

D-170

Природно-математички факултет
Радна заједница заједничких послова
НОВИ САД

Пријемач: 7 XII. 1979			
Орг. јед.	Број	Пријемач	Вредност
03	10/108		

=====

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ

A Z O T N I (N_2) L A S E R

- дипломски рад -

KANDIDAT
VERA R. STOJKOV

Novi Sad, 1979.

=====



Temu za ovaj diplomski rad predložio
je profesor doktor Ivan Janić.

Sva posmatranja izvršena su u labora-
toriji Instituta za fiziku.

Najtoplije se zahvaljujem profesoru
doktoru Ivanu Janiću, na velikoj
podršci, pomoći i savetima koje mi
je davao u toku izrade ovog rada.

S A D R Ž A J

Strana

UVOD

1.1. Spontana emisija, apsorpcija i stimulisana emisija	2
1. 2. Kvantni generatori	3
1. 3. Podela lasera	5
2. 1. Gasni laseri	5
2. 2. Elektronska stanja dvoatomskih molekula	6

N₂ LASER

3.1.1. N ₂ laser	9
3.1.2. Pobudjivanje molekula N ₂	22
3.2. Termiska šema molekula azota	25
3.3. Osobine izlaznog snopa zračenja.	27

UPOTREBA AZOTNOG LASERA

4. 1. Azotni laser kao optička pumpa	31
4.1.1. Fluorescencija	31
4.1.2. N ₂ laser kao optička pumpa	33
4. 2. Azotni laser kao izvor radijacije za Ramanovu spektroskopiju	37
Literatura	41

UVOD

Laser ("Light Amplification by stimulated Emision of Radiation"), veće je gotovo dve decenije stvarnost, deo sadašnjosti i budućnosti. Još je 1917. godine Ajnštajn, proučavajući ravnotežu izmedju atomskih sistema i njihovog zračenja, predskazao pojavu pojačanja elektromagnetnih oscilacija pomoću prinudnog indukovanog zračenja atoma i molekula. Međutim, tek 1953. godine Basov i Prohorov (SSSR), Townes i Schawlov (SAD) postavljaju teorijske osnove lasera, a 1960. godine T. Mejman konstruiše prvi laser (rubinski). Godinu dana kasnije realizovani su laseri kod kojih se kao radna supstanca koriste gasovi. Veoma značajnu ulogu poslednjih godina imaju i poluprovodnički generatori svetlosti.

Danas se u svojstvu aktivnih supstanci lasera koriste najrazličitiji materijali - kristali, aktivna stakla, plastične mase, gasovi, tečnosti, poluprovodnici...

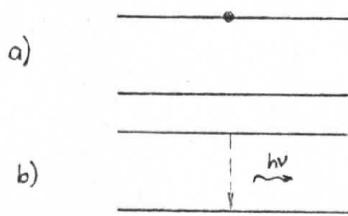
Dijapazon postojećih optičkih kvantnih generatora kreće se od ultraljubičastog zračenja ($\lambda \sim 0.3\mu\text{m}$) do infracrvenog zračenja ($\lambda \sim 300\mu\text{m}$). Ovo zračenje je koherentno, monohromatsko, prostire se u vrlo uskom snopu i karakteriše izvanrednom koncentracijom energije. Sve to pruža velike mogućnosti za svestranu upotrebu lasera.



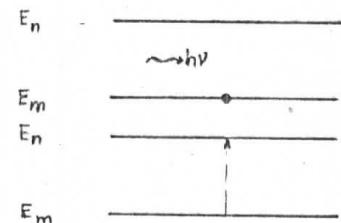
1.1. Spontana emisija, apsorpcija i stimulisana emisija

Atomski sistemi (atomi, joni, molekuli) mogu postojati samo u izvesnim stacionarnim stanjima, koja su okarakterisana kvantnim brojevima i opisana sopstvenim funkcijama (rešenja Šredingerove jednačine). Prelaz izmedju stacionarnih stanja može se dogoditi uz proces emisije ili apsorpcije fontona, čija je energija $h\nu = E_n - E_m$, gde su E_n i E_m energije stanja izmedju kojih se prelaz javlja.

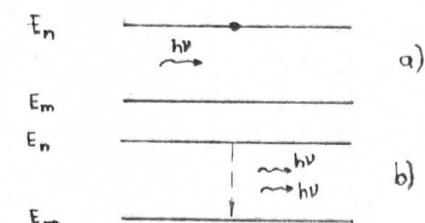
Stanje sistema sa najnižom energijom naziva se osnovno stanje, a svako drugo je pobudjeno stanje. U osnovnom stanju atomski sistem može samo apsorbovati energiju, a u pobudjenom stanju može i apsorbovati i emitovati energiju.



slika 1.



slika 2.



slika 3.

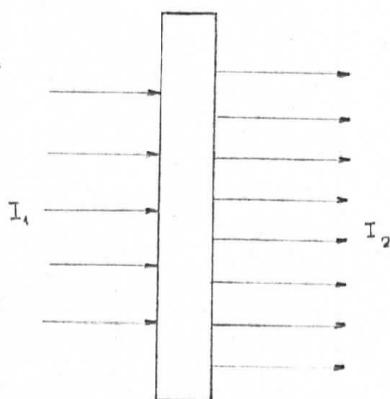
Ako se atomski sistem nalazi u pobudjenom stanju, emisijom fotona, bez spoljašnjeg uticaja, on može smanjiti svoju energiju. Takav proces, prikazan na slici 1a, 1b, naziva se spontana emisija. Spontani prelazi se javljaju samo u jednom pravcu, sa viših na niže energijske nivoe. Intenzitet, faza i pravac prostiranja spontano emitovanih fotona ne zavisi od spoljašnjeg zračenja. Na slici 2a,b prikazana je apsorpcija fotona (prelaz atomskog sistema sa nižeg (E_m) na viši energetski nivo (E_n)).

Ako se prelaz izmedju dvaju energetskih nivoa $E_n; E_m$ ($E_n > E_m$) vrši pod dejstvom spoljašnjeg elektromagnetskog zračenja odredjene frekvencije, radi se o tzv. stimulisanoj (indukovanom) zračenju.

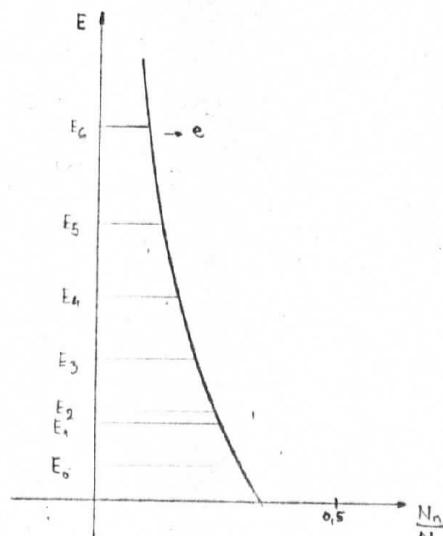
Naime, atomski sistem može emitovati foton pre vremena u kojem bi inače spontano emitovao, ako se u njegovoј blizini nadje drugi foton, koji ima istu frekvenciju kao i foton koji bi atomski sistem spontano emitovao. Na taj način se, prelaskom atomskog sistema sa višeg na niži energetski nivo, emituje foton energije $\hbar\nu = E_n - E_m$, ($E_n > E_m$), dodatno fotonu pod čijim je dejstvom prelaz izvršen. Stimulacijom emitovani foton ima istu fazu oscilacije, istu talasnu dužinu i isti pravac prostiranja^{ravnan polarnost je} kao i foton spoljšnjeg zračenja, koji izaziva stimulisanu emisiju.

1.2. Kvantni generatori

Da bi fotoni spoljašnjeg zračenja mogli da izvrše stimulaciju emisije, oni moraju da prolaze kroz neku sredinu (supstancu), pa se tada, pored stimulacije, vrši i apsorbcija. U normalnim uslovima je proces apsorbcije statistički mnogo češći od procesa stimulisanja emisije, koja tada ne dolazi do izražaja. Tek pod određenim uslovima će supstanca pojačavati zračenje frekvencije ν , koje kroz nju prolazi (slika 4). Kao prvo, atomi (joni ili molekuli) te supstance, u krajnjem slučaju, moraju imati dva nivoa energije E_n i E_m , tako da je $\hbar\nu = E_n - E_m$. Zatim, - mora biti postigнутa inverzna naseljenost, tj. broj atoma koji se nalaze u stanju sa većom energijom mora biti veći od broja atoma koji se nalaze u stanju sa manjom energijom. Naime, poznato je da se raspodela atoma po energetskim nivoima, ako ni jedan nivo nije degenerisan, u slučaju termodinamičke ravnoteže, može prikazati Boltmanovim zakonom $N_i = N_0 \exp(-\frac{E_i}{kT})$ (N_i - naseljenost i-tog nivoa), odakle se jasno vidi da su niži energetski nivoi naseljeniji od viših (slika 5.).



slika 4



slika 5

Odnos naseljenosti dva energetska nivoa E_n i E_m je tada:

$$\frac{N_n}{N_m} = \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT}\right)$$

, gde je $N_m > N_n$. Da bi atomi (joni, molekuli) mogli da pojačavaju zračenje koje prolazi kroz supstancu, mora se narušiti termodinamička ravnoteža, postizanjem inverzne naseljenosti ($N_m < N_n$). Treći uslov koji mora biti zadovoljen je da stimulisano zračenje aktivnih atoma ($N_n - N_m$) prevaziđe gubitke zračenja.

Ove uslove su u praksi ostvarili C.Townes i J. Gordon (1955. godine), za mikro talase ($1\text{cm} > \lambda > 1\mu\text{m}$) pomoću tzv. kvantnog generatora.

Kako radi kvantni generator? Radna supstanca se postavlja izmedju dva ogledala, koja čine tzv. optički rezonator. Jedno od ogledala je polupropustljivo. Pumpanjem (optičko, električno,...) se u supstanci postiže inverzna naseljenost. Pobudjeni atomi emituju zračenje u svim pravcima. Fotoni spontanog zračenja, emitovani u pravcu normalnom na ogledala, započinju stimulisanu emisiju, pa dolazi do njihovog kaskadnog umnožavanja, tj. do pojačavanja zračenja. Kada stignu do ogledala, fotoni se

odbijaju i proces pojačavanja se nastavlja. Deo zračenja prolazi kroz polupropustljivo ogledalo. Na taj način nastaje laserski snop velike snage i uredjenosti.

Prvi kvantni generator, kojim je postizana amplifikacija u području mikrotalasa na bazi stimulisane emisije - tzv. maser, konstituisan je 1956. godine. Ubrzo posle toga nastaje i "optički maser", kvantni generator koji radi u optičkom području spektra ($\lambda < 1 \mu\text{m}$) — laser.

1.3. Podela lasera

Danas je poznat veliki broj lasera, koji se među sobom razlikuju prema vrsti aktivne supstance, načinu njenog pobudjivanja ili prema načinu rada (kontinuirani, impulsni). Prema agregatskom stanju aktivne supstance, izvršena je podela na:

- gasne (He-Ne, Ar, CO₂-N₂, N₂, ...)
- tečne (organske boje)
- čvrste lasere (rubinski, poluprovodnički)

Pobudjivanje supstance zavisi najviše od stanja i vrste supstance, a može se vršiti:

1. optičkim pumpanjem (fleš lampa)
2. Pumpanjem sudarima prve vrste izmedju atoma (molekula, jona) i elektrona
3. Pumpanjem ozračivanjem snopovima čestica visoke energije
4. Pumpanjem hemijskim reakcijama.

2.1. Gasni laseri

Prvi gasni laser realizovali su Dr. Javan, Bennett, Herriott 1961. godine. To je bio laser neprekidnog rada sa smešom He-Ne.

U periodu od 1963. do 1964. godine otkriveno je mnoštvo laserskih prelaza u različitim gasnim sredinama, kako u impulsnom, tako i u neprekidnom režimu rada laserske cevi. Konstruisani su i drugi tipovi lasera, janski i molekulski, čije je usavršavanje omogućilo postizanje rekordnih snaga u neprekidnom režimu rada. Uz pomoć argonskog jonskog OKG u plavo-zelenoj oblasti spektra dobijene su snage koherentnog zračenja do 100W, dok su u radu s molekulskim OKG, koji koriste CO₂, u SAD dobijene izlazne snage reda veličine 10 KW.

Do danas konstruisane gasne lasere možemo podeliti u tri grupe:

1. atomski gasni laseri (He-Ne, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$)
2. jonski gasni laseri (Argonski)
3. molekulski gasni laseri (CO₂, N₂)

Pre nego što predjemo na posmatranje poslednjeg iz ove grupe, molekulskog gasnog lasera, kod kojeg se kao aktivna supstanca koristi azot, daćemo kratak prikaz elektronskih stanja dvoatomskih molekula.

