuje. Spektralne osobine tih materija su određene njihovom hemijskom i fizičkom strukturon, kao i karakterom njihovog uzajamnog dejstva sa rastvaračima.

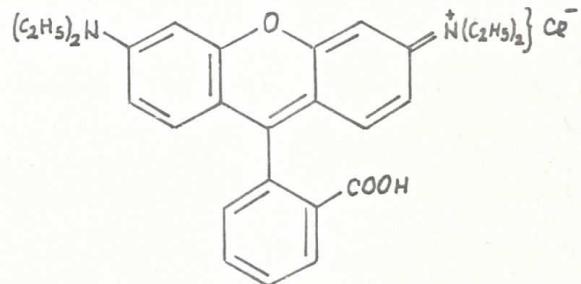
Rodamin 6G koji je korišćen u ovom radu spada u grupu ksantenskih boja. On apsorbuje i emitiše svetlost u vidljivoj oblasti spektra.

Strukturne formule rodamina 6G i rodamina B su date na slici 1 (15):



Rodamin 6G

sl.1

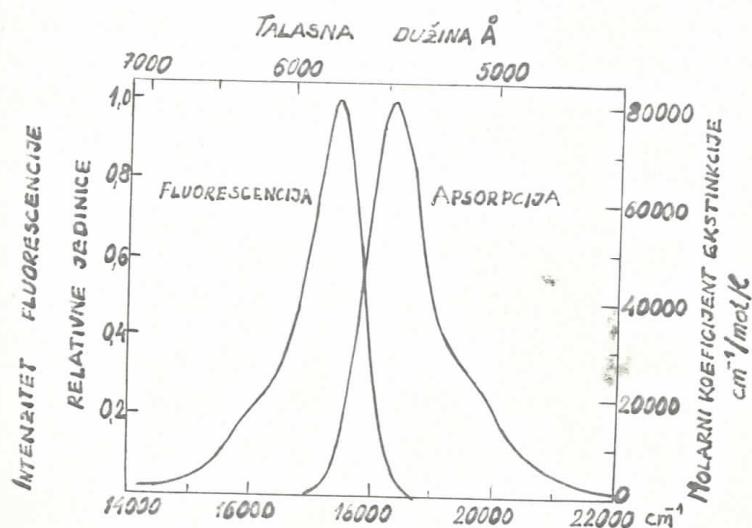


Rodamin B

Problemi koji se javljaju kod boja su hemijska i fotohemijska nestabilnost. Ksantenske boje, konkretno, uglavnom su stabilne pri ozračivanju vidljivom i UV svetlošću. Mogu se podvrgnuti višestrukom pumpanju sa vrlo intenzivnim impulsnim lampama i da ne dođe do znatnog razaranja jedinjenja. Ali, nakon približno sto časova rada sa brzinom od oko jednog impulsa u sekundi, rodamina 6G postaje neupotrebljiv.

1.2.2. Spektralne osobine

Talasna dužina, širina, struktura i intenzitet spektra, različit je za različite boje, kao i za jednu boju u različitim rastvaračima. Međutim, rastvori organskih boja imaju spektralne osobine slične rastvoru rodamina 6G u etil alkoholu (sl. 2), (16)



sl.2

Upšte spektralne osobine boja bi bile, sledeće :

1. Sirina osnovnih traka apsorpcije i emisije obično je reda 10^4 cm⁻¹
2. maksimum fluorescencije je pomeren ka većim talasnim dužinama u odnosu na maksimum apsorpcije, a to pomeranje se naziva Stoksovim pomakom. Veličina ovog pomaka i širina spektra fluorescencije i apsorpcije mogu da budu takvi da kratkotalasni kraj spektra fluorescencije potpuno prekriva dugotalasni kraj spektra apsorpcije.
3. spektar fluorescencije i apsorpcije se odnose kao predmet i lik u ogledalu.
4. srednji život fluorescencije je uglavnom reda 10^{-9} sec.
5. Nakon ozračivanja (pobuđivanja) rastvora boje, ponekad mogu da se pojave, tokom dovoljno dugog vremenskog intervala, još i neke nove trake apsorpcije koje odgovaraju izvesnim jedinjenjima nastalim u fotohemijskim procesima. Uve trake se gube u slučaju kada su spomenuti procesi reverzibilni, ali, ako je proces razaranja boje bio nepovratan, ni oni se neće promeniti.

Položaj i struktura spektra apsorpcije i emisije molekula u rastvorima zavisi i od rastvarača. Npr., spektar boja rastvorenih u benzolu ima znatno složeniju strukturu nego u slučaju rastvaranja iste boje u etil alkoholu. Taj efekat se ogleda uglavnom u različitoj spektralnoj širini traka emisije (17).

Čerkasov i Bahšiev (13) su pokazali da pomeranje spektra često može biti vezano i za promenu dijeliktrične konstante i indeksa prelamanja rastvarača.

pH rastvora takođe utiče na spektralna svojstva date boje, pošto od njega zavisi stepen disocijacije molekula.

Ukoliko je koncentracija boja suviše velika, može doći do znatnih gubitaka usled apsorpcije. Zato se pri radu sa tečnim laserima koriste rastvori čija je koncentracija najviše 10^{-2} (M).

1.3. Princip stimulacije svetlosti u tečnim laserima

Emisija svetlosti u tečnom laseru je funkcija više faktora. Kao prvo, boja koja će se u njemu koristiti mora da zadovoljava sledeće uslove:

1. da ima što manji presek za naseljenost tripletnog stanja izazvanu sudarnim procesima unutar molekula
2. da ima što veći stoksov pomak
3. da joj je vreme života u singletnom pobuđenom stanju što duže
4. da ima što veći kvantni prinos (to proističe i iz uslova pod 1.)

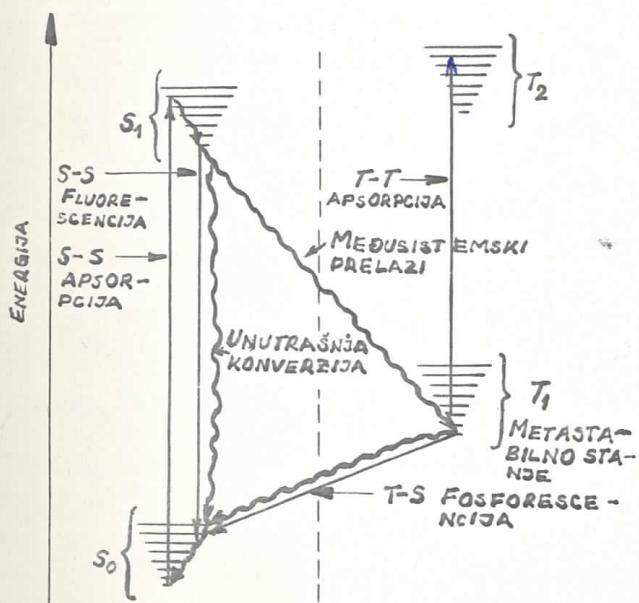
Ostale karakteristike su :

- a. naseljenost nivoa molekula boje, koja se menja sa vremenom u toku optičkog pumpanja
- b. frekvencija, koja je određena spektrima emisije i apsorpcije
- c. druga svojstva, kao što su: temperatura, koncentracija boje i dužina aktivne sredine

Da bi se razumeo rad lasera sa organskim bojama, polazi se od pojednostavljenih šeme energetskih nivoa molekula boje u rastvoru. Međutim, za razliku od ostalih vrsta lasera, kod ovih šema energetskih nivoa nije baš potpuno određena. Molekuli boja se sastoje iz mnogo atoma i stoga je vrlo teško definisati talasne funkcije koje bi predstavljale različite konfiguracije molekula. Sem toga ukoliko je molekul složeniji, utočniko postoji veći broj mogućih stanja koji uključuju različite kombinacije elektronskih, oscilatornih i rotacionih nivoa.

Postoje različite metode i teorije o optičkom pobuđivanju molekula koje mogu da daju dobre aproksimacije za talasne funkcije i nivoe energije malih molekula, ali, u ovom slučaju to ne dolazi u obzir, jer većina boja ima velike molekule. Umesto toga, energetski nivoi i procesi apsorpcije i emisije u rastvorima boja, mogu se približno opisati postavljanjem šeme analogne sa šemom energetskih nivoa u slučaju dvoatomnih molekula (sl.3).

1.3.1. Šema energetskih nivoa organskih boja u tečnim laserima



sl.3 Šema energetskih nivoa molekula organskih boja i prelazi odgovorni za lasersku emisiju (16)

Ovaj način opisivanja složenih molekula organskih boja prvi je dao Jablonski 1935. god. (18). Na sl.3 radijacioni prelazi koji se odnose na procese apsorpcije i fluorescencije, prikazani su punim linijama, a neradijacioni talasastim. Oscilatorno - rotacioni nivoi su grupisani oko elektronskih stanja, a oznake S (singlet) i T (triplet) se odnose na dve različite konfiguracije elektronskih stanja koje su funkcije elektronskog spina.

Ukratko, uprošćena šema emisije stimulisane svetlosti u tečnim laserima bi bila sledeća :

Apsorpcijom fotona iz izvora za optičko pumpanje vrši se prelaz molekula boje iz osnovnog singletnog stanja (S_0) u jedno od viših nivoa prvog pobuđenog singletnog stanja (S_1). Energija ovako pobuđenih molekula vrši prelaz do najnižih nivoa energije prvog pobuđenog singletnog stanja (prelaz je neradijacioni). Ovo je ujedno gornji nivo laser-

skog prelaza. Laserska emisija nastaje pri stimulisanom prelazu od ovog nivoa na jedan od vibracionih nivoa osnovnog singletnog stanja molekula. Zatim slede neradijacioni prelazi sa ovog nivoa u osnovno nepobuđeno stanje.

Uporedo sa ovim procesom apsorpcije i stimulisane emisije u singletnom stanju, postoji i verovatnoća prelaza molekula iz pobuđenog singletnog stanja (S_1) u osnovno tripletno stanje (T_1), koje je metastabilno. Ovakav prelaz dovodi do akumulacije molekula u osnovnom tripletnom stanju, a time se istovremeno smanjuje koncentracija molekula u pobuđenom singletnom stanju sa kojeg se vrši laserski prelaz. Usled toga, za postizanje inverzne naseljenosti potrebno je znatno povećati intenzitet izvora kojim se vrši optičko pumpanje. Takođe, da bi se izbegla naseljenost tripletnog stanja potrebno je da svetlosni impulsi, koji vrše optičko pobuđivanje imaju što kraće vreme uspona. Time se postiže inverzna naseljenost u singletnom pobuđenom stanju pre nego što nastupe osetni gubici usled prelaza pobuđenih molekula u tripletno stanje.

1.3.2. Zavisnost laserske emisije od frekvencije

Unutar oscilatorno - rotacionih nivoa, datog elektronskog stanja, molekuli su raspoređeni po Boltzmanovoj raspodeli, u zavisnosti od temperature sredine.

Veličina, čija vrednost zavisi od frekvencije je pojačanje (gain). Pojačanje po jedinici dužine za fotone sa ugaonom frekvencijom (ω) izražava se (13):

$$G(\omega) = \epsilon(\omega) - \alpha(\omega)$$

gde je $\alpha(\omega)$ -apsorpcioni koeficijent sredine, a $\epsilon(\omega)$ - emisioni koeficijent stimulacije. Koristeći presek apsorpcije $\bar{\epsilon}_{s_i}^a$ i emisije $\bar{\epsilon}_{s_i}^e$ za elektronsko stanje i-tog nivoa, izraz jedan prelazi u :

$$G(\omega) = N_{s_i} \bar{\epsilon}_{s_i}^e(\omega) - N_{s_o} \bar{\epsilon}_{s_o}^a(\omega) - N_{s_i} \bar{\epsilon}_{s_i}^a(\omega) - N_{T_1} \bar{\epsilon}_{T_1}^a(\omega)$$

Presek stimulisanog zračenja može se dobiti iz spektra spontanog zračenja. Ukoliko poslednje opišemo funkcijom $f(\omega)$ možemo pisati(13):

$$\bar{\epsilon}_{s_i}^e(\omega) = \left\{ \frac{2\pi c}{\omega n(\omega)} \right\}^2 f(\omega)$$

gde je $n(\omega)$ indeks prelamanja na frekvenciji ω .

Funkcija $f(\omega)$ se normira:

$$\int_0^\infty f(\omega) d\omega = \frac{\phi}{\theta \tau_s}$$

gde je ϕ - kvantni izlaz, a τ_s - vreme života pobuđenog singletnog

stanja. Postoji veza (13) :

$$\frac{\tilde{G}^a(\omega)}{G^e(\omega)} = \exp\left[-\frac{\hbar(\omega-\omega_0)}{kT}\right] \quad 5$$

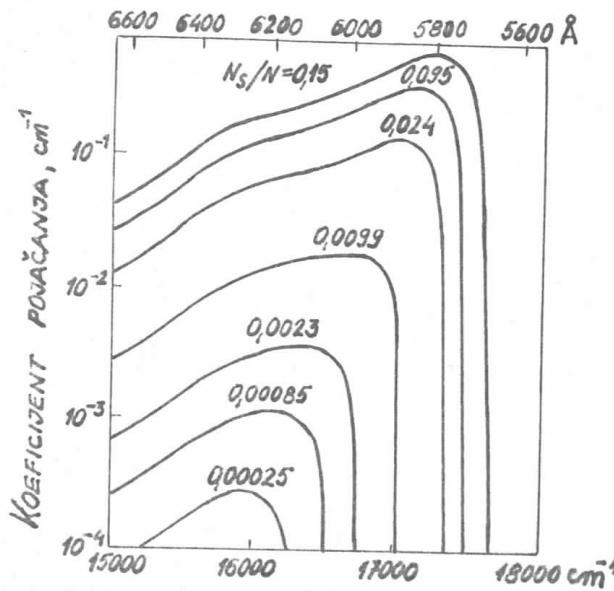
proizvod $\hbar\omega$ predstavlja potencijal ekscitacije koji zavisi od temperature i daje se kao čista slobodna energija, potrebna da se eksituje jedan molekul na temperaturi T. Odnos u gornjem izrazu može biti iskorišćen za uprošćenje izraza za pojačanje $G(\omega)$, koje sada dobija oblik :

$$G(\omega) = \left\{ N_{S_1} - N_{S_0} \exp\left[-\frac{\hbar(\omega_0-\omega)}{kT}\right] \right\} \left(\frac{2\pi c}{\omega n} \right)^2 f(\omega) - N_{S_0} G_{S_0}^a(\omega) - N_{T_1} G_{T_1}^a(\omega) \quad 6$$

Ukoliko je gubitak sa pobuđenog singletnog i tripletnog nivoa mali u spektralnoj oblasti koja nas interesuje i nivo T_1 neznatno naseljen, tada se izraz 6 uprošćava :

$$G(\omega) = \left[\left(\frac{2\pi c}{\omega n} \right)^2 f(\omega) + G_{S_0}^a(\omega) \right] N_{S_1} - N G_{S_0}^a(\omega) \quad 7$$

znači ukupan broj molekula je $N \approx N_{S_0} + N_{S_1}$. U tom slučaju pojačanje se povećava pri uvećanju naseljenosti pobuđenog stanja N_{S_1} . Da bi ovo ilustrovali razmotrimo spektar na sl.2 i predpostavimo da uticaj tripletnog stanja možemo zanemariti. Zavisnost pojačanja od frekvencije za rastvor u metil alkoholu sa koncentracijom 5×10^{-5} (M) izračunata je iz formule 7 i predstavljena na sl.4. za različite vrednosti N_{S_1} .



sl.4 zavisnost koeficijenta pojačanja od frekvencije (13)

Napomenimo, da čak za malu relativnu naseljenost S_1 ($\frac{N_{S_1}}{N} \ll 1$) sredina poseduje koeficijent pojačanja u širokoj spektralnoj oblasti.

Kritična inverzna naseljenost, neophodna za dobijanje laserske emisije u tipičnom optičkom rezonatoru, kako je zapaženo, je mala $\sim 10^{14}$ molekula/cm³, što odgovara relativnoj naseljenosti $< 1\%$.

Ukoliko N_s raste, a gubici na apsorpciju iz osnovnog stanja se smanjuju, tada se maksimum krive pojačanja (na sl.4) pomera u stranu većih frekvencija. Prag laserske emisije se postiže, kada se za neke frekvencije, $G(\omega)$ izjednači sa koeficijentom gubitaka $L(\omega)$ optičkog rezonatora. Ti gubici nastaju apsorpcijama na prelaz, propuštanjem ogledala, difrakcijom, rasejanjem i apsorpcijom u bilo kojoj oblasti rastvora.

Spektralne funkcije zračenja i apsorpcije u izrazu 2 ili 7 zavise od raspodele naseljenosti po oscilatorno-rotacionim nivoima elektro-nskog stanja. Zato pojačanje ima temperaturnu zavisnost. Pri nižim temperaturama spektri apsorpcije i fluorescencije se sužavaju i međusobno rastojanje im se smanjuje, što izaziva pomeranje frekvencije emisije u stranu maksimuma krive fluorescencije.

U sprovedenoj analizi zanemaren je uticaj tripletnih stanja. Ovo može imati i obično ima važno značenje za karakteristiku pojačanja, jer singlet - tripletna konverzija molekula u metastabilno stanje umanjuje ukupan broj molekula u singletnim stanjima i zato umanjuje maksimalno moguće pojačanje. Ovo ističe određen zahtev za snagu pumpanja, neophodnu za dobijanje laserske emisije.

