

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU

ELVIRA IŠTOKOVIĆ

LASERI

Diplomski rad

Osijek, 2011

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU

ELVIRA IŠTOKOVIĆ

LASERI

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja zvanja magistra edukacije fizike i informatike

Osijek, 2011

LASERI

ELVIRA IŠTOKOVIĆ

Sažetak

Tema ovog rada su laseri, otkriće koje je promijenilo znanost i svijet. Uvodni dio započinje s povijesnim razvojem lasera. Posebno se ističe Theodore H. Maiman koji je prvi laser napravio 1960. god. Lasersku emisiju postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom. Objašnjava se u kojim uvjetima je sustav u ravnoteži te kakvi su sustavi sa dva stanja. Prikazuje se način nastajanja laserskog zračenje i na kojem principu radi laser. Spominju se neke vrste lasera i po čemu se razlikuju. Opisuju se transverzalni modovi te ističe koliko su pojačala optičkih vlakana od presudne važnosti u komunikaciji na velike udaljenosti. Navode se maseri kao preteče lasera. U završnom dijelu opisuje se gdje se laseri najčešće koriste i koliko su nam važni u svakodnevnom životu.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi:[foton/laser/maser/optičko vlakno/stimulirana emisija/spontana emisija/rezonator]

Mentor: [Ramir, Ristić, prof.dr.sc]

Ocjenjivači: [Ramir Ristić, prof.dr.sc, Denis Stanić, doc.dr.sc, Slavko Petrinšak, mr.sc]

Rad prihvaćen: [8. Srpanj, 2011.]

LASERI

ELVIRA IŠTOKOVIĆ

Abstract

The topic of this thesis are lasers the invention that changed the science and the world. The introductory section begins with the historical development of the laser. Especially notable is Theodore H. Maiman who made the first laser. Laser emission is achieved by stimulated emission of ruby crystal excited with a light lamp. It explains the conditions in which the system is in balance and what are the systems with two states. It shows the method of the emergence of laser radiation and how the laser works . Some types of lasers and how they differ are mentioned. The thesis describes the transverse modes and points out how the optical fiber amplifiers are of the most importance in communicating over long distances. Furthermore, it is mentioned something about maser as precursors of the laser. The final section describes where the lasers are commonly used and how they are important to us in everyday life.

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: [photon/laser/maser/optical fiber/stimulated emission/spontaneous emission]

Supervisor: [Ramir, Ristić, prof.dr.sc]

Reviewers: [Ramir Ristić, prof.dr.sc, Denis Stanić, doc.dr.sc, Slavko Petrinšak, mr.sc]

Thesis accepted: [8. July, 2011.]

Sadržaj

1. Uvod.....	6
2. Povijest lasera.....	7
3. Ravnoteža.....	9
4. Sustavi s dva stanja.....	10
5. Rezonatori i uvjeti oscilacije.....	16
6. Vrste lasera.....	17
6.1. Laseri čvrstog stanja.....	17
6.2. Laseri s plinovitim pražnjenjem/ispuštanjem.....	19
6.3. Obojeni laseri.....	20
6.4. Poluvodički laseri.....	22
6.4.1. Injektirani p-n laser.....	23
7. Transverzalni modovi.....	25
8. Pojačala optičkih vlakana.....	26
9. Maseri.....	27
10. Primjena.....	29
11. Metodčki dio.....	33
12. Zaključak.....	35
13. Literatura.....	36
14. Životopis.....	37

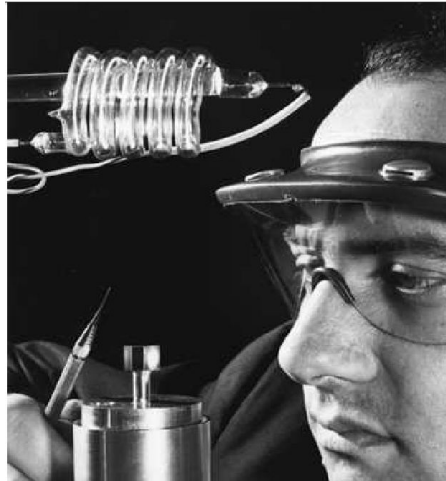
1. Uvod:

LASER¹ je ime za izvor svjetlosti kod kojeg se za razliku od konvencionalnih izvora svjetlosti, svjetlost generira mehanizmom stimulirane emisije. Iako na prvi pogled fizika lasera zvuči jako komplicirano, razvojem tehnologije i to pogotovo tehnologije bazirane na poluvodičima, laseri nas danas u velikom broju okružuju u našem svakodnevnom životu.

¹ “ *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ”

2. Povijest lasera

Pokušat ću vas uvesti u svijet lasera, krenuvši od povijesnih koraka. Još je davne 1917. godine u svom radu „On the Quantum Theory of Radiation“ Albert Einstein dao teorijski koncept i predvidio izum lasera i njegove preteče masera. Prvi laser napravio je 1960. godine Theodore H. Maiman zaposlen na Huges Research Laboratorije Malibu, California. Njegov je laser emitirao svjetlost valne duljine 694 nm u pulsnom režimu, a lasersku emisiju postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom.



*Slika 1. Theodore Maiman gleda u kristal rubina, koji je postao centralni dio njegovog budućeg lasera.
Preuzeto: PhysicsWorld*

T. Maiman je pomoću bljeskalice obasjavao crveni kristal rubina, čije su plohe bile posrebrene i čime je izazvao lasersku emisiju u crvenom dijelu spektra na 694 nm. Na taj način, objedinio je u svom uređaju (*Slika 2*) osnovna tri elementa koji su potrebna da bi došlo do stvaranja laserske emisije: aktivni medij (rubinski kristal), rezonatorsku šupljinu s dva rubna zrcala (posrebrene plohe kristala) u kojoj se odvija laserska emisija i lasersku pumpu (bljeskalica) koja daje energiju koja pokreće sam laserski efekt.



Slika 2. Maimanov laser
Izvor: Izložba Fifty Years Of Lasers, National Museum of
American History, Washington, DC

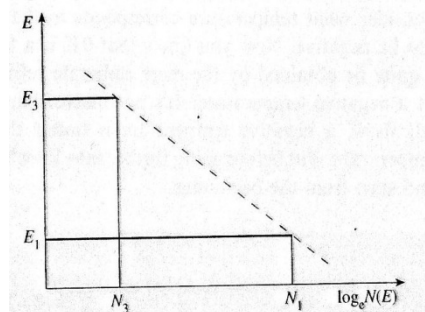
T. Maiman, tada tridesetdvogodišnjak, nije mogao ni naslutiti da će njegov izum postati tako važan istraživački instrument, ali i uređaj koji će se duboko usaditi u ljudsku svakodnevicu.

3. Ravnoteža

Kada kažemo da elektroni u krutom tijelu imaju Fermi-Diracovu raspodjelu energija, govorimo o dvije stvari: prvo, da je sustav u ravnoteži; drugo, da ima određenu temperaturu. Temperatura je statistički koncept te je povezana s pojmom ravnoteže. Ako imamo sustav čestica koji je pomaknut iz ravnoteže, recimo ubrzavajući neke od njih, onda trenutnu temperaturu ne možemo točno odrediti, pošto ne postoji vrijednost T kojom bi Fermi funkcija opisala distribuciju. Naravno, za elektrone u krutom tijelu, ili atome u plinovitom stanju, efekt kolizije brzo izravna perturbaciju, cijeli sustav vraća se u ravnotežu, te sama ideja temperature ponovno postaje važeća, iako je njezina stvarna vrijednost možda promijenjena. Laseri imaju perturbiranu distribuciju naseljenosti koja je svejedno u nekakvoj ravnoteži. Ali kada razmotrimo koja temperatura odgovara toj ravnoteži, vidimo da je ona negativna. Poznato je da se temperatura od $0K$ ne može postići niti najboljim hladnjakom. Ali kako onda dobijemo negativnu temperaturu? Vidjet ćemo da je negativna temperatura zapravo toplija od najveće pozitivne temperature.

4. Sustavi s dva stanja

Razmotrimo materijal u kojem atomi imaju samo dvije dopuštene energetske razine, kao što je prikazano na *Slici 3*.



Slika 3. Broj atoma u prirodnom sustavu s dva stanja kao funkcija energije. Isprekidana linija pokazuje Boltzmannovu funkciju kako opada što je veća energija.