2.2. Elektronska stanja dvoatomskih molekula

U molekulima se spoljašnji elektroni kreću u električnom polju oba jezgra. Zbog toga se može reći da elektronski nivoi molekula nastaju iz nivoa atoma koji obrazuju molekul, kao rezultat njihovog starkovog razlaganja, u električnom polju molekula. Ovo električno polje dvoatomskih molekula poseduje osnu simetriju (osa simetrije je prava koja spaja oba jezgra). Na taj način, u dvoatomskom molekulu postoji privilegovani pravac u odnosu na koji se orijentišu spoljašnji elektroni.

Svaki elektron u molekulu može se okarakterisati kvantnim brojevima n , l i λ (i spinским kvantnim brojem $\sigma = m_s = \pm \frac{1}{2}$). Elektroni sa jednakim vrednostima kvantnih brojeva n i l nazivaju se ekvivalentni elektroni. Prema Paulijevom principu, broj ekvivalentnih elektrona ne može da bude veći od dva za $\lambda = 0$ i 4 za $\lambda \neq 0$. Pri tome, dva ekvivalentna σ ili četiri λ elektrona, obrazuju zatvorenu elektronsku podgrupu, koja je okarakterisana vrednostima $\Lambda = \sum \lambda_i = 0$ i $S=0$. Dakle, elektronski omotač molekula, (slično kao kod atoma) je izgradjen od diskretnih grupa i podgrupa koje sadrže odredjeni broj elektrona. Elektronska konfiguracija molekula i njegova energetska stanja odredjeni su nizom molekulskih orbita, tj. skupom kvantnih brojeva svih elektrona u molekulu.

Stanje elektronske ljske je okarakterisano spinским (S) i orbitalnim (L) momentom ~~kolim~~impulsa etanja. Multiplicitet stanja, tj. broj energetskih nivoa na koje se ono rascepi u spoljašnjem polju, odredjen je spinским kvantnim brojem $g = 2S+1$. Stanja sa $S=0$ su singletna, $S=1/2$ dubletna, $S=1$ tripletna. Projekcija orbitalnog momenta impulsa (\vec{L}) na osu molekula (osa kvantizacije), $\Lambda = \sum \lambda_i$ može imati vrednosti $\Lambda = 0, 1, 2, 3, \dots$, a odgovarajući termovi se obeležavaju spektroskopskim simbolima:
 $\Sigma, \Pi, \Delta, \Phi, \dots$

Pored ovoga, za opis elektronskih stanja molekula, moraju se uzeti u obzir i njihove simetrične osobine, za šta se uvode označke (+) i (-), (g) i (u). Označke (+) i (-) se odnose na osobinu refleksije na ravan simetrije (tj. da li talasna

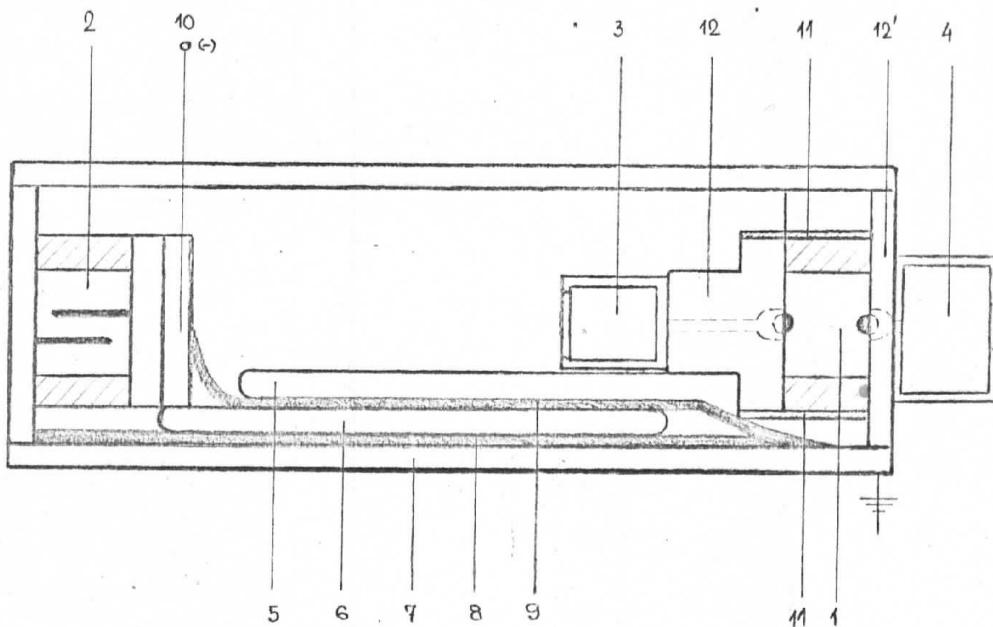
funkcija menja znak ili ne pri toj operaciji). Oznake (g) i (u) opisuju značajne talasne funkcije homonuklearnih molekula u odnosu na centar simetrije; (g) se odnosi na simetrične, a (u) na nesimetrične molekule. Konačno, kompletan opis elektronskog stanja molekula može se predstaviti, na primer $B^3\bar{T}_1$, gde je $\Lambda=1$, $2S+1=3 \Rightarrow S=1$ (tripletno stanje), g - simetričan molekul u odnosu na centar simetrije.

N₂ L A S E R

Problem koji se pred naučnike postavlja pri proučavanju laserskih prelaza jeste dobijanje koherentnog snopa zračenja što veće izlazne snage. Veliki uspeh je predstavljal otkriće L. Mathiasa i Parkera 1963. impulsnih laserskih prelaza u molekulskom azotu i njihovo proučavanje problema postizanja inverzne naseljenosti. Nekoliko godina kasnije (1965.) D. Leonard i E. Gerry su pokazali da se u azotnom laseru, koji je konstruisao H. Heard 1963. godine, može dobiti izlazna snaga od nekoliko stotina KW u impulsima trajanja oko 20 ns. Dužina impulsa je mala zbog metastabilnosti nižeg laserskog nivoa, što dovodi do nestajanja inverzije za vreme kraće od radiacionog vremena života gornjeg laserskog nivoa. Pored toga, oni su došli do zaključka da se megavatne snage mogu dobiti pri veoma brzom pražnjenju. Ovu ideju je 1966. godine ostvario J. Shipman pomoću sistema za pobudjivanje specijalne konstrukcije (tzv. Blumlein sistem). Kasnija ispitivanja same konstrukcije N₂ lasera imala su za cilj poboljšanje koherencnosti i smanjenje divergencije izlaznog snopa.

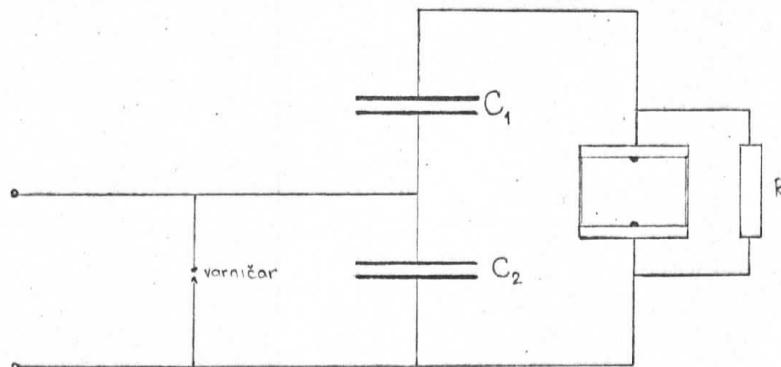
3.1.1. N_2 laser

U rešavanju savremenih fizičkih, tehničkih i drugih problema, često su neophodni snažni kratkoimpulsni laseri koji emituju koherentno ultraljubičasto zračenje. Te zahteve zadovoljava azotni laser. Najčešće se za pobudjivanje i postizanje inverzne naseljenosti molekula azota koristi tzv. Blumlainov sistem. To je, u stvari, visoko-naponski impulsni generator. Njegova fizička konstrukcija, odnosno ekvivalentna šema, data je na slikama 7. i 8.



Slika 7.

- | | |
|--|---|
| 1. šupljina laserske cevi | 8. i 9. višeslojni izolacioni papir, premazan uljem za transformatore |
| 2. varnični prostor | 10. priključak ispravljenog visokog napona za punjenje kondenzatora C_1 i C_2 |
| 3. cev za dovod gasa | 11. otporni papir (otpornik R) |
| 4. cev za odvod gasa | 12. i 12'. aluminijumske šine laserske cevi |
| 5. gornja ploča kondenzatora C_1 | |
| 6. donja ploča kondenzatora C_1 koja je ujedno i gornja ploča kondenzatora C_2 | |
| 7. Donja ploča kondenzatora C_2 , koja je uzemljena | |

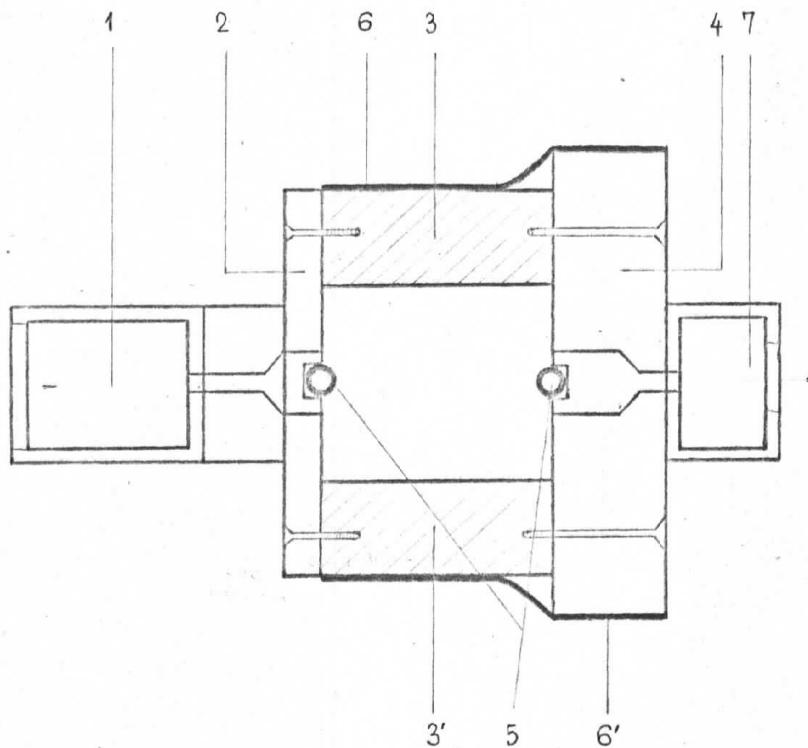


Slika 8.

Ekvivalentna šema N₂ lasera
NRG-0,5 u Institutu za fiziku PMF u Novom Sadu

Osnovni delovi azotnog lasera: varnični prostor, kondenzatorske ploče i laserska cev, smešteni su u kutiju dimenzija 61 cm x 61 cm x 5 cm, koja je uzemljena (slika 7.).

Laserska cev (slika 9.) je napravljena od dve paralelno postavljene aluminijumske šine (2. i 4.), medjusobno razdvojene zidovima od izolatora (pleksiglas) (3., 3').



Slika 9.

