

Ispitna pitanja iz Optičkih komunikacijskih sustava

Pitanja na koje se svakako mora znati odgovor kako bi se prošao usmeni (nužni uvjet prolaska usmenog):

1. Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija; izgled lasera.
2. Vrste laserskih dioda (Fabry-Pérot, DFB, DBR, VCSEL), P-I karakteristika, spektralna karakteristika
3. Vrste fotodetektora (PIN i APD fotodetektorske diode), parametri fotodetektora (kvantna djelotvornost, odziv, vrijeme porasta, frekvencijska širina pojasa)
4. Svjetlovodna pojačala, svojstva EDFA-pojačala, saturacija pojačanja, shema EDFA-pojačala
5. Princip rada svjetlovoda, Snellov zakon, kritični kut, numerička apertura, vrste svjetlovoda
6. Ograničenja u svjetlovodu: gušenje i disperzija; ovisnost maksimalne udaljenosti veze o brzini prijenosa, valnoj duljini i vrsti svjetlovoda
7. Multipleksiranja signala - TDM i WDM pristup
8. Projektiranje optičke veze - proračun snage i proračun vremena odziva

Ostala ispitna pitanja:

9. Laseri - osnovna laserska jednadžba, iznos minimalnog potrebnog pojačanja, fazni uvjet kod lasera
10. LED diode (osnovna svojstva, nutarnja i vanjska kvantna djelotvornost, P-I karakteristika, spektralna karakteristika, izvedbe LED dioda)
11. Laserska dioda (izgled, izvedba pomoću heterostrukturi, osnovna laserska jednadžba za laserske diode, P-I karakteristika, temperaturna ovisnost P-I karakteristike)
12. Modulacijski postupci kod optičkih komunikacijskih sustava (intezitetna modulacija (OOK), fazna modulacija (DPSK, DQPSK)); spektralna gustoća snage.
13. Načini modulacije laserske diode (direktna modulacija ili vanjski modulator), problemi kod direktne modulacije
14. Parametri optičkih predajnika ($\Delta\lambda$, σ_λ , -20dB širina, omjer gašenja, potiskivanje bočnih modova)
15. Šum kod PIN i APD fotodetektorskih dioda; usporedba S/N za PIN i APD detektorske diode
16. Određivanje greške bita (BER-a)
17. Osjetljivost prijamnika, ovisnost osjetljivosti prijamnika o Q i S/N, principijelna shema optičkog prijamnika, zahtjevi na parametre optičkog prijamnika
18. Vrste optičkih pojačala (EDFA, poluvodička optička pojačala, Ramanova pojačala)
19. Šum u optičkim sustavima s EDFA pojačalima
20. Planarni svjetlovodi, analiza planarnih svjetlovoda, određivanje broja modova u planarnom svjetlovodu
21. Rigorozna metoda analize cilindričnog svjetlovoda – osnovni principi
22. Modovi u svjetlovodu (TE, TM i hibridni modovi), ovisnost koeficijenta rasprostiranja o frekvenciji, normirana frekvencija, dominatni mod, prvi viši modovi, LP modovi, ovisnost broja modova o frekvenciji, omjer optičke snage u jezgri i u plaštu

23. Gušenje u svjetlovodu, infracrvena apsorpcija, ultraljubičasta apsorpcija, Rayleighovo raspršenje, tehnološko gušenje
24. Gušenje uslijed savijanja svjetlovoda, nove vrste svjetlovoda, svjetlovodi za dalje infracrveno područje ($\lambda > 1.7 \mu\text{m}$)
25. Nekromatske vrste disperzije, međumodalna disperzija, polarizacijska disperzija, ograničenje na brzinu prijenosa
26. Kromatska disperzija, ovisnost o grupnoj brzini, parametar kromatske disperzije, ograničenje na brzinu prijenosa
27. Materijalna disperzija, valovodna disperzija
28. Vrste svjetlovoda, ITU-T preporuke G 652 – G 657.
29. Kompenzacija kromatske disperzije (DCF svjetlovod, kompenzacija pomoću Braggove rešetke, elektronička kompenzacija disperzije); kompenzacija polarizacijske disperzije
30. Gradijentni svjetlovodi (profil indeksa loma, osnovna ideja konstrukcije, broj modova, varijacija grupne brzine, disperzija u gradijentnom svjetlovodu)
31. Mjerne metode u svjetlovodnim komunikacijama – mjerjenje snage, greške i ograničenja kod mjerjenja snage
32. Mjerne metode u svjetlovodnim komunikacijama – OTDR, nadzor optičkih mreža
33. Mjerne metode u svjetlovodnim komunikacijama – mjerjenje kromatske i polarizacijske disperzije
34. Nelinearni efekti – Kerrov efekt (vlastita modulacija faze, križna modulacija faze, miješanje četiri vala).
35. Nelinearni efekti – Ramanovo i Brilloiunovo nelinearno raspršenje
36. Projektiranje optičke veze – princip narušavanja snage (primjer: kromatska disperzija), polarizacijska disperzija, parazitne optičke refleksije
37. Multipleksiranja signala - TDM i WDM pristup, načini sinkronizacije takta u TDM sustavima, TDM komunikacijski sustavi: PDH, SDH/SONET
38. WDM sustavi, svojstva DWDM i CWDM sustava, komponente za WDM sustave

Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija

- Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija su pojave na kojima se bazira rad lasera.
- Svjetlost ima korpuskularnu (čestičnu) prirodu tj. svjetlosna zraka se sastoji od paketa svjetlosnih kvanata ili fotona od kojih svaki ima energiju

$$E = h \cdot \nu ,$$

gdje je h Planckova konstanta ($h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$), a ν je frekvencija zračenja.

- Gornja jednadžba je općenita, tj. ne vrijedi samo za svjetlosne frekvencije, već i općenito za elektromagnetsko zračenje.

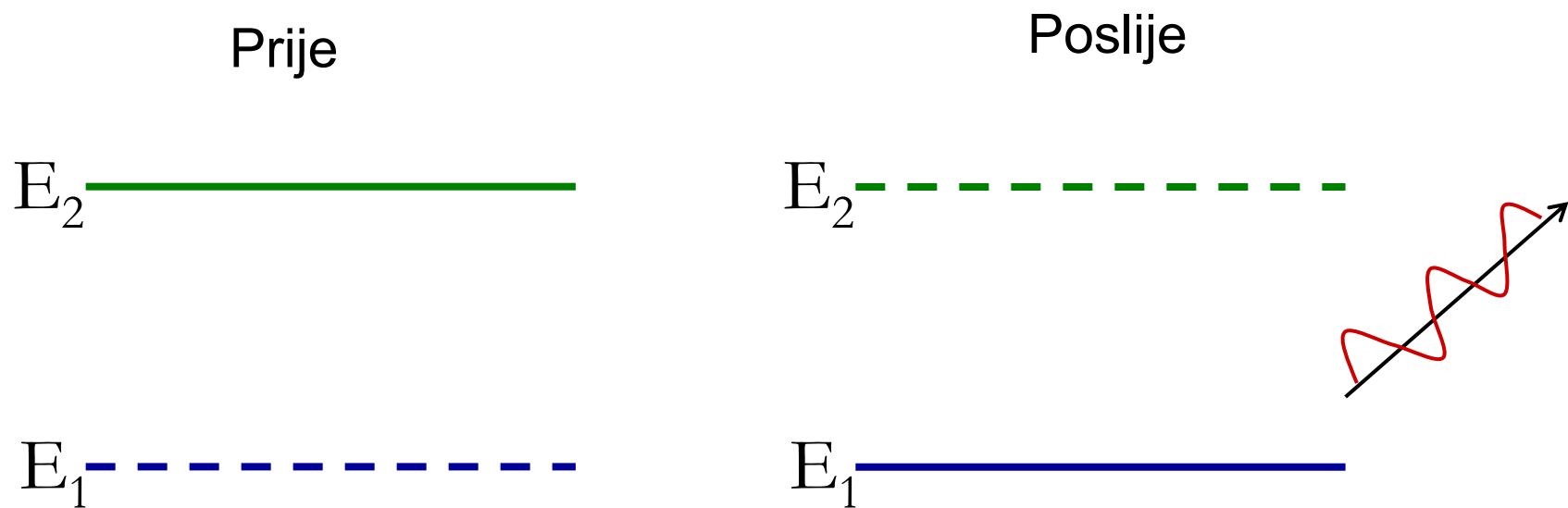
Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija

- U atomima (također i u molekulama, u poluvodiču...) postoje **diskretni energetski nivoi** koje prezentiramo pomoću energetskih dijagrama



Spontana emisija

Spontana emisija je, kao što već i samo ime kaže, kada atom spontano priđe iz stanja E_2 (stanje veće energije) u stanje E_1 (stanje manje energije) te pri tome emitira foton



Spontana emisija (2)

Frekvencija emitiranja je:

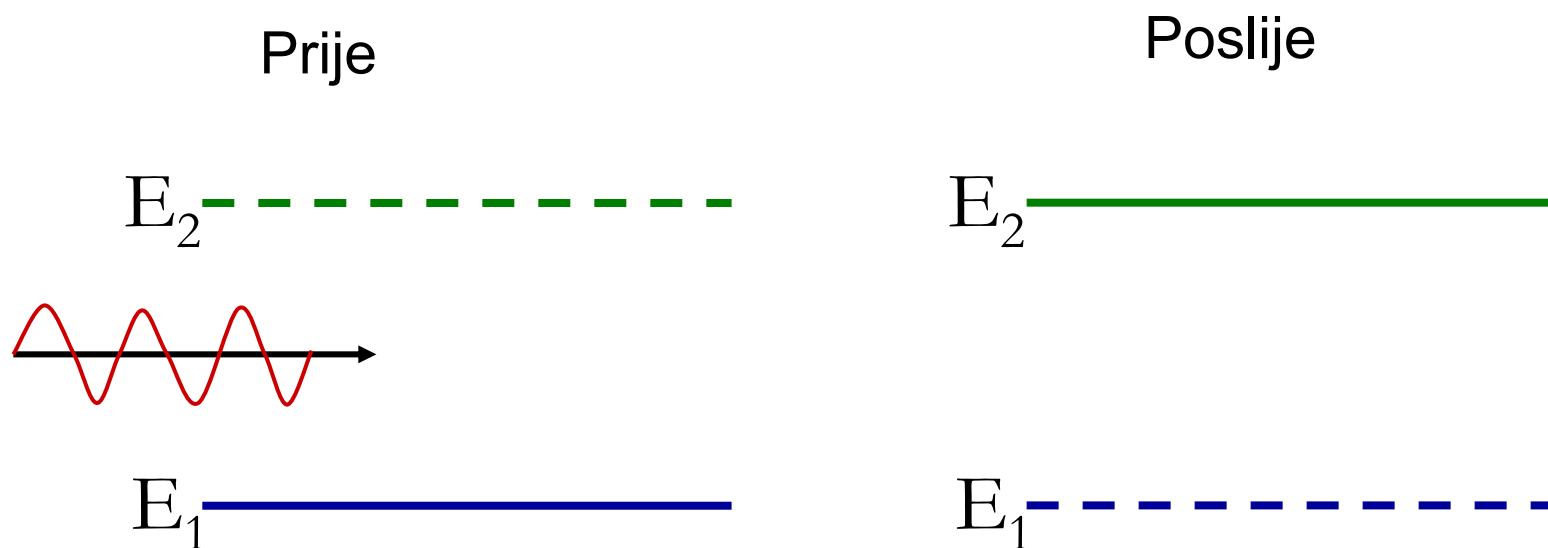
$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Uočiti

- val se može emitirati u bilo kojem smjeru
- val može imati bilo koju polarizaciju
- veća razlika između nivoa → veća frekvencija (od radio valova do rendgenskog frekvencijskog područja).

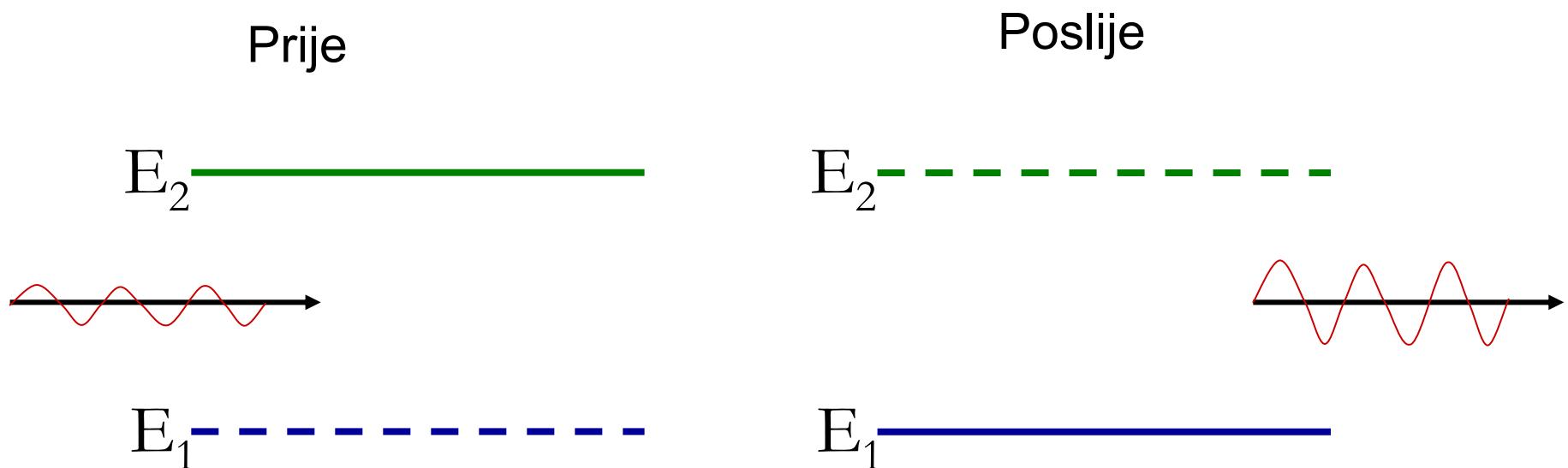
Apsorpcija

Atom apsorbira foton iz ulazne zrake i stoga prelazi u više energetsko stanje



Stimulirana emisija

Reverzni proces u odnosu na apsorpciju. Atom daje energiju $h\nu$ koja se koherentno zbraja s upadnim elektromagnetskim valom te ga pojačava



Stimulirana emisija (2)

