

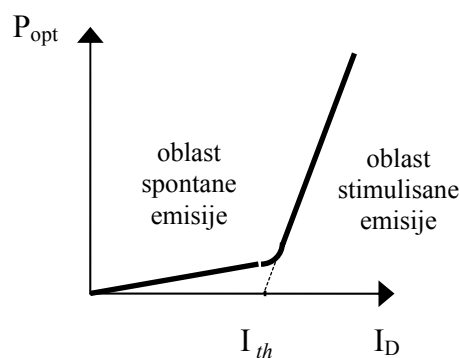
1. UVOD

Optoelektronski poluprovodnički elementi kao što su svetleće diode (LED) i laserske diode predstavljaju glavne izvore svetlosti u optičkim telekomunikacijama. Prenos signala preko optičkih talasovoda zahteva optoelektronske pretvarače kao izvore i detektore čije su karakteristike određene zahtevima sistema, odnosno na prvom mestu dužinom veze i brzinom prenosa. Posmatrajući optičke izvore u sistemima koji koriste intenzitetsku modulaciju zahtevi koji se postavljaju ovim komponentama su sledeći:

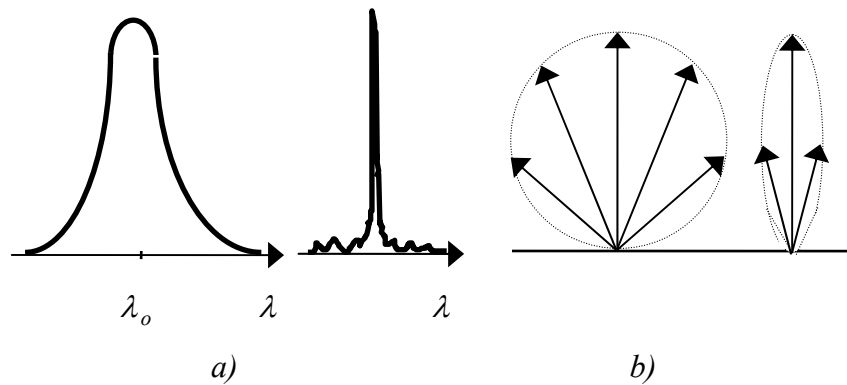
- emisija se mora nalaziti u spektralnom opsegu male apsorpcije i/ili disperzije optičkog vlakna,
- snaga zračenja uvedena u optički talasovod mora biti što veća (visok stepen elektrooptičke konverzije i dobra fokusiranost zračenja),
- što uži spektar zračenja, naročito za velike brzine modulacije,
- radni vek elementa mora biti uporedljiv sa ostalim komponentama sistema i
- ekonomična tehnologija proizvodnje.

U osnovi LED i laserske diode rade na principu zračenja svetlosti usled dovođenja pobudne struje. Razlika je u tome, što se kod LED odvija spontana emisija, koja je slabija i zračenje je nekoherentno (izlazna snaga je reda veličine 1mW, a širina spektra reda veličine nekoliko desetina nanometara - $k \times 10 \text{ nm}$). Laserska dioda radi na principu stimulisane emisije, te dobijamo veću izlaznu snagu i znatno uži spektar zračenja (izlazna snaga oko 10mW, širina spektra od desetih delova nm do nekoliko nm).

Kod laserske diode se definiše struja praga, iznad koje je zračenje stimulisano, a ispod koje je spontano (sl. 1.1.). LED je jednostavnija za izradu, te i jeftinija, manje osetljiva, ali zato za razliku od laserske diode, ima širi spektar zračenja i širi dijagram prostornog zračenja (sl. 1.2.a. i 1.2.b.). To za posledicu ima veće rasipanje i gubitke pri uvođenju svetlosti u vlakno. Zbog male fokusiranosti zračenja, LED se ne može koristiti kao izvor u sistemima gde je prenosni medijum monomodno vlakno (izuzetno mali prečnik vlakna), već se koristi samo kao izvor za multimodna vlakna, koja su za red veličine većih dimenzija.



Slika 1.1. Strujno-svetlosna karakteristika laserske diode.



Slika 1.2. Uporedni dijagrami a) širine spektra i b) prostornog zračenja za LED i lasersku diodu.

Sa druge strane, laserske diode su složenije strukture, osjetljivije i zahtevaju složeniju temperaturnu kompenzaciju i kontrolu snage zračenja.

Izbor materijala za izradu ovih dioda vrši se između poluprovodnika III i V grupe periodnog sistema (Ga, Al, In, As, P i Sb) iz sledećeg razloga: jedinjenja i legure ovih elemenata imaju direktan energetski procep, koji je u ovom slučaju neophodan, jer je u suprotnom velika neradijativna rekombinacija.

Od značaja su sledeći materijali:

1) $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ - za direktan procep potrebno je obezbediti $0 \leq x \leq 0,45$, a zračenje se dobija u opsegu talasnih dužina prvog optičkog prozora. Tehnologija dobijanja ovog materijala je razvijenija i jednostavnija.

2) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ - u ovom slučaju potrebno je ostvariti odnos $x=0,43y$. Zračenje je u opsegu talasnih dužina od $900 \div 1700\text{nm}$, čime je pokriven frekventni opseg u kome je disperzija i apsorpcija u optičkom vlaknu minimalna.

