Spontana i stimulisana emisija

UVOD

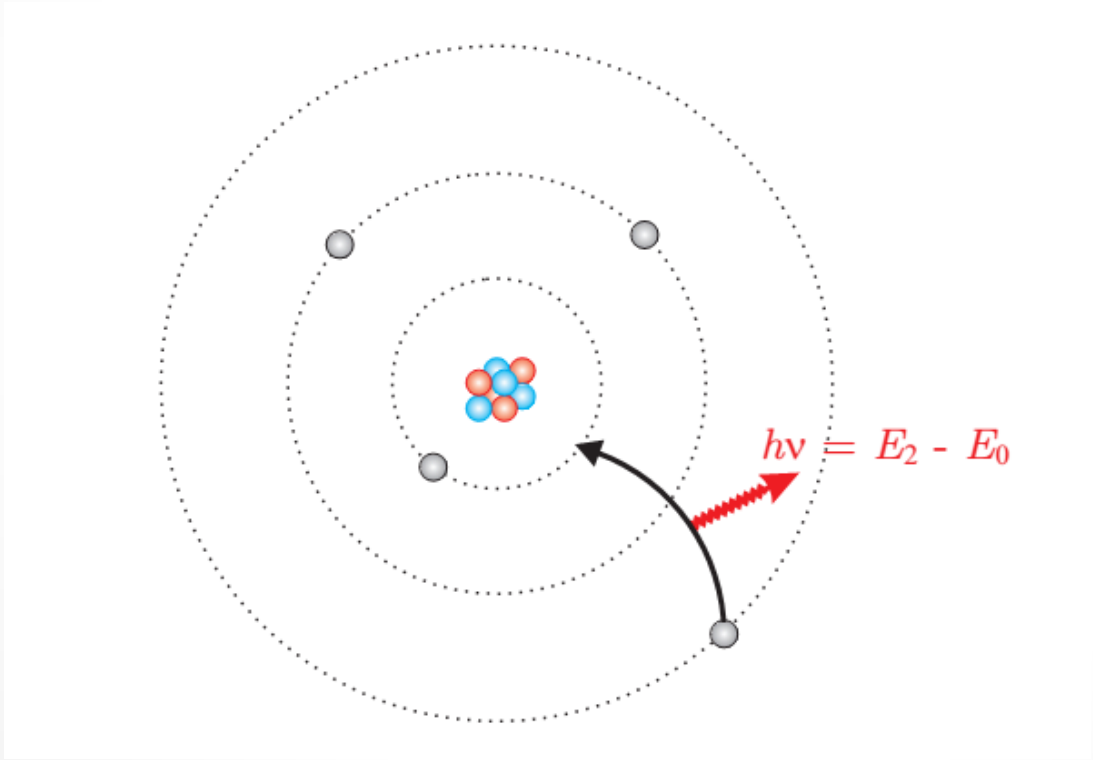
- Spontana i stimulisana emisija svetlosti
- Normalna I inverzna naseljenost
- Pincip rada lasera
- Laserska dioda

Sontana i stimulisana emisija svetlsti

Spontana emisija

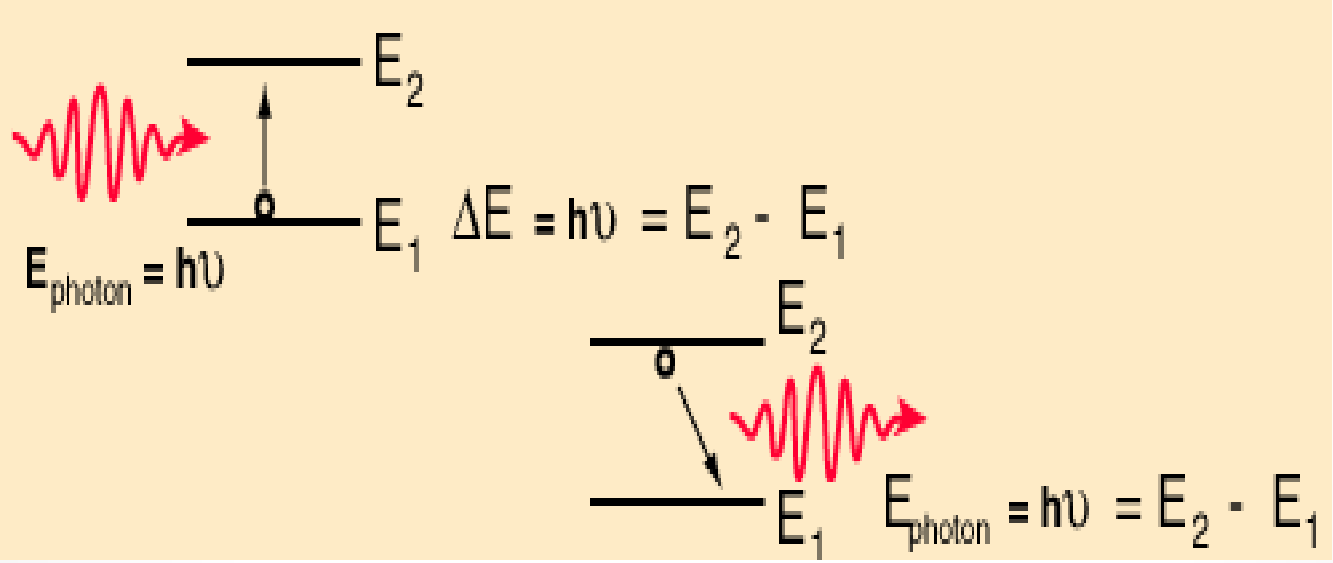
- Elektromagnetno zračenje ispušteno spontano (bez spoljašnjeg uticaja) prelaskom atoma ili molekula iz pobuđenog u osnovno ili neko niže energijsko stanje naziva se **spontana** emisija svetlosti.
- Takvo zračenje je nekoherentno, odnosno emitovani fotoni su statistički raspoređeni u vremenu i prostoru, 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

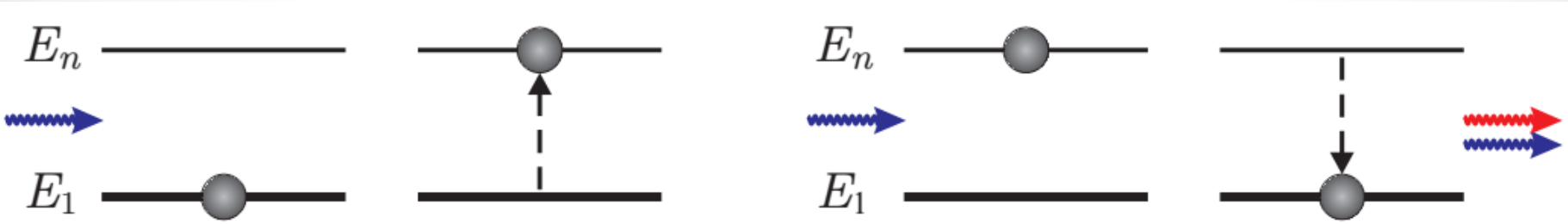
- Prelazak elektrona sa višeg na niži energijski nivo ne mora obavezno da bude spontan, već se može ostvariti i pod spoljašnjim uticajem, npr. Fotopobuđivanjem.
- Ustanovljeno je da se intenzitet emitovane svetlosti drastično povećava kada se frekvencija upadne svetlosti poklopi sa sopstvenom frekvencijom (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 različita 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 apsorbuje 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.

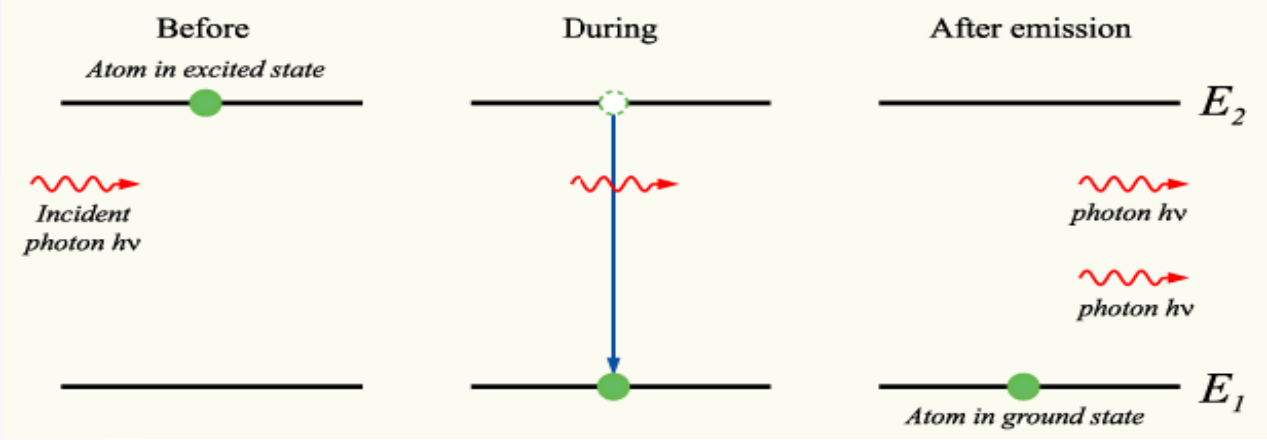
  - Stimulisana emisija nastaje kada do depopulacije pobuđenog nivoa E_2 dolazi pod uticajem fotona spoljašnjeg elektromagnetnog polja. Za stimulisanu, odnosno indukovanu emisiju, nužno je postojanje primarnog svetlosnog kvanta čija energija odgovara razlici energija dva nivoa $\Delta E=E_2-E_1$.