Pod uvjetom da je cijeli sustav u termičkoj ravnoteži, dvije dopuštene razine biti će napučene u skladu s dinamičkom energetsom ravnotežom između atoma. Naseljenost energetskih razina stoga je precizno opisana temperaturom, T , sustava i odgovarajućom statistikom, koju ćemo nazvati Boltzmannova statistika. Dvije razine koje promatramo označene su kao E_1 i E_3 na *Sl. 3*. Kasnije ćemo vidjeti što se događa u sustavu s tri razine, gdje je treća razina označena s E_2 . Brojevi elektrona N_1 , N_3 u razinama E_1 , E_3 povezani su s Boltzmannovom funkcijom sljedećom formulom:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (4.1)$$

gdje je N_0 konstanta te je stoga:

$$N_3 = N_1 \exp\left(-\frac{E_3 - E_1}{kT}\right) \quad (4.2)$$

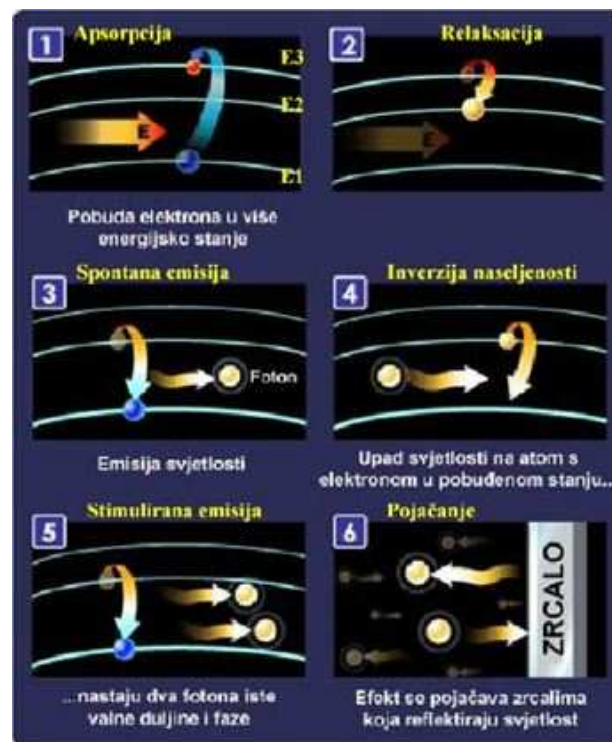
Kao što je već spomenuto, atomi su u dinamičkoj ravnoteži, što znači da je broj atoma koji opadaju iz E_3 u E_1 identičan broju atoma koji se penju iz E_1 u E_3 . Atom u E_3 može izgubiti energiju $E_3 - E_1$ radijacijskim ili neradijacijskim procesima. Ovdje ću razmotriti samo prvi slučaj. Kada se radijacijski prijelaz između E_3 i E_1 dogodi tijekom procesa termičke ravnoteže, tada proces „opadanja“ nazivamo *spontanom* emisijom, a proces „rasta“ apsorpcijom fotona. U svakom slučaju, energija fotona dobivena je s:

$$h\nu_{31} = E_3 - E_1 \quad (4.3)$$

Što mislimo kada kažemo da su fotoni prisutni? Jedan od temeljnih zakona fizike je da svako tijelo koje ima konačnu temperaturu zrači termalnom radijacijom (tj. radijacijom „crnog tijela“). Ova radijacija dolazi iz unutarnjih prijelaza. Planck je rekao da je atomska radijacija kvantizirana :

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi n^3 h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)-1} \quad (4.4)$$

gdje je $\rho(\nu)$ gustoća radijacije koja zrači iz tijela s temperaturom, T , u opsegu frekvencijskog spektra širine, $d\nu$, i pri frekvenciji, ν . Ako fotoni energije, $h\nu_{31}$, izvana sjaje na sustav, tada se odvija proces koji zovemo *stimulirana emisija*. Foton se ili spaja s atomom u nižem (E_1) stanju i pogurane ga u E_3 ; ili, što je manje očito, *stimulira* emisiju atomom (u E_3 stanju) fotona ($h\omega_{31}$). U krajnjem slučaju, jedan foton ulazi u sistem, a dva izlaze.



Slika 4.: Proces nastajanja laserskog zračenja

Proces nastajanja laserskog zračenja prikazan je slikovito na Slici 4 (pruzeto iz [6]). Promatramo atom koji je u stabilnom stanju i posjeduje jedan elektron koji kruži oko jezgre po orbitali energije E_1 (osnovno energijsko stanje). Na takav atom upada foton kojeg emitira optička pumpa i budući da je taj foton upravo odgovarajuće energije dolazi do apsorpcije fotona i naš elektron se prebacuje u nestabilno (pobuđeno) energijsko stanje E_3 . Energijsko stanje E_3 živi jako kratko, što znači da se elektron u vrlo kratkom vremenu ($\approx ns$) prebacuje u

energijski niže stanje E_2 koje je ujedno i stabilnije stanje (duže živi, $\approx ms$). Ovaj se proces naziva relaksacija jer se kod njega ne mora nužno emitirati foton, već se energija može izgubiti i neradijativnim procesima. Nakon određenog vremena elektron prelazi u osnovno stanje emisijom fotona. Emitirani foton putuje po rezonatoru (kojeg sačinjavaju dva zrcala) i na jednom se zrcalu reflektira natrag. Kada ponovo dolazi do našeg atoma zatekne ga u pobuđenom stanju jer je on u međuvremenu primio novi foton od optičke pumpe. Neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost nekog pobuđenog stanja veća od naseljenosti osnovnog stanja naziva se inverzija naseljenosti. Inverzija naseljenosti je nužan uvjet za generiranje laserske emisije. U uvjetima inverzije naseljenosti stimulirana emisija nadjača spontanu emisiju i pri tome dolazi do pojačanja intenziteta svjetlosti, odnosno laserske emisije. Fotoni nastali procesom stimulirane emisije potpuno su identični i upravo je to uzrok koherentnosti laserskog zračenja.

Promotrimo naš sustav te se podsjetimo da imamo dva stanja u ravnoteži. Učestalost stimuliranih tranzicija ($R_{1\rightarrow 3}$) iz nižeg u više stanje proporcionalna je broju atoma u nižem stanju, kao i broju fotona koji mogu uzrokovati prijelaz. Stoga možemo napisati:

$$R_{1\rightarrow 3} = N_1 B_{13} \rho(\nu_{31}) d\nu \quad (4.5)$$

Konstanta proporcionalnosti B_{13} je vjerojatnost apsorpcije fotona, često nazivana i Einsteinov B -koeficijent.

Za obrnutu tranziciju, iz E_3 u E_1 imamo sličan izraz za stimuliranu emisiju, samo što ćemo Einstein B -koeficijent napisati kao B_{31} . Također imamo i spontane emisije. Učestalost da će se ovo dogoditi proporcionalna je samo broju atoma u gornjem stanju pošto spontani efekt nije ovisan o vanjskim podražajima. Konstanta proporcionalnosti ili vjerojatnost svakog atoma u gornjem stanju da spontano emitira zove se Einstein A -koeficijent (A_{31}). Prema tome:

$$R_{3\rightarrow 1} = N_3 \{A_{31} + B_{31} \rho(\nu_{31})\} d\nu \quad (4.6)$$

U ravnoteži je :

$$R_{1\rightarrow 3} = R_{3\rightarrow 1} \quad (4.7)$$

$$B_{13} \rho(\nu_{31}) d\nu = N_3 \{A_{31} + B_{31} \rho(\nu_{31})\} d\nu \quad (4.8)$$

Kao što smo već rekli:

$$N_3 = N_1 \exp\left(-\frac{E_3 - E_1}{kT}\right) \quad (4.9)$$

Nakon malo matematike, koristeći jednadžbu (4.2) kako bi N_3 doveli u vezu s N_1 , dobijemo:

$$\rho(\nu_{31})d\nu = \frac{A_{31}d\nu}{B_{13} \exp(h\nu_{31}/kT) - B_{31}} \quad (4.10)$$

Ako ovo usporedimo s jednadžbom (4.7), vidimo da naši (tj. Einsteinovi) B -koeficijenti moraju biti jednaki

$$B_{13} = B_{31} \quad (4.11)$$

tj. stimulirana emisija i apsorpcija podjednako su moguće. Također,

$$A_{31} = B_{31} \frac{8\pi n^3 h\nu_{31}^3}{c^3} \quad (4.12)$$

tj., koeficijent spontane emisije povezan je s koeficijentom stimulirane emisije.