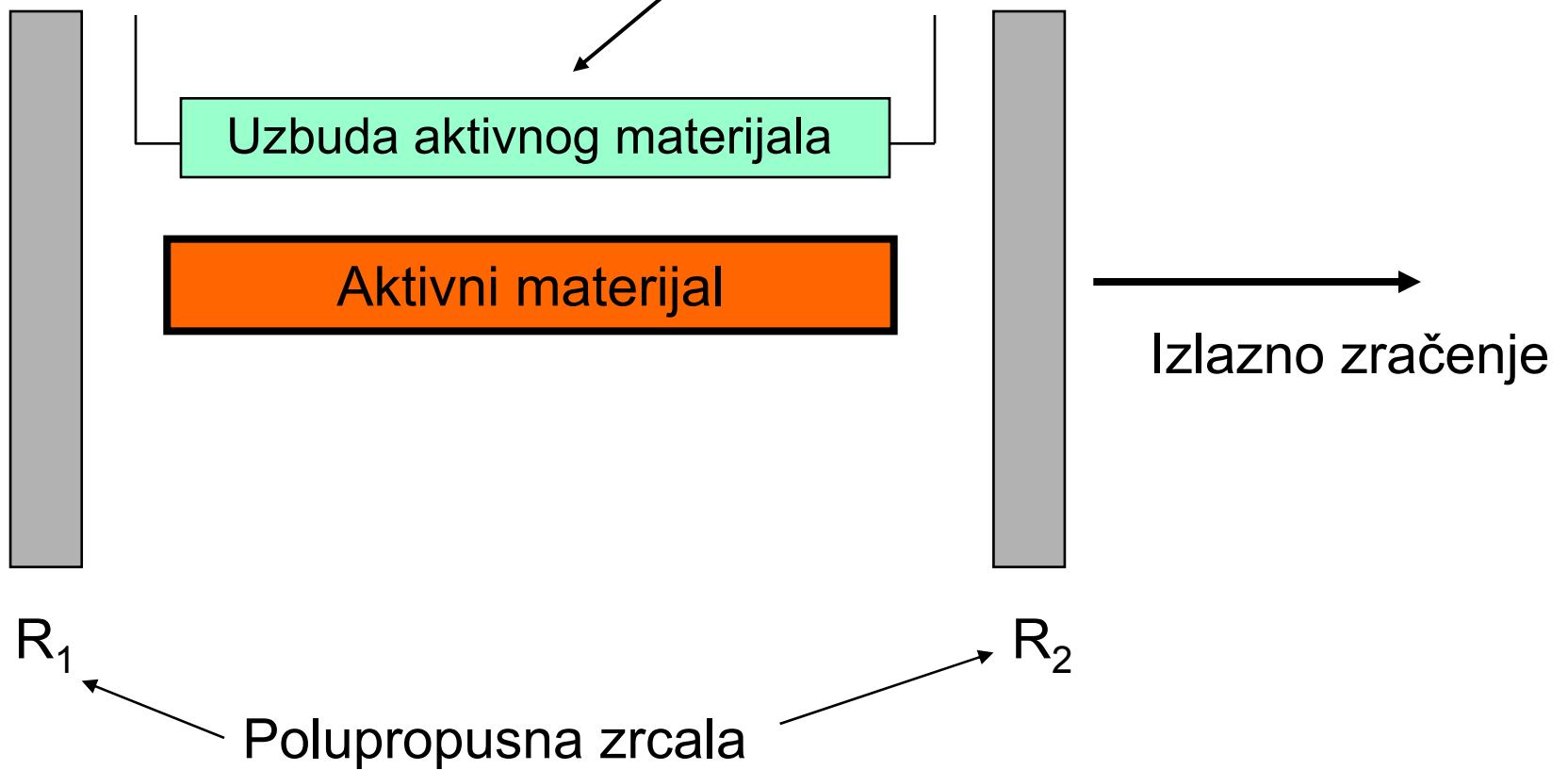
Što to znači koherentno zbrajanje?

1. na istoj frekvenciji kao i stimulacijski val
2. iste polarizacije kao i stimulacijski val
3. isti smjer putovanja kao i stimulacijski val
4. ista faza kao i stimulacijski val

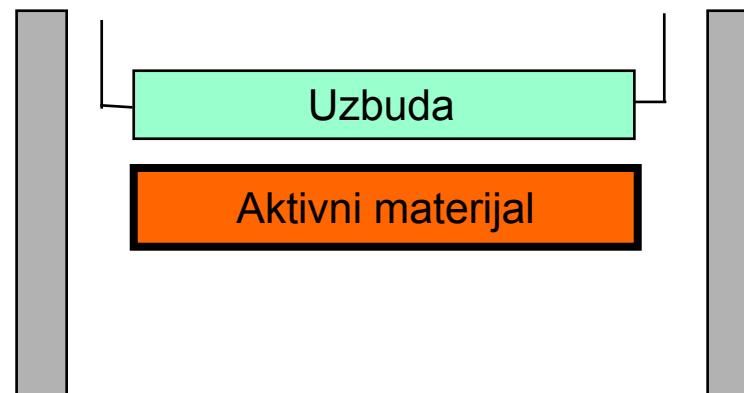
Izgleda "magično". Možemo zamisliti kao inverznu pojavu apsorpcije (apsorpcija je nešto što je "za očekivati" da se događa u prirodi). Napomenimo da ovo nije istina, došlo bi do različitih apsurda kao npr. kršenja većine termodinamičkih zakona.

Izgled lasera

Napomena: Način uzbude ovisi o tipu lasera
(elektronska uzbuda, bljeskalica, kemijska uzbuda, ...)



Laser (2)

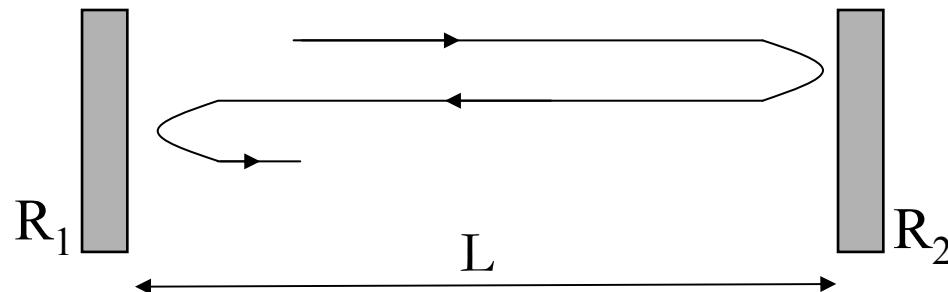


- Laser možemo promatrati kao oscilator. Povratna veza je *rezonantna šupljina*.
- Osnovni model rezonatora – Fabry-Perot-ov rezonator (rezonator s dva paralelna zrcala).
- *Rezonator* – oklopljena elektromagnetska struktura sa sposobnošću pohranjivanja elektromagnetske energije.



⇒ Postoje diskretne konfiguracije polja za koje je to moguće (tzv. modovi) – uvjet konstruktivne interferencije.

Laser (3)



Označimo sa

L – duljina aktivnog materijala

R_1, R_2 – refleksivnosti zrcala

(refleksivnost R – odnosi se na intenzitet,

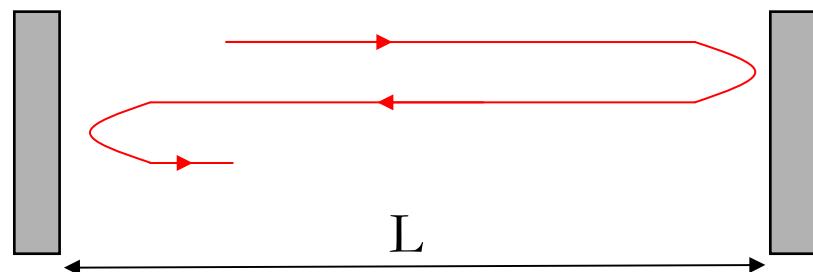
faktor refleksije Γ – odnosi se na električno polje E ,
 $R = |\Gamma|^2$)

γ - pojačanje po jedinici duljine

I – intenzitet elektromagnetskog vala

Laser (4)

Za kontinuirano osciliranje mora dobitak na dvostrukom putu biti veći od gubitaka.

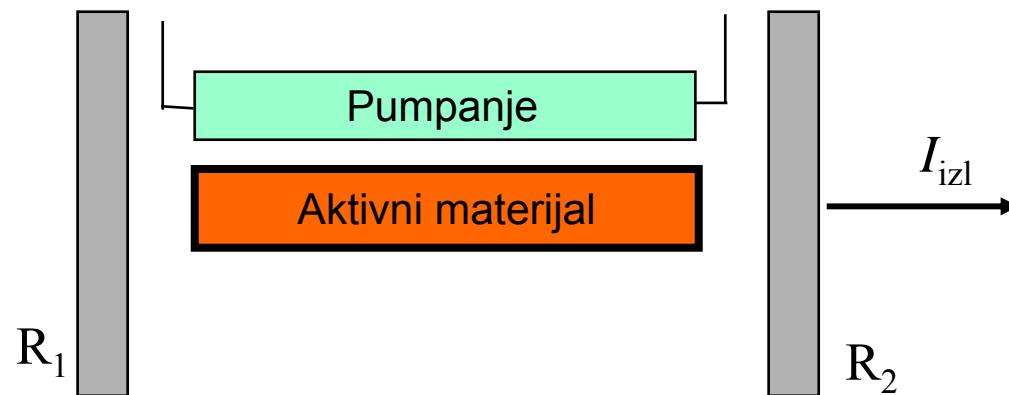


Matematički zapis minimalnog potrebnog pojačanja po jedinici duljine γ

$$I e^{2\gamma L} R_1 R_2 \geq I$$
$$\rightarrow e^{2\gamma L} \leq \frac{1}{R_1 R_2} \rightarrow \gamma \geq \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

Uvjet postojanja laserskih oscilacija

Laser (5)



Gubitke u rezonantnoj šupljini, odnosno prag laserskih oscilacija označiti ćemo s α :

$$\alpha = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

Izlazni intenzitet zračenja je:



$$I_{izl} = I(1 - R_2)$$

Laserske diode

Prednosti laserskih dioda u odnosu na LED:

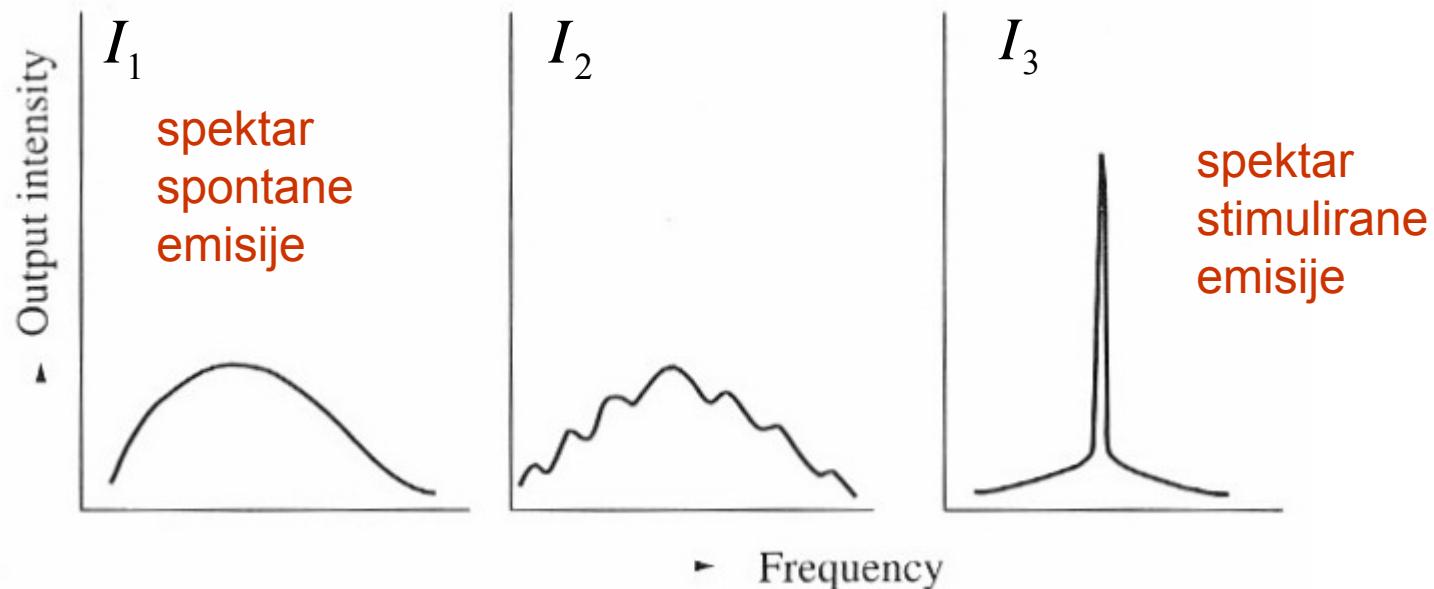
- Velika izlazna snaga (tipično 10 mW, neke izvedbe i više)
- Visok stupanj koherencije (uski spektar emitiranog signala)
- Iznimno širok modulacijski spektar (do ~ 30 GHz)
- Visoka djelotvornost η (do 50%).

Nedostaci laserskih dioda u odnosu na LED:

- P-I karakteristika više nije linearna
- Velika temperaturna osjetljivost
- Visoka potrebna tehnologija (heterostruktura, rezonator, Braggova periodička struktura, ...)
⇒ relativno visoka cijena.

Spektralna ovisnost emitirane svjetlosti

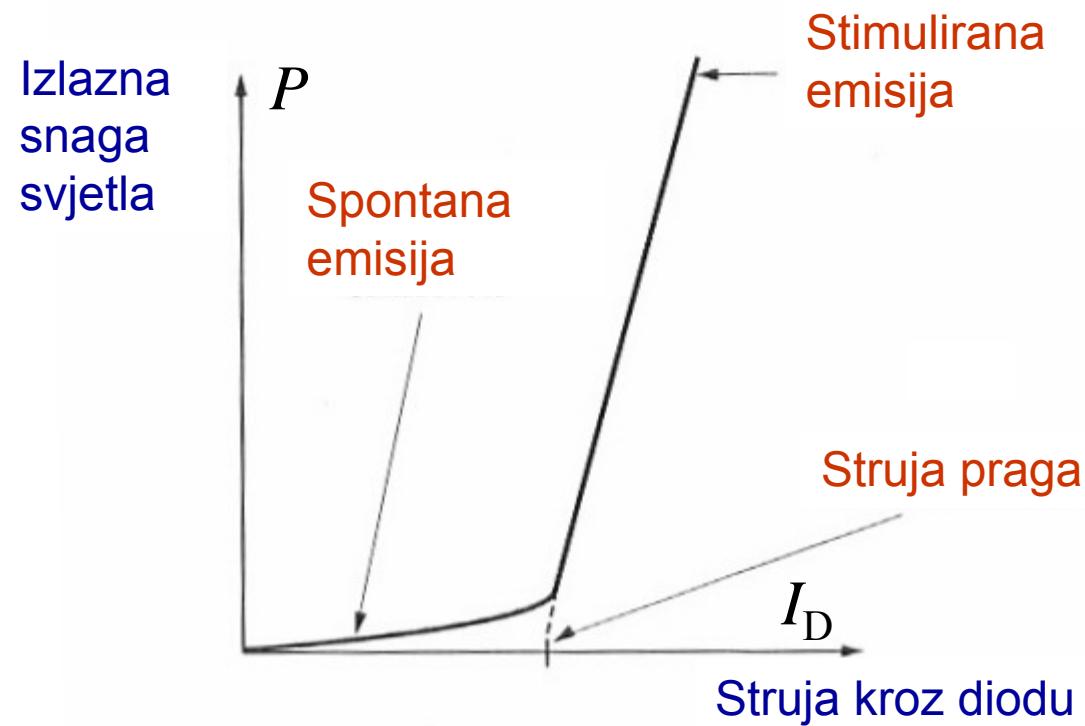
Povećavanjem struje kroz propusno polariziranu lasersku diodu, bitno se mijenja spektar emitiranog optičkog signala:



$$I_1 < I_2 < I_3$$

P-I karakteristika

Povećavanjem struje kroz propusno polariziranu lasersku diodu, bitno se mijenja izražena optička snaga:



Vanjska diferencijalna kvantna djelotvornost

- Nutarnja kvantna djelotvornost definirana je na sličan način kao kod LED-a:

$$\eta_i = \frac{\text{Srednji broj fotona}}{\text{Srednji broj injektiranih nosioca}}$$

- Tok fotona i generirana optička snaga jednaki su

$$\Phi = \eta_i \frac{i_d - i_{\text{prag}}}{e}$$

$$P_0 = h\nu \cdot \Phi = \eta_i h\nu \frac{i_d - i_{\text{prag}}}{e}$$

- Vanjska kvantna djelotvornost uzima u obzir gubitke – neće svi generirani fotoni biti emitirani (refleksija na polupropusnom zrcalu i reapsorpcija):



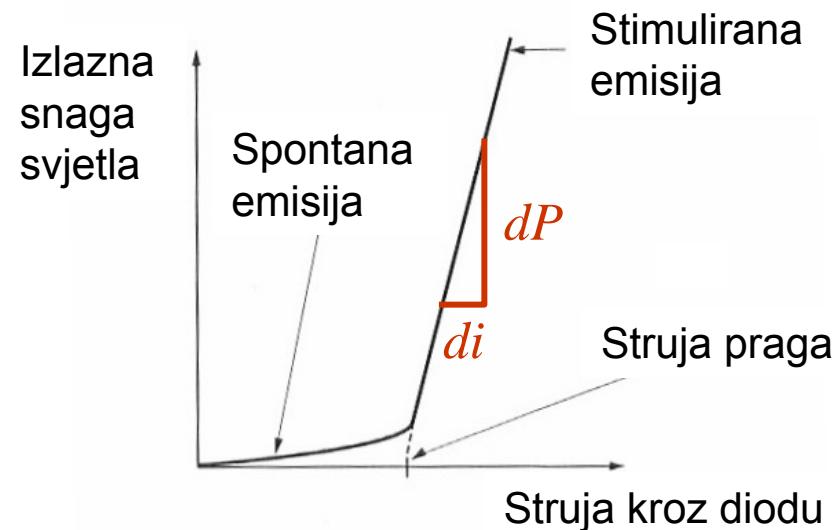
$$\eta_{ex} = \eta_e \cdot \eta_i$$

Vanjska diferencijalna kvantna djelotvornost

- Vanjska kvantna djelotvornost je zapravo vanjska **diferencijalna** kvantna djelotvornost:
 - dobivamo je deriviranjem jednadžbe za izračenu optičku snagu:

$$\frac{dP}{di} = \eta_{ex} \frac{h\nu}{e}$$

$$\Rightarrow \eta_{ex} = \frac{e}{h\nu} \frac{dP}{di}$$



Vanjska diferencijalna kvantna djelotvornost

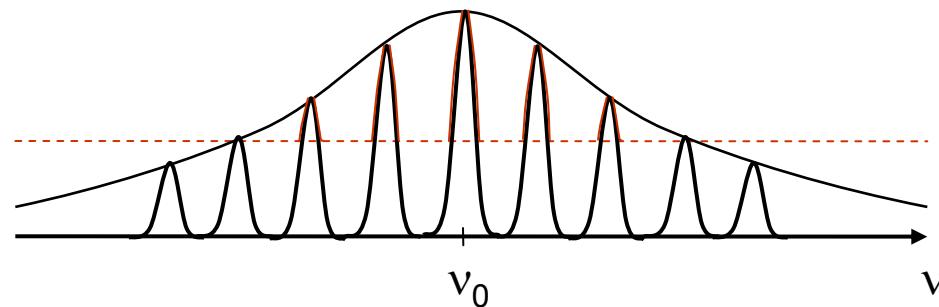
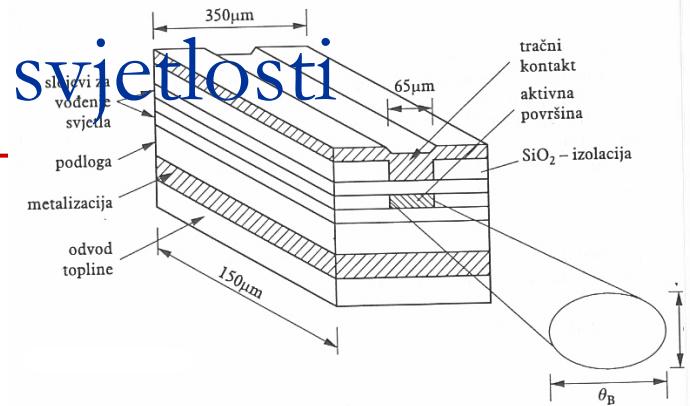
- Analogno kao i kod LED diode možemo pisati

$$P = \eta_{ex} (i_d - i_{\text{prag}}) \frac{h\nu}{e}$$

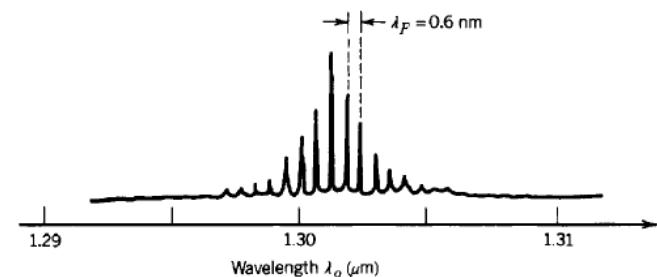
- Tipično: $\eta_i = 60 - 70 \%$
 $\eta_{ex} = 50 - 30 \%$
- Uočiti: djelotvornost pretvorbe električne u optičku snagu nije η_{ex} (zbog postojanja struje praga). Za slučaj kada je $I \gg I_{\text{prag}}$ ta djelotvornost je otprilike η_{ex} .

Spektralna ovisnost emitirane svjetlosti

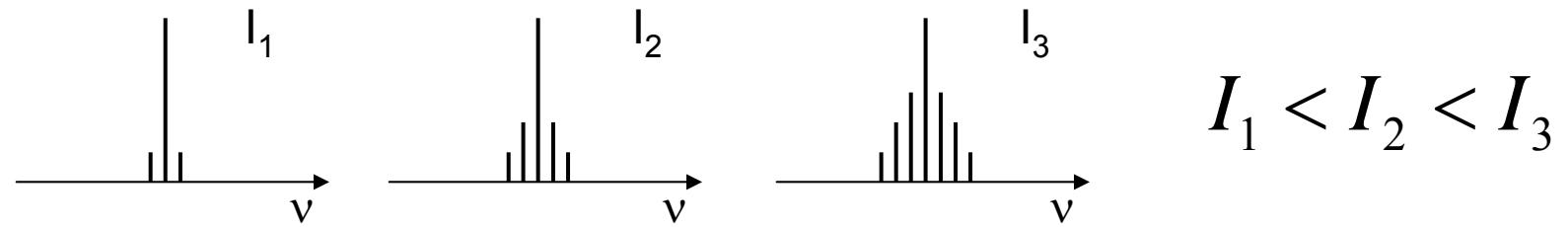
- Spektar emitiranog signala
(višemodna Fabry-Perot laserska dioda)



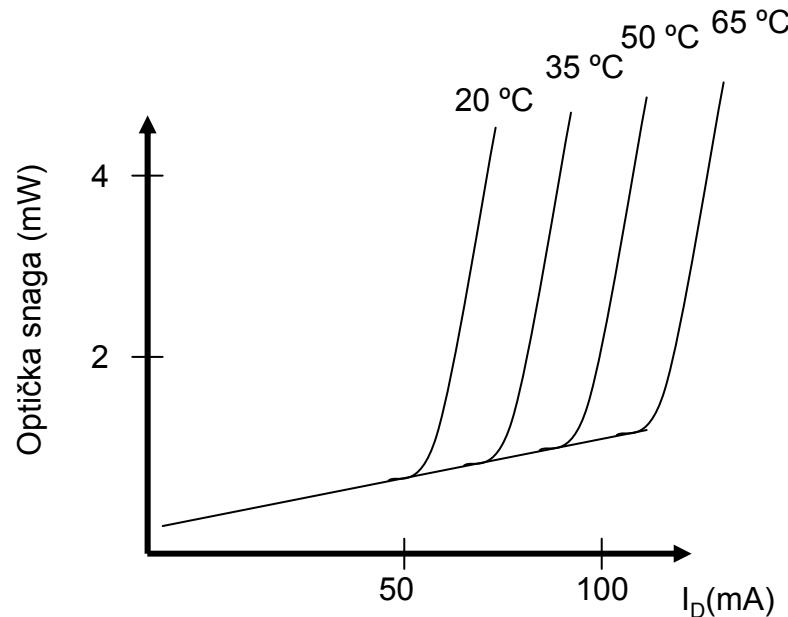
Izmjerena karakteristika



- Ovisnost broja modova o struji kroz diodu (odnosno ovisnost o izlaznoj optičkoj snazi)



Laserske diode – temperaturni utjecaj



Za tipičnu lasersku diodu (višemodnu Fabry-Perot lasersku diodu) struja praga raste s faktorom 1,4 između 20 °C i 60 °C

⇒ nužno je potrebno podesiti predstruju za konstantnu izračenu optičku snagu

Laserske diode – temperaturni utjecaj

- Prag laserske emisije I_{prag} raste s temperaturom (različiti su razlozi)
- Empirijski izraz:

$$I_{\text{prag}}(T) = I_z e^{T/T_0}$$

I_z - konstanta

T_0 - mjera relativne temperaturne neosjetljivosti

- za Fabry-Perot trakastu lasersku diodu, rubni emiter
tipično $T_0 = 120 \text{ }^\circ\text{C} - 160 \text{ }^\circ\text{C}$ (za $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Primjeri:

$$T_0 = 135 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_{\text{pr}} = 52 \text{ mA}$$

$$\frac{\Delta I_{\text{prag}}}{T} = 0,8 \frac{\%}{\text{ }^\circ\text{C}}$$

trakasta
laserska dioda
(rubni emiter LD)

$$T_0 = 437 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta I_{\text{prag}}}{T} = 0,23 \frac{\%}{\text{ }^\circ\text{C}}$$

GaAlAs laser s
kvantnom
jamom



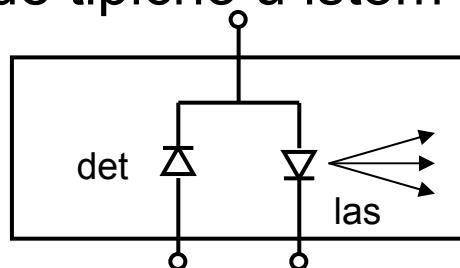
Laserske diode – temperaturni utjecaj

Regulacija konstantne izračene optičke snage:

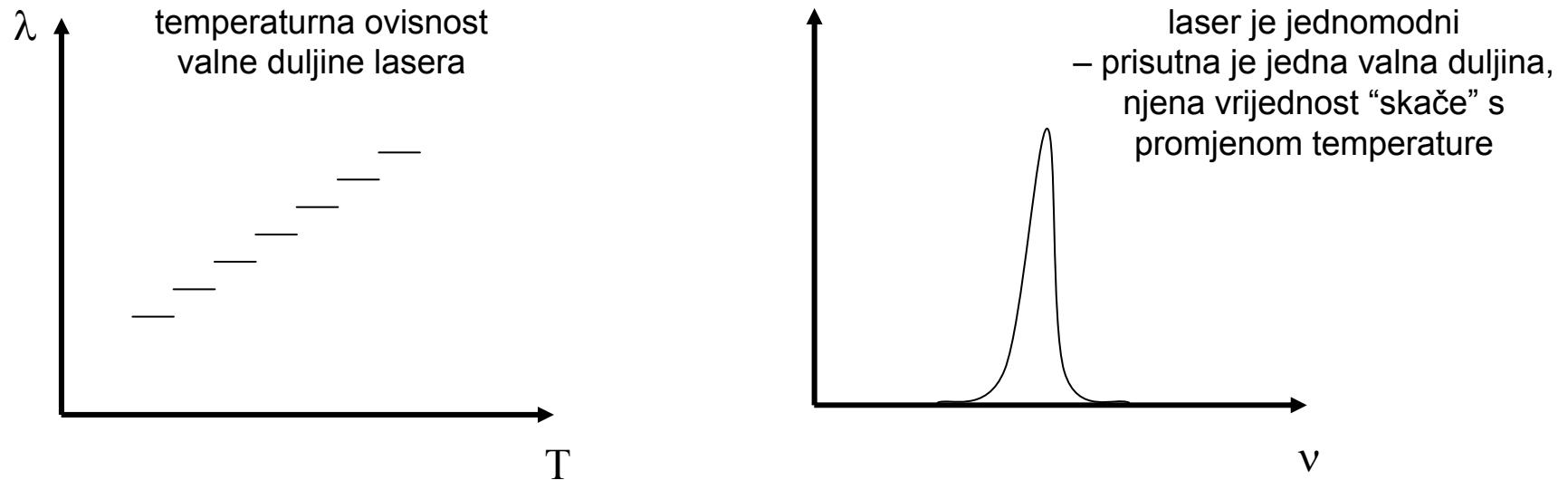
- optičkom povratnom vezom
 - dio optičke snage se odvoji iz prednjeg čela diode (prije ulaska npr. u svjetlovod), ili sa stražnjeg čela diode
 - dio snage iz stražnjeg čela se prati fotodetektorm
- temperaturno prilagodljivim sklopovima za prepoznavanje praga

Drugi razlog podešavanja predstavlja – izbjegavamo razaranje laserske diode zbog prevelike optičke snage u laserskoj šupljini ("vrlo skupe LED diode").

