

Spontana i stimulisana emisija

UVOD

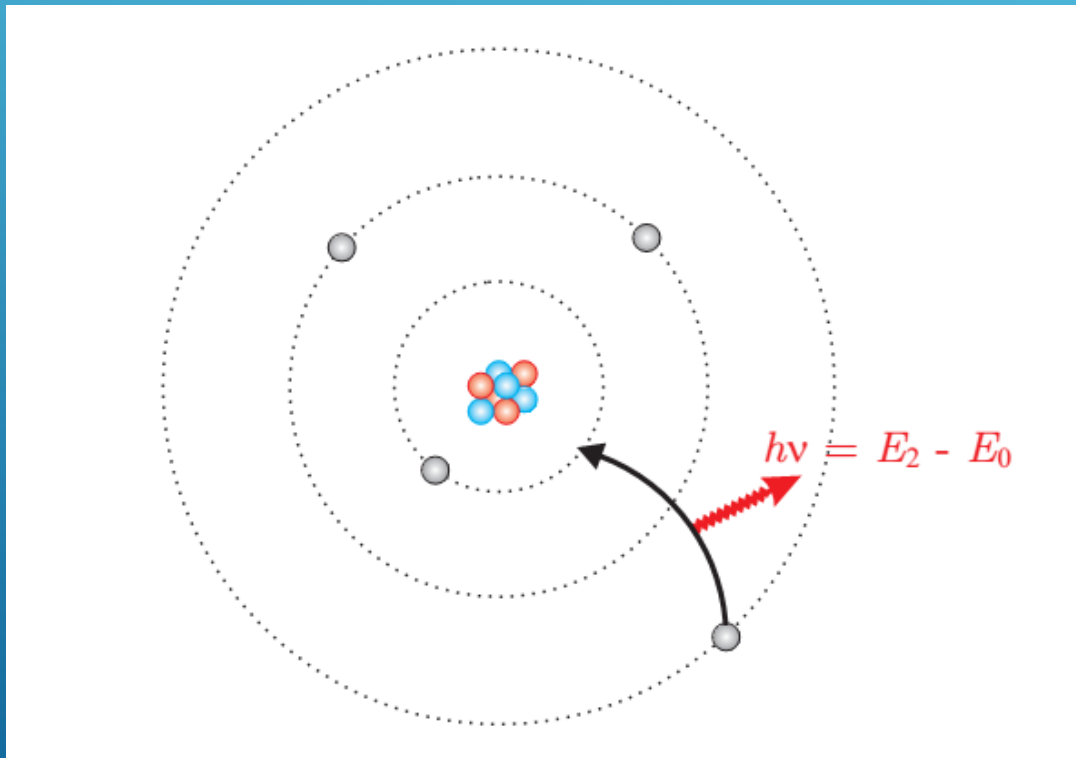
- ▶ Spontana i stimulisana emisija svetlosti
- ▶ Normalna i inverzna naseljenost
- ▶ Pincip rada lasera

SPONTANA I STIMULISANA EMISIJA SVETLSTI

Spontana emisija

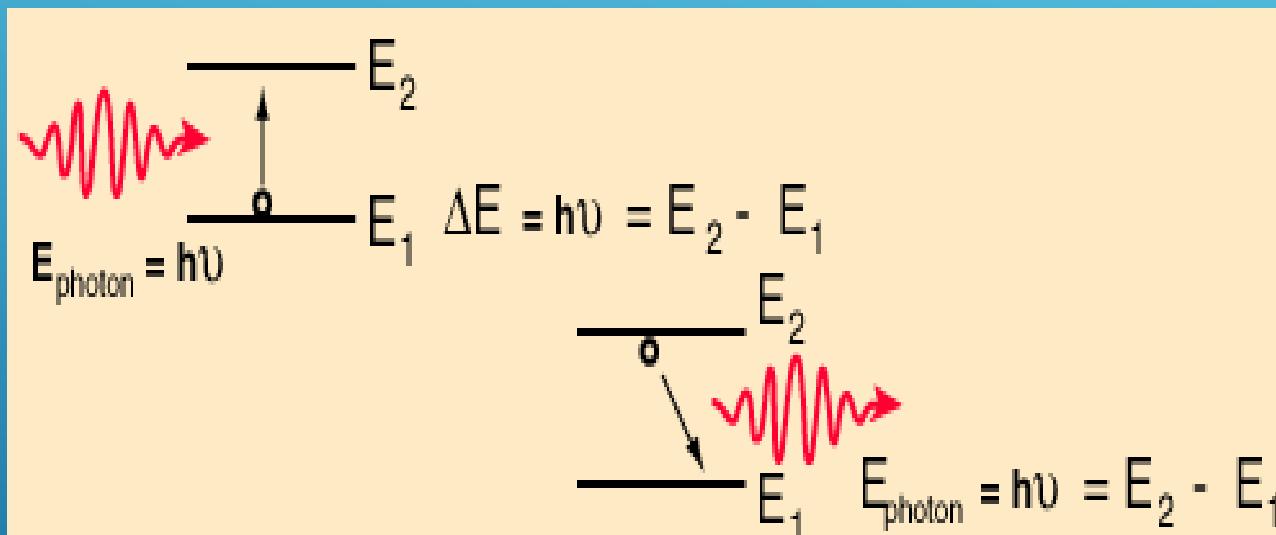
- ▶ Elektromagnetno zračenje ispušteno spontano (bez spoljašnjeg uticaja) prelaskom atoma ili molekula iz pobuđenog u osnovno ili neko niže energijsko stanje naziva se **spontana** emisija svetlosti.
- ▶ Takvo zračenje je nekoherentno, odnosno emitovani fotoni su statistički raspoređeni u vremenu i prostoru, što je posledica toga što svaki atom započinje i završava emisiju fotona nezavisno od drugih atoma.
- ▶ Čak se i u okviru istog atoma prelazi elektrona ne vrše uvek između dva određena nivoa, nego između raznih nivoa i to u različitim vremenskim trenucima.
- ▶ Spontano zračenje je, prema tome, nekoherentno i nepolarizovano.

- Atom se sastoji od jezgra i elektronskog omotača.
- Elektronski omotač se sastoji od elektrona, koji u stabilnom stanju kruže po svojim putanjama (orbitalama).
- Svaka orbitala je definisana određenom energijom.



Spontana emisija

- Prilikom prelaska elektrona iz orbitale veće energije, E_2 , u orbitalu manje energije, E_1 , dolazi emisije zračenja, odnosno emisije fotona čija je energija jednaka $E_2 - E_1$.