Ima li A_{31} fizičko značenje? Ima, a to je mjera spontane depopulacije stanja 3. Uzimajući u obzir, kao i obično, eksponencijalno opadanje, stopa promjene populacije je

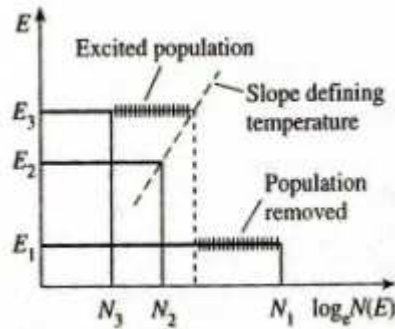
$$-\frac{dN_3}{dt} = A_{31}N_3 \quad (4.13)$$

Što dovodi do vremenske konstante opadanja, tzv. spontani vijek trajanja, prema definiciji

$$t_{spont} = \frac{1}{A_{31}} \quad (4.14)$$

Do sada bismo imali dobru predodžbu što se događa kada svjetlo frekvencije ν_{31} zasja na sustav s dva stanja. U prisutnosti ulaznog svjetla spontano opadanje je uglavnom zanemarivo, i iako je vjerojatnost prijenosa usmjerenog prema gore potpuno jednaka vjerojatnosti prijenosa usmjerenog prema dolje, veći broj prijenosa će se dogoditi u smjeru od E_1 prema E_3 zbog puno većeg broja atoma u nižem stanju. Ovo je često vidljivo u prirodi. Na primjer, mnoge soli kristalnog bakra imaju dvije energetske linije odvojene energijom fotona koja odgovara žutom svjetlu. Stoga, kada gledano u bijelom svjetlu, žuti dio je apsorbiran, a kristal prenosi i reflektira dodatnu boju, plavu. Rubin (kromovi ioni u kristalnoj glini) prema ovom mehanizmu ima zelenu apsorpcijsku liniju, te stoga izgleda crveno na bijelom svjetlu.

Kada je svjetlo apsorbirano, populacija više razine je povećana. Ova perturbacija, nastala zbog stanja ravnoteže, inače je mala. Ali ako postoji sve intenzivniji „pumpani“ izvor svjetla, populacija na razini 3 će se povećavati recipročno sa smanjivanjem populacije na razini 1. Očigledno, granica postoji, kada su razine jednako popunjene i pumpa je beskrajno snažna. To je prikazano na slici 5:



SLIKA 5: Sustav s tri razine. Jak signal „pumpe“ ima ujednačene razine E_1 i E_3 , tako da E_3 ima sada veću populaciju od E_2 . Istočkana linija pokazuje kako se populacija mijenja s energijom, kao na sl.3, ali sada s pozitivnim nagibom.

U slučaju intenzivnog pumpanja, neuravnotežene razine populacije (označene zvjezdicom) postanu gotovo jednake:

$$N_1^* \approx N_3^* \approx \frac{N_1 + N_3}{2} \quad (4.15)$$

Obratimo sada pažnju na sustav s tri razine, gdje je treća razina E_2 između razina E_1 i E_3 , što je također prikazano na slici 5. Pumpanje neće imati utjecaja na njezinu populaciju. Dakle sa sustavom od tri razine jako napumpanim, broj elektrona u tri stanja su N_1^*, N_2^*, N_3^* . Pretpostavljajući da neki fotoni dolaze s energijom

$$h\nu_{32} = E_3 - E_2 \quad (4.16)$$

Oni će naočigled međudjelovati sa sustavom, uzrokujući stimuliranu emisiju tranzicijom od E_3 do E_2 i apsorpciju tranzicijom od E_2 do E_3 . Ali sada nailazimo na neuobičajenu pojavu: da ima više elektrona u višem stanju (E_3) nego u nižem (E_2). Stoga će umjesto čiste apsorpcije fotona energije, $h\nu_{32}$, nastati čista emisija. Sustav sa tri razine će pojačati foton frekvencije, ν_{32} , tzv. frekvencija signala. Cijeli sustav se naziva „laserom“, što je skraćeno ime za svjetlosno pojačavanje stimuliranom emisijom radijacije.

Kada je broj atoma veći na višoj razini u odnosu na nižu, kao u slučaju E_3 i E_2 na slici 5 opravdano je tu pojavu žargonski nazvati „inverzijom naseljenosti“. Druga stvar koju je potrebno raščistiti, prije opisivanja nekog stvarnog sustava s inverzijom naseljenosti, jest temperatura. Iz jednadžbe (4.1) krivulja linije koja prikazuje populacije u različitim razinama energije

$$\frac{dE}{dN} = -\frac{kT}{N} \quad (4.17)$$

(prikazana kao istočkana krivulja na slici 3) ima negativan nagib proporcionalan T/N . Sada promotrimo *sliku 5*. Prvo obratimo pažnju na populacije N_3^* i N_1^* . Oni su u stanju mirovanja u smislu da dokle god se pumpanje nastavlja, oni se neće mijenjati s vremenom. Ali za ove dvije razine koje imaju ograničenu energetska razliku zapravo ne postoji razlika u populaciji. Stoga, ako uzmemo jednadžbu (4.17) kao način određivanja temperature, za dobro pumpan sustav sa dvije razine temperatura je neograničena. Obratimo li sada pažnju na populacije energetske razine E_3 i E_2 na *slici 5*, ustanovit ćemo da

$$N_3^* > N_2 \quad (4.18)$$

I da dE/dN krivulja ima pozitivan nagib, koja prema jednadžbi (4.17) odgovara *negativnoj temperaturi*.

Opet, ovo je razumljiv opis postojanja većeg broja atoma u višem stanju nego u nižem. Sada zamislimo sustav sa prirodnim stanjem čije će pumpanje biti u porastu sve dok ne dosegne neograničenu temperaturu i stoga s vremenom inverznu naseljenost, te će nam stoga postati donekle smisljena izjava da je negativna temperatura toplija od pozitivne.

5. Rezonatori i uvijeti oscilacija

Zbog toga što razine energija nisu beskonačno uske, emisija se pojavljuje u ograničenom frekvencijskom pojasu. Za jedno-frekventne emisije (pri čemu jedno-frekventna znači jedan uzak frekvencijski opseg) sva uzbuđena stanja bi trebala sukladno opadati. Ali kako će atom na jednoj strani materijala znati da se atom na drugoj strani pokrenuo? Sami fotoni dat će mu potrebnu povratnu informaciju. Oni stimuliraju emisiju drugih fotona, te također osiguravaju da se emisija događa u pravom trenutku. Ako želimo stvoriti nešto bolji fizički prikaz ovog mehanizma za povratne informacije, preporučljivo je vratiti se jeziku klasične fizike te govoriti o valovima i relativnim fazama. Ta informacija faze bit će zadržana stavimo li savršene reflektore na obje strane putanje valova, konstruirajući na taj način rezonator. Elektromagnetski val će se tada odbijati između dva reflektora uspostavljajući trajne valove, što također implicira da područje između dva reflektora mora biti cjelobrojni umnožak polovičnih valnih duljina. Iz tog razloga, u praktičnim slučajevima, imamo relativno širok frekvencijski pojas u kojemu se ostvaruje inverzija naseljenosti, i stvarne frekvencije oscilacija unutar ovog pojasa određene su prema mogućoj rezonantnoj/zvučnoj frekvenciji rezonatora.

Još samo jedna stavka o gubitcima prelamanja. Ako se rezonator sastoji od dva paralelna zrcala, tada je poprilično očito da će dio elektromagnetskog zračenja iscuriti van. U svakom otvorenom rezonatoru neminovno je postojanje gubitaka zbog prelamanja. Zašto u tom slučaju ne koristimo zatvoreni rezonator, nešto nalik mikrovalnoj šupljini? Odgovor stoji u činjenici da bismo zapravo eliminirali gubitke nastale zbog prelamanja, ali sveukupno bismo izgubili jer bi se omski gubici značajno povećali.

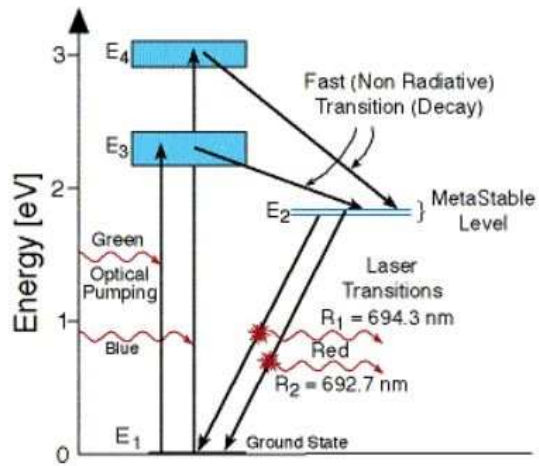
6. Vrste lasera

Postoji velik broj vrsta lasera, mogu biti organski ili neorganski, kristalni ili nekristalni, izolator ili poluvodič, plinski ili tekući, mogu imati fiksnu ili prilagodljivu frekvenciju, visoku ili nisku snagu, kontinuirani CW ili pulsirajući. Mogu biti pumpani pomoću drugog lasera, fluorescentnih lampi, električnih lukova, iradijacijom elektrona, ubačenim elektronima, ili na posve neelektrične načine, primjerice kemijskim laserom. Postoji veliki broj laserskih izvedbi stoga ću opisati samo neke od najpoznatijih lasera.

