

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО	35 АВГ 2004
ОРГАНИЗЈЕЦИЈА	БРОЈ
0603	3 365

ISTORIJAT RAZVOJA LASERA

– diplomski rad –

mentor:

Prof. Dr. Mira Terzić

student:

Stevica Teodorović

Novi Sad, avgust 2004.

PREDGOVOR

Fizika za mnoge predstavlja bauk, mada to ne mora tako biti. Baš iz tog razloga sam odlučio da za temu diplomskog rada izaberem oblast fizike koju mnogi koriste i da kroz rad prikažem jednostavnost nekih velikih dostignuća fizike. Uredaj koji gotovo svi koristimo, a ovenčan je veoma velikim brojem Nobelovih nagrada za fiziku je *laser*.

Ovaj rad je posvećen razvoju uređaja koji je obelažio drugu polovicu XX veka, a nadam se da će biti dominantan i u nastupajućem vremenu.

Izražavam zahvalnost svojoj porodici za strpljenje i razumevanje, a posebno bih htio da se zahvalim i mentoru Prof. **Dr Miri Terzić**, članovima komisije **Dr. Darko Kaporu** i **Dr. Imre Gutu** na bezrezervnoj podršci i saradnji.

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KRATAK PREGLED HRONOLOGIJE RAZVOJA LASERA	4
3. RAZVOJ TEORIJSKIH OSNOVA LASERA	7
4. OSNOVNI PRINCIPI RADA LASERA	8
4.1. APSORPCIJA,SPONTANA I STIMULISANA EMISIJA	8
4.2 . INVERZNA NASELJENOST	11
5. DELOVI I PODELA LASERA	13
6. PRVI LASERSKI SISTEMI	17
6.1. MASER	17
6.1.1 PRVI MASER	17
6.1.2 NASLEDNICI PRVOG MASERA	18
6.2. LASER	18
6.2.1 " TRKA " ZA TEORIJU O PRVOM LASERU	18
6.2.2 KONSTRUKCIJA PRVOG LASERA	20
6.2.3 NAČIN RADA PRVOG LASERA	22
7. RAZVOJ LASERSKIH SISTEMA	24
7.1. GASNI LASERI	25
7.1.1. HELIJUM-NEONSKI LASER	25
7.1.2. CO ₂ LASER	27
7.2. LASER ČVRSTOG STANJA	29
7.3. POLUPROVODNIČKI LASER	30
7.4. TEČNI LASER	32
7.5. EKSIMER	33
8. PRIRODNI MASER I LASER	35
9. NOBELOVE NAGRADE U OBLASTI LASERA	38
10. LASER DANAS I NJEGOVA BUDUĆNOST	39
DODATAK	
I. BIOGRAFIJE.....	40
II. EINSTEIN-ovi KOEFICIJENTI	43
III. FREE-ELEKTRON LASER	45
LITERATURA	46
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	48

1. UVOD

Nobelova nagrada za fiziku – kako to komplikovano zvuči. Bilo koji naučni rad, ili bilo koja naprava, koji zasluzuju Nobelovu nagradu su toliko komplikovani da je gotovo nemoguće shvatiti osnovne principe na kojima se oni baziraju. Ko bi to mogao shvatiti, a da ne pripada naučnom svetu? Ko i za šta može dobiti Nobelovu nagradu za fiziku? Da li te nagrade znače nešto običnom čoveku, da li on to može ikako koristiti, kad ne zna o čemu se radi? Ako realno razmislimo dolazimo do zaključka da je to gotovo nemoguće, međutim grešimo i to u velikoj meri. Odgovor na gore postavljena pitanja krije se u samo jednom pronalasku ili u samo jednoj reči “ LASER ”, koji mnogi koriste iako ne znaju osnovna pravila na osnovu kojih isti radi.

Laser je uređaj koji je višestruko povezan sa Nobelovom nagradom, a koriste ga kako naučnici tako i svi ljudi u svom svakodnevnom životu. Sam laser se sreće u mnogim oblastima ljudskog života i kao takav zasluzuje da se o njemu i njegovom razvojnom putu zna mnogo više.

Priča o laseru je ustvari veoma zanimljiva priča koja se svakim danom razvija i nadograđuje. Laser je uređaj budućnosti koji jednostavno rešava mnoge probleme. Još na početku njegovog razvoja neko je rekao “ Laser je rešenje koje čeka da se pred njega postavi problem ” i zaista je tako, jer mnoštvo problema iz raznih oblasti, koji su do pronalaska lasera bili nepremostivi, bili su veoma lako i elegantno rešeni njegovim korišćenjem. Gotovo niko, pa čak ni oni koji su učestvovali u njegovom razvoju, nisu mogli sagledati sve mogućnosti upotrebe lasera. Danas laser koristimo kako u svakodnevnom životu, tako i u mnogim naučnim oblastima. Gotovo je lakše nabrojati oblasti u kojima se ne koristi laser, nego one u kojima se on koristi.

Jedan od velikana kvantne fizike R.P.Feynman je jednom prilikom izjavio da će kvantna fizika jednom doći do punog izražaja. Laser kao čisto kvantno-mehanički uređaj je očigledan primer da kvantna fizika ima veoma bitno mesto u svetu nauke, ali ispostavilo se i u svakodnevnom životu. Bez korišćenja pojmove koji su produkt kvantne mahanike, laser kao uređaj, i njegovi principi rada ne mogu biti objašnjeni.

Prepostavljam da je to jedan od razloga zbog kojeg mnogi ljudi ne mogu shvatiti osnovne principe rada lasera. Poželeo sam da ovim radom bar malo približim laser običnom čoveku. Sam rad ima za cilj da sažeto prikaže sve o laseru, njegov teorijski razvoj, konstrukciju, osnovne tipove i osnove rada lasera, kao i delić njegove primene.

Laser kao uređaj je relativno mlad, koristi se nekih pedesetak godina. Prve ideje o današnjem laseru, nešto kao predskazanje, potiču još sa kraja XIX i početka XX veka kada je pisac H. G. Wells u svom romanu “ The War of the Worlds ” opisao kako osvajači sa Marsa koriste strašno oružije koje podseća na današnji laser. Po zamisli samog pisca agresori upotrebljavaju snažan svetlosni snop koji uništava sve u šta bude usmeren. Takav efekat može se danas ostvariti laserskim uređajem. Zbog toga može se reći da je pisac, davne 1896.g., predvideo laser mnogo pre njegove realizacije.

Danas se laser koristi u mnogim oblastima i u različitim situacijama. Da bi se malo suzio pregled oblasti u kojima se laser može koristiti treba izvršiti sistematizaciju. Veoma bitan doprinos laser danas ima u sledećim oblastima:

- ◆ *Medicina*– laser koristi u raznim dijagnostičkim metodama, terapeutskim metodama i možda najvažnije u operativnim zahvatima. Operativni zahvati laserom su mnogo precizniji i predstavljaju manju traumu za pacijenta, i



bolesnik se mnogo lakše oporavlja posle intervencije. Prilikom ovakvih zahvata krvarenje je manje izraženo i stoga je pogodnije i za pacijenta i za lekara koji ima bolju preglednost situacije. Pored toga, minijaturni laseri mogu biti ubačeni unutar organizma kroz veoma male otvore, a zatim se može obaviti neka hiruška intervencija (laparaskopske operacije) uz neznatnu mogućnost infekcije i uz minimalna krvarenja i traume.

- ◆ *Industrija*– mnoge industrijske grane koriste laser. Neke grane koriste lasere kao instrument za veoma precizna merenja, druge grane koriste ih kao uredjaje za obradu, jer je njihova preciznost i snaga mnogostruko veća od snaga i preciznosti nelaserske tehnike. Laserom se može seći, brusiti ili kontrolisati sve što je urađeno, sa veoma velikom sigurnošću i sa tačnošću koju je veoma teško postići drugim metodama. Laser se može koristiti i u svrhu određivanja kvaliteta upotrebljenih sirovina, kao i za bezbednosne svrhe u vidu raznih merača i prekidača senzorskog tipa.
- ◆ *Nauka i tehnologija*– u nauci i tehnologiji upotrebe lasera gotovo da nemaju granica. Laser se koristi kao idealan merni instrument za mnoge veličine, jer ima ogromnu tačnost i preciznost. Pored toga veoma se mnogo koristi u ispitivanju sredine u kojoj se odvijaju eksperimenti, jer svojim prisustvom ne narušava samu sredinu (laserska svetlost se ne može smatrati primesom u posmatranoj sredini), znači ne stvara perturbacije. Povezanost lasera sa ovom oblasti ide i u drugom smeru, jer razvoj samog lasera zavisi od stepena razvoja tehnologije. Može se reći da laser i razvoj tehnologije predstavljaju začaran krug. Nove tehnologije zahtevaju nove vrste lasera, a za njihovu izvedbu nam trebaju nove tehnike i nove tehnologije. Zbog toga mi danas imamo paralelan razvoj laserske tehnike i novih tehnologija.
- ◆ *Telekomunikacije*– Danas je nemoguće zamisliti moderne telekomunikacione sisteme bez upotrebe lasera. Za razliku od klasičnih sistema žične veze, sistemi koji koriste laser mogu istovremeno preneti mnogo više informacija uz povećanje kvaliteta prenosa. Postoje problemi u ostvarivanju fizičke veze između dva objekta, međutim laser nam omogućuje veoma brzu i preciznu komunikaciju između takva dva objekta. Satelitske veze istovremeno mogu preneti nekoliko desetina hiljada nezavisnih informacija, a sve se obavlja bez fizičke veze, baš zahvaljujući laserima.
- ◆ *Zaštita čovekove sredine*– u ovoj oblasti laser koristimo uglavnom u merne svrhe, jer predstavlja idealnu aparaturu za te potrebe. Svojim učešćem u merenju laser ne narušava stvarne vrednosti pa je stoga očitavanje parametara veoma precizno i samim tim ne treba vršiti korigovanje dobijenih rezultata.
- ◆ *Vojска*– koristi lasere i kao oružje veoma velike razorne moći i kao pomoćne uredjaje u cilju veće preciznosti i bolje komunikacije. Upotreba lasera u vojne svrhe je jedna od oblasti kaja zahteva svakodnevni razvoj laserske industrije i tehnike.

Pored svih ovih upotreba lasera, laser svakodnevno koristi čovek u mnoge svrhe, a da toga nije ni svestan. Prilikom kupovine u prodavnici laserski čitači bar-kodova obavljaju ogroman deo posla. Svako korišćenje usluga u bankama, koje posluju raznim karticama, bilo bi nemoguće bez lasera koji se koriste u cilju bezbednosti poslovanja i identifikacije. U poslednje vreme su se pojavili i lasrski brzinometri, nepopularni radari koji zadaju glavobolje ljubiteljima oštريје vožnje. Svakodnevno slušanje omiljenog CD-

a je nemoguće bez lasera, laser se tu koristi dvojako i kao naprava za formiranje zapisa i kao čitač tog zapisa. Današnja izdavačka delatnost koristi prednosti laserskih štampača koji daju mnogo kvalitetniji otisak u odnosu na sve druge tehnike štampe.

Posle ovakvog nabranjanja mogućnosti lasera čovek može da se zapita šta je to laser i šta ga čini tako posebnim. Laser je naprava koju veoma mnogo koristimo, a samo njeno ime potiče od pojave koja predstavlja osnovni princip rada lasera. Pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja je pojava koja omogućuje rad laserskog uređaja. Akronim ove interakcije zračenja i materije nam daje ime uređaja - LASER (Light Amplifications by Stimulated Emission of R

- ◆ Lasersko zračenje je strogo **monohromatsko**, jer sadrži samo jednu talasnu dužinu, koja odgovara prelazu između dva energetska nivoa posmatranog sistema. Istina sama linija odredene talasne dužine ima određenu širinu unutar spektra, ta širina linije se ne može izbeći, jer je posledica delovanja optičkog rezonatora. Optički rezonator stvara optički šum u okolini radne talasne dužine, usled čega se spektralna linija širi, ali ta širina je zanemarljivo mala pa mi možemo smatrati da je laserska svetlost strogo monohromatska. Ovo je veoma bitno kod korišćenja lasera u svrhu spektroskopije, holografije i interferometrije.
- ◆ Lasersko zračenje je **koherentno** zračenje. Ta koherentnost se ogleda kako u vremenskom pogledu tako i u prostornom pogledu. Prostorna koherentnost se ogleda u tome da je širina laserskog snopa uvek ista, ma gde vršili njeno merenje. Znači divergencija snopa je veoma mala. Prostorna koherentnost je povezana sa usmerenošću zračenja. Pošto je laserski snop veoma dobro usmeren, a širina samog snopa može biti izuzetno mala mi možemo dobiti ogromnu energiju fokusiranu na maloj površini. U toj osobini se krije snaga lasera. Ova vrsta koherentnosti se postiže korišćenjem optičkog rezonatora koji ujedno i usmerava zračenje kao kolimatorska cev. Vremenska koherentnost se ogleda u tome da su faze laserskog zračenja veoma dobro definisane u toku vremena trajanja zračenja.
- ◆ **Polarizacija** laserske svetlosti je takođe veoma važna osobina, po kojoj se laser razlikuje od ostalih izvora svetlosti. Za razliku od ostalih izvora laserska svetlost ima samo jednu ravan u kojoj osciluje.

Pored toga laseri mogu raditi u kontinualnom ili u pulsnom režimu, stim da impuls može trajati veoma kratko, što zavisi od opsega u kome radi laser. Sa obzirom da laseri rade u frekventnom opsegu reda GHz, a da je vreme trajanja impulsa obrnuto proporcionalno radnoj frekvenciji, dobija se da je vreme trajanja impulsa reda 10^{-15} s . Ovi veoma brzi impulsi su vrlo upotrebljivi kod ispitivanja veoma brzih procesa .U ovim osobinama laserske svetlosti se ogleda njegova posebnost i iz tog razloga ga je moguće koristiti u tolikom spektru različitih oblasti.

2. PREGLED HRONOLOGIJE RAZVOJA LASERA

Sam razvoj lasera je veoma teško definisati, jer za početak razvoja mogu se uzeti različite polazne tačke. Prve teorije o samom laseru kao uređaju javljaju se polovinom dvadesetog veka, međutim razvoj teorija o svetlosti datira mnogo pre. Pošto je laser jedan, istina neuobičajen, svetlosni izvor znači da početak razvoja lasera možemo smestiti u vreme prvih teorija o svetlosti. Pošto je to veoma dug period, ograničiću se na vreme kada su osnovne teorije o svetlosti već bile poznate. Za razvoj lasera bitni su sledeći događaji

- ◆ **1864.g.–1940.g.** se razvija spektroskopija. U okviru spektroskopije dominantna je astronomski spektroskopija, mada je osetan razvoj i spektroskopije materije uopšte.
- ◆ **1905.g.** Planck je izneo svoju kvantnu teoriju
- ◆ **1917.g.** Einstein preuzima foton kao osnovni kvant svetlosti i postulira stimulisanu emisiju.
- ◆ **1928.g.** Landenburg potvrđuje postojanje stimulisane emisije i negativne apsorpcije
- ◆ **1940.g.** V.A. Fabrikant ustanavljava postojanje inverzne naseljenosti
- ◆ **1947.g.** W. Lamb i R.C. Rutherford demonstriraju stimulisanu emisiju
- ◆ **1951.g.** Townes sa saradnicima konstruiše prvi uređaj koji radi na principu stimulisane emisije u mikrotalasnom delu spektra – maser
- ◆ **1951.g.** A Prohorov i N. Basov otkrivaju maser, nezavisno od Townes-a
- ◆ **1960.g.** Maimann konstruiše prvi uređaj koji radi na principu stimulisane emisije u vidljivom delu spektra – laser
- ◆ **1960.g.** P. Sorokin i M. Stevenson prvi uranijumski laser
- ◆ **1961.** A. Javan i saradnici konstruišu prvi kontinualni, gasni He–Ne laser
- ◆ **1962.g.** Robert Hall konstruiše prvi poluprovodnički laser
- ◆ **1964.g.** Kumar N Patel izumeo CO₂ laser.
- ◆ **1964.g.** William Bridges napravio jonski laser
- ◆ **1965.g.** otkriven prvi maser u maglini Orion i otkriveno je reliktno kosmičko zračenje korišćenjem masera.
- ◆ **1966.g.** konstruisan prvi gasodinamični laser.
- ◆ **1970.g.** postulirano je postojanje laserskih prelaza u okolini zvezda.
- ◆ **1973.g.** otkriveno je postojanje laserskih prelaza u kvazarima
- ◆ **1979.g.** otkriven je laser koji radi u delu spektra koji je blizak infracrvenom u maglini Orion
- ◆ **1981.g.** otkriven ugljen – dioksidni laser u atmosferi Venere i Marsa
- ◆ **1984.g.** otkriven laser koji radi na frekvencijama koje spadaju u oblast X – zraka.
- ◆ **1993.g.** konstruisan gas kontakt plazma laser

- ◆ **1995.**g. Kuiper – ova vazduhoplovna opservatorija otkrila lasersku aktivnost kod nekih zvezda sa zračenjem koje se nalazi u u dalekom infracrvenom područiju.
- ◆ **1996.**g pomoću Hubble – ovog teleskopa otkriven ultraljubičasti laser.
- ◆ **1999.**g otkriven free-elektron laser
- ◆ **2000.**g. razvoj čitavog niza ekstra snažnih i vojnih lasera.

Ovaj pregled predstavlja samo veoma značajne tačke u razvoju laserskih sistema. U toku samog razvoja laserskih sistema pronalaženi su novi načini postizanja inverzne naseljenosti, ostvarivanja većih snaga. Ipak najviše su su razvijali novi tipovi lasera koji su korišćeni za specijalne namene.

Poredn novih vrsta lasera razvija se i njihova primena, kako u svakodnevnom životu – sa ciljem povećanja kvaliteta života – tako i u istraživačkim projektima. Specijalni laseri se koriste u mikrohirurgiji, u molekularnoj biologiji pri izučavanju genetskog koda i hromozomskih mutacija, u pokušaju da se kontroliše fuzija kao novi izvor energije.

Laser kao sistem predstavlja “svetlost” XXI veka. Laser učestvuje u gotovo svim oblastima ljudskog života i kao takav usko je povezan sa razvojem čovečanstva.