Izgled šeme spontane emisije zračenja

Stimulisana emisija

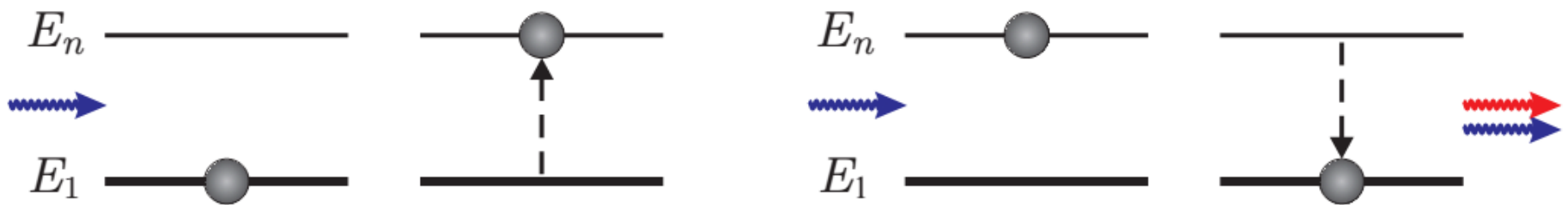
- ▶ Prelazak elektrona sa višeg na niži energijski nivo ne mora obavezno da bude spontan, već se može ostvariti i pod spoljašnjim uticajem, npr. fotopobuđivanjem.
- ▶ Ustanovljeno je da se intenzitet emitovane svetlosti drastično povećava kada se frekvencija upadne svetlosti poklopi sa sopstvenom frekvencijom (talasnom dužinom) koju emituju pobuđeni atomi.
- ▶ Tada nastaje posebna vrsta rezonancije između talasa upadne i talasa emitovane svetlosti.
- ▶ Elektromagnetno zračenje nastalo prelaskom atoma (molekula) na osnovno ili neko niže energijsko stanje, izazvano spoljašnjim zračenjem iste energije (frekvencije), naziva se **stimulisano** (indukovano, prinudno) zračenje.
- ▶ Stimulisana (indukovana) svetlost ima istu energiju, smer kretanja, početnu fazu, frekvenciju i ravan polarizacije kao i upadna svetlost kojom je izazvana.
- ▶ Kao rezultat dobija se elektromagnetni talas veće amplitude i energije od amplitude i energije upadnog talasa.
- ▶ Stimulisana svetlost je, prema tome, koherentna, monohromatska i polarizovana.

- ▶ Stimulisana emisija je pre svega fenomen kvantne mehanike.
- ▶ To je proces u kome foton, prilikom prolaska kroz atom, stimuliše pobuđeni elektron da se depopuliše emitovanjem istog takvog fotona.
- ▶ Atom sa dva energetska nivoa E_1 i E_2 može, prema Ajnštajnu, da interaguje sa elektromagnetnim zračenjem na tri načina

- Apsorpcija kvanta svetlosti uz pobudu atoma sa nižeg energetskog nivoa E_1 na viši E_2 . U ovom procesu, foton energije $\Delta E = E_2 - E_1$ se apsorbira iz zračenja.

- Spontana emisija sa nivoa E_2 predstavlja proces depopulacije pobuđenih nivoa, pri čemu se foton energije ΔE emituje posle određenog vremena provedenog na pobuđenom nivou, koje je poznato kao srednje vreme života.

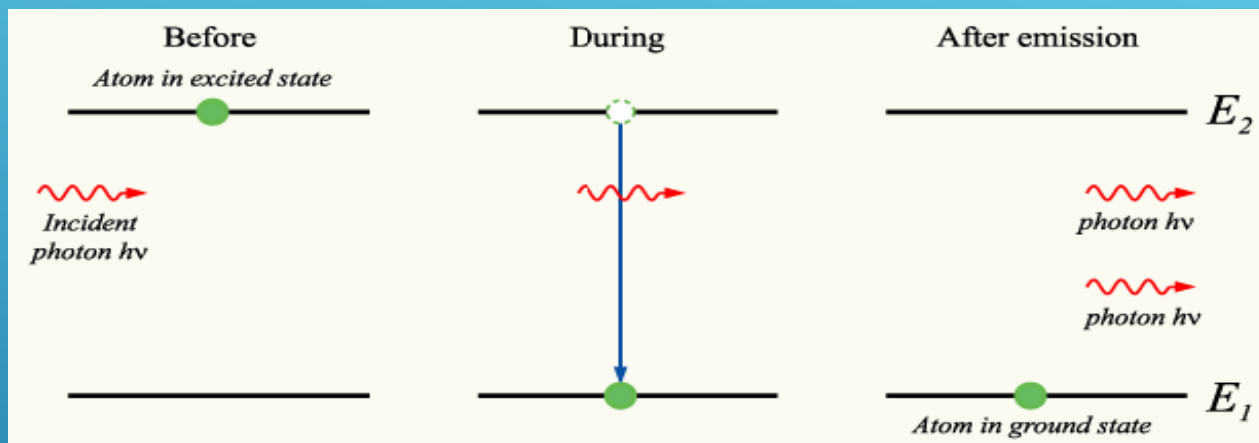
- Stimulisana emisija nastaje kada do depopulacije pobuđenog nivoa E_2 dolazi pod uticajem fotona spoljašnjeg elektromagnetnog polja. Za stimulisanu, odnosno indukovanu emisiju, nužno je postojanje primarnog svetlosnog kvanta čija energija odgovara razlici energija dva nivoa $\Delta E = E_2 - E_1$.



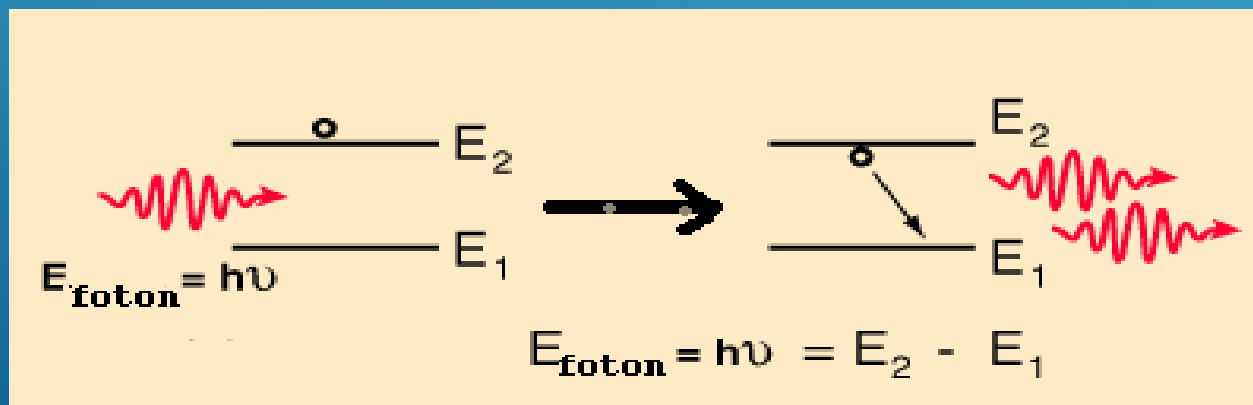
a) apsorpcija fotona

b) stimulisana emisija fotona

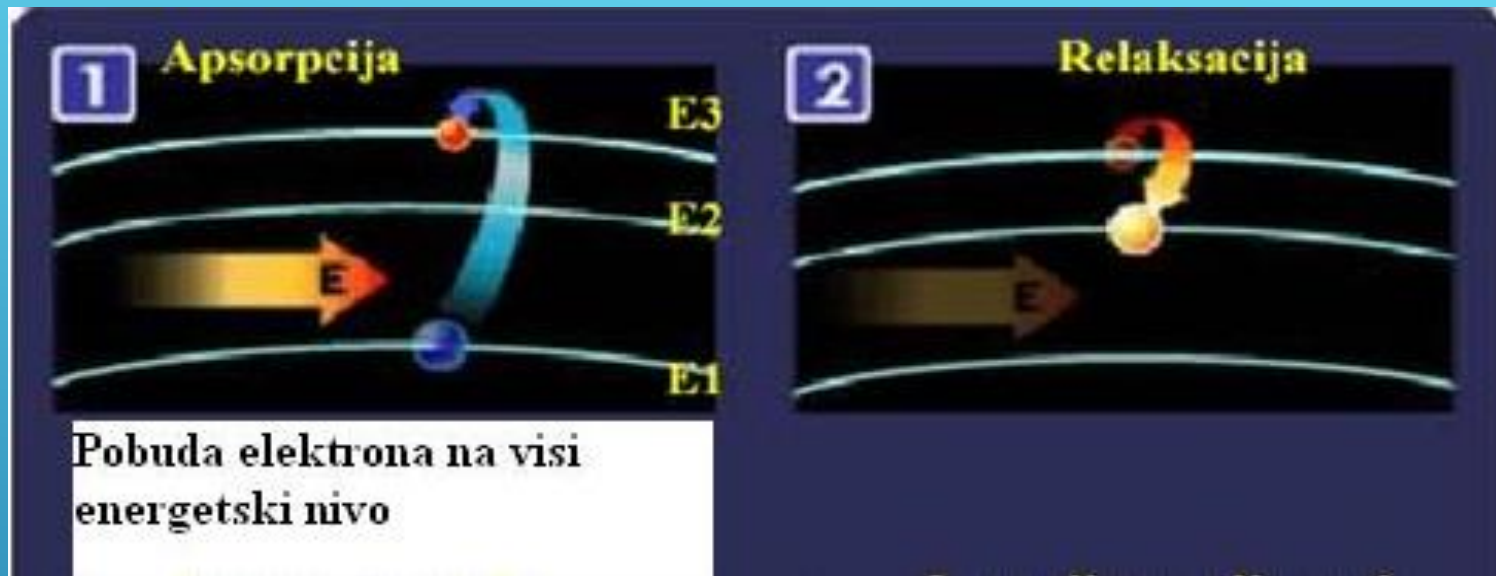
S druge strane, elektron može preći iz orbitale manje energije u orbitalu veće energije jedino ako pri tome apsorbuje jedan kvant (paketa) zračenja ili foton