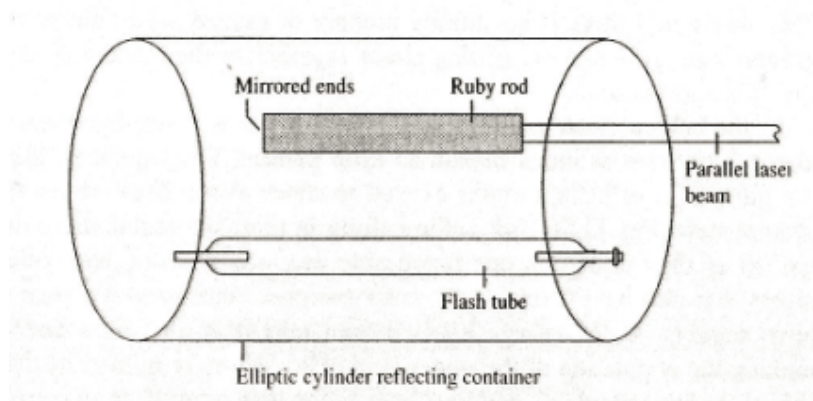
6.1. Laseri čvrstog stanja

Primjer takvog lasera je prvi konstruiran rubinov laser. Rubin je spoj Al_2O_3 , koji se naziva safir i iona kroma koji su safiru dodani kao primjesa. Crvena boja rubina dolazi od iona kroma (0,05%). Tipičan razmještaj skiciran je na slici 6 (preuzeto iz [3], koji prikazuje kako svjetlo nastalo u cijevi u kojoj ksenon oslobađa bljesak, „pumpa“ rubin do uzbuđenog stanja. Laserska svjetlost nastaje pri prijelazu sa nivoa E_2 na nivo E_1 . Ioni kroma apsorbiraju svjetlost valne duljine oko 545 nm te prelaze na visokopobuđeni nivo E_3 , s nivoa E_3 prelaze na metastabilni² nivo E_2 neradijativnim putem.

² Razine energije u kojima atomi mogu mirovati duže vremena (nekoliko milisekunda u ovom slučaju) nazivaju se „metastabilnima“



Slika 6. : Razine energije Cr^{3+} iona u rubinu. Razine pumpanja su široki pojasevi zelene i plave, koji efikasno apsorbiraju svjetlo bljeskajuće cijevi. Razina 2 je zapravo dvostruka (dvije linije vrlo blizu jedna drugoj), tako da se svjetlo lasera sastoji od dvije crvene linije valnih duljina 694.3nm i 692.9nm.

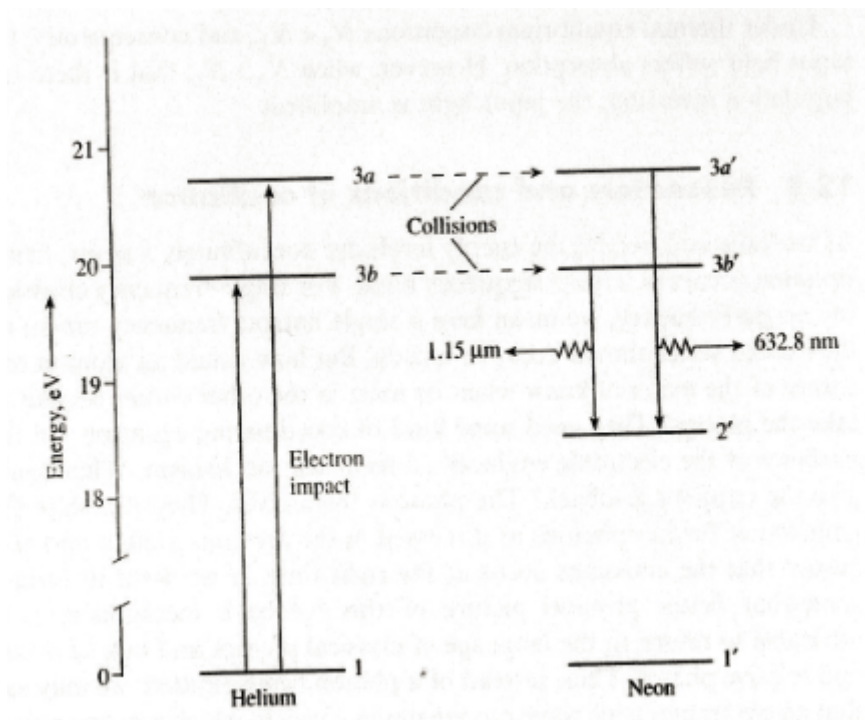


Slika 7. : Okvirno uređenje rubinskog lasera. Rubin i bljeskajuća cijev su učvršćene duž žarišta eliptičnog cilindričnog reflektora kako bi se ostvario maksimalni prijenos svjetlosne pumpe. *

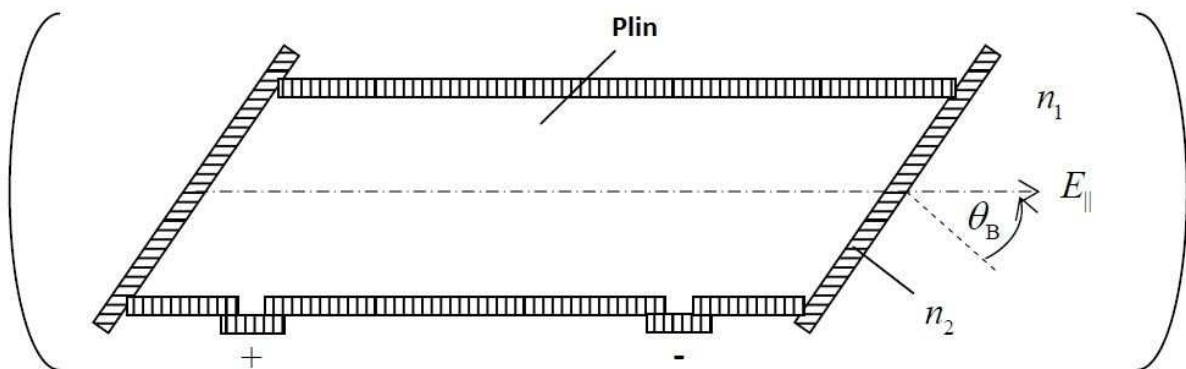
Danas se često koristi Nd:YAG laser, koji se sastoji od štapića itrij-alumijevog granata (YAG), dopiranog atomima neodimija. Nd:YAG daje infracrveno zračenje.

6.2. Laseri sa plinovitim pražnjenjem/ispuštanjem

Kada je strujanje propušteno kroz plin, primjerice kod fluorescentnih lampi najveći broj nabijenih čestica koje čine to strujanje dolaze od atoma plina koje su se ionizirale prilikom sudara. U helij-neonskom laseru aktivni plin je neon, ali prisutnost helija je veća za oko 7 do 10 puta. Stoga, postoji velik broj atoma helija uzbuđenih do stanja od otprilike 20eV iznad osnovnog stanja (*slika 8*). Sada se atomi helija u tim određenim stanjima mogu riješiti svoje energije sudarom s drugim atomima koji također imaju jednake razine energije. Kako neon ima dobro raspoređene razine energije, on je u stanju primiti dodatnu energiju čineći populaciju viših razina ($3a'$, $3b'$) brojnijom od one na nižim razinama ($2'$), te stoga laser može djelovati. Potrebno je, naravno, prilagoditi pritisak plinova, dimenzije cijevi za otpuštanje kako bismo ostvarili inverziju naseljenosti, što je ostvareno samo u vrlo uskom rasponu pritiska plinova od oko 1 Torra.



Slika 8. : Razine energije bitne za helij-neonski laser. Atomi helija uzbude se do razina 3a i 3b zbog udara ubrzanih elektrona. Atomi neona, koji slučajno imaju jednake razine energije ($3a'$, $3b'$) sudaraju se s atomima helija i preuzimaju višak energije. Djelovanje lasera sada se može pojaviti na dvije različite valne duljine, odgovarajući radijacijskim prijenosima s razine $3a'$ i $3b'$ na nižu razinu $2'$.