3. RAZVOJ TEORIJSKIH OSNOVA LASERA

Razvoj lasera se može posmatrati praktično u dve faze. Prva faza je faza u kojoj se laser razvijao samo u domenu teorija, dok druga faza počinje sa prvim napravljenim laserom. Postoje mnoge teorije koje su povezane sa laserom, neke od njih direktno a neke indirektno. Teorijski razvoj lasera se odvijao po sledećem hronološkom rasporedu:

- ◆ **1860.g.** Maxwell je dao teoriju o elektromagnetskom zračenju i prepostavio je i da je svetlost elektromagnetne prirode. On je ustvari preuzeo ideju od Faraday-a koji je ustanovio da je materijalna sredina nosilac svih električnih i magnetnih pojava.
- ◆ **1900.g.** Planck je izneo svoju kvantnu teoriju u kojoj je prepostavio da energija nema kontinualni, već diskontinualni spekter.
- ◆ **1913.g.** Bohr je prepostavio da se atom može naći samo u određenim energetskim stanjima i da prilikom prelaza iz jednog u drugo stanje atom ili zrači ili apsorbuje energiju koja je jednaka energetskoj razlici ta dva stanja.
- ◆ **1917.g.** Einstein je prilikom razmatranja interakcije zračenja i materije uveo do tada nepoznatu pojavu stimulisane emisije, koja je docnije postala osnov za rad lasera.
- ◆ **1948. g.** Schawlow i Townes po prvi put razmatraju primenu stimulisane emisije u cilju poboljšanja spektralne analize materijala.

Još je Faraday, tridesetih godina devetnaestog veka ustanovio da se svi procesi koji imaju neko od magnetskih ili električnih osobina ispoljavaju u materijalnim sredinama i stoga je prepostavio da je sama sredina nosilac tih procesa. Pošto se električne i magnetne pojave javljaju i u vakuumu, Faraday je uveo i pojam etra tј sredine koja se nalazi u bezvazdušnom prostoru. Po njemu se delovanje nanelektrisanih tela javlja kao posledica promena naponskog stanja u dielektrikumu. Promena se javlja polarizacijom sredine kada se nanelektrisano telo nađe u samoj sredini, a prostor oko nanelektrisanog tela nazvao je električnim poljem. Kasnije je tu ideju preuzeo Maxwell i uveo pojam elektromagnetskog zračenja, zatim je prepostavio i da je svetlost elektromagnetne prirode. Maxwell je ove pojmove objasnio matematičkim putem, poznatim Maxwell-ovim jednačinama. Sledеće teorije koje su imale značajan doprinos u razvoju lasera dao je Planck. On je na osnovu proučavanja raspodele zračenja u spektru crnog tela od **1897-1901.g.** formulisao pojam kvanta energije, čime je uveo prepostavku da je energetski spekter diskontinualan. Na osnovu razmatranja i svoje hipoteze pokušao je da otkloni neslaganja u teorijskim i eksperimentalnim rezultatima koji su dobijeni o raspodeli energije u spektru zračenja crnog tela. Samo rešavanje problema zračenja se svelo na uvođenje diskontinualnog spektra energije. Do Planck-ove teorije raspodela energije u spektru zračenja se dobijala na osnovu nekoliko formula:

- ◆ Štefan i Boltzmann su dali zakon po kome je energija koju neko telo izrači proporcionalna četvrtom stepenu temperature. Štefan je do ovog zakona došao eksperimentalno a Boltzmann teorijski nakon pet godina. Sam zakon glasi:

$$P = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

- ◆ Wien je dao formulu koja je dobro funkcionala samo u oblasti malih talasnih dužina. Ta formula je nastala na osnovu proučavanja gustine zračenja crnog

tela. Na osnovu nje može se reći da je talasna dužina koja odgovara maksimumu emisione moći obrnuto je proporcionalna temperaturi tela.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Ovo je poznati zakon pomeranja, međutim Wien je dao i opštu formulu za izračunavanje totalnog zračenja na osnovu formule

$$w_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}}$$

gde su C_1 i C_2 konstante. Ova formula pokazuje eksponencijalnu zavisnost izračene energije, u funkciji od talasne dužine.

- ◆ Rayleigh-Jeans su dali formulu koja je dobro funkcionala u oblasti velikih talasnih dužina. Međutim oni su prepostavili da se energija zrači kontinualno, pa su dobili absurdne rezultate u oblasti malih talasnih dužina, odnosno velikih frekvencija. Ukupna gustina izračene energije data je izrazom

$$w = \frac{8 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{c^3} \int v^2 dv \rightarrow \infty$$

- ◆ Na osnovu ove formule zračenje pri malim talasnim dužinama težilo bi ogromnim vrednostima, što je bilo u suprotnosti sa eksperimentalnim rezultatima. Da bi ovaj absurd razrešio Planck je uveo nov pojam, do tada nepoznat, pojam kvanta energije. On je uveo hipotezu da oscilator zrači energiju samo u kvantima čija je energija proporcionalna frekvenciji zračenja

$$\epsilon = h \cdot \nu$$

- ◆ Sam Planck-ov zakon zračenja dat je izrazom koji daje raspodelu zračenja crnog tela u intervalu frekvencija. Ta raspodela je funkcija frekvencije zračenja i temperature.

$$u_\nu d\nu = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

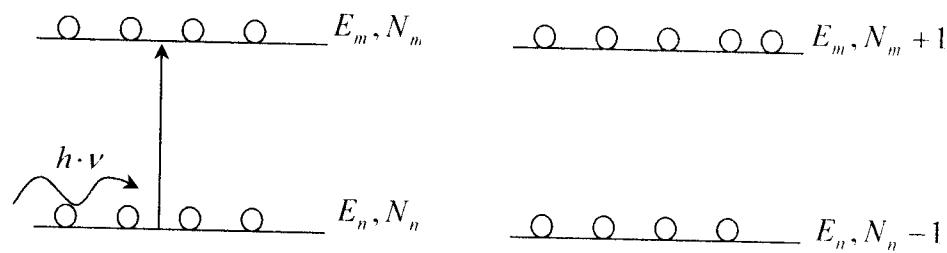
Pomoću ovog izraza Planck je uveo pojam kvanta energije i razrešio je problem ultraljubičaste katastrofe. Sve ove Planckove ideje naučnici u početku su veoma teško prihvatali. Jedan od retkih koji ih je prihvatao bio je Albert Einstein. Prvi put pojam fotona je Einstein uveo u svom radu o fotoefektu 1914.g., ali je bitniji rad objavljen 1916.g. u kome je pri opisivanju interakcije zračenja i materije.

4. OSNOVNI PRINCIPI RADA LASERSKIH SISTEMA

4.1 APSRPCIJA, SPONTANA I STIMULISANA EMISIJA

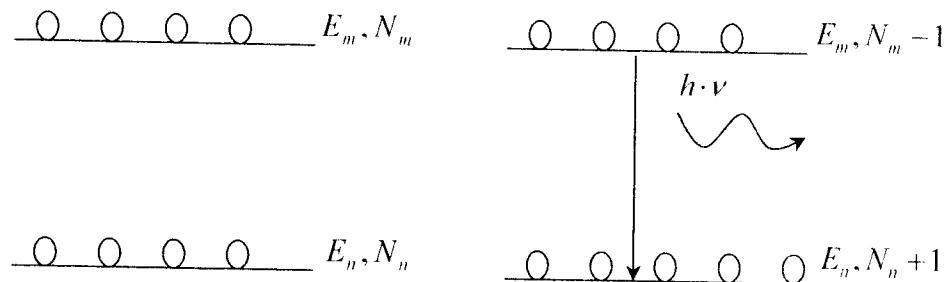
1916.g. Einstein pored već ranije poznatih procesa spontane emisije i apsorpcije uveo i novi pojam - pojam stimulisane emisije. On je svoje rade o interakciji zračenja i materije zasnovao na pojmu fotona koji ustvari predstavlja kvant svetlosne energije. Einstein u svom radu objavljuje postojanje tri tipa kuantnih prelaza.

- ◆ Apsorpcija je proces pri kome sistem prilikom interakcije apsorbuje kvant svetlosti - foton i pri tome sistem prelazi iz stanja niže energije u stanje sa višom energijom. Ovaj proces prikazan je na slici 1. Pri ovom procesu se smanjuje populacija na stanju sa nižom energijom a povećava se populacija na stanju sa višom energijom.



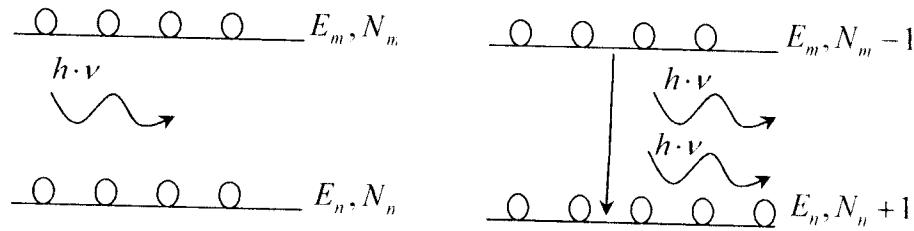
Sl.1. Apsorpcija kvanta svetlosti

- ◆ Spontana emisija je proces kod kojeg sistem prelazi iz stanja više u stanje niže energije uz emisiju jednog fotona, što je prikazano na slici 2. Ovim procesom se smanjuje populacija na stanju sa višom energijom, a povećava se populacija na stanju sa nižom energijom. Ovaj proces se odvija bez spoljašnjeg uticaja, sistem teži da zauzme stanje sa najnižom energijom.



Sl.2. Spontana emisija kvanta svetlosti

- ◆ Stimulisana emisija je proces kod kojeg sistem koji se već nalazi u stanju sa višom energijom apsorbuje jedan foton, a zatim se odmah vrati u stanje sa nižom energijom uz emisiju još jednog fotona. Ovaj proces do Einstein-a nije bio poznat, a on ustvari predstavlja osnovni proces pomoću kojeg se ostvaruje laseriranje. Pod laseriranjem se podrazumeva pojačanje intenziteta zračenja svetlosti pomoću stimulisane emisije. Ovaj proces je prikazan na slici 3.Ovim



Sl.3. Stimulisana emisija

procesom se smanjuje populacija na stanju sa višom energijom, a povećava se populacija na stanju sa nižom energijom.

Za sve ove procese je bitno naglasiti da su fotonii koji se pojavljaju strogo determinisane energije koja odgovara razlici energija početnog i krajnjeg stanja.

$$h \cdot v = E_n - E_m$$

Svi ovi procesi (apsorpcija, emisija i stimulisana emisija) se u nekom sistemu mogu odigravati istovremeno, nezavisno jedan od drugog, i stoga je potrebno razmotriti dinamiku ovih procesa. Da bi to lakše učinili moramo uvesti veličine verovatnoća pojedinih procesa:

- ◆ Verovatnoća apsorpcije W_{nm} zavisi od Einstein-ovog koeficijenta B_{nm} i gustine zračenja $\rho(T, v)$, koja je funkcija temperature T i frekvencije v

$$W_{nm} = B_{nm} \cdot \rho(T, v)$$

- ◆ Verovatnoća spontane emisije je jednaka koeficijentu A_{nm}

- ◆ Verovatnoća stimulisane emisije je jednaka Einstein-ovom koeficijentu B_{nm}

Na osnovu verovatnoća možemo analizirati vremensku promenu naseljenosti pojedinih nivoa, u zavisnosti od procesa koji se odigravaju. Promena populacije je data izrazima:

$$\frac{dN_m}{dt} = B_{nm} N_m \rho(v, T)$$

$$-\frac{dN_n}{dt} = N_n \cdot A_{nm} + B_{nm} \cdot N_n \cdot \rho(v, T)$$

Zbog principa detaljne ravnoteže, koji će biti razjašnjen u dodatku *ii*, koeficijenti B_{nm} i B_{mn} su jednakii. Uz uslov stacionarnosti mi takođe možemo reći da je promena populacije na jednom nivou jednaka promeni populacije na drugom nivou, tako da povećanje populacije na jednom nivou izaziva smanjenje populacije na drugom.

$$\frac{dN_m}{dt} = -\frac{dN_n}{dt}$$

Obzirom na ove činjenice može se pisati da je:

$$N_m B_{nm} \rho(v, T) = N_n A_{nm} + N_n B_{nm} \rho(v, T)$$

uz uslov

$$B_{nm} = B_{mn}$$

imamo

$$N_m B_{nm} \rho(v, T) = N_n A_{nm} + N_n B_{nm} \rho(v, T)$$

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{B_{nm} \rho(\nu, T)}{(A_{nm} + \rho(\nu, T) B_{nm})}$$

odnosno

Ovaj izraz nam pokazuje da je relativna popunjenošć energetskog nivoa funkcija gustine zračenja i verovatnoća pojedinih procesa koji se odigravaju unutar samog sistema. Same verovatnoće procesa se mogu dobiti samo na osnovu kvantne mehanike. Odnos populacija pojedinih nivoa, odnosno relativnu popunjenošć nivoa možemo dobiti i na osnovu Boltzmann-ove raspodele:

$$\frac{N_n}{N_m} = e^{-\frac{E_m - E_n}{kT}}$$

Analizom ove raspodele mogu se razlikovati sledeći slučajevi:

1. Pri $T > 0$ i $E_m > E_n$ imamo slučaj da je $\frac{N_n}{N_m} < 1$, što znači da je naseljenost nivoa sa većom energijom manja od naseljenosti nivoa sa nižom energijom. U tom slučaju imamo normalnu naseljenost.
2. Pri $T = 0$ i $E_m > E_n$, tad je $\frac{N_n}{N_m} = 0$, odnosno sve čestice su smeštene na nivo sa nižom energijom.
3. Pri $E_m - E_n > k \cdot T$ gotovo sve čestice se nalaze u stanju sa nižom energijom, međutim postoji određena popunjenošć nivoa sa višom energijom, ali je ona mala, gotovo zanemarljiva.

Daljim izvođenjem može se dobiti i izraz za temperaturu nekog sistema. Temperatura je termodynamička veličina koja predstavlja meru zagrejanosti nekog sistema. Bitno je naglasiti da se temperatura definiše za sisteme koji se nalaze u stanju termodinamičke ravnoteže

$$T = -\frac{(E_m - E_n)}{k \cdot \ln\left(\frac{N_n}{N_m}\right)}$$

Analiza ovog izraza nam pokazuje da je moguće ostvariti i negativnu temperaturu pri $E_m > E_n$ i $N_n > N_m$. Ovakvo stanje je termodinamički nemoguće i ono se naziva stanjem negativne temperature. Moguće ga je ostvariti samo uz inverznu naseljenost. Ovo stanje nema isti fizički smisao kao redovna termodinamička temperatura. Kad se neki sistem nađe u stanju inverzne naseljenosti, i ako je ozračen zračenjem gustine $\rho(\nu, T)$, tada taj sistem sam generiše dodatno zračenje. Zbog toga je gustina izlaznog zračenja veća od gustine zračenja kojim je sistem bio ozračen $\rho_i(\nu, T) > \rho(\nu, T)$. Ukoliko bi se sistem nalazio u stanju redovne naseljenosti ovo povećanje intenziteta zračenja bi bilo nemoguće. Tada se interakcijom zračenja i materije intenzitet zračenja smanji u odnosu na upadno zračenje.

4.2. INVERZNA NASELJENOST

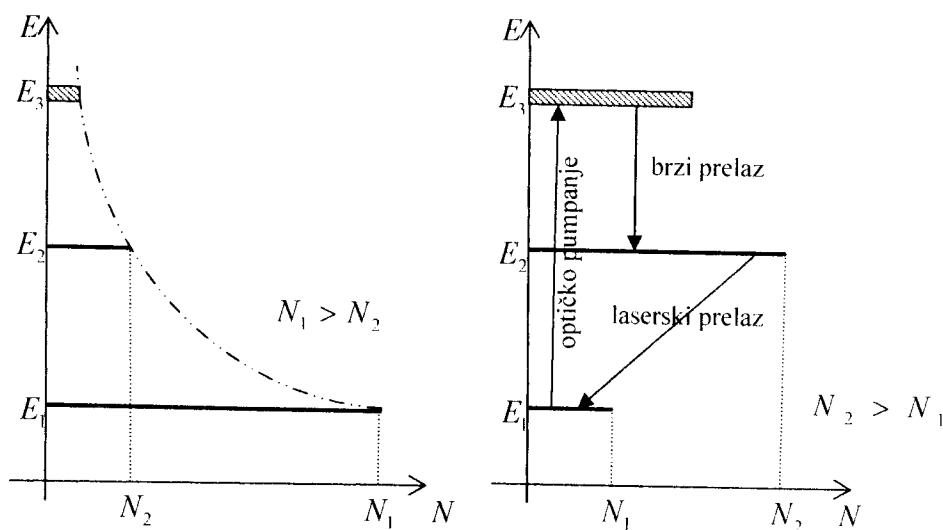
Pojam inverzne naseljenosti je pojam koji se može ostvariti samo narušavanjem termodinamičke ravnoteže. Upravo to je jedan od razloga zašto je proteklo više od 30 godina dok stimulisana emisija kao pojava nije iskorištena pri realizaciji masera. Samo narušavanje principa termodinamičke ravnoteže za mnoge naučnike je predstavljalo nepremostiv problem.

Invezna naseljenost je pojava kada su viši energetski nivoi popunjениji od nižih energetskih nivoa. Ova pojava nije uobičajena i zbog toga se naziva inverznom populacijom. Ovakvo stanje je moguće ostvariti na dva načina

1. Povećanjem broja atoma ili molekula koji imaju više energetsko stanje
2. Smanjenjem broja atoma ili molekula koji su u stanju sa nižom energijom.

Za ostvarenje inverzne naseljenosti najjednostavnije je koristiti sisteme sa tri ili četiri energetska nivoa:

Sistemi sa tri energetska nivoa, tipičan predstavnik za ovaj tip sistema je rubinski laser. Kod ovih sistema je teže ostvariti inverznu naseljenost. Osnovni razlog za to je činjenica da se kod ovih sistema na osnovnom energetskom nivou, u početnom stanju, nalazi ogroman broj atoma, i stoga je potrebno ostvariti veliki transfer na više energetske nivoe da bi se ostvarila inverzna populacija .