Emisija fotona usled stimulisane emisije



Izgled šeme stimulisane emisije zračenja



- Energetsko stanje E_3 živi jako kratko, što znači da se elektron u vrlo kratkom vremenu ($\cong ns$) prebacuje u energetski niže stanje E_2 koje je ujedno i stabilnije stanje (duže živi, $\cong ms$).
- Ovaj se proces naziva relaksacija jer se kod njega ne mora emitovati foton, već se energija može izgubiti i neradijativnim procesima.



Emisija svetlosti

Stimulisana emisija



nastaju dva fotona iste talasne duzine



Nailazak fotona na elektron u pobudjenom stanju



efekat se povecava ogledalima koja odbijaju zracenje

- Nakon određenog vremena elektron prelazi u osnovno stanje emisijom fotona.
- Emitovani foton putuje po rezonatoru (kojeg sačinjavaju dva ogledala) i na jednom se ogledalu reflektuje nazad.
- Kada ponovo dolazi do atoma zatekne ga u pobuđenom stanju jer je on u međuvremenu primio novi foton od optičke pumpe.

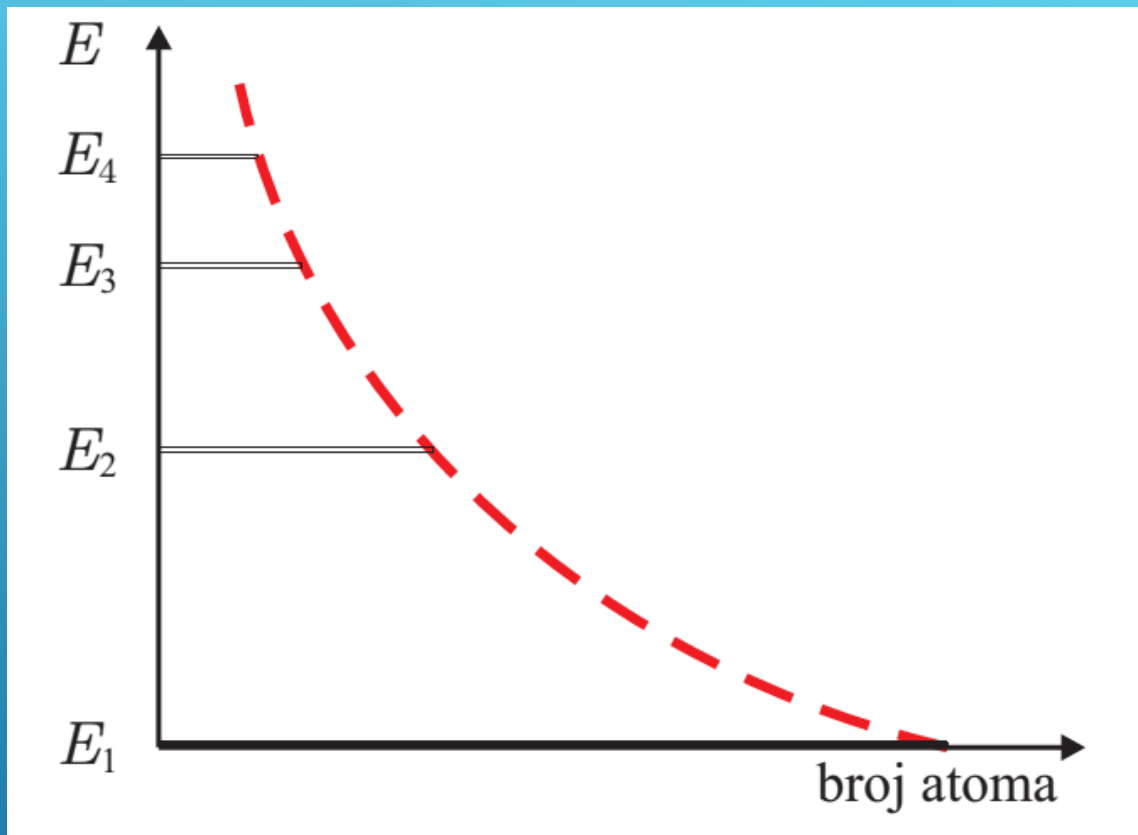
- Neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost nekog pobuđenog stanja veća od naseljenosti osnovnog stanja naziva se inverzna naseljenost.
- Inverzna naseljenost je potreban uslov za generisanje laserske emisije.
- Inverzna naseljenost ne može biti postignuta ukoliko se sistem nalazi u termodinamičkoj ravnoteži.
- Zapravo, apsorpcijom i emisijom zračenja moguće je uspostaviti ravnotežu procesa, odnosno moguće je izjednačiti populacije datog nivoa.
- Posle toga dati sistem atoma postaje transparentan za posmatrano zračenje

NORMALNA I INVERZNA NASELJENOST

- ▶ Pri prolasku elektromagnetnog zračenja kroz neku supstancu njegov intenzitet opada usled apsorpcije.
- ▶ Istovremeno sa apsorpcijom odvija se i proces stimulisane emisije zračenja, s obzirom da uvek postoji izvestan broj atoma koji se nalaze u pobuđenom energijskom stanju.
- ▶ Pri normalnim uslovima (stanje termodinamičke ravnoteže) proces apsorpcije je izraženiji od stimulisane emisije i nije moguće ostvariti pojačanje intenziteta svetlosti.
- ▶ Stanje supstance u kome se manje od polovine atoma nalazi u pobuđenom stanju naziva se stanje normalne naseljenosti energijskih nivoa.
- ▶ Raspodela atoma po energijskim nivoima na datoj temperaturi T u tom slučaju određena je tzv. Bolcmanovom raspodelom:

$$N_n = N_1 e^{-\frac{E_n - E_1}{k_B T}}$$

gde je N_1 broj atoma u osnovnom stanju, E_1 energija osnovnog stanja, E_n energija datog n -tog energijskog stanja, a N_n broj atoma u tom stanju.