Kritična inverzna naseljenost singletnog stanja i naseljenost tripletnog stanja su nađeni pri uslovu kada je $G(\lambda)$, izražen na sledeći način (15), izjednačen sa nulom :

$$G(\lambda) = N_s \left[\frac{\lambda^4 E(\lambda) Z}{8\pi c} + \epsilon_{ss}(\lambda) \right] - N \epsilon_{ss}(\lambda) \frac{L_1}{L_1} - N_T [\epsilon_{rr}(\lambda) - \epsilon_{ss}(\lambda)] + \frac{1}{2L_1} \ln(G_1 G_2) \quad 8$$

Sada možemo izračunati kritičnu inverznu naseljenost singletnog stanja :

$$N_s^c = k_1 N \left(\frac{L_1}{L_1} \right) + k_2 N_T + k_3 \quad 9$$

gde su koeficijenti k_i (gde je $i = 1, 2, 3$) dati sledećim izrazima :

$$k_1 = \frac{\epsilon_{ss}(\lambda)}{A(\lambda)} \quad 10-a$$

$$k_2 = \frac{\epsilon_{rr}(\lambda) - \epsilon_{ss}(\lambda)}{A(\lambda)} \quad 10-b$$

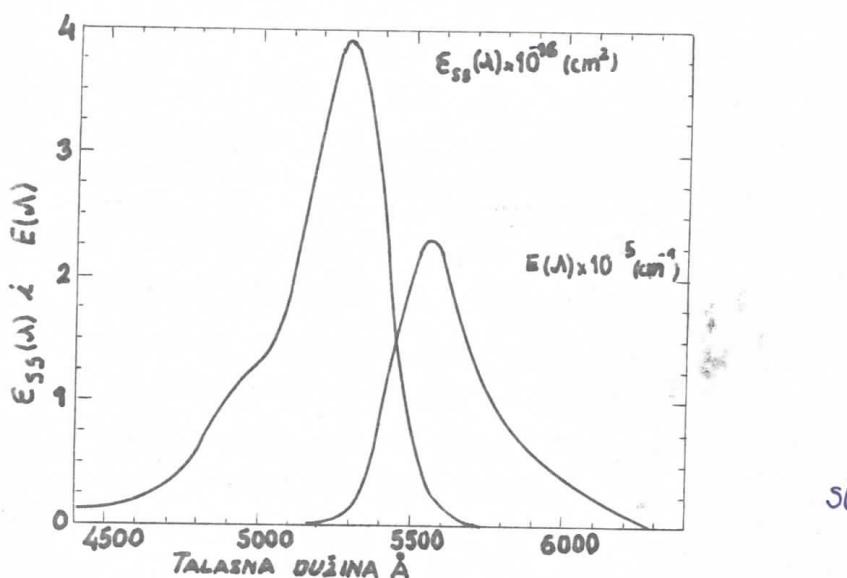
$$k_3 = \frac{-\ln(G_1 G_2)}{2L_1 A(\lambda)} \quad 10-c$$

gde je :

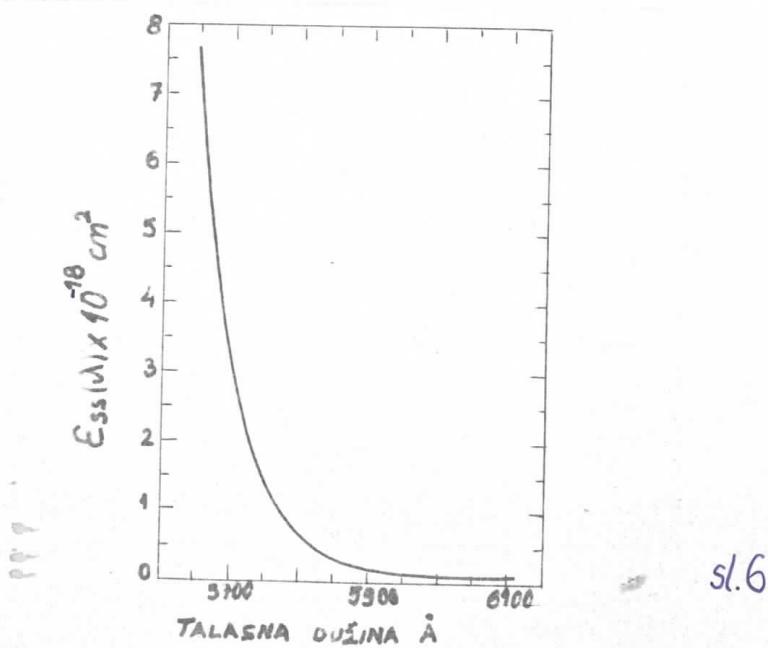
$$A(\lambda) = \frac{\lambda^4 E(\lambda) Z}{8\pi c} + \epsilon_{ss}(\lambda) \quad 11$$

Veličine koje figurišu u prethodnim izrazima su :

r_1, r_2 predstavljaju koeficijente refleksije ogledala, L_1 - dužina kive-
te koja je osvetljena fleš lampom a L_2 je ukupna dužina kivete, γ je
indeks prelamanja, $E(\lambda)$ predstavlja spektralnu funkciju fluorescencije,
 t je vreme fluorescencije, $\epsilon_{ss}(\lambda)$ je apsorpcioni koeficijent singletnog
stanja. Na sl.5 prikazana je zavisnost apsorpcionog koeficijenta single-
tnog stanja i spektralne funkcije fluorescencije od talasne dužine za ra-
stvor 1×10^{-4} (M) rodamina 6G u etil alkoholu :

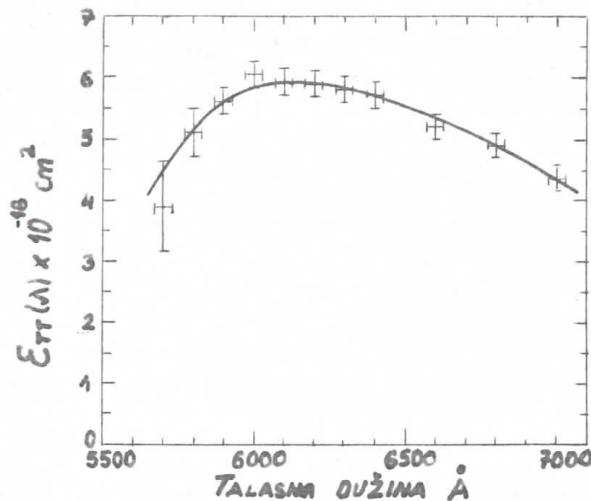


Na osnovu grafika sa sl.5 može se prikazati samo apsorpcioni
koeficijent singletnog stanja u intervalu talasnih dužina od 5650 do
6100 Å (15) :



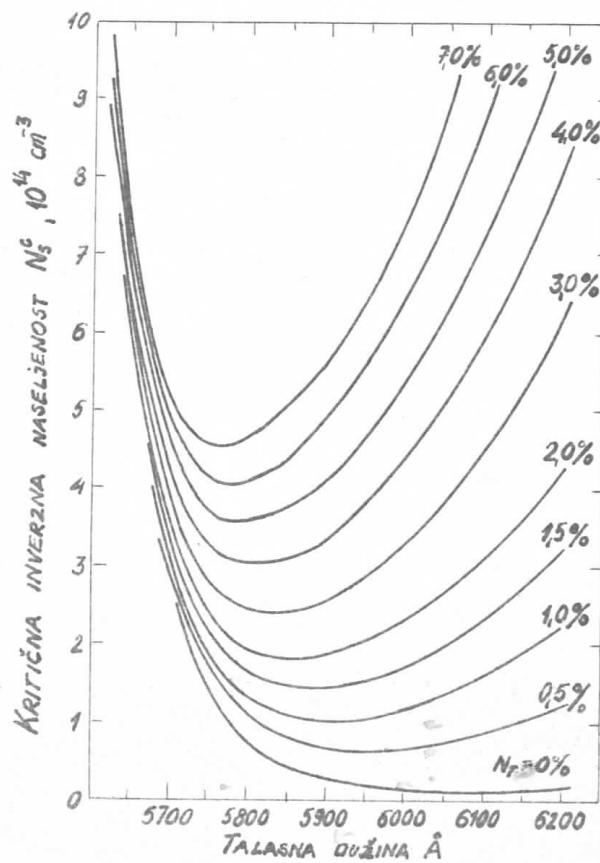
Apsorpcioni koeficijent tripletnog stanja, $\epsilon_{tt}(\lambda)$ u zavisnosti

od talasne dužine dat je na sl.7 za 1×10^{-4} (M) rastvor rodamina 6G u etil alkoholu :



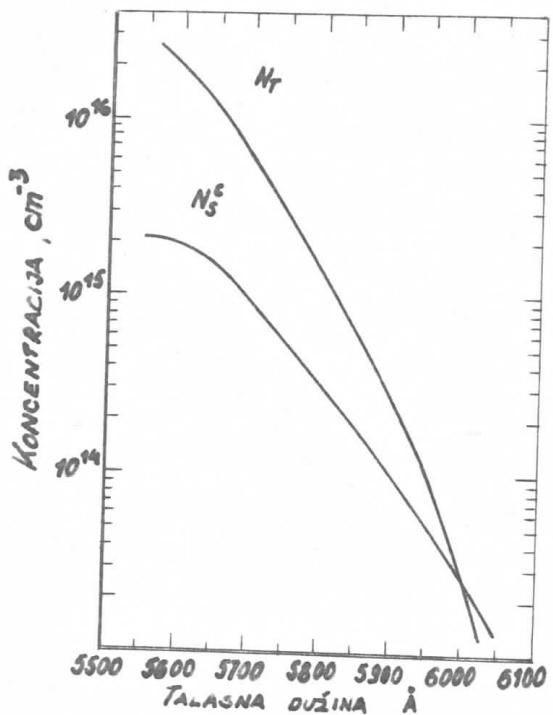
sl.7

Za određene talasne dužine mogu se naći vrednosti za $E(\lambda)$, $E_{ss}(\lambda)$ i $E_{TT}(\lambda)$, i uz poznavanje ostalih veličina koje figurišu u izrazu 10, mogu se izračunati vrednosti za N_s^c za različite vrednosti N_t . Takvi računi su bili sprovedeni za rodamin 6G. Rezultati su prikazani na sl.8, gde je kritična inverzna naseljenost singletnog stanja N_s^c , neophodna za postizanje praga emisije lasera, prikazana kao funkcija talasne dužine pri nekoliko značajnijih naseljenosti tripletnog stanja N_t kao parametra.



sl.8 zavisnost N_s^c od talasne dužine za različite vrednosti N_t (13)

Ukoliko je poznata talasna dužina laserske emisije, izborom krive sa sl.8 sa minimumom na toj talasnoj dužini može se naći N_s^c i N_T . Za rastvor rodamina 6G u etil alkoholu pri koncentraciji 5×10^{-5} (M) u rezonatoru dužine 7 cm ovo je prikazano na sl.9



sl.9 zavisnost N_s^c i N_T od talasne dužine (13)

1.3.3. Vremenska zavisnost

Naseljenosti nivoa u bilo kom trenutku vremena nakon početka pumpanja se dobija rešavanjem jednačina brzine po kojima se dešavaju ekscitacioni i relaksacioni procesi. Za tri efektivna nivovska sistema, ove jednačine su sledeće : (13)

$$\frac{dN_s}{dt} = -\frac{1}{\tau_s} N_s + P(t) N_0 \quad 12-a$$

$$\frac{dN_T}{dt} = -\frac{1}{\tau_T} N_T + k_{sr} N_s \quad 12-b$$

$$\frac{dN_0}{dt} = -P(t) N_0 + \left(\frac{1}{\tau_s} - k_{sr}\right) N_s + \frac{1}{\tau_T} N_T \quad 12-c$$

gde su τ_s i τ_T vremena života singletnog i tripletnog stanja, $P(t)$ je snaga optičkog pumpanja, k_{sr} je brzina singlet - tripletne konverzije.

Brzina singlet - tripletne konverzije i snaga optičkog pumpanja tj. za $t = 0$, pa se mogu naći naseljenosti nivoa. Ukoliko se ti

rezultati uvrste u izraz 2, za pojačanje, pri određenoj temperaturi, možemo u svakom trenutku vremena dobiti rešenje. Na taj način se dobija pojačanje G kao funkcija frekvencije ω za izabrani trenutak vremena u toku pumpanja.

1.3.4. Tehnika optičkog pobuđivanja tečnih lasera

Uslove brzog optičkog pumpanja je u prvo vreme bilo moguće ostvariti jedino impulsima rubinskog lasera, čiji impuls traje 15 do 20 nsec. Kasnije se pokazalo da se optičko pumpanje može vršiti impulsnim (fleš) lampama. U te svrhe, da bi pumpanje bilo efikasno, svetlost fleš lampe treba da je što homogenije i da impuls ima veliki intenzitet i što kraće vreme uspona.

Cleasson i Lindqvist (19) su 1957. god. radili sa tipom fleš lampa koja je delimično ispunjavala ove uslove koristeći je u fotohemijskim ispitivanjima. Kasnije su te lampe primenjene i u konstrukciji tečnih lasera (7). Schmidt i Schäfer (20) su radili sa uobičajenim linearnim fleš lampama, punjenim ksenonom i vezanim za niskoinduktivni kondenzator, a Furumonto i Ceccon (21) su izučavali laserske efekte sa nekoliko tipova koaksijalnih fleš lampi punjenih različitim gasovima kao što su argon, ksenon i kripton. U te svrhe su ispitivali zavisnost izlazne energije lasera od pritiska i veličine vremena uspona, kao i zavisnost izlazne energije lasera od veličine energije pumpanja.

Aristov je sa saradnicima (22) dobio stimulisanu emisiju iz rastvora rodamina B, koji je prethodno ohladio do 190° K, a koristio je kao izvor pumpanja dve linearne fleš lampe vezane u unutrašnjosti eliptičnog reflektora.

Ferrar (23) je usavršio linearne impulsne lampe stavivši, oko krajeva iste, komadiće elastičnog creva, čime je postigao oslabljenje, inače vrlo jakog, mehaničkog udara na zidove lampe za vreme procesa praznjenja.

R. i N. Konjević (24) vršili su ispitivanja sa novim tipom staklenih fleš lampi koje su direktno, u koaksijalnom položaju, vezane za kivete čija je sadržina, ustvari, sama organska boja - aktivna sredina lasera. Lampe su punjene ksenonom pod različitim pritiskom i autori su radili na istraživanju optimalnog pritiska za konstrukciju i geometriju njihovog lasera.

Međutim, uz neophodan uslov kao što je brzo optičko pobuđivanje, sve do skoro je sa tečnim laserima bilo moguće raditi jedino u vrlo kratkom impulsnom režimu i to im je, svakako, ograničavalo primenu. Ispitujući mogućnosti za dobijanje kontinualnog tečnog lasera, Snavely

sa saradnicima (25), zatim Marling i saradnici (26) i Keller (27) koristili su izvesne supstance koje imaju osobinu da skraćuju život tripletnog stanja boja (kiseonik i ciklooctatetraen) i razmatrali nastale efekte dajući i teorijska objašnjenja. Naime, eksperimentalno je nađeno da se dužina laserskog impulsa, dodatkom ovih supstansi, produžava i dostiže trajanje od 600 ~~usecu~~ slučaju kad se optičko pumpanje vrši fleš lampama. Peterson, Tuccio i Snavely (28) su 1970. god., čak uspeli da naprave kontinuirani tečni laser pumpajući ga kontinualnim argonskim laserom. Dodatkom ciklooctatetraena (COT-a) rastvoru rodamina 6G znatno utiče na spektar emitovane laserske svetlosti. Ispitivanje vremenski razloženih spektara rodamina B (Röhr (9)) i rodamina 6G sa COT-om (R. Konjević, J. Jovičić, N. Konjević i Lj. Ćirković (29)) pokazala su da uz osnovnu emisionu liniju, supstance emituju još i drugu lasersku liniju na kraćoj talasnoj dužini od one osnovne. Röhr je pretpostavio da ta nova linija potiče od prelaza u tripletno stanje molekula. Međutim, autori članka (29) su radili sa 10 do 15 puta nižim energijama, ali se druga linija uvek pojavljivala u prisustvu COT-a što jasno kazuje da se ona ne javlja kao posledica prelaza u tripletno stanje, koje se, uostalom, dodatkom COT-a ustvari gasi.

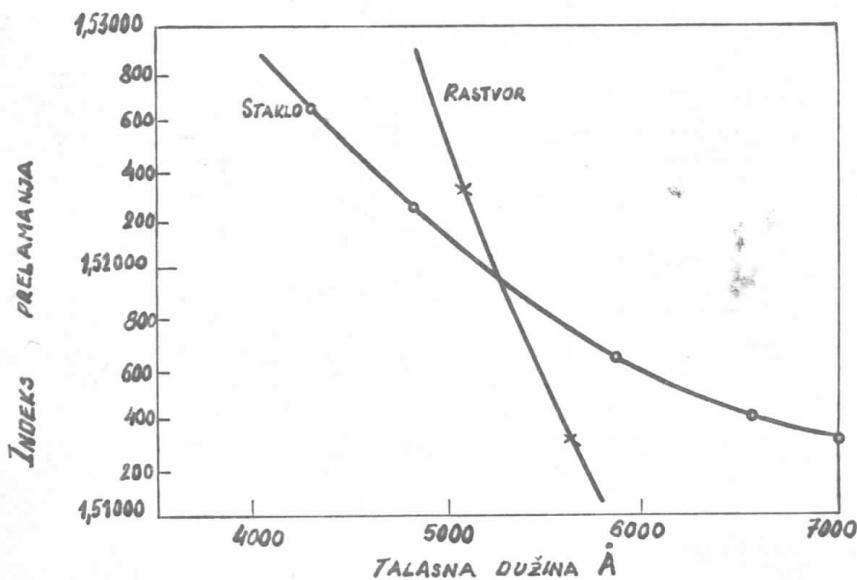
1.4. Osobine tečnih lasera

1.4.1. Biranje talasnih dužina tečnih lasera

Jedna od najvažnijih osobina tečnih lasera je da se frekvencija emitovane svetlosti (širina trake emitovane svetlosti tečnih lasera, u tipičnom rezonatoru sa ogledalima, iznosi od 10 do 300 Å) može menjati izborom boje, koncentracije rastvora i vrste rastvarača. Inače, široki spektar, dobijen sa jednom bojom, može se suziti bez znatnijih gubitaka energije. Ukoliko se to vrši sa selektorom frekvencije, onda se ceo posao sastoјi u ubacivanju takvih elemenata u rezonator, koji će vršiti tu selekciju. Cubici u rezonatoru, koji su funkcije frekvencije, mogu se tom prilikom regulisati tako da do emisije dođe samo na željenoj frekvenciji. Ako se u te svrhe u rezonator postavi stakleni filter (30), dobće se selekcija frekvenci bez sužavanja spektra. Ubacivanjem interfencionih filtera u rezonator takođe se može birati frekvenca i sužavati linija. Murakava sa saradnicima (31) je kao selektor koristio Litrovljevu prizmu čime je, pumpajući sistem drugim laserom, menjao talasnu dužinu tečnog lasera u opsegu od 400 Å dobijajući kao izlaznu spektralnu širinu linije svega oko 20 Å.

Soffer i McFarland (32) su jedno lasersko ogledalo zamenili difrakcionom rešetkom. Rotiranjem difrakcione rešetke dolazi do selekcije talasnih dužina.