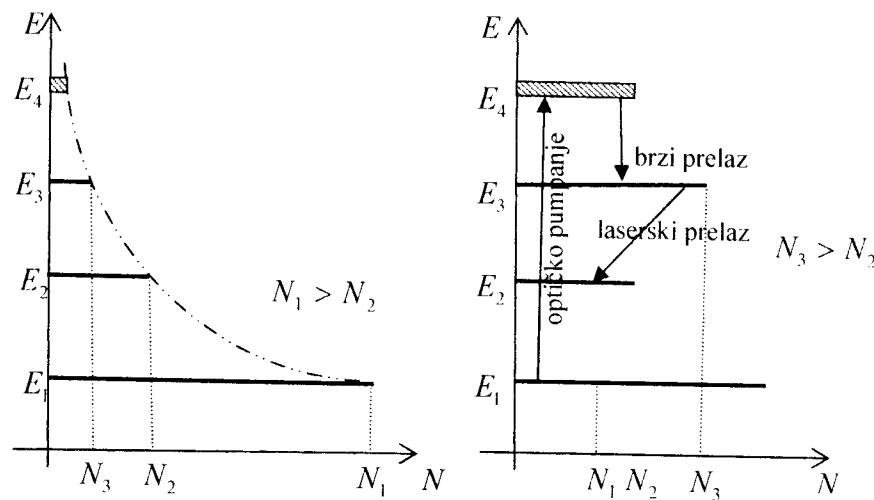


Sl.4. Realizacija inverzne populacije kod sistema sa tri nivoa

Na slici 4 je data raspodela atoma ili molekula pre i posle optičkog pumpanja kod sistema sa tri energetska nivoa. Kod ovih sistema je poželjno da nivo E_3 bude skup više, energetski bliskih , nivoa kako bi se omogućilo da prelaz $E_1 \rightarrow E_3$ ne bude strogo energetski određen, odnosno zbog bolje apsorpcije. Pre optičkog pumpanja raspodela atoma u sistemu odgovara Boltzmann–ovoj raspodeli, pa je broj atoma u osnovnom stanju najveći. Nakon pumpanja atomi prelaze na stanje E_3 sa koga bez emisije zračenja prelaze na nivo E_2 . Ovi neemisioni prelazi su posledica razmene energije elektrona sa kristalnom rešetkom. Usled sudara sa rešetkom elektron gubi svoju energiju pri čemu se energija elektrona približi energiji metastabilnog stanja i tada dolazi do neemisionog prelaza $E_3 \rightarrow E_2$. Ovaj prelaz bi trebao biti što je moguće brži

kako bi se uspostavila inverzna naseljenost nivoa E_3 u odnosu na nivo E_2 . Drugi uslov uspostavljanja inverzne populacije je da nivo E_3 bude metastabilan, odnosno da vreme života na tom nivou bude dovoljno dugo. Nedostatak ovih sistema se ogleda u tome da je pri normalnoj temperaturi gotovo celokupna populacija atoma smeštena na osnovnom nivou, pa je potrebno prebaciti više od polovine ukupnog broja atoma na viši nivo da bi se ostvarila inverzna naseljenost.

Sistemi sa četiri energetska nivoa su sistemi koji u procesu laseriranja koriste četiri različita energetska nivoa, odnosno koriste prelaze između četiri nivoa energija. Tipični predstavnici ovog tipa lasera su Nd:YAG i helijum-neonski laser. Kod ovih lasera imamo energetske nivoe i energetske prelaze kao na slici 5.



sl.5. Realizacija inverzne naseljenosti kod sistema sa četiri en. nivoa

Ovakvi sistemi se sastoje od osnovnog energetskog stanja E_1 , zatim dva stanja iznad njega kojih se odvija laserski prelaz E_2 i E_3 , i konačno nivoa E_4 koji je potreban da bi se izvršilo pumpanje sistema. Poslednji energetski nivo bi trebao da se sastoji od više različitih stanja, kako bi se povećala apsorpcija. Sa nivoa E_4 sledi veoma brz i neemisioni prelaz na nivo E_3 , koji je metastabilan, usled čega se ostvaruje inverzna naseljenost nivoa E_3 u odnosu na nivo E_2 . Na ovaj način se izbegava ostvarenje inverzne populacije u odnosu na nivo E_1 koji ima veliki broj atoma, čime je ujedno olakšano ostvarenje uslova za laseriranje.

5. DELOVI I PODELA LASERA

Samo konstrukcionalo rešenje lasera kao uređaja zavisi od tipa lasera, međutim svi laseri se sastoje praktično od istih delova. Ti delovi se mogu podeliti na sledeći način:

- ◆ Sistem za pobudivanje lasera, je sistem pomoću kojeg se aktivna supstanca prevodi u pobuđeno stanje a zatim i u stanje inverzne naseljenosti
- ◆ Radna ili aktivna supstanca, je deo lasera u kojem se vrši kaskadno povećanje broja fotona
- ◆ Rezonator, je deo koji omogućuje dovoljno dug put fotonima kroz radnu supstancu, bez povećanja dužine lasera.

Sistem za pobudu može biti različito tehnički rešen. Kao rešenje može da se javi fleš lampa, sistem za električno pražnjenje kroz gas ili čak i neki drugi laser. Sam mehanizam ostvarenja inverzne naseljenosti može biti različit. Karakteristika svih tih mehanizama je da nisu termički. Inverzna naseljenost se najčešće ostvaruje na sledeće načine:

- ◆ Apsorpcijom elektromagnetskog zračenja, sistem se prevodi u pobuđeno stanje

$$A + h\nu = A^*$$

- ◆ Sudarima prve vrste prilikom električnog pražnjenja kroz gas, tom prilikom nastaje pobuđeni sistem i termalizovani elektron

$$A + e = A^* + e_{ter}$$

- ◆ Elektromagnetne oscilacije se mogu koristiti samo kod nekih posebnih tipova lasera. Kod pojedinih tipova tečnih i gasovitih lasera se mogu za pobudu koristiti i snažne elektromagnetne oscilacije.
- ◆ Hemijski laseri za pobuđivanje koriste hemijske reakcije.
- ◆ Kod nekih lasera za pobudu koristimo zračenje drugog lasera,

U zavisnosti od vrste radne supstance i njenog agregatnog stanja bira se i način pobude.

Radna ili aktivna supstanca predstavlja supstancu koja ispunjava prostor u kome se odigrava lavinsko umnožavanje broja fotona. Sama supstanca može biti u različitim agregatnim stanjima. Radi veće efikasnosti, odnosno maksimalno mogućeg pojačanja zračenja aktivna supstanca se stavlja u optički rezonator. Kao aktivna supstanca danas se koristi veliki broj jedinjenja, dok su u početku rada lasera to bili materijali koji su bili u to vreme spektralno ispitani. U zavisnosti od izbora radne supstance može se dobiti laser koji radi na samo jednoj frekvenciji (istina postoji odredena širina spektra koji se izrači), ili laser kod kojeg možemo podešavati frekvenciju prema potrebama.

Rezonatorska kutija ili optički rezonator je deo uređaja koji je u početku zadavao najviše muka pri konstrukciji lasera. Danas postoji nekoliko osnovnih tipova rezonatora koji imaju vašestruku ulogu. Osnovna uloga rezonatora je produženje puta zračenju kroz radnu supstancu sa ciljem multiplikacije broja fotona, za šta je potrebno da zračenje ima dovoljano dug put kroz optički aktivnu supstancu. Da se ne bi koristili laseri velikih dimenzija mi koristimo rezonatore, koji omogućuju dovoljno dug put zračenja kroz aktivnu supstancu - bez povećanja dimenzija lasera. Rezonator je ustvari prostor u koji se smešta radna supstanca, a na čijim krajevima se nalaze ogledala.

Mnogostrukim odbijanjem snopa fotona od ogledala mi ustvari povećavamo dužinu puta duž koga se vrši multipliciranje fotona. Geometrijski rezonatori mogu biti različitih oblika. Oni su najčešće oblika:

- ◆ Planparalelan rezonator se sastoji od dva paralelna ravna ogledala koja su postavljena na krajevima rezonatorske kutije na određenom međusobnom rastojanju. Jedno ogledalo je nešto manje refleksivnosti, dok je refleksivnost drugog maximalno moguća.
- ◆ Hemisferični rezonator je sastavljen od jednog ravnog ogledala i jednog udubljenog ogledala čija je žiža jednaka dužini rezonatorske kutije, odnosno jednaka rastojanju među ogledalima.
- ◆ Sferični rezonator se sastoji od dva sferna ogledala čije se žiže nalaze na polovini dužine rezonatorske kutije, odnosno na polovini rastojanja između ogledala.
- ◆ Konfokalni rezonator je rezonator se sastoji od dva konkavna ogledala, čije su žiže jednakе rastojanju među samim ogledalima.

Postavlja se pitanje dimenzija same rezonatorske kutije, jer na primer kod masera je ona istog reda veličine kao i što je talasna dužina samog zračenja. Znači kod lasera taj uslov je nemoguće ostvariti, jer su talasne dužine reda od 1 mm do 100 nm. Rešavanje ovog problema je moguće na više načina.

Prohorov, a gotovo istovremeno i potpuno nezavisno od njega, Schawlow i Townes su predložili i matematički izračunali kolika bi trebala da bude dužina rezonatora. Uz početni uslov da je $l \gg \lambda$, uzete su refleksione ploče velike refleksivnosti r i postavljene su na rastojanje l . Da bi se intenzitet zračenja prilikom prostiranja kroz sredinu smanjio e puta taj talas mora preći rastojanje l kroz datu sredinu

$$l' = \frac{l}{(1-r)}$$

U slučaju da je $r = 0.95$ tada je $l' = 20l$. Uslov rezonancije je dat izrazom $l = n\frac{\lambda}{2}$, tako da se iz ova dva izraza može grubo odrediti dužina potrebnog puta, a samim tim i dužina rezonatora. Međutim, čak i u slučaju da ovaj uslov nije zadovoljen do rezonancije može doći jer postoji verovatnoća da se od dovoljno velikih površina ogledala neki zraci odbiju pod uglom $\alpha \neq 90^\circ$ i tada ti zraci mogu da prelaze put koji odgovara dužini puta koja je potrebna za rezonanciju. Postoji izraz koji nam daje graničnu vrednost ugla u funkciji dimenzija ogledala D , karakteristika ogledala i rastojanja istih.

$$\theta_{\max} = \frac{D(1-r)}{l}$$

Ukupan broj talasa koji se obrazuju dat je izrazom:

$$N_{\text{tal}} = \frac{\pi^2 D^4 (1-r)}{2c^3 l} \nu \Delta \nu$$

Ako uzmemo npr. da je $D = 1 \text{ cm}$, $r = 0.95$, talasna dužina reda μ , a relativna promena frekvencije $\Delta \nu = 10^{-4}$ dobija se da je broj ostvarenih talasa reda 10^7 što

predstavlja broj koji je dovoljan za laseriranje. Zbog činjenice da prilikom prolaska zračenja kroz materiju , usled interakcija zračenja sa materijom, zračenje gubi na intenzitetu moramo uzeti u obzir i ove efekte. Ako se uzme da je koeficijent pojačanja α_p , a koeficijent slabljenja zračenja α_s tad je promena intenziteta zračenja data izrazom .

$$I = I_0 e^{(\alpha_p - \alpha_s)l}$$

Takođe možemo uvesti i koeficijent refleksije potreban radi samoodržanja oscilacija odnosno laseriranja.

$$re^{(\alpha_p - \alpha_s)l} > 1$$

Na osnovu ovih izraza se može odrediti dužina razonatora i rezonantna frekvencija

$$n\lambda = 2l$$

tako da konačan izraz za rezonantnu frekvenciju glasi

$$\nu = n \frac{c}{2l}$$

Tipovi lasera:

Sami laseri se mogu podeliti po više osnova. Sve vrste lasera imaju iste osnovne elemente. Podelu lasera možemo izvršiti na sledeći način:

◆ Prema režimu rada dele se na:

1. Pulsne lasere
2. Kontinualne lasere

◆ Prema agregatnom stanju radne supstance ih delimo na:

1. Gasne lasere
2. Tečne lasere
3. Lasere čija je aktivna supstanca u čvrstom stanju

◆ Prema stanju u kome se nalazi radna supstanca delimo ih na:

1. Atomske lasere
2. Molekulske lasere
3. Jonske lasere
4. Free-elektron lasere

Veoma je teško izvršiti podelu lasera tako da se u okviru jedne grupe nađe samo jedan tip lasera , jer se mnoge grupe međusobno preklapaju. Pored ove podele, koja je veoma opšta, postoji čitav niz podgrupa lasera. U daljem delu rada ću navesti osnovne razlike ovih tipova lasera i načine njihovog rada.

Pulsni laseri su laseri koji ne daju kontinualan laserski snop, već je snop izdeljen u impulse. Takav laser je i prvi laser, rubinski laser. Kod ovih lasera je osnovna karakteristika da je izračena veoma velika energija u kratkom vremenskom intervalu. To vreme impulsa je mnogo kraće od jedne sekunde. Oni mogu imati čak i nižu srednju energiju od kontinualnih lasera. Izračena energija skoncentrisana u veoma kratkom



vremenskom intervalu i na maloj površini, pa je trenutna snaga zračenja mnogo veća nego kod kontinualnih lasera. Unutar ove grupe lasera imamo podelu na:

- ◆ lasere sa veoma kratkim impulsima čije trajanje ne prelazi vreme od jedne pikosekunde. Ovi laseri imaju ogromnu izračenu snagu po jedinici površine, ona premašuje vrednost 10^{20} Wcm^{-2}
- ◆ lasere čiji impuls traje duže od jedne nanosekunde, to su nešto stariji laseri velikih snaga i koriste se u istraživanjima u oblasti fuzije.

Kontinualni laseri su laseri koji emituju kontinualno laserski snop u trajanju dužem od jedne sekunde. Ovi laseri obično imaju relativno veliku srednju snagu koja je uporediva sa snagom tipičnih pulsnih lasera. Kontinualni laseri koji imaju izuzetno veliku prosečnu snagu obično se nazivaju vojnim laserima, jer se takvi laseri koriste pri uništavanju projektila. Pored ovih lasera u ovu grupu spadaju i gasodinamični laseri čiji rad se zasniva na veoma brzom adijabatskom šitenju gasa pri velikim temperaturama. Ovakvi laseri rade još od 1966.g. U grupu kontinualnih lasera spada i amonijačni laser koji ima nisku izlaznu snagu, a bazira se na nisko energetskim prelazima unutar molekula.

Gasni laseri su laseri koji radnu supstancu imaju u gasovitom agregatnom stanju. Ova grupa lasera ima svoju internu podelu na:

1. Atomske gasne lasere ($He - Ne, Cs, \dots$)
2. Molekulske gasne lasera (Ar, Kr, \dots)
3. Jonske gasne lasere ($CO_2, N_2, XeBr, \dots$)
4. eksimerno - halogene lasere
5. hemijske lasere

Ova podela je izvršena na osnovu stanja u kom se nalazi aktivna supstanca.

Tečni laseri imaju radnu supstancu u tečnom stanju, a mogu se podeliti na sledeće podtipove:

1. lasere "kaveznih molekula" među koje spada i helatni laser.
2. lasere sa organskim bojama

Čvrsti laseri su laseri čija radna supstanca ima čvrsto agregatno stanje. Unutar ove grupe javlja se i podele na :

1. kristalne lasere (rubinski, YAG, ...)
2. amorfne lasere (stakleni, plastični, ...)

U nastavku rada će biti podrobnije objašnjen po jedan laser od navedenih tipova.

6. PRVI LASERSKI SISTEMI

6.1. MASER

Laserski sistemi su svi sistemi koji koriste stimulisani emisiju kao osnov svoga rada. Podela sistema se vrši na osnovu frekventnog opsega u kojima se nalazi dobijeno zračenje. Osnovna podela je na

1. Maseri, koji rade u mikrotalasnem delu spektra
2. Laseri, koji rade u vidljivom i ultraljubičastom delu spektra

Prednost ovog izvora u odnosu na druge izvore radiotalasa je u tome što je on davao zračenje čija je frekvencija veoma uske širine, gotovo da zrači samo jednu frekvenciju.

6.1.1 . PRVI MASER

Vođeni željom da se omogući što kvalitetnija spektroskopija uzoraka, a zaintrigirani mogućnošću stimulisane emisije mnogi naučnici su krenuli u realizaciju aparata koji bi stimulisanom emisijom ostvario veoma snažno zračenje. Pored toga bili su zainteresovani i mogućnostima radara koji je osmišljen i korišćen u vojne svrhe tokom drugog svetskog rata. Prvi rad koji je vodio ka realizaciji masera, nakon Einstein-ove teorije, je rad R.W.Landenberga iz 1928.g. koji je potvrdio postojanje stimulisane emisije i negativne apsorpcije. Tek 1940.g. V.A.Fabrikant je nagovestio mogućnost ostvarenja inverzne naseljenosti. Nakon sedam godina W.E.Lamb i R.C. Rutherford su na osnovu analiziranja spektra vodonika pokušali i ostvarili prvu stimulisanu emisiju. Nedugo nakon toga 1948. g. C.H.Townes, objavljuje rad koji se odnosio na pojačanje svetlosti u mikrotalasnem delu spektra, tako je i nastalo ime uređaja – akronim pojave (Microwave Amplifications by Stimulated Emission of Radiation) - **maser**. Sam princip rada masera je zasnovan na radovima iz kvantne teorije koji su bili objavljivani tokom perioda od 1950.g do 1953.g.. Prvi operabilni maser napravljen je 1951.g. a osmislio ga je C.H.Townes. U realizaciji učestvovali su i H.Zeiger i J.Gordon koji su mu bili saradnici na *Columbia University*. Maser je uređaj koji stimulisanom emisijom, bilo atomskog ili molekulskog sistema, generiše dodatno zračenje. To generisano zračenje ima iste osobine kao i primarno zračenje. Da bi se dobio dovoljan broj fotona prvo bitno sistem moramo prevesti u stanje inverzne naseljenosti. Prvi maser je koristio amonijak kao radnu supstancu, jer je kod amonijaka prvi put ostvarena invezna populacija. Ovu inverznu populaciju kod amonijaka Townes i saradnoci su dobili fizičkim razdvajanjem molekula koji se nalaze na višim kvantnim stanjima od onih na nižim kvantnim stanjima. Ovo razdvajanje je obavljeno tako što se molekulski snop propuštao kroz sistem fokusirajućih elektroda koje su formirale kvadropolno cilindrično elektrostatičko polje. Usled dejstva sile molekuli koji su nepobuđeni napuštaju snop, a molekuli na višim energetskim stanjima nastavljaju kretanje u vidu snopa i stižu do rezervoara. Kada se rezervoar sa separisanim, pobuđenim molekulima, ozrači zračenjem nekog intenziteta čija je frekvencija 24 GHz (koja je ujedno rezonantna za molekule amonijaka), tada je izlazno zračenje mnogostruko intenzivnije od početnog. Ovaj maser je imao manu jer izlazni signal nije bio kontinualan. Sa današnjeg stanovišta može se reći da i amonijačni maser može da radi u kontinualnom režimu – ukoliko je izlazno zračenje dovoljno intenzivno tada se

može desiti da spoljno zračenje više ne bude potrebno za pobudu sistema, jer postoje somoodržive oscilacije koje kompenzuju unutrašnje gubitke i tada se sam molekulski sistem ponaša kao oscilator.

6.1.2. NASLEDNICI PRVOG MASERA

U veoma kratkom roku posle masera koji je konstruisao Townes sa saradnicima, kao nezavisni konstruktor masera javio se J. Weber koji je radio na *Maryland University*.