Laserske diode tipično u istom kućištu imaju i detektorsku diodu:



Jednomodni laseri -temperaturni utjecaj

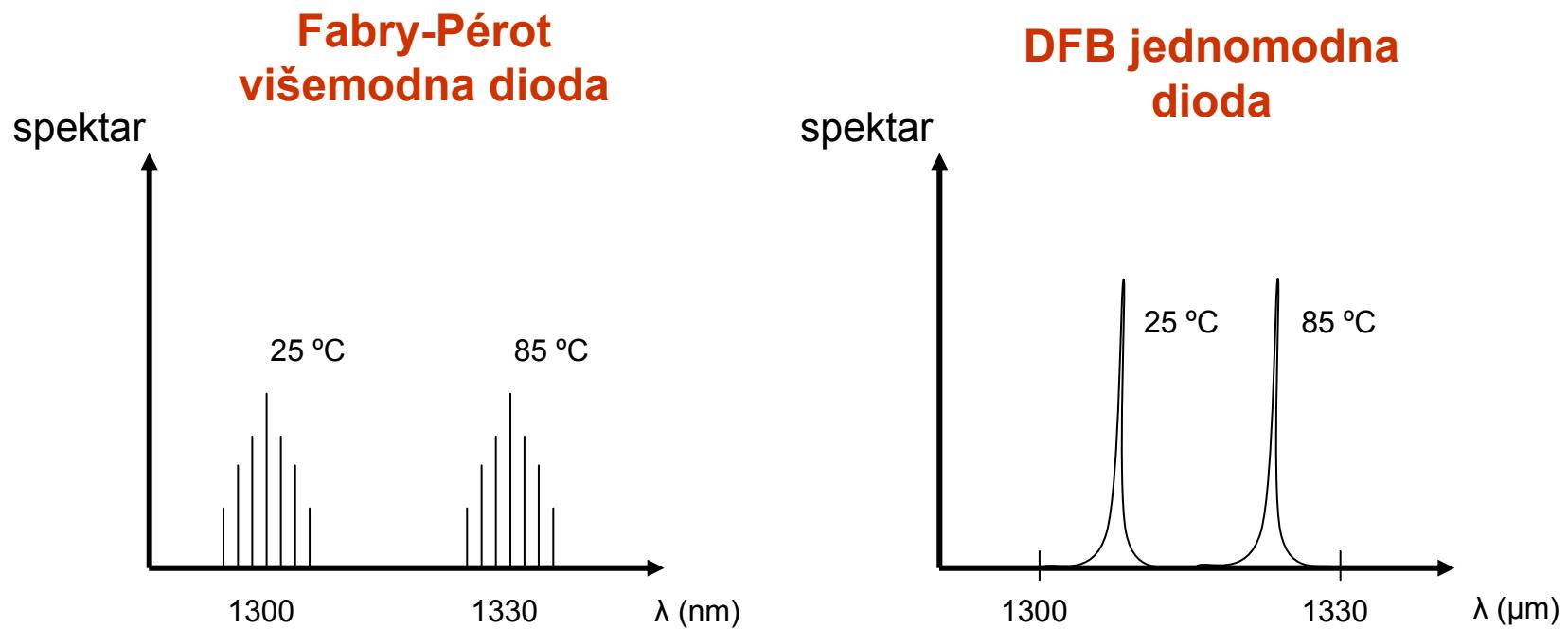


Slika prikazuje valnu duljinu jednomodnih lasera kao funkciju temperature (bitno kod DWDM sustava da valna duljina ne "pobjegne" u drugi komunikacijski kanal!)

Tipičan razmak između valnih duljina kod DWDM sustava iznosi 0.8 nm ili 0.4 nm.

Laserske diode – temperaturni utjecaj

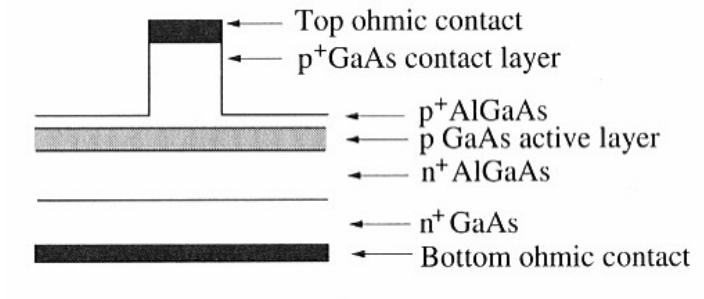
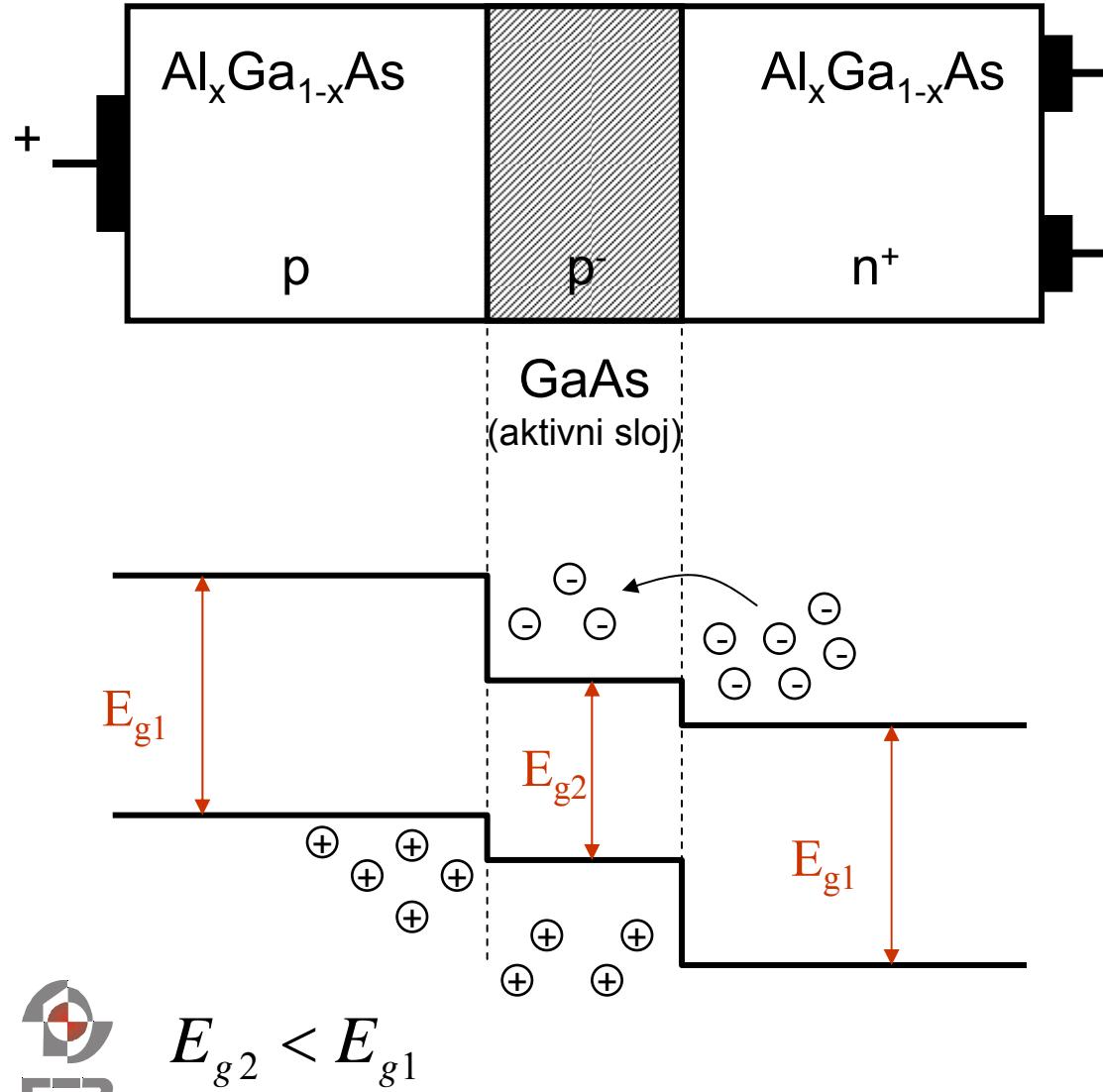
Usporedba temperaturne ovisnosti jednomodne i višemodne laserske diode.



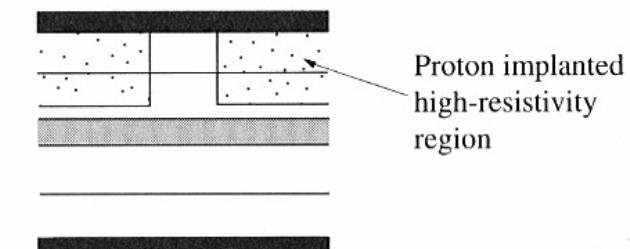
Laserske diode – heterostrukture

- Laserske diode se u pravilu izvode koristeći heterostrukture:
 - Kod homostrukture aktivno područje (debljine d) nije jasno određeno.
 - Širina optičkog moda isto nije jasno određena – gubici u optičkoj strukturi uslijed reapsorpcije su veliki.
 - Maksimum pojačanja γ_{\max} obrnuto proporcionalno ovisi o debljini aktivnog sloja
⇒ laserske diode izvedene od homostrukture ne mogu raditi kao izvor kontinuiranog optičkog signala (CW način rada) na sobnoj temperaturi!

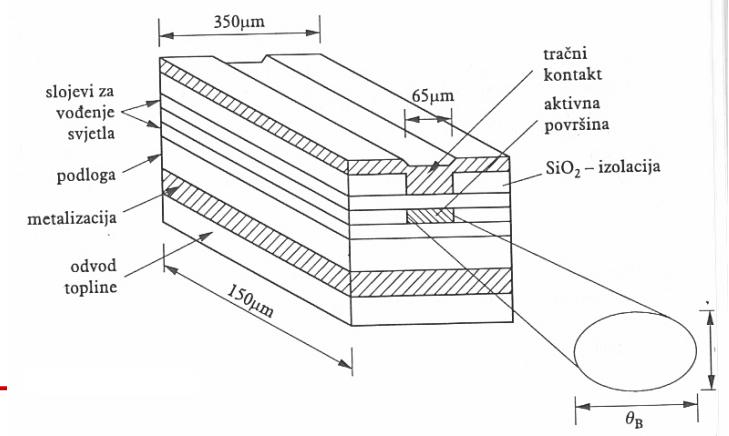
Laserske diode – heterostrukture



(a)



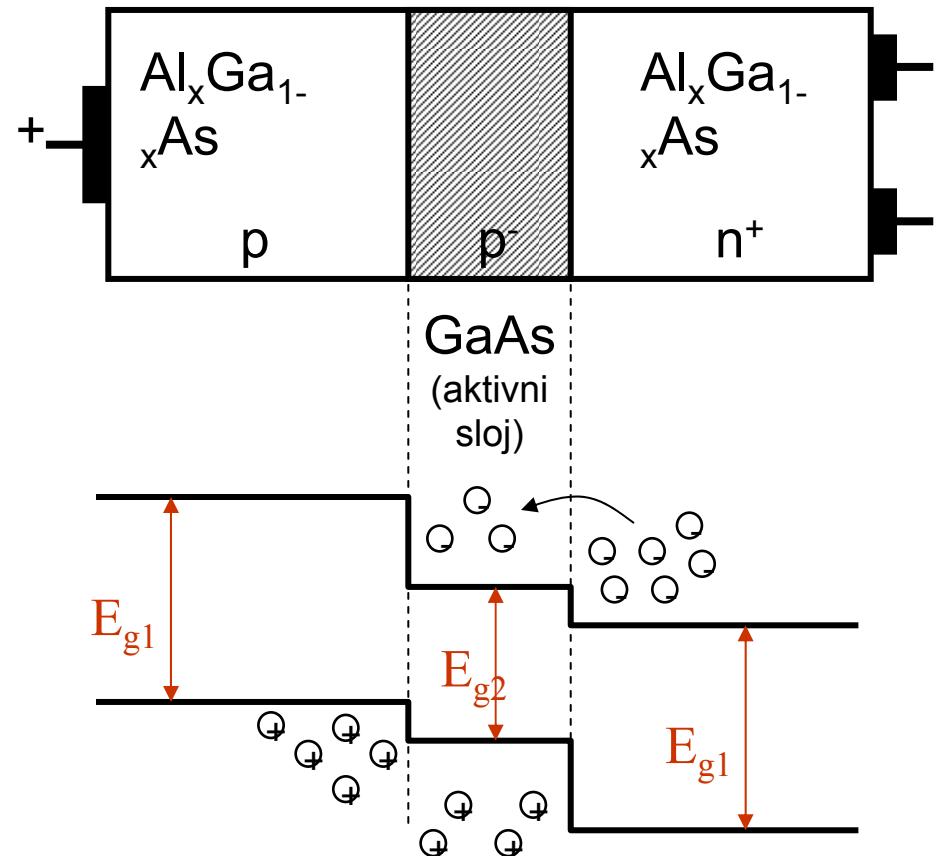
(b)



Laserske diode – heterostrukture

Prednosti heterostrukture:

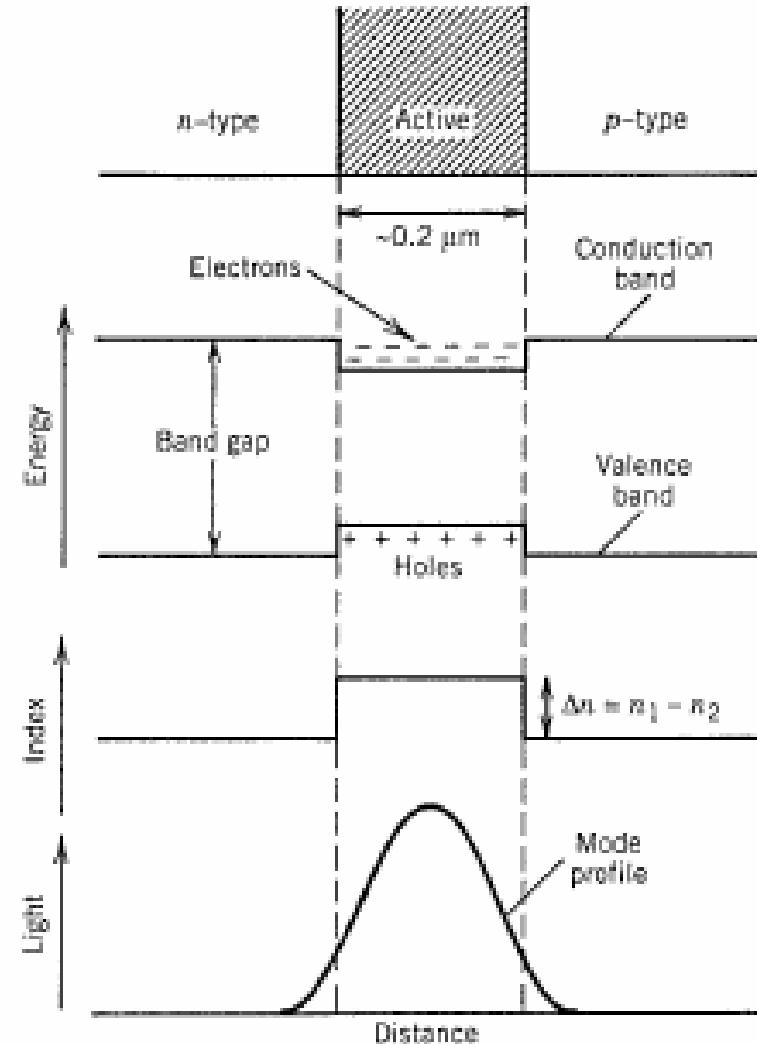
- (a) debljina sloja u koji su injektirani elektroni "dobro" je definirana aktivnim srednjim slojem.
- (b) budući da je energetski procjep E_g veći u prvom i trećem sloju, smanjena je reapsorpcija unutar materijala ($h\nu < E_g$). Drugim riječima, prvi i treći sloj su prozirni.
- (c) moguće je postići veće koncentracije nosioca (zbog razlike u vrijednosti E_g za pojedine slojeve).



Laserske diode – heterostrukture

Prednosti heterostrukture:

- (d) razlika u indeksu loma (indeks loma u srednjem sloju je veći u odnosu na susjedne slojeve) omogućuje formiranje planarnog svjetlovoda – svjetlost je “zarobljena” unutar aktivnog sloja.



Valna dužina emitirane svjetlosti

Primarno odredjena primjenom, ali često tehnologijom.