Christiansen je 1844. god. otkrio da komadići stakla potopljeni u određenu tečnost, zajedno sa njom postaju potpuno transparentni za onu talasnu dužinu za koju i staklo i tečnost imaju isti indeks prelamanja (33). Na sl.10 su prikazane krive zavisnosti indeksa prelamanja od talasne dužine propuštene svetlosti za slučaj tzv. kraun stakla (borosilikat) i rastvora načinjenog od 10 % - tne smeše ugljen - disulfida u benzolu na 20° C.

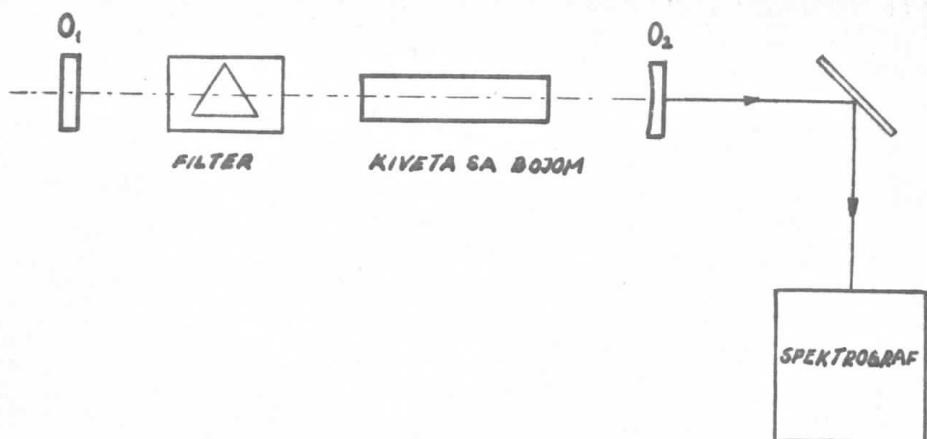


sl.10 krive indeksa prelamanja u funkciji talasne dužine za date komponente filtera (33)

S obzirom na zakone prelamanja i refleksije na graničnim površinama, očigledno je da će se za talasnu dužinu za koju obe komponente rastvora i stakla imaju isti indeks prelamanja, ovakav filter ponašati poput čvrste pločice, a data linija će bez devijacija ili refleksije potpuno proći kroz ovako napravljen filter.

Ova pojava je iskorišćena za biranje talasnih dužina laserske svetlosti stimulisane u rodaminu 6G (Lj. Ćirković, J. Jovičić (34)). Prvo je kao Christiansen - ov filter upotrebljena kombinacija prizme od kraun stakla uronjena u smešu ugljendisulfida (CS_2) i benzola. Varirajući koncentracije CS_2 i C_6H_6 između 5% i 15% (zapreminskih), indeks prelamanja celog rastvora menja se tako da je filter bio transparentan za svetlost između 5800 i 6100 Å. Na primer, kada je odnos $CS_2 : C_6H_6$ jednak 1 : 10, tada je filter transparentan za 5890 Å i maksimum laserske emisije dobijene na izlazu, odgovara toj talasnoj dužini.

Uopštена šema eksperimenta imala je izgled dat na sl.11



sl. 11 Šemetski prikaz aparature sa Christiansen-ovim filterom (34)

1.5. Primena tečnih lasera u spektroskopiji

Tečni laseri se od drugih vrsta izvora koherentnog zračenja razlikuju po mogućnosti kontinualne promene talasne dužine emisije lasera i zahvaljujući tome, o njima se vrlo često govori kao o idealnim izvorima svetlosti za primenu u slučajevima kada je potrebno raditi sa specifičnim talasnim dužinama.

1.5.1. Primena tečnih lasera u rezonantnoj spektroskopiji

Zbog navedenih prednosti, ova vrsta lasera dobija sve značajniju ulogu i u spektroskopskim istraživanjima gasova i para. Poznato je na primer, da je efikasni presek rezonantnog rasejanja svetlosti na atomima ili molekulskim grupama približno za oko deset redova veličine veći od preseka za nerezonantne procese (Rayleigh-ovo, Raman-ovo i Mie-ovo rasejanje), stoga je rezonantno rasejanje jedno od najosetljivijih metoda za određivanje tih grupa (njihove koncentracije, vrste, itd.). Polazeći od toga, Yamaguchi je sa saradnicima (35) radio na ispitivanju rezonantnog rasejanja laserske svetlosti na atomima natrijuma, čija je gustina bila oko $3,5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ na 100°C . Na osnovu dobijenih rezultata predložili su da se ova vrsta lasera koristi za kontrolu čistoće vazduha kao tzv. laserski radar i za detekciju Na u visokoj atmosferi. Održeli su da je u vreme njihovog merenja gustina Na atoma na visini od 80 - 100 Km variralo između $1,8 \times 10^{14}$ i $9 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$.

Za određivanje koncentracije pojedinačnih sastojaka potrebno je poznavanje efektivnog efikasnog preseka za rasejanje laserske svetlosti na atomima tih sastojaka. On se, u slučaju rasejanja po jednom atomu računa po formuli (37):

$$\bar{\sigma}_{\text{eff}} = \int \bar{\sigma}(\nu) \cdot g(\nu) d\nu$$

gde je $\bar{\sigma}(\nu)$ - srednji efikasni presek apsorpcije po atomu na frekvenciji ν i on zadovoljava relaciju :

$$\int \bar{\sigma}(\nu) d\nu = \frac{e^2}{4 \epsilon_0 m_e c} f$$

(f - jačina oscilatora koja za D_1 liniju Na iznosi 0,33; ostali simboli imaju uobičajeno značenje).

$\int g(\nu) d\nu$ je frakcija laserskih fotona u oblasti frekvencija od ν do $\nu + d\nu$ i ona zadovoljava :

$$\int g(\nu) d\nu = 1$$

Maksimalna vrednost $\bar{\sigma}(\nu)$ za D_2 liniju Na na 220 °K je $9 \times 10^{-16} \text{ m}^2$. Gibson (37) je za liniju od 0,05 Å širine, koju je kao D_2 liniju iz tečnog lasera, našao da vrednost $\bar{\sigma}_{\text{eff}}$ iznosi oko jednu trećinu od ove maksimalne vrednosti. Autor ovog rada je konstatovao da su efikasni preseci za sve atome i jone metala, istog reda veličine.

R. i N. Konjević (36) upotrebili su tečni rodaminski 6G laser za apsorpcionu analizu tragova Na u plamenu. Našli su da se tehnikom tečnih lasera mogu odrediti koncentracije i do $2 \times 10^{-10} \text{ g/l}$ Na, što prevažilazi osjetljivost svih komercijalnih instrumenata najmanje za 2 reda veličine.

Do danas, tečni laseri su korišćeni i u nizu drugih eksperimentata. Tako se, recimo, može ispitivati zavisnost probaja u gasovima, izazvanog snopom svetlosti iz tečnog lasera, od talasne dužine (40). Zatim, korišćeni su za pobuđivanje i izazivanje spontane emisije u parama Cs, Rb, Sr (38, 39) kao i molekularnog joda.

Z A D A T A K R A D A

Zadatak eksperimenata, navedenih u ovom diplomskom radu, je da se ispitaju neke karakteristike tečnog lasera, kao i faktori koji utiču na spektralne osobine tečnog lasera :

-spektralna i vremenski razlučena merenja spektra tečnog lasera

-spektralna i vremenski razlučena merenja spektralne karakteristike fleš lampe

-promenu intenziteta fleš lampe pri promeni energije napajanja

-zavisnost pomeranja talasne dužine laserske emisije usled promene koncentracije rastvora i vrste rastvarača

-zavisnosti promene spektralne širine laserske emisije usled promene energije fleš lampe

-određivanje kritične inverzne naseljenceti singletnog stanja i naseljencati tripletnog stanja

2.1. Opis aparature

Eksperimenti, opisani u ovom diplomskom radu, rađeni su u Institutu za fiziku u Beogradu na aparaturi koja bi se mogla podeliti na : tečni laser i sistem za spektralnu analizu laserske emisije.

2.1.1. Tečni laser

Tečni laser se sastoji od sledećih delova : sklop tečnog lasera, sistema za napajanje električnom energijom i okidanja lasera i uređaja za napajanje tečnog lasera bojom.

2.1.10. Sklop tečnog lasera

Sastavni delovi sklopa tečnog lasera su : kiveta sa prozorima, fleš lampa, ogledala i laserska šupljina, koji čine optički deo tečnog lasera. Svi navedeni delovi, sem ogledala, smešteni su u kućištu lasera.

Eksperimenti su rađeni sa dva tipa sklopa tečnih lasera koji se konstruktivno, međusobno, razlikuju.

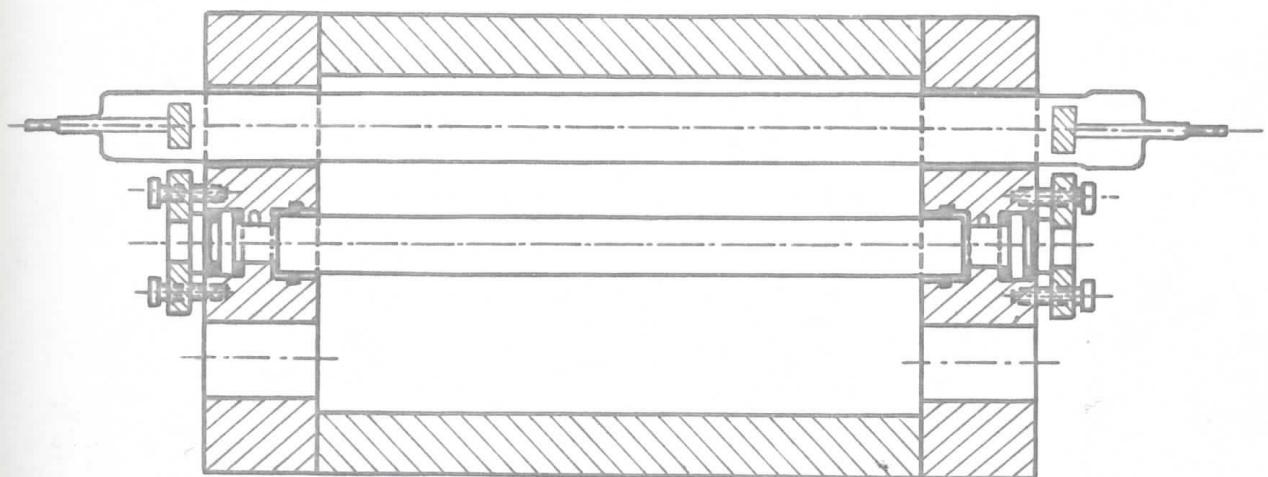
a. Pomoću prvog tipa sklopa tečnog lasera, čiji su preseci dati na sl.12, rađen je prvi eksperiment naveden u ovom diplomskom radu.

Kiveta kroz koju protiče boja, je kvarcna cevčica dužine 91mm i spoljašnjeg prečnika 8,0mm. Kiveta je od kvarcnog stakla da bi propuštala i UV svetlost fleš lampe.

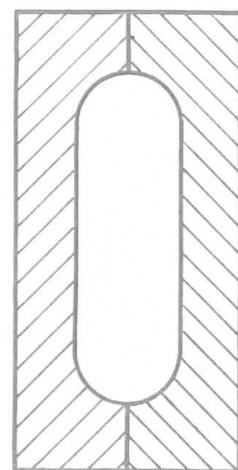
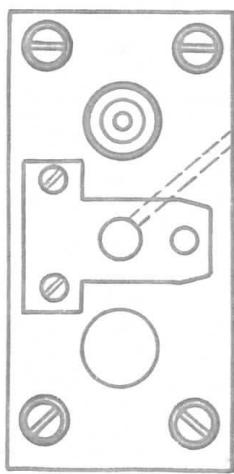
Da bi se izbeglo neželjeno isticanje boje, na mestima gde je kiveta pričvršćena u kućištu, u ležištima kivete nalaze se gumeni prstenovi („o" ringovi) koji imaju ulogu zaptivača. Na stranama kivete, nalaze se prozori koji je zatvaraju. Između prozora i kivete nalazi se gumeni prsten koji ima ulogu i zaptivača, a i dozvoljava mala pomeranja prozora pri njihovom poravnavanju, koje se vrši pomoću držača prozora, koji se pomoću tri zavrtnja pričvršćuju za kućište. Upravo se tim zavrtnjima mogu pomerati prozori.

Konstrukcija ovog laserskog sklopa dozvoljava da se mogu istovremeno koristiti dve fleš lampe, jedna iznad a druga ispod kivete. Eksperimenti, koji će kasnije biti opisani, rađeni su sa jednom fleš lampom postavljenom iznad kivete.

Optičko pobuđivanje boje je vršeno pomoću dva tipa fleš lampi. Prvi tip, fleš lampe ima omotač od pireksnog stakla, tako da apsorbuje UV zračenje. Prostor u kome se vrši pražnjenje je u obliku kapilare (unutrašnjeg prečnika 2mm). Unutar balona nalazi se ksenon pod pritiskom 100mmHg. Drugi tip fleš lampi, koja je korišćena, ima omotač od kvarcnog stakla, tako da propušta i UV zračenje. Unutrašnji pritisak je 10mmHg. Elektrode ove fleš lampe imaju veću čeonu površinu od prethodnih, a i samo pražnjenje se



Uzdužni presek laserskog sklopa



Poprečni preseci laserskog sklopa

vrši u cevi unutrašnjeg prečnika 8mm, a ne u kapilari. Ova fleš lampa je proizvod firme Quartz and vevre, Francuska. Fleš lampe nalaze se unutar laserske šupljine, načinjene od aluminijuma, a zidovi su joj polirani jer imaju ulogu ogledala.

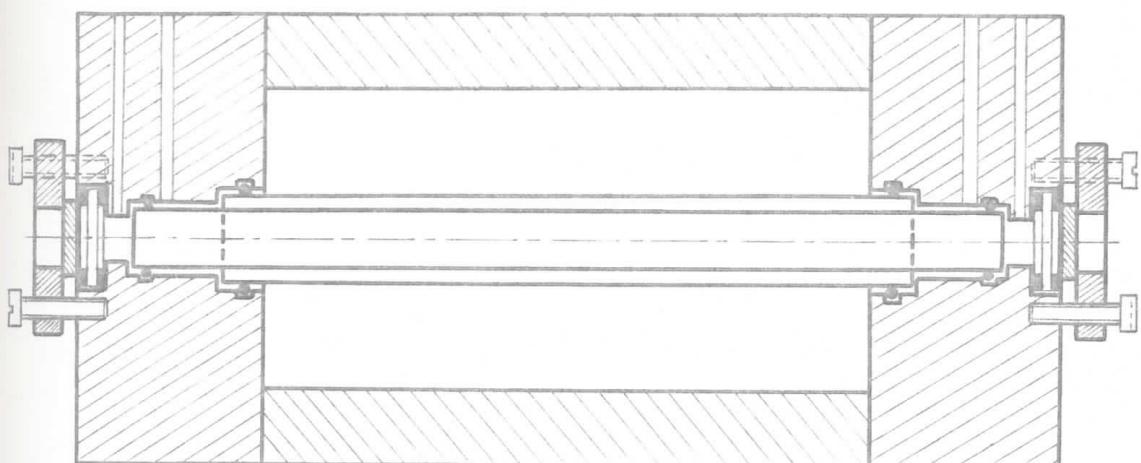
b. Drugi tip sklopa tečnog lasera se konstruktivno razlikuje od prvog po tome što mu je poprečni presek šupljine u obliku elipse, ima mesta za samo jednu fleš lampu i umesto jedne kivete ima dve koncentrično postavljene od kojih je unutrašnja za boju a spoljašnja za hlađenje. Na sl.13 prikazani su preseci ovog lasera. Unutrašnja kiveta je dugačka 115mm a spoljašnji prečnik joj je 8,0mm. Kiveta za hlađenje boje je dugačka 91mm a unutrašnji prečnik je 11,0mm.

Stranice jednog prozora su međusobno pod malim uglom od 30° , kako bi se izbegla interferencija svetlosti na njima. U slučaju kada su prozori plan-paralelne ploče, ponašaju se kao Fabry - Perot-ov interferometar.

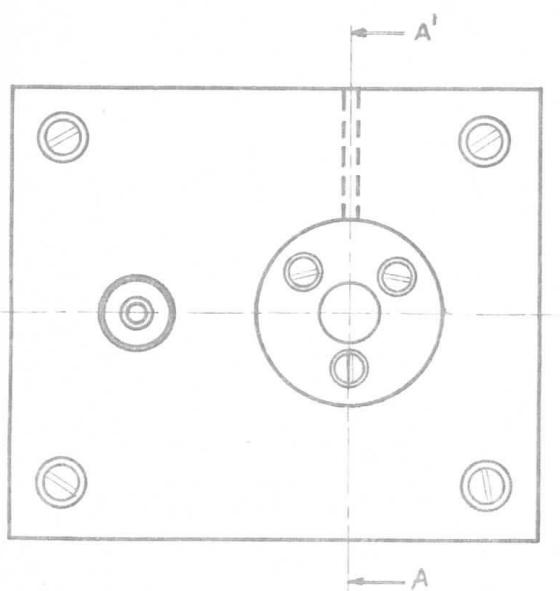
Poprečni presek šupljine je elipsa. U jednom fokusu se nalazi fleš lampa a u drugom kiveta, što omogućava maksimalno korišćenje svetlosti fleš lampe. I u ovom slučaju zidovi šupljine su polirani.

Kiveta, zatvorena prozorima, kroz koju protiče boja sa laserskim ogledalima čini optički rezonator tečnog lasera. U svim navedenim eksperimentima, aktivna supstanca je rastvor rodamina6G. Upravo zbog toga upotrebljena ogledala su reflektivna u oblasti od 5800 do 6400 Å. Jedno ogledalo je ravno (koeficijent refleksije je 99,8 %), a drugo je zakriveno, radijusa 100cm (koeficijent refleksije je 99,0 %).

Da bi tečni laser mogao da radi optički rezonator mora biti poravnat. Poravnavanje se vrši pomoću HeNe lasera (proizvod „Iskra“ Kranj, snage 0,5mW). Postupak poravnavanja je sledeći : prvo se pusti da kroz kivetu protiče boja. Tada se poravnava kiveta tj. snop svetlosti HeNe lasera treba da prolazi kroz osu kivete. Posle ovoga se vrši poravnavanje prozora kivete, na taj način što se vrši pomeranje prozora sve dok se upadni zrak na njih i deo zraka koji se reflektuje sa strana prozora ne poklope. Prvo se poravnava onaj prozor koji je udaljeniji od HeNe lasera pa zatim bliži. Kada su prozori poravnati vrši se poravnavanje ogledala, na isti način kao i prozora. Prvo se vrši poravnavanje zakriviljenog ogledala, sve dok se upadni i odbijeni zrak ne poklope. Posle toga se vrši poravnavanje ravnog ogledala.



