

Laseri

11.1 Fizički princip laserskog zračenja

Sama reč laser je skraćenica i znači Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – pojačanje svetlosti pomoću stimulisane emisije zračenja. Za razliku od vidljive svetlosti lasersko zračenje je monohromatsko, koherentno (prostorno i vremenski) i izuzetno visoke snage. U osnovi procesa laserskog zračenja nalazi se proces stimulisane, prinudno indukovane emisije svetlosti.

Da bi se u potpunosti razumeo fizički princip laserskog zračenja potrebno je prvo opisati Bohrov model atoma. Po tom modelu, atom se sastoji iz atomskog jezgra i elektronskog omotača. Svaki atom sadrži određenu količinu unutrašnje energije koja je strogo kvantizirana, odnosno, unutrašnja energija atoma može imati samo određene, strogo definisane vrednosti. Po prirodnim zakonima, svaki atom teži da bude u stanju sa minimumom unutrašnje energije. To stanje se naziva osnovno ili ne pobuđeno stanje. Moguće je da se atom nađe i u stanju sa višom unutrašnjom energijom. To stanje se naziva pobuđeno stanje i atom teži da se vrati u osnovno stanje.

Energija atoma je, u suštini, sadržana u njegovom elektronskom omotaču. Elektroni iz tog elektronskog omotača mogu da zauzimaju samo tačno određene orbite, koje određuju energetske nivo celog atoma. U osnovnom stanju, elektroni se u atomu nalaze na najnižim energetskim orbitama. U pobuđenom stanju, jedan ili više elektrona u atomu se nalazi na višim energetskim orbitama. Svaki pobuđeni atom teži da pređe sa višeg energetskog nivoa na niži energetski nivo, tako što će elektron da se spusti sa više energetske orbite na nižu energetsku orbitu, i pri tome da emituje foton čija je energija jednaka razlici energija posmatranih orbita.

Razmotrimo prvo primer iz svakodnevnog života, a to je sijalica sa usijanim volframovim vlaknom. Ona predstavlja izvor obične bele svetlosti kod koje se energija dovodi, stručno se kaže pumpa, u atome volframa koji se dovode u pobuđeno stanje. Pobuđeni atomi teže da se vrate u osnovno stanje tako što spontano (bez spoljne prisile) emituju apsorbovanu energiju u vidu fotona, koji ima potpuno slučajan pravac. Moguće je primetiti da se pobuđeni atomi volframa nezavisno jedan od drugog vraćaju u osnovno stanje. To znači da emitovani fotoni nisu u fazi, odnosno da nemaju nikakvu faznu zavisnost i da je emitovana svetlost nekoherentna bela svetlost koju vidimo.

Drugi bitan efekat za razumevanje rada lasera je stimulisana emisija zračenja, koju je opisao Albert Einstein, 1917. godine. Ako atom pogodi foton sa dovoljno visokom energijom, tada atom može da apsorbuje foton i pređe u pobuđeno stanje (više energetske stanje). Atom teži da se vrati u niže energetske stanje (koje ne mora neophodno da bude osnovno stanje) pomoću emisije fotona na jedan od dva moguća načina. Jedan od načina je spontano emitovanje fotona, dok je drugi emitovanje fotona na osnovu prisustva elektromagnetnog zračenja odgovarajuće frekvencije. Ovaj drugi način emitovanja fotona naziva se stimulisana emisija i predstavlja

osnovni fizički princip laserskog zračenja. Energija fotona koja se emituje jednaka je razlici energija višeg i nižeg energetskeg nivoa

$$E_p - E_k = h \cdot \nu_{pk}, \quad (11.1)$$

gde su:

E_p –energija polaznog, višeg energetskeg nivoa,

E_k –energija krajnjeg, nižeg energetskeg nivoa,

h –Planckova konstanta,

ν_{pk} –frekvencija emitovanog fotona svetlosti.