U cilju stvaranja kontinualnog masera izučavani su sistemi koji imaju više od dva energetska stanja, jer se tada zračenje može ostvariti i bez vraćanja sistema u osnovno stanje, čime se održava stanje inverzne populacije. Ovu ideju su realizovali u Moskvi u *Lebedev laboratoriji*, takođe 1951.g. N. Basov i A. Prohorov. 1956.g. N. Bleembergan na *Harvard University* je predložio realizaciju prvog masera sa tri energetska nivoa sa materijalom koji je bio u čvrstom agregatnom stanju.

Za svoj doprinos razvoju masera Townes, Basov i Prohorov su dobili Nobelovu nagradu 1964.g.

Sami maseri mogu da se koriste dvojako, kao pojačavači, i kao oscilatori koji se koriste za izvore koherentnog zračenja. Jedan od najčešće korišćenih masera je maser čiji rad se zasniva na prelazima kod atoma vodonika prilikom kojeg se ostvaruje radna frekvencija od 1.421 MHz. Ovaj maser daje veoma jasan i konstantan signal i stoga se koristi i kao etalon za atomske časovnike. Današnji maseri koriste i paramagnete jonske kristale.

6.2. LASER

6.2.1. “TRKA” ZA TEORIJU O PRVOM LASERU

Prvi laser je osmišljen sa ciljem da se poboljša spektralna analiza materijala. Pod pretpostavkom da se može ostvariti stimulisana emisija u materijalima koji se ispituju, došlo se na ovu ideju da prilikom ozračivanja materijala dobijemo odziv koji će biti lakši za analizu, jer će intenzitet zračenja biti mnogostruko veći od primarnog zračenja. Još pre realizacije prvog masera, radove u ovoj oblasti je izvršio i objavio V. A. Fabrikant sa svojim studentima, u kojima je pokušao da ozračivanje bude u ultraljubičastom delu spektra. Njegovi radovi, koji su objavljeni 1951.g. nisu imali neki bitan uticaj na razvoj lasera, jer ni u tadašnjem SSSR-u nisu ostavili značajniji trag.

Pored ovog dela značajni doprinos u razvoju lasera ima i R.H. Dicke koji je 1954.g. predložio da se koristi “optička bomba” u vojne svrhe. U procesu uspostavljanja inverzne naseljenosti koristi kratkotrajni svetlosni impuls koji zatim proizvodi veoma snažan svetlosni snop, usled spontane emisije. U svom radu on se suočio sa problemom pojačanja tog snopa i 1956.g. je patentirao rezonantnu optičku kutiju za “pojačanje molekulskog zračenja i procese generisanja”. Rezonantna kutija se sastojala od para paralelnih ogledala. Takav par ogledala predstavlja i Fabry–Perot–ov interferometar.

1957.g. G. Gould je prvi put postavio definiciju lasera kao uređaja koji radi na principu stimulisane emisije u optičkom delu spektra. Sam G. Gould je radio doktorsku tezu, uz mentorstvom P. Kusch-a (koji je sa W. Lamb-om **1955.**g. podelio Nobelovu nagradu), ali je zbog svojih prokomunističkih stavova bio šikaniran od strane državnog i naučnog establišmenta. Iz tog razloga je sva svoja istraživanja mnogo teže ostvarivao u odnosu na Townes-a i Schawlow-a, koji su iza sebe imali kompletну strukturu *Columbia University* i *Bell Labs*. Obzirom na mala sredstva kojima je raspolagao i opštu nepopularnost Gould je patent o laseru pokušao da prijavi uz sponzorstvo izvesnog J. Goulda, vlasnika prodavnice. Međutim taj patent nije dostavljen patentnom zavodu na vreme i G. Gould je izgubio sva prava u vezi sa laserom, jer ga je pretekao advokatski tim *Bell Laboratorije* koji je za C.H.Townes i A.Schawlowa prijavio patent.

Svakako prvi rad koji se odnosi na optički maser, koji je kasnije nazvan laserom, objavio je C.H. Townes sa A. Schawlow-om. Njih dvojica su saradivali na izradi kataloga tablica mikrotalasne spektroskopije dok su bili zajedno na *Columbia University*. U međuvremenu A. Schawlow se preselio i zaposlio u istraživačkom centru *Bell Labs*. Prilikom jedne posete C.H. Townes je predložio svom bivšem saradniku da se pozabave problemom " optičkog i infracrvenog " masera sa ciljem još bolje spektralne analize. Ta ideja se rodila **1957.**g. , a rad u vezi zadatog problema bio je objavljen u decembarskom broju *Physical Review* **1958.**g. Ovaj rad predstavlja kamen temeljac u razvoju laserske tehnike. Prepisa *Bell Labs - Columbia University* bila je veoma intenzivna i to sve u cilju realizacije prvog lasera. Nisu svi bili jednak oduševljeni idejom o laseru, naprotiv, neki su tu ideju čak i omalovažavali, tako da je tek na uporno insistiranje C.H.Townes-a podnet zahtev za patent. Samo omalovažavanje je poticalo iz vremena kada je Townes sa saradnicima konstruisao prvi maser, jer u to vreme se koristio podsmešljiv akronim za radove koje je sprovodio Townes. Po njima maser je bio akronim za sredstvo za sticanje podrške za skupa istraživanja (Means of Acquiring Support for Expensive Research). Posle dosta muka laser **1960.**g. dobija svoj patentni broj *U.S. patent No 2.929.922* , kojim se sve zasluge za laser kao genijalnom izumu pripisuju dvojcu Townes-Schawlow .

Osnovna ideja i jednih i drugih je bila da se mehanizmi primenjeni kod masera primene i kod kvantnog pojačavača koji radi u vidljivom i infracrvenom delu spektra. Međutim, baš iz tog razloga su naišli na problem, jer je razlika u talasnim dužinama između ove dve vrste zračenja više od hiljadu puta. Zbog toga se rezonator iz masera nije mogao koristiti kod lasera, pa je nastao problem rezonatorske kutije za lasersko oscilovanje. To je bio jedan od glavnih problema, mada je bilo i drugih. Poznato je da se rezonancija zračenja javlja ako zračenje, tj. talas, putuje kroz neku sredinu celobrojni umnožak svoje talasne dužine. Zbog toga je najjednostavnije napraviti rezonatorsku kutiju čija dužina iznosi polovinu talasne dužine samog zračenja. Ovaj princip je bilo moguće ostvariti kod mikrotalasnog zračenja, jer je talasna dužina ove vrste zračenja reda centimetra, ali kod optičkog ili infracrvenog zračenja tipične talasne dužine su reda mikrometra i manje, to je bilo nemoguće. Postavljalo se pitanje kako ostvariti rezonanciju i kako napraviti rezonatorsku kutiju tako malih dimenzija. Rešenje tog problema je preuzeto od Dickea koji je za pojačanje intenziteta snopa elektromagnetskog zračenja koristio Fabry-Perot-ov interferometar kod "optičke bombe". Kod lasera rezonatorska kutija je ustvari par ravnih, međusobno paralelnih ogledala koja su na rastojanju koje iznosi nekoliko desetina hiljada talasnih dužina svetlosti. Svetlosni snop se reflektuje sa njihovih površina, pri prolasku kroz optički aktivnu sredinu pojačava se intenzitet zračenja, a zatim kroz jedno od ogledala napušta rezonatorsku kutiju,

formirajući laserski snop. Jedno ogledalo ima takav koeficijent refleksije da se celokupno zračenje reflektuje, dok drugo ogledalo deo zračenja propušta.

Za teorijsko objašnjenje lasera Townes i Schawlow su od stane naučnih krugova bili veoma poštovani i kao rezultat toga poštovanja oni su dobitnici Nobelove nagrade, mada ne istovremeno (Townes 1961.g. , a Schawlow 1981.g.). Zasluge Goulda u oblasti lasera i laserske tehnike gotovo da se ni ne spominju, mada je njegov doprinos u postavljanju osnova za tu oblast zaista znatan. Njegov doprinos i njegov rad je gotovo zanemaren od strane naučnog kruga sredinom sedamdesetih godina prošlog veka, sve dok sud nije osporio patent Townesa i Schawlowu i prava na patent dao Gould-u 1970.g. Tek nakon toga Gould se ponovo pojavio kao značajan naučnik u laserskoj tehnici. Sve do 1977.g. Gould je radio gotovo bez nekih bitnih otkrića, a tada je ponovo počeo da prijavljuje patente u oblasti laserske tehnike i u oblasti optičkih vlakana. To vremensko odlaganje prihvatanja Gould-ovih ideja je te ideje učinilo još više vrednim, tako da je Gould dobio i materijalnu satisfakciju.

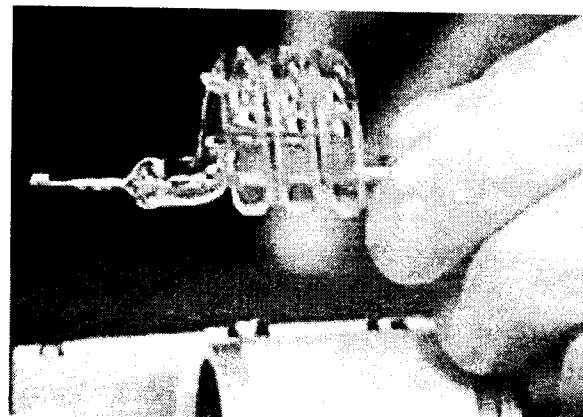
6.2.2. KONSTRUKCIJA PRVOG LASERA

Praktično dokument o mogućnosti izgradnje lasera koji su objavili Townes i Schawlow bio je ustvari startni pištolj za trku ko će pre napraviti laser. Mnogi istraživači, koji su radili na konstrukciji i usavršavanju masera, su krenuli u pokušaje realizacije i laserskog uređaja. Pored njih i naučnici iz drugih oblasti su eksperimentisali na polju konstruisanja lasera, jer su bili zaintrigirani pričom o laseru.

Prvi pokušaji su bili sa materijalima čije su energetske strukture bile dovoljno istražene u spektroskopskim analizama. Mogućnosti helijum-neonskog lasera izučavao je A. Javan, još i pre objavlјivanja dokumenta od strane Townesa i Schawlowa, u okviru eksperimenata koji su vršeni u *Bell Laboratoriji*. Na *Columbia University* Townes, uz saradnju Cummins-a i Abella, je izučavao energetsku strukturu kalijumovih para sa ciljem da se kalijum iskoristi kao aktivna supstanca za laser. Istraživanja kod gotovo svih naučnika su bila usmerena na pare alkalnih metala, ali to nisu bili jedini istraživani kandidati za aktivne supstance za lasere. U tadašnjem SSSR-u, N. Basov je proučavao poluprovodnike sa željom da ih iskoristi u konstrukciji lasera. U samom startu istraživanja su bila skromno finansirana, izuzev istraživanja koja su obavljana u *Bell Laboratoriji*. Drugo značajno istraživanje je finansiralo Ministarstvo Odbrane preko agencije za napredna istraživanja koja je finansirala malu kompaniju TRG, u kojoj se bio zaposlio Gordon Gould, po napuštanju *Columbia University*. Ubrzo po dolasku u firmu Gould je svoje poslodavce zainteresovao za ideju realizacije lasera, koji su bili spremni da investiraju oko 300.000 \$ za istraživanja. To je bio dobar poslovni korak za TRG, jer je kasnije od vlade dobila ugovor vredan 1.000.000 \$. Obzirom da se Ministarstvo Odbrane aktivno uključilo u projekat realizacije lasera, a zbog njegove političke nepopularnosti kao iz razloga sigurnosti, Gould je bio praktično isključen iz same realizacije projekta. Ostali naučnici, koji su radili na projektu su mogli da se konsultuju sa njim, ali nisu mogli da ga informišu o toku projekta. Sam projekat je zbog toga bio relativno usporen, u odnosu na mogućnosti, a kasnije je i napušten jer se ispostavilo da pare alkalnih metala nisu pogodan materijal za izradu lasera.

Među mogućim kandidatima se našao i sintetički rubin, koji je ustvari korund koji je dopiran sa atomima hroma. Hrom je imao veliki doprinos u maserima, a i struktura energetskih nivoa mu je bila dobro poznata na osnovu spektroskopskih analiza i stoga

je rubin postao jedan od značajnih kandidata za laserski materijal. Rubin je bio predložen od strane Schawlow-a koji je svoja istraživanja sprovodio za *Bell Laboratoriju*. Posle izvesnog vremena Schawlow je došao do zaključka da je pogrešio i rubin je proglašio za neodgovarajući materijal **1959.g.** To njegovo mišljenje o nepodobnosti se baziralo na osnovu neadekvatnih podataka, koji su nedugo zatim bili dokazano pogrešni. Gotovo istovremeno Theodore Maiman je koristeći znanje iz maserske tehnike pokušavao da rubin iskoristi u laserske svrhe, na *Hughes Research Laboratories, Malibu, California*. Prvobitno je Maiman htio da pomoću rubina shvati sve potrebe za realizaciju lasera, a da zatim pređe na neki drugi pogodniji materijal. Ipak tokom rada je ubedio sebe da Schawlow nije u pravu i da rubin može dati dobre rezultate u laserskoj tehnici, tj da se pomoću rubina kao aktivne supstance može napraviti dobar laser. Istina, Maiman je ustanovio da rubinski laser ne može dati kontinualan laserski snop, ali je za demonstraciju rada lasera sasvim dovoljno i to kratkotrajno, impulsno, laseriranje. Prvi put, zvanično demonstrirano, laser je proradio **16. 05. 1960.** g. Iako je pokazao da laser radi, mnogi naučni časopisi su negirali njegov uspeh, jer su rubinski laser nazvali " samo još jednim maserom ". Časopis *Physical Review Letter* koji je publikovao nova dostignuća, koji je osnovao Samuel Gouldsmit (otkrio spin elektrona), je bio zatrpan idejama o novim maserima tako su odlučili da više ne objavljaju nove ideje o maserima. Maiman-ov rad o rubinskom laseru je iz tog razloga je olako odbačen. Maiman je uprkos tome nastavio da radi na tom dokumentu uz podršku rukovodstva *Hughes Laboratorije*. Demonstracija rada lasera i objavlјivanje fotografija lasera je bilo propraćeno negodovanjem zbog veličine uređaja jer se predpostavljalo da takav uređaj mora biti relativno većih dimenzija. Maiman-ov laser je bio malih dimenzija, gotovo minijaturan, tako da je mogao stati u šaku, kao što pokazuje slika 6.



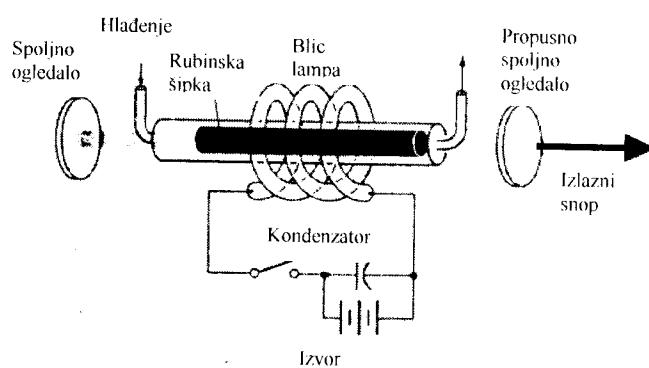
Sl.6 Maiman sa prvonapravljenim laserom

Bilo je insistirano, od strane novinara da sledeći laser koji bude prezentovan bude mnogo većih dimenzija. Čak i danas se distribuiraju slike na kojima Maiman pozira sa laserom koji nije prvi napravljeni laser, već je na slikama taj drugi, uvećan model. Maiman je zatim napisao koncizan izveštaj koji je veoma brzo objavljen u julskom broju britanskog nedeljnika " *Nature* ", što je ubrzo izazvalo Gouldsmita da prizna svoju gršku i da **06.08.1960.g.** objavi rad o prvom laseru koji radi. Nedugo zatim mnoge laboratorije su napravile svoj rubinski laser na osnovu Maiman-ovog uputstva, stim da je većina koristila laser koji je koristio veću fleš lampu. Schawlow je sa saradnicima napravio još veći laser. Pored toga laseri su počeli da se dele na " tamne " i " crvene " u zavisnosti od koncentracije hromovih jona u samom rubinu.

Posle nekoliko meseci, tačnije novembra 1960.g. P. Sorokin i M. Stevenson su konstruisali drugi laser, uranijumski laser. Oni su konstruisali laserski sistem sa četiri nivoa, koristeći uranijum dopiran kalcijum fluoridom. U svakom slučaju Maiman je pobedio u trci za prvi laser. Za svoje delo je dobio nagradu Japana, ali mu je izmakla Nobelova nagrada, koju su 1964 podelili Townes, Basov i Prohorov za teorijske doprinose u oblasti lasera i laserske tehnike. Razvoj rubinskog lasera nije završen sa Maiman-ovim modelom, već je na njemu rađeno i dalje. Kao posledica toga dobijen je kontinualni rubinski laser 1961.g. koji je napravljen u *Bell Laboratoriji* od strane W. S. Boyla i D. F. Nelsona.

6.2.3. NAČIN RADA PRVOG LASERA

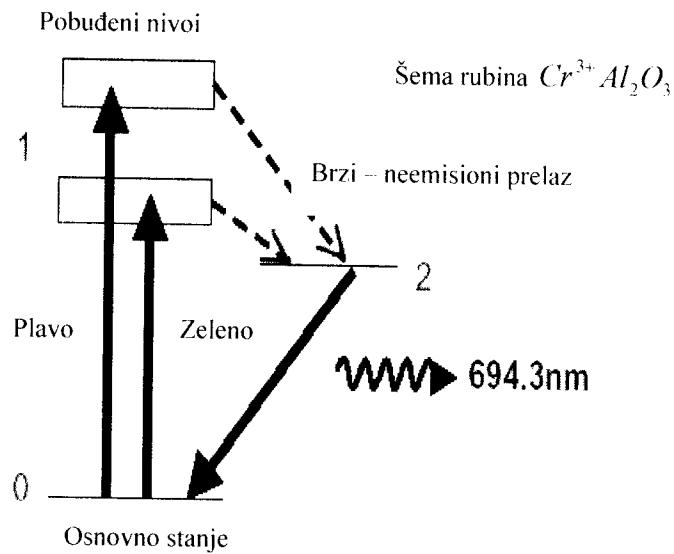
Prvi laser je bio sačinjen od šipke rubina čiji su krajevi bili polirani i presvučeni srebrnom reflektujućom površinom koja je smeštena u unutrašnjost helikoidne ksenonske fleš lampe, kao na slici 7.