PRESEK AA'

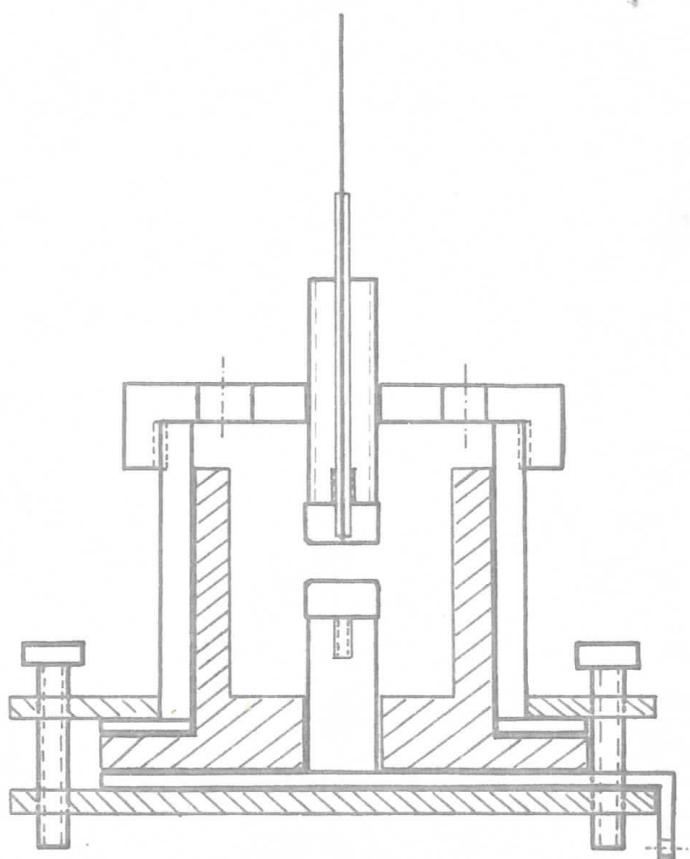


sl. 13 PRESECI SKLOPA TEĆNOG LASERA

2.1.11. Sistem za napajanje električnom energijom i okidanje lasera

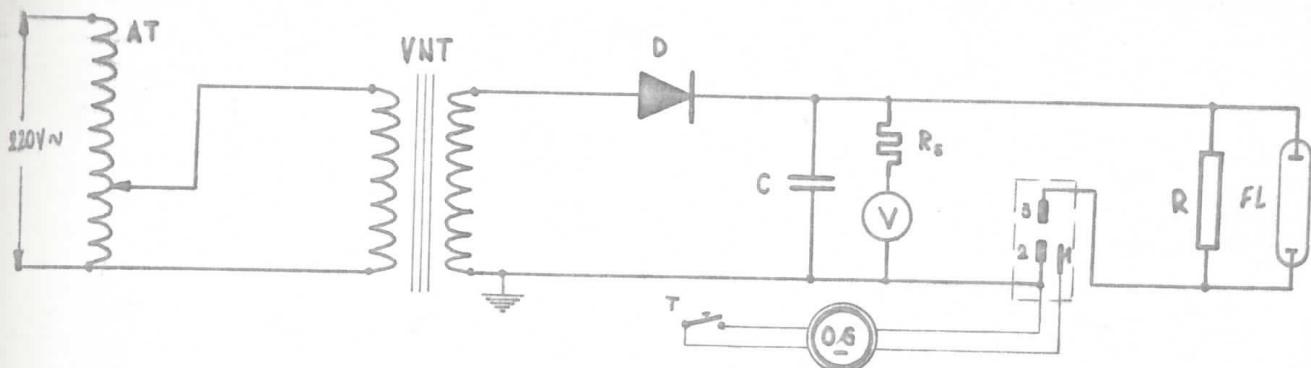
Deo aparature koji služi za napajanje električnom energijom fleš lampe sastoji se od : autotransformatora, visokonaponskog transformatora, poluprovodničke visokonaponske diode, kondenzatora i instrumenta za merenje napona. Sistem za okidanje tečnog lasera čine okidni generator i varnični prekidač.

Pomoću autotransformatora se iz gradske mreže, električna energija vodi na visokonaponski transformator (maksimalnog napona 10 KV). Podešavanje željene vrednosti napona, na sekundaru visokonaponskog transformatora, se postiže autotransformatorom. Visoki napon, se ispravlja poluprovodničkom visokonaponskom dicdom (Semicron, 17000 V i 0,5 A, England). Ispravljeni visoki napon se vodi na kondenzator (Hivotronic LTD, 2,5 μ F 20KV, England) malog koeficijenta induktivnosti ($L < 12nH$). Po- zitivni izvod kondenzatora je direktno spojen sa pozitivnom elektrodom fleš lampe. Drugi izvod kondenzatora je preko varničnog prekidača povezan



sl.14 poprečni presek varničnog prekidača
sa drugom elektrodom fleš lampe. Preko otpornika (vrednost otpora $40M\Omega$),
krajevi prekidača su pod visokim jednosmernim naponom. Izvod 1, na sl.15

je spojen sa impulsnim generatorom (okidni generator). Fritiskom taste-
ra okidnog generatora javlja se varnica između izvoda 1 i 2. Ta varnica



sl.15 električna šema sistema za el. napajanje i okidanje lasera
između izvoda 1 i 2 je dovoljna da izazove el. pražnjenje između elektro-
da prekidača 2 i 3. Na taj način kolo električne struje je zatvoreno i
dolazi do električnog pražnjenja između elektroda fleš lampe.

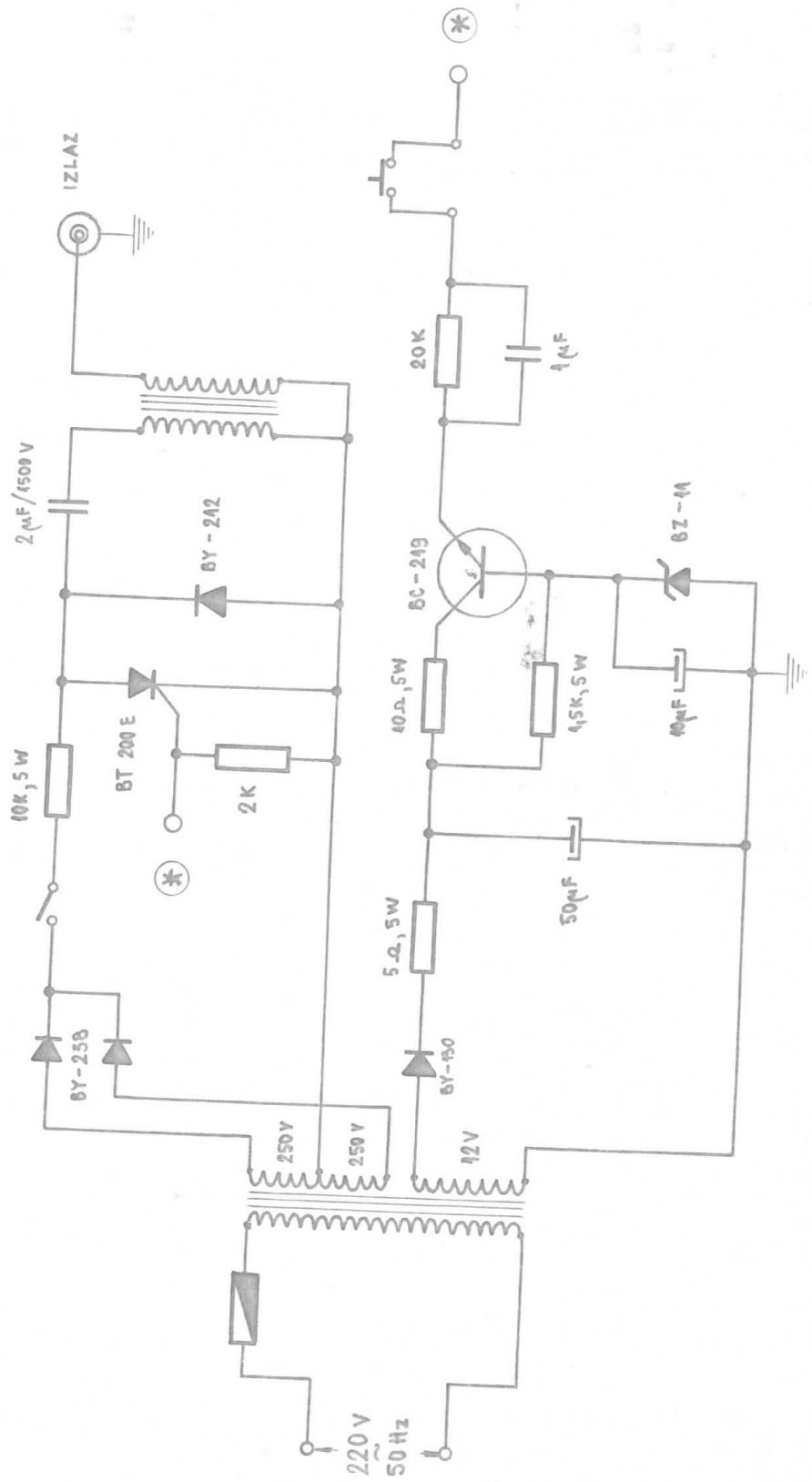
Električna energija, kojom je napajana fleš lampa u navedenim
eksperimentima, je najviše 80 J.

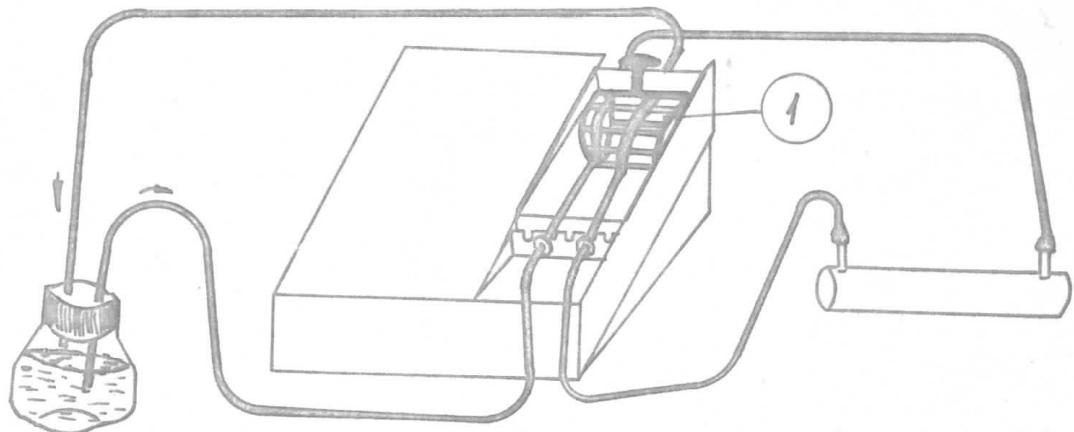
Od fleš lampe se traži, kako je navedeno u prethodnoj glavi, da
joj je vreme uspona intenziteta svetlosnog bljeska što kraće. Zbog toga
se koriste tzv. brzi kondenzatori, kod kojih je vreme pražnjenja veoma kr-
atko.

2.1.12. Uredaj za napajanje bojom tečnog lasera

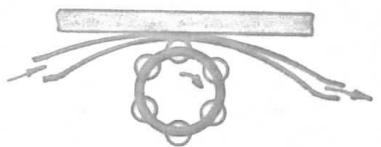
U eksperimentima, opisanim u ovom diplomskom radu, korišćen je
rastvor rodamina 6G u etil ili metil alkoholu. Prilikom optičkog pobuđi-
vanja rastvora dolazi do njegovog zagrevanja, usled čega se javlja toplo-
tni gradijent koji ima za posledicu pojavu nehomogenosti rastvora. Zbog
toga je potrebno vrlo često obezbeđivati svež rastvor rodamina 6G. U te-
svrhe koristi se pumpa (Peristaltic miniflow pump, type 304 "Elmed", Po-
land).

Creva, od plastične mase, povezuju kivetu i posudu sa bojom, pr-
eko pumpe čineći zatvoreno kolo kako je prikazano na sl.17





Pozicija „1“ data je:



sl.17 sistem za napajanje tečnog lasera bojom

Pumpa radi na sledeći način : creva, koja idu kroz pumpu, prolaze preko malih valjaka smeštenih na jednom velikom valjku. Veliki valjak pokreće se pomoću elektro-motora. Iznad valjaka nalazi se poklopac koji pritiskuje creva na valjak. Kada se veliki valjak okreće, mali valjkovi (koji se obrću oko svoje centralne ose) okrećući se istiskuju tečnost iz creva.

2.1.2. Sistem za spektralnu analizu laserskog zračenja

Spektralno razlaganje laserskog zračenja vršeno je na dva tipa spektrograфа. Prvi je Hilger & Watts, Medium Quartz, England. Kao disperzionalni element ima prizmu. Inverzna disperzija pri 6030 \AA iznosi 100 \AA/mm . Drugi tip spektrograфа je „McPherson“ GCA corporation, USA. Disperzionalni element je rešetka (2400 nareza po mm). Inverzna linearna disperzija ovog spektrograфа je $4,15 \text{ \AA/mm}$.

Integralno snimanje spektara laserskog zračenja vrši se na foto ploču (Ilford plate R40, England). Foto ploča se smešta u kasetu, koja se nalazi na kućištu spektrograфа. Kao referentni spektar, koristi se spektar gvožđa.

Kada se vrši analiza intenziteta laserske emisije na pojedinim talasnim dužinama, svetlosni signal iz spektrograфа se vodi na fotomultiplikator (RCA 1P28 kada je korišćen spektrograf sa prizmom i EMI 6215B za spektrograf sa rešetkom), koji svetlosne signale pretvara u električne.

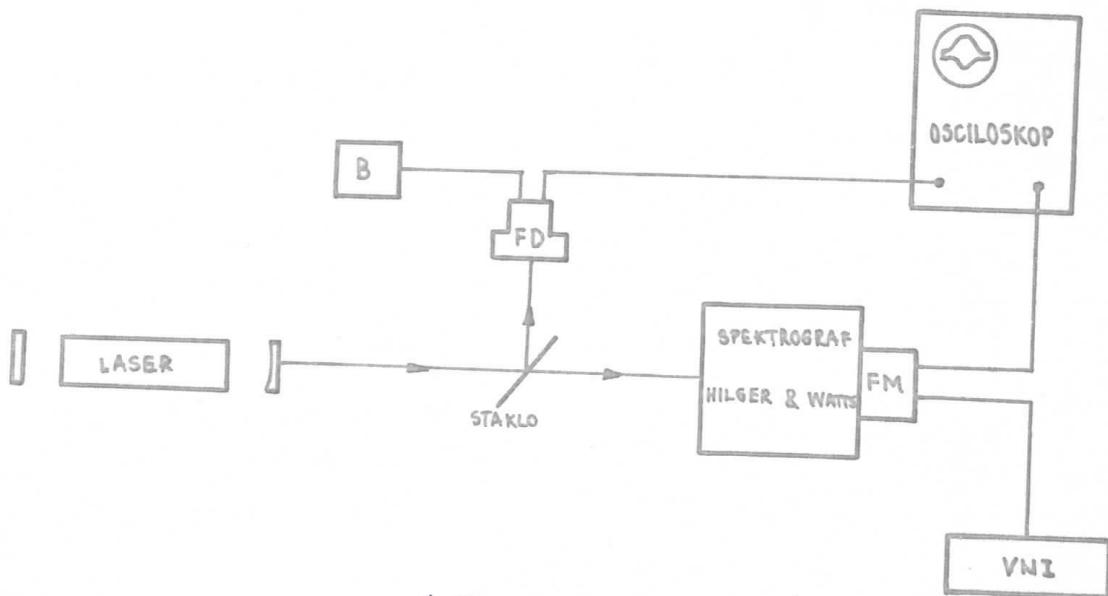
Napajanje fotomultiplikatora vrši se visokonaponskim ispravljačem („Keithley instruments“ 244 Hi6H voltage supply, maksimalni napon je 2,2 KV i maksimalna struja je 10 mA). Foto-električni signali iz fotomultiplikatora vode se na osciloskop (Type 555, Dual-Beam, Tektronix, Oregon, USA), na čijem se ekranu mogu posmatrati. Sa ekrana osciloskopa foto-električni signali se mogu, pomoću foto-aparata snimiti na foto-film (Orwo NP27, Panromatic, DDR).

Integralno merenje intenziteta laserske emisije vršeno je pomoću foto-diode (Edgerton, Germeshausen & Grier. Inc. Massachusetts, USA). Ovi foto-električni impulsi takođe se vode na osciloskop.

2.2. Merenje spektralno i vremenski razlučenog spektra emisije tečnog lasera

Zadatak ovog merenja je određivanje spektralne širine laserske emisije i zavisnost intenziteta laserske emisije od talasne dužine.

Šematski prikaz aparature korišćene za ova merenja je prikazan na sl.18 :

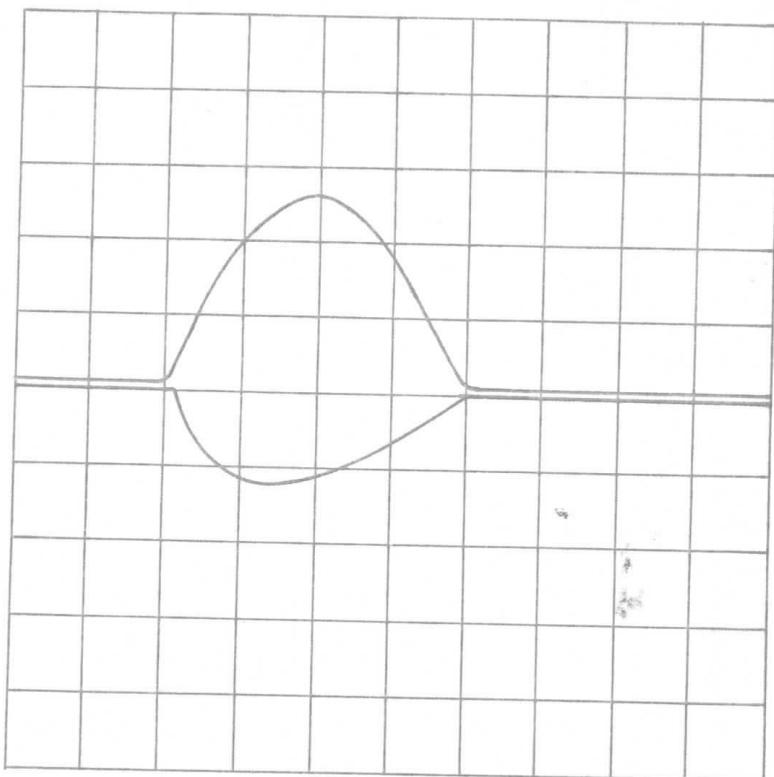


sl.18

Od impulsa do impulsa je vršena promena položaja prizme u spektografu, čime je na osciloskopu, preko fotomultiplikatora (FM), registrovan signal koji odgovara određenoj talasnoj dužini laserske svetlosti. Signali koji dolaze iz foto-diode služe samo kao merilo reproduktivnosti lasera, jer foto-dioda meri intenzitet na svim talasnim dužinama

laserskog zračenja, integralno .