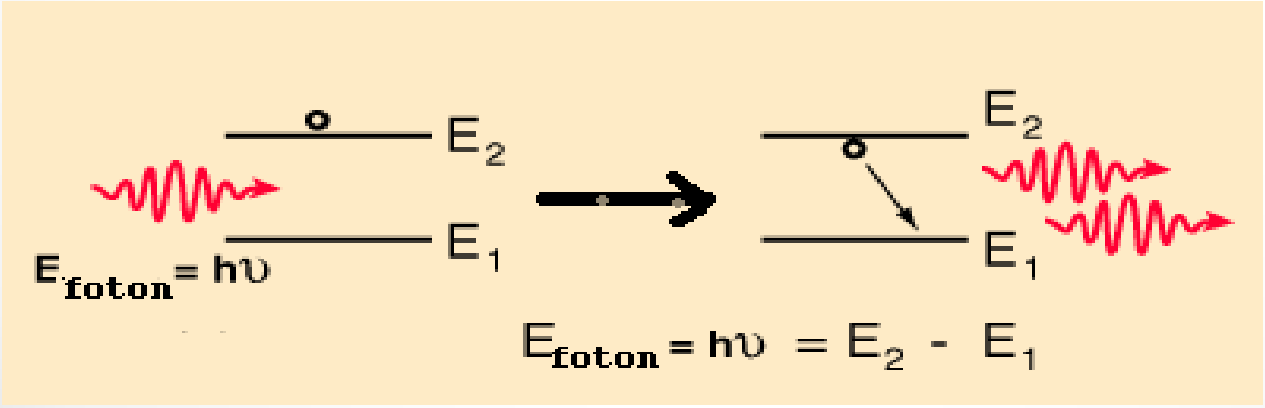
a) b)

a) apsorpcija fotona b) stimulisana emisija fotona

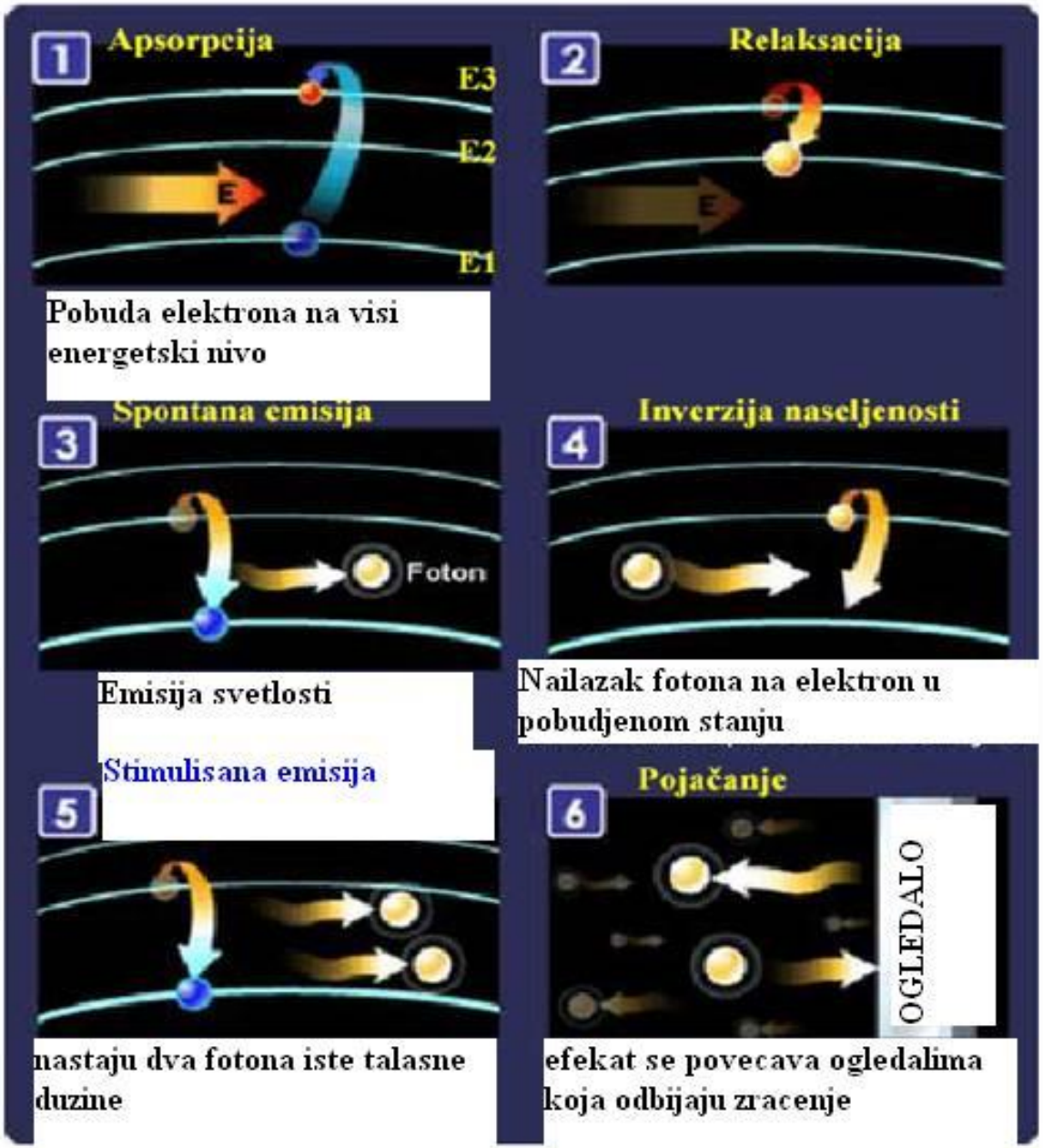
S druge strane, elektron može preći iz orbitale manje energije u orbitalu veće energije jedino ako pri tome apsorbuje jedan kvant (paket) zračenja ili foton



Emisija fotona usled stimulisane emisije



Izgled šeme stimulisane emisije zračenja



Slika 4. Slikoviti prikaz procesa nastajanja laserskog zračenja

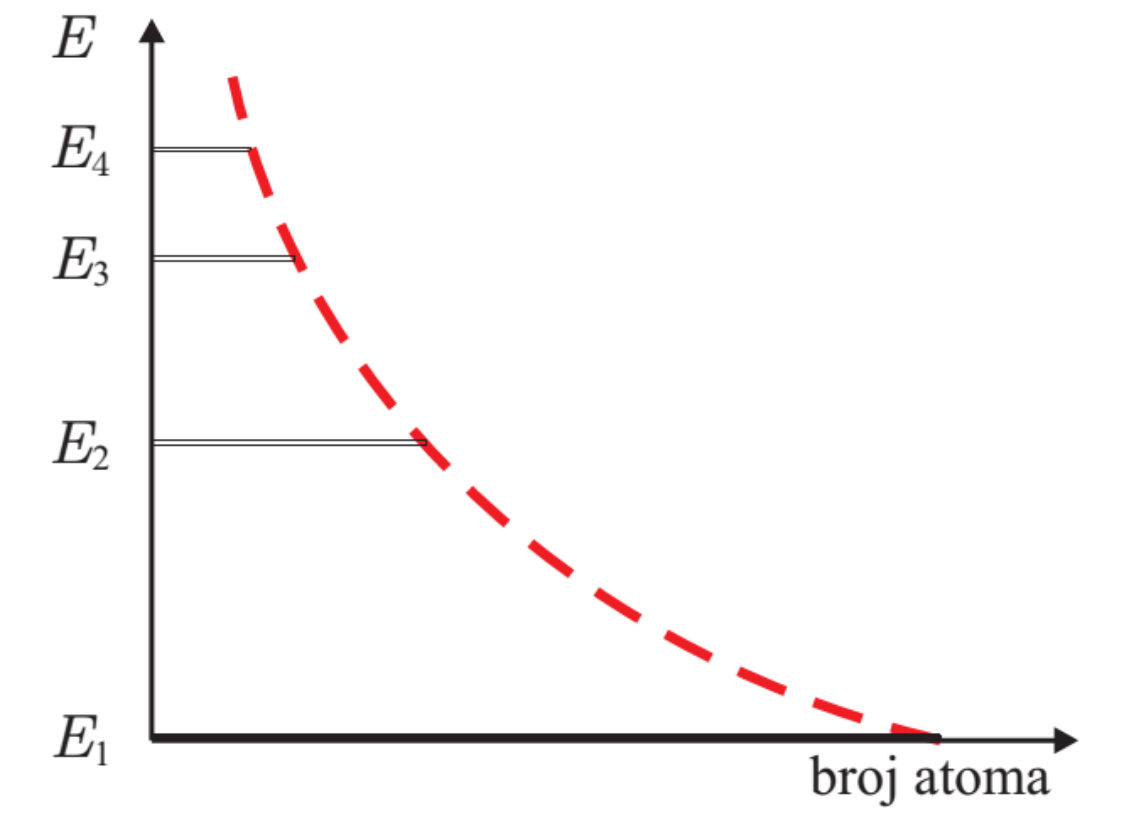
- Energetsko stanje E_3 živi jako kratko, što znači da se elektron u vrlo kratkom vremenu (≅ns) prebacuje u energetski niže stanje E_2 koje je ujedno i stabilnije stanje (duže živi, ≅ms).
- Ovaj se proces naziva relaksacija jer se kod njega ne mora emitovati foton, već se energija može izgubiti i neradijativnim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

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

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.