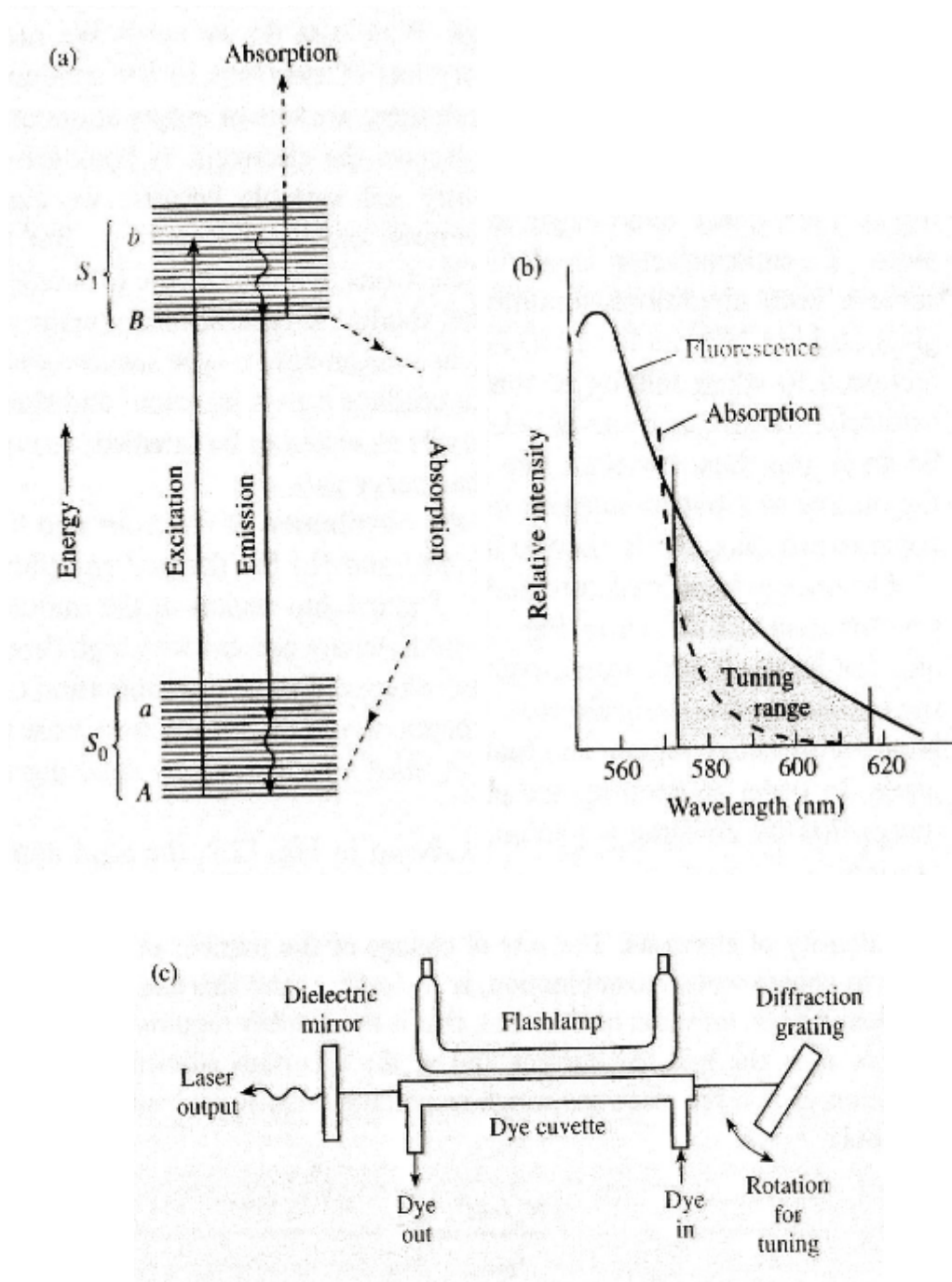


Slika 9. : Shematski prikaz plinskog lasera

Reflektori su s vanjske strane cijevi, kako je prikazano na slici 9. Potrebno je obratiti pažnju da su prozori optičke ravnine, nakošene prema Brewsterovom kutu, $\theta_B = \arctg \frac{n_2}{n_1}$ (n_2 je indeks loma materijala prozora, a n_1 indeks loma sredine iza prozora). Prozori se postavljaju pod kutom θ_B da bi se smanjili gubici uslijed refleksija na površinama prozora [za linearno polarizirano zračenje E_{\parallel} (u ravni crteža) nema gubitaka]. Kod plinskih lasera se obično koriste sferna zrcala (rezonator je stabilan). Mala gustoća plina predstavlja i nedostatak u odnosu na druge sredine jer je broj pobuđenih atoma plina po jedinici volumena manji, tako da je kod plinskih lasera teško postići impulse velike snage. U ovu skupinu lasera spadaju još i laser argonovih iona, koji djeluje u čistom Ar pražnjenju/ispuštanju te CO₂ laser.

6.3. Obojeni laseri

Ovo je zanimljiva skupina lasera, koja koristi fluorescentne organske boje kao aktivni materijal. Njihovo prepoznatljivo svojstvo je širok spektar emisije, koji dozvoljava prilagodbu oscilacija lasera. Njima bitne razine energije su prikazane na slici 10(a). Pumpa (bljeskajuća lampa ili drugi laser) će uzбудiti stanja u S_1 pojasu (prijenos $A \rightarrow b$) koji će opadati bez radijacije prema B i onda napraviti radijacijski prijenos ($B \rightarrow a$) na razinu energije u S_0 pojasu. Ovisеći o krajnjoj točki, a , postoji mogućnost emitiranja širokog raspona frekvencija. Na kraju, ciklus je završen neradijacijskim prijenosom ($a \rightarrow A$).



Slika 10:

- (a) Relevantne razine energije molekula boje. Valovite strelice koje idu od b do B i od a do A predstavljaju neradijacijske prijenose. Isprekidane linije također prekidaju neradijacijske prijenose u kojima su uključena neka druga stanja.
- (b) Raspon podešavanja rodamina 6G kao funkcije valne duljine.
- (c) Shematski prikaz prilagodljivog obojenog lasera.

Raspon prilagodbe određenog obojenog lasera (rodamin 6G) je prikazan na slici (10b) osjenčanim dijelom, gdje su fluorescentne i apsorpcijske krivulje nacrtane također i kao funkcija valne duljine. Djelovanje lasera postane moguće kada se susretnu apsorpcijska i fluorescentna krivulja.

6.4. Poluvodički laseri

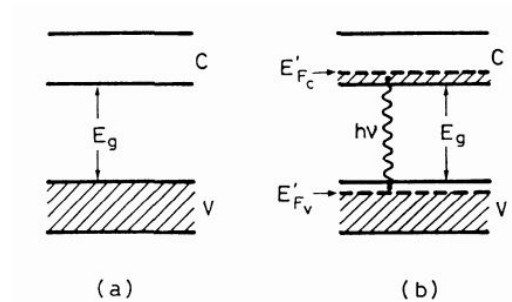
Kako funkcionira poluvodički laser? Osnovna ideja vrlo je jednostavna. Do laserskog djelovanja dolazi radijacijskom rekombinacijom u poluvodiču direktnog procjepa. Zašto direktni procjep? Zato što želimo da vjerojatnost prelaska s dna vodljive vrpce na vrh valentne vrpce bude velika. Što nam još treba? Treba nam komad materijala u kojem je mnogo elektrona u vodljivoj vrpici voljno opadati te u kojem je mnogo praznih stanja na vrhu valentne vrpce voljno prihvatiti elektrone. Homogeni poluvodič nije prikladan jer ne možemo postići oba stanja u isto vrijeme, samo jedno. Ali to nam daje ideju. Možemo imati mnogo elektrona u degeneriranom poluvodiču n-tipa, kao i mnogo šupljina u degeneriranom poluvodiču p-tipa. Spojimo li ih zajedno, tj. stvorimo li p-n spoj, u njegovoj sredini tada oba uvjeta mogu biti ostvarena, uzmemo li u obzir da je propusna polarizacija, U_1 , blizu energijskog procjepa.

Energetski spektar poluvodiča sastoji se od valentne i vodljive vrpce koje su razdvojene energetskim procjepom. Prema Paulijevom principu u svakom energetskom stanju mogu se nalaziti samo dva elektrona suprotnih spinova. Raspodjela vjerojatnosti popunjenosti stanja sa energijom E , pri temperaturi T , određena je Fermi-Diracovom funkcijom raspodjele:

$$F(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (6.4.1)$$

gdje je E_F tzv. Fermijeva energija, koja određuje granicu između popunjenih i nepopunjenih nivoa pri temperaturi $T = 0K$, [$F(E < E_F, 0) = 1$, $F(E = E_F, 0) = \frac{1}{2}$, $F(E > E_F, 0) = 0$]. Pri $T = 0K$ valentna je vrpca popunjena (štrafirano područje na slici 11a), a vodljiva prazna, tako da se poluvodič ponaša kao izolator]. Pretpostavimo da su (pri $T = 0K$) elektroni na neki način prevedeni iz valentne u vodljivu vrpcu. Unutar vodljive vrpce elektroni se za vrlo kratko vrijeme ($10^{-13}s$) rasporede na najniže nivoe i ta vrpca je popunjena do nekog nivoa $E_c = E'_{F_c}$ (vidjeti sliku 11. b). Analogno se rasporede i elektroni u valentnoj vrpici do nekog nivoa $E_v = E'_{F_v}$, a iznad toga nivoa (do vrha valentne vrpce) ostaju šupljine. Između valentne i vodljive vrpce pojavljuje se inverzija naseljenosti.