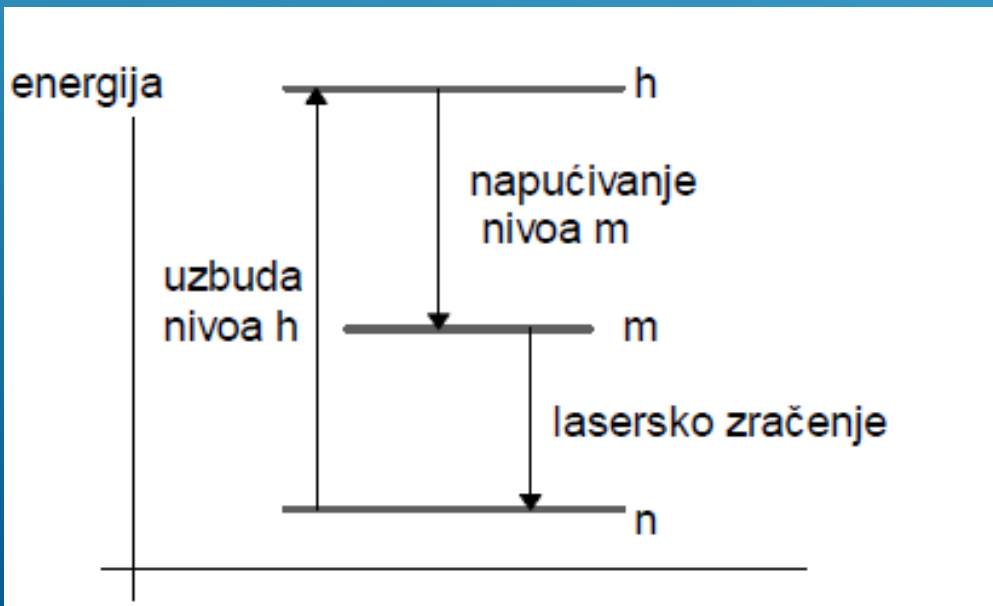
Normalna naseljenost energijskih nivoa

Vidi se, dakle, da se broj atoma u pobuđenim stanjima eksponencijalno smanjuje sa povećanjem energije

Inverzna naseljenost

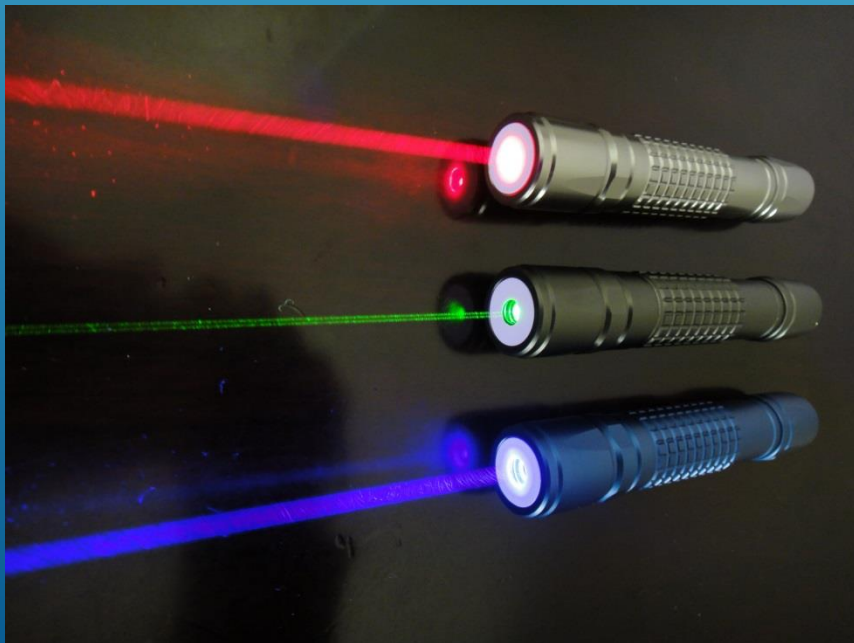
- ▶ U sistemima sa normalnom naseljenošću nije moguće pojačavati svetlost procesima stimulisane emisije.
- ▶ Da bi takvo pojačanje bilo moguće, neophodno je ostvariti tzv. **inverznu naseljenost** energijskih nivoa, odnosno broj atoma u nekom višem energijskom stanju treba da bude veći od broja atoma u nižem stanju.
- ▶ To se može ostvariti pomoću svetlosti iz nekog jakog izvora, čijim delovanjem se veći deo atoma neke supstance prebacuje u pobuđeno energijsko stanje.
- ▶ Ovaj proces naziva se pumpanje pojačavačke sredine.
- ▶ Eksperimenti su, međutim, pokazali da je za dobijanje inverzne naseljenosti korišćenje dva energijska nivoa u velikoj meri neefikasno.
- ▶ Iz tog razloga se kod atoma pojačavačke sredine za dobijanje inverzne naseljenosti koriste tzv. **metastabilna energijska stanja**.

- **Metastabilna energijska stanja** su stanja u kojima je srednje vreme života čestica znatno veće nego u bilo kom drugom energijskom stanju (do 10^6 puta), sa izuzetkom osnovnog stanja.
- Zahvaljujući postojanju ovih stanja osnovno stanje se brzo prazni a sporo puni, dok je sa metastabilnim stanjima obrnut slučaj.
- ▶
- Na taj način se ostvaruje inverzna naseljenost energijskih nivoa.
- Metastabilni nivoi mogu se „ugraditi” dodavanjem odgovarajućih primesa datoj sredini.
- Uređaji u kojima stimulisana emisija znatno nadmašuje apsorpciju zračenja nazivaju se **laseri**.