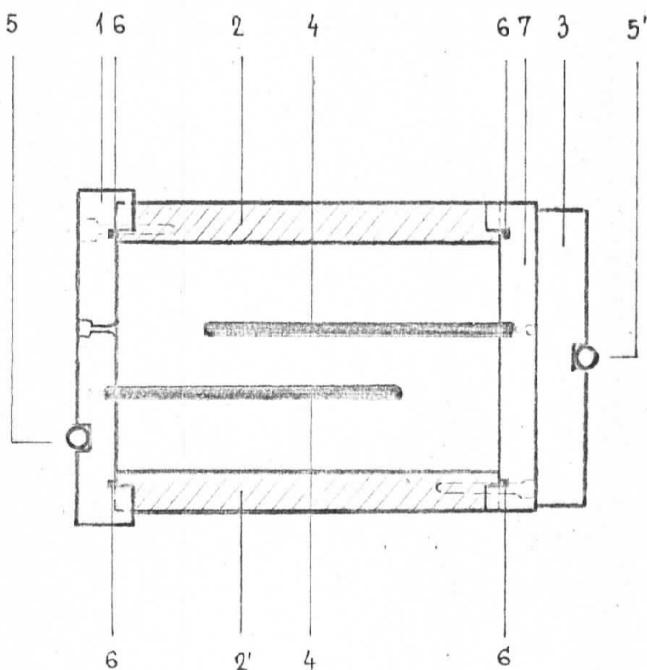
1. cev za dovod gasa
2. visokonaponska elektroda (aluminijumska šina)
3. i 3'. izolator(pleksiglas)
4. uzemljena elektroda (aluminijumska šina)
5. bakarne elektrode i vodeno hladjenje
6. i 6'. otporni papir ($R=100 \Omega$)
7. cev za odvod gasa

Izolator (3. i 3') je sa unutrašnje strane prevučen materijalom koji ga štiti od oštećenja usled naglog pražnjenja kroz azot. U svaku aluminijumsku šinu je uvučena po jedna bakarna cevčica, prečnika 0,65 cm, dužine 53 cm (5.). Ove cevčice služe kao elektrode za pražnjenje i obezbedjuju vodeno hladjenje lasera. Na spoljašnjoj strani izolatora, celom dužinom laserske cevi (61 cm), nalazi se papir koji ima funkciju otpornika (to je grafitni papir) (6 i 6'). On povezuje niskonaponsku i visoko-naponsku stranu lasera. Uloga ovog paralelnog otpora ($=100 \Omega$) je da održi napon izmedju krajeva lasera približno na nuli, za vreme dok se vrši ~~na punjenje~~avanje kondenzatora. Pored toga, zbog svoje površinske lokacije, on ograničava spoljašnje električno polje, tako da održava veću homogenost električnog polja unutar laserske cevi za vreme početnih faza pražnjenja. Ovo, pak, omogućuje da se izbegne udar varnice u izolator i pomaže da se pražnjenje lokalizuje na debljini koja je približno jednaka prečniku bakarnih elektroda.

Na jednom kraju laserske cevi, nalazi se ogledalo (da bi se reflektovalo zračenje koje stiže do njega), čija je jedna strana aluminizirana. Kvarcni prozor je postavljen na drugi kraj cevi, naspram ogledala. On je, kao i ogledalo, ~~preko~~ O prstena ~~malčagaščenog~~ lasersku cev. Ogledalo i kvarcni prozor

moraju biti međusobno strogo paralelni i normalni na optičku osu cevi.

Posmatran laser ima automatski dvoelektrodni varničnik (slika 10.). Prednji (7.) i zadnji (1.) deo varničnog prostora načinjeni su od paralelno postavljenih aluminijumskih šina. Na prednji deo (7.) je pričvršćena aluminijumska šina (3.), koja je povezana sa kondenzatorskom pločom (broj 6. na slici 7.)



Slika 10.

1. zadnji deo varničnog prostora
2. i 2'. izolator
3. aluminijumska šina, pričvršćena za jednu kondenzatorsku ploču i varnični prostor
4. bakarne elektrode ($2 \times 2,5 \text{ cm}$)
5. i 5'. vodeno hladjenje
6. gume za zaptivanje
7. prednji deo varničnog prostora

Izolatori (2 i 2') preko dihtung-guma (6.) čvrsto naležu na prednji (7.) i zadnji (1.) deo varničnog prostora. U varničnom prostoru se nalaze dve medjusobno paralelne bakarne elektrode (4.). Aktivna (naspramna) površina svake elektrode je oko dva $\times 2,5 \text{ cm}^2$. Mala količina materijala, koji ispari za vreme svakog varničenja, ponovo se nataloži na elektrodama, tako da su radne osobine varničnika postojane. Azot je u varničnom prostoru pod pritiskom od $1,8 \text{ kg/cm}^2$. Induktivnost varničnika je $L_S = 15 \text{nH}$, a otpor $R_V = 1 \Omega$. Varničnik je konstruisan tako, da se varnica pojavi u trenutku maksimalnog napona (19 KV) na kondenzatoru. Pri upotrebljenom transformatoru, ovim je naponom postignuta saturacija punjenja kondenzatora, varničnik postaje kratak spoj i transformator ne može da dovodi struju veće jačine.

Protok gasa je veoma značajan, naročito za vreme rada sa velikom brzinom ponavljanja. Neophodno je da joni, koji su zaostali od prethodnog pražnjenja, budu ravnomerno rasporedjeni i da su određene gustine, da bi se omogućilo sledeće pražnjenje. Ukoliko je zaostalih jona malo, ili ako su oni neujednačeno rasporedjeni, električno pražnjenje će biti neujednačeno. Ako je, pak, zaostalih jona mnogo, smanjuje se napon pri kome dolazi do električnog pražnjenja kroz gas. U oba slučaja se smanjuje efikasnost lasera. Povoljni uslovi za pražnjenje se ostvaruju ako gas protiče u pravcu normalnom na optičku osu.

Gas se ubacuje kroz otvor sa više rupa (8-10), raspoređenih duž svake aluminijumske šine, pa ulazi u lasersku cev, iza bakarne elektrode. Zatim protiče kroz cev (u pravcu parallelnom osi cevi) i izlazi kada prodje oko druge bakarne elektrode, takodje kroz otvor sa 8-10 rupa (koje nisu naspram rupa kroz koje gas ulazi u cev). Ovakvim rasporedom otvora, kroz koje gas ulazi u

lasersku cev i iz nje izlazi, ostvaruje se dovoljno dobra uniformnost u protoku gasa. Pri većim frekvencijama (60 Hz) impulsa, protok gasa treba da bude oko $0,21 \text{ m}^3/\text{min}$, a pri manjim frekvencijama i protok se mora smanjiti (pomoću ~~vakuum~~ pumpe), jer bi, u protivnom, svi zaostali joni bili ispumpani za vreme izmedju dva uzastopna pražnjenja. Kod ovog lasera se koristi prečišćen azot, jer nečistoće (ugljovodonik) mogu da izazovu taloženje ugljenika u varničnom prostoru. Prečišćavanje se vrši pomoću posebnog filtra.

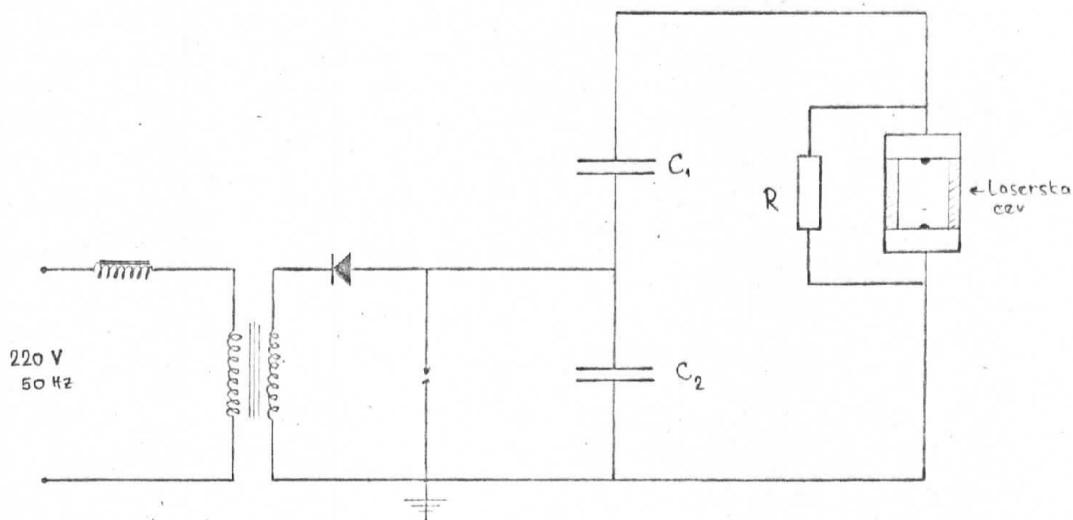
Kondenzator je konstruisan od aluminijumskih ploča, debljine 0,32 cm. Ploča koja je uzemljena (7. na slici 7.) je dimenzija 61 cm x 61 cm, a unutrašnje ploče (5 i 6 na slici 7.) su dimenzija 53 cm x 46 cm. Izmedju ploča je postavljen izolacioni materijal (8 i 9 na slici 7.) debljine 0,13 mm i 0,51 mm. On je načinjen u više slojeva (voštanih i Mylar tabaka debljine po 0,13 mm) i premazan uljem za transformatore. Kondenzatorske ploče su čvrsto spojene i tako konstruisane, da stoje na stalnoj udaljenosti jedna od druge.

Punjjenje i pražnjenje kondenzatora C_1 i C_2

Izmedju bakarnih elektroda laserske cevi mora postojati napon $U=18-19 \text{ KV}$, da bi došlo do električnog pražnjenja kroz gas u cevi. Vrednost ovog napona zavisi od karakteristika svih elemenata sistema -(induktivnosti varničnika i laserske cevi, rastojanja izmedju elektroda, kapaciteta kondenzatora,...). Da bismo videli na koji način se to postiže, posmatraćemo proces punjenja i pražnjenja kondenzatora C_1 i C_2 (slika 7.).

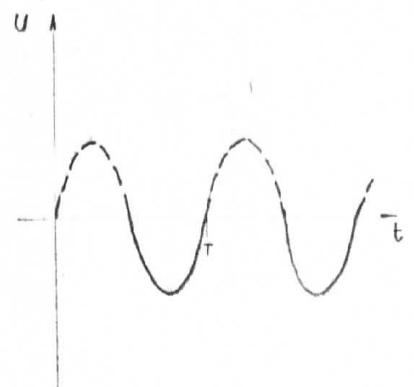
a) punjenje kondenzatora C_1 i C_2

Punjene kondenzatora C_1 i C_2 se vrši pomoću izvora struje, prikazanog na slici 11:



Slika 11.

Primarni transformator je priključen na napon gradske mreže ($U=220\text{ V}$, $\nu = 50\text{ Hz}$), a u sekundaru se indukuje visok u napon. Transformator je sposoban da daje struju od $0,25\text{ A}$ pri naponu od 20 KV . Ispravljanje ovog napona se vrši pomoću diode, tako da on ima oblik prikazan na slici 12:



Slika 12.

Posmatraćemo sliku 7. na strani 9: za vreme $t = \frac{T}{2} = \frac{1/\nu}{2} = 0,01\text{ s} = 10^{-2}\text{ s}$ (vreme za koje elektroni pod dejstvom ems izvora prolaze kroz diodu i kreću se prema kondenzatorima C_1 i C_2 , tj. prema ploči (6), pune se kondenzatori C_1 i C_2 . Tom prilikom



elektroni ne prolaze kroz varničar, jer je otpor gasa izmedju elektroda varničara veliki. Dakle, elektroni stižu na gornju ploču kondenzatora C_2 (ona je ujedno i donja ploča kondenzatora C_1) (6), čime se ploča (6) nanelektriše negativno, količinom elektriciteta $(-2 q)$. Gornja ploča kondenzatora C_1 (5) - preko otpornika R; i donja ploča kondenzatora C_2 (7) su vezane za isto uzemljenje. Električnom influencom se gornja strana donje ploče kondenzatora C_2 (7) nanelektriše pozitivno. Naime, slobodni elektroni koji se nalaze na tom delu ploče (7) odlaze u zemlju, pa se na gornjoj strani ploče (7) javi pozitivno nanelektrisanje $(+q)$, koje vezuje nanelektrisanje $(-q)$, tj. nanelektrisanje na donjoj strani ploče (6) $(-q)$. Isto tako se donja strana gornje ploče kondenzatora C_1 (5), električnom influencom, nanelektriše pozitivno - slobodni elektroni preko otpornika R odlaze u zemlju. Pozitivno nanelektrisanje ploče (5) je $(+q)$. Ono se vezuje za $(-q)$ nanelektrisanje ploče (6). Pri punjenju kondenzatora C_1 i C_2 nanelektrisanja se javljaju samo na naspramnim površinama. Jasno je da aluminijumske šine, a time i bakarne elektrode, laserske cevi, pri punjenju kondenzatora, nisu nanelektrisane (izvedu njih nema napona, jer su uzemljene).

U trenutku neposredno pre pojave varnice izmedju bakarnih elektroda varničnika, napon izmedju ploča kondenzatora je oko - 19 KV (u odnosu na uzemljenje). Količina elektriciteta ($+q$) na pločama (5) odnosno (7) je:

$$q_5 = CU = 10 \cdot 10^{-9} F \cdot 19 \cdot 10^3 V = 19 \cdot 10^{-5} C = +q$$

A na ploči (6):

$$q_6 = 2 \cdot (+q) = 38 \cdot 10^{-5} C = -q$$

Srednja struja kroz otpor R, pri punjenju kondenzatora C_1 , za $t=10^{-2}$ s, je:

$$\bar{i}_R = I_R = \frac{q}{t} = \frac{19 \cdot 10^{-5} C}{10^{-2} s} = 19 \cdot 10^{-3} A$$

pa je napon izmedju bakarnih elektroda laserske cevi (za vreme punjenja):

$$U = I_R R = 19 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 V = 1,9 V$$

Ovaj napon je veoma mali (zanemarljiv) u odnosu na napon pri kome dolazi do električnog pražnjenja kroz gas izmedju bakarnih elektroda laserske cevi. Zbog toga se može smatrati da je on, za vreme punjenja kondenzatora C_1 i C_2 , praktično jednak 0, tj. da su elektrode laserske cevi tom prilikom na istom (zemljinom) potencijalu.