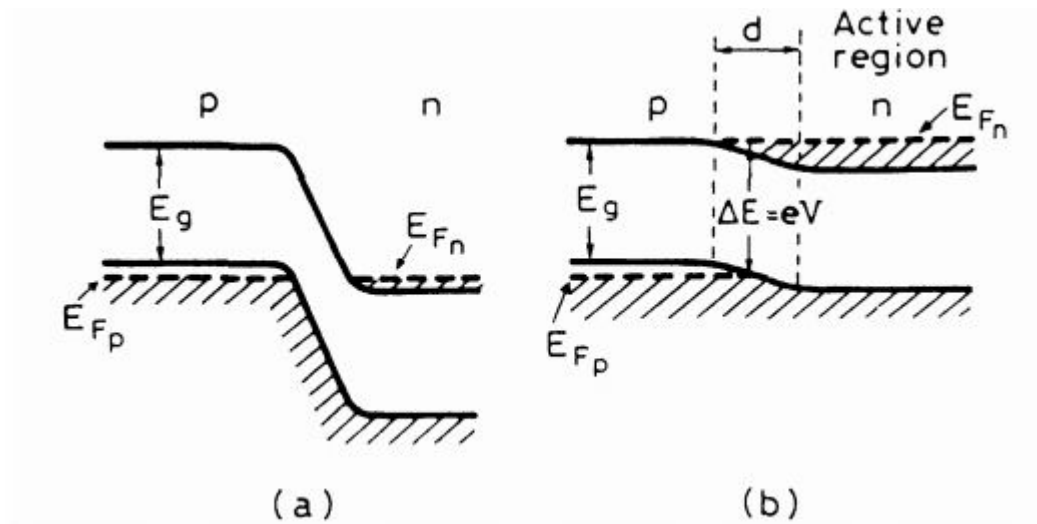
Parovi elektron-šupljina predstavljaju pobuđena stanja. Elektroni iz vodljive vrpce prelaze nazad u valentnu vrpcu (taj proces se naziva rekombinacija para elektron-šupljina), emitirajući pri tome foton. Ako se takav poluvodič smjesti u odgovarajući rezonator, stimulirani prijelazi, uzrokovani rekombinacijskim zračenjem, dovode do laserske generacije. Kako bi se proces nastavio, kad god par elektrona i šupljine nestane emitirajući foton, taj par mora biti zamijenjen injektiranjem novih nositelja.



Slika 11.: Shematski prikaz vrpce u poluvodiču i princip rada poluvodičkog lasera

6.4.1. Injektirani p-n laser

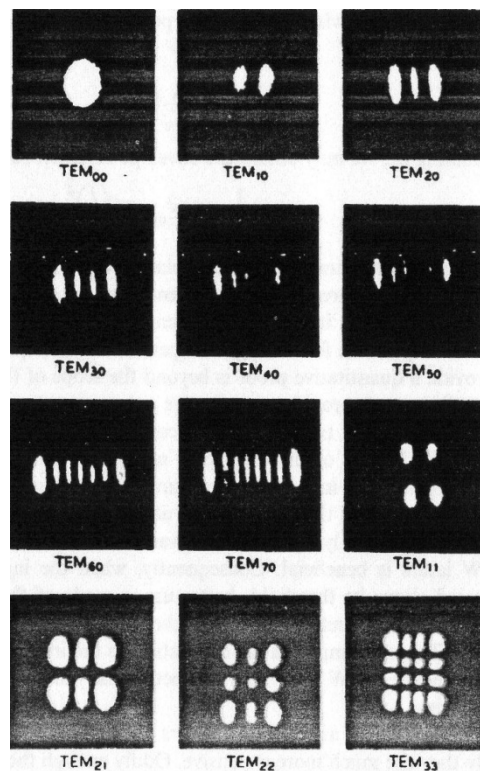
Poluvodič n-tipa se dobija tako što se čistom poluvodiču dodaju određene primjese (nečistoće) – tzv. donori, koji lako predaju elektrone u blizinu dna vodljive vrpce. Analogno, poluvodič p-tipa se dobije dodavanjem akceptora – atoma koji lako primaju elektrone iz blizine gornjeg kraja valentne vrpce. Kada p-n dioda nije priključena na vanjski napon (slika 12.a) elektroni “teku” sa n-strane ka p-strani sve dok se ne uspostavi potencijalna barijera U_B koja sprječava dalji tok elektrona. Pri tome Fermijev nivo $E_p = E_{F_p}$ poluvodiča p-tipa, koji je u valentnoj vrpce, i Fermijev nivo $E_n = E_{F_n}$ poluvodiča n-tipa, koji je u vodljivoj vrpce, imaju iste vrijednosti. Ako se na p-n spoj priključi napon V koji snižava potencijalnu barijeru (slika 12.b), nivoi se pomjeraju za $\Delta E = eV$, u području p-n prijelaza se injektiraju elektroni iz vodljive vrpce poluvodiča n-tipa i šupljine iz valentne vrpce poluvodiča p-tipa i tako se u tom prijelaznom području i stvara inverzija naseljenosti. (preuzeto iz [4])



Slika 12. :Princip rada p-n lasera bez (a) i sa (b) priključenim naponom U .
Sa p-n je označeno područje p-n prijelaza.

7. Transverzalni modovi

Kolika je amplituda distribucije elektromagnetskog vala u laserskom rezonatoru? Da li je ravnomjerna (stalna, jednolika) ili naglo varira preko poprečnog presjeka? Odgovore na ova pitanja dali su Kogelnik i Li u svom radu iz 1966., u kojem su teoretski i praktično pokazali moguće modove u laserskom rezonatoru. Eksperimenti su izvedeni u He-Ne laseru te su stvoreni modeli (uzorci) modova prikazani na *Sl. 13*. U većini slučajeva želimo čistu, glatku zraku kao što je u gornjem lijevom kutu. Ostale možemo eliminirati uvođenjem gubitaka za modove višeg reda. To možemo postići primjerice smanjivanjem veličine reflektora. Pošto modovi višeg reda imaju veći gubitak difrakcije, time će se istaknuti ispred osnovnog moda. Međutim, ovo djeluje i na funkcioniranje lasera u osnovnom modu. Stoga je učinkovitije staviti irisni zaslon/blendu u rezonator, čime bi se propustio osnovni mod, a „presreli“ modovi višeg reda.



Slika 13. : Eksperimentalno izmjereni modeli (uzorci) transverznog moda u He-Ne laseru s pravokutnim rezonatorom.

8. Pojačala optičkih vlakana

Pojačala su od presudne važnosti u komunikaciji na velike udaljenosti. Ideja korištenja pojačala stara je koliko i ideja o laserima. Ranih '60.-ih godina obavljani su eksperimenti s vlaknima dopiranima s N_d . Inverzija naseljenosti postignuta je flash-lampom. Ova ideja ponovno je zaživjela sredinom '80.-ih, kada se eksperimentiralo s erbijem kao elementom za dopiranje. Danas su svi tehnički problemi riješeni, a pumpa je dostupna u obliku diodnog lasera (ne bi bilo pametno stavljati flash-lampe na dno oceana). Zahvaljujući pojačalima dopiranim erbijem (EDFA), danas je moguće slati informacije brzinom 2.4 Gbit s^{-1} na udaljenost od 21 000 km.

Učinkovitost optičkih vlakana jako je napredovala. Mjera njihove učinkovitosti je količina informacija koja se može poslati na udaljenost bez korištenja repetitora (pojačalo se ne računa kao repetitor jer ono ne prekida optički val). Jedinica mjere je Gbit km s^{-1} . Između 1975. i 1991. narasla je s 1 na 50 000. Od onda se višestruko uvećala, a trenutno iznosi 1.6 milijuna. Ovo je slično godišnjem porastu broja tranzistora na čipu u vrijeme njihovog ubrzanog napretka. Iz toga možemo zaključiti da uređaji udvostručavaju svoje performanse svake godine.