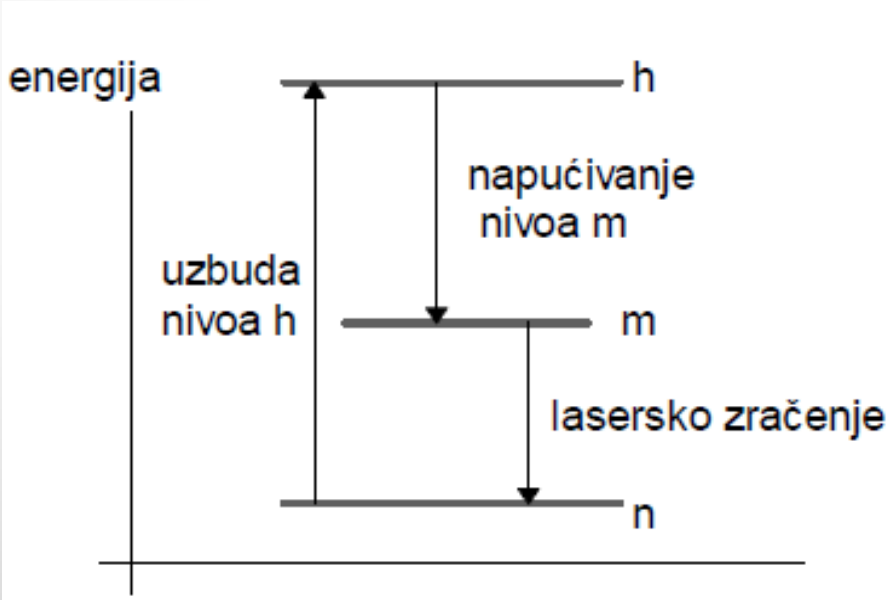
Normalna naseljenost energijskih nivoa

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

Inverzna naseljenost

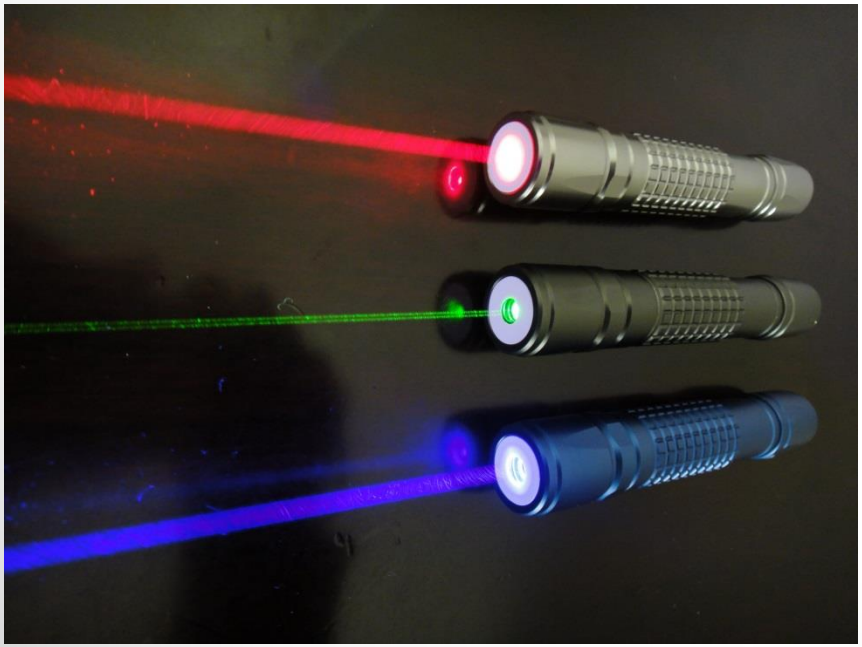
- U sistemima sa normalnom naseljenošću nije moguće pojačavati svetlost procesima stimulisane emisije.
- Da bi takvo pojačanje bilo moguće, neophodno je ostvariti tzv. **inverznu naseljenost** energijskih nivoa, odnosno broj atoma u nekom višem energijskom stanju treba da bude veći od broja atoma u nižem 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

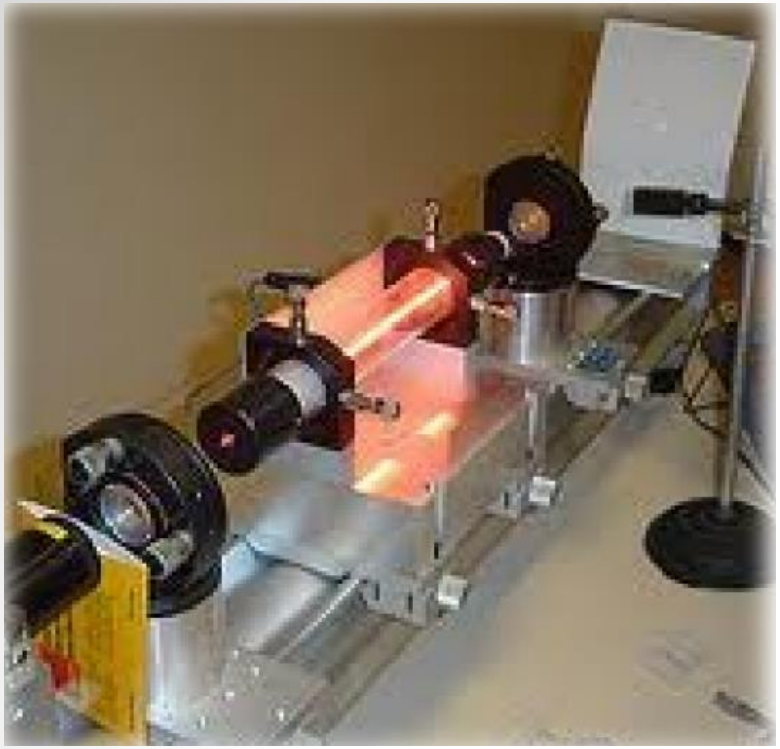


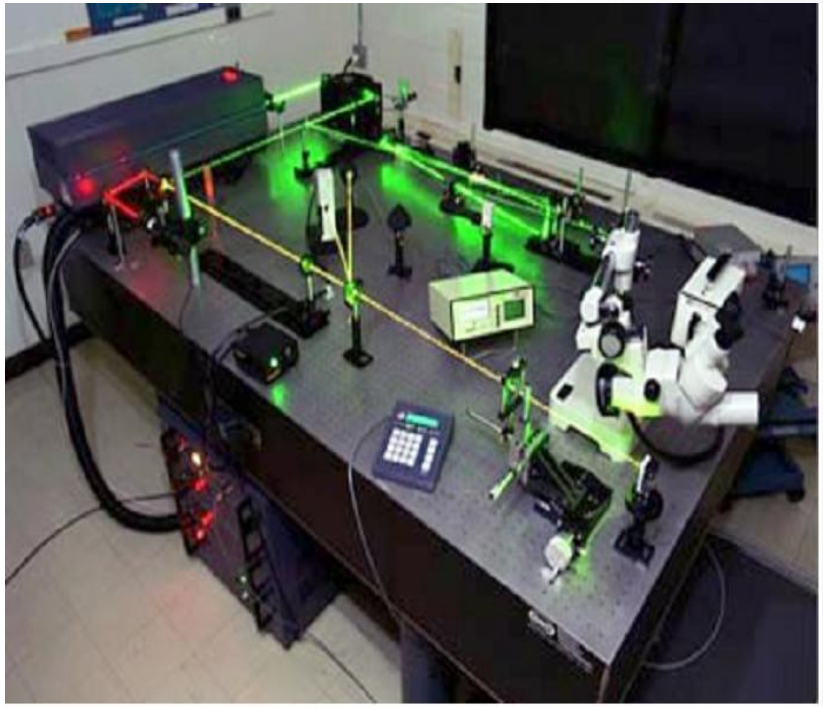
Princip rada lasera

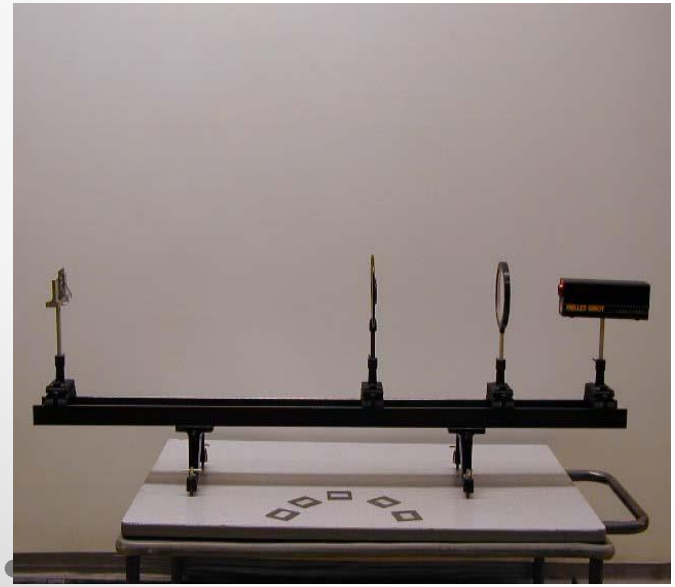
- Uređaj u kome se ostvaruje pojačanje intenziteta zračenja u procesima stimulisane emisije, tako da se dobija koherentno, monohromatsko i strogo usmereno elektromagnetno zračenje naziva se laser (od početnih slova engleskih reči **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja).