Sl.7. šematski prikaz rubinskog lasera

Tipične vrednosti kondenzatora su takve da on može da izdrži nekoliko impulsa energije od oko $2J$. Sa obzirom na vreme trajanja impulsa dobijaju se vršne snage koje su reda nekoliko desetina, pa čak i stotina kW . Izlazno zračenje je multimodno. Najveće izlazne snage su do $100MW$, a trajanje impulsa je između 20 i 30 nanosekundi. I ovaj impuls se dalje može povećavati ako se propusti kroz drugi pojačavački sistem – bez spoljnih ogledala i sa sinhronizovanom pobudom aktivne sredine. Rubinski laser spada u grupu lasera čija se radna supstanca nalazi u čvrstom agregatnom stanju i spada u grupu pulsnih lasera. Rubin je usvari kristalni Al_2O_3 koji je dopiran jonima hroma Cr^{3+} u uobičajenoj koncentraciji od 0.05%. Sam Al_2O_3 je bezbojan, tako da možemo reći da su nečistoće ustvari uzrok obojenosti. Laseriranje je ustvari omogućeno prelazima između energetskih nivoa Al_2O_3 i Cr^{3+} . Rubinski laser spada u lasere koji se nazivaju i laserima sa tri nivoa. Rubin pokazuje veoma jaku absorpciju zračenja unutar plave i zelene oblasti, otuda i njegova crvena boja. Prilikom ozračivanja, jakom fleš lampom, elektroni bivaju pobuđeni do plavog i zelenog (1) energetskog nivoa koji imaju neku širinu. Zatim se veoma brzo vraćaju neemisionim prelazom, usled gubitaka energije pri sudarima sa kristalnom rešetkom, do energetskog nivoa (2), usled čega se javlja inverzna naseljenost nivoa (2) u odnosu na nivo (0). Nivo (2) je metastabilan i elektroni se na njemu nalaze dovoljno dugo da se ostvari

inverzna naseljenost. Da bi se ovaj proces odigrao potrebno je da se pobuđeni nivoi brzo i puni i prazni, a da se metastabilni nivo sporo prazni. Da bi se pobudeni nivo brzo punio koristi se snažna fleš lampa koja svojim zračenjem uspeva da prebaci veliki broj elektrona u pobuđeno stanje, za relativno kratko vreme. Na taj način stvara se velik broj elektrona koji su u mogućnosti da neemisionim prelazom popune metastabilni nivo, o čemu će u sljedećoj sekciji biti reč.



Zatim se odigrava prelaz sa nivoa (2) na nivo (0), što predstavlja laserski prelaz, uz emisiju zračenja crvene boje sa talasnom dužinom od 694.3nm . Ovaj tipično impulsni laser ima obično trajanje impulsa reda $5 \cdot 10^{-4}\text{s}$, dok vreme koje sistem provede na višem energetskom stanju prosečno iznosi oko $3 \cdot 10^{-3}\text{s}$. Šematski prikaz prelaza dat je na slici 8.

Sl.8. Šema prelaza kod rubinskog lasera

7.RAZVOJ LASERSKIH SISTEMA

Nakon prvog uspešno realizovanog laserskog sistema, isti je bio usavršavan, su se razvijali novi sistemi. Tabela 1 daje sažet prikaz razvoja lasera kroz neka značajna otkrića.

tab. 1. Hronološki pregled značajnijih događaja u istoriji lasera

Datum	Pronalazač	Pronalazak / Ustanova
1960	Peter P Sorokin Mirek Stevenson	Prvi sistem sa četiri energijska nivoa. Uranijumski laser/ Bell Lab.
1961	A G Fox and T Li	Teorijska analiza optičkih rezonatora / Bell Lab.
1961	Ali Javan, William Bennet Jr. Donald Herriot	Konstruisan Helijum–Neonski laser / Bell Lab.
1962	Robert Hall	Osmišlje prvi poluprovodnički laser/ General Electric Lab.
1964	J E Geusic, H M Markos L G Van Uiteit	Konstruisan prvi operabilni Nd:YAG laser/ Bell Lab.
1964	Kumar N Patel	Izumeo CO ₂ laser / Bell Lab.
1964	William Bridges	Napravljen Argon–jonski laser/ Hughes Lab.
1965	George Pimentel J V V Kasper	Prvi hemijski laser California University, Berkley.
1966	William Silfvast Grant Fowles i Hopkins	Prvi laser koji koristi pare metala - Zn/Cd - Utah University
1966	Peter Sorokin, John Lankard	Konstruisan prvi laser sa org.bojama/ IBM Lab.
1970	Nikolai Basov	Prvi eksimer laser koji radi na čist plemenit gas(Ksenon) / Lebedev Lab, Moscow.
1974	J J Ewing i Charles Brau	Prvi excimer sa plemenitim gasom+halogenid / Avco Everet Lab.
1977	John M .J .Madey sa saradnicima	Prvi free-elektronski laser/ Stanford University.
1980	Geoffrey Pert sa saradnicima	Teorija za prvi laser koji radi u području X–zraka / Hull University, UK.
1981	Arthur Schawlow N.Bloembergan	Dobitnici Nobelove Nagrade za radove na spektroskopiji i nelinearnoj optici
1984	Dennis Matthew sa saradnicima	Prva demonstracija rada lasera u opsegu X–zraka / Lawrence Livermore Labs.

7.1. GASNI LASERI

Gasni laseri predstavljaju sve laserske sisteme kod kojih je radna ili aktivna supstanca u gasovitom agregatnom stanju, bez obzira da li je gas atomski, molekulski ili jonski. Ovi tipovi lasera su veoma često primenjivani, jer su laki za korišćenje, jednostavne konstrukcije. Mogu da koriste za pobudu praznjenje kroz gas, radio-talase, optičko pobudivanje pomoću drugih lasera, pa čak i snopove elektrona. Najčešće se laserski sistem sastoji od keramičke ili staklene cevi u koju je smešten gas. Ovi laseri mogu da rade u kontinualnom i pulsnom režimu rada. Neki laseri koji u osnovi rade u kontinualnom režimu malim konstrukcionim promenama mogu da rade u pulsnom režimu. U tabeli 2. je prikazan pregled gasnih lasera i njihove osnovne osobine

tab. 2. Pregled značajnijih gasnih lasera i njihove osobine

Naziv	Aktivna sredina	Izlazna snaga puls / kontinualni režim	Osobine zraka	Primena
Helijum-Neon	Mešavina helijuma i neon-a, pobuda električnim praznjenjem	samo kontinualan režim 0.2 mW-20 mW	Veoma dobro definisan, 633 nm	Svugde gde se ne zahteva snažno zračenje: merenja, analize
Argon	Jonizovan argon	kon. od 10 mW –25 W Puls reda kW	Dobro definisan snop, više linjski	Merenje velikih udaljenosti i protoka gasova i tečnosti, pokazivači na aerodromima, holografija,
Ugljen-dioksid	Gas CO ₂	10 mW –25 kW u kontinualnom Ostvaruje veće snage u pulsnom režimu	Slabo na 10.6μm; daleka IC oblast, neophodna specijalna optika bazirana na Ge	Veoma efikasan za industrijsku upotrebu.U vojne svrhe za uništavanje na malim rastojanjima

7.1.1. HELIJUM-NEONSKI LASER

Helijum-neonski ili He-Ne laser je prvi kontinualni laser. Konstruisao ga je A. Javan sa saradnicima 1961.g. Ovaj laser je gotovo dvadeset godina bio dominantan, dok ga nisu prevazišli poluprovodnički laseri. Osnovne osobine He-Ne lasera su

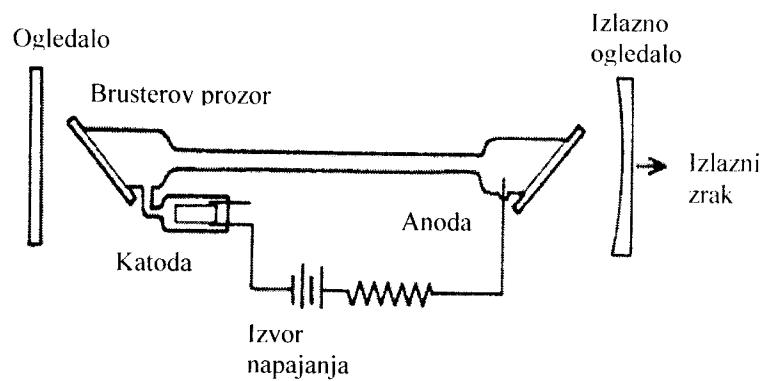
- ◆ Emisija vidljive svetlosti
- ◆ Radi u kontinualnom režimu
- ◆ Snop je veoma dobro kolinisan
- ◆ Relativno niske cene
- ◆ Veoma stabilan i siguran pri radu

Ovaj laser predstavlja laserski sistem male snage, retko koji laser ovog tipa može dati snagu koja prelazi $100mW$ u kontinualnom režimu. Zbog toga je primena ovih lasera ograničena na operacije kod kojih nije potrebana snaga, kao što su: skeniranje bar kodova, interferometriju i različita merenja.

Aktivna supstanca kod ovog lasera je smeša neona i helijuma u razmeri $1:10$. Pobuda ovog sistema se vrši električnim pražnjenjem kroz smešu gasova, prilikom čega se kod neona javlja oko 150 različitih laserskih prelaza, mada samo je nekolicina od praktičnog značaja. Sama pobuda se vrši na pritisku gase od $100Pa$ a radni napon je $2kV - 4kV$. Prevodenje sistema u pobuđeno stanje vrši se sudarima prve vrste na osnovu relacije:



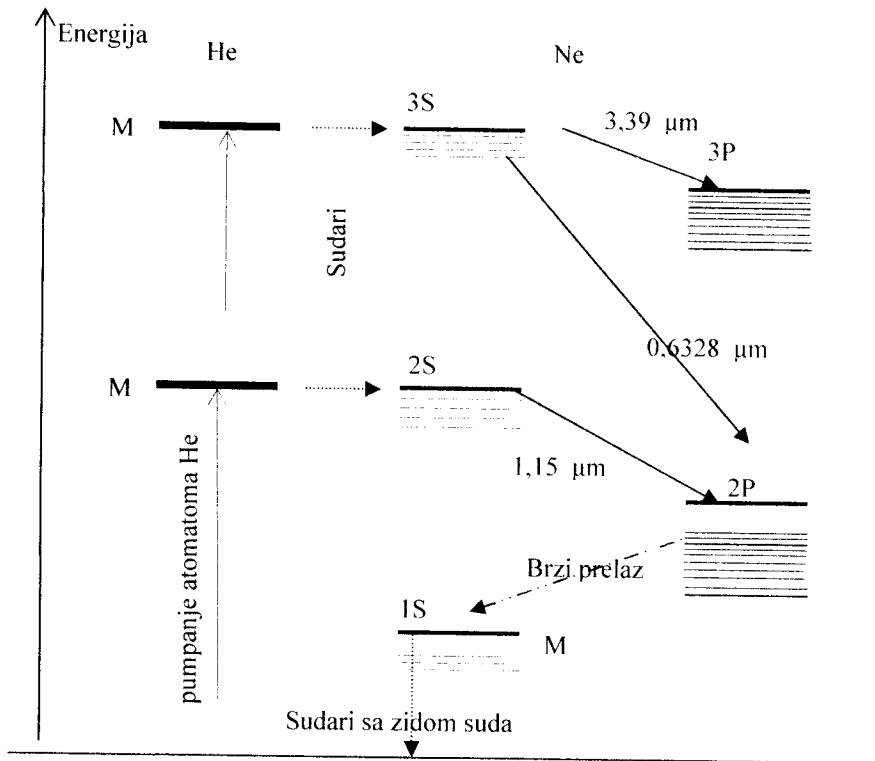
Pražnjenje se izaziva impulsom visokog napona, a zatim se kroz gas održava struja $10mA - 20mA$. Krajevi cevi su zatvoreni Brusterovim prozorima, koji su pod Brusterovim uglom nagnuti i koriste za polarisanje izlaznog snopa svetlosti. Snaga ovih lasera je uobičajeno mala, oko $20mW$, snop je širine oko $1mm$ i ima malu divergenciju. Spektralna širina linije na $0,6328\mu m$ je oko $1500MHz$, a ako je pojačanje aktivne supstance veće onda je širina oko $1000MHz$. Pored ovog prelaza koji daje zrak u vidljivom delu spektra javlja se i zračenje u bliskoj infracrvenoj oblasti $3.39\mu m$ koje može biti tako intenzivno da za laseriranje ne treba rezonator, već se samo jednim prolaskom kroz medijum ostvaruje veoma snažan izlazni snop.



Sl.9. Šematski prikaz izgleda He-Ne lasera

Komercijalni He-Ne laseri danas koriste različite prelaze tako da se dobijaju zraci raznih boja: zelena $\lambda = 543nm$, narandžasta $\lambda = 611.9nm$, crvena $\lambda = 632.8nm$, i nekoliko prelaza u infracrvenoj oblasti spektra. Sam način rada He-Ne lasera je veoma jednostavan i njegov šematski prikaz dat je na slici 9. Najbolje rezultate postiže ako se centralna linija izračene linije poklopi sa Fabry-Perotovom rezonansom, a najlošije ako se dogodi da se pojave oba longitudinalna moda sa istim intenzitetom.

Pobuda ili optičko pumpanje se odvija u više etapa, što je prikazano na *slici 10*. Prva etapa su sudari prve vrste atoma helijuma sa slobodnim elektronima, ovi prvi prevode u metastabilna stanja M . Dok je u pobuđenom stanju helijum u sudarima sa nepobuđenim atomima neona im predaje izvesnu količinu energije, što je rezonantni transfer energije sa $M \rightarrow 2S$ i $M \rightarrow 3S$. Sa obzirom da su stanja M helijuma metastabilna, vreme života je dovoljno dugo da bi se izvršili sudari koji će pobuditi neon. Ovim pobuđivanjem je ostvarena inverzna naseljenost nivoa $2S$ i $3S$ u odnosu na nivoe $2P$ i $3P$ kod neona. Emisioni prelaz $2P$ na osnovni nivo je veoma brz pa se stoga naseljenost nivoa $2P$ obično i ne uzima u obzir, jer se nivo $2P$ jako brzo prazni. Pored toga, treba naglasiti da su izbornim pravilom, prelazi $S \rightarrow S$ i $P \rightarrow P$ zabranjeni. Ovaj laser može raditi na više talasnih dužina u zavisnosti koji smo optički sistem izabrali. Najčešće se koristi laser koji ima dominantan prelaz sa $2S$ na $2P$. Kod ovog lasera se ostvaruje inverzna naseljenost nivoa $3S$ u odnosu na nivo $2P$ i ovaj laser nam daje svetlost talasne dužine od $632,8\text{nm}$ odnosno radi u crvenom delu optičkog spektra. Šema prelaza kod He–Ne lasera data je na slici 10.



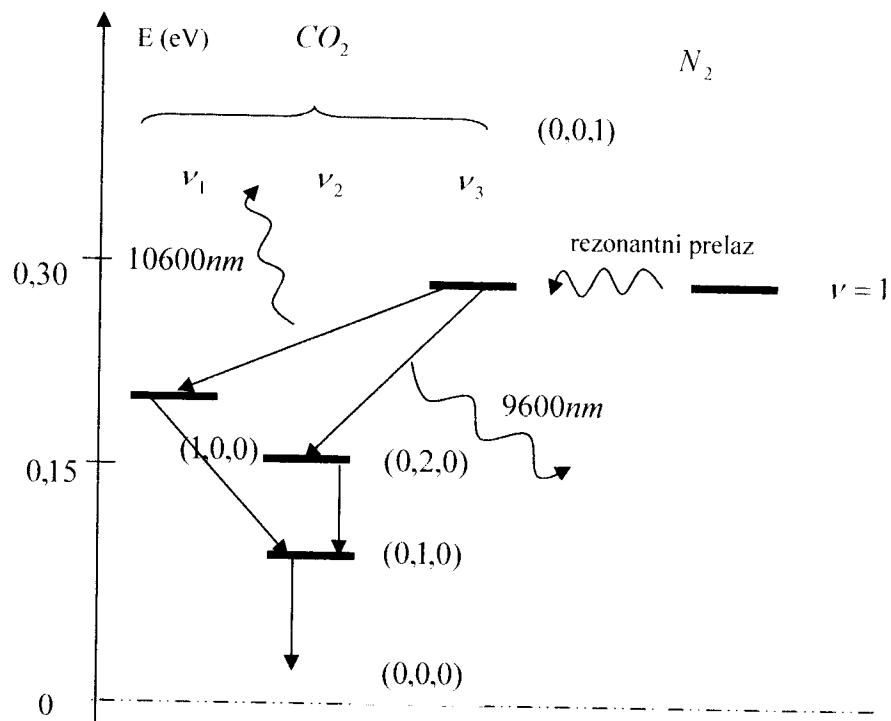
Sl.10. Šematski prikaz pobude kod He–Ne lasera

Postojali su pokušaji da se napravi čisto Neonski laser, jer je poznato da u osnovnom tipu lasera helijum služi samo pri pobuđivanju. Problem ovakvog lasera je njegova neefikasnost, jer se čak 99% uložene energije gubi na zagrevanje same cevi u kojoj se gas nalazi.

7.1.2. CO₂ LASER

Ovaj tip lasera spada u grupu molekulskih lasera, što znači da pored elektronskih nivoa poseduje i vibracione i rotacione nivoe. Ovu vrstu lasera predložio je C. Patel 1964.g. kada je kroz staklenu cev ispunjenu čistim CO₂ propustio struju. Tom prilikom

on je dobio veoma slab laserski snop. Ustanovio je da je u CO₂ moguće ostvariti laseriranje i da bi popravio karakteristike snopa u lasersku cev je počeo da ubacuje ne više čist gas već smešu gasova. Ustanovio je da odnos gasova treba podešavati u zavisnosti od samog mehanizma pobude sistema, ali generalno se pokazalo da za kontinualni režim rada ovog tipa lasera je najbolja smeša u sledećoj razmeri CO₂:N₂:He - 1:1:8. U ovakvoj smeši N₂ pomaže pri pobudovanju molekula CO₂, a He pomaže pri pražnjenju nižih energijskih nivoa i na taj način održava inverznu populaciju. Pobuda kod ovog lasera može da se izvrši direktno, ali i posredno preko molekula N₂ i tada se pobuda vrši na osnovu date termske šeme date na slici 11.