- Komunikacijski laseri
 - **1310 nm i 1550 nm** zbog malih gubitaka i niske disperzije u kvarcnom svjetlovodu (“optical fiber”) - InP,
 - **850 nm** diktirani materijalom – GaAs
 - **980 nm i 1480 nm** EDFA pumpe (diktirani primjenom) – GaAs, InP
- Štampači, CD/DVD laseri rade na 780 nm, 635 nm, i 405 nm (diktirani tehnologijom) – GaAs, GaN
- Senzori (npr. optički miš); valna dužina ovisi o primjeni
- Laserske pumpe (“Laser Diode Pump”). Naprimjer **808 nm** za svjetlosno pumpanje Nd:YAG lasera velike snage - GaAs
- **Valna dužina određuje poluvodič kojim se laser radi**

Vrste poluvodičkih lasera – podjela po rezonatoru

- Laser: rezonator + svjetlosno pojačalo
- Rezonator se radi poluvodičkom tehnologijom

■ **Rezonator u ravnini čipa**

- “in-plane” ili “edge-emitting laser”

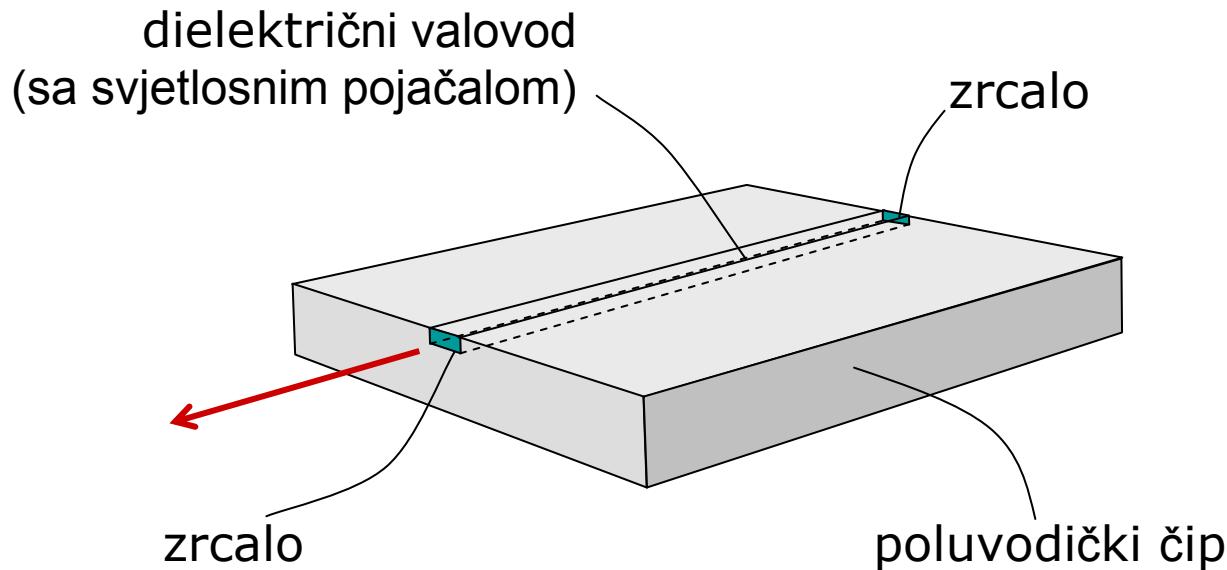
■ **Rezonator okomit na ravninu čipa**

- vertical-cavity surface-emitting laser / VCSEL

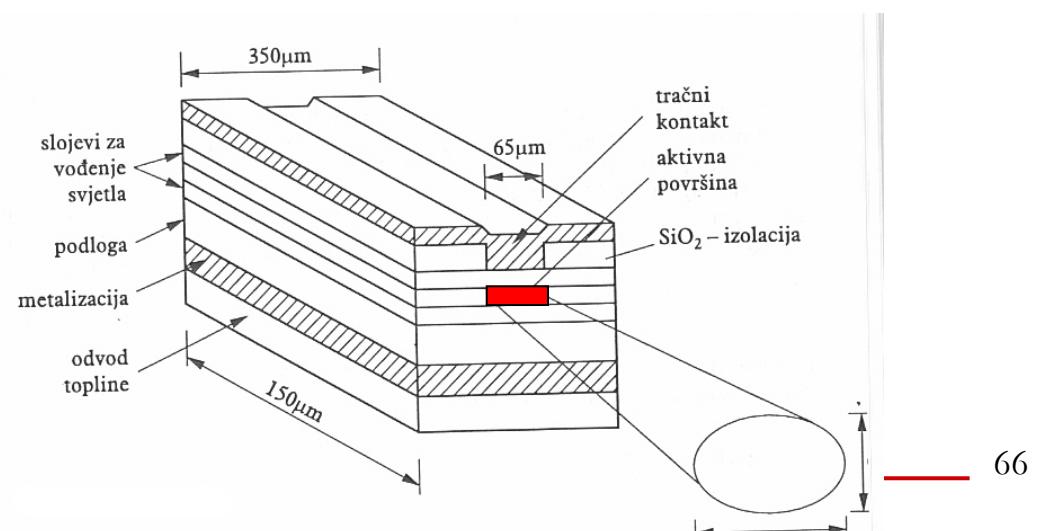
■ Exotični rezonatori

- npr. whispering gallery-mode laseri

Rezonator u ravnini čipa

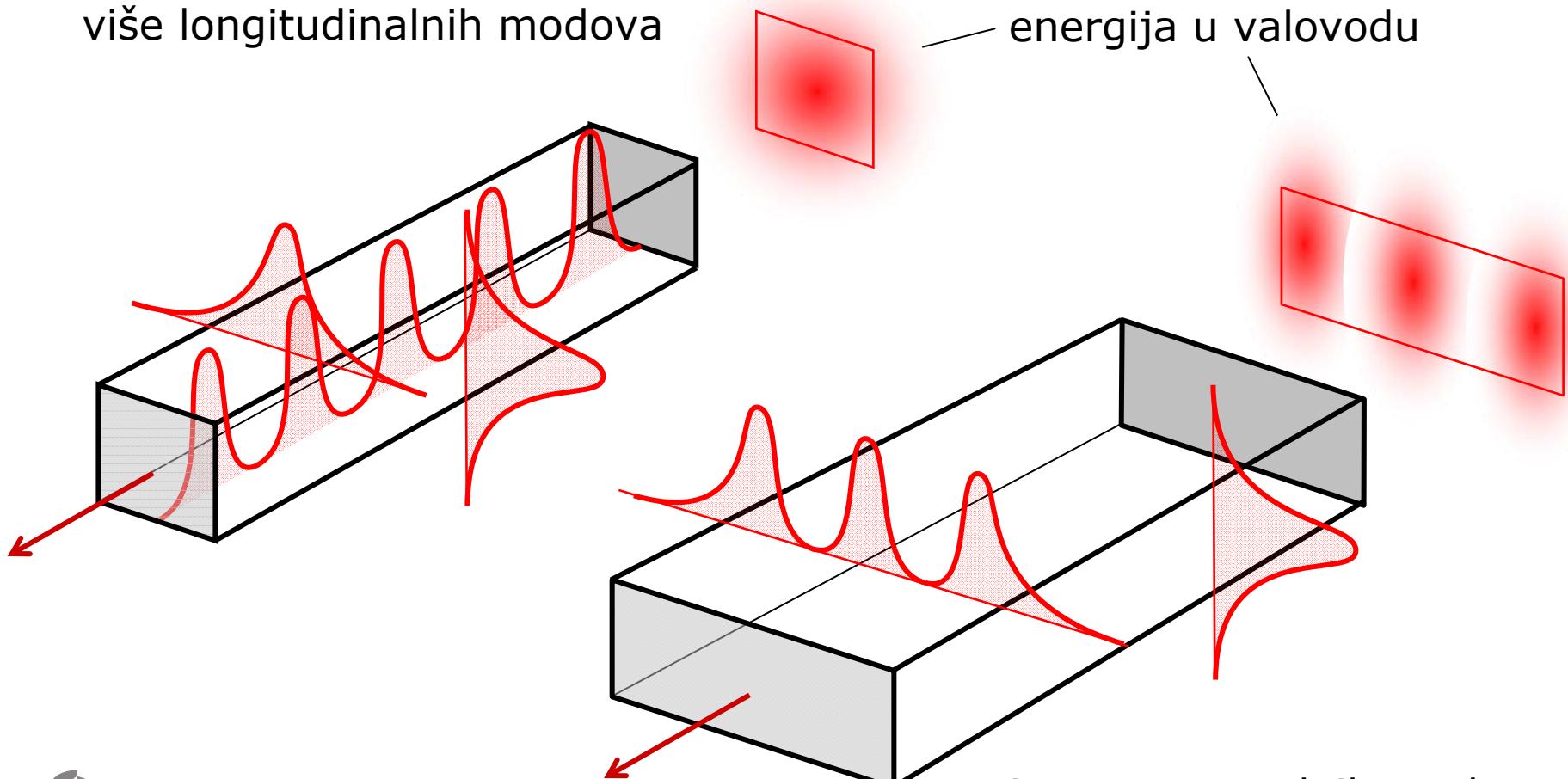


- Izgled laserske diode:
- Tzv. heterostruktura
 - različite vrste poluvodiča omogućavaju formiranje dielektričnog valovoda.



Valovod s zrcalima

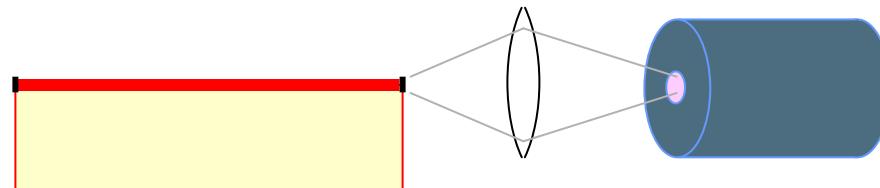
jedan transverzalni mod
više longitudinalnih modova



više transverzalnih modova
više longitudinalnih modova

Laseri s jednim transverzalnim modom

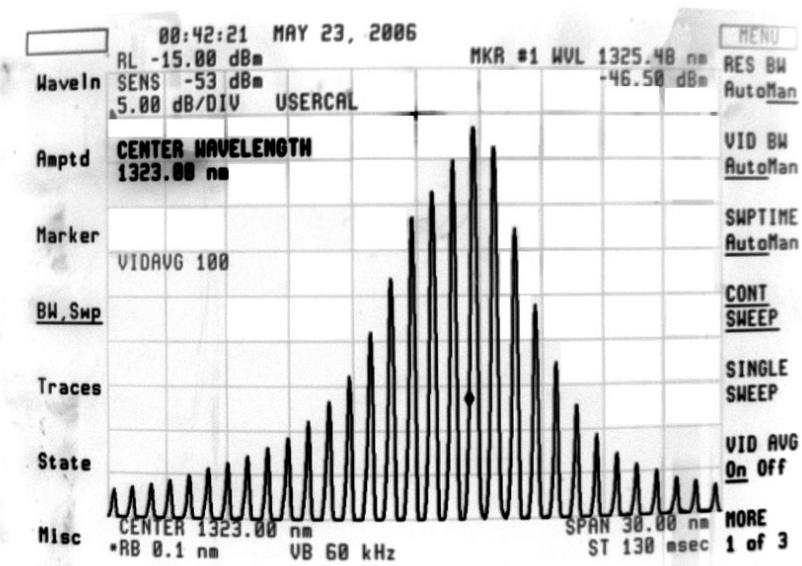
- **Jedan transverzalni mod** – koriste se kad je potrebno svjetlo fokusirati u malu tocku:
 - Komunikacije - svjetlosno vlakno (“optical fiber”)
 - CD ili DVD primjene.
 - Laserski štampači



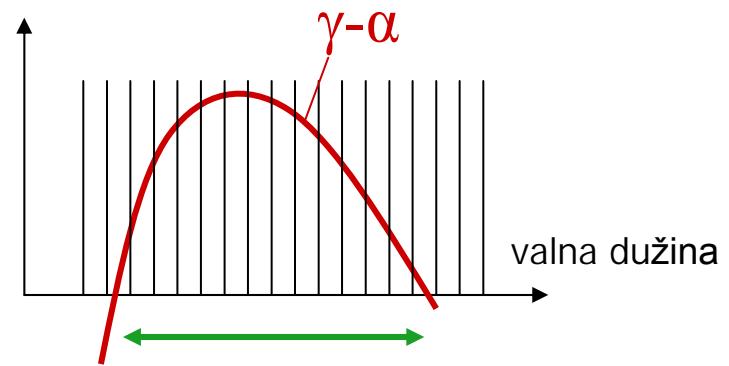
→ Fabry-Pérot laser

(ima vise longitudinalnih modova, ali nije problem za gornje primjene osim za svjetlosno vlakno ako je modulacija visoka > 1Gb/s)

Fabry-Pérot laser



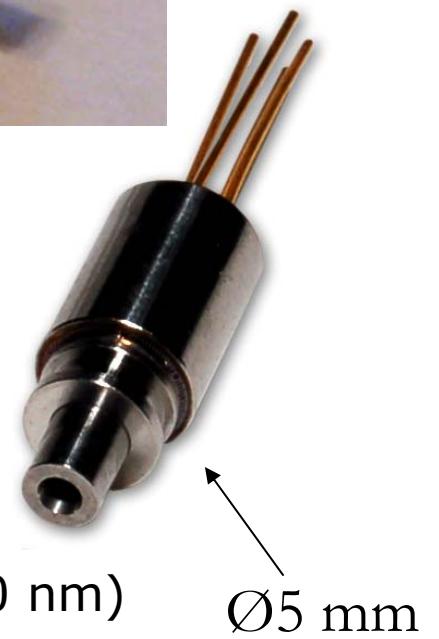
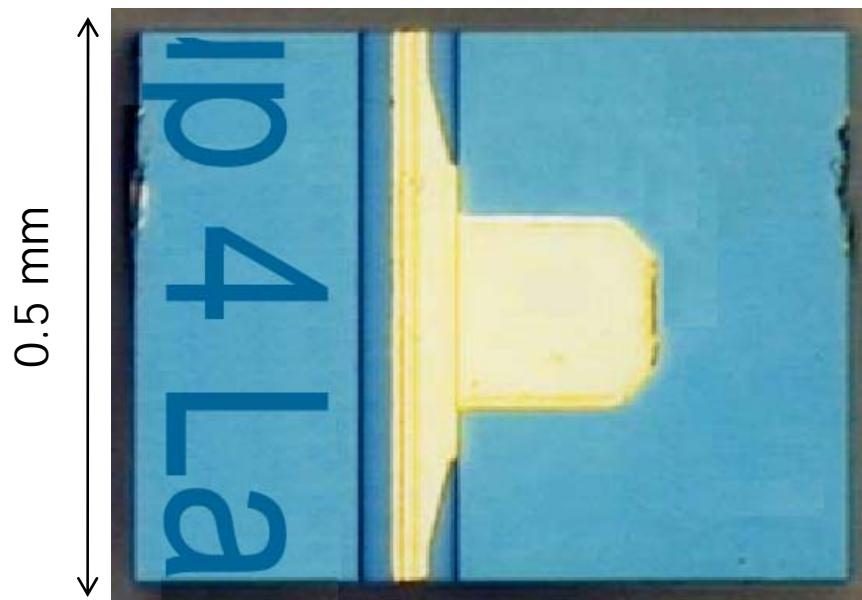
jedan transverzalni mod
više longitudinalnih modova