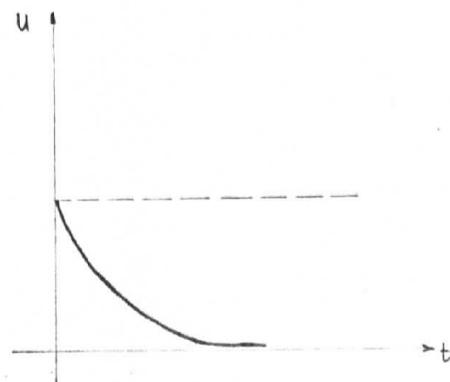
Električno pražnjenje izmedju bakarnih elektroda varničnika se javlja u trenutku kada napon izmedju njih (odnosno napon izmedju ploča kondenzatora) dostigne vrednost od oko - 19 KV. Tada počinje pražnjenje kondenzatora C_2 i C_1 , prvog preko varničnika a drugog preko laserske cevi.

b) pražnjenje kondenzatora C_1 i C_2

Prilikom pražnjenja kondenzatora C_2 preko varničnika, elektroni sa ploče (6) odlaze u zemlju, sve dok se C_2 ne isprazni. Istovremeno, iz zemlje elektroni stižu na donju ploču kondenzatora C_2 (7) i razelektrišu je. Pored toga, elektroni se kreću (iz zemlje)

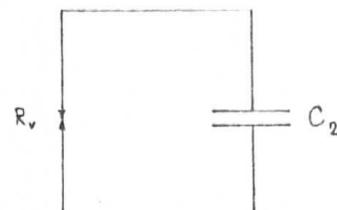
i ka gornjoj ploči kondenzatora C_1 (5). Međutim, zbog postojanja otpornog papira ($R=100 \Omega$), pražnjenje kondenzatora C_1 će se vršiti drugačije nego što je to slučaj sa kondenzatorom C_2 . Zbog toga ćemo odrediti vremensku konstantu kola koje se sastoji iz varničara ($L_s = 15 \text{ nH}$, $R_v = 1 \Omega$) i kondenzatora $C_2 = 10 \text{ nF}$, a zatim i vremensku konstantu kola koje se sastoji iz varničnika, otpornika $R=100 \Omega$ i kondenzatora $C_1 = 10 \text{ nF}$.

Pražnjenje kondenzatora se vrši prema relaciji:
 $U = U_0 e^{-t/\tau}$, što je prikazano na slici 14: gde je U_0 maksimalni napon na kondenzatoru, τ vremenska konstanta kola, tj. vreme za koje napon na kondenzatoru opadne do vrednosti $U = \frac{U_0}{e} \approx 0,36 U_0$.



Slika 14.

Vremenska konstanta kola koje se sastoji iz varničara i kondenzatora C_2 (slika 15.) je: $\tau_2 = R_v C_2 = 1 \Omega \cdot 10^{-8} \text{ F} = 10^{-8} \text{ s}$, dakle, za vreme $t = \tau_2 = 10^{-8} \text{ s}$, napon na kondenzatoru C_2 se smanjuje e puta. Praktično, on će se za to vreme isprazniti.



Slika 15.

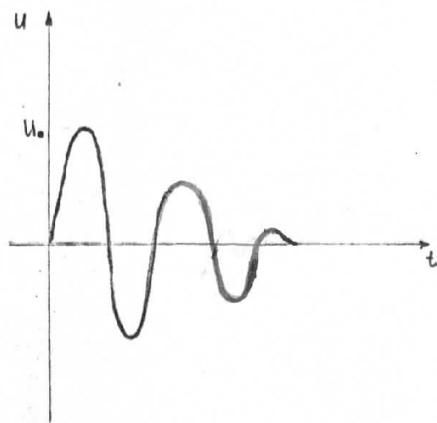
Ovo kolo se može posmatrati kao $L_s C_2$ oscilatorno kolo, u kome, u trenutku kada počinje pražnjenje kondenzatora, nastaju prigušene oscilacije, frekvencije:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_2}} = 8 \cdot 10^7 \text{ rad/s}$$

i perioda:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 7.85 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

što je prikazano na slici 16.



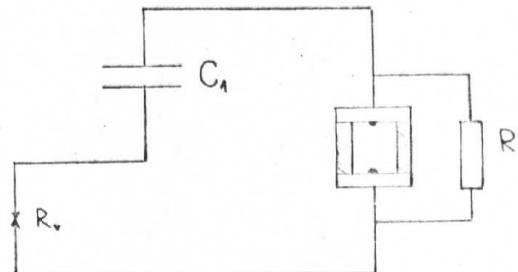
Slika 16.

Vremenska konstanta kola koje se sastoji iz varničnika, otpornika ($R=100 \Omega$) i kondenzatora C_1 (slika 17) je:

$$\tau_1 = (R_v + R)C_1 \approx RC_1 = 10^6 \text{ s}$$

tj. za vreme $t = \tau_1 = 10^6 \text{ s}$

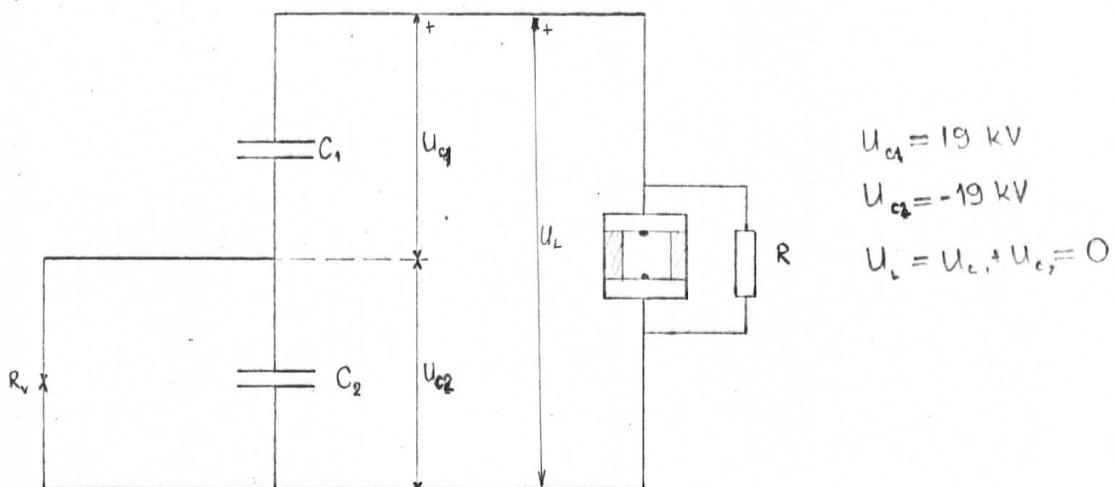
napon na kondenzatoru C_1 će se smanjiti e puta.



Slika 17.

Poredjenjem vremenskih konstanti τ_1 i τ_2 : $\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{10^6 \text{ s}}{10^8 \text{ s}} = 100$ postaje očigledno da se kondenzator C_1 preko otpornika R prazni mnogo sporije od kondenzatora C_2 , koji se prazni preko varničara.

Pre električnog pražnjenja na varničaru, zbir napona na kondenzatorima C_1 i C_2 je jednak 0, pošto su U_{C2} i U_{C1} suprotno orijentisani, pa je otuda i napon na laserskoj cevi jednak 0 (slika 18).



Slika 18.

Kada se kondenzator C_2 isprazni preko varničara, onda napon kondenzatora C_1 pada na elektrode laserske cevi, jer kondenzator C_1 nije mogao istovremeno biti ispražnjen preko otpornika R , kad i kondenzator C_2 , s obzirom da je vremenska konstanta T_1 (preko R) oko 100 puta veća od vremenske konstante T_2 (preko varničara). Zato kondenzator C_1 nije istovremeno ispražnjen sa kondenzatorom C_2 . Na ovaj način, napon U_L na laserskoj cevi (od 19 KV) će izazvati snažno pražnjenje kondenzatora C_1 izmedju bakarnih elektroda laserske cevi. Za vreme ovog pražnjenja i kroz otpornik R teče struja, ali je ona nesrazmerno manja od struje kroz lasersku cev.

Da bi ilustrovali pojavu i promenu napona na laserskoj cevi (U_L), posmatraćemo napon na kondenzatoru C_2 (U_{C2}), kondenzatoru C_1 (U_{C1}) i napon izmedju bakarnih elektroda laserske cevi (U_L), u trenutku $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$, $t = \frac{T}{2}$ (T je period oscilacija $L_S C_2$ kola).

$$t = 0 \quad U_{c_1} = 19 \text{ kV}$$

$$U_{c_2} = -19 \text{ kV}$$

$$U_t = U_{c_1} + U_{c_2} = -19 \text{ kV} + 19 \text{ kV} = 0$$

Zatim se kondenzator C_2 prazni, tj. napon izmedju ploča kondenzatora C_2 se smanjuje.

Posle vremena $t = \frac{T}{4} = 1,96 \times 10^{-8} \text{ s}$, je:

$$t = \frac{T}{4} \quad U_{c_1} = 19 \text{ kV}$$

$$U_{c_2} = U_0 e^{-t/\tau} \approx 0$$

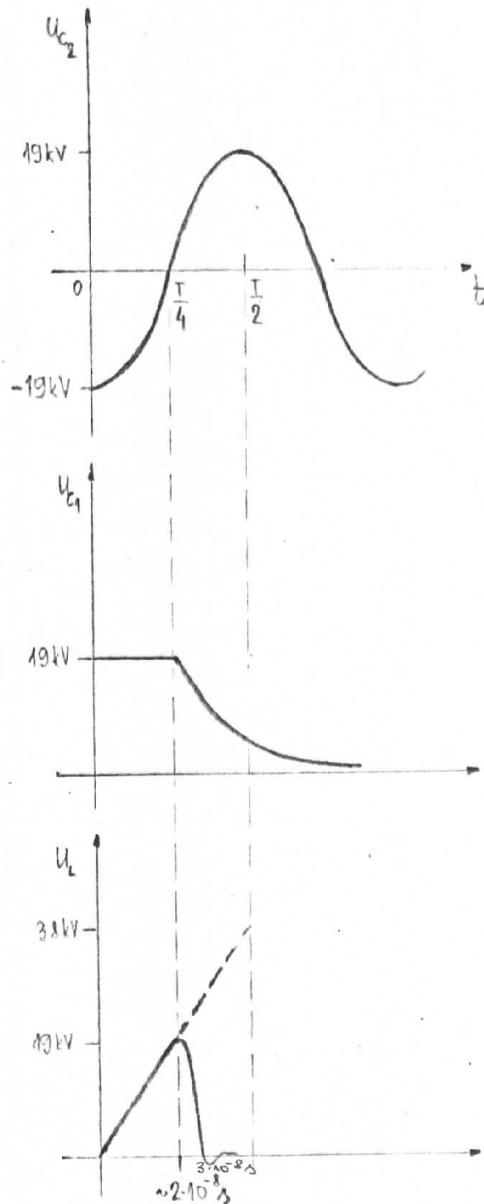
$$U_t = U_{c_1} + U_{c_2} = 0 + 19 \text{ kV} = 19 \text{ kV}$$

tada dolazi do naglog pražnjenja kondenzatora C_1 kroz lasersku cev, tj. napon U_{C1} naglo opada. Tom prilikom samo manji broj elektrona (iz zemlje) prolazi kroz otporni papir (R) prema gornjoj ploči kondenzatora C_1 (5), a struja I_R je:

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{19 \cdot 10^3 \text{ V}}{10^2 \Omega} = 190 \text{ A}$$

dok ogroman broj elektrona prolazi kroz lasersku cev, krećući se od jedne prema drugoj bakarnoj elektrodi laserske cevi. Prosečna struja kroz lasersku cev I_C je:

$$I_C = \frac{q}{t} = 3.8 \cdot 10^4 \text{ A}$$



Slika 19.

drugim rečima, za veoma kratko vreme (nekoliko nanosekundi) elektron i gornju ploču $C_1(5)$ troni iz zemlje stižu na aluminijumsku šinu (12, slika 7), tako da napon izmedju bakarnih elektroda laserske cevi naglo opada.