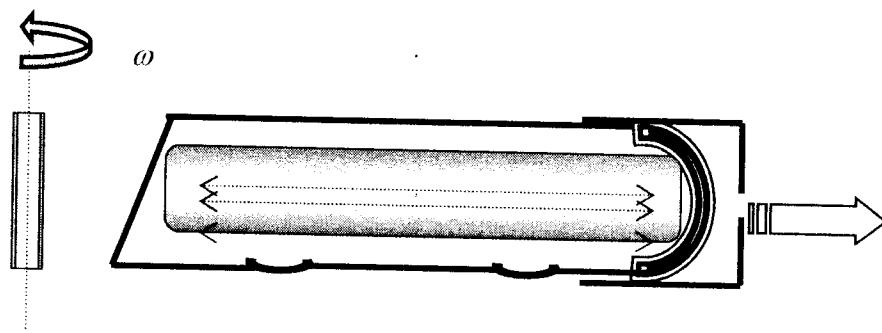
Sl.11 Šema pobude kod CO₂ lasera

Ovaj tip lasera odlikuje se sledećim osobinama:

- ◆ Laser veoma velike snage izlaznog zračenja. Snaga zračenja veća od 10 kW
- ◆ Zračenje u bliskoj infracrvenoj oblasti ($9600\text{nm} \leq \lambda \leq 11000\text{nm}$)
- ◆ Velika efikasnost (dostiže i do 30%)
- ◆ Netoksična sredina
- ◆ Može se birati način rada (impulsni ili kontinualni)

Zbog svoje velike snage ovaj laser je našao svoje mesto u primeni u metalnoj industriji. Kao što je rečeno ovi laseri su veoma snažni, međutim, u impulsnom režimu rada pokazuju veću snagu nego ako rade u kontinualnom režimu. Impulsni režim rada ovih lasera se veoma lako postiže ukoliko jedno fiksno ogledalo zamenimo rotirajućim.

Jedan takav laser na slici 11. koji u kontinualnom režimu ima snagu od 50 W u pulsnom režimu bi imao snagu od 20 kW – 50 kW, pri $400 \frac{\text{imp}}{\text{s}}$. Šematski prikaz jednog CO₂ lasera koji radi u pulsnom režimu dat je na slici 12.



Sl. 12. Principijelna šema rada pulsnog CO_2 lasera

7.1. LASER ČVRSTOG STANJA

Laseri čvrstog stanja su laseri kod kojih je radna supstanca u čvrstom stanju na sobnoj temperaturi, a pobuda se vrši optičkim putem. Poluprovodnički laseri ne spadaju u ovu grupu jer im je pobuda električnim a ne optičkim mehanizmom i uključuju sasvim drugačije fizičke procese u toku svog rada. Prvi laser čvrstog stanja je bio Maimann–ov rubinski laser koji je davao vidljivu crvenu svetlost ($694.3nm$) i bio je pulsnog tipa. Današnji laseri čvrstog stanja koriste sisteme sa tri i četiri energijska nivoa, imaju veliku snagu a mogu biti i pulsnog i kontinualnog tipa. Upotrebljavaju se u mnogim oblastima (metalna industrija, medicina–hirurgija, razna merenja, proizvodnja poluprovodničkih materijala i naučna istraživanja) gde se zahteva velika snaga bilo pulsnog bilo kontinualnog tipa. U novije vreme veoma snažni YAG laser se eksperimentalno koristi kao "raketni" motor zasad samo za ekstra lake male projektilne. Najsnažniji laseri danas su laseri čvrstog stanja – pulsnog tipa. Ovi moderni laseri se ne razlikuju mnogo od primarnog lasera, osim u veličini i materijalu koji koriste kao aktivnu supstancu. Osnovni princip pobude je kod svih gotovo isti kao i kod osnovnog rubinskog lasera. Kod lasera čvrstog stanja optičkim pumpanjem se elektroni prebacuju na više energetsko stanje, sa kojeg usled interakcije sa kristalnom rešetkom prelaze na neko metastabilno energetsko stanje koje je energetski blisko pobudenom stanju. Pošto je vreme života na metastabilnom stanju mnogo duže nego vreme života na pobudenom stanju uspostavlja se inverzna naseljenost kao osnovni uslov za laseriranje. Danas postoji izuzetno velik broj različitih jedinjenja koja se koriste kao aktivna supstanca, najčešće se koristi neodijum (Nd) koji se javlja kao primesa raznim kompleksnim jedinjenjima. Najpoznatiji je Nd:YAG gde je YAG ustvari itrijum alumijum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) koji ima mnogo niži prag za laseriranje od rubinskog, mnogo veću snagu i radi u bliskoj infracrvenoj oblasti. $1,064nm$. Promenom kompleksnog jedinjenja se neznatno menja talasna dužina na kojima radi posmatrani laser.

Ukoliko se želi pulsní režim rada, mogu se koristiti razni modeli ksenonske fleš lampe kod kojih se pomoću Q prekidačkog kola stabište rad i dostiže maksimum snage tako što se okidanje prekida sve do momenta kad se postigne puna inverzna naseljenost. Kod kontinualnih lasera može se koristiti ili ksenonska ili kriptonska blic lampa, ili neka druga koja daje intenzivan snop svetlosti. U današnje vreme za pobudu ovakvih lasera se često koriste i laserske diode kod kojih je moguće da se podeši izlazno zračenje tako da odgovara apsorpcionom spektru aktivne supstance čime se automatski povećava efikasnost ovih lasera. Pored ova dva tipa postoje i kvazikontinualni laseri

koji su ustvari pulsni, ali pojavljivanje pulsa je tako često (i preko 50 pulsa po sekundi) da se mogu smatrati kontinualnim.

U tabeli 3 je dat pregled vrsta i nekih osnovnih osobina pojedinih tipova lasera čvrstog stanja kod kojih je osnovni materijal dodat različitim nosačima u podesnoj koncentraciji. Nosači se biraju tako da su uglavnom transparentni i dobri provodnici topote.

tab .3 . Pregled značajnijih čvrstotelnih lasera

Naziv	Aktivna supstanca	Izlazna snaga Kontinualni/pulsni	Osobina zračenja	Primena
YAG	Nd ³⁺ -jon i nosač YAG 4 ener. nivoa	0.2 mW -10 W 1 mJ-1 J po pulsu	Zrak dobro definisan, 1064 nm (IR)	Merenja i hemijske analize udaljenih objekata, razni pokazivači i usmerivači
Ti-safir	Ti-joni i safir (Al_2O_3) kao nosač	Velike snage, zavisi od vrste lasera koji je korišćen za pobudu	Moguće podešavanje od 650 nm do 1050 nm	Sve primene gde je potreban veoma kratak puls
Rubnski	Cr ³⁺ -joni dopiran safiru 3 ener. nivoa	Puls 1 mJ do 10 J za vreme od 10 ns	Slabo definisan i nestabilan zrak 694nm	Važan samo kao prvi laser, slaba primenljivost

7.3. POLUPROVODNIČKI LASER

Poluprovodnički laser je laser koji je predložio R. Hall 1962.g. Ovi laseri rade na principu pn-spoja kod kojeg se pri rekombinaciji elektrona i šupljine javlja emisija elektromagnetskog zračenja. Sam razvoj poluprovodničkog lasera se dešavao nezavisno na različitim materijalima i u okviru različitih istraživačkih grupa. Ovi tipovi laseri su bili predloženi i od strane N. Basova kao jedno od prvih lasera. Još od 1948.g. kada je u *Bell Laboratoriji* otkriven prvi tranzistor od strane Williama Shockleya, Waltera Brattaina i Johna Bardeena, mnogi su pokušavali da iskoriste emisiju svetlosti unutar poluprovodnika pri rekombinaciji. Mnogo različitih osnovnih činjenica i efekata se moralo saznati na putu od tranzistora do prvog poluprovodničkog, galijum–arsenid–nog (GaAs) lasera koji su zajedničkim snagama razvili je 1962. g. *General Electric, IBM*, i

Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. Prvi poluprovodnički laser je imao manu, jer se veoma brzo pregrevao, i zbog toga nije imao neku značajniju primenu. Da bi se to pregrevanje izbeglo, ovaj laser je mogao raditi samo u pulsnom režimu. Fizičari su isprobavali razne metode odvodenja toplote, ali sve je bilo bezuspešno. **1963.** godine *Herbert Koemer* sa *University of Colorado* predložio je drugačiju metodu izrade poluprovodničkog lasera. Po njemu treba napraviti laser koji se sastoji od sendviča poluprovodnika, s tankim aktivnim slojem umetnutim između dve ploče različitog materijala. Za postizanje laserske akcije unutar tankog aktivnog sloja potrebno je malo električne energije, pa se i zagrevanje poluprovodnika može kontrolisati. *Morton Panish* i *Izuo Hayashi* **1967.g.** iz *Bell Laboratorije* predložili su mogućnost stvaranja višeslojnog kristala koristeći modifikovan oblik GaAs, u kojem bi se neki atomi galijuma zamenili atomima aluminijuma. Međuatomski razmak u takvom spoju GaAs razlikovao bi se od međuatomskog razmaka u spoju čistog GaAs za svega 1 promil. Istraživači su pretpostavili da bi se narastanjem kristala s obe strane GaAs, laserska akcija u AlGaAs ograničila samo unutar tankog sloja GaAs. Nakon nekoliko godina rada su uspeli da naprave poluprovodnički laser koji može da radi na sobnoj temperaturi i u kontinualnom režimu. Danas postoji ogroman broj poluprovodničkih lasera i jedan njihov deo je predstavljen tabelom 4.

tab.4. Prikaz poznatijih poluprovodničkih lasera i njihovih osobina

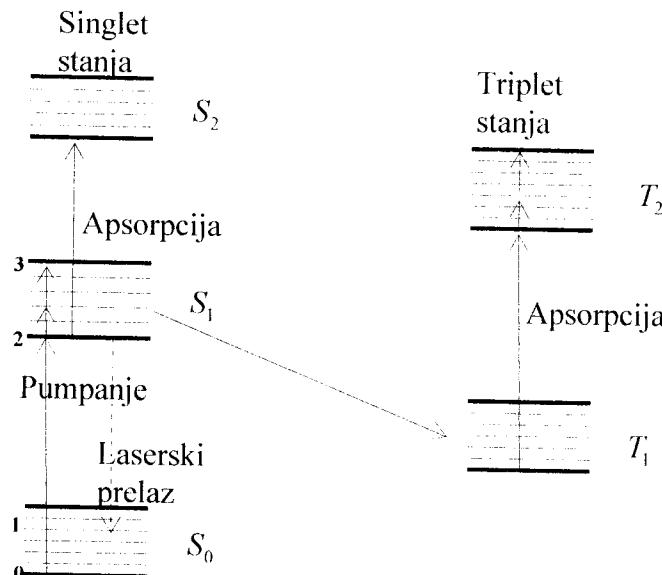
Poluprovodnički materijal	Snaga zračenja (mW)	Talasna dužina (nm)
Al _{1-x} Ga _x As	~ 10 – 10k+	780 – 880
In _{1-x} Ga _x As _{1-y} P _y	~ 10 - 120	1150 – 1650
Al _x Ga _y In _{1-x-y} P	~ 20 – 70	630 - 680

Osnovna prednost poluprovodničkih lasera u odnosu na druge lasere se ogleda u sledećim osobinama: male dimenzije, mala masa, velika efikasnost i niska energija pobude. Iz ovih razloga ovaj tip lasera je nezamenljiv u komunikacionim sistemima koji korista optička vlakna. Ovi ne tako snažni laseri mogu se pomoću spoljne optike poboljšati fokusiranjem snopa, tako da se dobije veća snaga, što omogućava primenu u mikrohirurškim zahvatima i u specifičnim istraživanjima. Pored dobrih osobina postoje i neki nedostatci kod poluprovodničkih lasera, a to su: relativno mala snaga i osetljivost na elektrostatička polja. Radi poboljšanja ovih osobina koriste se spoljni optički sistemi i laseri se smeštaju u posebna antistatik kućišta.

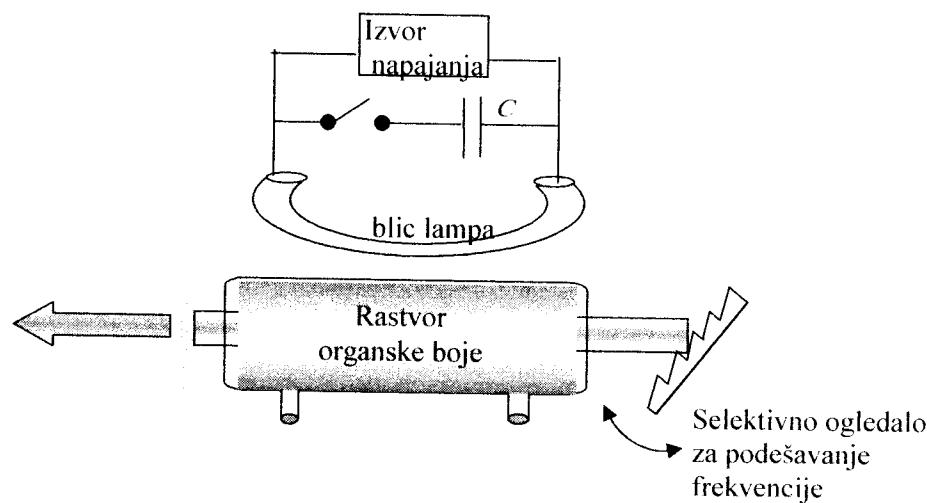
Razvoj ovih laserskih sistema zavisi u velikoj meri od razvoja poluprovodničke tehnologije i novih proizvoda u toj oblasti. Posebno treba obratiti pažnju na povećanje snage lasera i na proširenje spektra u kojima ovi laseri rade, kao i na poboljšanje operacionih karakteristika u neodgovarajućim uslovima povišene temperature, pojačanih vibracija i povišenog pritiska. Danas, i pored ovih nedostataka, ovi laseri imaju ključnu ulogu u informacionim sistemima, optičkoj komunikaciji kao i u elektroindustriji.

7.4. TEČNI LASER

Tečni laseri su laseri kod kojih je radna supstanca u tečnom agregatnom stanju. Tipičan predstavnik ovog tipa lasera je laser sa organskim bojama. Kod ovih lasera se organska boja rastvor u pogodnoj tečnosti. Ovi laseri spadaju u grupu laserskih sistema se tri energijska nivoa, ali tako da nivoi nisu diskretne energijske vrednosti već su zone. Ovo je posledica postojanja vibracione energije molekula boje, još finija struktura se dobije ako se uzme u obzir i rotaciona energija. Ovi laseri nemaju strogo definisanu radnu talasnu dužinu, već je ona promenljiva. Sam princip rada lasera prikazan je na šematskom prikazu energijskih nivoa na slici 13.

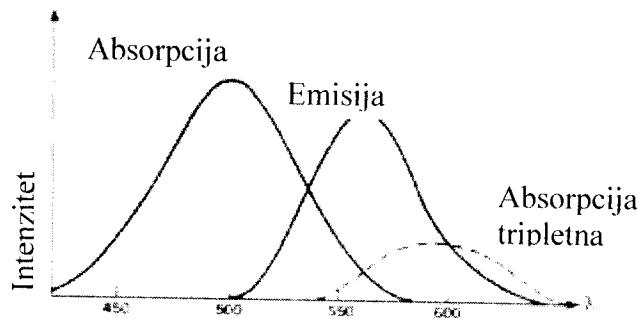


Pumpanje laserskog sistema se vrši sa 0-tog singletnog stanja S_0 do viših podnivoa singletnog stanja S_1 . Usled sudara dolazi do zagrevanja sistema na račun gubitka dela energije elektrona na višim nivoima, te se njihova energija snižava i približava vrednosti energije tripletnog stanja T_1 usled čega dolazi do neemisionog, rezonantnog prelaza $S_1 \rightarrow T_1$. Usled ovog prelaza se narušava inverzna populacija nivoa S_1 u odnosu na nivo S_0 usled čega prestaje laseriranje.



Isti efekat ima i prelaz $S_1 \rightarrow S_2$. Vreme života na stanju 3 unutar singletnog stanja S_1 je reda μs i zbog toga je potrebna velika snaga pumpanja da bi se održala inverzna naseljenost. Ovo je manja ovih lasera, jer je potrebno stalno održavanje inverzne naseljenosti pomoću impulsa čije trajanje treba da bude u okviru μs , pa se veće vršne snage laserskog zračenja teže ostvaruju nego kod čvrstih lasera. Pošto se kod organskih boja javljaju i tripletna stanja potrebno je naglasiti da ona ne učestvuju, već naprotiv ometaju, lasersko zračenje. I pored ovih poteškoća ovi laseri se često koriste jer imaju prednost koja se ogleda u podesivosti radne frekvencije zračenja. Selekcija zračenja se obavlja izborom prizmi i ogledala u rezonatoru. Šema jednog takvog lasera data je na slici 14.

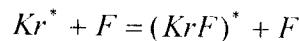
Pošta postoji čitava paleta organskih boja, i pravilnim odabirom rezonatorske kutije i ogledala i prizmi, može se birati veliki broj različitih frekvencija izlaznog zračenja u vidljivom delu spektra. Samo pumpanje može da se obavi pomoću blic lampe, ali i pomoću lasera koji imaju radnu supstancu u čvrstom stanju. Izbor pobudnog lasera zavisi od absorpcionog spektra boja koje koristimo u rastvoru. Poznato je da je on pomeren u odnosu na emisioni spekter ka manjim talasnim dužinama. Tipičan izgled ovih spektara dat je na slici 15.