- Pošto se proces stimulisane emisije, kao i svi drugi procesi unutar atoma opisuju kvantnomehaničkim zakonitostima, često se umesto termina ,,laser" koriste nazivi kvantni generator ili kvantni pojačavač.

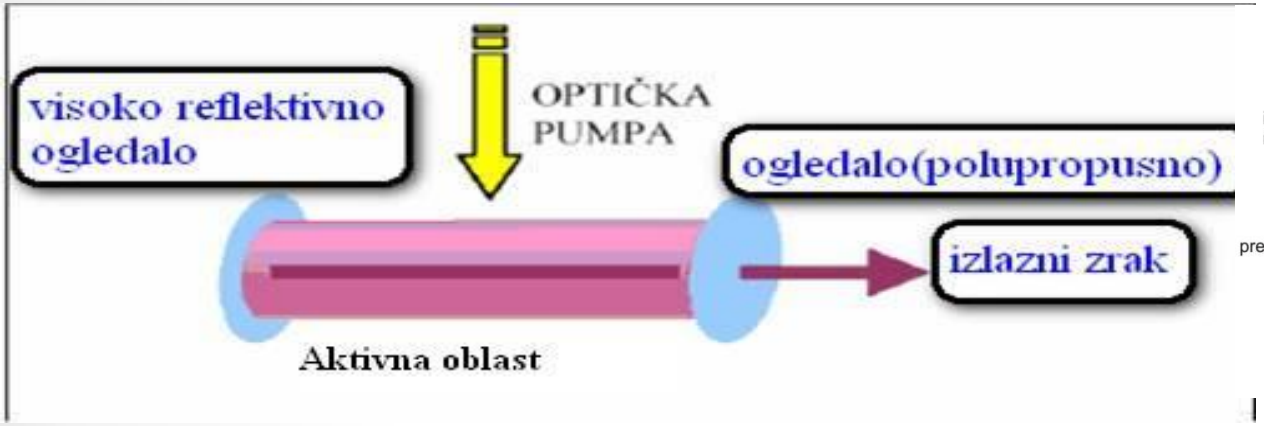
- Osnovni delovi lasera su:
  - radno telo (aktivna, pojačavačka sredina),
  - sistem ogledala,
  - izvor svetlosti za pobuđivanje radnog tela,
  - sistem za hlađenje,
  - električno napajanje izvora,
  - kućište za zaštitu laserskog sistema.

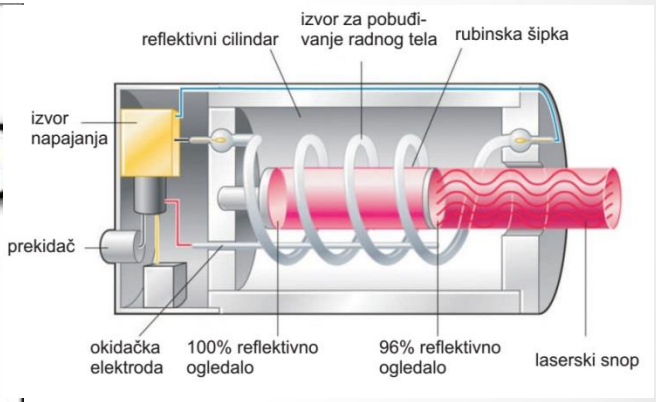




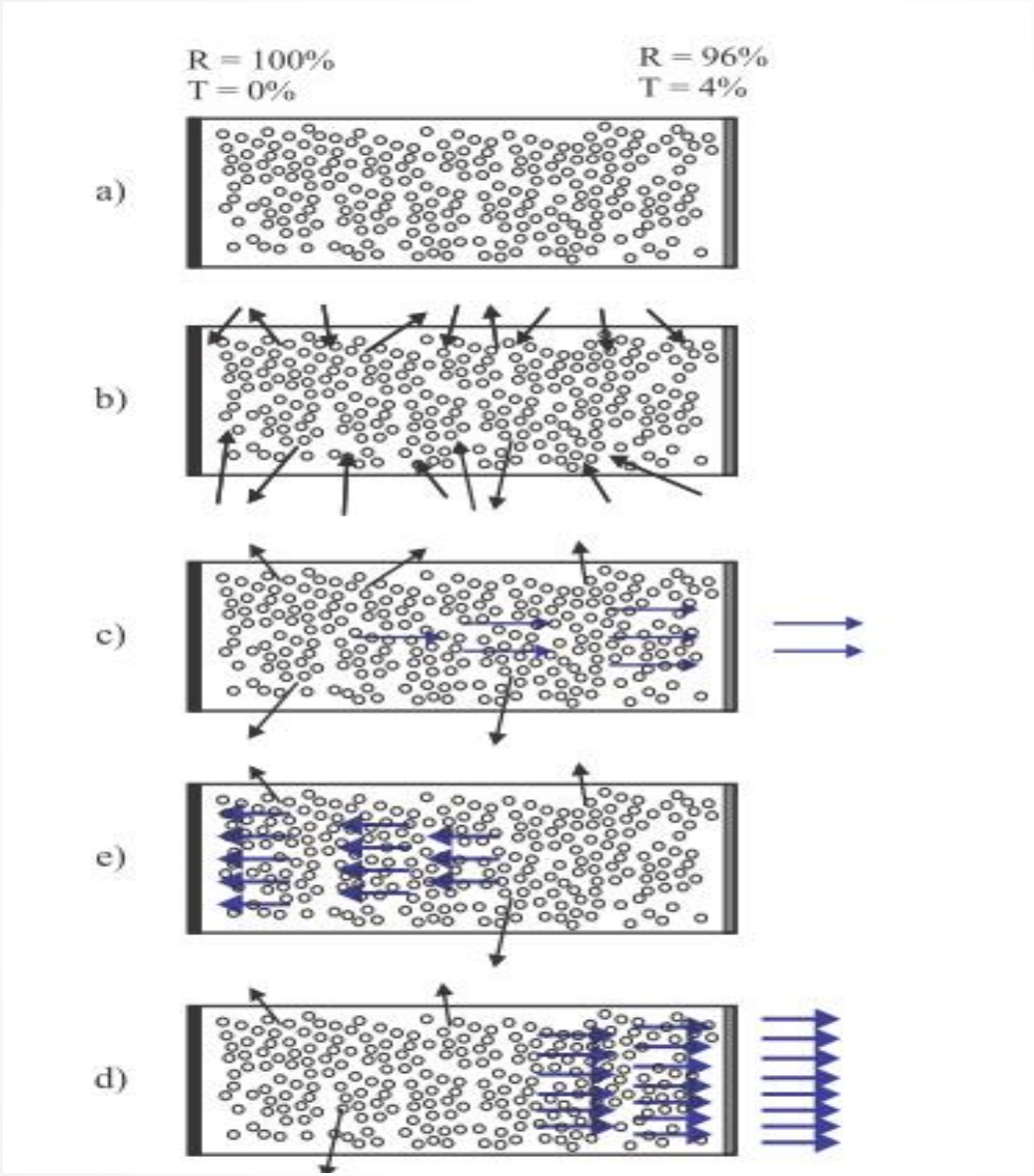


- Lasersko telo obično ima oblik cilindra.
- Da bi se produžio put svetlosti kroz aktivnu sredinu, osnove cilindra su međusobno paralelne i polirane tako da imaju ulogu ogledala.
- Jedno od tih ogledala potpuno reflektuje svetlost i vraća je nazad u radnu sredinu, dok drugo reflektuje oko 95%, a propušta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