Posle vremena $t = \frac{T}{2}$ napon na laserskoj cevi (napon izmedju bakarnih elektroda laserske cevi) bi dostigao vrednost $U_L \approx 40 \text{ KV}$, jer je:

$$U_a = 19 \text{ KV}$$

$$U_{a2} = 19 \text{ KV}$$

$$U_L = U_a + U_{a2} = 19 \text{ KV} + 19 \text{ KV} = 38 \text{ KV}$$

ali se to ne dogadja, jer već pri naponu od oko 19 KV na cevi, dolazi do električnog pražnjenja kroz gas u cevi (kondenzator C_1 se isprazni kroz lasersku cev, tj. napon U_{C1} se naglo smanjuje).

Na slici 19. je prikazana promena napona U_{C2} , U_{C1} i U_L sa vremenom. Na ovaj način se dobija jedan električni (strujni) impuls $\frac{\text{kroz cev}}{\text{impuls}}$. Ciklus se zatim ponavlja, ponovnim punjenjem kondenzatora C_1 i C_2 , pomoću izvora napona.

3.1.2. Pobudjivanje molekula N_2

Pri naponu od $U_L = 19 \text{ KV}$, u vremenskom intervalu od nekoliku nanosekundi, elektroni se kreću od jedne prema drugoj bakarnoj elektrodi laserske cevi. Već je rečeno da je struja u cevi tada $I_C = 4 \times 10^4 \text{ A}$, odnosno promena struje je $\Delta I / \Delta t \approx 10^6 \text{ A/s}$. Krećući se kroz cev, elektroni se, pod dejstvom jakog električnog polja ($E/p \approx 100 \text{ V/cm} \cdot \text{torr}$), ubrzavaju i vrše ionizaciju i pobudjivanje molekula azota. Drugim rečima, dolazi do električnog pražnjenja kroz gas, pri čemu je to električno pražnjenje, zahvaljujući konstrukciji laserske cevi, lokalizovano u prostoru izmedju bakarnih elektroda, (u zapremini $V = 2,5 \text{ cm} \times 0,7 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$). Pošto se u vremenskom intervalu od oko 20 ns, koliko traje porast

naponu izmedju bakarnih elektroda laserske cevi, dogadja veliki broj sudara izmedju molekula gasa, jona i elektrona (rekombinacija jona za tako kratko vreme se može zanemariti), treba utvrditi koji su procesi najodgovorniji za pobudjivanje molekula N_2 i da li pobudjivanje sudarima izmedju jona i molekula N_2 ima nekog većeg značaja. Zbog toga ćemo odrediti energiju molekula N_2 bez prisustva električnog polja, a zatim i energiju jona i elektrona, koju oni stiču pod dejstvom električnog polja, izmedju dva sudara.

Poznato je da je srednji slobodni put molekula N_2 pri $p = 1 \text{ atm}$

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2} \pi d^2 N p} = 0.9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

a njegova srednja brzina

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8.31 \cdot 273}{3.14 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4.54 \cdot 10^4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

dok je pri $p = 30 \text{ torra}$, $\lambda = 23 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$

Ako se ne nalaze u električnom polju, molekuli ili joni mogu preći za $t = 20 \text{ ns}$ put:

$$s = \bar{v} \cdot t = 4.54 \cdot 10^4 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 20 \cdot 10^{-9} \text{s} = 90.8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

a energija koju stiču na tom putu $E = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \sim 10^{-2} \text{ eV}$, što je nedovoljno za pobudjivanje molekula.

Međutim, u električnom polju, pri naponu $U = 10 \text{ KV}$, put koji za 20 ns mogu preći joni biće:

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{eUt^2}{2Md} = 0.028 \text{ cm}$$

a brzina (srednja):

$$v = \frac{s}{t} = \frac{28 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{20 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 1.4 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

dok je kinetička energija jona N_2 :

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = 27,44 \text{ eV}$$

Pošto je za pobudjivanje molekula N_2 na CII nivo potrebna energija od oko 10 eV, može se zaključiti da, na svom putu, jon N_2 može izvršiti pubudjivanje najviše 3 nepobudjena molekula azota.

Za razliku od jona, energija elektrona u električnom polju ($U = 10 \text{ KV}$) dostiže vrednost od $E = eU = 10^4 \text{ eV}$, pa se zaključuje da on na svom putu može izvršiti pobudjivanje oko 10^3 nepobudjenih molekula N_2 . Nešto detaljnijim računom - preko srednje brzine elektrona izmedju dva sudara:

$$\bar{v} = \frac{eUt}{2md}$$

i pod pretpostavkom da elektron izmedju dva sudara stiče energiju $E_k = 10 \text{ eV}$, može se izračunati vreme izmedju dva sudara:

$$E_k = 10 \text{ eV} = \frac{m\bar{v}^2}{2} \Rightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = 1,875 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\bar{v} = \frac{eUt}{2md} \Rightarrow t = \frac{2md\bar{v}}{eu} = 54 \text{ ps}$$

Za to vreme, elektron će preći put:

$$s = \bar{v} \cdot t = 1,875 \cdot 10^6 \cdot 54 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1,01 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$$

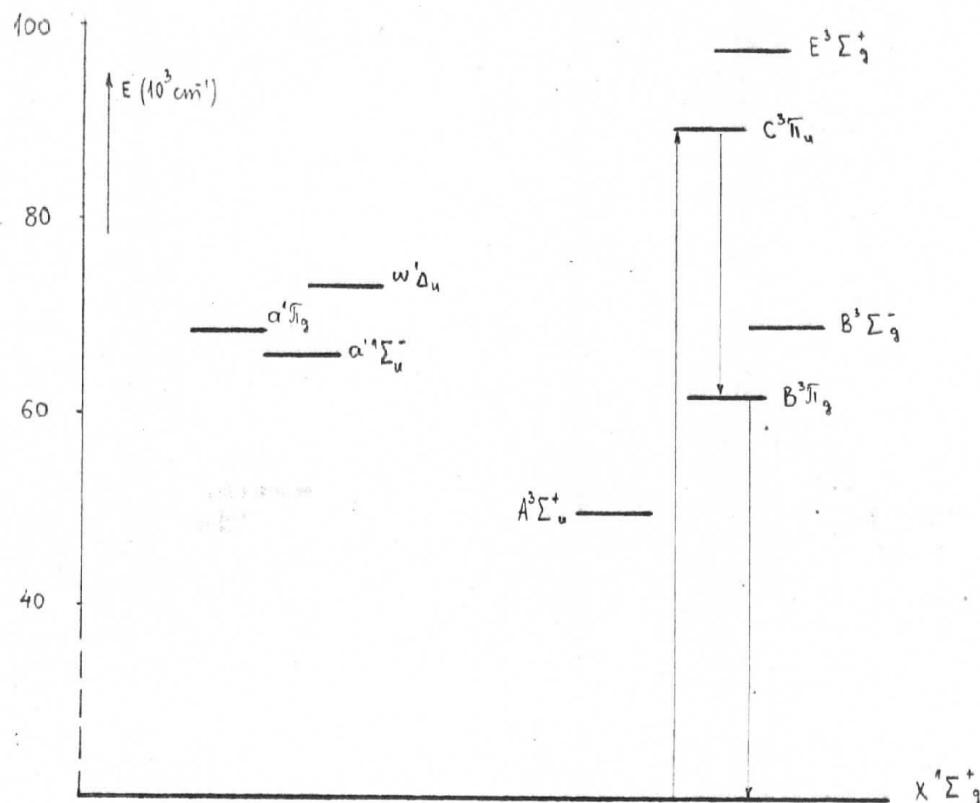
U toku 20 ns, broj sudara će biti $\frac{20 \cdot 10^{-9}}{54 \cdot 10^{-12}} \approx 370$. To je još uvek mnogo veći broj sudara (10^2 puta) od broja sudara jona.

Kada se uzme u obzir da je koncentracija jona u gasu oko 10^8 cm^{-3} , a broj elektrona: $n = \frac{eU}{e} = 6 \cdot 10^{14}$, odnosno $\frac{n}{V} \approx 7 \cdot 10^{12} \frac{\text{elektrona}}{\text{cm}^3}$, jasno je da najveću ulogu u pobudjivanju molekula N_2 imaju slobođeni elektroni i da je uloga jona N_2 u pobudjivanju gotovo zanemarljiva.

Iz izloženog se može videti da pri električnom pražnjenu dolazi do nagle promene struje ($\Delta I / \Delta t \approx 10^{14} \text{ A/s}$), tj. javlja se ogroman broj slobodnih elektrona, sposobnih da izvrše pubudjivanje molekula gasa. Na taj način se, za vreme manje od vremena života gornjeg laserskog nivoa ($C^3\pi_u$), ostvaruje osnovni zahtev za nastajanje inverzne naseljenosti u azotu: velika brzina porasta gustine elektrona u radnoj sredini i visoka energija tih elektrona, neophodna za efikasno pumpanje gornjeg laserskog nivoa ($C^3\pi_u$). Brzi pad napona izmedju bakarnih elektroda laserske cevi i - kao posledica - sniženje elektronske temperature, dovodi do ograničenja pumpanja N_2 lasera.

3.2. Energetička šema molekula azota

Energetička šema molekula N_2 data je na slici 21.



Slika 21.

Postoji nekoliko mogućih prelaza:

1. Prelaz izmedju singletnih stanja $a^1\Sigma_g^+$ i $a^1\Delta$.

Odgovarajuća emisija se dogadja u infracrvenom području spektra.

2. Prelaz izmedju $B^3\Pi_g$ i $A^3\Sigma_u^+$. tripletnih elektronskih stanja. Tom prilikom se emituje veliki broj linija u oblasti talasne dužine 760 nm (vidljiva svetlost).

3. Prelaz izmedju $C^3\Pi_u$ i $B^3\Pi_g$ tripletnih elektronskih stanja. Talasna dužina ovog zračenja (337,1 nm) odgovara bliskom ultraljubičastom području spektra.

Kod posmatranog N_2 lasera najveću ulogu ima prelaz izmedju tripletnih elektronskih (pobudjenih) stanja: $C^3\Pi_u$ - $B^3\Pi_g$.

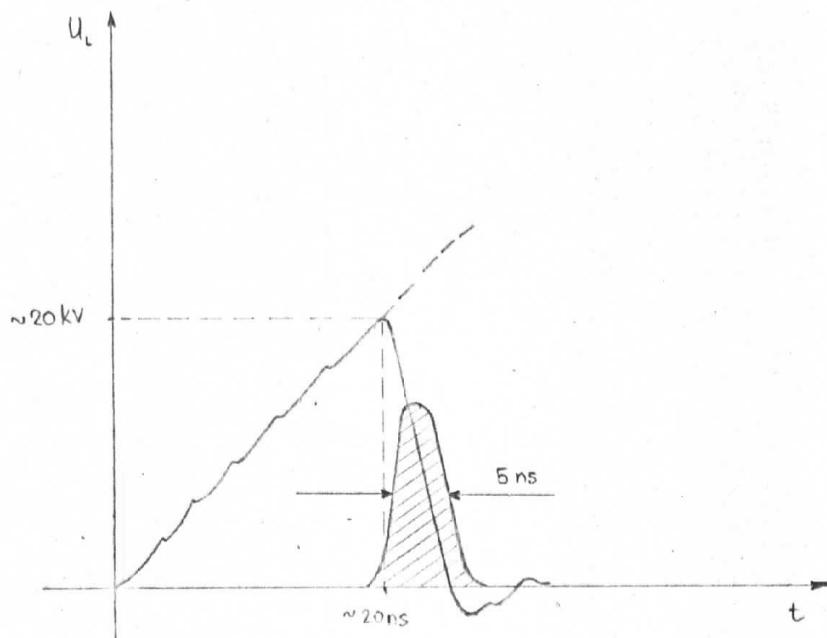
Već je rečeno da se pobudjivanje molekula vrši sudarima sa elektronima. Pri neelastičnom sudaru izmedju elektrona i nepobudjenog molekula N_2 (osnovno stanje $X^1\Sigma_g^+$) (sudar I vrste), elektron predaje energiju molekulu, koji tom prilikom prelazi u pobudjeno stanje. Postoji mogućnost da molekul predje u jedno od dva pobudjena stanja: $B^3\Pi_g$ ili $C^3\Pi_u$. Medutim, prema Frank Kondonovom principu (da je verovatnoća za elektronski prelaz bez promene impulsa sistema i rastojanja izmedju jezgara veća od verovatnoće za elektronski prelaz pri kome se menjaju ove veličine) verovatnoća za prelaz u pobudjeno $C^3\Pi_u$ stanje je oko 10 puta veća od verovatnoće za prelaz u pobudjeno stanje $B^3\Pi_g$. Zbog toga se, za veoma kratko vreme ($t \ll 40$ ns), postiže (sudarima I vrste) inverzna naseljenost $C^3\Pi_u$ nivoa u odnosu na $B^3\Pi_g$ nivo. Laserska emisija talasne dužine $\lambda = 337,1$ nm dogadja se pri elektronskom prelazu sa $C^3\Pi_u$ na $B^3\Pi_g$ nivo molekula azota.