Centralna talasna dužina zračenja, za LED i laserske diode, određena je širinom energetskog procepa E_G :

$$\lambda \text{ [}\mu\text{m]} = \frac{hc}{E_G} = \frac{1,24}{E_G [\text{eV}]}, \quad h=6.625 \cdot 10^{-34}\text{Js} \quad (1.1)$$

Takođe je važno napomenuti, da treba obezbediti usaglašenost kristalografskih osobina (dimenzija kristalne rešetke) slojeva poluprovodnika, koji formiraju heterostrukture, jer u suprotnom, na mestu heterospojeva, dolazi do pojave kristalnih defekata što povećava neradijativnu rekombinaciju.

2. SVETLEĆE DIODE

Svetleće diode (LED-Light Emitting Diode) obično rade na talasnim dužinama oko 850nm i 1300nm (I i II optički prozor), i to kao što je već rečeno, samo u kombinaciji sa multimodnim vlaknima. Širina spektra ovih dioda je oko $30 \div 40\text{nm}$, te se zato kod njih primenjuje samo intenzitetska modulacija (analogna ili digitalna).

Prednosti LED u odnosu na laserske diode su: niža cena, linearniji odnos između snage zračenja i struje kroz diodu i manja osetljivost na temperaturne promene.

Osnovni kriterijum za primenu LED su sjajnost (radijansa) i brzina odziva (inercione osobine). Sjajnost je snaga zračenja emitovana sa jedinice emisije površine u jedinični prostorni ugao, i potrebno je da bude što veća. Brzina odziva ograničava maksimalnu širinu spektra, kojim se može modulisati zračenje LED (maksimalno do oko 200MHz). Iz tog razloga potrebno je da inercija diode bude što manja.

Svetleće diode, prema veličini emisije površine, možemo podeliti u dve grupe:

1) Dioda sa velikom emisijom površinom ($0,2 \div 5,6\text{mm}^2$) i slabim sjajem. Koriste se samo kod optičkih kablova, čiji su svetlovođi sačinjeni od $50 \div 1000$ vlakana u obliku pletenice, pa im je poprečni presek približno jednak emisijoj površi diode.

2) Dioda sa malom emisijom površinom (reda veličine $0,05\text{mm}^2$) i velikim sjajem, za multimodno vlakno.

Takođe, LED možemo podeliti na diode sa površinskim zračenjem (*Burrus*-ovog tipa) i diode sa bočnim zračenjem.

2.1. LED sa površinskim zračenjem

Strukturni prikaz jedne ovakve diode dat je na sl. 2.1.1.

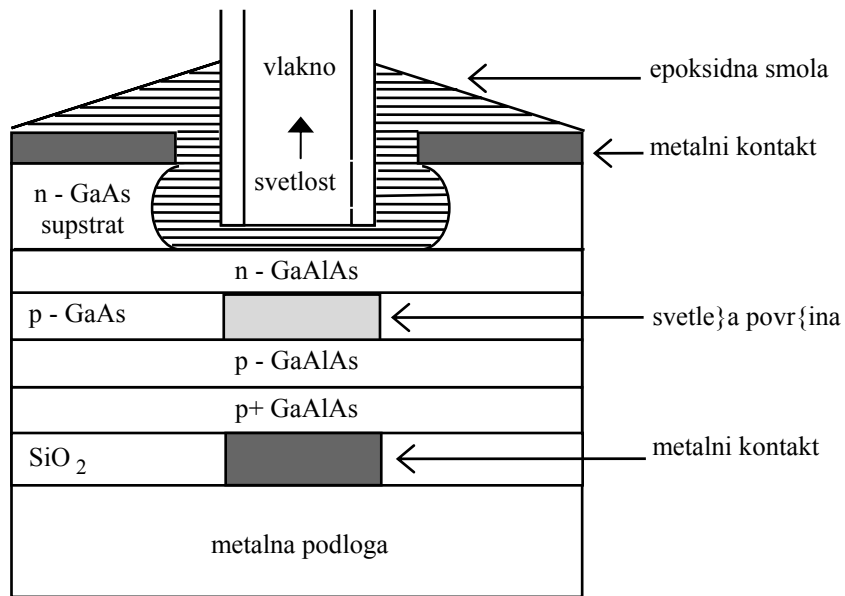
Sloj u kojem se ostvaruje spontana emisija (aktivni sloj p-GaAs) smešten je između slojeva sa većim energetskim procepom, (slojevi n-GaAlAs i p-GaAlAs) Time se ostvaruje lokalizacija nosilaca naelektrisanja u aktivnom sloju.

Aktivna oblast je kružnog oblika i obično je prečnika $50 \mu\text{m}$ i debljine do $2,5 \mu\text{m}$.

Direktnom polarizacijom diode iz sloja n-GaAs, kroz sloj n-GaAlAs, injektuju se elektroni u p-GaAs zonu rekombinacije. Potencijalna barijera kod sloja p-GaAlAs zadržava elektrone u sloju p-GaAs, gde se formira visoka koncentracija istih, sa jakim rekombinacionim procesom. Deo rekombinacionog zračenja koji pada na sloj n-GaAlAs je koristan deo, koji se u ovom slučaju ne apsorbuje (jer GaAlAs ima veći energetski procep), nego pada neposredno na optičko vlakno.

Okrugla kontaktna elektroda (metalni kontakt) u kvarcnom sloju, određuje i ograničava oblast rekombinacije zračenja.