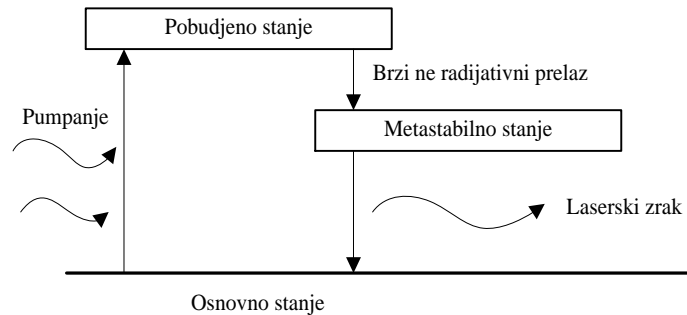
Ako se želi da elektromagnetno zračenje izazove stimulisanu emisiju pobuđenog atoma, tada elektromagnetno zračenje mora imati frekvenciju ν_{pk} . Značajno je da emitovani foton ima:

- istu fazu i istu polarizaciju kao elektromagnetno zračenje koje ga je izazvalo,
- širi se u smeru elektromagnetnog zračenja koje ga je izazvalo.

Važno je primetiti da emitovani foton doprinosi povećanju gustine fluksa elektromagnetnog zračenja koje je dovelo do emitovanja tog fotona. Budući da se većina atoma nalazi u osnovnom stanju, velika je verovatnoća da će emitovani foton ponovo biti apsorbovan i da neće izazvati stimulisanu emisiju novih fotona. Međutim, ako bi na neki način uspeli da veliki broj atoma dovedemo u pobuđeno stanje, a samim tim ostane mali broj atoma u osnovnom stanju, tada bi emitovani foton sa odgovarajućom frekvencijom izazvao pojavu većeg broja fotona koji bi bili u fazi sa njim. To je tkzv. efekat lavine, gde jedan foton izaziva pojavu stimulisane emisije većeg broja fotona. Populacija atoma koji su dovedeni u pobuđeno stanje naziva se populaciona inverzija. Ako je moguće dovođenjem spoljne energije održavati populacionu inverziju, tada će stimulisana emisija fotona biti sve snažnija i, u jednom trenutku, formiraće se snop izuzetno snažne monohromatske i koherentne svetlosti.

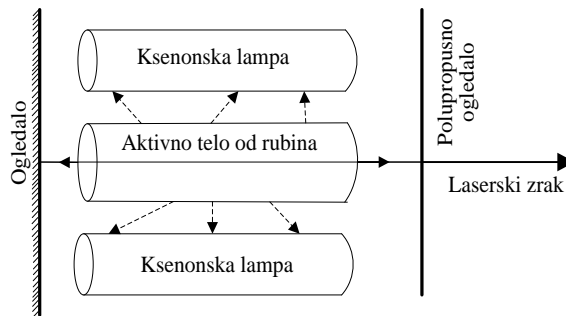
Osnovni problem kod projektovanja lasera je pronalaženje odgovarajuće supstance, koja dozvoljava formiranje populacione inverzije. Prvi materijal sa kojim je uspešno formirana populaciona inverzija i formiran laserski sistem je sintetički rubin. Rubin je kristal aluminijuma (Al_2O_3), kod koga je manji deo aluminijumovih jona Al^{3+} zamenjen sa jonima hroma Cr^{3+} . Joni hroma daju rubinu karakterističnu crvenu boju i oni se koriste za formiranje populacione inverzije u rubinskom laseru. U rubinskom laseru, šipka rubina se osvetljava intenzivnim bljeskovima ksenonske lampe. Joni hroma upijaju zelenu i plavu svetlost lampe i povećavaju energiju elektrona sa osnovnog nivoa u visoko pobuđeno stanje. Elektroni iz tog visokopobuđenog stanja veoma brzo prelaze u metastabilno stanje. Taj prelaz je ne radijativni, odnosno ne zrači se nikakva svetlosna energija, već se energija oslobađa rasipanjem toplotne energije koja zagreva šipku rubina. Osnovna karakteristika metastabilnog stanja je da ima dosta dugačko vreme života (oko 4 milisekunde). Ovo dugačko vreme života omogućava da veliki deo (više od polovine) jona hroma pređe u metastabilno stanje i, na taj način, formira se populaciona inverzija, koja je neophodna da bi stimulisana emisija fotona mogla da savlada apsorpciju i dovede do pojačanja svetlosti.