Signali, na ekranu osciloskopa, se snimaju pomoću foto-aparata na film i na slici 19 je prikazan jedan tipičan snimak.



sl.19

Donji trag je signal iz fotomultiplikatora, a gornji iz foto-diode .
Vremenska baza na osciloskopu je $0,5 \mu\text{sec}/\text{cm}$.

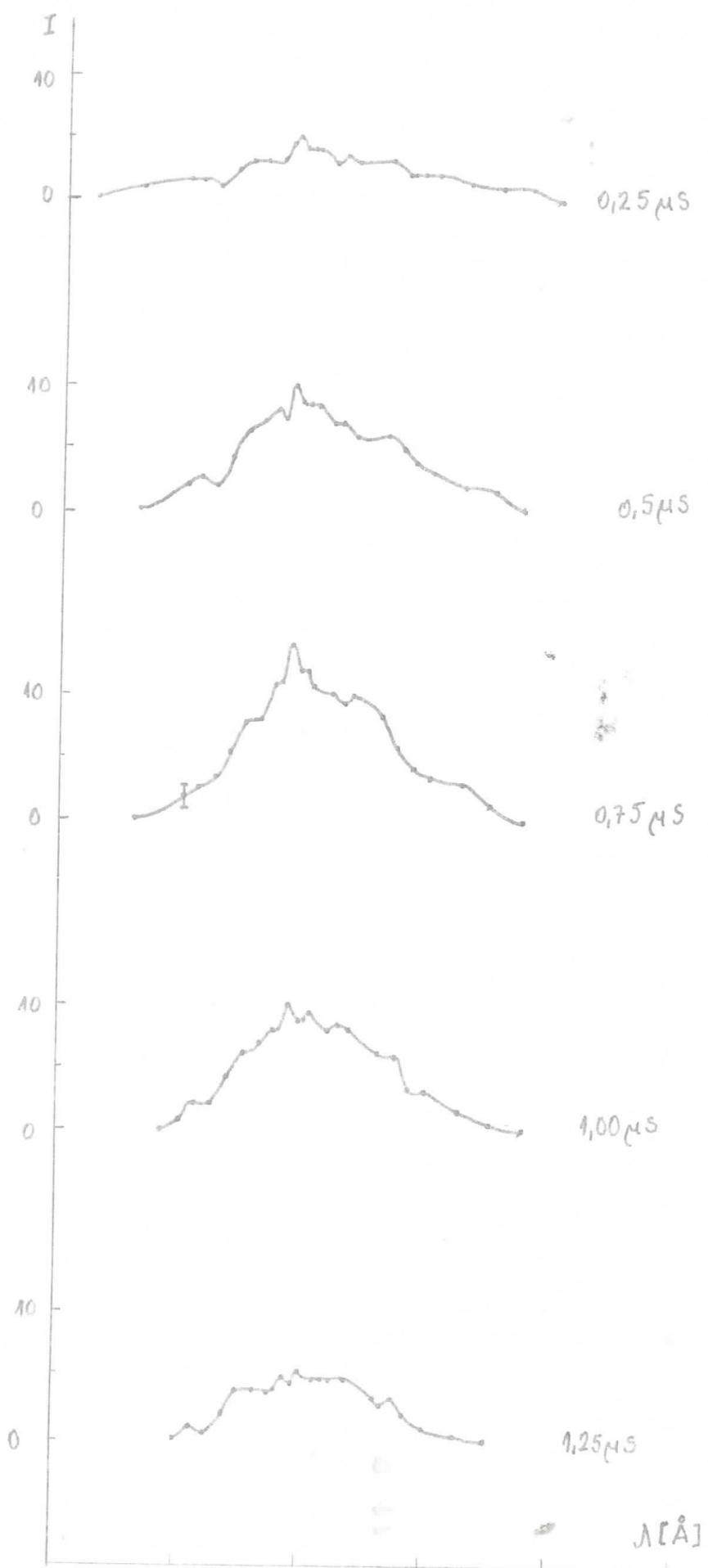
Analiza merenja je vršena na snimcima, prenetih sa foto-filma, na milimetarski papir. Sa svakog snimka se određuje relativni intenzitet laserskog impulsa u različitim vremenima. Ovi podaci se unose u tablice i na osnovu njih se može nacrtati grafik zavisnosti relativnog intenziteta laserske emisije od talasne dužine. Svaka vrednost na graficima predstavljaju srednju vrednost tri merenja, a odstupanja od srednje vrednosti naznačena su \pm

U tabeli II dati su podaci kada je koncentracija rastvora rodamina 6G u etil alkoholu 5×10^{-4} (M), a energija pireksne fleš lampe iznosi 37,5 J .

Tabela II

TALASNA DUŽINA Å	INTENZITET				RELAT. JEDINICE	
	NA 0,25 μsec	NA 0,5 μsec	NA 0,75 μsec	NA 1,0 μsec	NA 1,25 μsec	NA 1,5 μsec
6015	0	0	0	0	0	0
6022,5	1,0	0	0	0	0	0
6030	1,5	2,0	1,5	0,5	0	0
6032,5	1,5	2,5	2,5	2,0	1,0	0
6035	1,0	2,0	3,0	2,0	0,5	0
6037,5	2,0	4,5	5,0	4,0	2,0	0
6040	3,0	6,5	8,0	6,0	4,0	0
6042,5	3,0	7,0	8,0	6,5	4,0	0
6045	3,0	8,0	11,0	8,0	4,0	0
6046	4,0	7,5	11,0	8,0	4,0	0
6047,5	5,0	10,0	14,0	10,0	5,0	0
6049	4,0	8,5	12,0	9,0	4,5	0
6050	4,0	8,5	12,0	9,0	5,5	0
6051	4,0	8,5	10,5	9,5	5,0	0
6054	3,0	7,0	10,0	8,0	5,0	0
6055	3,5	7,0	9,5	8,5	5,0	0
6057,5	3,0	6,0	10,0	8,0	5,0	0
6062,5	3,0	6,0	8,0	6,0	3,0	0
6065	2,0	5,0	6,0	6,0	3,5	0
6067,5	2,0	3,5	4,0	3,0	2,0	0
6070	2,0	3,0	3,5	3,0	1,5	0
6075	1,5	2,0	3,0	1,5	0,5	0
6080	1,0	1,5	1,0	0,5	0	0
6085	1,0	0	0	0	0	0
6090	0	0	0	0	0	0

Na osnovu ovih podataka crta se grafik (sl.20)

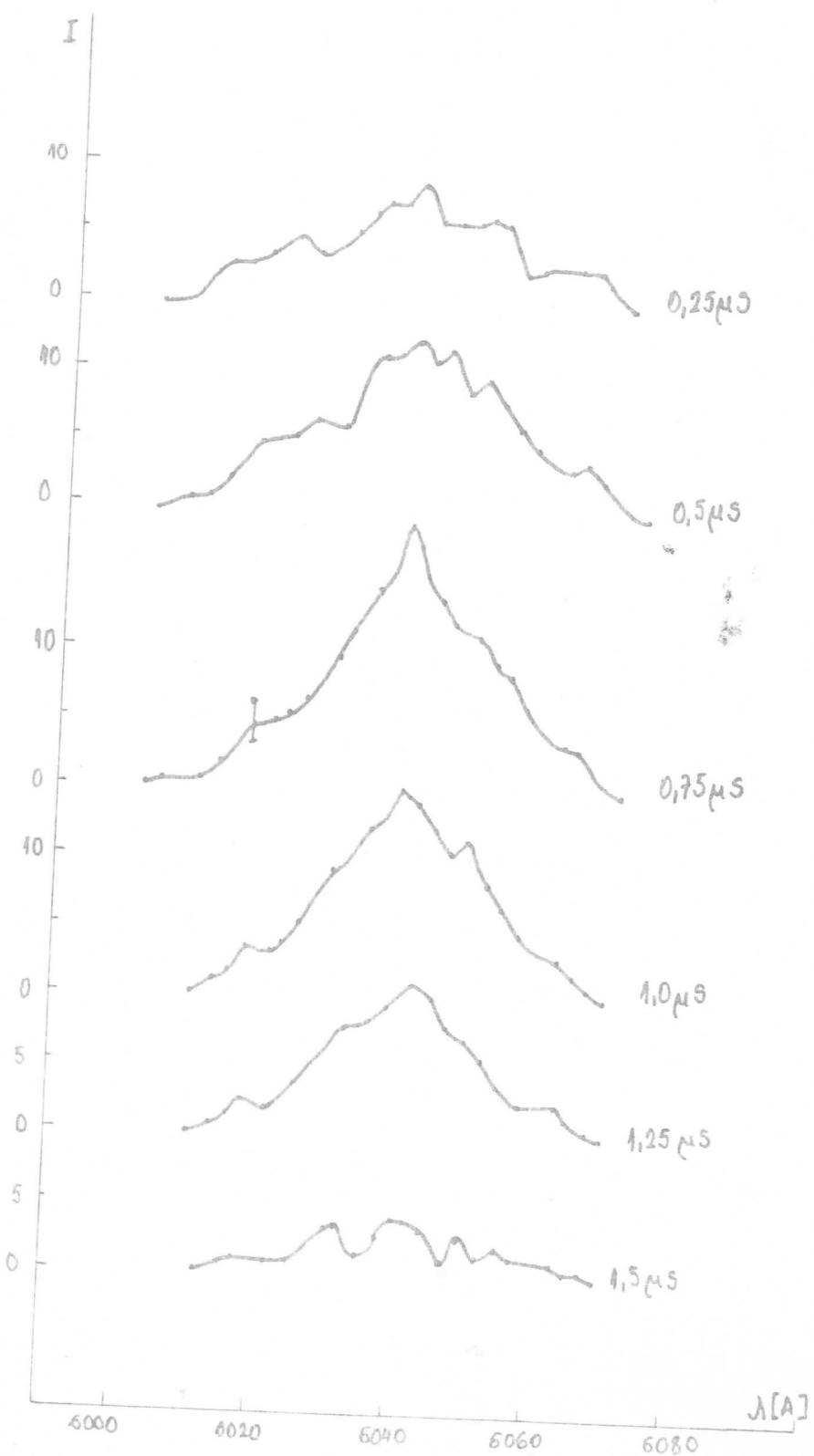


sl.20

Tabela III

TALASNA DUŽINA Å	INTENZITET					RELAT. JEDINICE	
	NA 0,25 µSEC	NA 0,5 µSEC	NA 0,75 µSEC	NA 1,0 NSEC	NA 1,25 µSEC	NA 1,5 µSEC	
6002,5	0	0	0	0	0	0	0
6007,5	0,5	1,5	1,0	0	0	0	0
6010	2,0	1,5	1,0	0	0	0	0
6012,5	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5	0	0
6015	3,0	3,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0
6017,5	3,5	5,0	4,5	3,5	2,5	1,0	0,5
6022,5	5,0	5,5	5,0	3,0	2,0	1,0	1,0
6025	3,5	6,5	6,0	5,0	3,5	1,0	1,0
6030	5,0	8,0	10,0	9,0	6,5	3,0	1,0
6032,5	6,5	9,5	12,0	10,0	8,0	3,5	3,5
6035	7,5	11,5	14,0	12,0	8,0	4,5	4,5
6037,5	7,5	11,5	15,0	13,0	9,0	2,0	2,0
6040	9,0	12,5	19,0	15,0	10,0	4,0	4,0
6042,5	6,0	11,0	15,0	14,0	11,0	4,0	4,0
6045	6,0	12,0	14,0	12,0	10,0	3,5	3,5
6047,5	5,0	9,0	12,0	10,5	8,0	1,0	1,0
6050	5,5	10,0	11,5	11,5	7,0	3,0	3,0
6052,5	5,0	8,0	9,0	8,0	5,5	1,5	1,5
6055	2,5	6,5	8,5	6,5	4,0	2,0	2,0
6057,5	3,0	5,0	6,0	4,5	2,5	1,5	1,5
6063	3,0	3,5	3,5	3,0	2,5	1,0	1,0
6065	3,0	4,0	3,5	2,0	1,5	0,5	0,5
6067,5	2,0	2,5	1,5	1,0	0,5	0	0

U tabeli III dati su podaci kada je koncentracija rastvora rodamina 6G u etil alkoholu 5×10^{-4} (M), a električna energija pireksne fleš lampe je 45 J. Na sl. 21 grafički su predstavljeni ovi podaci.



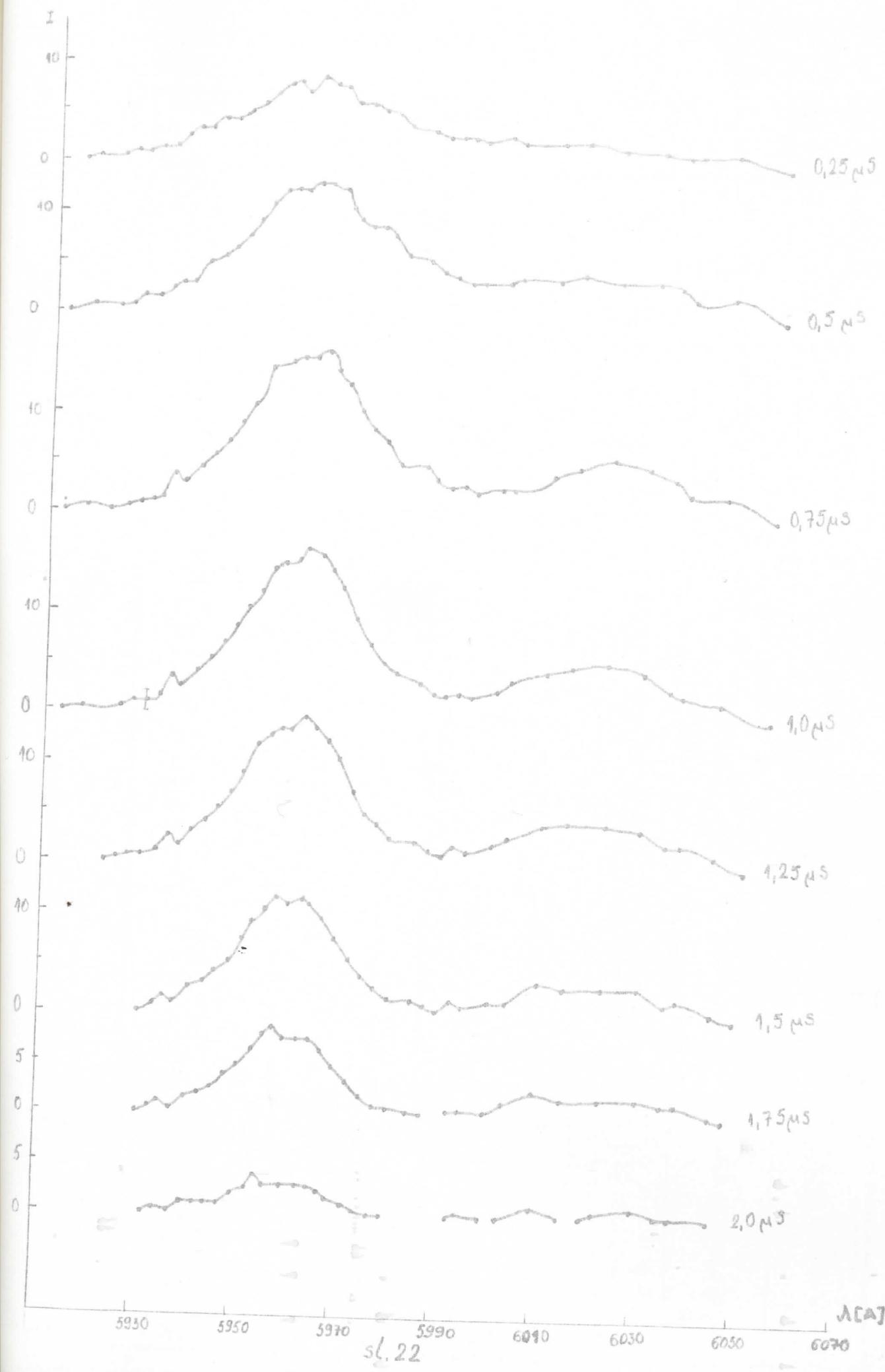
sl. 21

Vrednosti kada je koncentracija rodamina 6G u etil alkoholu 1×10^{-4} (M) i energija fleš lampe, sa kvarenim omotačem, od 37,5 J, dati su u tabeli IV.