Područje gdje je pojačanje
veće od gubitaka

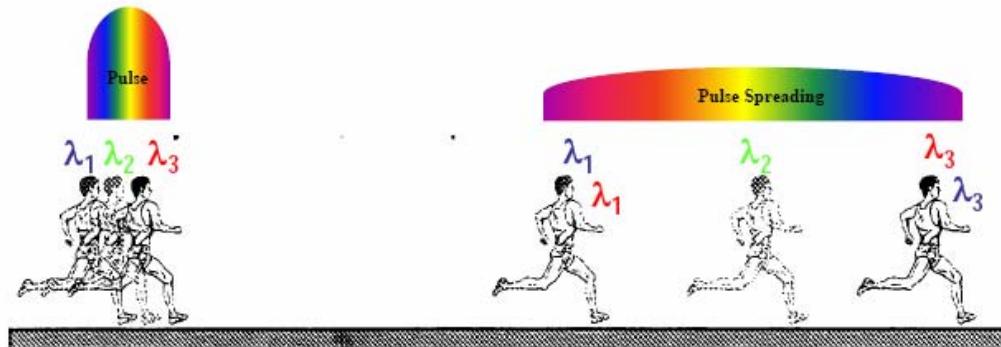
Fabry-Pérot laser

Laserska dioda za DVD (635 nm)



Laseri s jednim transverzalnim modom

- Svjetlosno vlakno ima ograničenje uslijed **disperzije**: rasipanje (proširenje) signala pri propagaciji.
- Disperzija ovisi o frekvenciji signala (valnoj duljini signala)

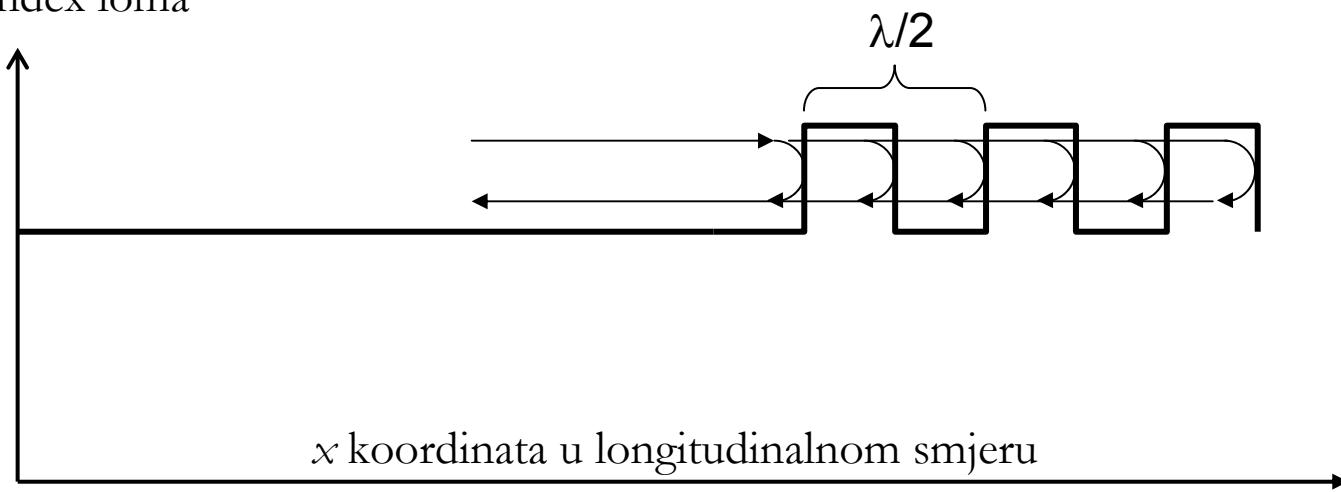


- Da bi se rasipanje signala minimiziralo, mora se koristiti **samo jedan mod** (jedan transverzalni i longitudinalni mod):
 - Za komunikacije preko $\sim 1\text{ km}$ i brzinama $> 2.5 \text{ Gb/s}$
 - Tipične udaljenosti i brzine danas: 10 Gb/s i $> 100 \text{ km}$

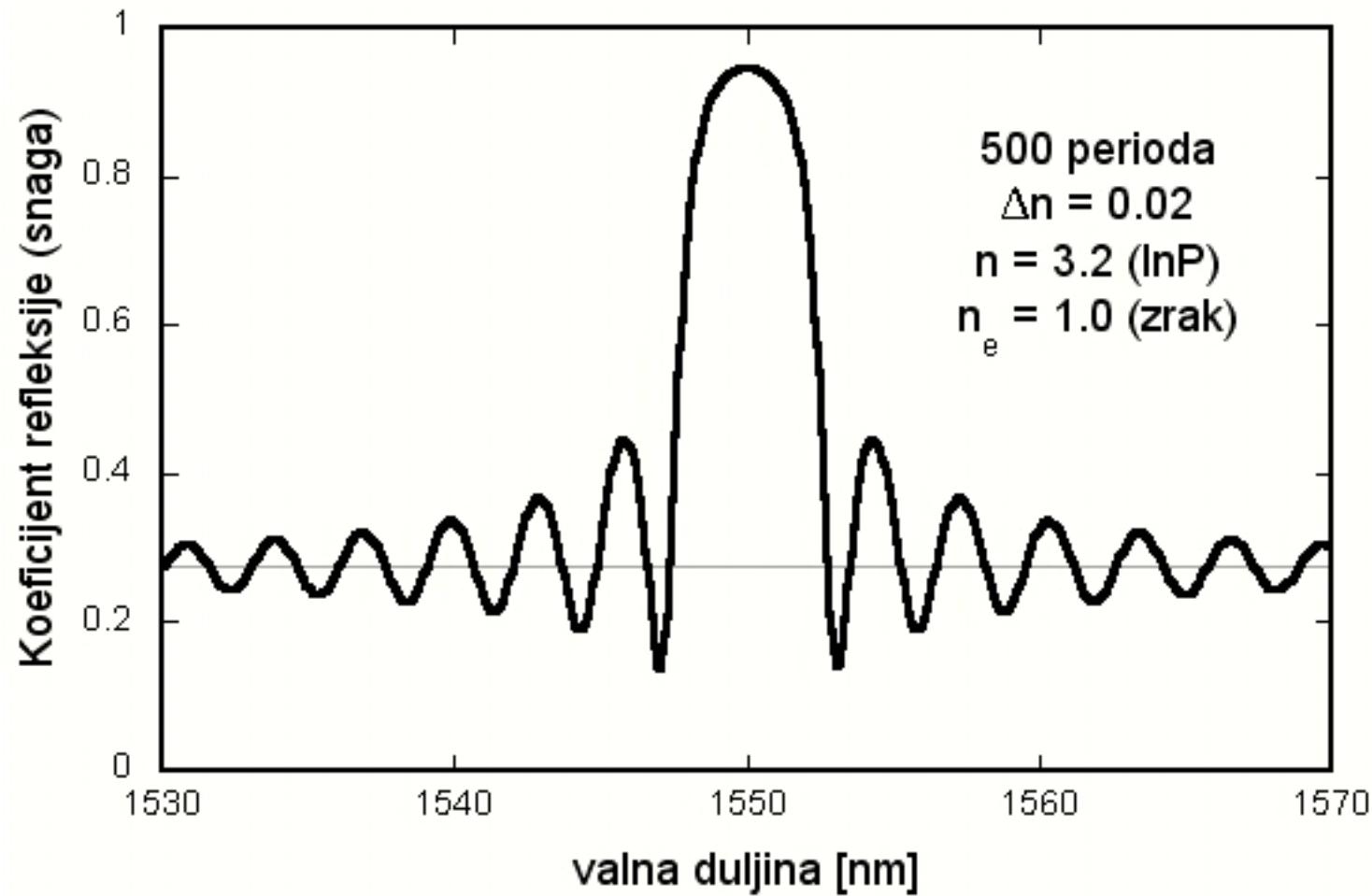
Laseri s jednim longitudinalnim modom

- Ravno zrcalo nema frekvencijske selektivnosti.
- Da se odabere jedan longitudinalni mod potrebno je zrcalo kojem se koeficijent refleksije (i njegova faza) mijenja u frekvenciji: periodično zrcalo (Distribuirano Braggovo Zrcalo).
- Distribuirano zrcalo ima periodu $\lambda/2$. Svi reflektirani valovi se zbrajaju u fazi (konstruktivnom interferencijom) i nastaje jaki reflektirani signal.

$n(x)$ index loma

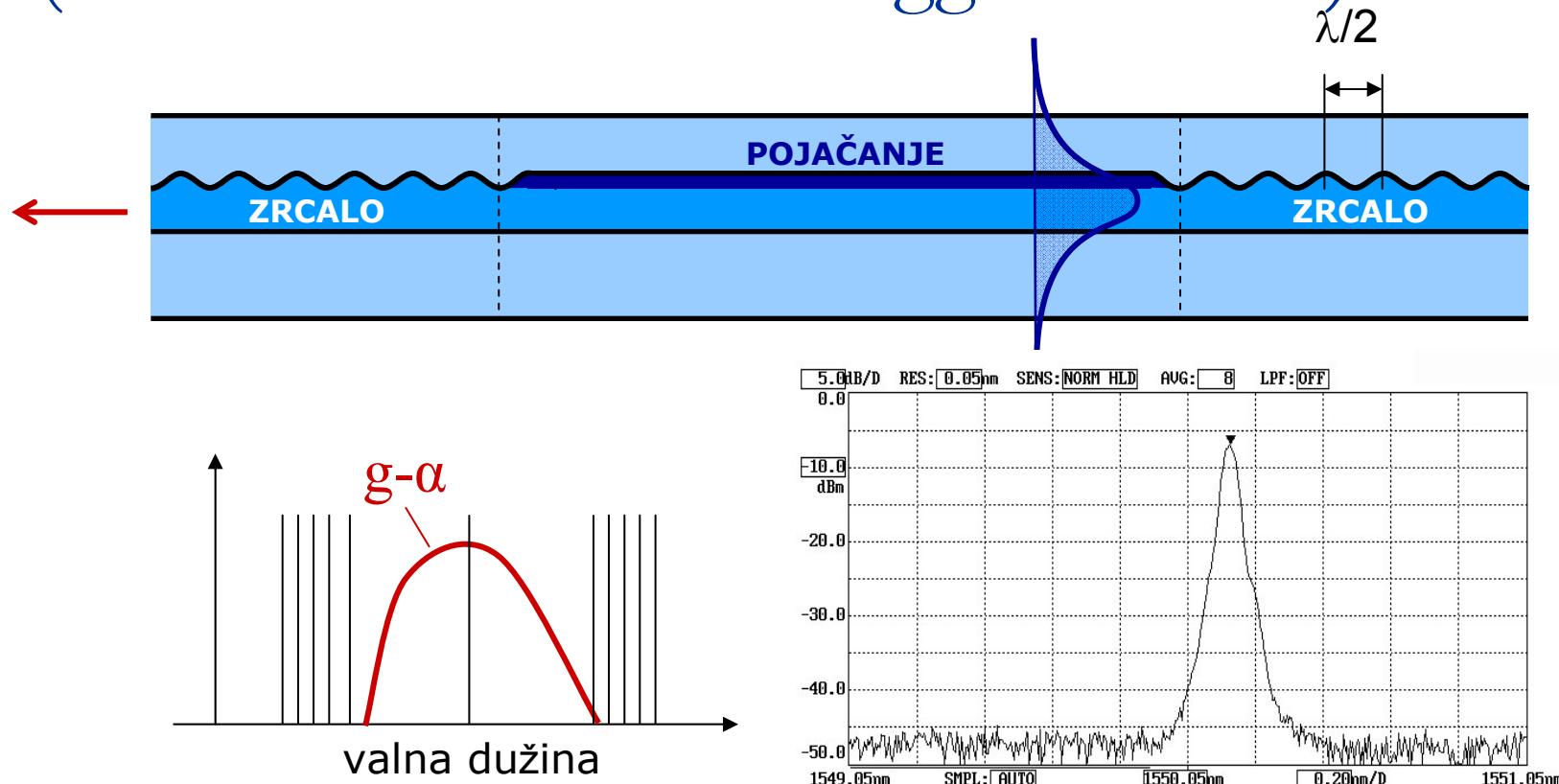


Distribuirano (Braggovo) zrcalo



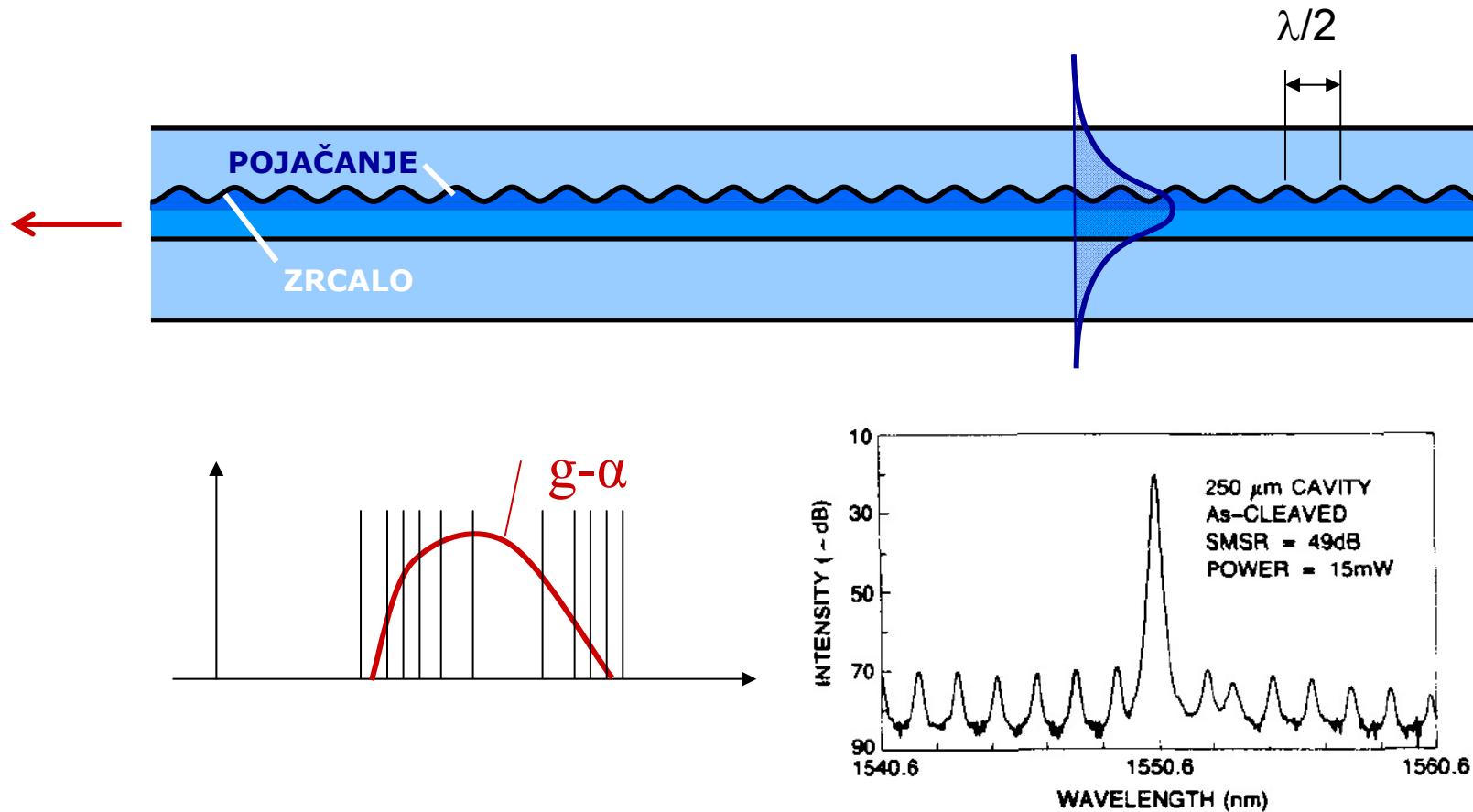
DBR laserska dioda

(DBR – Distributed Bragg Reflector)