9. Maseri

Preteča lasera je maser, koji je doživio široku uporabu ali je igrao važnu ulogu u znanosti kao najosjetljiviji detektor i pojačalo mikrovalnog zračenja. Izvorni akronim bio je „maser“ (microwave amplification by stimulated emission of radiation). Maseri su u prošlosti korišteni za amplifikaciju niskih šumova, ali to danas više nije slučaj. Ustupili su to mjesto ohlađenim parametarskim pojačalima. Maser je uređaj koji radi na jednak način kao i laser, ali u drugom frekvencijskom području. Maser je izvor mikrovalova, dok je laser izvor elektromagnetskih valova u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra. Što se tiče masera, važno je da se frekvencija (učestalost) djelovanja može promijeniti variranjem magnetskog polja. Drugim riječima, imamo podesivi maser. Potrebna magnetska polja mogu se izvesti u praksi. Moguće razine dane su jednadžbom (11.41):

$$E = -M_j g \mu_{mB} B, \quad M_j = J, J - 1, \dots - J \quad (5.1)$$

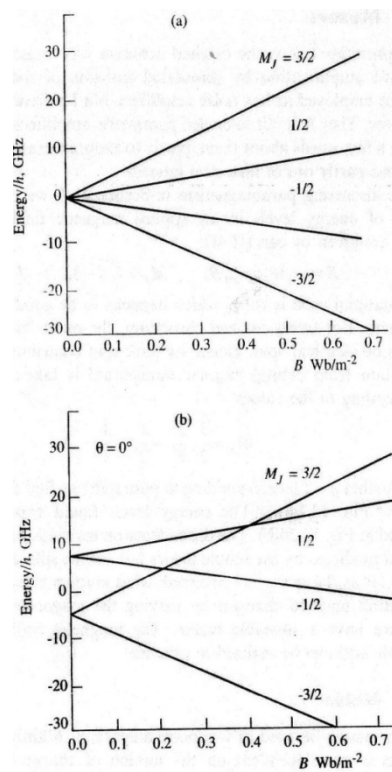
gdje je E =energija nivoa, M_j =projekcija ukupnog magnetskog dipolnog momenta, g = g -faktor, $\mu_{mB} = \frac{eh}{2m_e}$ Bohrov magneton koji iznosi $9,27 \cdot 10^{-24} J/T$

Kao materijal koristi se rubin, koji je pogodan i za lasere i za masere. Kod trostruko ioniziranog kroma vanjski 3d-omotač ima tri elektrona identične vrtnje. Stoga je njegov doprinos vrtnji $3/2$. Uzima se da je doprinos orbitalnog zakretnog momenta nula³, dakle $j = 3/2$, što dovodi do sljedećih vrijednosti:

$$M_j = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2} \quad (5.2)$$

Nadalje, uzmemo li da je $g = 2$, dobijemo energetske razine prikazane na Slika 14(a). Energetske razine dobivene eksperimentom ilustrirane su na *Slici 14b*.

³ Postoje i teoretska opravdanja za ovo, međutim pravi razlog je taj što ne postoji nikakva sličnost između teorije i eksperimenta ako ne zanemarimo orbitalni moment.



Slika 14: Cijepanje energetske razine Cr^{3+} iona u rubinu kao funkcija magnetskog polja. (a) U slučaju kada je orbitalni moment smanjen, a spinski se odvija samo zbog vrtnje. (b) Eksperimentalne krivulje za B u smjeru osovine simetrije rubina, $\theta = 0$.

10. Primjena

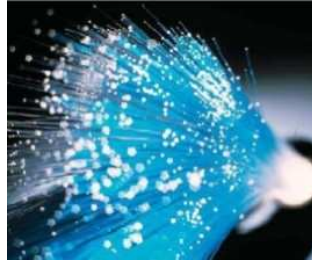
Proizvodnja različitih tipova lasera, njihovo tehnološko usavršavanje i povezivanje s optikom i elektronikom otvorilo je posve nova područja znanosti i tehnologije. Istovremeno, mnoge grane ljudske djelatnosti prepoznale su važnost laserskih tehnologija, što je dovelo do primjene lasera u industriji, u medicini i stomatologiji, u telekomunikacijama, ali i u energetici. Nepunih 15 godina od otkrića, He-Ne laseri i diodni laser postali su osnova za bar-kod čitače, uređaje koji registriraju crno-bijeli uzorak (kod) na način da se lasersko svjetlo reflektira od površine koda. Signal nastao refleksijom digitalizira se i pohranjuje u računalu. Svaki proizvod identificira se prema svom jedinstvenom proizvodnom kodu (*eng. Universal Product Code- UPC*). Na taj se način automatizirao rad s podacima o proizvodu u trgovinama, velikim supermarketima i skladištima. Ideja o takvom sustavu postojala je još 1930. godine, ali je zaživjela tek 1974., zahvaljujući laserima. Prvi proizvod čiji je bar-kod laserski skeniran na blagajni jednog supermarketa u Ohio-u bio je paketić Wrigley's žvakaćih guma. Tehnološka novost vezana uz bar-kod čitače su tzv. 2D bar-kodovi (*Slika 7*) koji bi se mogli čitati s mobitelima, pri čemu bi kupac u supermarketu mobitelom skenirao proizvod koji ga interesira, a podaci o proizvodu (sastav, cijena, kuponi pa čak i recepti) bi stigli na zaslon njegovog mobitela.



*Slika 15. : 2D bar-kod budućnosti.
Preuzeto: Barcodesolutions.com.au*

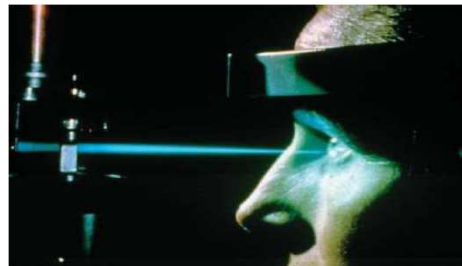
Laseri se koriste za pohranu i očitavanje podataka na različitim medijima CD, DVD, Blu-ray diskovi. Osnovna razlika između ova tri različita formata je valna duljina lasera potrebna za zapis informacije na disk. Ona iznosi 780 nm za CD, 650 nm za DVD i 405 nm za BD. Naime, što je valna duljina kraća, to je i difrakcijski limit za lasersku zraku manji, što omogućava gušće pakiranje podataka na fizičkom prostoru diska. Laseri se koriste i u laserskim printerima, za osvjetljavanje određenih područja na fotoosjetljivom valjku, kojim se onda tinta preslikava na papir. U tu svrhu se koriste mali poluvodički laseri. Laser je postao dominantan uređaj u telekomunikacijama.

Pomoću lasera se povezuju milijuni umreženih računala, prebacujući binarni kod računala u svjetlosni signal, koji se praktički bez ikakvih gubitaka prenosi optičkim kablovima na velike udaljenosti i to brzinom od nekoliko terabajta u sekundi (TBps). Optičke kablove čini snop optičkih vlakana.



*Slika 16. : Optička vlakna.
Preuzeto: PhysicsWorld*

Danas se proizvode pulsni laseri snage veće od $10^{15}W^4$. Visoki intenziteti pulsnih lasera omogućili su primjenu lasera u obradi materijala, npr. za rezanje i bušenje materijala. S obzirom na kratko trajanje pulsova, tj. na kratko vrijeme interakcije medija s pulsom, laserska obrada materijala ne vodi do taljenja i deponiranja već isparava i ostavlja čiste rubove na rezu ili rupi. Danas se ta svojstva koriste u autoindustriji. Zbog kolimiranosti laserske zrake, moguće je postići veliku preciznost prilikom obrade materijala, pa se često laseri koriste u kirurgiji; npr. moguće je laserom obraditi kapilaru u oku bez oštećenja okolnog tkiva i bilo kakve operacije na oku. Laserima se može liječiti i kratkovidnost i dalekovidnost, obradom očne leće.



*Slika 17. : Laserska operacija oka.
Preuzeto: PhysicsWorld*

Lasери se koriste i u dermatologiji i kozmetici, pri čemu se laserima tretiraju tumori, korigiraju ožiljci od akni i ozljeda te uklanjanju neželjene tetovaže.

⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Laser#Examples_by_power

Kod uklanjanja tetovaža (*slika 18*) koriste se svojstva pulsnih lasera visokog intenziteta (CO_2 laseri), koji mogu relativno bezbolno prodrijeti u potkožno tkivo gdje je smješten pigment boje koju želimo ukloniti.



Slika 18. : Postupak laserskog uklanjanja tetovaže

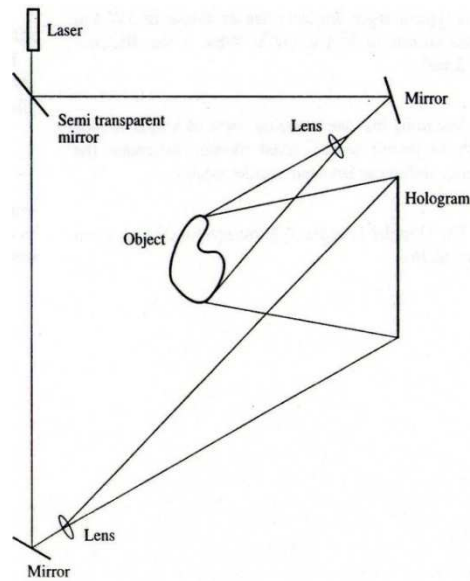
Laseri se već godinama, od 1994., intenzivno koriste i u stomatologiji, za uklanjanje zubnih naslaga te pripremanje zuba za punjenje ispunama, te za učvršćivanje ispuna jednom kada se umetnu u pripremljeni zub.