Azotni laser ima na jednom kraju laserske cevi ogledalo, ali je njegova uloga bez većeg značaja, jer ovaj laser pripada grupi tzv. superemitterskih lasera. U takvim laserima je uloga rezonatora sporedna i smanjuje se još više s povećanjem koeficijenta pojačanja aktivne sredine i smanjenjem vremena postojanja inverzne naseljenosti. Super-emisija (karakteristična i za ovaj laser) nastaje u sredinama s velikim koeficijentom pojačanja, iz spontane emisije. Kao i u rezonantnim sistemima, superemisija je proizvod uzajamnog dejstva spontane emisije i aktivne sredine; to je oblik stimulisane emisije. Njena suštinska odlika je u tome, da se zbog velikog koeficijenta pojačanja, ako je gustina plazme dovoljno visoka, zasićenost aktivne sredine postiže već pri jednom prolazu zračenja kroz cev.

3.3. Osobine izlaznog snopa zračenja.

Talasna dužina izlaznog snopa zračenja je $\lambda = 337,1 \text{ nm}$. Zračenje se vrši u impulsima. Značajno je napomenuti da se pobudjivanje (a time i emisija) mora vršiti impulsno, jer je srednji život višeg laserskog nivoa $C^3\bar{\Pi}_u$ 40 ns, što je mnogo manje od srednjeg života nižeg laserskog nivoa $B^3\bar{\Pi}_g$ - 6 μs , tako da inverzna naseljenost $C^3\bar{\Pi}_u$ nivoa u odnosu na $B^3\bar{\Pi}_g$ nivo nestaje za veoma kratko vreme ($t < 40 \text{ ns}$), čime više nije ostvaren osnovni uslov za kvantno pojačanje - inverzna populacija nivoa (jer bi za veoma kratko vreme niži pobudjeni $B^3\bar{\Pi}_g$ nivo postao naseljeniji od višeg pobudjenog $C^3\bar{\Pi}_u$ nivoa). Optički impuls se javlja u trenutku kada napon izmedju bakarnih elektroda laserske cevi dostiže vrednost od oko 18-19 KV i gasi se usled naglog pada napona na cevi (slika 21).

Vreme trajanja jednog optičkog impulsa kreće se od 3 ns do 20 ns, što zavisi od brzine promene struje, dimenzija laserske cevi, pritiska gase. Sa povećanjem pritiska gase smanjuje se dužina impulsa (slika 22).



Slika 21b.

Kod većine N_2 lasera dobijaju se impulsi u trajanju od oko 5 ns na polovini maksimalne snage.

Brzina ponavljanja optičkih impulsa je ograničena brzinom kojom azot može biti osvežen dovodenjem novog gase i brzinom kojom se vrši pražnjenje kondenzatora.

Širina linije je oko 1 Å. Pošto na usmerenost superemiter-skog zračenja veliki uticaj ima geometrija aktivne sredine, zbog relativno velikih razmera laserske cevi, kod N_2 lasera je divergencija izlaznog snopa zračenja veća nego kod nekih drugih lasera, i kreće se oko 8 m rad po horizontali i oko 3 m rad po vertikali.

$$\text{Energija jednog fotona je } E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{337,1 \cdot 10^{-9}} = 5,87 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = 3,668 \text{ eV}$$

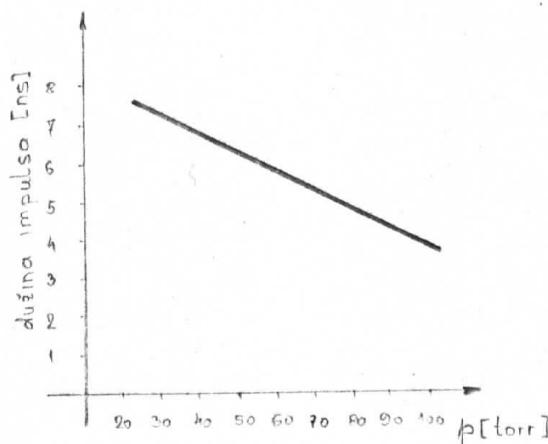
Ako je vreme trajanja optičkog impulsa $t = 5\text{ ns}$ i ako se uzme u obzir da se za to vreme pojavi oko 10^{16} fotona (već je rečeno da je broj elektrona u cevi 6×10^{14} i da svaki od njih izvrši pobudjivanje molekula oko 10^2 puta), onda je maksimalna snaga jednog impulsa:

$$P = \frac{nE}{t} = \frac{10^{16} \cdot 3,668\text{ eV}}{5 \cdot 10^{-9}} = \frac{10^{16} \cdot 5,83 \cdot 10^{-19}}{5 \cdot 10^{-9}} = 1,175 \cdot 10^6 \text{ W} \approx 1,2 \text{ MW}$$

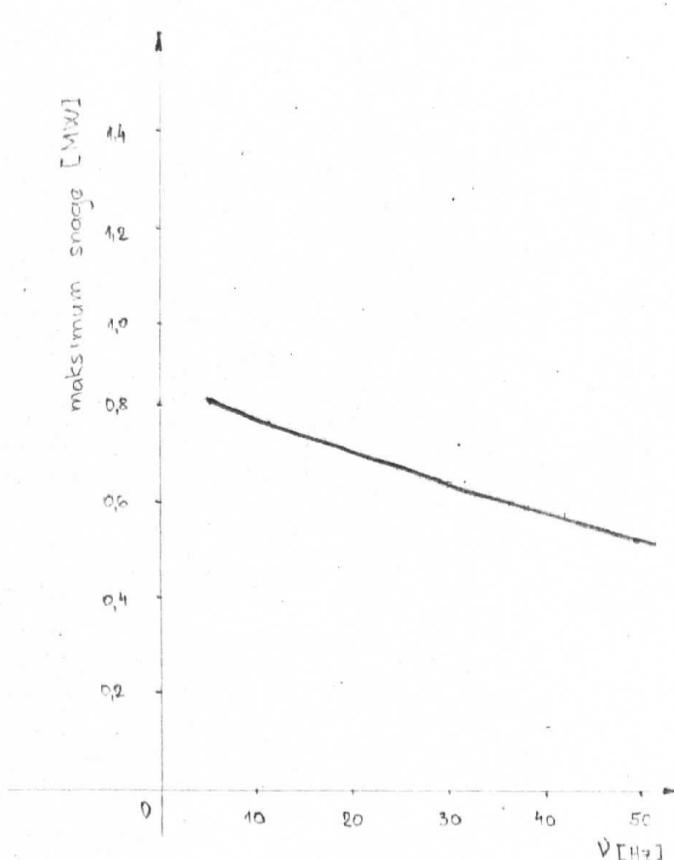
Snaga izlaznog snopa zračenja zavisi od napona na kondenzatoru, pritiska i geometrije laserske cevi i kreće se od 0,5 - 1,2 MW. Pri pritisku od 30 torra, kada se pobudjivanje vrši visokonaponskim impulsima od 10-30 KV, maksimalna snaga optičkog impulsa je oko 1,2 MW.

Sa povećanjem napona, povećava se izlazna snaga zračenja, jer je više energije spremno za svako pražnjenje kondenzatora (a pražnjenje se odvija za isto vreme).

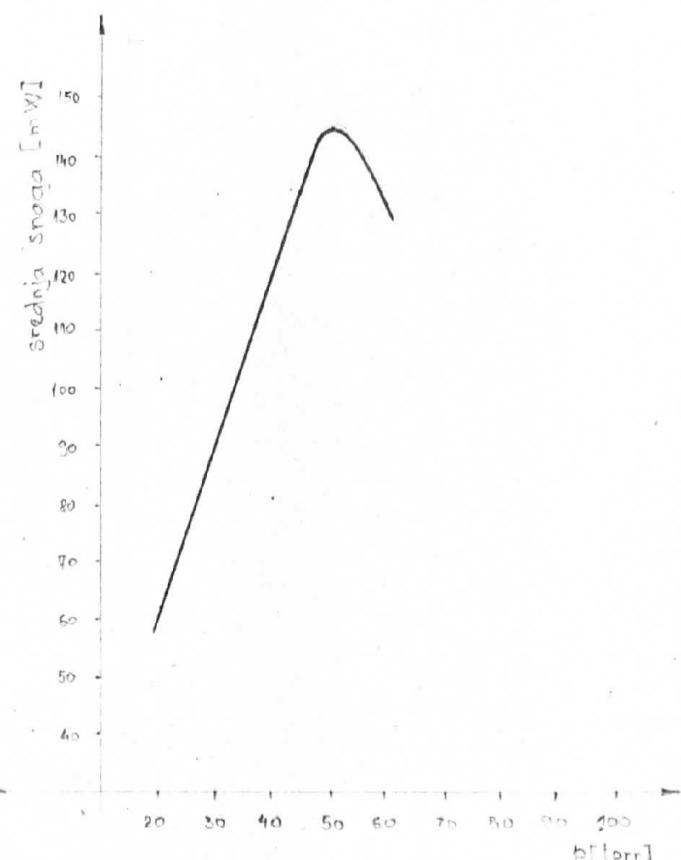
Ukoliko se povećava brzina ponavljanja strujnih impulsa, smanjuje se snaga optičkog impulsa, jer izvor struje (napona) ne može da dovodi dovoljno struje koja će u smanjenom vremenskom intervalu izmedju dva impulsa napuniti kondenzator. Na slici 23a. je prikazana zavisnost maksimalne snage optičkog impulsa od frekvencije naponskog impulsa.



slika 22



Slika 23a.



Slika 23b.

Snaga izlaznog snopa zračenja menja se i sa promenom pritiska u laserskoj cevi. Na slici 23.b se vidi da srednja snaga zračenja dostiže maksimum pri pritisku od oko 60 torra, a zatim opada, pošto na većem pritisku pražnjenje postaje neujednačeno.

Laserski snop azotnog lasera može izazvati oštećenja oka, a ako se rukom predje kroz fokusnu tačku, izaziva bolne opekotine.

UPOTREBA AZOTNOG LASERA

Iako je još uvek u fazi ispitivanja (radi postizanja što veće izlazne snage i usmerenosti zračenja), azotni laser je našao široku primenu. On se može koristiti:

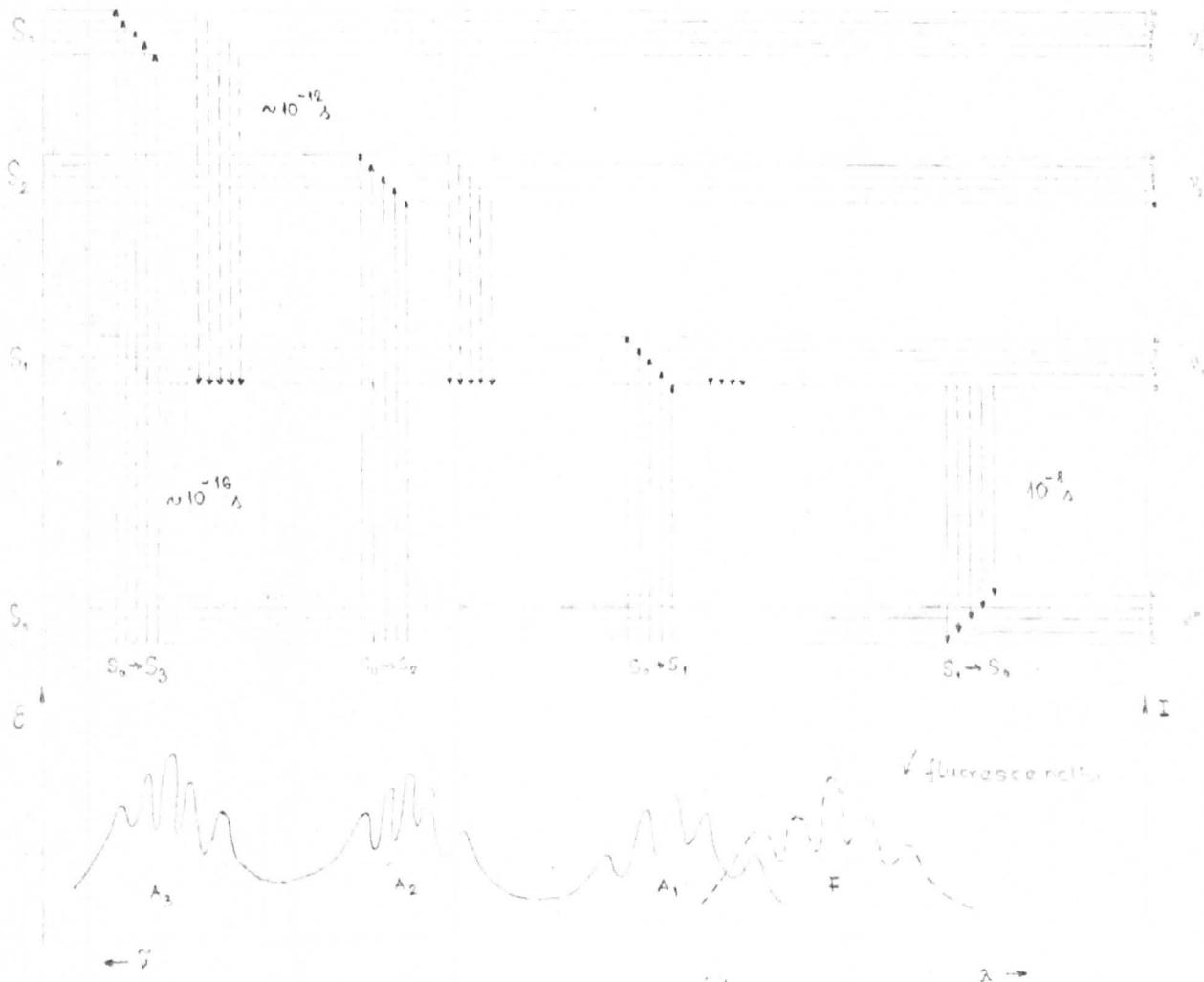
1. Kao opštička pumpa
2. Kao izvor radijacija za Ramanovu spektroskopiju
3. Za Relijevo rasejanje
4. Za nelinearne optičke eksperimente
5. U fotohemiji, fotobiohemiji, biofizici, fotobiologiji
6. Za vazdušna i podvodna proučavanja, zagadjenost sredine.
7. U fizici čvrstog stanja
8. U proučavanju pobudjivanja i ionizacije gasa i pare
9. U kinetičkim proučavanjima (brzina fotoreakcije, srednji život).

4.1. Azotni laser kao optička pumpa

4. 1.1. Fotofluorescencija

Kada se emisija svetlosti pobudjuje apsorbacijom svetlosti, pri čemu u emisionim prelazima učestvuju samo singletni termovi, govori se o fotofluorescenciji. Kod višeautomnih molekula u kondenzovanim sistemima (čvrsto i tečno stanje i rastvor) se pri emisiji (fluorescenciji) javlja samo onaj prelaz koji odgovara dugotalasnoj apsorpcionoj traci kod apsorpcionog spektra molekula. Spektralna raspodela intenziteta fluorescencije ne zavisi od talasne dužine upadnog zračenja (pobudjivačkog zračenja). Tačnije, svejedno je da li molekul prilikom apsorpcije pobudjivačkog zračenja (pri pobudjivanju fluorescencije) prelazi u ^{prvo} najniže pobudjeno elektronsko stanje (S_1) ili u neko više pobu-

djeno stanje (S_2 , S_3 , ...). Fluorescencija uvek nastaje pri prelazu iz najnižeg pobudjenog singletnog stanja (S_1) u osnovno singletno stanje (S_0) (prelaz $S_1 \rightarrow S_0$). Iz toga proizilazi da pobudjeni molekul pre fluorescentne emisije, za veoma kratko vreme ($\sim 10^{-12} \text{ s}$), neemisionim prelazima (energija pobudjivanja se pretvara u topotu) prelazi u prvo pobudjeno singletno stanje (S_1). Pri sudarima sa susednim



slika 24

Šema termova, energetskih nivoa, apsorpcionih i emisionih energetskih prelaza i neemisionih prelaza kod organskih molekula. Na slici je prikazan i fluorescentni spektar.

molekulima pri uspostavljanju termičkeravnoteže, u stanju (S_1) molekul gubi oscilatornu energiju, tako da ostaje sa nultom oscilatornom energijom, pa je fluorescentni spektar F pomeren ka većim talasnim dužinama u odnosu na apsorpcionu traku koja odgovara prelazu $S_0 \rightarrow S_1$

(ogledalski su simetrični). Tek tada se vrši fluorescentna emisija. (Slika 24). Srednji život trajanja fluorescentnog stanja S_1 je $\sim 10^{-8}$ s, a to je i srednji život trajanja fluorescentne emisije po prestanku njenog pobudjivanja.

Pošto svaki apsorbovani foton ne izaziva emisiju fotona, definiše se kvantni prinos fluorescencije, kao odnos emitovanih (fluorescentnih) i apsorbovanih (pobudjivačkih) fotona kod neke fluorescentne supstance.

Fluorescencija je opšta osobina supstanci i javlja se pod različitim uslovima (tečno i čvrsto stanje) rastvor, temperatura, pH,...). Najčešće se isputuje u rastvorima gde se kao rastvarač koristi voda, alkohol, ugljentetrahlorid,... Značajna je za utvrđivanje elektronskih prelaza, oscilatornih termova u osnovnom i pobudjenom elektronском stanju, mogućnosti primene pojedinih rastvora u cilju dobijanja zračenja velikog intenziteta.

4.1.2. N_2 laser kao optička pumpa

Azotni laser se vrlo često koristi za pobudjivanje rastvora organskih boja (tečni laseri), zbog velike snage zračenja (oko 1 MW) i dužine trajanja impulsa (oko 5 ns). Na tabeli 1. su prikazane mogućnosti za pobudjivanje rastvora izvorima zračenja velikog intenziteta. Vidi se da je upravo azotni laser, pored rubinskog jedan od najpogodnijih da se koristi kao optička pumpa.

Za pobudjivanje i ispitivanje rastvora organskih boja koristi se aparatura prikazana na slici 25. Snop zračenja azotnog lasersa, ($\lambda = 337,1$ nm) prolazi kroz sferno i cilindrično sočivo i pada na kivetu u kojoj se nalazi rastvor organske boje. U pravcu koji je normalan na pravac primarnog laserskog snopa (azotnog lasersa) postavlja se spektroskop, pomoću kojeg se određuje talasna dužina

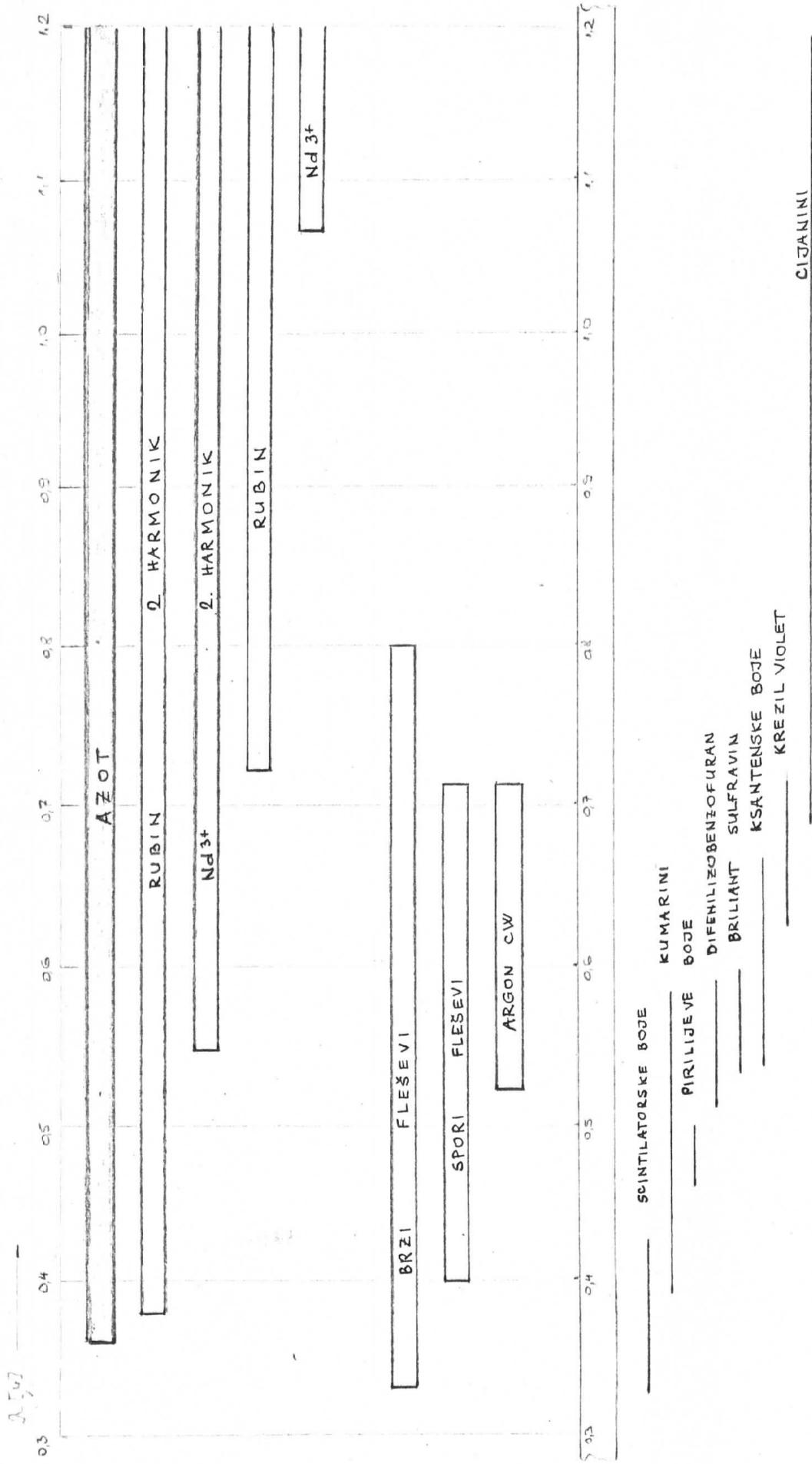
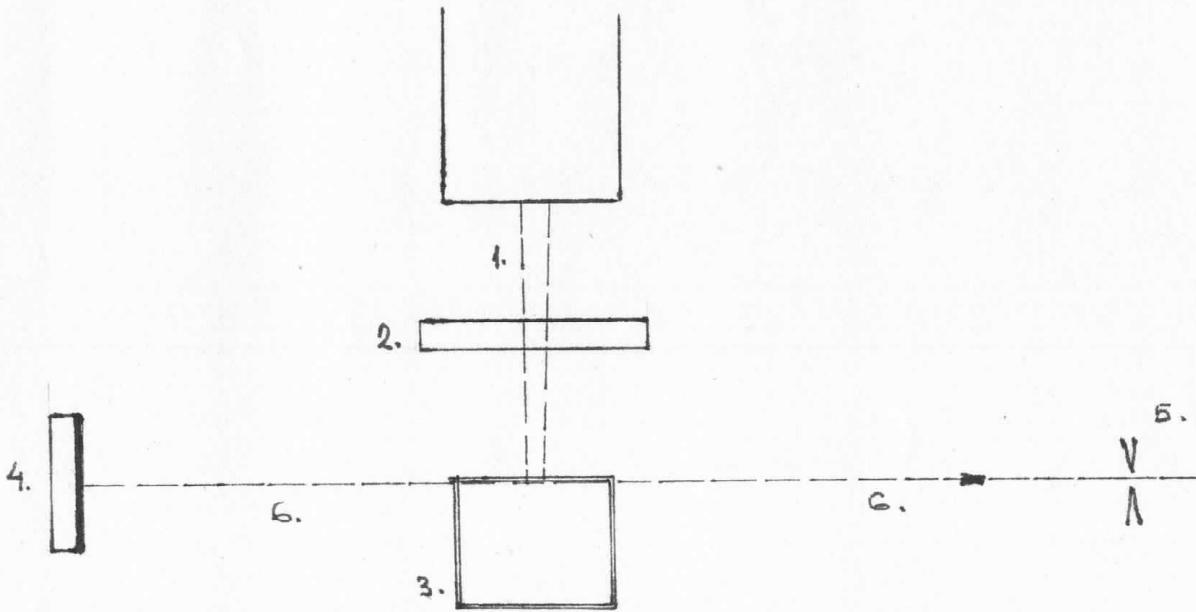


tabela 1 preglad talasnih dužina koje su efikasne za pumpanje lasera sa organskim bojama



Azotni laser kao optička pumpa

1. izlazni snop zračenja N₂ lasera ($\lambda = 337,1 \text{ nm}$)
2. cilindrično sročivo
3. kiveta u kojoj se nalazi rastvor organske boje
4. ogledalo
5. spektroskop ; 6. snop zračenja tečnog lasera

Slika 25.

zračenja koje emituje pobudjeni rastvor organske boje. Umesto spektroskopa (ili na suprotnom kraju) može se priključiti termopar povezan sa galvanometrom. Na taj način se može odrediti intenzitet zračenja tečnog lasera (rastvora organske boje).