Epoksidna smola se stavlja radi povećanja efikasnosti uvođenja svetlosti u optičko vlakno ujednačavanjem indeksa prelamanja vlakna i izvora. Povećanje efikasnosti sprege izvor-vlakno može se ostvariti i korišćenjem sočiva (koja kolimiraju izlazni snop).

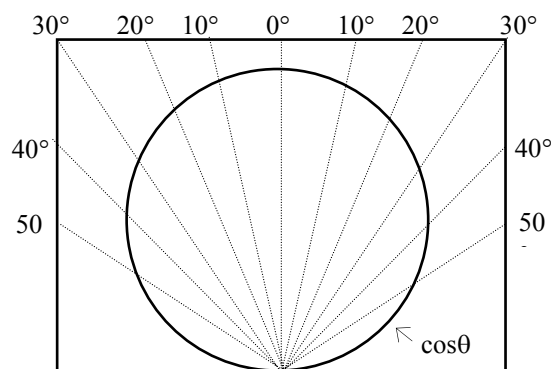


Slika 2.1.1. Struktura LED sa površinskim zračenjem.

Barusova dioda se ponaša kao Lambertov izvor svetlosti sa širinom dijagrama zračenja oko 120° (sl. 2.1.2.). Lambertov izvor svetlosti je onaj čija se radijansa može opisati izrazom:

$$B(\theta) = B_0 \cos \theta \quad (2.1.1.)$$

gde B_0 aksijalna radijansa.

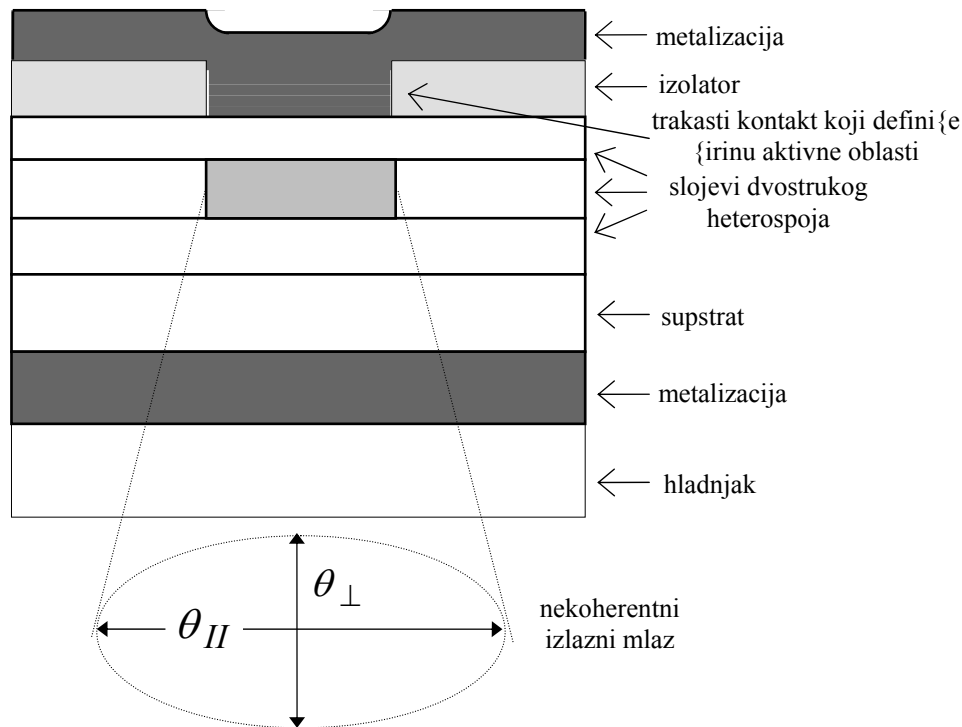


Slika 2.1.2. Prostorni dijagram zračenja LED sa površinskim zračenjem.

2.2. LED sa bočnim zračenjem

Ove diode imaju bolje karakteristike od Barusovih dioda u pogledu: brzine odziva, veličine izlazne optičke snage i divergencije snopa zračenja. One imaju bočnu emisiju kao i poluprovodnički laseri. Slojevi dvostrukog heterospoja obrazuju planarni talasovod što dovodi do bolje usmerenosti izlaznog zračenja.

Struktura LED sa bočnim zračenjem prikazana je na sl. 2.2.1.



Slika 2.2.1. Strukturni prikaz LED sa bočnim zračenjem.

U ravni paralelnoj ravni pn spoja, gde nema talasovodnog efekta, emitovani mlaz je Lambertovog tipa. Širina izlaznog snopa u ovoj ravni kada snaga opadne na polovinu maksimalne snage je $\theta_{II}=120^\circ$. U ravni normalnoj na ravan spoja širina snopa je $\theta_{\perp}=25^\circ \div 35^\circ$.

Posebnu vrstu LED čine tzv. **superluminescentne LED**. Diode ovog tipa deo svetlosti generišu spontanom, a deo stimulisanom emisijom. Da bi se to postiglo, one sadrže optički rezonator koji na jednom kraju ima nepropusno ogledalo, ali na drugom kraju takvog ogledala nema, pa svetlost slobodno izlazi u okolni prostor. U ovom slučaju, spontano zračenje izaziva stimulisane radijacione prelaze i na taj način pojačava samo sebe. To pojačanje nije značajno jer veliki deo zračenja brzo prolazi kroz rekombinacionu oblast i izlazi napolje. Ovako generisano zračenje naziva se superluminescentno zračenje.