Tabela IV

TALASNA DUŽINA Å	INTENZITET								RELAT. JEDINICE
	NA 0,25μsec	NA 0,5μsec	NA 0,75μsec	NA 1,0μsec	NA 1,25μsec	NA 1,5μsec	NA 1,75μsec	NA 2,0μsec	
5912,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5917,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0
5922,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
5925	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
5927,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0	0	0	0
5930	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0	0	0	0
5932,5	1,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0	0	0
5935	2,5	3,5	4,0	3,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0
5937,5	3,5	3,5	3,0	2,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
5940	3,5	5,0	4,5	3,5	3,0	2,5	1,5	0,5	0,5
5942,5	4,5	5,5	5,5	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	1,0
5945	4,5	6,5	7,0	6,5	5,0	4,0	2,5	1,0	1,0
5947,5	5,0	7,5	8,5	8,0	6,5	5,0	3,5	1,0	1,0
5950	5,5	9,0	10,5	10,0	8,5	7,0	4,5	2,0	2,0
5952,5	6,5	10,5	12,0	11,5	11,5	9,0	6,0	2,5	2,5
5955	7,5	12,0	15,0	14,0	12,5	10,0	7,5	4,0	4,0
5975,5	8,0	12,5	15,0	15,0	13,5	11,5	8,0	3,0	3,0
5960	7,0	12,5	15,5	15,0	13,5	11,0	7,5	3,0	3,0
5962,5	8,5	13,0	15,5	16,5	14,5	11,5	7,5	3,0	3,0
5965	8,0	13,0	16,0	16,0	13,5	10,5	7,5	3,0	3,0
5967,5	7,5	12,5	14,0	14,0	12,0	9,0	6,0	2,5	2,5
5970	6,0	10,0	12,5	12,0	10,0	7,0	4,5	1,5	1,5
5972,5	6,0	9,0	10,0	9,0	7,0	5,0	3,0	1,0	1,0
5975	5,5	9,0	8,5	7,0	5,0	3,5	2,0	0,5	0,5
5977,5	5,0	8,0	7,5	5,5	4,0	2,5	1,0	0	0
5980	4,0	6,0	5,0	4,5	2,5	1,5	1,0	0	0
5985	3,5	5,5	5,0	3,5	2,5	1,5	1,0	0	0
5987,5	3,0	4,5	3,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0	0
5990	3,0	4,0	3,0	2,0	1,0	0,5	0,5	0	0
5992,5	3,0	3,5	3,0	2,5	1,0	0,5	0	0	0
5995	2,5	3,5	2,5	2,0	1,0	1,5	0,5	0	0
6000	3,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	0,5	0,5	0,5
6002,5	2,5	4,0	4,0	3,5	2,5	1,5	0,5	0	0
6010	2,5	4,0	4,5	4,5	4,0	3,5	2,5	1,0	1,0
6015	2,5	4,5	5,5	5,0	4,5	3,0	2,0	1,0	1,0
6022,5	2,0	4,0	6,0	5,5	4,5	3,0	2,0	0	0
6030	2,0	4,0	5,5	4,5	4,0	3,0	2,0	0,5	0,5
6035	1,5	3,5	4,0	3,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0
6037,5	1,5	2,0	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5	0,5	0,5
6045	0	0	0	0	0	0	0	0	0

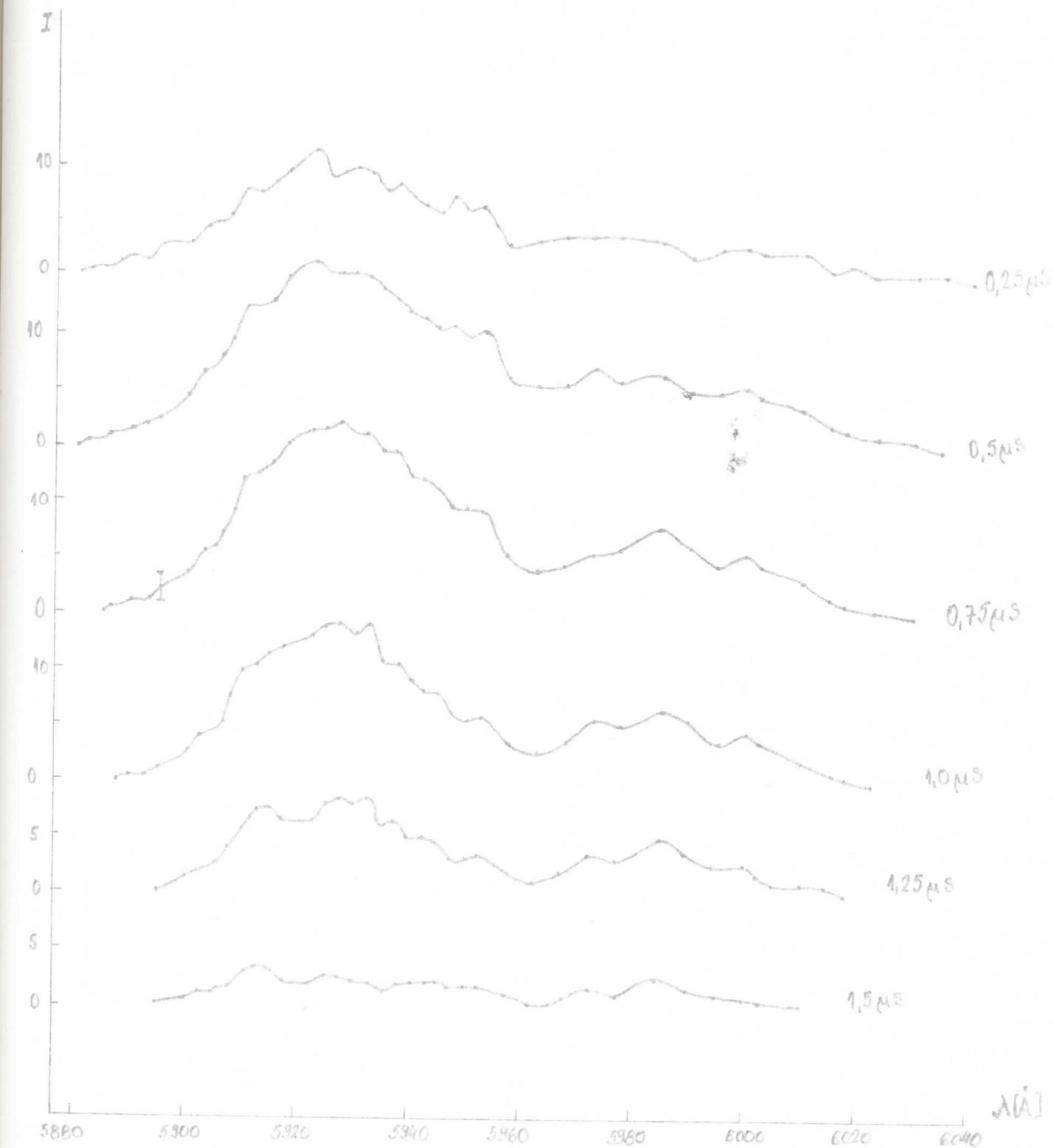
Odgovarajući grafik dat je na sl. 22



U tabeli V dati su podaci za rastvor R-6G u etil alkoholu koncentracije 5×10^{-5} (M) i energije kvarcne fleš lampe od 37,5 J.

Tabela V

TALASNA DUŽINA Å	INTENZITET					REL. JEDINICE	
	NA 0,25 μsec	NA 0,5 μsec	NA 0,75 μsec	NA 1,0 μsec	NA 1,25 μsec	NA 1,5 μsec	
5880	0,5	0	0	0	0	0	
5882,5	0,75	0,5	0	0	0	0	
5885	1,0	0,5	0	0	0	0	
5886	1,0	1,0	0,5	0	0	0	
5887,5	1,5	1,0	0,5	0	0	0	
5890	2,0	1,5	1,0	0,5	0	0	
5892,5	1,5	2,0	1,0	0,5	0	0	
5895	3,0	2,5	2,0	1,0	0	0	
5900	3,0	4,5	3,5	2,5	1,5	0	
5902,5	4,5	6,5	5,5	4,0	2,0	0,5	
5905	5,0	7,0	6,0	4,5	2,5	1,0	
5906	5,0	8,0	7,0	5,0	3,0	1,0	
5907,5	5,5	9,5	9,0	7,5	4,0	1,5	
5910	8,0	12,5	12,0	10,0	6,0	3,0	
5912,5	7,5	12,5	12,5	10,5	7,5	3,5	
5915	8,5	13,0	13,5	11,5	7,5	3,0	
5917,5	9,5	15,0	15,0	12,0	6,5	2,0	
5922,5	11,5	16,5	16,5	13,0	6,5	2,0	
5925	9,0	15,5	16,5	14,0	8,0	2,5	
5927,5	9,5	15,5	17,0	14,0	8,5	2,5	
5930	10,0	15,5	16,0	13,0	8,0	2,0	
5932,5	9,5	15,0	16,0	14,0	8,5	2,0	
5935	7,5	14,0	14,5	10,5	6,0	1,5	
5937,5	8,5	13,0	14,5	10,5	6,0	1,5	
5940	7,0	12,0	12,0	9,0	6,5	2,0	
5942,5	6,5	11,5	12,0	8,0	5,0	2,0	
5945	6,0	10,5	11,0	8,0	5,0	2,0	
5947,5	7,5	11,0	9,5	6,0	3,0	1,5	
5950	6,0	10,0	9,5	5,5	3,0	1,5	
5952,5	6,5	10,5	9,5	6,0	3,5	1,5	
5955,5	3,0	6,0	5,0	3,0	2,0	1,0	
5962,5	3,5	5,5	4,0	2,5	1,0	0	
5967,5	4,0	5,5	4,5	3,5	2,0	0,5	
5972,5	4,0	7,0	5,5	5,5	3,5	1,5	
5977,5	4,0	6,0	6,0	5,0	3,0	1,0	
5985	3,5	6,5	8,0	6,5	3,0	1,0	
5990	2,0	5,0	6,0	5,5	2,5	2,5	
5995	3,0	5,0	4,5	3,5	2,5	1,5	
6000	3,0	5,5	5,5	4,5	2,5	1,0	
6002,5	2,5	4,5	4,5	3,5	1,5	0,5	
6010	2,5	3,5	3,0	2,0	1,0	0	
6015	1,0	2,0	1,5	1,0	0,5	0	
6017,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0	0	
6022,5	0,5	1,0	0,5	0	0	0	
6030	0,5	0,5	0	0	0	0	
6035	0,5	0	0	0	0	0	
6040	0	0	0	0	0	0	



sl. 25

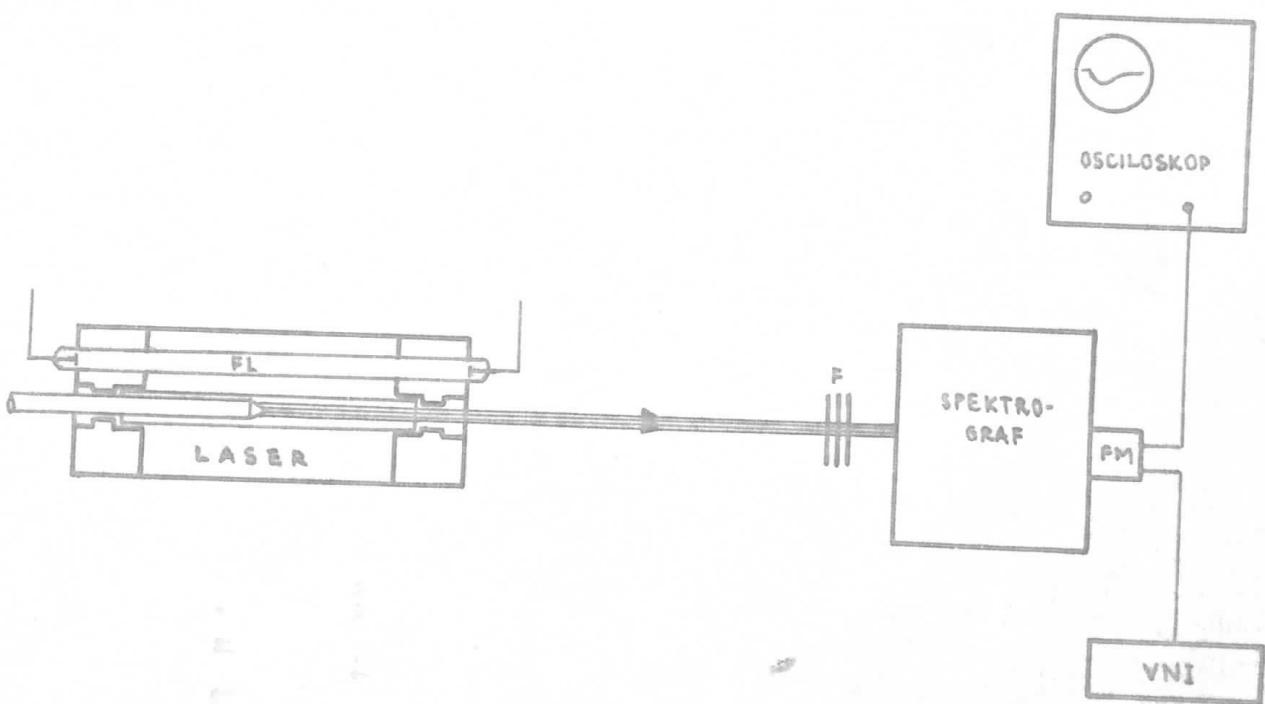
Grafici na slikama 22 i 23 pokazuju da postoji dva maksimuma intenziteta laserske emisije, kao i fina struktura spektra emisije lasera. Ovo nije u skladu sa teorijskim postavkama (41) i grafikom (sl.4). Na osnovu grafika na slikama 20;21 i 22;23 može se zaključiti da spektralna karakteristika fleš lampe utiče na spektralnu karakteristiku laserskog zračenja, jer prva dva snimanja su vršena kada je optičko pobuđivanje vršeno sa fleš lampom čiji je omotač od pireksnog stakla (i pražnjenje u kapilari), a drugo sa fleš lampom čiji je omotač od kvarcnog stakla.

Predmet daljih istraživanja u ovoj oblasti treba da bude, pro-nalaženje svih faktora koji utiču na spektralne karakteristike laserskog zračenja a koje teorija ne uzima u obzir.

2.3. Određivanje spektralne karakteristike fleš lampe

Zadatak ovog eksperimenta je određivanje spektralne karakteristike fleš lampe sa kvarcnim omotačem, kao i snimanje spektralne karakteristike ove lampe kada se oko kivete postavi pireksna cevčica (koja apsorbuje veliki deo UV zračenja).

Šematski prikaz aparature je dat na sl.24



Kao što se sa sl. 24 vidi, prozori se izvade iz laserskog sklopa, a u kivetu se postavi (do polovine kivete) aluminijumski valjak čiji je vrh iskošen pod uglom od 45° . Na taj način se svetlost fleš lampe usmerava ka spektrografu (sa rešetkom).

Kao i u prethodnom eksperimentu (glava 2.2.) od impulsa do impulsa vršeno je pomeranje rešetke spektrografa, a na foto-film je izvršeno snimanje impulsa. Prvo je izvršeno snimanje spektra fleš lampe od 2500 do 6000 Å, pri energiji od 45 J i kada je kiveta od kvarcnog stakla. Drugo snimanje izvršeno je kada se oko kivete nalazi cevčica od pireksnog stakla. Takođe je vršeno pomeranje rešetke spektrografa od 2500 do 6000 Å, pri energiji fleš lampe od 61,25 J.

Prilikom analize podataka uzeta je u obzir promena osjetljivosti fotomultiplikatora sa talasnom dužinom, a i obračunato je smanjenje intenziteta pri upotrebi neutralnih filtera.

Prikaz rezultata je dat u tabeli VI.

TABELA VI

TALASNA DUŽINA Å	KVARCNA CEV				PIREKSNA CEV			
	INTENZITET REL. JEDINICE NA 1,5 μSEC	PROPUST. FILTERA	OSETLJIV. FOTO- MULTIPL.	INTENZITET (KORIGOVANI) REL.JED.	INTENZITET REL. JEDIN. NA 1,5 μSEC	PROPUSTLJ. FILTERA	OSETLJIVOST FOTO-MULT.	INTENZITET (KORIGOVANI) REL. JEDINICE
2500	4,5	1	0,92	4,9	5,0	1	0,92	5,4
2600	13,5	1	0,73	18,5	12,0	1	0,73	16,4
2700	8,5	1	0,89	12,3	8,0	1	0,89	11,6
2800	15,5	1	0,70	22,1	14,0	1	0,70	20,0
2900	11,0	1	0,68	16,1	6,5	1	0,68	9,5
3000	12,0	1	0,77	15,6	11,0	1	0,77	14,3
3100	21,0	1	0,88	23,8	17,5	1	0,88	20,1
3200	9,5	1	0,95	10,0	12,5	1	0,95	13,2
3300	7,5	1	0,96	7,8	11,5	1	0,96	12,0
3400	7,5	1	0,97	7,7	11,5	1	0,97	11,8
3500	11,5	1	1,00	11,5	15,5	1	1,00	15,5
3600	11,0	1	0,98	11,1	11,5	1	0,98	11,7
3700	12,0	1	0,94	12,8	15,0	1	0,94	15,9
3800	15,5	1	0,97	16,0	23,0	1	0,97	23,7
3900	19,0	1	0,94	20,2	24,5	1	0,94	26,1
4000	25,0	1	0,95	26,4	35,0	1	0,95	36,8
4100	33,0	1	0,92	35,8	24,0	1	0,92	45,6
4200	25,0	0,5	0,95	51,4	8,0	0,12	0,95	70,5
4300	17,0	0,5	0,97	35,1	16,5	0,5	0,97	34,0
4400	29,0	0,5	0,93	62,2	8,0	0,12	0,93	71,5
4500	16,0	0,5	0,92	34,7	4,5	0,12	0,92	40,5
4600	16,0	0,12	0,88	152,5	17,5	0,12	0,88	164,0
4700	25,0	1	0,77	32,5	5,0	0,12	0,77	74,0
4800	18,0	1	0,69	26,1	14,0	1	0,69	20,2
4900	19,0	1	0,65	29,2	16,5	1	0,65	25,4
5000	14,5	1	0,59	24,6	18,5	1	0,59	34,4
5100	16,5	1	0,50	33,0	17,0	1	0,50	34,0
5200	15,0	1	0,44	34,1	15,5	1	0,44	35,2
5300	14,0	1	0,37	37,8	16,0	1	0,37	43,2
5400	8,5	1	0,30	28,3	9,5	1	0,30	34,6
5500	6,0	1	0,24	25,0	7,0	1	0,24	29,2
5600	5,5	1	0,19	29,0	3,0	1	0,19	15,7
5700	5,0	1	0,14	35,6	3,0	1	0,14	21,5
5800	2,0	1	0,11	18,2	2,0	1	0,11	18,2
5900	2,5	1	0,08	31,2	3,5	1	0,08	43,6
6000	3,0	1	0,06	50,0	1,0	1	0,06	16,7

----- PIRESNA CEV [61,25 JJ]

----- KVARCNA CEV [45 JJ]

NA 1,5 μS



Korišćenjem pireksne cevčice ukupni intenzitet fleš lampe se smanjuje usled apsorpcije UV zračenja. Kada se poveća energija (kada je upotrebljena pireksna cevčica) fleš lampe na 61,25 J površine ispod krivih, bivaju podjednake ($S_{\text{pir}} = 214 \text{ pod}$, $S_{\text{kvc}} = 196 \text{ pod}$; mereno planimetrom).

2.4. Promena intenziteta fleš lampe pri promeni energije napajanja

Zadatak ovog eksperimenta je da se odredi promena intenziteta fleš lampe usled promene energije kojom se napaja.

Snimanje intenziteta fleš lampe vrši se integralno pomoću foto-diode, sa koje se foto-električni impuls vodi na osciloskop. Ovi impulsi su snimani na foto-film.