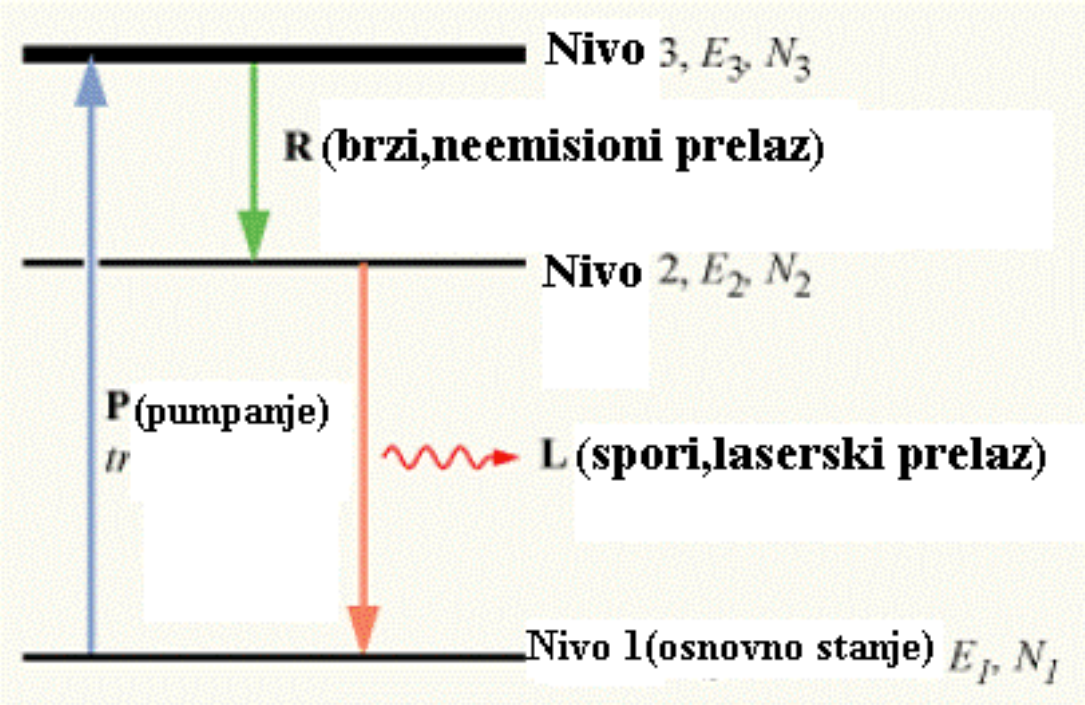




- Za pobuđivanje atoma aktivne sredine koristi se impulsna gasna cev, spiralno omotana oko laserske cevi.
- Energija koju apsorbuje radno telo ne pretvara se u potpunosti u energiju laserskog zračenja.
- Naprotiv, veliki deo ove energije oslobađa se u vidu toplote koja zagreva radno telo, usled čega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

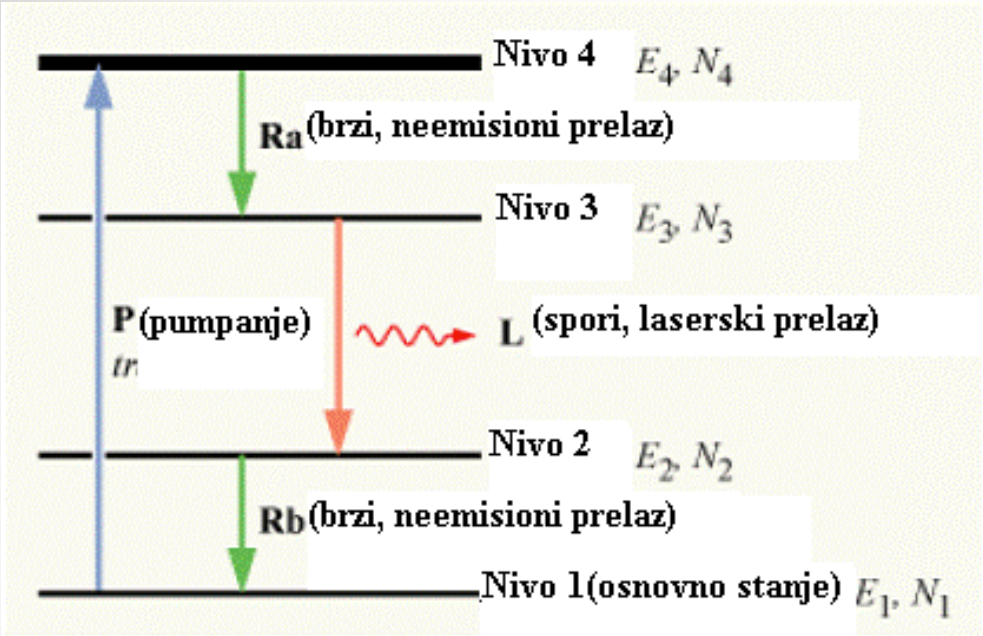


Princip rada lasera



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 $E_3 - E_2 = h*\nu_{31}$ 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 lasreski 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 ($\tau_{32} >> \tau_{43}$), 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.

Laserske Diode

- Rad laserske diode se zasniva na procesu stimulisane emisije zračenja.
- Za razliku od ostalih lasera (gasni, čvrstog stanja) kod poluprovodničkih lasera ne postoje izolovani energetski nivoi, nego se radijativni prelazi elektrona odvijaju između stanja provodne i valentne zone.
- Radi ostvarenja pojačanja zračenja putem stimulisane emisije, potrebno je prethodno "pumpanjem" lasera ostvariti inverziju populacije .
- Spojimo li lasersku diodu na izvor napajanja tako da bude propusno polarizovana (pozitivni pol na p-, a negativni pol na n-sloju) šupljine iz p-sloja i elektroni iz n-sloja biće injektovani u pn-spoj gdje se stvara inverzija naseljenosti.
- Kod poluprovodničkih lasera najznačajnija je prolazak struje kroz direktno polarisani p-n spoj diode. Na taj način se ostvaruje injekcija nosilaca u okolini p-n spoja, pa se ovakvi laseri nazivaju **injekcionim.**
- Jednostavnom modulacijom struje kroz p-n spoj, moguće je modulisati izlaznu snagu laser diode do frekvencija reda GHz.
- Za "pumpanje" se mogu primeniti i druge tehnike kao što su optičko pobuđivanje ili bombardovanje elektronskim mlazom.

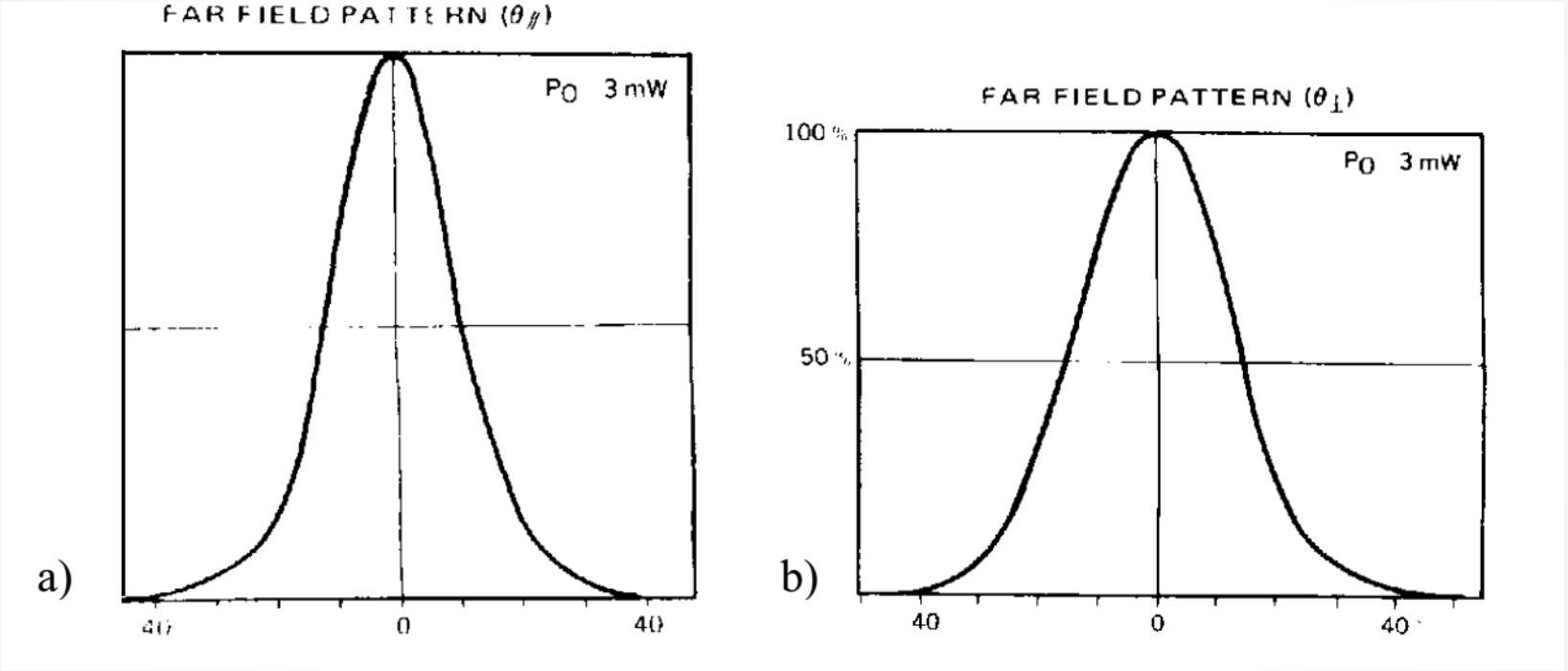
- Oblast u kojoj se ostvaruje inverzija populacije, tj. oblast u kojoj postoji optičko pojačanje putem stimulisane emisije, naziva se aktivna oblast.