Prethodno opisane LED, sa površinskim i bočnim zračenjem, koje rade u talasnom području od $800 \div 900\text{nm}$, pri struji od $100 \div 200\text{mA}$, daju izlaznu snagu zračenja od nekoliko mW. Snaga zračenja koja ulazi u vlakno zavisi od numeričke aperture (NA) vlakna i vrste diode. Za vlakna sa $NA < 0,3$ povoljnije su LED sa bočnim zračenjem, a za vlakna sa $NA > 0,3$ diode sa površinskim zračenjem. Diode sa površinskim zračenjem obično zrače u prostor oko tri puta veću snagu od dioda sa bočnim zračenjem.

Još jedan značajan parametar LED, koji do sada nije pominjan, jeste vek trajanja. Starenje diode je sporije ako je struja, koja protiče kroz nju, manja. Osnovni uzroci degradacije su mehanički i toplotni efekti, koji deluju na kristal poluprovodnika u toku rada diode. Značajan faktor je disipacija.

3. LASERSKE DIODE

Rad laserske diode (LASER- *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) se zasniva na procesu stimulisane emisije zračenja. Za razliku od ostalih lasera (gasni, čvrstog stanja) kod poluprovodničkih lasera ne postoje izolovani energetske 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 (veća popunjenost elektronima pri dnu provodne nego pri vrhu valentne zone), a za to postoje različite tehnike. 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 injeksionim. Jednostavnom modulacijom struje kroz p-n spoj, moguće je modulirati 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. Laserski rezonator se najčešće izvodi planparalelnim ogledalima (FP - *Fabry-Perot* rezonator).

Unutar laserskog rezonatora mogu da postoje talasi samo onih talasnih dužina λ za koje je ispunjen uslov:

$$m \frac{\lambda}{2} = L ; \quad m=1,2,3... \quad (3.1.)$$

gde je L dužina rezonatora.

Izračena talasna dužina (po izlasku svetlosti iz laserskog rezonatora) $\lambda_o = n\lambda$, gde je n indeks prelamanja aktivne oblasti.

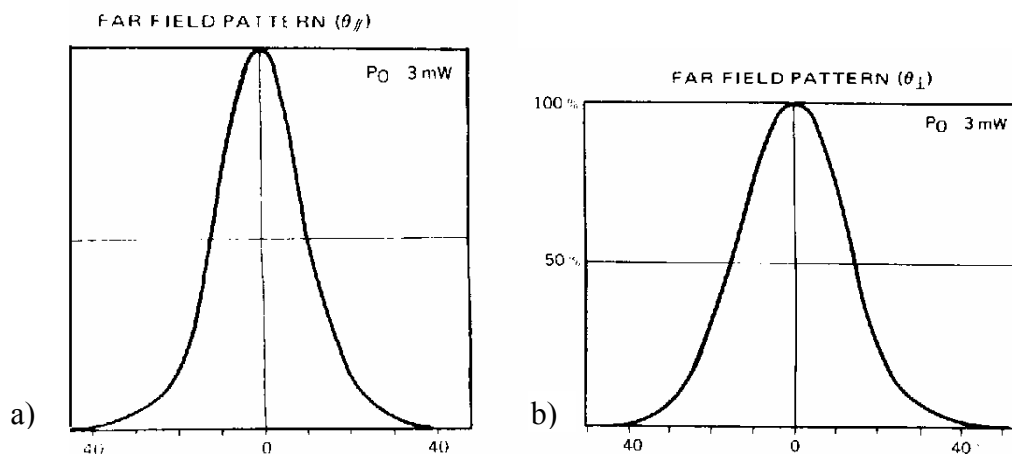
U opštem slučaju unutar rezonatora mogu postojati modovi koji se prostiru pod različitim uglovima u odnosu na osu rezonatora. U interesu je, naravno, da takvih modova bude što manje, odnosno da postoje samo modovi koji se prostiru duž ose, kako bi prostorni dijagram zračenja bio što uži.

Važna karakteristika laserskih materijala je unutrašnja kvantna efikasnost η_i , koja se definiše kao odnos verovatnoća radijativne rekombinacije $1/\tau_r$ i ukupne rekombinacije $1/\tau = 1/\tau_r + 1/\tau_{nr}$:

$$\eta_i = \tau / \tau_r = \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} \quad (3.2.)$$

gde su τ_r i τ_{nr} radijativno i neradijativno vreme života nosilaca, respektivno. Pravilnim legiranjem i brižljivom izradom kristala postiže se $\eta_i \approx 1$.

U dosadašnjem tekstu je već navedeno da laserske diode imaju znatno užu dijagram prostornog zračenja u odnosu na LED. Za InGaAsP laser sa dvostrukom heterostrukturom koji zrači na talasnoj dužini od 1310nm, na sl. 3.1., dati su kataloški dijagrami prostornog zračenja po horizontalnoj i vertikalnoj ravni.