U eksperimentu su korišćeni rastvori organskih boja:
rodamin 6G, umbeliferon, krezilviolet, fluorescein,
u alkoholu. To su supstance sa visokim kvantnim prinosom (88-89%).

Zračenje azotnog lasera koje pada na kivetu vrši pobudjivanje molekula organske boje. Pošto se radi o impulsima (oko 5 ns) veoma velike snage, u rastvoru će doći do fluorescentne emisije i pojačavanja zračenja, tako da se i sam rastvor organske boje ponaša kao izvor stimulisanog zračenja.

Utvrđeno je da se laserske emisije rastvora ne vrši pri malim koncentracijama. Isto tako, ako se rastvor ponaša kao aktivna supstanca, (pri određenoj koncentraciji) zračenje koje on emituje ima veći intenzitet ukoliko je frekvencija impulsa veća. To je konstatovano pomoću galvanometra, promenom frekvencije od 10 Hz na 25 Hz.

U drugoj fazi u kivetu su stavljeni rastvori 2 organske boje, Pri određenoj koncentraciji u spektrometru su bile zapažene dve trake: za umbeliferon i metiloranž - plava i zelena, za rodamin i krezilviolet - crvena i žuta. Ukoliko se tada u kivetu ubacivao kalijum jodid, koji se koristi kao gasitelj laserske emisije, utvrđeno je da se gasi samo jedna od ovih linija.

Dakle, azotni laser se veoma uspešno može koristiti kao optička pumpa za pobudjivanje molekula organske boje na lasersku emisiju, s obzirom da je dužina trajanja optičkog impulsa, u odnosu na fleš lampu, mala.

4.2. Azotni laser kao izvor radijacija za Ramanovu spektroskopiju

Prilikom osvetljavanja molekula gasa, tečnosti ili kristala snažnim snopom zračenja, u spektru rasejanog zračenja se, pored linija koje su svojstvene spektru samog izvora (ν_0) (Relijevo rasejanje, rasejanje bez promene talasne dužine), zapažaju i linije koje su pomerene u odnosu na linije izvora (ν_0). Ovaj efekat, koji su istovremeno otkrili 1928. godine Raman u Indiji i Mandeljštam u SSSR, naziva se kombinaciono rasejanje ili Ramanov efekat.

Ono se javlja usled oscilacija atoma koji ulaze u sastav molekula. Ako molekul poseduje nekoliko sopstvenih frekvencija oscilovanja $\nu', \nu'', \nu''', \dots$, u rasejanoj svetlosti treba da se pojave sve kombinacione frekvencije: $\nu_1 = \nu_0 \pm \nu'$, $\nu_2 = \nu_0 \pm \nu''$, $\nu_3 = \nu_0 \pm \nu'''$, ...

Veličine ν', ν'', ν''' su karakteristične za odredjene molekule i ne zavise od frekvencije izvora zračenja. Često se linije kombinacionog rasejanja nalaze rasporedjene na obema stranama Relijevih linija, (spektralnih linija frekvencije ν_0). One koje odgovaraju frekvenciji manjoj od ν_0 nazivaju se štoksove, a one koje odgovaraju frekvencijama većim od ν_0 su antištokslove linije.

Kako se objašnjava Ramanov efekat?

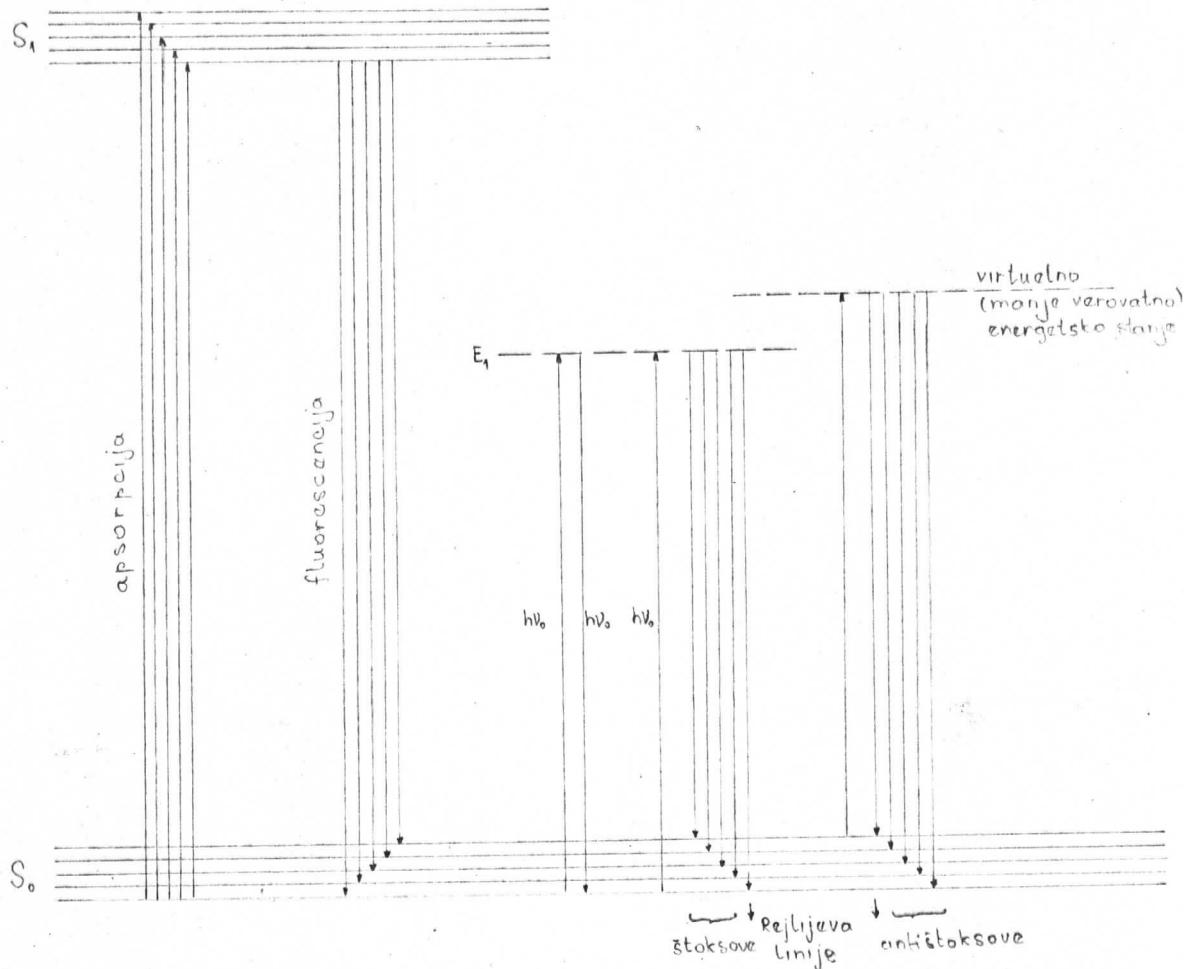
Proces rasturanja svetlosti se, prema kvantno-talasnoj interpretaciji, zamišlja kao kratkotrajni prelaz molekula na sve moguće energetske nivoe, uz naknadni prelazak na jedan od najnižih. Ako molekul neke materije ima sopstvenu frekvenciju oscilovanja ν_{osc} , onda on može da apsorbuje ili emituje energiju u kvantima $h\nu_{osc}$. Kada foton energije $h\nu_0$ upadnog zračenja pada na molekul, oni stupaju u interakciju.

Ako se molekul nalazi u osnovnom elektronskom stanju i posa
sa nultom oscilatornom energijom, apsorpcijom fotona energije $h\nu_0$
on prelazi u kvazistacionarno pobudeno stanje. Iz kvazistacio-
narnog stanja molekula emisijom fotona energije:

$$\text{tj.: } h\nu_r = h\nu_0 - h\nu_{\text{osc}}$$

$$\nu_r = \nu_0 - \nu_{\text{osc}}$$

prelazi u osnovno elektronsko stanje sa nekom oscilatornom
energijom. Vidi se da je frekvencija ν_r novih linija manja od prvo-
bitne frekvencije ν_0 upadnog zračenja, što znači da su nove linije
pomerene prema dugotalasnoj oblasti spektra. Ove linije predsta-
vljaju štoksove komponente.



slika 26 .

Ako se molekul nalazi u osnovnom elektronskom stanju i pobuđenom osculatornom stanju, $\hbar\nu_{osc}$, apsorpcijom fotonu on prelazi u neko pobuđeno kvazi stacionarno stanje. Emisijom fotonu energije:

$$\hbar\nu = \hbar\nu_0 + \hbar\nu_{osc}$$

molekul prelazi u osnovno stanje (elektronsko) sa nekom nizom osculatornom energijom. Dakle, frekvencija ν novih linija je veća od prvobitne frekvencije ν_0 upadnog zračenja. Nastale linije su pomerene prema kratkočalasnom delu spektra, i nazivaju se antištokslove linije.

(štokslovih)
Intenzitet novih linija je redovno veći intenziteta od antištokslova, jer je pod normalnim uslovima u materiji mnogo veći broj nepobudjenih nego pobudjenih molekula.

U odnosu na upadno i Relijevo zračenje, količina rasejanog zračenja pri Raman ovom efektu je veoma mala. Praktično svaki milioniti upadni foton pretrpi Ramanovo rasejanje. Zbog toga se moraju koristiti izvori zračenja velikog intenziteta.

Pored klasičnog, značajan je i stimulisani Ramanov efekat kod kojeg je rasejano zračenje usmereno, za razliku od klasičnog Ramanovog efekta. Pored toga, efikasnost stimulisanog kombinacionog rasejanja je skoro milion puta veća od efikasnosti klasičnog Ramanovog efekta. Intenzitet nastalih linija mnogo zavisi od intenziteta upadnog zračenja pa se koriste snažni izvori zračenja. S obzirom da je snaga zračenja azotnog lasera veoma velika on je pogodan za izazivanje Ramanovog efekta, a time i za proučavanje spektara kombinacionog rasejanja. Naime, analizom tih spektara, mogu se odrediti frekvencije oscilovanja molekula, njihovi momenti inercije (analizom strukture rotacionih spektara), energije elektronskog pobudjivanja, zatim struktura molekula i njihovo ponašanje pri promeni agregatnog stanja supstance.

Azotni laser, zbog optičkog područja rada (blisko UV) našao je primenu u raznim izvidjanjima na moru (otkrivanje objekata) i detekciji ugljovodonika.

Ovo su samo neke od oblasti u kojima se N_2 laser koristi. Njegova osnovna karakteristika, pored megavatne snage i vremena trajanja optičkog impulsa, je činjenica da je emitovano zračenje u bliskom ultraljubičastom delu spektra, što je važno, kada se ima u vidu da većina lasera radi u vidljivom ili infracrvenom području.

i dovođenje gase, i smanjivanje,

* * *

L I T E R A T U R A

1. Dr Ivan Janić - Eksperimentalne vežbe iz atomske fizike
2. Dr Ivan Janić - Fizika, III deo, Novi Sad, 1978.
3. Dr Miroslav Pavlov - Elektronika I-II, Novi Sad, 1973.
4. T.Jelaković - Uvod u elektroniku i elektrotehniku, Zgb.1975.
5. Dr ing D.Ivanović, ing. V. Vučić - Fizika II, Naučna knjiga, Bgd, 1967.
6. Friš, Timorjeva - Kurs opšte fizike, Bgd, 1972.
7. V.N. Kondratjev - Struktura atoma i molekula, Naučna knjiga, Bgd, 1966.
8. W.A. Fitzsimmons, L.W. Anderson, C.E. Riedhauser, and Jan M.Vrtilek -
- Experimental and theoretical investigation
of the nitrogen Laser -
- IEE journal of quantum electronics,
vol. qE-12, No.10, october 1976.
9. P. Richter, J.D. Kimel, nad G.C. Moulton - Pulsed UV nitrogen
Laser: dynamical behavior, APPLIED OPTICS
(vol.15, No.3) March 1976.
10. Dr S.Lugomer, mr M.Stipančić -Laser, "Svetlost", Sarajevo 1971
11. Soboljev - Laseri i njihova budućnost, Vojnoizdavački
zavod, Bgd, 1972.
12. Gazovie lazeri, sbornik statei, Moskva 1968.
13. Gazovie lazeri, Novosibirsk, 1977.