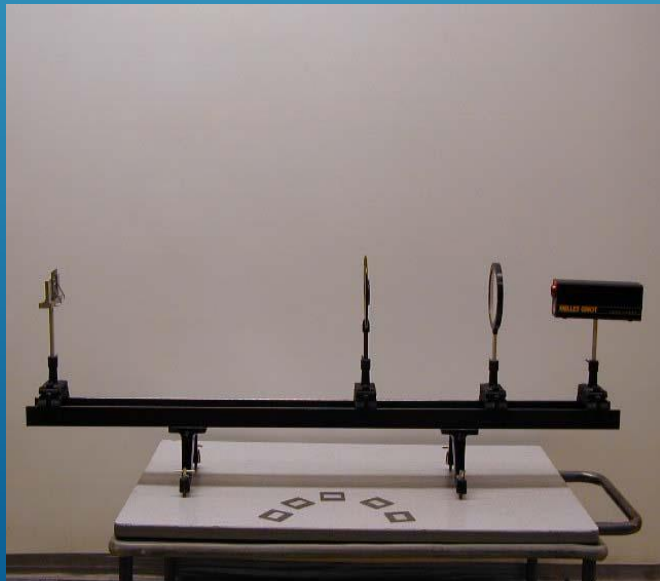
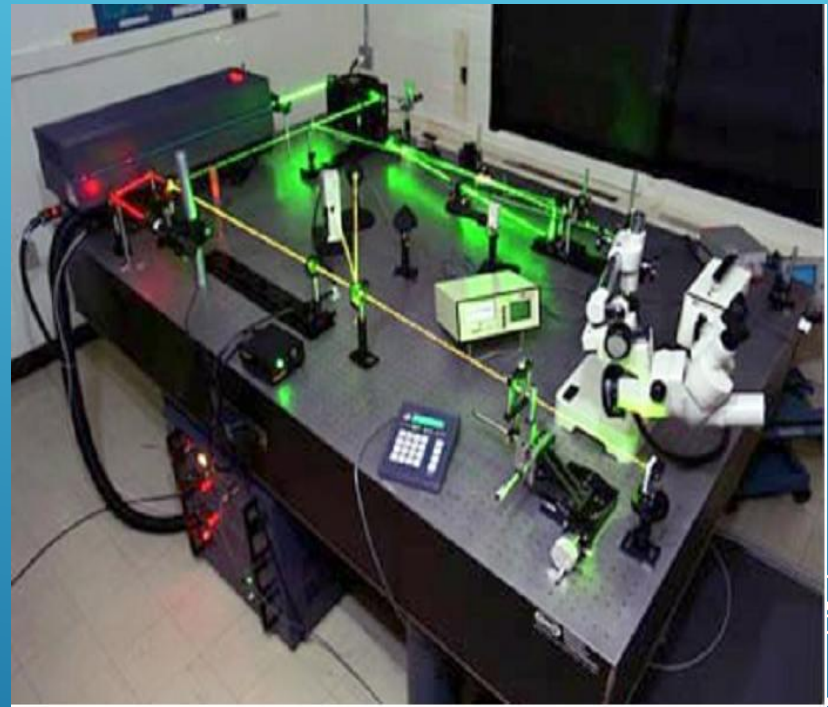
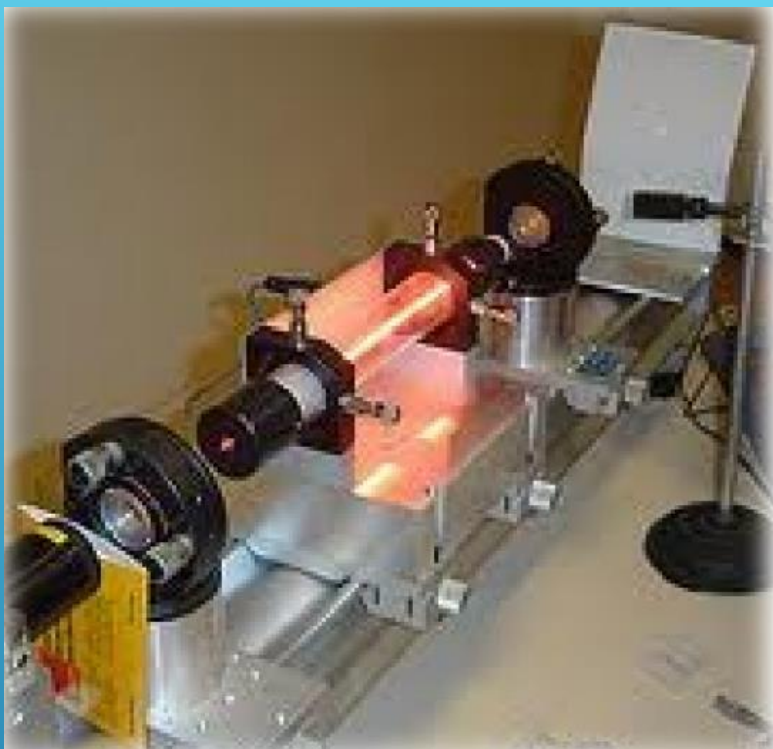
PRINCIP RADA LASERA

- ▶ Lasersko zračenje, u odnosu na zračenje običnih svetlosnih izvora, karakteriše koherentnost, usmerenost i monohromatičnost.
- ▶ Koherentno zračenje je ono zračenje kod koga svi svetlosni talasi od kojih je ono sastavljeno osciluju u fazi (svi su događaji sinhronizovani).
- ▶ Laserska svetlost je usmerena, dakle zračenje se prostire samo u relativno uskoj oblasti, pa je i daljina prostiranja takvog zračenja velika.
- ▶ Nadalje, lasersko zračenje je monohromatsko, tj. sastoji se od relativno uskog frekventnog spektra ili možemo reći samo od jedne boje

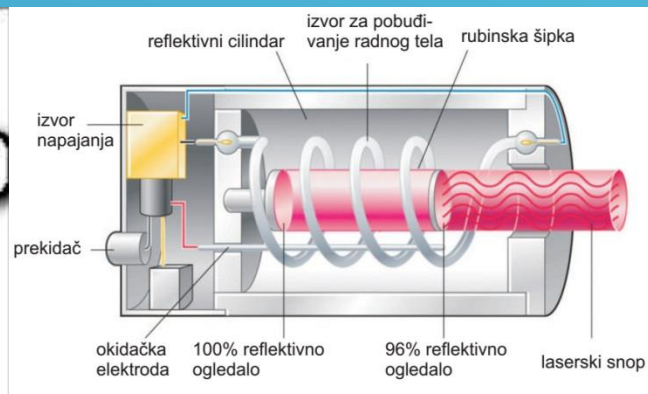
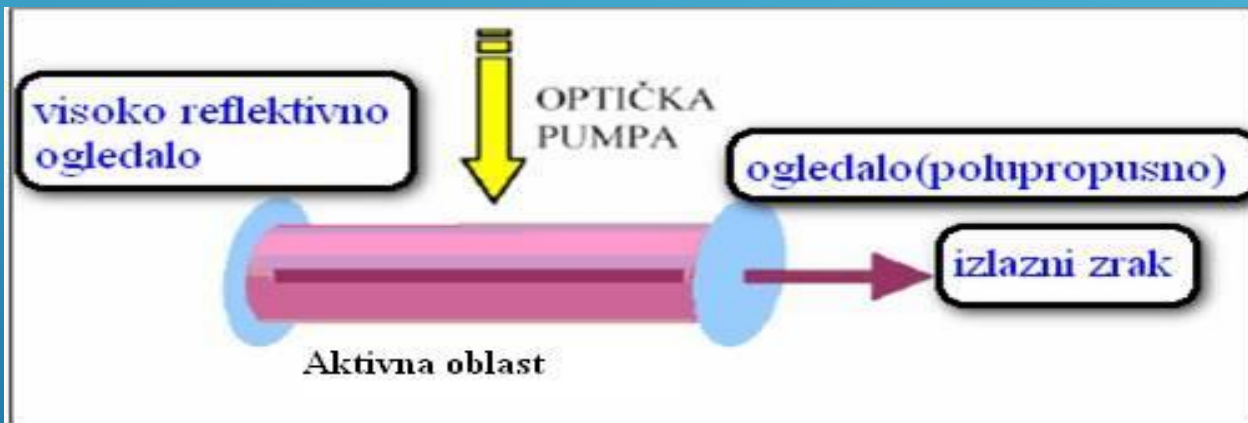


PRINCIP RADA LASERA

- ▶ Uređaj u kome se ostvaruje pojačanje intenziteta zračenja u procesima stimulirane emisije, tako da se dobija koherentno, monohromatsko i strogo usmereno elektromagnetno zračenje naziva se laser (od početnih slova engleskih reči **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja).
- ▶ Pošto se proces stimulirane emisije, kao i svi drugi procesi unutar atoma opisuju kvantnomehaničkim zakonitostima, često se umesto termina „laser” koriste nazivi kvantni generator ili kvantni pojačavač.
- ▶ Osnovni delovi lasera su:
 - radno telo (aktivna, pojačavačka sredina),
 - sistem ogledala,
 - izvor svetlosti za pobuđivanje radnog tela,
 - sistem za hlađenje,
 - električno napajanje izvora,
 - kućište za zaštitu laserskog sistema.