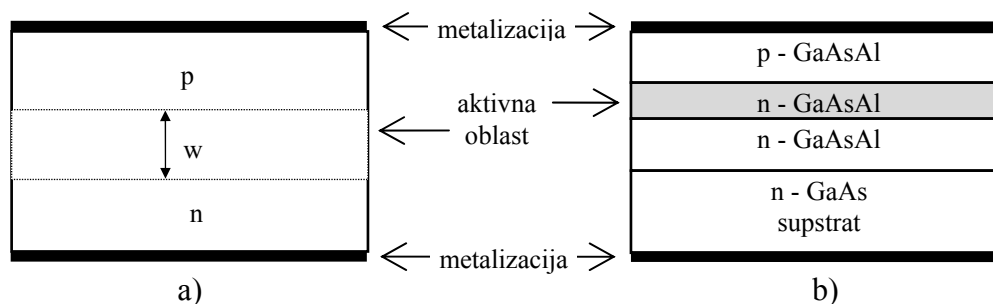


Slika 3.1. Prostorni dijagrami zračenja laser diode u a) horizontalnoj i b) vertikalnoj ravni.

3.1. Pregled razvoja laserskih dioda

Prvi injkcionni laser bio je jednostavan p-n spoj od GaAs, paralelopipednog oblika (sl. 3.1.1.a.). Kod ovog lasera dve naspramne strane koje emituju svetlost su glatko odsečene (fasete) i poseduju izvesnu refleksivnost zbog velikog indeksa prelamanja GaAs, te na taj način formiraju *Fabry-Perot* (FP) 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.

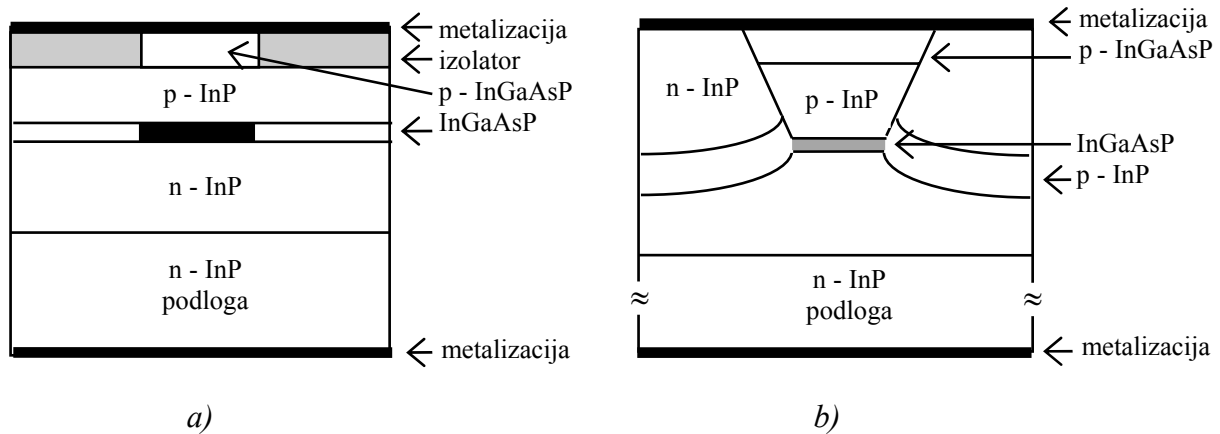
Oba navedena nedostatka se mogu prevazići ako se sa obe strane aktivnog sloja postavi po jedan sloj poluprovodnika sa većim energetskim procepom, a manjim indeksom prelamanja. Na taj način potencijalne barijere na mestima heterospojeva u potpunosti lokalizuju injektovane nosioce unutar aktivnog sloja. Istovremeno je formiran talasovod jer aktivna oblast ima veći indeks prelamanja nego okolni slojevi, te je ostvarena lokalizacija fotona u aktivnoj oblasti. Ovakva višeslojna struktura naziva se heterostruktura (sl. 3.1.1.b.). 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.



Slika 3.1.1. Strukturni prikazi laserske diode a) kao običnog pn spoja i b) kao heterostrukture.

Laserske diode kod kojih se usredsređivanje talasa po lateralnom pravcu vrši optičkim pojačanjem nazivaju se **pojačanjem vođeni** laseri ili **trakasti** laseri (sl. 3.1.2.a.). 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.

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. Na sl. 3.1.2.b. je prikazan jedan BH laser.