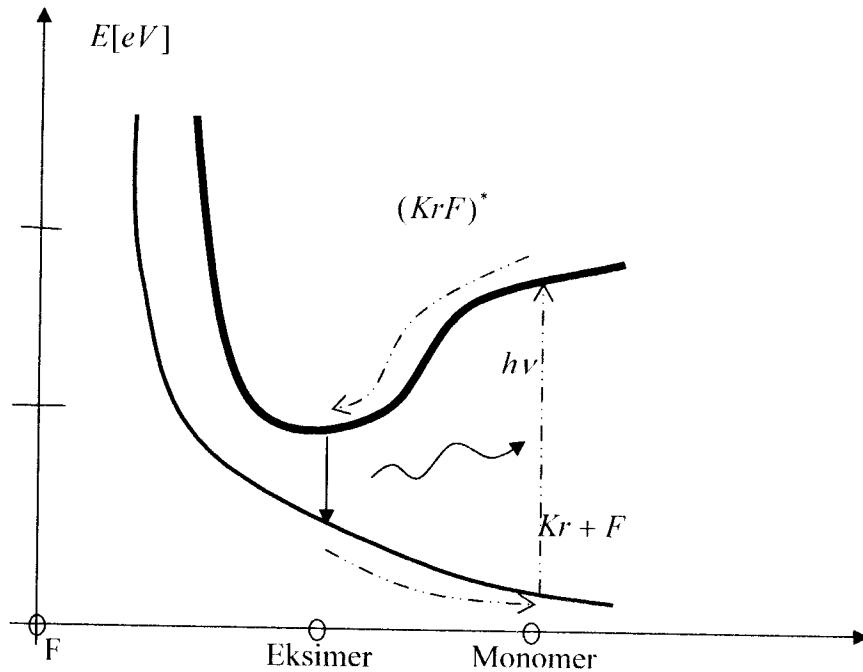
sl.15. Odnos absorpcionog i emisionog spektra organskih boja

7.5. EKSIMER

Eksimerni laseri su laseri čija je radna supstanca monohalogeni inertni gas, a njihovo zračenje je u oblasti ultraljubičastog spektra. Prvi takav eksimer je konstruisao N. Basov 1970.g. koji je radio na čist plemenit gas, ksenon. Između 1975.g i 1979.g. mnogi naučnici su radili na razvoju ove vrste gasnog lasera. Sam naziv *EXCIMER* je nastao kao spoj dve reči "Excited Dimer" što bi u prevodu značilo da se neki gas ponaša kao dvoatomni molekul samo ako je u eksitovanom stanju, a da je jednoatomni ako je u osnovnom stanju. Ovako se mogu ponašati plemeniti gasovi. U današnje vreme se koriste i raznoatomni molekuli (*ArF*, *KrCl*, *KrF*, *XeBr*, *XeCl*, *XeF*), koji se ponašaju na isti način kao i jednoatomni eksimer molekuli. Ovaj tip lasera na početku je radio sa frekvenijom pulsa od 20 Hz, dok danas postiže frekvencije od nekoliko kHz. Osnovni princip rada ovih lasera se zasniva na sudarima, usled kojih dolazi do pobudivanja gde $(KrF)^*$ predstavlja pobudeni molekul – eksimer. Ovaj način pobude je moguć, jer



je vreme života pobuđenog stanja oko 1 ns a vreme disocijacije je reda 1 ps. Pobuda se može vršiti sudarima sa brzim elektronima ili visokofrekventnim poljem. Kod ovih lasera nailazimo na ogromne razlike u snagama u zavisnosti od režima rada $P_{\text{cont}}=10 \text{ W}$, a $P_{\text{imp}}=1 \text{ MW}$. Na slici 16 je prikazan grafik odnosa energija eksimera i zbira energija njegovih činilaca



Sl.16. Odnos energija pobuđenog molekula i njegovih kostituenata u osnovnom stanju

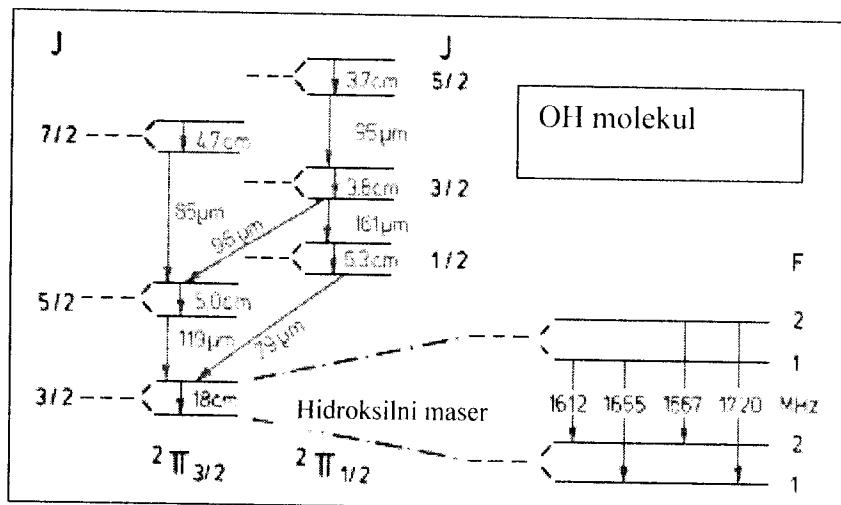
Snaga eksimernih lasera zavisi od talasne dužine na kojoj se javljaju izračeni maksimumi, u zavisnosti od vrste molekula. ArF ili XeCl mogu da izrače energije od do nekoliko J, u pulsnom režimu rada, u trajanju pulsa od 5–10 ns. Oni daju snop u dalekom ultraljubičastom delu spektra u intervalu od 150 nm do 350 nm. Koriste se u očnoj hirurgiji i u elektronskoj industriji. Tabela 5. prikazuje talasne dužine pojedinih tipova eksimernih lasera

tab.5. Talasne dužine pojedinih eksimer lasersa

Eksimer Laseri	
Vrsta	talasna dužina (nm)
F ₂	157
ArF	193
KrF	248
XeCl	308
XeF	351

8. PRIRODNI MASER I LASER

Osnovni uslovi za laserske prelaze su postojanje inverzne naseljenosti i postojanje stimulisane emisije. Obzirom da u prirodi postoji širok spektar različitog zračenja, može se sa pravom pretpostaviti da se negde ostvaruje stimulisana emisija. Znači jedan od uslova za lasersko zračenje je ispunjen, međutim da bi se ispunio drugi uslov potrebno je narušiti termodinamičku ravnotežu. Baš iz tog razloga nije se verovalo da se u prirodi može spontano ostvariti laserska emisija. Mogućnost postojanja takvog lasera je najavljena 1958.g., kada je A. Javan predvideo negativnu apsorpciju na osnovu nekih radioastronomskih eksperimenata. Nekoliko godina kasnije, u intervalu od 1965.g. do 1968.g. H Weaver sa saradnicima na *California Universit, Berkeley* otkrili su emisiju zračenja oko 1670 MHz koja je dolazila sa obližnjih zvezda, a ostvarila se prelascima unutar OH molekula u zvezdanim oblacima, što pokazuje slika 17.



Sl.17. Šema maserskih prelaza kod OH molekula

Danas je poznato preko 30 različitih maserskih prelaza u prirodi. Za dokaz postojanja stimulisane emisije koja nastaje spontano u prirodi astronomi su koristili sledeće dokaze:

- ◆ Emisija sa hidroksilnog masera talasne dužine 18 cm se sastoji od hiperfinih strukturnih linija 1612, 1665, 1667 i 1720 MHz koje narušavaju intenzitete koji bi se dobili u slučaju važenja termodinamičke ravnoteže (1:5:9:1)
- ◆ Na osnovu izučavanja profila dobijene OH-linije očekivana je Doppler-ova temperatura od 50 K, međutim intenzitet zračenja odgovara temperaturi od 10^{12} K
- ◆ Poreklo zračenja je ograničeni, tačkasti izvor a samo zračenje je kolimisano.
- ◆ Postojanje određene polarizacije zračenja i stoga je nemoguće da je nastalo spontanom emisijom.

Od tada se sve više naučnika okrenula istraživanju kosmosa. Ovaj tip masera, odnosno prelaza, otkriven je i u kosmosu unutar magline Orion. Danas je otkriveno mnoštvo prirodnih, kosmičkih masera, koji se javljaju u omotačima usijanih zvezda, kometa i drugih zvezdanih maglina kod kojih zračenje pri prolasku kroz omotače pobuduju

tab.6. Hronološki prikaz važnih radioastronomskih otkrića

Šta je otkriveno	Naziv	Datum
Veoma pokretljiv kvazar	TON 202	Jun 1999.
Laserski prelaz u X-zračnom opsegu u kvazaru	PKS 0637-752	April 1999.
Zračenje koje se prostire 6 puta brže od svetlosti	M 87	Mart 1999.
Lasersko zračenje u ultraljubičastom području.	Eta Carinae	Jan 1996.
Zvezda koja zrači lasersko zračenje udalekoj infracrvenoj oblasti.	MWC 349	Aug 1995.
Veoma kolinisan snop sa protovezde.	HH 34S	Jun 1995.
Novi kvazar u Mlečnom putu.	GRO J1655-40	Mart 1995
Mikrovazar unutar naše galaksije.	GRS 1915+105	Sept 1994
Laserska emisija u bliskoinfracrvenoj oblasti.	NGC 7027	1989
Otkriven je CO ₂ laser u atmosferama Marsa i Venere	Mars i Venera	1981
Laserska emisija u bliskom infracrvenom delu spektra.	magline Orion	1979

atomske ili molekulske sisteme na više energetske nivoe. Na taj način se stvara mogućnost ostvarenja inverzne populacije, a samim tim i postojanje prirodnih, kosmičkih, masera. Za razliku od masera koje je napravio čovek, ovi prirodni maseri imaju ogromnu energiju koja se ne zrači samo u jednom pravcu, znači ne formira se zrak.

Skorija astronomска istraživanja su vezana za **Hubble**-ov teleskop i za **KAO** leteću istraživačku stanicu (*Kuiper Airborne Observatory*). U okviru tih istraživanja otkriveno je mnoštvo laserskih emisija koje mogu biti prouzrokovane sa dva različita mehanizma.

1. Jaki zvezdani vetrovi u atmosferama zvezda mogu predstavljati levkaste otvore kroz koje se vreli gas naglo širi i hlađi usled čega se može narušiti termodinamička ravnoteža i normalna raspodela, odnosno može se ostvariti inverzna populacija koja je neophodna za stvaranje laserskog zračenja.
2. Kada vreo gas nošen zvezdanim vetrovima uđe u prostor koji je prethodno bio ohlađen tada se javlja slična situacija kao kod gas-kontakt plazmenog lasera koji je stvoren na Zemlji.

Prvi prirodni laser u svemiru otkrio je istraživački tim **KAO** laboratorije u grupaciji mlađih, veoma vrelih zvezda u sazvežđu Cygnus, koristeći infracrvene teleskope. Pronalazač odnosno glavni istraživač je bio V. Strelnitski a saradnici koji su učestvovali u ovom otkriću su: H.A.Smith, M.R.Haas, E.F.Erickson i S.W.J.Colgan. Laseri se formiraju tako što se jako ultraljubičasto zračenje prostire kroz zvezdane atmosfere i vrše eksitaciju atoma vodonika unutar nje. Na tako pobudene atome pada infracrveno zračenje koje izaziva stimulisanu emisiju ogromnog intenziteta. Emisija koja potiče sa zvezde **MWC 349** je detektovana na 169 mikrona i ima intenzitet koji je šest puta veći nego da je posledica spontane emisije. Pored ovog prirodnog lasera pronađeni su i drugi, jedan od poznatijih je laser otkriven 1996.g. na zvezdi **Eta Carinae**. Ovaj laser koji zrači u ultraljubičastom delu spektra su pronašli K. Davidson i S. Johansson. Kasnjom analizom je utvrđeno da se sa date zvezde javljaju mnogi laseri koji rade i u mikrotalasnom i u infracrvenom području, što predstavlja veoma redak fenomen. Hronološki gledano okrića kosmičkih lasera može se dati tabelom 6.

9. NOBELOVE NAGRADE U OBLASTI LASERA

Pored ogromne upotrebe vrednosti laser je pojedincima omogućio da postanu slavni, jer su mnogi naučnici za rad na polju lasera dobili Nobelovu nagradu. Dobitnici Nobelove nagrade za fiziku, za radeve povezane sa laserima su:

- ◆ Townes, Basov i Prohorov su **1964.g.** podelili Nobelovu nagradu za teorijski rad koji je vodio ka izradi lasera. Na osnovu njihovih radova Maiman je konstruisao prvi laser
- ◆ Gabor je **1971.g.** dobio Nobelovu nagradu za postavljanje prve i osnovne teorije o holografiji, koja je jedna od čuvenih i spektakularnih primena laserske tehnike. To je metod stvaranja i reprodukcije trodimenzionalnih slika, koji je našao veliku primenu u proučavanju vibracija i vibrirajućih objekata. Veoma veliki deo saznanja o muzici i muzičkim instrumentima i načinu kako oni proizvode tonove dugujemo holografiji. Pored toga danas se hologram koristi i u druge svrhe, npr zaštita na vrednosnom papiru ili na creditnim karticama je bez holograma danas neizvodljiva.
- ◆ Bloembergen i Schawlow **1984.g.** su dobili Nobelovu nagradu za doprinos u razvoju laserske spektroskopije i nelinearne optike. Jedna tipična primena lasera je da se pomoću više različitih laserskih snopova uporede dve ili više različitih materijala. Takođe su pretpostavili da se pomoću jednog laserskog zraka može upravljati drugim laserskim zrakom. Ovi fenomeni će u budućnosti omogućiti izgradnju optičkih kompjutera koji će biti mnogo brži i efikasniji od današnjih kompjutera. Ovi kompjuteri će svoj rad zasnovati na nelinearnoj optici.
- ◆ Chu, Cohen-Tanoudji i Philips su **1997.g.** dobili Nobelovu nagradu za razvoj metoda hlađenja i zarobljavanja atoma pomoću laserske svetlosti. Kod ovog metoda laserski snop koji pogada atom indukuje njegovo zračenje usled čega atom gubi sopstvenu energiju, usled čega se hlađi odnosno postiže sve niže temperature. Kao posledica gubljenja kinetičke energije javlja se praktično njihovo zaustavljanje u veoma kratkom vremenskom intervalu. Kada njihova temperatura dostigne vrednosti bliske apsolutnoj nuli, tada se odvija kondenzacija, sparivanje atoma pomoću kojeg je moguće otkriti neke unutrašnje aspekte prirode. To i jeste jedna od osnovnih primena laserkog hlađenja, međutim ova metoda može da se koristi i u drugim, sličnim oblastima.
- ◆ Alferov i Kroemer su **2000.g.** dobili Nobelovu nagradu za istraživanja na polju poluprovodničke fizike. Tom prilikom oni su ispitivali materijale koji su primenjivani u proizvodnji poluprovodničkih lasera, koji danas lasere čine malim, jeftinim i laksim za izgradnju. Takvi laseri su danas našli primenu u oblasti informacionih tehnika i predstavljaju osnovu za optičku informacionu mrežu.

10. LASER DANAS I NJEGOVA BUDUĆNOST

Već ranije sam napomenuo koliko je laser upotrebljiv i da je zaista gotovo neiscrpna paleta njegovih mogućnosti.

U okviru razmatranja o uticaju lasera na mnoštvo oblasti ljudskog života u kojima danas ima značajnu ulogu ne može se poreći da će laser biti dominantan i u budućnosti. Pored svih do sada nabrojanih oblasti i primena, mislim da će se spektar primena u budućnosti samo širiti. Jedna od novih mogućnosti može biti nuklearna fuzija i njeno kontrolisanje u cilju ostvarenja velike energije, koja je neophodna za razvoj. Ukoliko bismo uspeli da ostvarimo laserski kontrolisanu fuziju, usmeravanjem snažnih laserskih snopova na mešavinu deuterijum-tricijum (koji se nalaze na bliskom rastojanju) primorali bismo ih da izvrše sjedinjenje pre nego što se međusobno udalje. Za laserski kontrolisanu nuklearnu fuziju potrebno je da laserski snop ostvari temperaturu od 30-tak miliona stepeni. Za tako nešto konstruišu se ogromni laseri jer ostvarenjem nuklearne fuzije dobija se nepresušni izvor energije.

Istorijski gledano razvoj lasera je veoma čudan, jer njegovi konstruktori nisu bili u stanju da sagledaju sve njegove mogućnosti, međutim danas kada se pogleda njegov doprinos je nezamenljiv u razvoju čovečanstva, stoga se slobodno može reći da su ravoj lasera i razvoj ljudskog društva povezani. Baš iz tog razloga mislim da sam izabrao pravu temu za diplomski rad, jer mi je želja bila da sažeto prikažem razvoj lasera od početka pa do danas, jer može se sa sigurnošću reći da je laser svetlo 21-og veka. Kako to svetlo bude sijalo tako će se i čovečanstvo razvijati.

DODATAK i.

BIOGRAFIJE ZNAČAJNIH LIČNOSTI ZA RAZVOJ LASERSKE TEHNIKE



Nikolai Gennadievič Basov je rođen **14.12.1922.** u Usmanu kraj Voroneža. Pohađao je medicinsku vojnu akademiju, krajem 1943.g. je napustio. Po završetku rata, u kome je i sam učestvovao počeo je da pohađa Moskovski Institut za teorijsku i eksperimentalnu fiziku. On je jedan od začetnika kvantne elektronike. U periodu **1950.g.–1953.g.** je pohađao postdiplomske studije na *Lebedev–u*, Institutu za fiziku, pri akademiji nauka U.S.S.R. U toku svog naučnog rada bavio se poluprovodnicima uopšte, poluprovodničkim, hemijskim i laserima čvrstog stanja, plazmom, optoelektronikom, oscilacijama unutar molekula i različitim oblastima radiofizike i njene primene. Otkrio je princip stimulisane emisije kod poluprovodničkih kvantnih generatora. Zajedno sa Prohorov-im otkriva amonijački maser **1954.g.** **1955.g.** prelaze razvoj kvantnih generatora koji rade u optičkom delu spektra. U međuvremenu postaje profesor na katedri za fiziku čvrstog stanja fakulteta za Fiziku u Moskvi. Doktorsku tezu "Molekulski oscilatori" odbranio je **1956.g.** Od **1961.g.** do **1963.g.** radi na poluprovodničkom laseru i na njihovoj primeni u sintezi materijala. Višestruki je dobitnik Lenjinove nagrade, dopisni član akademije nauka postaje **1962.g.**, član iste postaje **1966.g.** a član predsedništva **1967.g.** Dobitnik je velikog broja priznanja u S.S.S.R–u i postaje počasni član akademije nauka Nemačke. Basov je umro **2001.g.**



Aleksandr Mihailovič Prohorov je rođen **11.07.1916.g.** u Australiji. Nakon Oktobarske revolucije se sa roditeljima vraća u Sovjetski Savez. **1934.g.** počinje da pohađa Univerzitet u Lenjingradu. Pohađa predavanja iz opšte fizike, kvantne mehanike, teorije relativiteta, spektroskopije i molekulske fizike kod profesora V.A. Fock, S.E. Frish, i E.K. Gross. 1939.g. upsuje postdiplomske studije na Institutu za fiziku, *Lebedev* u Moskvi, gde se bavi oscilacijama i prostiranjem radiotalasa pod mentorstvom Akademika N.D. Papaleksi. **1941.g.** je mobilisan, dva puta ranjan u toku II Svetskog rata, a nakon demobilizacije **1944.g.** vraća se na Institut Lebedev. Proučava nelinearne oscilacije sa S.M. Rytov-im, a **1946.g.** brani tezu "Teorija stabilnosti oscilacija i teorija malih parametara". Počev od **1947.g.** radi sa V.I. Veksler-om na koherentnom zračenju, i **1951.g.** brani doktorat na temu "Koherentno zračenje elektrona u sinhrotonom akceleratoru". U periodu **1950.g.–1955.g.** on i Basov proučavaju metodu uspostavljanja negativne apsorpcije, a **1954.g.** konstruišu amonijačni maser. Još **1957.g.** Prohorov predlaže rubin kao jednu od mogućnosti izgradnje lasera, a **1958.g.** predlaže rešenje problema rezonatorske kutije. Od **1960.g.** se bavi proučavanjem procesa koji su proistekli iz lasera i koji su vodili konstrukciji drugih laserskih sistema. konstruiše sasvim novi tip lasera-gasodinamični laser. Dobitnik je mnogih priznanja u S.S.S.R–u. Prohorov je umro **2002.g.**



Arthur Leonard Schawlow rođen je u Mount Vernon, New York, U.S.A. **05.05.1921.**g. kao dete iseljenika iz Rige i Kanadance. Osnovnu i srednju školu pohadao je u Kanadi. Još kao dečak pokazao je interes za nauku, mehaniku i astronomiju. Upisuje studije fizike, jer mu se to činilo najbliže željenoj radioastronomiji, na Univerzitetu u Torontu. Diplomirao je **1945.**g. međutim zbog rata je tokom **1941.-1945.**g. radio na razvoju radarskih antena za potrebe vojske. Po završetku rata i po povratku na univerzitet počinje da se bavi spektroskopijom sa **Malcolm F. Crawford-om** i **Harry L. Welsh-om**. Kasnije odlazi na *Columbia University* gde počinje saradnju sa Charles H. Townes -om. **1951.**g. ženi se sestrom Townes-a, a zatim prelazi da radi za *Bell Telephone Laboratories*. Tu se bavi problemima superprovodnosti i nuklearnih kvadropolnih rezonanci. Kasnije, po izdavanju knjige "Mikrotalasna spektroskopija" počinje intenzivnije da se bavi čvrstim stanjem sa ciljem otkrivanja lasera. Po otkrivanju lasera, objašnjava metodu laserske spektroskopije, i počinje da se bavi nelinearnom optikom. Nezavisno od Bloembergena **1974.**g. otkriva princip koji je vodio izradi dvofotonskog lasera. U daljem toku svog naučnog rada bavi se niskim temperaturama i superprovodnicima. Od **1961.**g. postaje profesor na *Stanford University*. Dobitnik je brojnih priznanja i član je mnogobrojnih naučnih udruženja. (Američka Akademija Nauke i Umetnosti, Društvo Fizičara Amerike.....). **1991.**g. odlaz u penziju nakon pogibije supruge u saobraćajnoj nesreći. *Schawlow* je umro **1999.**g.