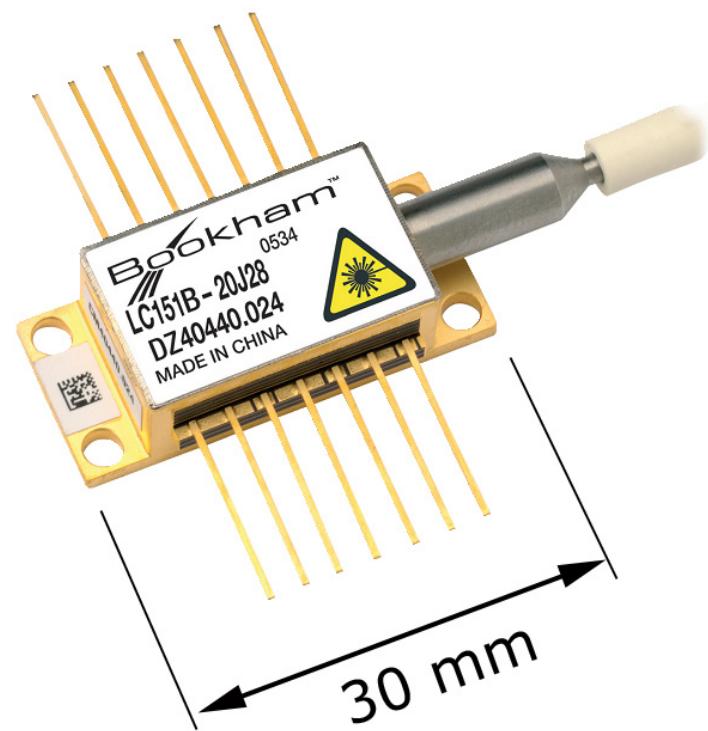
- Distribuirano Braggovo zrcalo selektira longitudinalni mod
- Zbog komplikirane tehnologije, cijena takve diode je dosta visoka.

“Distributed FeedBack” laser (DFB)

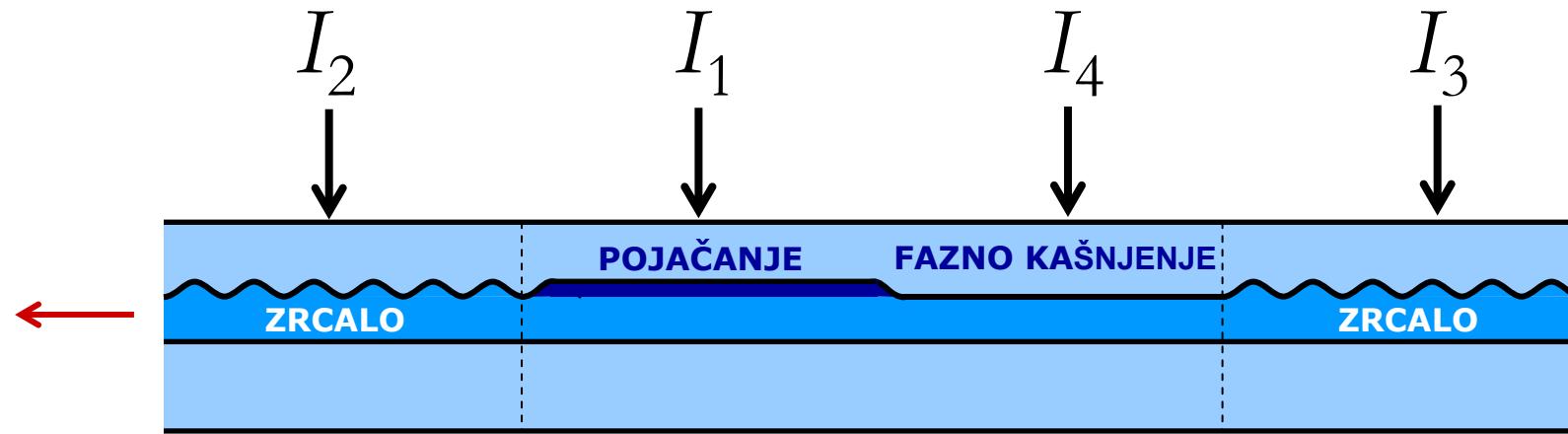


- Aktivni sloj je ujedno i jezgra planarnog svjetlovoda.
- Distribuirano zrcalo se često kombinira sa zrcalom na kraju čipa

DFB laser



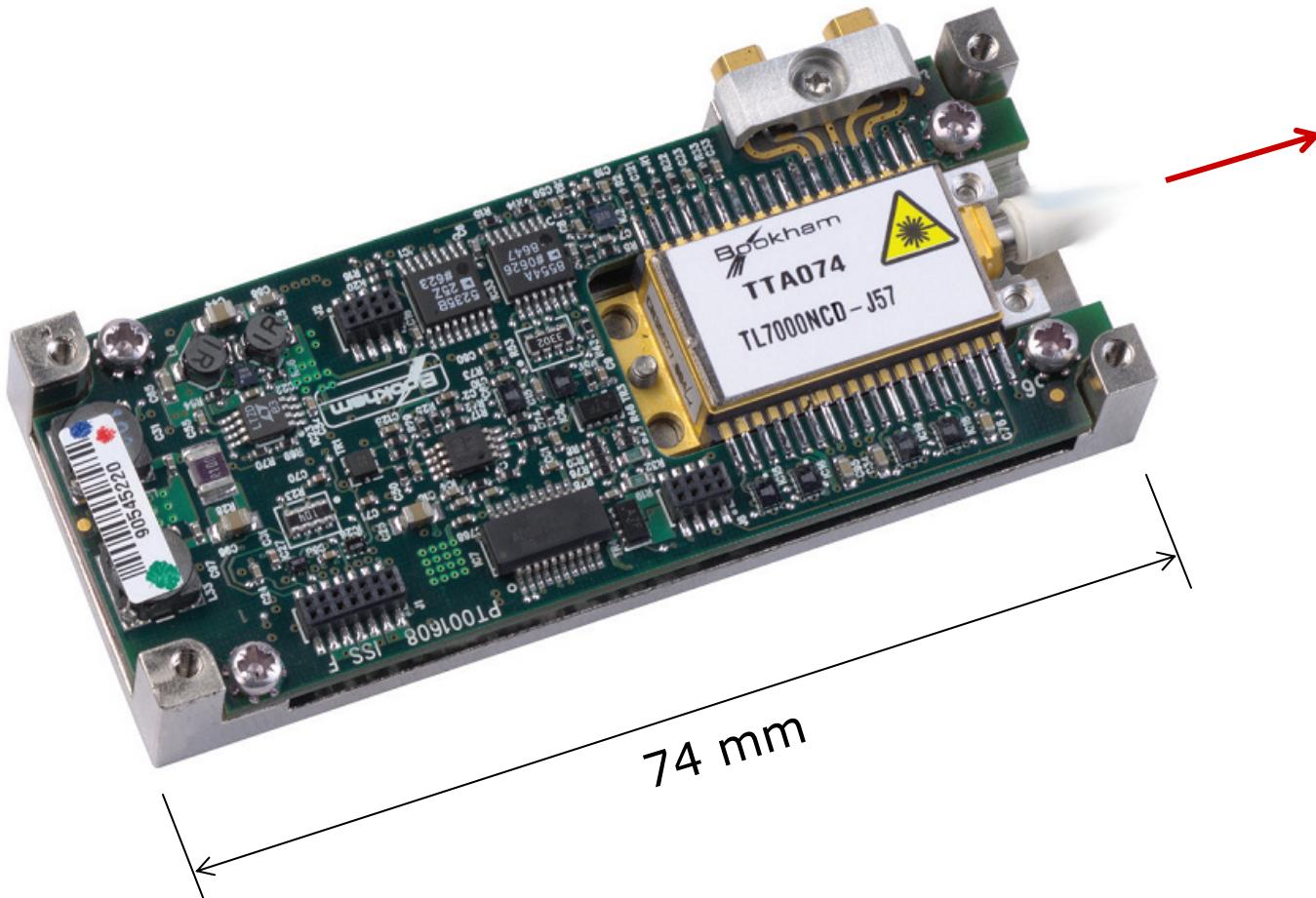
DBR laser sa ugodivom valnom duljinom



- I_1 = svjetlosno pojačanje (aktivni sloj)
- I_2, I_3 = rezonantna frekvencija zrcala, struja mijenja efektivni index loma
- I_4 = fazno kašnjenje za fino ugadjanje valne dužine
- kompliciran proces i kontrola, ali se danas komercijalno proizvode za komunikacije na velike udaljenosti.

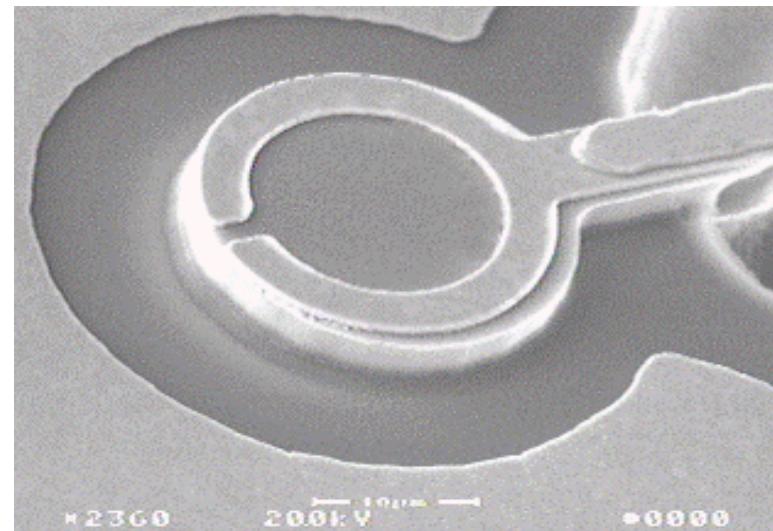
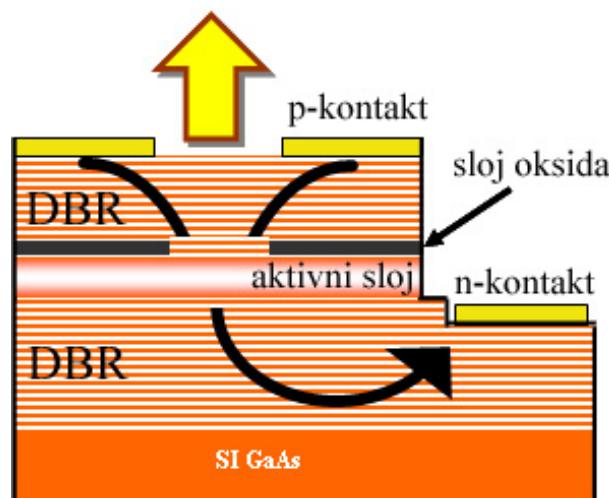
Ugodivi DBR laser

Ugodivi laser s vanjskim modulatorom:

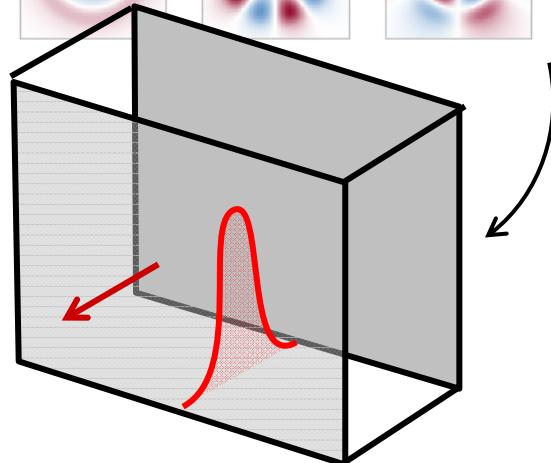
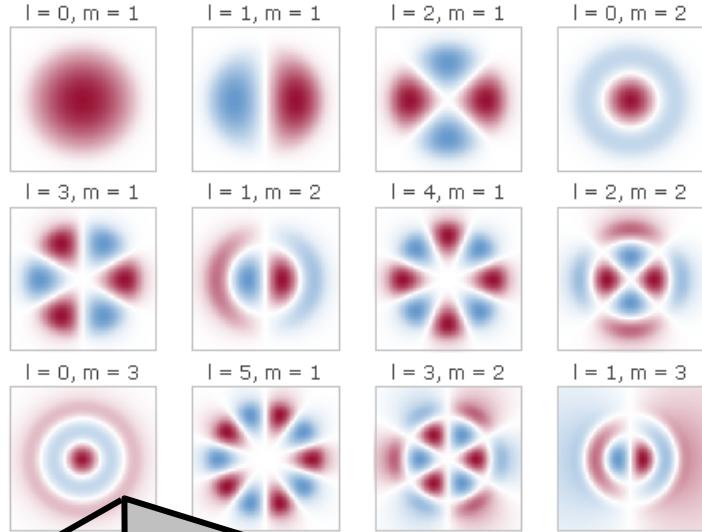


Laser s vertikalnim rezonatorom (VCSEL)

- VCSEL = Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
- Motivacija razvoja: napraviti lasersku diodu čiji je proizvodni process sukladan s uobičajnim planarnim proizvodnim procesu (npr. light-emitting diode), i time dobiti vrlo jeftinu lasersku diodu.