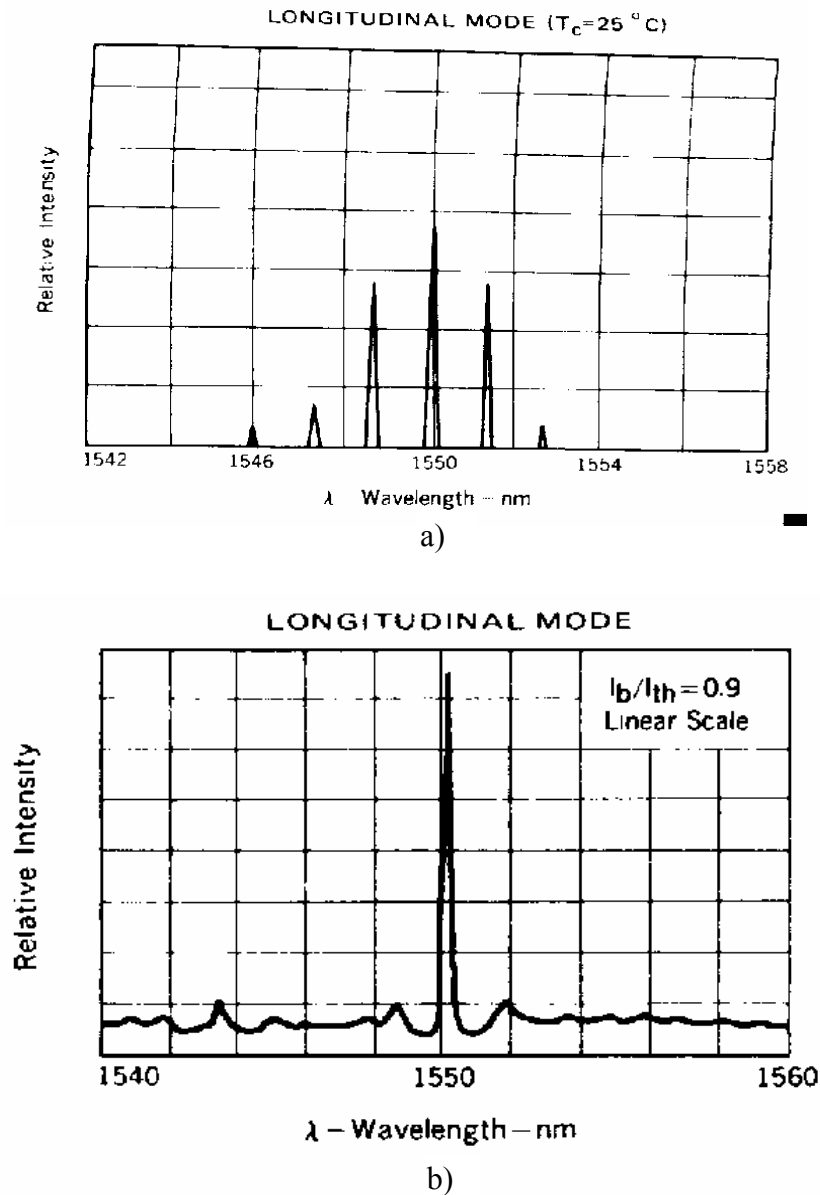


Slika 3.1.2. Strukturni prikazi a) trakastog lasera i b) planarne BH heterostrukture. Aktivna oblast je zatamnjena.

Zahvaljujući maloj debljini i širini aktivne oblasti postoje samo modovi koji se prostiru duž njene ose (longitudinalni modovi). Različiti longitudinalni modovi imaju različite talasne dužine (izraz 3.1.). Istovremeno postojanje više ovakvih modova je nepoželjno, jer će u kombinaciji sa hromatskom disperzijom optičkog vlakna dovesti do proširenja optičkog impulsa i ISI na prijemu.

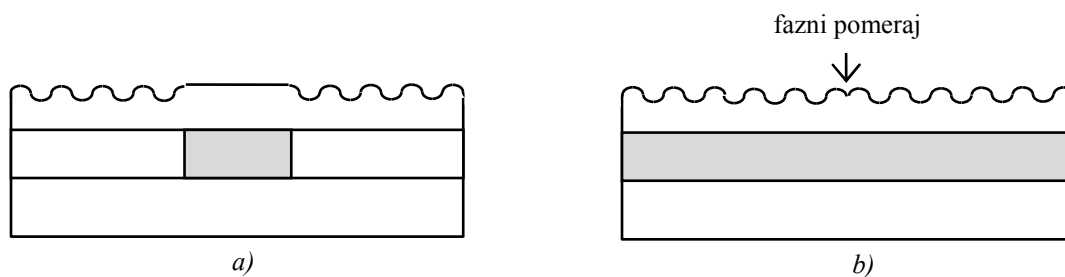
Kod lasera sa FP rezonatorom u prelaznom režimu uvek postoji više longitudinalnih modova. Tek posle izvesnog vremena se, zahvaljujući različitom pojačanju na različitim talasnim dužinama, izdvaja osnovni mod. Pri velikim brzinama modulacije laserska dioda stalno radi u prelaznom režimu, pa su zbog toga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

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 sl. 3.1.3. dati su kataloški dijagrami zračenja za laser diodu sa FP rezonatorom i jednu DSM laser diodu.



Slika 3.1.3. Spektri zračenja a) heterostrukturalne 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*). Na sl. 3.1.4.a. i sl. 3.1.4.b. su šematski prikazani DBR i DFB laseri respektivno.



Slika 3.1.4. Šematski prikaz a) DBR i b) DFB lasera. Aktivna oblast je zatamnjena.

3.2. Pojačanje na pragu laserskog efekta

Da bi se ostvarila laserska emisija potrebno je da optičko pojačanje bude dovoljno veliko (tj. stimulirana emisija dovoljno intenzivna), da pokrije sve gubitke fotona u rezonatoru. U ove gubitke, pored ostalog spada i korisno svetlosno zračenje. Kada se pobuda poveća do te mere da se pojačanje izjednači sa sumom svih gubitaka, nastupa prag laserskog efekta, okarakterisan naglim porastom amplitude nekoliko centralnih modova. Ispod praga laserskog efekta, laser se ponaša kao pojačavač spontane emisije.