Slika 19. : Lasersko izbjeljivanje zuba

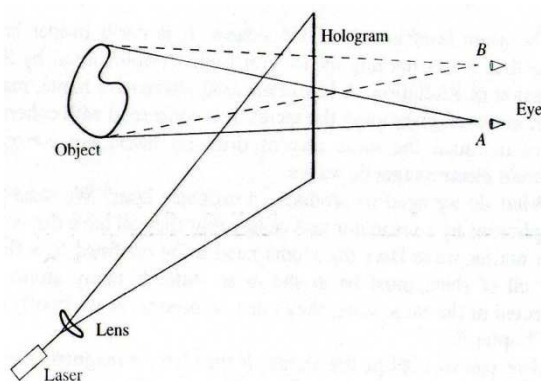
Laseri se koriste u spektroskopiji, kao intenzivni izvori monokromatičnog svjetla. U vojnoj tehnologiji se koriste, ili se razvijaju laseri kojima bi se uništio udaljeni objekt, npr. balistička raketa ili satelit.

Kao zadnju primjenu spomenuti ću *holografiju*, metodu rekonstrukcije slike koju je izmislio Dennis Gabor 1948. g. Teško je procijeniti koliko će ova tehnologija biti važna u budućnosti. Moguće je da zauvijek ostane predmet znanstvene znatiželje uz ograničenu primjenu kod testiranja materijala. S druge strane, možda bude imala toliki utjecaj na naš život kao što je to imala fotografija. Ipak, holografija i laseri postali su usko vezani prvenstveno zato što se rekonstrukcija holografskog prikaza najlakše postiže laserima na optičkim frekvencijama.



Slika 20. : Shematski prikaz stvaranja holograma.

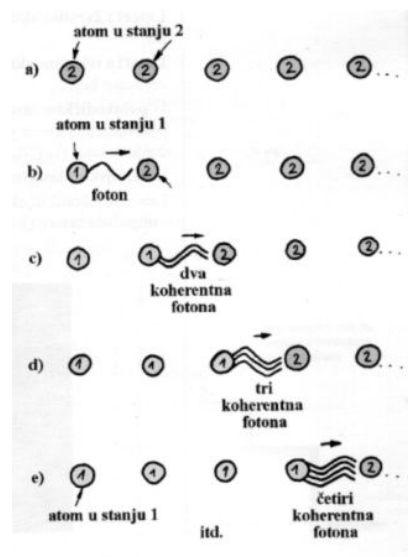
Na Sl. (20) možemo vidjeti kako se stvara hologram. Laserski snop rascijepljen je na dva dijela te jedna od zraka osvjetljava objekt. „Hologram“ se dobije tako što se svjetlost raspršena s predmeta prepliće s drugom zrakom. Interferencijski uzorak koji se pojavi ovisi i o fazi i o amplitudi raspršene svjetlosti. Pohranjujući ovu informaciju na fotografsku ploču dobijemo našu „sliku“, no ona nimalo ne liči na objekt. Točnu projekciju dobije se tek kada hologram osvjetlimo laserom (Sl 21). Pomičući oko iz točke A u točku B znači da predmet gledamo iz drugog kuta te nam pregled izgleda drukčije, baš kao što bi to bilo u stvarnosti. Projekcija koju dobijemo jednake je kvalitete kao sam predmet, ako ne i bolje.



Slika 21. : Shematski prikaz čitanja holograma.

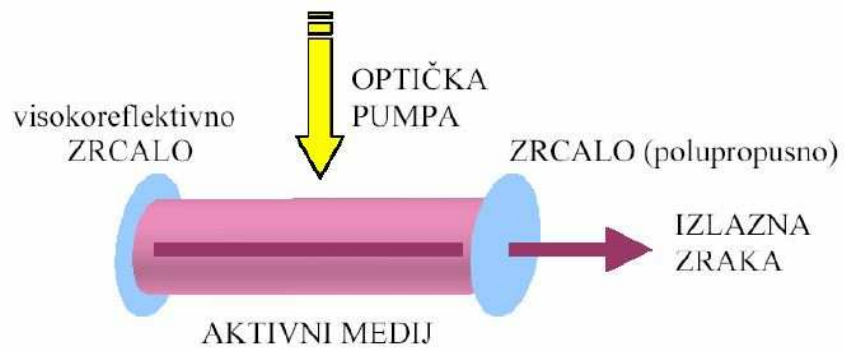
11. Metodički dio

Laseri se obrađuju kao nastavna tema u fizici u četvrtom razredu srednje škole. To je jedna od tema u nastavnoj cjelini Energijski spektri. Prije početka osmišljavanja tijeka nastavnog procesa bitno je definirati cilj i zadatke koji se planiraju ostvariti prilikom obrade ove teme. Cilj je objasniti stimuliranu emisiju atoma i načelo rada lasera. Prilikom definiranja zadataka trebamo voditi računa da koristimo precizne glagole iz Bloomove taksonomije. Bloomova taksonomija dijeli učenička postignuća na tri kategorije: kognitivno (područje znanja i razumijevanja), psihomotoričko (područje stavova i uvjerenja) te afektivno (područje vještina-umijeća). Da bi se cilj ostvario učenicima treba objasniti princip rada lasera te primjenu lasera. Kroz obradu ove nastavne teme kod učenika razvijamo apstraktno mišljenje, komunikaciju, prihvaćanje znanstvenog jezika i stava. Učenicima ističemo važnost znanstvenih otkrića i pokazujemo koliko su bitna u svakodnevnom životu. Za početak sata bitno je s učenicima ponoviti neke pojmove kao što je foton, orbitale, elektromagnetsko zračenje, kvant. Time smo napravili korelaciju s kemijom i potaknuli učenike na razmišljanje. Bitno je da tijekom cijelog nastavnog procesa postoji stalna komunikacija s učenicima. Osim ploče i krede potrebno je koristiti suvremena nastavna sredstva i pomagala kao što su projektor i računalo. Prikazati učenicima na projektoru slike spontane i stimulirane emisije, dijelove lasera.



Slika 22. : Nastanak laserskog zračenja

Naglasiti glavne karakteristike laserskog zračenja: koherentnost, usmjerenost, monokromatičnost. Pokazati učenicima dijelove lasera.



Slika 23. : Dijelovi lasera

Učenike se može zainteresirati za ovu temu i pravljenjem plakata. Na taj način razvijamo modernu konstruktivističku nastavu temeljenu na interaktivnim metodama. Kod učenika razvijamo znanstveni način razmišljanja i interes za fiziku.

12. Zaključak:

Premda je prošlo već 51 godina od prvog lasera na kristalu rubina, razvoj tehnike, tehnologije, pa čak i fizike lasera ni izdaleka nije usporen. Taj tehnološki napredak doveo nas je do shvaćanja kako fotoni kao svjetlosni kvanti, u rubnim tehnologijama današnjice, igraju ulogu kao što su to igrali elektroni u dvadesetom stoljeću. T. Maiman nije mogao ni naslutiti da će njegov izum postati tako važan istraživački instrument, ali i uređaj koji će se duboko usaditi u ljudsku svakodnevicu. Zapravo, možemo reći da je laser postao jedan od najpoznatijih i najpriznatijih izuma fizike. Laserima možemo slati informacije, korigirati vid, izoštravati astronomske slike dalekog svemira, obrađivati različite materijale. Zbog toga je primjena različitih lasera u industriji sve veća i zahvaća sve novija područja, a naročito u daljnjem razvoju nanotehnologije i telekomunikacija. Koliko je važno otkriće lasera, govori podatak da je u proteklih 50 godina čak 14 Nobelovih nagrada iz područja prirodnih znanosti podijeljeno za ona znanstvena otkrića koja su direktno povezana uz lasere.

13.Literatura:

- [1] Solymar, L., Walsh, D. Electrical properties of materials. Sixth Edition: Oxford University Press, 1998.
- [2] Paar, V. : Udžbenik za 4. razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb,2004.
- [3] <http://www.fer.hr/download/repository/Laseri-cvrsti.pdf> (17.05.2011)
- [4] http://www.pmf.unsa.ba/fizika/Site/DODIPLOMSKI_4_files/Osnove_laserske_fizike_6.pdf (6.05.2011)
- [5] http://eskola.hfd.hr/clanci/50_godina_lasera_Natasa_Vujicic.pdf (20.04.2011)
- [6] http://eskola.hfd.hr/susreti/Laseri_Ticijana_Ban.pdf (20.04.2011)
- [7] <http://hr.wikipedia.org>
- [8] <http://library.thinkquest.org/C0130388/index4.html> (12.05.2011)
- [9] <http://znano.st/znanost-matematika-fizika-kemija/4/bolji-laseri-za-opticku-komunikaciju/124/> (12.05.2011)

14. Životopis

Rođena sam 21.04.1987. godine u Vinkovcima. 2002. godine sam završila osnovnu školu „Bartola Kašića“ u Vinkovcima. 2006. godine sam završila srednju školu, Gimnaziju u Vinkovcima. Iste godine sam upisala preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku i 2009. godine stekla naziv sveučilišne prvostupnice fizike. Iste godine upisujem diplomski studij fizike i informatike također na Odjelu za fiziku. Od prve godine studija primam braniteljsku stipendiju iz Fonda za stipendiranje hrvatskih branitelja iz domovinskog rata i djece hrvatskih branitelja iz domovinskog rata.