Čematski prikaz aparature, korišćene u ovom eksperimentu, je dat na sl. 26 :

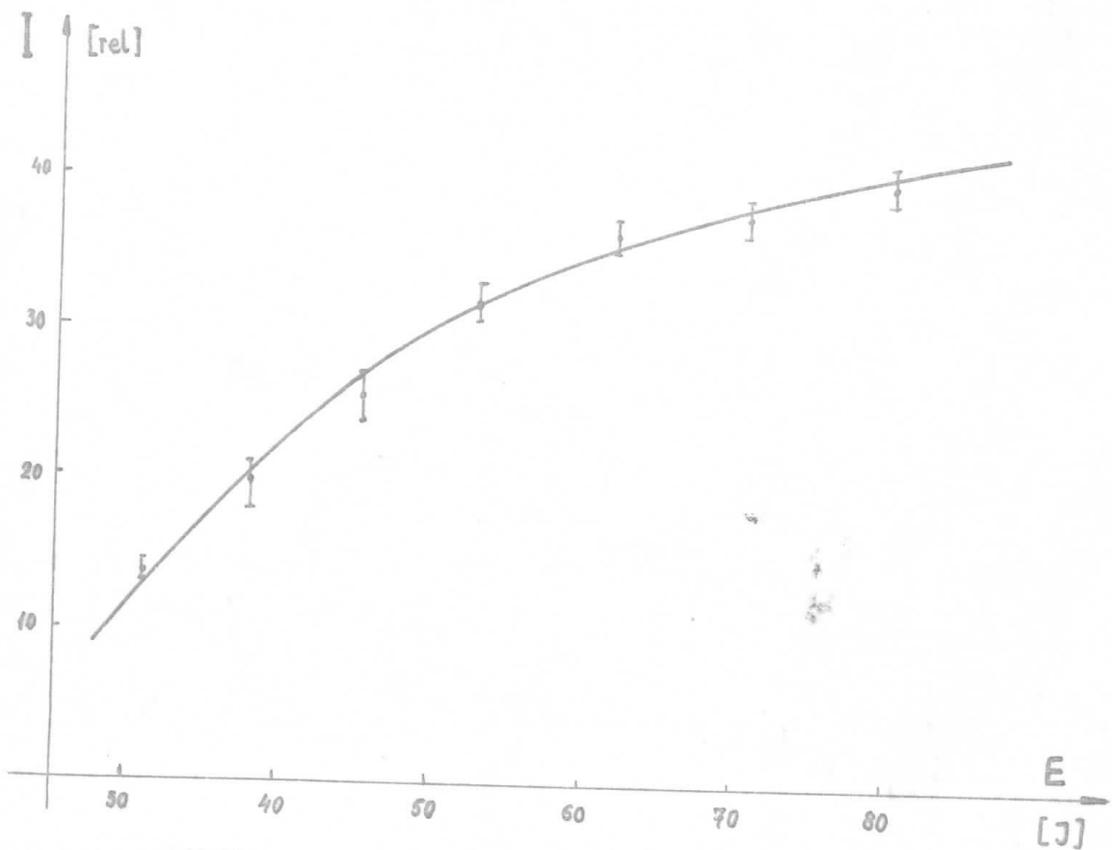


sl.26

Rezultati merenja su prikazani u tabeli VII

ENERGIJA J	INTENZITET REL. JEDINICE NA 1 SEC	PROPUSLJIV. FILTERA	KORIGOVANI INTENZITET REL. JEDINICE
31,25	13,5	1	13,5
37,75	20,0	1	20,0
45,00	25,5	1	25,5
52,75	32,0	1	32,0
61,25	36,5	1	36,5
70,50	40,5	0,5	37,0
80,00	40,0	0,5	40,0

Na osnovu podataka iz tabele VII može se nacrtati grafik (sl.27)



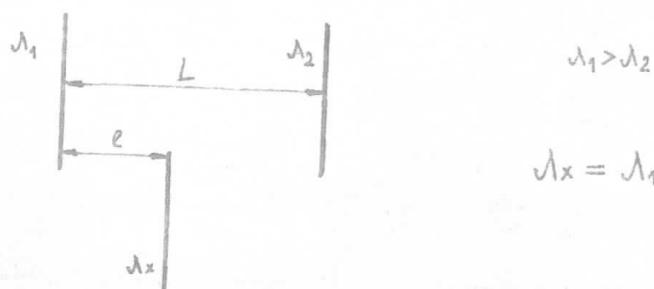
sl.27 zavisnost intenziteta fleš lampe od energije njenog napajanja

2.5. Pomeranje talasne dužine laserske emisije usled promene koncentracije rastvora i vrste rastvarača

Zadatak ovog eksperimenta je da se snimi pomeranje talasne dužine laserskog zračenja usled promene koncentracije rastvora i vrste rastvarača.

Spektar laserskog zračenja se snima integralno na foto-ploču, a kao referentni spektar korišćen je spektar gvođa. U tabeli VIII sredeni su podaci dobijeni prilikom analize spektra sa foto-ploče.

Određivanje talasne dužine nepoznate linije vrši se pomoću poznate formule :



$$\lambda_x = \lambda_1 - (\lambda_1 - \lambda_2) \frac{e}{L}$$

Tabela VIII

λ_1 [Å]	REL. POLOŽAJ λ_1	λ_2 [Å]	REL. POLOŽAJ λ_2	REL. POLOŽAJ λ_x	L	ℓ	λ_x [Å]	KONCENTRACIJA RASTVORA
5983,705	45967	5935,358 5976,799	49486	48304	3519	2337	5978,64	
5909,983	82675	5902,527	86635	86144	3960	3469	5903,451	5×10^{-5} (M) U ETIL ALKOHOLU
6007,966								
6008,576	38960	6003,034	40437	40231	1477	1271	6003,765	1×10^{-4} (M) U ETIL ALKOHOLU
5930,186	68545	5914,482	76610	72453	8065	3908	5922,431	
6027,069	32175	6024,063 5951,362	33180	32753	1005	578	6025,345	
5956,708	52302	5952,740	54945	54130	2643	1828	5953,739	2×10^{-4} (M) U ETIL ALKOHOLU
6065,487	38583	6056,001	40040	38712	1457	129	6064,648	
5997,805	53518	5987,055	56679	56107	3361	2789	5988,885	4×10^{-4} (M) U ETIL ALKOHOLU
5940,968	59803	5934,680	62027	64130	2144	1247	5937,341	
5859,197	88483	5056,081	91047	88978	2564	495	5858,929	5×10^{-5} (M) U METIL ALKOHOLU
6024,063	33180	6020,047 6020,179	34983	33463	1803	283	6023,444	
5949,375	55930	5940,968	59883	56610	3953	680	5947,929	3×10^{-4} (M) U METIL ALKOHOLU
6065,487	45420	6056,001	47769	45868	2349	448	6063,678	
5997,805	62607	5987,055	65855	64000	3248	1393	5993,495	6×10^{-4} (M) U METIL ALKOHOLU

Grafički prikaz rezultata dat je na sl. 28 :

$6 \cdot 10^{-4}$ M (MET) R66

$3 \cdot 10^{-4}$ M (MET) R66

$5 \cdot 10^{-5}$ M (MET) R66

$4 \cdot 10^{-4}$ M (ET) R66

$2 \cdot 10^{-4}$ M (ET) R66

$4 \cdot 10^{-4}$ M (ET) R66

$5 \cdot 10^{-5}$ M (ET) R66

5900

6000

6100

A
[Å]

2.6. Promena spektralne širine laserske emisije usled promene energije fleš lampe

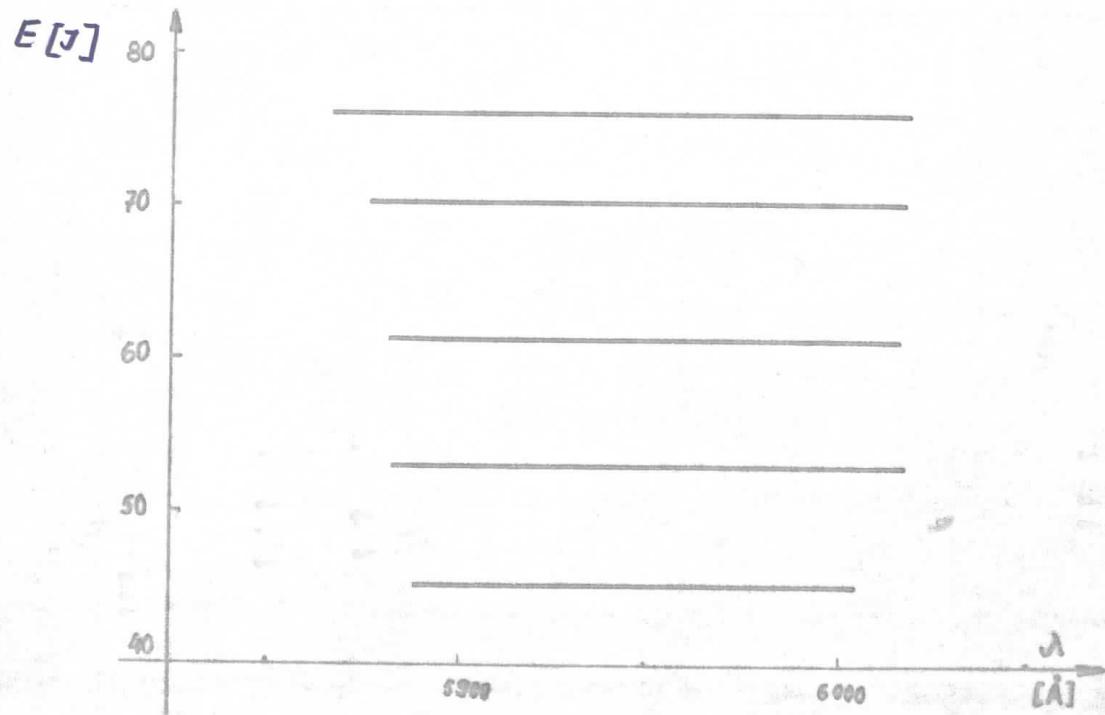
Zadatak ovog eksperimenta je da se odredi da li postoji promena u spektralnoj širini laserske emisije usled promene energije fleš lampe.

Spektar laserske emisije sniman je kao i u prethodnom (u glavi 2.5.) eksperimentu, na foto-ploču. Referentni spektar je opet bio spektar gvožđa. Koncentracija rastvora rodamina 6G u etil alkoholu je bila 1×10^{-4} (M).

Podaci, prilikom analiziranja spektra sređeni su u tabeli IX i grafički predstavljeni na sl. 29.

Tabela IX

E [J]	$\lambda_1 [\text{\AA}]$	REL. POLOŽAJ λ_1	$\lambda_2 [\text{\AA}]$	REL. POLOŽAJ λ_2	REL. POLOŽAJ λ_x	L	ℓ	$\lambda_x [\text{\AA}]$	$\Delta\lambda [\text{\AA}]$
45	6007,966 6008,576 5902,527	22760 53696	6003,034 5883,848	23980 60131	23540 58975	1220 6435	780 5279	6004,923 5887,204	117,719
53	6020,047 6020,479 5883,848	19840 60131	6007,966 5879,994	22760 62462	20535 6173	2920 2331	695 1042	6017,295 5882,125	135,17
61,4	6020,047 6020,479 5883,848	19840 60131	6007,966 5879,994	22760 62462	21437 61710	2920 2331	1297 1579	6014,854 5881,237	433,017
70,3	6020,047 6020,479 5878,002	19840 62936	6007,966 5872,912	22760 64928	20510 63410	2920 1932	670 414	6017,396 5876,911	440,485
76,3	6020,047 6020,479 5871,039	19840 66228	6007,966 5862,363	22760 70580	20455 68471	2920 4352	615 2243	6017,619 5866,568	151,051

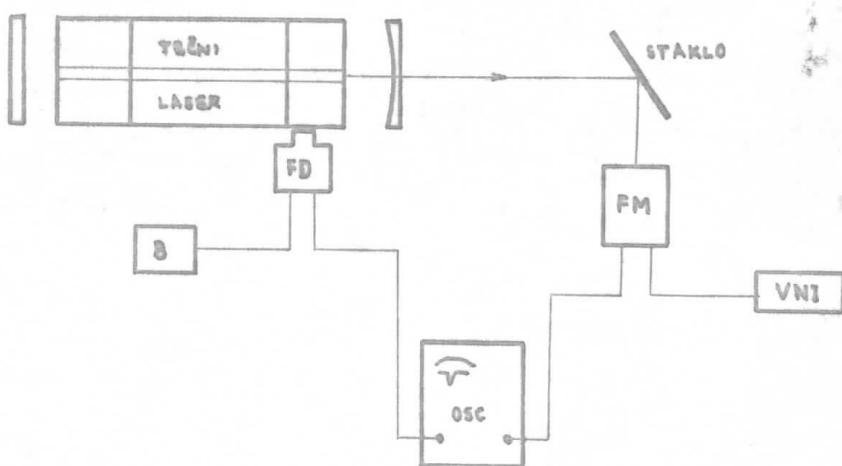


Spektralno širenje laserskog zračenja pri povećanju energije fleš lampe se zapaža na osnovu grafika na sl. 29, međutim, ova promena nije velika.

2.7. Promena vremena trajanja laserskog impulsa pri promeni energije fleš lampe

Iz grafika na slikama 20 ; 21 ; 22 i 23 može se zapaziti da vreme trajanja laserske emisije nije isto za sve slučajevе. Ovim eksperimentom želi se ispitati da li promena energije optičkog pobuđivanja utiče na dužinu trajanja laserske emisije, pri stalnoj koncentraciji rodamina 6G u etil alkoholu (1×10^{-4} M).

Šematski prikaz aparature dat je na slici 30 :



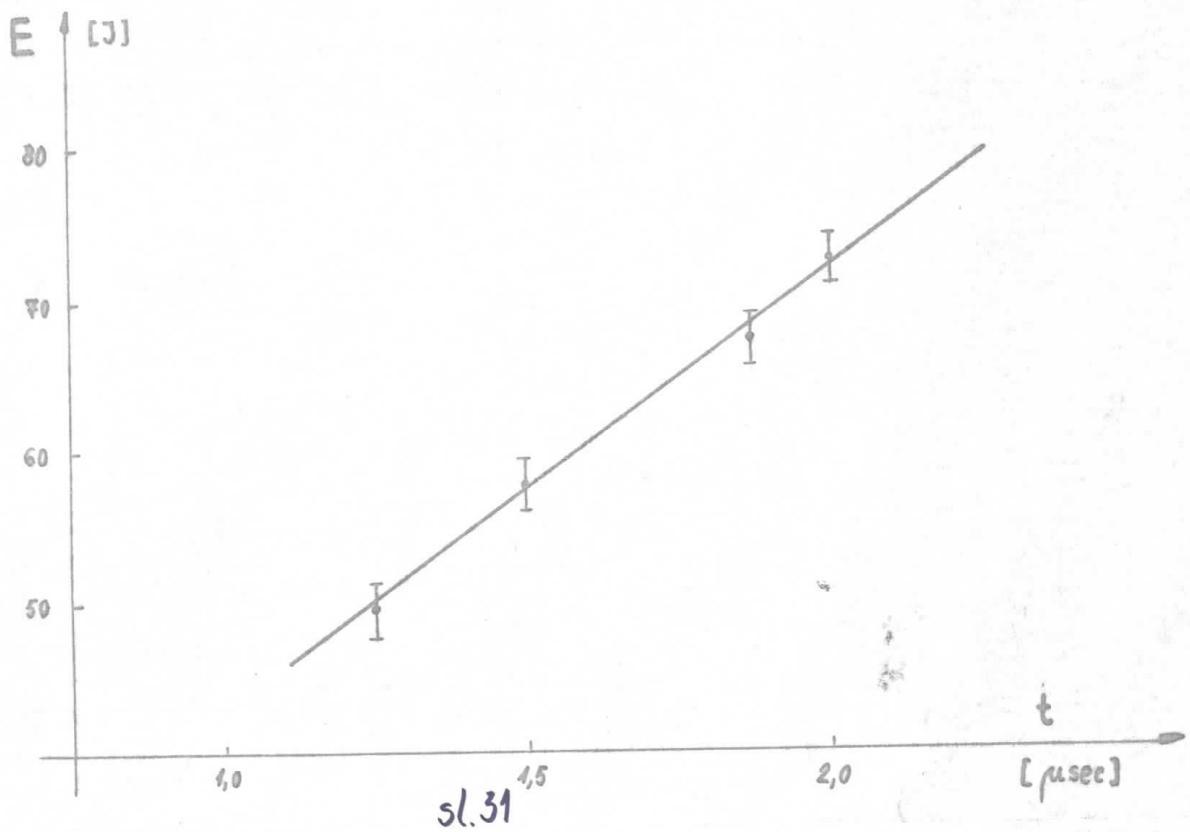
sl. 30

Foto-električni signali iz diode služe kao merilo reproducibilnosti fleš lampe na pojedinim energijama, jer foto-dioda vrši integralno snimanje intenziteta fleš lampe. Foto-multiplikator vrši integralno snimanje intenziteta i vremena trajanja laserskog zračenja. Vremenska baza na osciloskopu je $0,5 \mu\text{sec}/\text{cm}$. Snimanje foto-električnih impulsa sa osciloskopa je vršeno na foto-film.

Posle izvršene analize, podaci su sređeni u tabelu X .

E [J]	DUŽINA IMPULSA [cm]	VREM. BA- ZA [μsec/cm]	VREME TR. IMPULSA [μsec]
49,75	2,5	0,5	1,25
57,75	3,0	0,5	1,50
66,75	3,75	0,5	1,875
72,25	4,0	0,5	2,00

Rezultati iz tabele X mogu se grafički predstaviti (sl. 31) :



Na osnovu prikazanih rezultata jasno se nameće zaključak da vreme trajanja laserske emisije linearno raste sa porastom energije optičkog pobuđivanja, pri stalnoj koncentraciji rastvora.

2.8. Određivanje kritične inverzne naseljenosti singletnog stanja i naseljenosti tripletnog stanja

Zadatak ovog eksperimenta je da se odredе vrednosti za N_s^c i N_T .