Da bi se odredilo pojačanje na pragu laserskog efekta, polazi se od izraza za intenzitet zračenja u laserskoj diodi:

$$I(z) = I(z=0) e^{(g-\alpha)z} R_1 R_2 \quad (3.2.1.)$$

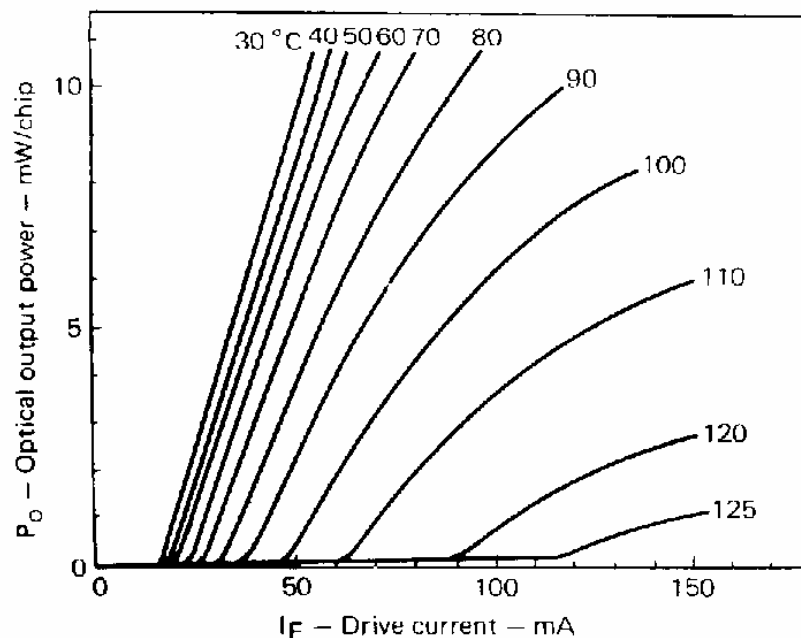
gde je g optičko pojačanje, z koordinata po dužini lasera, R_1 i R_2 reflektivnosti ogledala rezonatora, a α su gubici usled apsorpcije, rasejanja, itd. Prag laserskog efekta nastupa kada se optičko pojačanje izjednači sa sumom svih gubitaka u rezonatoru. Iz uslova da je $I(2L) = I(0)$, gde je L dužina rezonatora, dobija se izraz za pojačanje na pragu laserskog efekta:

$$g_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (3.2.2.)$$

Drugi sabirak predstavlja gubitke usled transmisije zračenja kroz ogledala rezonatora.

3.3. Statička karakteristika i uticaj temperature na rad laser diode

Statička karakteristika, tj. zavisnost izlazne optičke snage od struje kroz laser za različite temperature, prikazana je na sl. 3.3.1.



Slika 3.3.1. Zavisnost izlazne optičke snage od pobudne struje laser diode pri različitim temperaturama.

Nagib prikazane karakteristike određuje diferencijalna kvantna efikasnost η_D . Ako sa P obeležimo izlaznu optičku snagu tada je:

$$P = \eta_D \cdot \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad (3.3.1.)$$

gde je I_{th} struja praga. Fundamentalna relacija koja opisuje diferencijalnu kvantnu efikasnost je sledeća:

$$\eta_D = \eta_i \left(1 - \frac{\alpha}{g_{th}}\right) \quad (3.3.2.)$$

gde je η_i unutrašnja kvantna efikasnost definisana izrazom 3.2., α gubici usled apsorpcije, rasejanja, itd. i g_{th} pojačanje na pragu laserskog efekta.

Standardni poluprovodnički laseri imaju η_D od 15 ÷ 20%, a visoko kvalitetni poluprovodnički laseri mogu imati vrednost η_D i do 30% ili 40%.

Pri većim izlaznim snagama zračenja, zbog grejanja spoja, javlja se smanjenje nagiba statičke karakteristike.

Na statičkoj karakteristici se takođe uočava, jedna od važnih karakteristika, struja praga laserskog efekta. Kod poluprovodničkih lasera sa porastom temperature optička snaga drastično opada, struja praga se povećava, a zavisnost optičke snage od pobudne struje je sve nelinearnija. Zavisnost struje praga od temperature je sledeća:

$$I_{th} = I_o e^{\frac{T}{T_o}} \quad (3.3.3.)$$

pri čemu je poželjno da T_o bude što veće. Kod dugotalasnih lasera (1300nm i 1550nm) to je 50 ÷ 60K, a kod GaAs lasera (850nm) ide čak i do 200K. U pogledu smanjenja temperaturne zavisnosti kod dugotalasnih lasera za sada najviše obećavaju laserske strukture sa kvantnim jamama. Pri tome postoje strukture sa jednom ili više kvantnih jama.

U toku rada usled proticanja struje kroz laser diodu, dolazi do pojave disipacije koja u velikoj meri utiče na vek trajanja diode. Disipacija je najizraženija u aktivnom sloju. Materijal je tada podvrgnut velikom temperaturnom gradijentu i jakim mehaničkim naprezanjima. Pored toga GaAs ima lošije mehaničke i temperaturne osobine od Si. Zbog toga dolazi do naglog opadanja intenziteta svetlosti (za nekoliko časova). Ono je propraćeno stvaranjem "tamnih linija" koje slede kristalografske ose, a nastaju zbog smanjenja vremena života osnovnih nosilaca naelektrisanja. Nakon naglog opadanja intenziteta svetlosti, u toku daljeg rada intenzitet svetlosti se sporije smanjuje, što zavisi od vrste i količine primesa, čistoće osnovnog poluprovodnika itd.