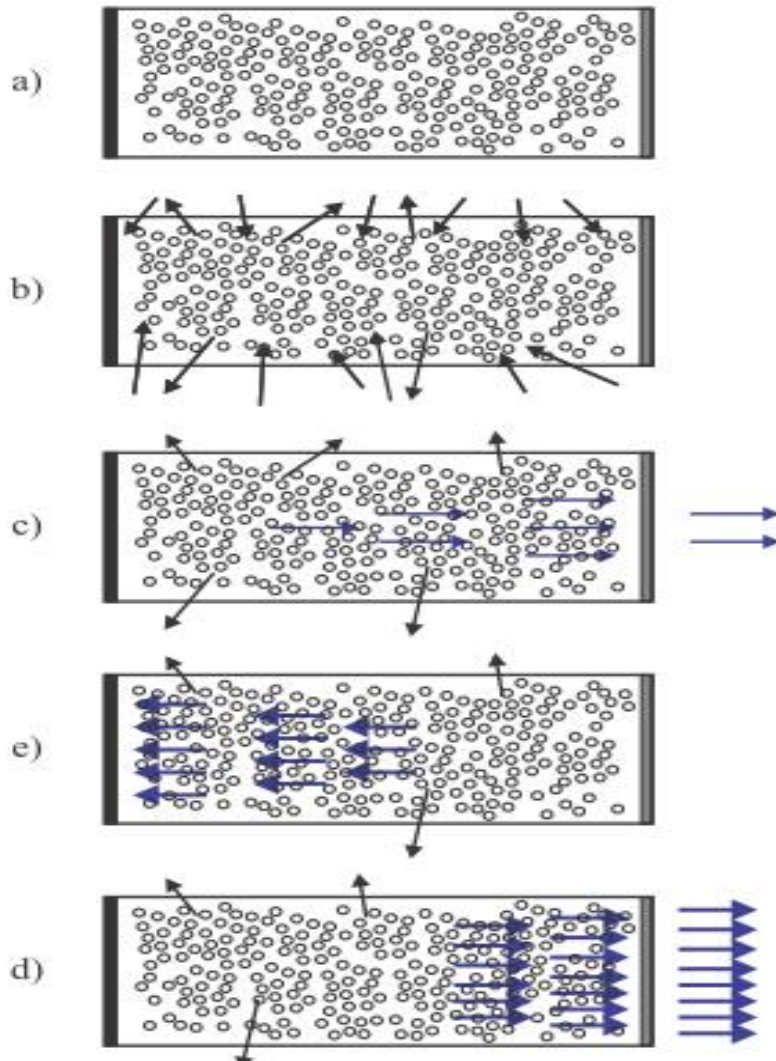
- ▶ Lasersko telo obično ima oblik cilindra.
- ▶ Da bi se produžio put svetlosti kroz aktivnu sredinu, osnove cilindra su međusobno paralelne i polirane tako da imaju ulogu ogledala.
- ▶ Jedno od tih ogledala potpuno reflektuje svetlost i vraća je nazad u radnu sredinu, dok drugo reflektuje oko 95%, a propušta približno 5%.
- ▶ Posle višestruke refleksije sa jedne na drugu stranu laserske cevi, svetlosni snop napušta radnu sredinu kroz propusno ogledalo.

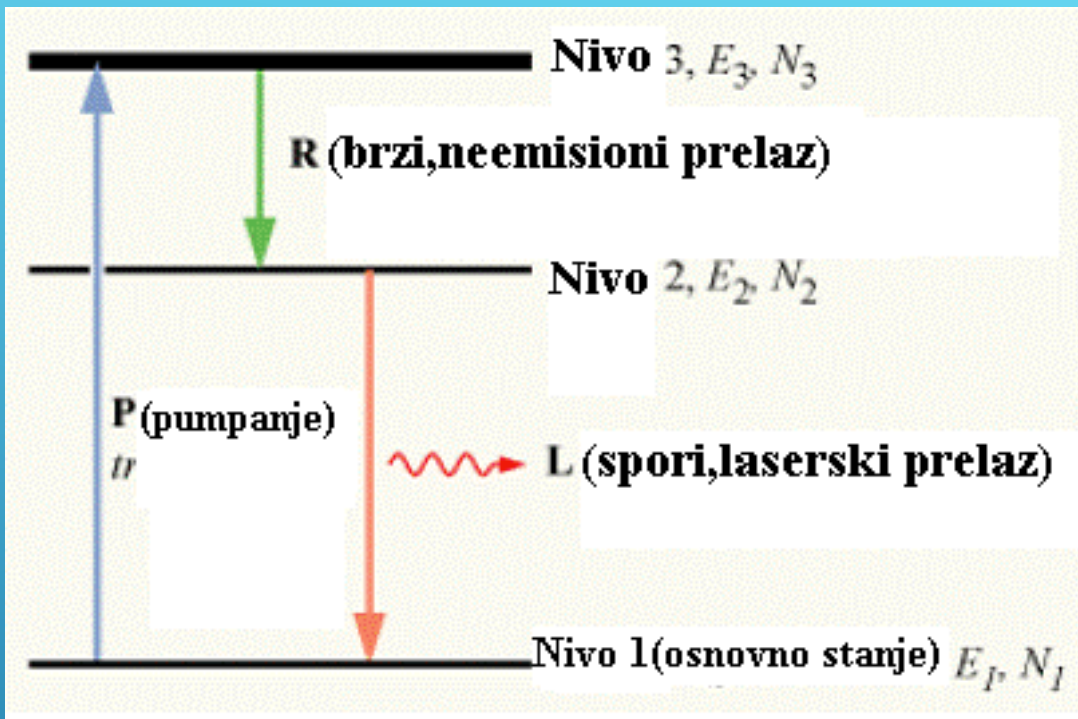


- Za pobuđivanje atoma aktivne sredine koristi se impulsna gasna cev, spiralno omotana oko laserske cevi.
- Energija koju apsorbuje radno telo ne pretvara se u potpunosti u energiju laserskog zračenja.
- Naprotiv, veliki deo ove energije oslobađa se u vidu toplote koja zagreva radno telo, usled čega je u konstrukciji lasera predviđen sistem za hlađenje.