- Za generisanje laserskog zračenja neophodno je da aktivna oblast bude smeštena unutar rezonatora. Ovaj rezonator obezbeđuje višestruki prolazak svetlosti kroz aktivnu oblast. Pri svakom novom prolasku intenzitet svetlosti se putem stimulisane emisije pojačava.

- Ako pojačanje emisije svetlosti (kao posledica stimulisane emisije) uspe kompenzovati gubitak fotona usled apsorpcije i difuzije iz pn-spoja može se pojaviti laserski efekt, odn. laserska emisija.

- Laserski rezonator se najčešće izvodi planparalelnim ogledalima (FP - *Fabry-Perot* rezonator).

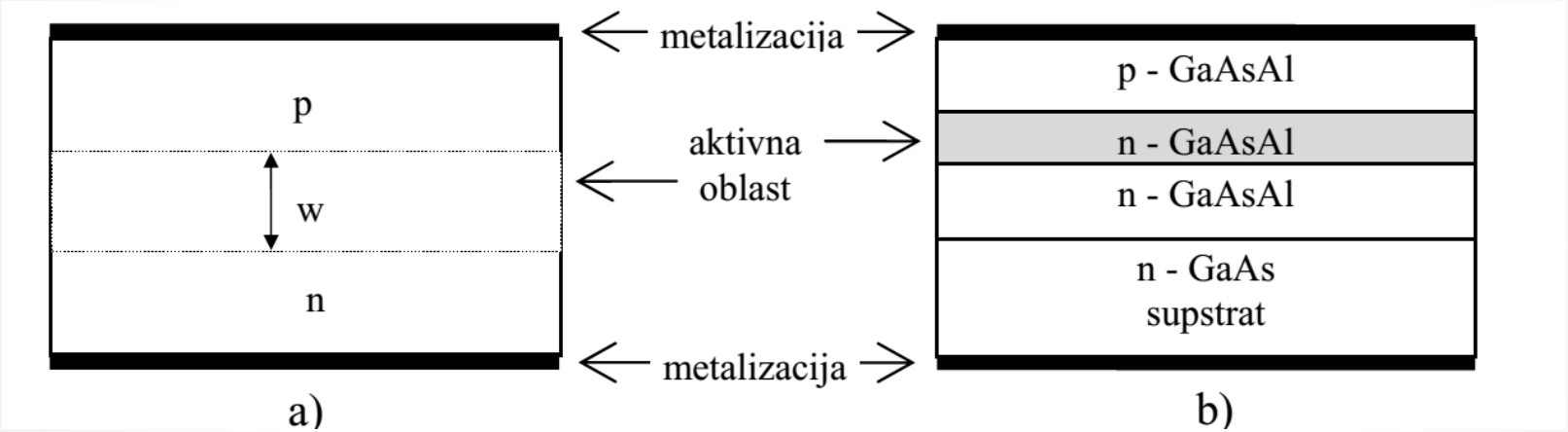
- Laserske diode imaju znatno uži dijagram prostornog zračenja u odnosu na LED.
- Za InGaAsP laser sa dvostrukom heterostrukturom koji zrači na talasnoj dužini od 1310nm, dati su kataloški dijagrami prostornog zračenja po horizontalnoj i vertikalnoj ravni



Prostorni dijagrami zračenja laser diode u a) horizontalnoj i b) vertikalnoj ravni.

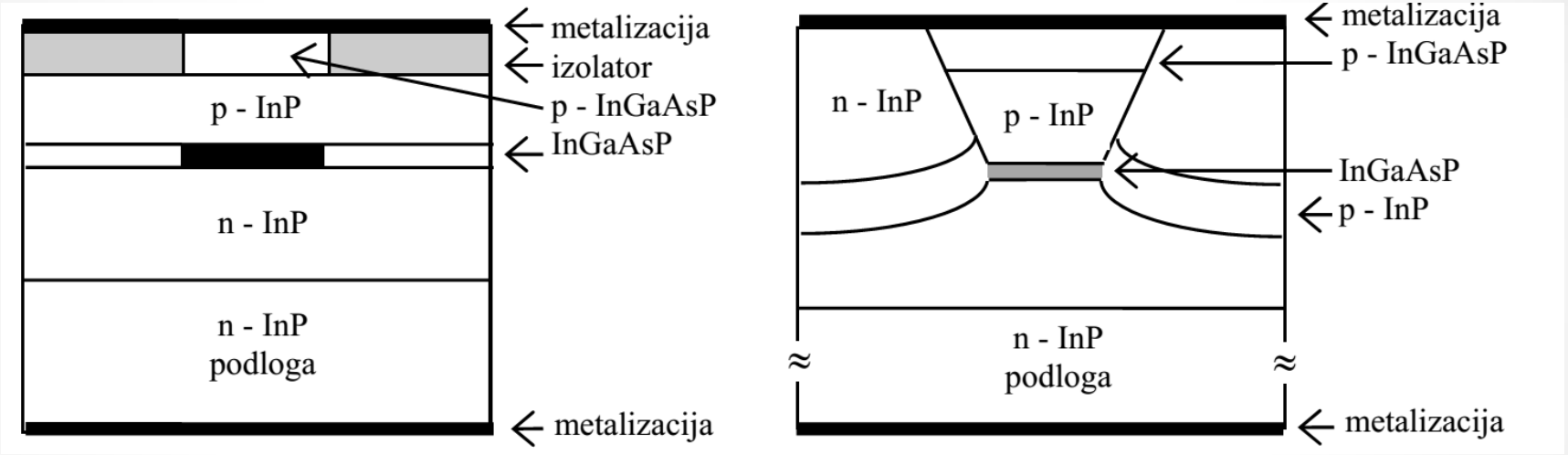
Razvoj laserskih dioda

- Prvi injekcioni laser bio je jednostavan p-n spoj od GaAs, paralelopipednog oblika
- Dve naspramne strane koje emituju svetlost su glatko odsečene i poseduju izvesnu refleksivnost zbog velikog indeksa prelamanja GaAs, te na taj način formiraju rezonator.
- Nedostatak ovih lasera je velika gustina struje praga te je korišćen samo na temperaturi tečnog helijuma (77K) i to samo u impulsnom režimu.
- Razlozi zbog kojih je struja praga tako velika jesu neprecizno definisana oblast sa inverzijom populacije (usled difuzije nosilaca) i nepotpuna lokalizovanost svetlosti unutar aktivne oblasti.



- Ovi nedostaci se mogu prevazići ako se sa obe strane aktivnog sloja postavi po jedan sloj poluprovodnika sa većim energetskim procepom, a manjim indeksom prelamanja.
- Na taj način potencijalne barijere na mestima heterospojeva u potpunosti lokalizuju injektovane nosioce unutar aktivnog sloja.
- Aktivna oblast ima veći indeks prelamanja nego okolni slojevi, te je ostvarena lokalizacija fotona u aktivnoj oblasti. Ovakva višeslojna struktura naziva se heterostruktura
- Pored debljine i širina aktivne oblasti treba da bude što manja da bi struja praga bila što manja, i da bi se ostvarila što bolja usmerenost zračenja.

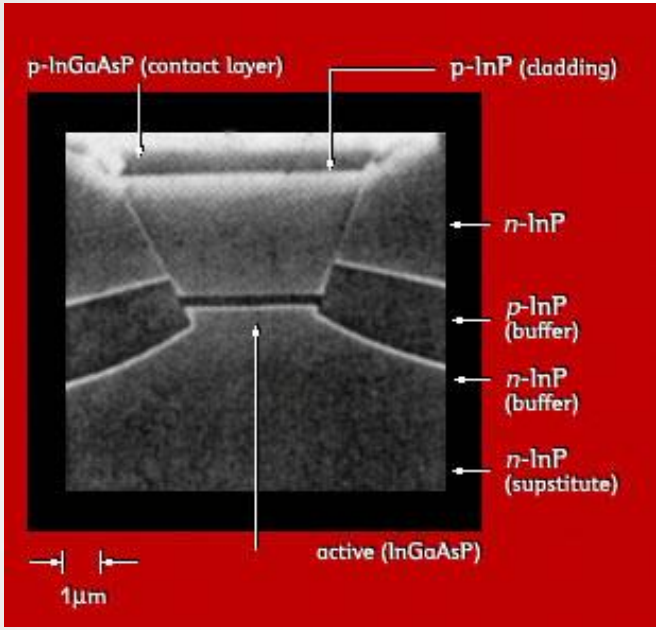
- Laserske diode kod kojih se usredsređivanje talasa po lateralnom pravcu vrši optičkim pojačanjem nazivaju se *pojačanjem vođeni* laseri ili *trakasti* laseri).
- Kod njih struja dominantno teče kroz jednu usku oblast pa se i samo optičko pojačanje ostvaruje u toj uskoj aktivnoj oblasti.
- Oblast proticanja struje obično je ograničena izolatorom.