3.4. Dinamika laserske emisije

Zahvaljujući mogućnosti rada i na velikim frekvencijama (reda GHz), laser diode su od velikog značaja za optičke telekomunikacije.

Karakteristično za laser diode je da im se u odzivu javljaju prigušene relaksacione oscilacije - naizmenično se smenjuju minimumi i maksimumi koncentracije elektrona i fotona. Analitički se ovo opisuje jednačinama brzina (3.4.1., 3.4.2., i 3.4.3.) koje određuju dinamički odziv lasera.

$$\frac{ds}{dt} = \Gamma v_g a_o (n - n_o) s - \frac{s}{\tau_p} + \frac{n_{sp} \Gamma n}{\tau_n} \quad (3.4.1.)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{i(t)}{eV_a} - v_g a_o (n - n_o) s - \frac{n}{\tau_n} \quad (3.4.2.)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left\{ \Gamma v_g a_o (n - n_o) - \frac{1}{\tau_p} \right\} \quad (3.4.3.)$$

gde je:

s koncentracija fotona u laser diodi;

n koncentracija slobodnih elektrona u laser diodi;

n_o koncentracija elektrona na pragu transparencije (pri kojoj se jednak broj fotona generiše i apsorbuje);

v_g grupna brzina optičkog talasa unutar rezonatora;

a_o koeficijent optičkog pojačanja;

Γ faktor optičkog ograničenja (definiše deo optičke snage koji se nalazi unutar aktivne oblasti);

τ_p srednje vreme života fotona u rezonatoru;

τ_n srednje vreme života slobodnih elektrona u rezonatoru;

n_{sp} faktor spontane emisije (tj. deo spontane emisije koji se uključuje u laserske modove);

α faktor proširenja spektralne linije;

Φ trenutna faza optičkog talasa;

V_a zapremina aktivne oblasti laser diode;

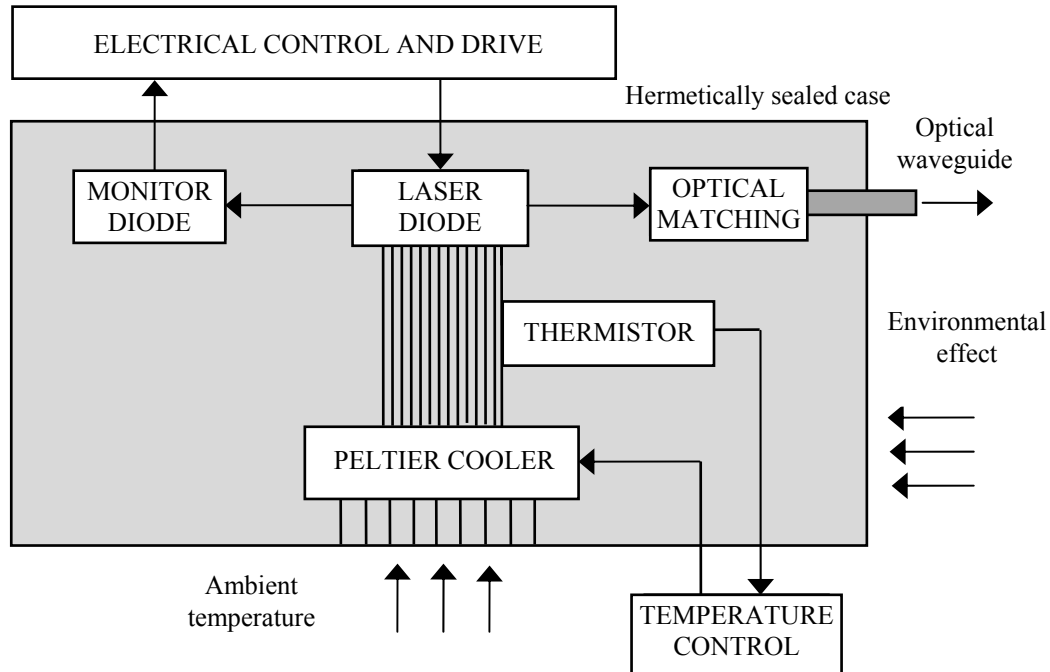
i(t) struja kroz aktivni deo laser diode;

e naelektrisanje elektrona.

Na osnovu ovih jednačina dobija se vreme potrebno za prigušenje oscilacija.

3.5. Modul laserskog izvora

Zbog velike osjetljivosti laser dioda na temperaturne promene i potrebe za kontrolom nivoa izlaznog zračenja, one se ne proizvode kao zasebne komponente već u okviru modula. Laserski modul pored same laser diode sadrži i elemente prikazane na sl. 3.5.1.



Slika 3.5.1. Blok šema modula laserskog izvora.

Pored dela za prilagođenje laser diode optičkom vlaknu (OM) i sistema za kontrolu i održavanje temperature na dozvoljenoj vrednosti (T, PC i TC), modul sadrži i sistem za regulaciju izlazne snage zračenja laser diode. Naime, sem ka izlazu, tj. optičkom vlaknu, laser dioda zrači i ka fotodetektoru (MD), koji signal predaje posebnom spoljnom sistemu za regulaciju izlazne optičke snage laser diode (ECD).

Na ovaj način laser dioda je zaštićena od spoljnih uticaja, jednostavnije je priključenje laserskog izvora u sistem, a takođe je omogućena i jednostavnija regulacija rada laser diode.