Nicolaas Bloembergen rođen je **11.03.1920.**g. u Dordrecht, Holandija. U Utrecht-u završava osnovnu i srednju školu i upisuje fakultet 1938.g. Od 1941.g. pohađa nastavu statističke mehanike kod L. Rosenfeld-a. Učestvuje na izradi fotoelektričnih detektora. 1943.g. brani magistarsku tezu, a preostalo vreme da kraja rata se krije i izučava kvantnu teoriju. **1945.**g. seli se u Ameriku i upisuje doktorske studije na *Harvard University*. Kao saradnik učestvuje u razvoju raznih mikrotalasnih tehnika i ustanavljanju nuklearnih magnetnih rezonanci. **1948.**g. zajedno sa E.M. Purcell i R.V. Pound objavljuje rad "Nuklearna magnetna relaksacija". **1950.**g. se ženi, a **1958.**g. postaje državljanin Amerike. Gotovo stalno radi na *Harvard University*, kao predavač i istraživač. Posebno je zainteresovan za polje spektroskopije i nuklearne fizike, a na osnovu istraživanja predložio je koncept masera sa tri energijska nivoa. Predviđao je mogućnost masera koji su prihvatili i razradili Schawlow and Townes. **1961.**g. zajedno sa svojim saradnicima zasnovao je oblast "nelinearne optike". **1974.**g. otkriva dvofotonsku spektroskopiju. Kasnije je predavač na mnogim letnjim školama, za koje kaže da su mu pomogle, jer je saradnja sa mlađim kolegama raznih kulturnih i geografskih okruženja, uticala na kompletiju viziju problema. U Nacionalnu akademiju nauka Holandije primljen je **1956.**g., u američku **1959.**g. Počasni ili dopisni član je nekoliko akademija (Indija, Francuska). Tokom **1990.**g. se povlači sa *Harvard University* i postaje povremeni predavač na *California Institute of Technology*, na *Fermi Scuola Nationale Superiore* u Pizi, Italija, i na *University Munich*, Nemačka. Dobitnik je mnogih nagrada i priznanja, a **1991.**g. postaje predsednik Američke Akademije Nauka.



Dr. Dennis Gábor je rođen u Budimpešti, Mađarska **05.06.1900.g.** Veoma je rano počeo da se bavi naukom, sa posebnom pažnjom na teorije o mikroskopima i njihovim problemima, kao i Lippmann-ovom kolor fotografijom. Zajedno sa bratom izučava X-zrake i radioaktivnost. Pohadao je Tehničku školu u Berlinu i dobio titulu doktora nauka **1924.g.**, i titulu elektrotehničkog ing. **1927.g.** Otkrio je elktromagnetna sočiva i jedan od prvih katodnih oscilografa. **1927.g** počinje da radi u *Siemens & Halske AG*. Po dolasku

Hitlera na vlast primoran je da se preseli u Mađarsku, a nedugo zatim i u Englesku. Tu se zapošljava u *Thomson-Houston Co* i proučava gasne cevi. U toku svog rada do **1948.g.** za ovu kompaniju objavio je rad o komunikacijama i postavio novi pojam steroskopske fotografije, koji je prvi eksperiment u oblasti holografije. **1949.g.** priključio se *Imperial College of Science & Technology* u Londonu i predavao je na njemu sve dao penzipnisanja **1967.g.** Jedan je od prvih ljudi koji je pomoću Wilson-ove komore merio brzinu čestica. Konstruisao je holografski mikroskop, razne katodne cevi koje se koriste u elektronskoj industriji, analogni kompjuter i mnoga druga elektronska pomagala. Posle **1967.g** postaje član *CBS laboratorije* u Stamfordu gde učestvuje u osmišljavanju kolor televizijskog aparata. Dobitnik je mnogih nagrada i priznanja: Član Kraljevskog Društva (**1956**), član Mađarske Akademije Nauka(**1964**)... Umro je **1979.g.** u Londonu.



Charles Hard Townes rođen je u Greenville, Južna karolina, **28.07.1915.g.** U rodnom gradu završava osnovnu i srednju školu. Svoje obrazovanje nastavlja na *Duke University* i *California Institute of Technology*, bavio se separacijom izotopa i nuklearnim spinovima i gde brani doktorsku tezu na **1939.g.** Postaje član tima *Bell Laboratorije* od **1933.g.** gde intenzivno radi na usavršavanju radarske tehnike. To je bila osnova sa koje je počeo razvijanje mikrotalasne spektroskopije. **1948.g.** prelazi na *Columbia University* i sve do **1951.g.** razvija teoriju masera, kada je i objavljuje. Townes **1954.g.**, sa kolegama konstruiše maser, a **1958.g.** zajedno sa Schawlow-om objavljuje dokument o laseru. Jedan je od začetnika kvantne elektronike, kao i radio i infracrvene spektroskopije. Veliki doprinos ima u primeni laserske tehnike u medicinsko-biološkim ispitivanjima, nelinearnoj optici, kao i u drugim oblastima. Dobitnik je velikog broja nagrada i priznanja za svoj rad u nauci. Bio je profesor na brojnim univerzitetima (*Columbia University*, *Massachusetts Institute of Technology* i *California University*) i član velikog broja naučnih foruma i organizacija.

DODATAK ii.

DOBIJANJE EINSTEIN-OVIH KOEFICIJENATA

Jedan od prvih teorijskih problema koji se javio u toku razvoja teorije lasera je problem Einstein-ovih koeficijenata, koje je on koristio u objašnjenju procesa stimulisane emisije. Einstein je 1916.g. je objavio dokument koji je na nov i krajnje jednostavan način dokazao Planck-ov zakon zračenja, a istovremeno je i ustanovio neke nove pojmove koji su bili neophodni za objašnjenje procesa apsorpcije i emisije svetlosti prilikom interakcije materje i zračenja. U svom radu Einstein je koristio saznanja koja je prezentovao Bohr u svojoj teoriji o spektru zračenja.

Prilikom razmatranja određenog molekula, bez obzira na njegovu orijentaciju i translatorno kretanje, u skladu sa kvantnom teorijom on može zauzimati samo odredena stanja Z_i kojima se mogu pripisati diskretne energije E_i . Ako se prilikom razmatranja izabere molekul gasa koji se nalazi na temperaturi T , tada se verovatnoća nalaženja tog molekula u stanju Z_n dobija na osnovu Gibbs-ove kanonske raspodele primenjene na diskretna energetska stanja.

$$W_n = e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

Pod pretpostavkom da posmatrani molekul napušta stanje Z_m u toku vremena dt uz emisiju odgovarajuće energije, prelazi na stanje niže energije Z_n , istovremeno neki drugi molekul koji se nalazio u stanju niže energije Z_n pod uticajem nekog zračenja frekvencije ν i gustine zračenja ρ u toku vremena dt pređe na stanje sa višom energijom Z_m . Ovi procesi se javljaju sa određenim verovatnoćama, a broj prelaza iz jednog u drugo stanje je dat izrazima

$$A_m^n \cdot dt$$

odnosno

$$B_n^m \cdot \rho \cdot dt$$

Uz ove pojave koje su bile već ranije poznate Einstein je uveo i pojam stimulisane emisije, prilikom koje se dešava da molekul koji je već na stanju sa višom energijom Z_m apsorbuje zračenje frekvencije ν i gustine zračenja ρ u toku vremena dt pređe na stanje sa nižom energijom Z_n , ali da se pri tome javi emisija dva fotona čija energija odgovara energetskoj razlici ta dva stanja $E_m - E_n$. Ovaj proces se javlja sa određenom verovatnoćom. Broj molekula koji obave ovakav ti prelaza dobijamo na osnovu izraza

$$B_m^n \cdot \rho \cdot dt$$

Pošto razmena energije između molekula i zračenja mora da se pokorava kanonskoj raspodeli može se tvrditi da prosečno u jedinici vremena imamo jednak broj prelaza sa stanja više energije Z_m na stanje sa nižom energijom Z_n kao i broj prelaza u obrnutom smeru. Stoga se ovi procesi mogu opisati jednačinom

$$e^{-\frac{E_n}{kT}} \cdot B_n^m \cdot \rho = e^{-\frac{E_m}{kT}} \cdot (B_m^n \cdot \rho + A_m^n)$$

Pod pretpostavkom da gustina zračenja ρ raste sa povećanjem temperature T mi možemo zanemariti član A_m^n i tada se može reći da su koeficijenti B_n^m i B_m^n međusobno jednaki. Ovo nam ustvari omogućuje da prethodnu jednačinu napišemo u sledećem obliku

$$\rho = \frac{A_m^n}{e^{\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{kT}} - 1} \cdot B_m^n$$

Ova jednačina odgovara Planckovom zakonu zračenja. Da bi se postiglo asimptotsko približavanje Rayleigh-ovom zakonu zračenja u dugotalasnoj oblasti i Wien-ovom zakonu u kratkotalasnoj oblasti mora biti zadovoljeno sledeće

$$\varepsilon_m - \varepsilon_n = h \cdot v$$

$$A_m^n = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot B_m^n$$

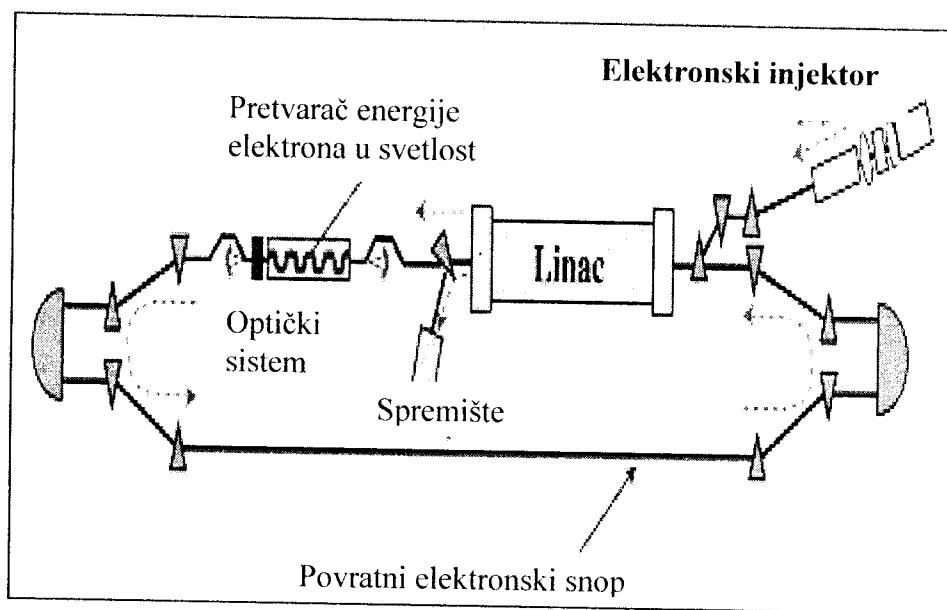
Ove činjenice je ustanovio Einstein prvi put u svom dokumentu o razmeni energije između materije i zračenja, a kasnije su pokazale veoma veliku važnost u razvoju kvantne teorije.

Postojanje stimulisane emisije, a odsustvo stimulisane absorpcije predstavlja asimetriju, odnosno samo prividno narušava simetriju, jer uvedenjem simetričnih koeficijenata B_n^m i B_m^n odnosno njihovim izjednačavanjem simetrija je očuvana. Jedan od osnovnih zadataka kvantne teorije ustvari izračunavanje raznih koeficijenata, među kojima su i Einsteinovi koeficijenti. Relacija $A_m^n = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot B_m^n$ je bila potvrđena eksperimentalno, poređenjem intenziteta apsorpcionih i emisionih linijskih spektra od strane L.S.Ornstein- i H.C.Burger-a.

DODATAK iii.

FREE-ELEKTRON LASER

Free-elektron laseri (FEL) spadaju u grupu novijih specijalnih lasera. Ovi laseri mogu da rade na biranoj boji, odnosno talasnoj dužini. Ovo je omogućeno time što slobodni elektroni, oslobođeni atomskog uticaja, mogu da prime i emituju bilo koju energiju. Upravo zbog toga free-elektron laseri mogu da se kontrolišu bolje od bilo koje druge vrste. Ovaj laser se prvi put pojavio u upotrebi krajem 1999.g., a šematski prikaz jednog takvog je dat na slici 18.



Sl. 18. Šema FEL-a

Unutar LINAC-a se vrši ubrzavanje elektronskog snopa da bi se nadoknadila izgubljena energija. Kao dokaz o velikoj mogućnosti podešavanja ovakvog sistema može se videti tabela 7 u kojoj je dat pregled parametara koji su dobijeni na jednom FEL-u u Jefferson Lab-u

tab.7 pregled mogućnosti FEL u Jefferson Lab-u

Parametri FEL-a Džefersonove Laboratorije			
Osobina	Ostvaruje	Konvertor IR 2003	Konvertor UV 2004
Energija (MeV)	20-48	80-210	200
I_{avc} (mA)	5	10	5
Snaga snopa (kW)	240	2000	1000
Puls (MHz)	18.75-75	4.7-75	2.3-75
Peak Current (A)	>60 A	270	270
σ_E/E *	<0.25%	0.5%	0.125%
eN^* (mm-mrad)	5-10	<30	<11
FEL efikasnost pobude	>0.75%	1%	0.25%
FEL Snaga(kW)	2.1	>10	>1

LITERATURA

1. Sir Edmund Whittaker, *A History of the Theories of Aether and electricity.* Harper & Brothers, NY 1960.g.
2. Janez Strand, *Mala kvantna fizika*, Školska knjiga, Zagreb 1985.g..
3. Ivan Supek, *Na atomskim vulkanima*, Naprijed, Zagreb 1959.g..
4. Svetislav Marić, *Na izvorima fizike*, Matica Srpska, Novi Sad 1952.g..
5. Serija članaka iz časopisa "Laser Fokus World", juli 1995.g.ww, februar 1997.g., novembar 1992.g., decembar 1992.g.
6. w.w.w. *Laser History*
7. w.w.w. *Laser Stars*
8. w.w.w. *Nobel museum*
9. *Encyclopedia.com*
10. w.w.w. *Jefferson Labs*

BIOGRAFIJA AUTORA



Teodorović Stevica rođen 31.01.1966.g. u Novom Sadu. Osnovnu školu i Gimnaziju "Jovan Jovanović-Zmaj" smer fizika sam završio u Novom Sadu. Po upisivanju Prirodno-Matematičkog Fakulteta, odsek fizika, nastavni smer u Novom Sadu odlazim na odsluženje vojnog roka 1984.g., u Našice i Osijek. Sa studijama nastavljam 1985.g. i apsolviram 1990.g. U međuvremenu sam se oženio i zaposlio. Radio sam u nekoliko osnovnih škola u okolini Novog Sada i obavljao još neke poslove koji nisu direktno povezani sa nastavom.

Stevica Teodorović

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KJUĆNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Diplomski rad

VR

Autor: Teodorović Stevica; br. dosjea 104/84

AU

Mentor: Prof. Dr. Mira Terzić

MN

Naslov rada: Istorijat razvoja lasera

NR

Jezik publikacije: Srpski, latinica

JP

Jezik izvoda: sr/en

Jl

Zemlja publikovanja: Srbija i Crna Gora

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2004

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: PMF, Trg Dositeja Obradovića 4 , Novi Sad

MA

Fizički opis rada: broj poglavlja–10, broj strana–46, priloga–3, slika–18, tabela–7
FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Istoriski razvoj fizike, Kvantna elektronika
ND

Predmetna odrednica/ klučne reči

Laser, Maser, Stimulisana emisija,

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka Instituta za fiziku, PMF Novi Sad
ČU

Važna napomena: Nema
VN

Izvod: Cilj rada je da se sažeto prikaže razvoj laserskih sistema kao jednog od uredaja
budućnosti
IZ

Datum prihvatanja teme od strana NN veća: 05.07.2004
DP

Datum odbrane: 09.08.2004
DO

Članovi komisije:

– Predsednik: Dr Darko Kapor, redovan profesor PMF-a u Novom Sadu
– član: Dr Imre Gut, Docent na PMF-a u Novom Sadu

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF NATURAL SCIENCE & MATHEMATIC
KEY WORLD DOCUMENTATION**

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record

TR

Contens code:

CC

Author: Teodorović Stevica

AU

Mentor: Prof. Dr. Mira Terzić

MN

Title: History of laser developmpt

TI

Language of text: Serb

LT

Language of abstract: Serb/english

LA

County of publication: Serbia & Montenegro

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2004

PY

Publisher: Publ. place: Faculty of Natural Science & Mathematic, Novi Sad
PU

PP

Physical description: chapters-10, page-46, tables-7 graphs-18, additional list-3
PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: History of physics, Quantum electronics

SD

Subject / key words: Laser, Maser, Stimulated emission of radiation,
SKW

UC:

Holding data: -Library of Faculty of Natural Science & Mathematic, departman of Physics, Novi Sad

HD

Note: none

N

Abstract: Lasers sistem from the begining to the future

AB

Accepted by the Scientific Board on : 05.07.2004

ASb

Defended: 09.08.2004

DE

Thesis defend board:

- President Dr. Darko Kapor, full professor Faculty of Science , Novi Sad
- Member: Dr. Imre Gut, assistant professor Faculty of Science , Novi Sad