Postupak određivanja N_s^c i N_T je opisan u poglavljju 1.3.2. Veličine koje figurišu u izrazima 10 i 11 su (15) : $t = 7,3 \times 10^{-9}$ sec; $\gamma = 1,36242$; $r_1 \approx r_2 = 0,99$ kao i vrednosti $E(\lambda)$; $\epsilon_{ss}(\lambda)$ i $\epsilon_{rr}(\lambda)$ sa grafika na slikama 5 ; 6 i 7. Ukupan broj molekula pri koncentraciji rođadima 6G u etil alkoholu 1×10^{-4} (M) je

$$N = \frac{N_A}{10^3} 10^{-4} = \frac{6,0247 \cdot 10^{23}}{10^3} 10^{-4} = 6,0247 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

Za tečni laser čiji je poprečni presek šupljine elipsa, kod koga su $L_1 = 8,0$ cm i $L_2 = 11,5$ cm može se uz poznavanje gornjih podataka izvršiti teorijska izračunavanja vrednosti za N_s^c , koristeći se izrazom 9. Izračunate vrednosti su sredjene u tabeli XI, a na osnovu njih slede grafici (sl.32 i 33).

TABELA XI

λ [Å]	$\lambda^4 \cdot 10^{-42}$ [cm^6]	$E(\lambda) \times 10^5$ [cm^{-1}]	$E_{SS}(\lambda) \times 10^{-18}$ [Einstein cm^{-2}]	$E_{II}(\lambda) \times 10^{-18}$ [cm^2]	$A(\lambda) \times 10^{-18}$ [cm^2]	$K_4 \cdot 10^{-3}$	$K_2 \cdot 10^{-3}$	$K_3 \cdot 10^{42}$
5700	4,056	4,386	3,065	4,45	368,969	8,306	3,753	3,407
5800	4,132	0,903	0,625	5,00	340,805	2,439	4,91	4,91
5820	4,147	0,818	0,465	5,10	235,026	1,978	20,359	5,35
5860	4,179	0,724	0,265	5,43	242,779	1245	24,274	5,90
5880	4,195	0,670	0,200	5,52	200,362	0,998	26,551	6,48
5900	4,212	0,619	0,165	5,62	187,722	0,879	29,058	6,69
5920	4,228	0,585	0,120	5,70	179,748	0,667	31,049	7,06
5940	4,245	0,534	0,100	5,75	166,301	0,601	33,972	7,57
5960	4,262	0,500	0,080	5,80	157,830	0,506	36,244	7,95
5980	4,278	0,474	0,060	5,85	150,544	0,388	38,460	8,35
6000	4,296	0,420	0,050	5,87	136,130	0,367	42,753	9,22
6020	4,314	0,403	0,045	5,90	132,430	0,339	44,242	9,49
6040	4,331	0,369	0,043	5,92	122,829	0,366	47,830	10,22
6060	4,348	0,335	0,040	5,94	112,935	0,354	52,242	11,43
6080	4,367	0,303	0,035	5,95	102,901	0,340	57,482	12,00
6100	4,375	0,288	0,025	5,96	98,859	0,253	60,04	12,72
6120	4,403	0,270	0,022	5,956	93,84	0,234	63,24	13,39
6140	4,421	0,234	0,019	5,956	82,40	0,231	72,05	15,25
6160	4,439	0,198	0,016	5,95	70,60	0,227	84,05	17,80
6180	4,459	0,180	0,013	5,94	65,04	0,199	94,13	19,32
6200	4,478	0,144	0,010	5,93	52,10	0,169	142,4	23,84
6220	4,497	0,107	0,007	5,92	43,30	0,161	136,3	28,97

TABELA XI

λ [Å]	$N_s \times 10^{-44}$ [cm $^{-3}$]	$N_t = 0\% N$	$N_t = 0.5\% N$	$4.0\% N$	$4.5\% N$	$5.0\% N$	$5.5\% N$	$6.0\% N$	$6.5\% N$	$7.0\% N$	$7.5\% N$	$8\% N$	$9\% N$	$10\% N$
5700	7,253	7,265	7,276	7,284	7,299	7,324	7,344	7,367	7,389	7,412	7,434	7,457	7,479	7,499
5800	7,169	7,221	7,274	7,327	7,379	7,485	7,579	7,965	2,801	2,906	2,632	2,754	3,011	3,221
5820	7,173	7,831	7,896	7,951	7,016	7,441	7,264	7,386	2,509	2,019	2,165	2,344	2,457	2,604
5860	7,141	7,244	7,287	7,361	7,934	7,579	7,726	7,872	1,730	1,890	2,050	2,209	2,367	2,529
5880	7,130	7,010	7,169	7,170	7,250	7,400	7,570	7,730	1,730	1,881	2,056	2,251	2,306	2,581
5900	7,080	7,830	7,918	7,005	7,095	7,480	7,355	7,530	1,706	1,706	1,706	1,706	1,706	2,571
5920	7,050	7,344	7,827	7,931	7,024	7,212	7,399	7,399	1,586	1,773	1,959	2,147	2,334	2,645
5940	7,030	7,000	7,803	7,905	7,007	7,212	7,447	7,621	1,826	2,034	2,235	2,440	2,440	2,703
5960	7,019	7,628	7,738	7,847	7,956	7,174	7,393	7,611	1,829	2,048	2,266	2,484	2,484	2,746
5980	7,015	7,429	7,661	7,777	7,892	7,424	7,356	7,588	1,819	2,051	2,283	2,515	2,515	2,746
6000	7,014	7,539	7,797	7,926	7,984	7,442	7,699	7,956	1,699	1,826	2,047	2,268	2,447	2,987
6020	7,039	7,523	7,656	7,789	7,922	7,455	7,721	7,988	1,721	1,988	2,254	2,520	2,727	3,053
6040	7,020	7,564	7,708	7,852	7,937	7,285	7,573	7,861	1,861	2,149	2,437	2,725	3,014	3,302
6060	7,048	7,576	7,733	7,948	7,963	7,678	7,993	7,993	2,307	2,622	2,934	3,252	3,566	3,878
6080	7,045	7,588	7,762	7,934	7,988	7,455	7,721	7,988	2,493	2,839	3,186	3,532	3,895	3,965
6100	7,034	7,547	7,708	7,852	7,937	7,678	7,993	7,993	2,307	2,622	2,934	3,252	3,566	3,878
6120	7,033	7,531	7,733	7,948	7,963	7,678	7,993	7,993	2,493	2,839	3,186	3,532	3,895	3,965
6140	7,035	7,553	7,569	7,762	7,934	7,455	7,721	7,988	2,493	2,839	3,186	3,532	3,895	3,965
6160	7,035	7,566	7,628	7,881	7,937	7,678	7,993	7,993	2,307	2,622	2,934	3,252	3,566	3,878
6180	7,036	7,546	7,695	7,858	7,949	7,664	7,964	7,964	2,493	2,839	3,186	3,532	3,895	3,965
6200	7,037	7,429	7,811	7,937	7,962	7,751	7,993	7,993	2,307	2,622	2,934	3,252	3,566	3,878
6220	7,037	7,429	7,841	7,951	7,982	7,751	7,993	7,993	2,493	2,839	3,186	3,532	3,895	3,965

$N_{\text{c}}^{\text{c}} \cdot 10^{14}$

9
8
7
6
5
4
3
2
1

$N = 10\%$

9%

8%

7%

6%

5%

4%

3%

2%

4,5%

4,0%

0,5%

0%

5700

5800

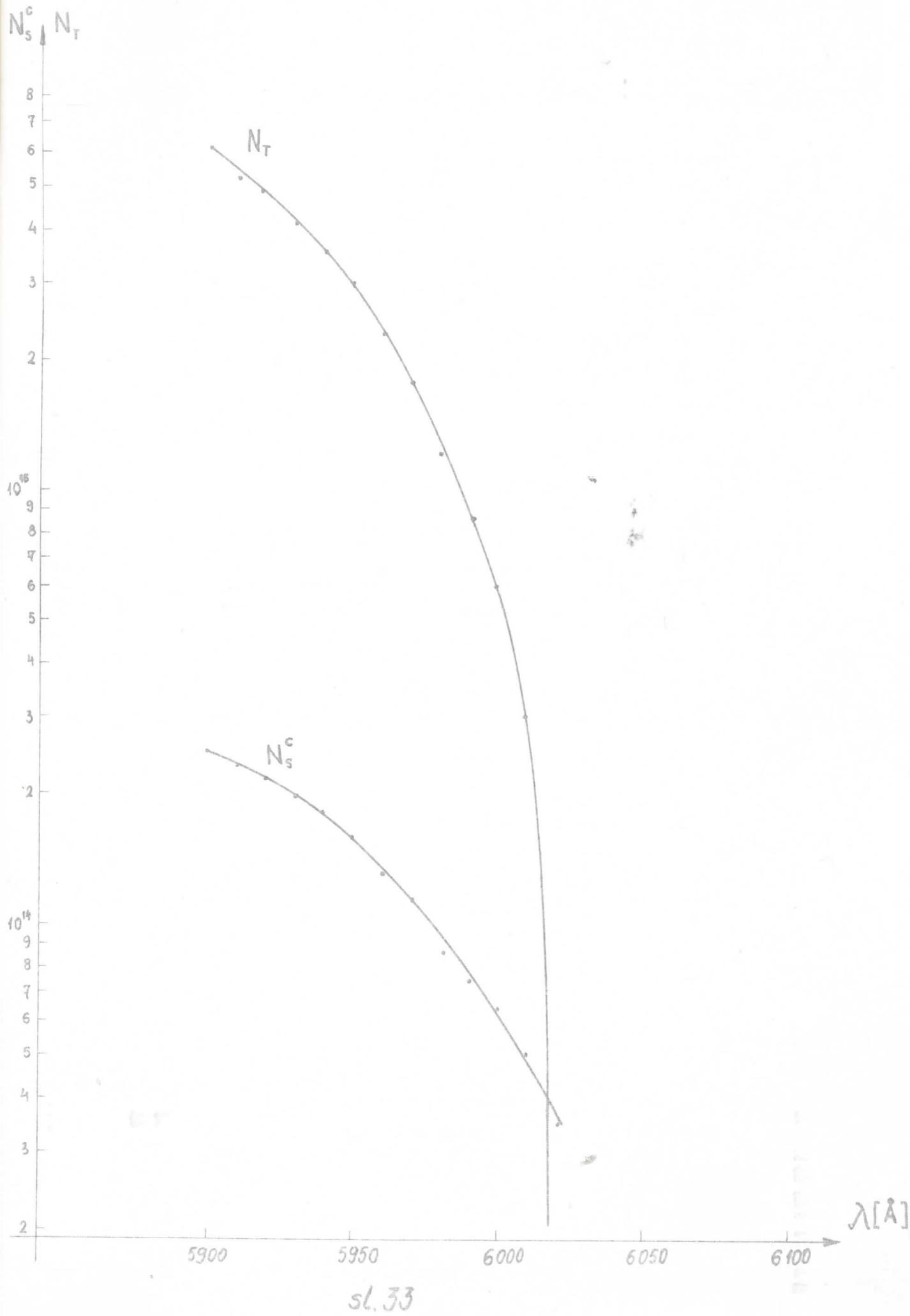
5900

6000

6100

6200

λ [Å]



Eksperimentalno je utvrđeno da za tečni laser, sa poprečnim presekom šupljine u obliku elipse, pri koncentraciji R-6G 1×10^{-4} (M) u etil alkoholu, maksimum intenziteta laserskog zračenja je na 5960 \AA (sl.22), a na osnovu eksperimenta 2.6. zapaža se da nema značajnije promene u spektralnoj širini laserske emisije usled promene energije pobuđivanja, pa prema tome talasna dužina maksimuma intenziteta zračenja lasera ne zavisi od energije pobuđivanja. Koristeći ovaj eksperimentalni podatak i na osnovu grafika (sl.33) određuju se vrednosti za kritičnu inverznu naseljenost singletnog stanja : $N_S^c = 1,32 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ i naseleđenost tripletnog stanja : $N_T = 2,41 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Na osnovu ovih rezultata može se zapaziti da je inverzna naseljenost singletnog stanja na kojoj se javlja laserska emisija za jedan red veličine manja od naseljenosti tripletnog stanja.

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih u opisanim eksperimentima, može se zaključiti sledeće :

-grafici na slikama 22 i 23 pokazuju da postoje dva maksimuma intenziteta laserske emisije i fina struktura spektra laserske emisije. Ovo nije u skladu sa teorijskim postavkama (41) i grafika 4. Na osnovu grafika na slikama 20 ; 21 i 22 ; 23 može se zaključiti da spektralna karakteristika fleš lampe utiče na spektralnu karakteristiku laserske emisije, jer prva dva snimanja i druga dva su rađena sa dva različita tipa fleš lampi.

-korишћenjem pireksne cevčice ukupni intenzitet fleš lampe se smanjuje usled apsorpcije UV zračenja. Kada se poveća energija fleš lampe (na 61,25 J) ukupni intenziteti (površine ispod krivih) se izjednačavaju .

-povećanjem koncentracije rastvora rodamina 6G, talasna dužina laserskog zračenja se pomera ka većim vrednostima. Takođe, promena vrste rastvarača utiče na promenu talasne dužine emisije lasera. Pri istoj koncentraciji, kada je rastvarač etil alkohol talasna dužina laserske emisije ima veću vrednost nego kad je rastvarač metil alkohol.

-promena energije fleš lampe ne utiče značajnije na spektralnu širinu laserskog zračenja pri koncentraciji $1 \cdot 10^{-4}$ (M) rastvora rodamina 6G u etil alkoholu (**U INTERVALU ENERGIJE OD 45 DO 80 J**)

-porast energije fleš lampe ima posledicu, porast vremena trajanja laserske emisije. Ova zavisnost je linearna.

-za tečni laser, čiji je poprečni presek šupljine elipsa i pri koncentraciji rastvora rodamina 6G u etil alkoholu $1 \cdot 10^{-4}$ (M), kritična inverzna naseljenost singletnog stanja iznosi $1,3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ i naseljenost tripletnog stanja iznosi $2,41 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Na osnovu ovih rezultata zapaža se da je inverzna naseljenost singletnog stanja na kojoj se javlja laserska emisija za jedan red veličine manja od naseljenosti tripletnog stanja.

L I T E R A T U R A

- (1) E. G. Brock, P. Czavinsky, E. Hormets, H. C. Nedderman, D. Sti-rpe, F. Unterleitner, J. Chem. Phys. vol.35, 759-760, (1961).
- (2) S.G. Rautian, J.I. Sobelmann, Opt. Spectry. vol 10, 65-66, (1961).
- (3) P.P. Sorokin, J.R. Lankard, J.Res. Develop., vol 10, 162-163, (1966).
- (4) EP. Sorokin, W.H. Culver, E.C. Hammond, J.R. Lankard, J. Res. Develop., vol 10, 401, (1966).
- (5) F.P. Schäfer, W. Schmidt, J. Volze, Appl. Phys. Lett. vol 9, 308 (1966).
- (6) M.L. Spaeth, D.P. Portfield, Appl. Phys. Lett., vol 9, 180, (1966).
- (7) P.P. Sorokin, J.R. Lankard, E.C. Hammond, V.L. Moruzzi, J. Res. Develop., vol 11, 132, (1967).
- (8) C.V. Shank, A. Dienes, A.M. Trozzolo, J.A. Myer, Appl. Phys. Letters vol 16, № 10, 405, (1970).
- (9) N. Röhr, Z. Phys 228, 465, (1969).
- (10) B.I. Stepanov, A.N. Rubimov, UFN 95, 45, (1968).
- (11) F.P. Schäfer, W. Schmidt, K. Marth, Phys Lett. 24A, 280, (1967).
- (12) N. i R. Konjević, Lj. Ćirković, V Kongres na matematičarite fizičarite i astronomite na Jugoslavija. „Zbornik na trudovite“ Tom II, 436, (1973). Skopje.
- (13) M. Bass, T. Deič, M. Veber, Uspehi fizičeskih nauk, Tom 105, vip. 3. 251, (1971).
- (14) O.N. Witt, J. Chem. Cos. (London), (1876).
- (15) B.B. Snavely, Proc. IEEE 57, 1374, (1969).
- (16) M.J. Veber, M. Bass, IEEE J. Quantum Electron. 5, 175, (1965).
- (17) T.F. Deutsch, M. Bass, IEEE J. Quantum Electron. QE-5, 260, (1969).
- (18) A. Jablonski, Zs. Phys. 94, 38, (1935).
- (19) S. Claesson, L. Lindqvist, Arkiv Kemi, vol 12, 1, (1958).
- (20) W. Schmidt, F.P. Schäfer, Zs. Naturforsch, 22a, 1563, (1967).
- (21) H.W. Furumonto, H. Ceccon. Appl. Opt. 8, 1613, (1969).
- (22) A.V. Aristov, J.S. Masljakov, Optika i spektroskopija, 24, 835, (1968).
- (23) C.M. Ferrar, Rev. Sci. Instr. 43, 497, (1972).
- (24) R. Konjević, N. Konjević, Fizika, vol 5, № 1, 49, (1973).
- (25) B.B. Snavely, E.P. Schäfer, Phys. Lett. 28A, 728, (1969).
- (26) J.B. Marling, D.W. Gregg, S.J. Thomes, IEEE J. Quantum Electron. September, 570, (1970).
- (27) R.A. Keller, IEEE J. Quantum Electron. QE-6, № 7, 411, (1970).

- (28) O.G. Peterson, S. Tuccio, E.B. Snavely, Appl. Phys. Lett 17, 245, (1970).
- (29) R. Konjević, J. Jovičić, N. Konjević, Lj. Ćirković, Fizika, vol 5, № 1, 17, (1973).
- (30) M. Bass, T.F. Deutsch, M.J. Weber, Appl. Phys. Lett. 13, 120 (1968).
- (31) S. Murakava, G. Yamaguchi, C. Yamanaka, Japan, J. Appl. Phys. 7, 681, (1968).
- (32) B.N. Soffer, B.B. McFarland, Appl. Phys. Lett 10, 266, (1967).
- (33) E.D. McAlister, Smithsonian Miscellaneous Collections, 93, 178, (1935).
- (34) Lj. Ćirković, J. Jovičić, Fizika, vol 5, № 1, 53, (1973).
- (35) G. Yamaguchi, S. Murakava, H. Tanaka, C. Yamanaka, Japan, J. Appl. Phys. 8, 1265, (1969).
- (36) R. Konjević, N. Konjević, u Štampi
- (37) A.J. Gibson, J. Scien. Instrum. vol 2, 802, (1969).
- (38) P.P. Sorokin, J.R. Lankard, J. Chem. Phys. 51, 2969, (1969).
- (39) P.P. Sorokin, J.R. Lankard, Phys. rev. 186, 342, (1969).
- (40) A.J. Alcock, C. De Michelis, M.C. Richardson, Appl. Phys. Lett. 15, 72, (1969).
- (41) J.B. Atkinson, F.P. Face, IEEE J. Quantum Electronics, 572, (1973).