Pojedini joni hroma će na spontani način preći iz metastabilnog stanja u osnovno stanje i pri tome će emitovati fotone na talasnoj dužini od 694.3 nm, što odgovara crvenoj boji u vidljivom delu spektra. Ti emitovani fotoni će pomoću stimulisane emisije, u interakciji sa metastabilnim jonima hroma, proizvesti nove fotone, na istoj talasnoj dužini. Važno je primetiti da svaki foton koji reaguje sa jonima hroma u metastabilnom stanju proizvodi dva nova fotona i na taj način se stvara efekat lavine. Grafički prikaz opisanog procesa dat je na slici 11.1.



Slika 11.1. Princip rada trostepenog lasera

Da bi se dobio jak impuls laserskog zračenja potrebno je pored rešenja pojačanja zračenja pomoću stimulisane emisije fotona, rešiti i problem pozitivne povratne sprege. To se rešava pomoću sledeće principijelne šeme, prikazane na slici 11.2.



Slika 11.2. Principijelna šema laserskog sistema

Kao što se sa slike 11.2 može videti, ksenonska lampa služi za pumpanje energije u štapić od rubina i prevođenje jona hroma u metastabilno stanje. Joni hroma, na osnovu stimulisane emisije, počinju da emituju fotone u svim pravcima. Međutim, samo fotoni koji su emitovani duž ose štapića od rubina se odbijaju od sistema ogledala (dva ogledala) i na taj način se dodatno pojačavaju. Kada se zrak dovoljno pojača polupropusno ogledalo propušta zrak van laserskog sistema. U tom trenutku je stvoren laserski impuls koji izlazi van sistema.

11.2 Osnovne komponente laserskog sistema

Da bi laserski sistem mogao da funkcioniše on mora da se sastoji iz sledećih osnovnih komponenti:

- aktivnog tela,

- sistema za pobuđivanje,
- rezonatorskog sistema.

Uloga aktivnog tela je da generiše veliki broj fotona pomoću stimulisane emisije, koji će biti u fazi i kretać se u istom smeru. To se postiže preko populacione inverzije, kao što je opisano u prethodnom poglavlju.

Uloga sistema za pobuđivanje je pumpanje energije u aktivnom telu i njegovo dovođenje u metastabilno stanje sa populacionom inverzijom.

Uloga rezonatorskog sistema je pojačanje emisije fotona pomoću formiranja pozitivne povratne sprege. Rezonatorski sistemi se najčešće prave od ogledala koja reflektuju fotone i, na taj način, vraćaju ih u aktivno telo, koje pomoću stimulisane emisije generiše nove fotone.

Aktivno telo može biti napravljeno od elemenata u sva tri agregatna stanja. Aktivna tela u čvrstom stanju najčešće se prave od: rubina, kalcijum – fluorida, kalijum – volframata, kalcijum – molibdata, stakla, itrijum – aluminijum granata. Ovi materijali se dopiraju sa elementima iz grupe retkih zemalja. U aktivna tela u čvrstom stanju spadaju i poluprovodnici tipa galijum arsenida i slični. Aktivna tela u tečnom stanju najčešće su rastvori jedinjenja elemenata iz grupe retkih zemalja, ili rastvori organskih boja. Aktivna tela u gasovitom stanju su obično helijum – neon, argon, kripton, ugljen – dioksid i slični gasovi.

Sistem za pobuđivanje može biti:

- optički,
- strujni,
- visokofrekventni.

Optički sistem za pobuđivanje sastoji se najčešće od različitih tipova lampi. Često se primenjuju lampe sa gasovima (npr. ksenonska lampa). Optički elementi za pobuđivanje mogu biti raspoređeni u cilindričnoj i eleiptičnoj konfiguraciji. Cilindrična konfiguracija se sastoji od visoko poliranog, metalnog cilindra i spiralne lampe – bljeskalice, koja je obavijena oko aktivnog tela. Eliptična konfiguracija ima cilindar u obliku elipse. U žižnim tačkama elipse nalaze se bljeskalica i aktivno telo. Svi emitovani fotoni moraju proći kroz oba fokusa elipse i usmeriti energiju ka aktivnom telu.