R = 100%
T = 0%

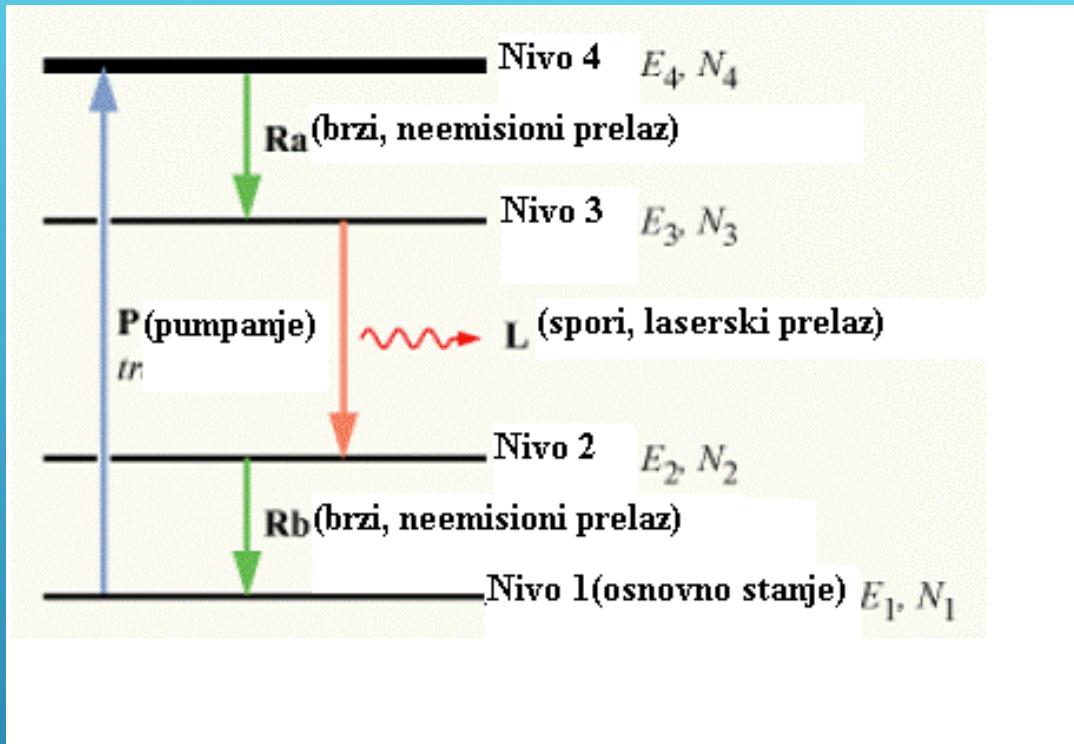
R = 96%
T = 4%





Energetski dijagram lasera sa tri aktivna nivoa

- Sistem atoma se u početku nalazi u termodinamičkoj ravnoteži.
- Većina atoma je u nepobuđenom stanju, osnovnom stanju $N_1 \approx N, N_2 \approx N_3 \approx 0$.
- Ako bismo atome izložili svetlosti frekvencije ν_{31} , gde je $E_3 - E_2 = h \cdot \nu_{31}$ proces apsorpcije bi ekscitovao atome sa osnovnog nivoa 1 na nivo 3.
- Ovaj proces se naziva pumpanje (obeleženo strelicom **P**), i ne mora da bude prouzrokovan samo apsorpcijom svetlosti.
- Pumpanjem na nivou 3 će se naći veliki broj elektrona, odnosno $N_3 > 0$.
- Elektroni prelaze sa nivoa 3 na nivo 2. ovaj process mora biti brz, pri čemu se energija može osloboditi u obliku fotona (spontana emisija), ili neradijativno u obliku fonona (čvrsta tela). Process označen je sa **R**.
- Atom sa nivoa 2 može preći u osnovno stanje emisijom fotona frekvencije ν_{21} ($E_2 - E_1 = h \nu_{21}$). Process označen sa **L** se naziva još i laserski prelaz.



Energetski prikaz lasera sa četiri nivoa

- U ovom sistemu pumpanjem (prelaz **P**) se ekscituje atom iz osnovnog stanja (nivo 1) na nivo 4.
- Sa nivoa 4 elektroni prelaze brzim neradijativnim prelazom **Ra**, kao i kod atoma sa tri nivoa, na nivo 3.
- S obzirom da je vreme života nivoa 3 mnogo veće od vremena života nivoa 4 ($\tau_{32} \gg \tau_{43}$), proces **Ra** je mnogo brži od procesa **L**, elektroni se akumuliraju na nivou 3 (gornji laserski nivo).
- Sa njega može doći do spontane ili stimulisane emisije i prelaska na nivo 2 (donji laserski nivo).
- Sa nivoa 2 ponovo dolazi do brzog neradijativnog prelaza **Rb** u osnovno stanje 1.

Vrste lasera

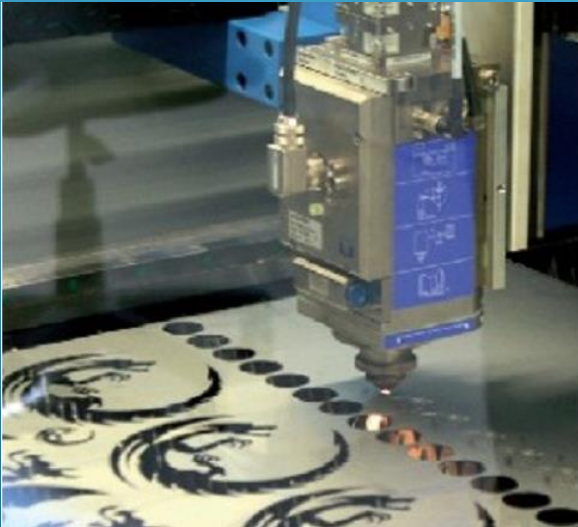
Podela lasera može se izvršiti prema različitim kriterijumima.

1. Vrsti materijala aktivne sredine (gasni, tečni, laseri čvrstog stanja),
2. Režimu rada (kontinualni i impulsni),
3. Načinu pobude materijala aktivne sredine (laseri sa optičkom pobudom, putem električnog pražnjenja i sudarima elektrona, pobudom hemijskim reakcijama, nuklearnim reakcijama),
4. Oblasti spektra u kojoj emituju svetlost.

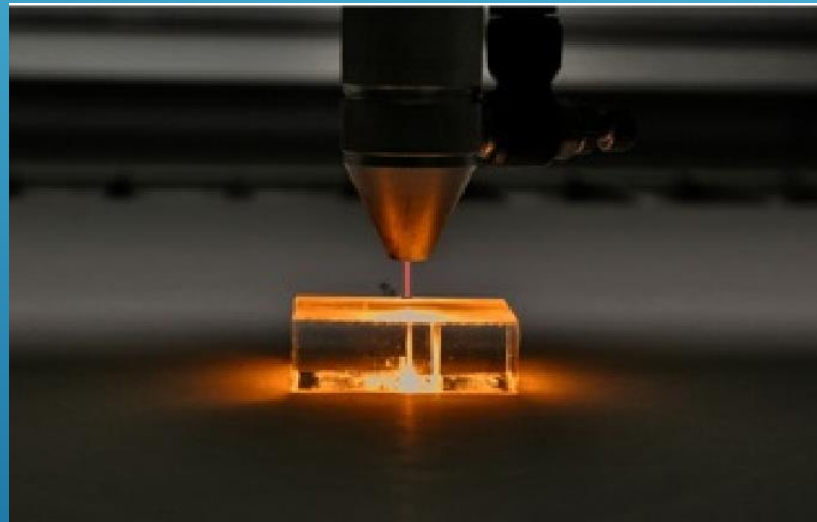
Primena lasera

Oblasti u kojima je primena lasera posebno izražena su: različite grane industrije, naročito vojna industrija, medicina, nauka, telekomunikacije, ekologija, robotika, informatika, holografija, laserska spektroskopija itd.

Laseri se u industriji koriste posebno za: rezanje materijala, zavarivanje, lokalnu termičku obradu, nanošenje prevlaka, topljenje, bušenje malih otvora, kontrolu proizvoda, merenje itd



Prikaz CNC mašine za sečenje limova laserom



Prikaz postupka rezanja i graviranja laserom

Laseri su u **medicini** našli široku primenu pre svega kao hirurška tehnika, ali u mnogim oblastima medicine koriste se i kao ne hirurške metode

Oblasti u kojima se laseri najviše koriste su: **stomatologija**, **oftamologija** (tretmani pri poremećaju oka), **dermatologija**, **ortopedija** (tretman kostiju, ligamenata i mišića), **otorinolaringologija** (tretmani pri poremećaju uha, grla i nosa), **urologija**, **neurohirurgija**, **onkologija** (tretmani kancera), **pulmologija** (tretman kod poremećaja respiratornog sistema), **gastroenterologija** (tretman kod poremećaja gastrointestinalnog trakta) itd.

Laser je našao široku primenu i u **telekomunikacijama**.

Pomoću lasera, odnosno laserskih dioda, binarni kod računara se pretvara u svetlosni signal koji se praktično bez ikakvih gubitaka optičkim kablovima prenosi na velike udaljenosti.

U **robotici** se laseri koriste kao senzori visoke tačnosti za određivanje položaja u prostoru, što omogućava pozicioniranje robota u skladu sa programom kojim su utvrđeni putanja i druge funkcije robota.

U **informatici** laseri se koriste za memorisanje podataka na optičke medije (CD, DVD), za skeniranje podataka, kao laserski štampači itd.