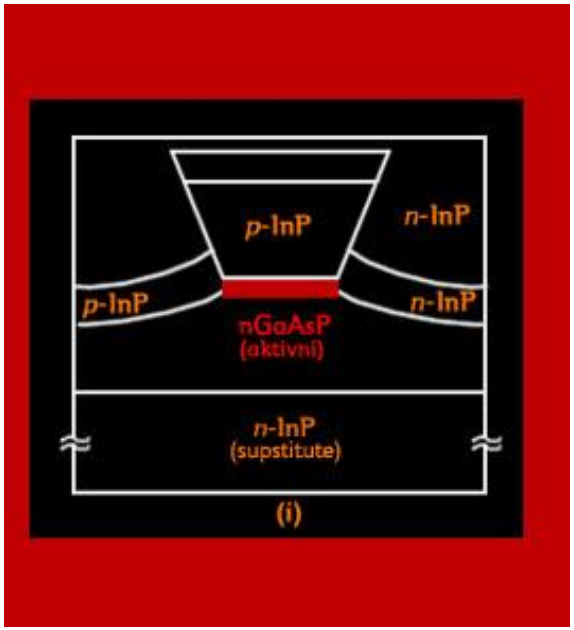


a) Trakasti laser i b) planarni BH heterostrukture. Aktivna oblast je zatamnjena

- Drugu vrstu laser dioda čine *indeksom vođeni* laseri.
- Kod njih se talasi usredsređuju u lateralnom pravcu, promenom indeksa prelamanja u istom pravcu.
- Većina njih ima konfiguraciju ukopane heterostrukture (BH - *Buried heterostructure),* kod kojih je aktivna oblast sa svih strana okružena materijalom većeg energetskog procepa i manjeg indeksa prelamanja.

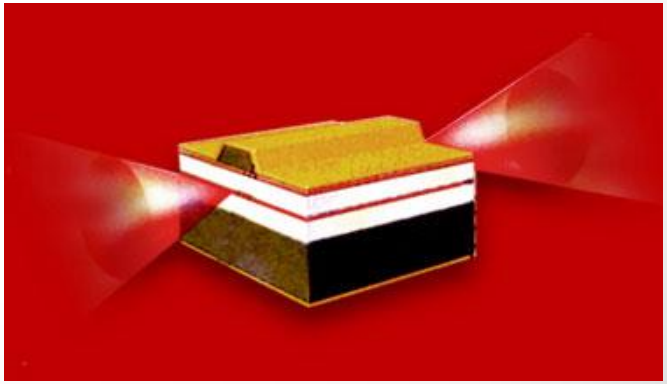
- Laserski efekt javlja se u ravnini pn-spoja ako kroz njega teče struja elektrona dovoljno velike gustine
- Poluprovodnički diodni laser nema spoljnih ogledala.
- Višestruka refleksija unutar rezonatora lasera događa se na izlaznim ravninama kristala poluprovodnika čija je prirodna refleksivnost samo oko 30%.



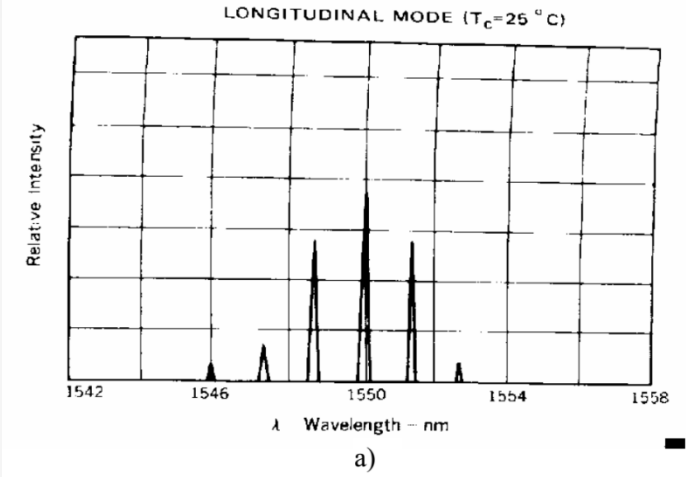


Skica iste strukture
Širina aktivnog laserskog sloja (crveno) je oko 3 µm, a debljina oko 0.3 µm. Dužina aktivnog laserskog sloja je 200-300 µm

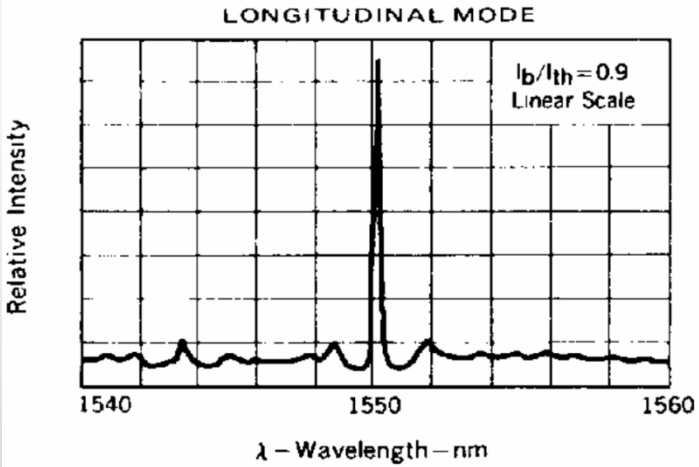
Realna struktura poluprovodničkog lasera. Slika je dobivena SEM mikroskopom. Najčešći postupak dobivanja laserskih struktura je tzv. MOCVD (metallo-organic chemical vapor deposition)



- Kod lasera sa FP rezonatorom u prelaznom režimu uvek postoji više longitudinalnih modova.
- Tek posle izvesnog vremena se, zahvaljujući različitom pojačanju na različitim talasnim dužinama, izdvaja osnovni mod.
- Pri velikim brzinama modulacije laserska dioda stalno radi u prelaznom režimu, pa su zbog toga FP laseri u takvim primenama nepovoljni.



a)



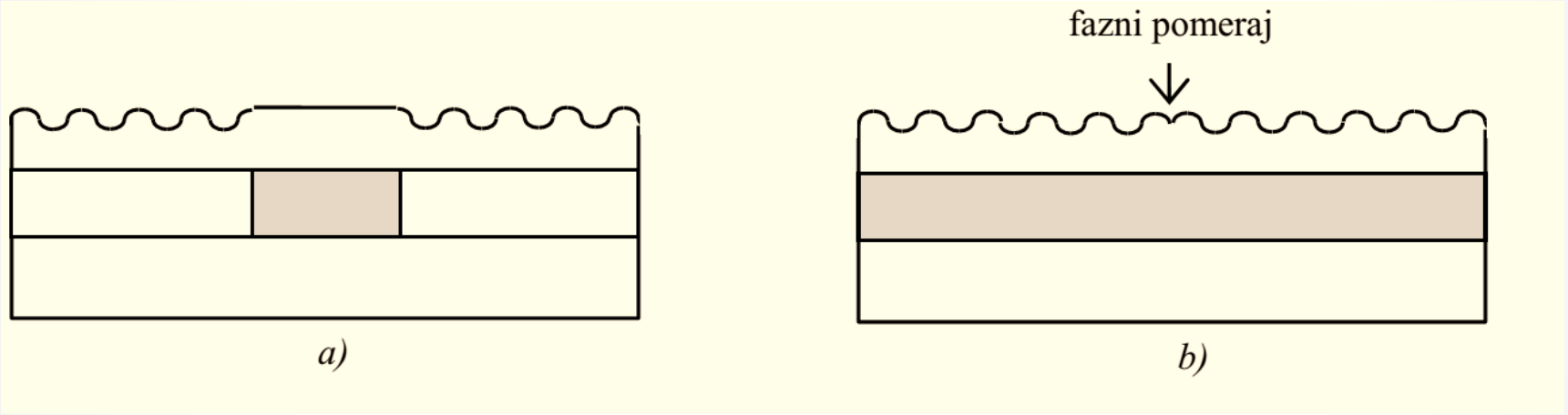
b)

Laser diode koje su i u prelaznom režimu monomodne nazivaju se ***dinamički monomodne*** **(DSM - *Dynamic Single Mode*) laser diode.**
Kod ovih lasera postoji selektivna zavisnost povratne sprege od talasne dužine, što je ostvareno ugrađivanjem uzdužne optičke rešetke u heterostrukturu lasera.