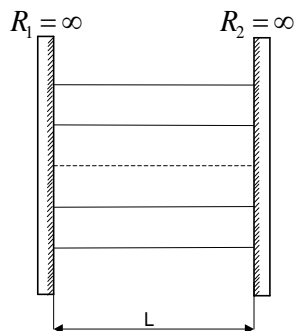
Strujni sistemi za pobuđivanje generišu određene oblike strujnih impulsa potrebnih za napajanje pojedinih tipova lasera (poluprovodnički i gasni, na bazi ugljen dioksida). Njihova pogodnost se ogleda u visokom stepenu iskorišćenja energije (oko 20%).

Visokofrekventni sistemi za pobuđivanje generišu elektromagnetno polje, koje se koristi za pobudu aktivnog tela koje je sastavljeno od plemenitih gasova.

Rezonatorski sistem predstavlja sistem od dve reflektujuće površine između kojih se nalazi aktivno telo. Rezonatorski sistemi se mogu podeliti na:

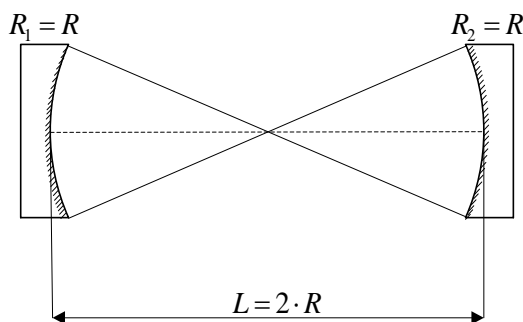
- planparalelne rezonatore,
- koncentrične (sferične) rezonatore,
- konfokalne rezonatore,
- hemisferične rezonatore,
- rezonatore velikog poluprečnika.

Planparalelni rezonator se sastoji iz ravnog ogledala i ravnog polupropusnog ogledala. On je veoma osjetljiv na nepodešenost (odstupanje od stroge paralelnosti), pa se stoga ređe koristi. Odstupanje od stroge paralelnosti ravnih ogledala rezonatorskog sistema dovodi do efekta “razlaza”, što povećava gubitke u laseru. Ako postoji i najmanja zakrivljenost površina rezonatorskih ogledala, to dovodi do stvaranja velikih difrakcionih gubitaka koji čak mogu onemogućiti rad lasera. Dobra strana planparalelnih rezonatora je u pobuđenosti svih atoma i iskorišćenju cele zapremine. Planparalelni rezonator prikazan je na slici 11.3.



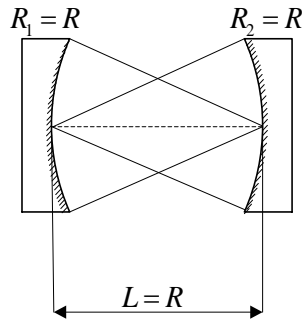
Slika 11.3. Planparalelni rezonator

Koncentrični (sferični) rezonator sastoji se iz dva sferna ogledala koja imaju podjednake poluprečnike i nalaze se na rastojanju koje je jednako dvostrukom poluprečniku. Jedno od ogledala je izvedeno kao polupropusno, da bi laserski zrak u odgovarajućem trenutku mogao da napusti rezonatorski sistem. Glavni problem i kod ovog rezonatorskog sistema je zahtev za visokom podešenošću ogledala. Koncentrični (sferični) rezonator prikazan je na slici 11.4.



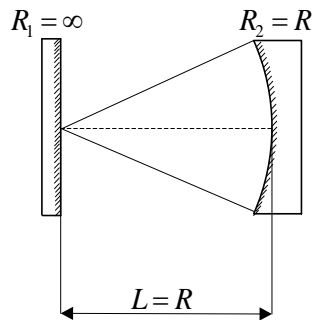
Slika 11.4. Koncentrični (sferični) rezonator

Konfokalni rezonator sastoji se iz dva sferna ogledala sa jednakim radijusima. Rastojanje između ogledala je jednako radijusu ogledala. Jedno od ogledala je izvedeno kao polupropusno, da bi laserski zrak u odgovarajućem trenutku mogao da napusti rezonatorski sistem. Konfokalni rezonator prikazan je na slici 11.5.