Laserska tehnologija ima široku primenu u **vojnoj industriji**,

Moguća upotreba lasera u borbenim uslovima i eventualnoj ratnoj situaciji se u savremenim armijama ograničava uglavnom na tri funkcije, obeležavanje cilja i nišanje, direktno dejstvo na cilj i kao sredstvo komunikacije

- Do sada je razvijeno više sistema za **nišanje i obeležavanje cilja** u borbenim uslovima i na njihovom razvoju se kontinuirano radi.
- Lasersko zračenje kod ovih sistema se usmerava na cilj, odbija od njega, a zatim prolazi kroz proces kompjuterske obrade, nakon čega se izlazni podaci koriste za upotrebu oružja i uništavanje cilja.
- Oružja koja se koriste za **direktno dejstvo na cilj** su od posebnog interesa za armije u svetu jer se njihovom upotrebom deluje u smislu neutralisanja i uništenja cilja. Problem kod ovih oružja je loš uticaj atmosfere i lokalnih meteoroloških prilika na lasersko zračenje što bitno umanjuje njegovu ubojnu moć.
- Laseri se koriste i kao **sredstvo komunikacije** tako što se vrši modulisanje signala koji prenosi informaciju u laserski snop i obrnuto. Prednost ove metode je otežano otkrivanje podataka čiji se prenos vrši od strane protivnika, a nedostatak je kratak domet ovakvih sistema (nekoliko kilometara) i negativan uticaj meteoroloških **uslova na signal**.

Gasni laseri

vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
Helijum – neonski laser (He-Ne laser)	632,8nm (543,5nm; 593,9nm; 611,8nm; 1152,3nm; 1520nm; 3391,3 nm)	Električno pražnjenje	Interferometrija, holografija, spektroskopija, skeniranje.
Argonski laser	454,6nm; 488,0nm, 514,5nm (351nm; 363,8nm; 457,9nm; 465,8nm; 476,5nm; 472,7nm; 528,7nm)	Električno pražnjenje	Fototerapija mrežnjače oka, litografija, spektroskopija, laserska pumpa za ostale lasere.
Kriptonski laser	416nm; 539,9nm; 568,2nm; 647,1nm; 676,4nm; 752,5nm; 799,3nm	Električno pražnjenje	Naučna istraživanja, koristi se sa argonom za laser, svetlosni prikazi.
Ksenon-jon laser	Vidljivi deo spektra, UV i IR	Električno pražnjenje	Naučna istraživanja.
Azotni laser	337,1nm	Električno pražnjenje	Pumpanje lasera sa bojama, merenje zagađenosti vazduha, naučna istraživanja.
CO₂ laser	10600nm; (9400nm)	Električno pražnjenje	Obrada materijala (rezanje, zavarivanje), hirurgija.
CO laser	2600 do 4000nm; 4800 do 8300nm	Električno pražnjenje	Obrada materijala (graviranje, zavarivanje), spektroskopija
Ekscimer laser	193nm (ArF), 248nm (KrF) 308nm (XeCL) 353nm (XeF)	ekscimer rekombinacija uz električno pražnjenje	Litografija, hirurgija.

Tečni laseri

vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
Laseri sa bojama	390-435 nm; 460-515 nm; 570-640 nm	Drugi laseri, lampa bljeskalica	Naučna istraživanja, spektroskopija, medicina

Hemijski laseri

Vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
HF laser(vodonik-fluorid laser)	2700 do 2900nm	Hemijska reakcija u gorećem mlazu etilena i azot trifluor (NF ₃)	Istraživanja u vojne svrhe
DF laser(deuterij-fluorid laser)	3600 do 4200nm	Hemijska reakcija	Istraživanja u vojne svrhe
HOIL laser(hemij. kiseonik- jod laser)	1315nm	Hemijska reakcija u mlazu monokiseonika i joda	vstraživanja u vojne svrhe

Laseri sa parama metala

vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
HeCd laser (helijum-kadmij.)	441nm; 325nm	Električno pražnjenje	Kontrola novčanica, naučna istraživanja, ispisivanje oznaka
HeHg laser (helijum-živa)	567nm; 615nm	Električno pražnjenje	Naučna istraživanja
HeSe laser (helij.-seleni.)	24 tal.dužine između crvene i UV	Električno pražnjenje	Naučna istraživanja
HeAg laser (helij.-srebr.)	224,3nm	Elektr. pražnjenje	Naučna istraživanja
Sr laser (stroncij.)	430,5nm	Elektr. pražnjenje	Naučna istraživanja
NeCu laser (neon-bakar)	248,6nm	Elektr. pražnjenje	Naučna istraživanja
Cu laser (bakar)	510,6nm; 578,2nm	Elektr. pražnjenje	Pumpa za lasere sa bojama, dermatologija
Au laser (zlato)	627nm	Elektr. pražnjenje	Dermatologija

Laseri čvrstog stanja

vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
Rubinski laser	694,3nm	Lampa, bljeskalica	Holografija, uklanjanje tetovaže
Nd:YAG laser	1064nm (1320nm)	Lampa bljeskalica, laserska dioda	Obrada metala, hirurgija, merenje udaljenosti, pumpa za druge lasere, naučna istraživanja
Er:YAG laser	2940nm	Lampa bljeskalica, laserska dioda	Stomatologija
Nd:YLF laser	1047nm; 1053nm	Lampa bljeskalica, laserska dioda	Pumpa za druge lasere
Nd:YVO₄ laser	1064nm	Laserska dioda	Pumpa za druge lasere, označavanje
Nd:YCOB laser	1060nm	Laserska dioda	
Nd:staklo laser	1062nm (silikatno staklo); 1054nm fosfatno staklo)	Lampa bljeskalica, laserska dioda	Koriste se velike snage (10^{12} W), za lasersku fuziju
Ti:safir laser	650-1100nm	Drugi laseri	Spektroskopija, merenje, naučna istraživanja
Tm:YAG laser	2000nm	Laserska dioda	Merenje
Yb:YAG laser	1030nm	Lampa bljeskalica, laserska dioda	Obrada materijala, merenje
Yb kao primesa, stakleni laser	1000nm	Laserska dioda	Obrada materijala: rezanje, zavarivanje, označavanje
Ho:YAG laser	2100nm	Laserska dioda	Hirurgija, uklanjanje bubrežnog kamenca, stomatologija
Ce:LiSAF ili Ce:LiCAF laser	280 do 316nm	Laserske pumpe	Merenje (atmosfera)
F-Centar laser	2300-3300nm	Jonski laser	Spektroskopija

Poluprovodnički laseri

Vrsta lasera	Talasna dužina	način pobude	primena
Poluprovodnička laserska dioda	0,4-20 μ m	Električna struja	Obrada materijala, zavarivanje, laserska pumpa, holografija, telekomunikacije
GaN laser	400nm	Električna struja	Optički disk
AlGaInP laser AlGaAs laser	630-900nm	Električna struja	Mašinska obrada, optički disk, CD disk glava, medicina, laserska pumpa
InGaAsP laser	1000-2100nm	Električna struja	Mašinska obrada, telekomunikacije, medicina
Kvantni kaskadni laser	Infracrvena oblast	Električna struja	Naučna istraživanja
Hibridno silikatni laser	Infracrvena oblast	Električna struja	Naučna istraživanja

Ostale vrste lasera

vrsta lasera	talasna dužina	način pobude	primena
laseri sa slobodnim elektronima	Širok raspon (0,1nm-nekoliko mm)	svetlost	Nauka o materijalima, medicina
Gasno dinamički laser	Oko 10500nm	Smesa N ₂ i CO ₂	Primena u vojne svrhe
Raman laser	1000-2000nm	Laserska pumpa (Yb-staklo laser)	
Nuklearno pumpan laser	Kao gasni laseri	Nuklearna fisija	Naučna istraživanja