Na slikama su dati kataloški dijagrami zračenja za laser diodu
sa FP rezonatorom i jednu DSM laser diodu

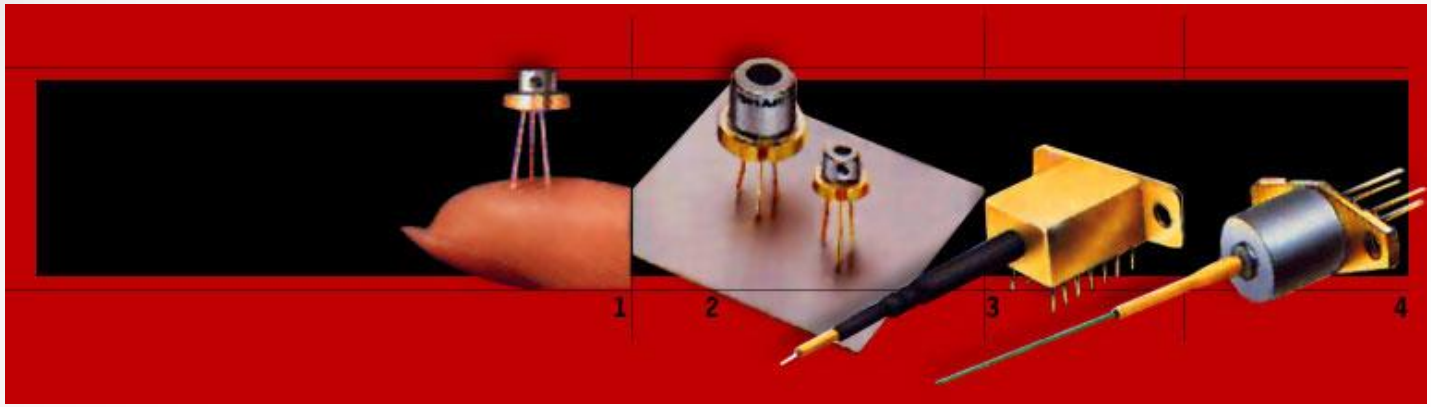
Spektri zračenja a) heterostrukturne laser diode sa klasičnim FP rezonatorom i b) dinamički monomodne laser diode.

- Dva osnovna tipa dinamički monomodnih dioda su: struktura sa raspodeljenim Bragovim reflektorom (DBR - *Distributed Bragg Reflector*) i struktura sa raspodeljenom povratnom spregom (DFB - *Distributed FeedBack*).



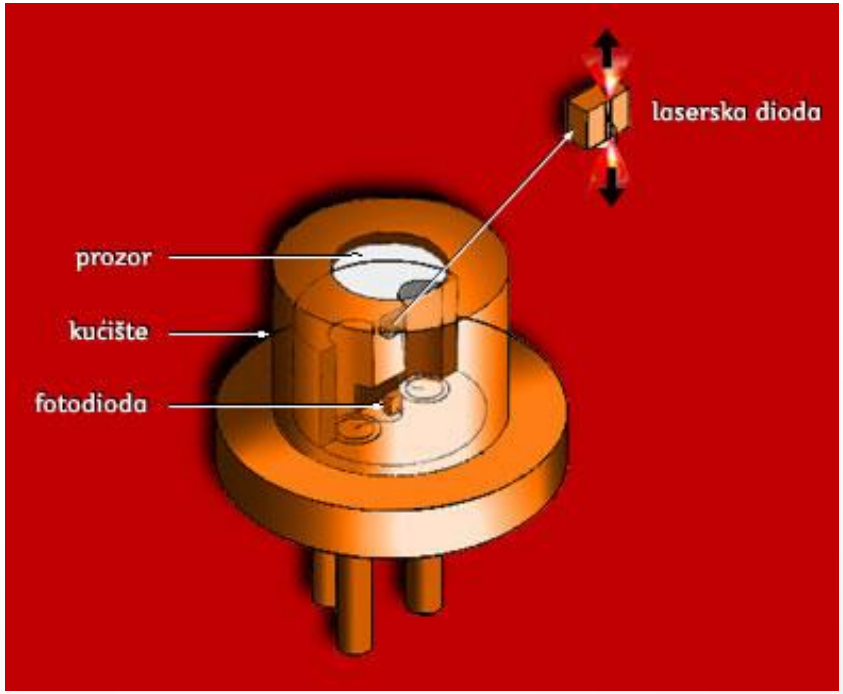
Šematski prikaz a) DBR i b) DFB lasera. Aktivna oblast je zatamnjena.

Izgled Poluprovodničke Laserske Diode



- Većina laserskih dioda male snage se nalazi u kućištu tranzistorskog tipa (sl.1), a manji deo ima kućišta drugih oblika. Standardni promeri su 9 i 5.6 mm (sl. 2).
- Laserske diode koje se koriste u optičkim komunikacijskim sistemima dolaze u kućištu koje na prozoru ima ugrađen (nalijepljen) svetlovod (slike 3 i 4).

- Okruglo kućište zatvoreno je hermetički, s prednje strane (gore) ima tanki stakleni prozor kroz koji prolazi laserska svetlost, a sa zadnje strane tri električna kontakta (nožice).
- U kućištu se nalazi ne samo laserski čip mikronskih dimenzija, približno 0.5 x 5 x 300 mikrona (desno na slici, strelice označavaju snopove svetlosti), nego i jedna integrisana fotodioda, takođe mikronskih dimenzija.
- Ona služi za praćenje intenziteta svetla lasera koje dolazi iz zadnjeg ogledala laserske diode.
- Ova fotodioda, u principu, omogućava kontrolu snage i talasne dužine zračenja lasera opto-elektroničkom povratnom vezom, preko odgovarajućeg sklopa koji je deo elektronike za napajanje diode



Primena laserskih dioda

- Laserske diode postale su gotovo najbitniji proizvod opto-elektroničke industrije.
- Prednosti laserske diode su mnogostruke: to je monohromatski, koherentni i kolimirani izvor svetla.
- Kompaktan je, lagan, dugog životnog veka, te male potrošnje električne energije.
- Osim toga - što je vrlo važno u komunikacijama - može ih se direkno modulirati i to vrlo visokim frekvencijama.

- Područja savremene tehnike gde se koriste laserske diode:

- **Obrada informacija**
  Audio-vizuelna (kućna) tehnika
  Uređaji za komunikacije
  Merni i kontrolni instrumenti
  Medicinski aparati

Komunikacija optičkim vlaknom

- Brz protok informacija sve je važniji u industriji, u poslovanju i u različitim savremenim video i komunikacijskim uslugama koje su nam potrebne u kući.
- Trenutni pristup udaljenim bazama podataka potreban nam je i u poslu i kod kuće.
- Ogromna količina podataka koju treba preneti velikom brzinom korisnicima opterećuje konvencionalne žičane prenosne veze i preko njihovih mogućnosti.
- Povećanje brzine i kapaciteta klasičnih prenosnika informacija bilo bi izuzetno skupo, i sobzirom na mogućnosti te tehnologije značilo bi bacanje novaca.
- Pravi odgovor na ovaj problem su *optičke komunikacije*.
- Napredak u razvoju opto-elektronike omogućuje proizvodnju vrlo pouzdanih i jeftinih integrisanih elektro-optičkih elemenata te optičkih vlakana i na njima osnovane tehnologije prenosa podataka.
- Tom tehnologijom koriste se savremeni lokalni telekomunikacijski sistemi, zemaljski interkontinentalni prenos podataka, lokalne (računarske) mreže (local area networks, LAN), moderni upravljački sistemi u avionima i drugim vozilima, te savremeni sistemi za prenos video-signala.
-

Prednosti optičkih komunikacija

- Prednosti optičkih komunikacija u odnosu na žičane su puno širi "bandwidth", manja osetljivost na smetnje (šum), izbegavanje tzv. "ground-loops" koje se teško eliminiše iz klasičnih žičanih sistema, vrlo mala težina uređaja, vrlo male dimenzije uređaja, puno manji broj tzv. "repeatera" u odnosu na klasične sisteme, ...
- Osim toga, podaci koji se šalju optičkim kablovima puno su zaštićeniji od mogućeg prisluškivanja nego kod klasičnih sistema s žičanim prinosom, gde je to vrlo veliki problem.
- Optička vlakna su neusporedivo sigurniji (tehnički) vid prenosa podataka preko "opasne" okoline kao što su prostori u kojima ima zapaljivih ili eksplozivnih supstanci (npr. u rudnicima i rafinerijama), nego što su to žičani kablovi.
- U prostorima gde postoje jaka elektromagnetna polja žičani kablovi se ne smeju upotrebiti, pa su optička vlakna jedino moguće rešenje.

Laserske diode: Upotreba u komunikacijama

- Konvencionalne jednožičane veze mogu imati maksimalnu frekvenciju nosioca oko 1 MHz.
- Povećanje brzine i kapaciteta klasičnih prenosnika informacija ostvarivo je koaksijalnim kablom, gdje je maksimalna frekvencija nosioca oko 10 GHz.
- U komunikacijama s optičkim vlaknom frekvencija nosioca je oko 500 THz (svetlost kao nosilac).
- Upotreba
  - lokalni telekomunikacijski sistemi,
  - zemaljski interkontinentalni prenos podataka,
  - lokalne (računarske) mreže (local area networks, LAN),
  - moderni upravljački sistemi u avionima i drugim vozilima,
  - savremeni sistemi za prenos video-signala.