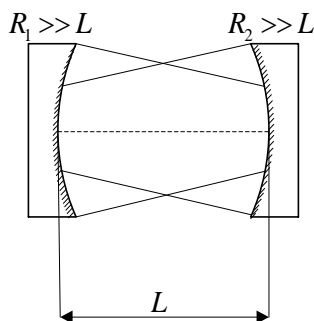
Slika 11.5. Konfokalni rezonator

Hemisferični rezonator sastoji se od ravnog i sfernog ogledala. Rastojanje između ogledala je jednako radijusu sfernog ogledala. Jedno od ogledala je izvedeno kao polupropusno, da bi laserski zrak u odgovarajućem trenutku mogao da napusti rezonatorski sistem. Glavni nedostatak hemisferičnog rezonatora je u maloj izlaznoj snazi. Hemisferični rezonator prikazan je na slici 11.6.



Slika 11.6. Hemisferični rezonator

Rezonator velikog poluprečnika se sastoji iz dva sferna ogledala, koja obično imaju poluprečnike 10 do 20 puta veće nego što je rastojanje između njih. Jedno od ogledala je izvedeno kao polupropusno, da bi laserski zrak u odgovarajućem trenutku mogao da napusti rezonatorski sistem. Dobra strana ovog rezonatora je relativno velika zapremina i veliki broj pobuđenih atoma, što omogućava veće izlazne snage lasera. Rezonator velikog poluprečnika prikazan je na slici 11.7.



Slika 11.7. Rezonator velikog poluprečnika

11.3 Zaštita od laserskog zračenja

Lasersko zračenje se razlikuje od drugih oblika svetlosnog zračenja po tome što je koherentno, pa se lakše i bolje fokusira. Snaga laserskog zračenja po jedinici površine je daleko veća od snage drugih prirodnih ili veštačkih izvora svetlosti. Zbog toga lasersko zračenje može da predstavlja opasnost za ljudska tkiva a naročito za oko, kao najosetljiviji deo tela.

U normalnim uslovima, očni kapci štite oči od 95% upadnog zračenja, jer se zatvaraju prilikom pojave izvora svetlosti u vidnom polju. Međutim, ova prirodna reakcija nije efikasna zaštita od lasera, jer je ljudsko oko osetljivo samo na vidljivu svetlost, a laseri obično zrače u bliskoj IC oblasti.

Zračenje u vidljivoj i bliskoj IC oblasti je najopasnije za ljudsko oko jer se ono fokusira na mrežnjači. Zračenja u ultravioletoj oblasti i u infracrvenoj oblasti sa talasnim dužinama preko 3 μm su znatno bezopasnija za ljudsko oko, jer se ona apsorbuju na suznom prekrivaču debljine 7 – 10 μm i rožnjači debljine oko 600 μm .

Vidljivo i blisko IC zračenje se fokusira na maloj površini mrežnjače prečnika oko 20 μm . Koncentracija energije laserskog zračenja po jedinici površine mrežnjače može da bude i do 100000 puta veća nego na rožnjači. Najveći deo energije apsorbuje tanki pigmentni sloj koji se nalazi neposredno uz svetlosno osetljive elemente – štapiće i čepiće.

Postoje sledeći mehanizmi oštećenja usled laserskog zračenja:

- nelinearni efekti, koji su dominantni za kratkotrajna izlaganja laserskom zračenju reda piko i nano sekundi,
- termalni efekti, koji su dominantni za izlaganja laserskom zračenju u trajanju od mikrosekunde do sekunde.

Kod nelinearnih efekata, između ostalog, dolazi i do generisanja kratkotrajnih akustičkih talasa zbog brze predaje energije i stvaranja plazme koja zavisi od jačine električnog polja.

Kod termalnih efekata, primarno oštećenje nastaje zbog povišenja temperature koje je posledica apsorpcije energije zračenja. Da bi nastalo oštećenje, potrebno je povišenje temperature od najmanje 10°C u odnosu na temperaturu tela.

Najteže povrede nastaju u centralnom delu mrežnjače, u oblasti centralne jamice, koja sadrži najveći broj čepića. Pošto se tu nalazi najvažniji deo za vid u dnevnim uslovima, njegovo

oštećenje može prouzrokovati delimično ili potpuno slepilo. Ako se oštećenje nalazi na periferiji mrežnjače i nije veliko često može da prođe i nezapaženo.

Laserski daljinomeri obično zrače u bliskoj IC oblasti spektra (najčešće na 1.06 μm). Energija laserskog zraka je velika i ona na nekoliko metara od daljinomera stvara temperaturu od 180°C. Zbog toga se za vreme merenja daljine laserski daljinomer nikada ne sme uperiti na čoveka ili na mesto gde se može nalaziti čovek. Zato je potrebno za svaki tip laserskog daljinomera odrediti bezbednu daljinu. Pod bezbednom daljinom podrazumeva se rastojanje od laserskog daljinomera, u direktnom snopu zračenja, preko kojeg je štetno dejstvo na čulo vida zanemarljivo. Bezbedna daljina je definisana jednačinom

$$d_{bez} \geq \frac{D_z \cdot \sqrt{\frac{E_{izl}}{E_z}} - D_b}{\varphi_d}, \quad (11.2)$$

gde su:

d_{bez} –bezbedna daljina za ljudsko oko,

D_z –prečnik zenice oka,

D_b –prečnik izlaznog otvora predajne optike laserskog daljinomera,

E_{izl} –energija laserskog zraka na izlazu iz laserskog daljinomera,

E_z –dozvoljeni nivo energije laserskog zraka na zenici oka,

φ_d –ugao divergencije laserskog zraka.

Za laserske daljinomere sa NdYAG laserom, usvojeno je da je maksimalni dozvoljeni nivo izlaganja oka laserskim zracima 2.5 μJ/cm². Za domaći laserski daljinomer RLD M84, bezbedna daljina je 215 m ako se laserski daljinomer koristi danju, odnosno 526 m, ako se laserski daljinomer koristi noću.

11.4 Tipovi lasera

Lasere je moguće podeliti prema sledećim karakteristikama:

- način generisanja laserskog impulsa,
- fizičko stanje aktivnog elementa,
- snaga i spektar generisanja laserskog zraka.

Prema načinu generisanja laserskog impulsa moguće je razlikovati impulsne i kontinualne lasere. Impulsni laseri zrače kratak i snažan impuls laserskog zračenja. Kontinualni laseri imaju neprekidno lasersko zračenje. Neprekidno lasersko zračenje se omogućava konstantnim pobuđivanjem aktivnog tela.

Prema fizičkom stanju aktivnog tela laseri se mogu podeliti na:

- čvrstotelne,

- gasovite,
- tečne,
- poluprovodničke.

Kod čvrstotelnih lasera aktivno telo najčešće se pravi od plastične mase ili optičkog stakla koje je dopirano sa elementima iz grupe retkih zemalja. Prvi čvrstotelni laser bio je rubinski laser. Danas se dosta koristi Nd YAG (Neodimijum Itrijum Aluminijum Granat). Nd YAG laser zrači u bliskoj infracrvenoj oblasti na talasnoj dužini od 1064 nm. Prednost Nd YAG lasera u odnosu na ostale čvrstotelne lasere je u maloj energiji potrebnoj za pobuđivanje. U vojnim primenama, najčešće se koriste čvrstotelni laseri.

Kod gasnih lasera aktivno telo je neki gas, smeša gasova ili pare metala. Gasni laseri se dele prema načinu formiranja populacione inverzije na:

- lasere sa pražnjenjem u gasu,
- gasodinamičke lasere,
- hemijske lasere.

Laseri sa pražnjenjem u gasu populacionu inverziju postižu putem električnog pražnjenja u gasu. Kod gasodinamičkih lasera populaciona inverzija se postiže pomoću brzog hlađenja, pri širenju smeše gasova koja je zagrejana na visokoj temperaturi i koja je sabijena pod visokim pritiskom. Za postizanje populacione inverzije kod hemijskih lasera, koristi se energija koja se oslobađa prilikom hemijske reakcije komponenata aktivnog tela.

Kod tečnih lasera, aktivno telo je rastvor neorganskih jedinjenja elemenata iz grupe retkih zemalja (najčešće neodimijum – Nd), ili rastvor organskih boja.

Aktivno telo poluprovodničkih lasera je u čvrstom stanju, ali je izdvojeno u posebnu grupu, zbog specifičnosti formiranja laserskog zračenja. Kod poluprovodničkih lasera, lasersko zračenje se formira protokom velike gustine struje preko p-n spoja.