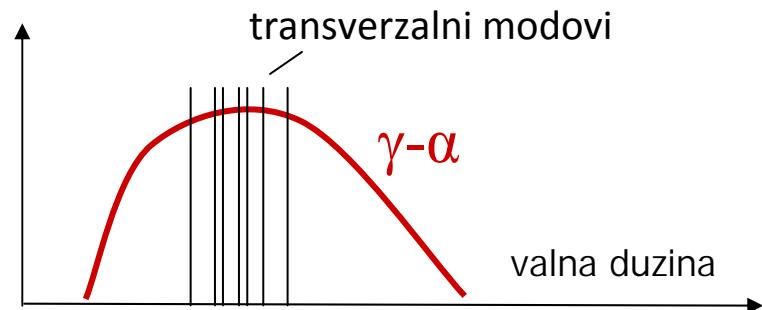


Laser s vertikalnim rezonatorom



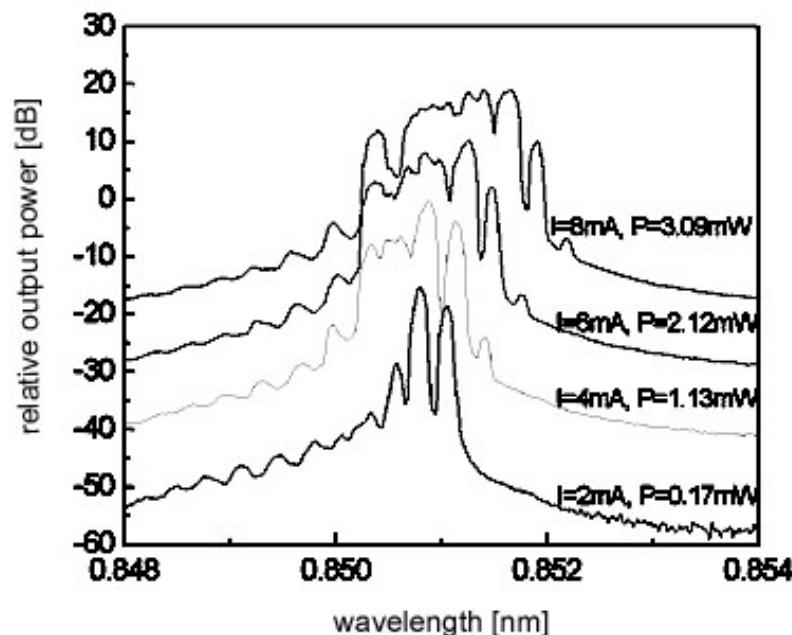
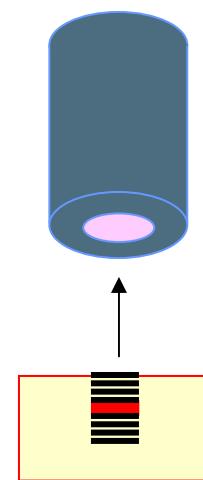
više transverzalnih modova
jedan longitudinalni mod

- rezonator je okomit na ravninu čipa
- jedan longitudinalni mod
- jedan ili vise transverzalnih modova
- pojaganje mnogo manje nego u laserima u ravnini cipa jer je duljina aktivnog sloja vrlo mala ($\sim 25 \text{ nm}$)
- zrcala moraju biti vrlo visokog koeficijena refleksije ($>99.5\%$)

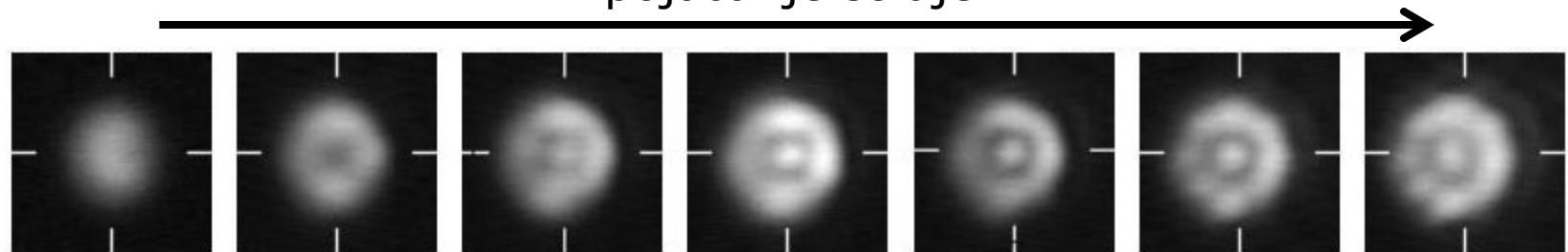


Laser s vertikalnim rezonatorom

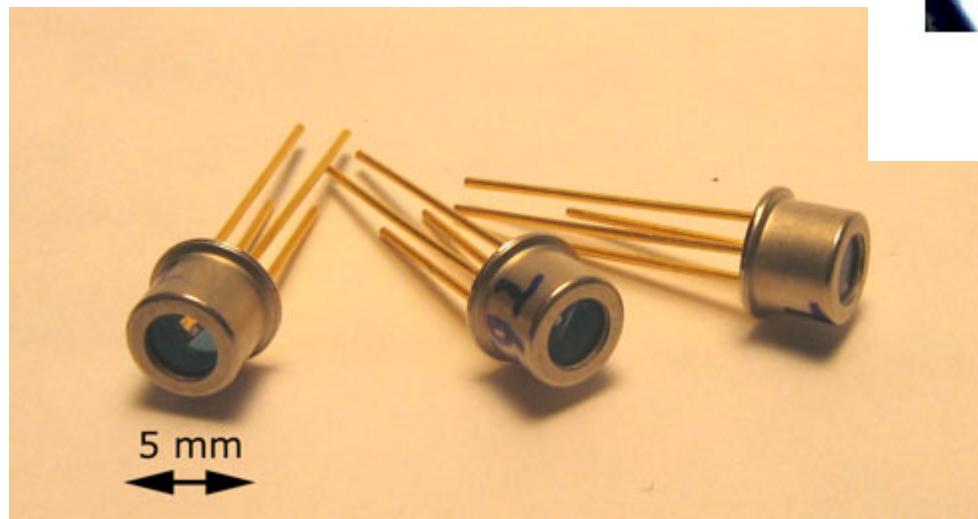
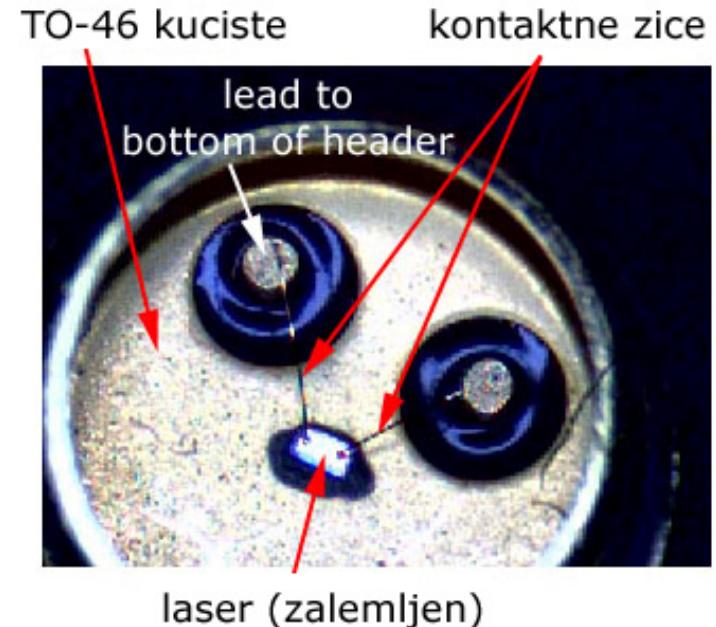
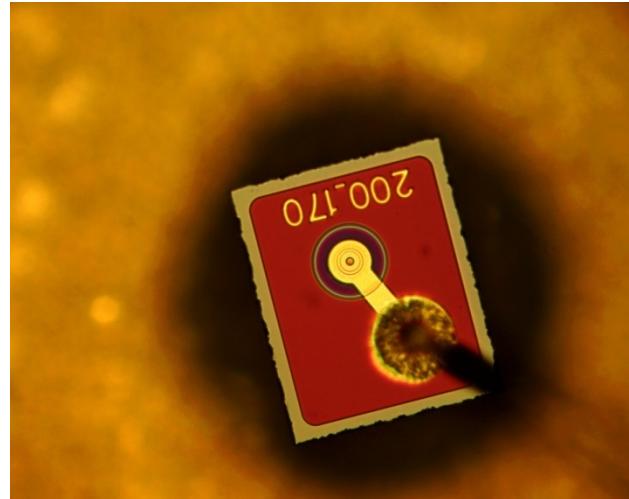
- Transverzalni modovi



pojačanje struje



Laser s vertikalnim rezonatorom



Usporedba laserskih dioda

Vrsta laserske diode	Longitudinalni smjer	Transversalni smjer	Primjena
Fabry-Pérot	Višemodan	Jednomodan	Komunikacije CD/DVD, stampači
DBR, DFB	Jednomodan	Jednomodan	Komunikacije
VCSEL (MM)	Jednomodan	Višemodan	Komunikacije
VCSEL (SM)	Jednomodan	Jednomodan	Komunikacije, senzori, optički miš

Usporedba laserskih dioda

- Cijena:

Fabry-Pérot

VCSEL

DFB, DBR

850 nm

1300 nm

1550 nm

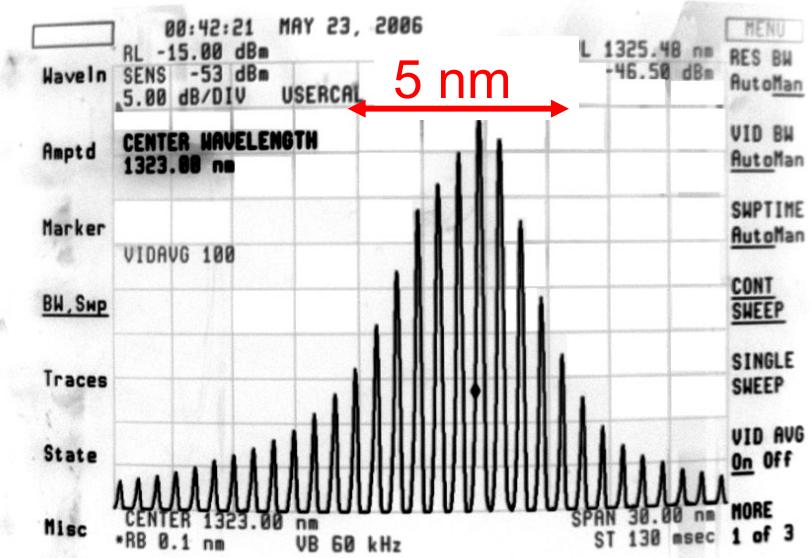
- Tipično gušenje svjetlovoda:

1. komunikacijski prozor	$\lambda \sim 0.85 \mu\text{m}$	$\alpha \approx 2.5 \text{ dB/km}$
2. komunikacijski prozor	$\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$	$\alpha \approx 0.35 \text{ dB/km}$
3. komunikacijski prozor	$\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$	$\alpha \approx 0.2 \text{ dB/km}$

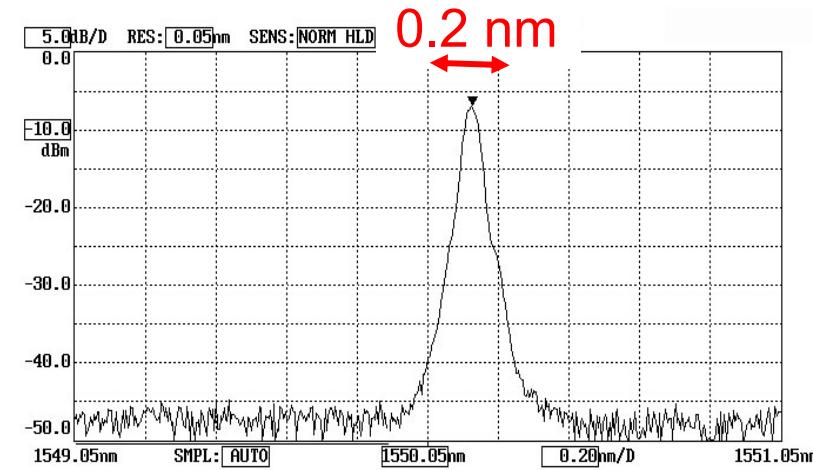
Usporedba laserskih dioda

- Spektar:

Fabry-Pérot laser

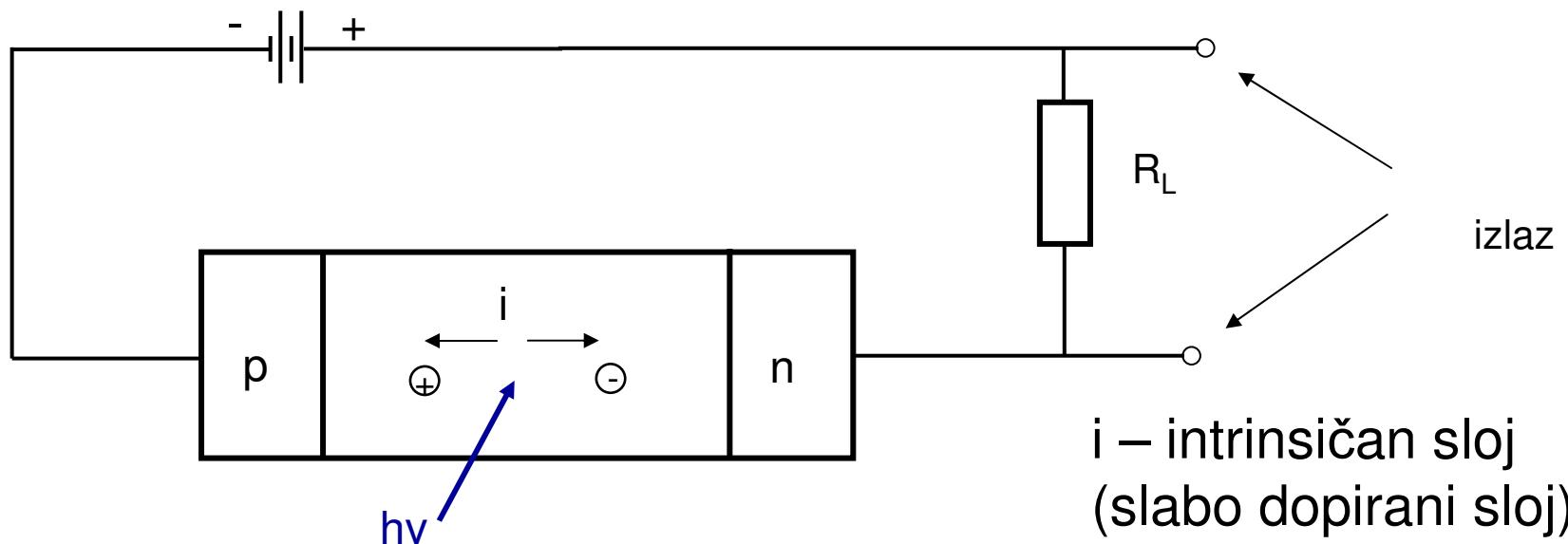


DBR laser

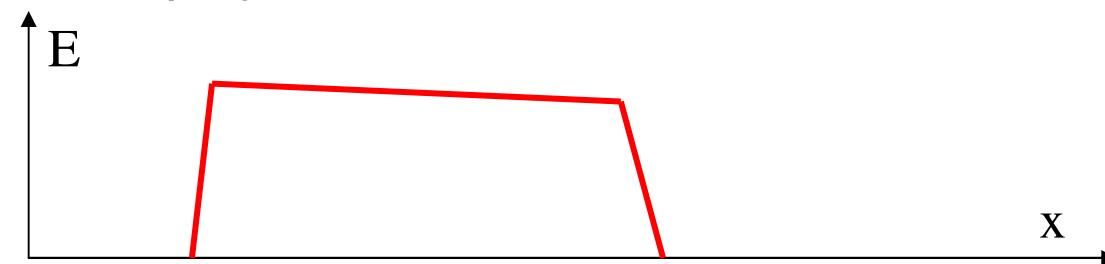


PIN-fotodioda

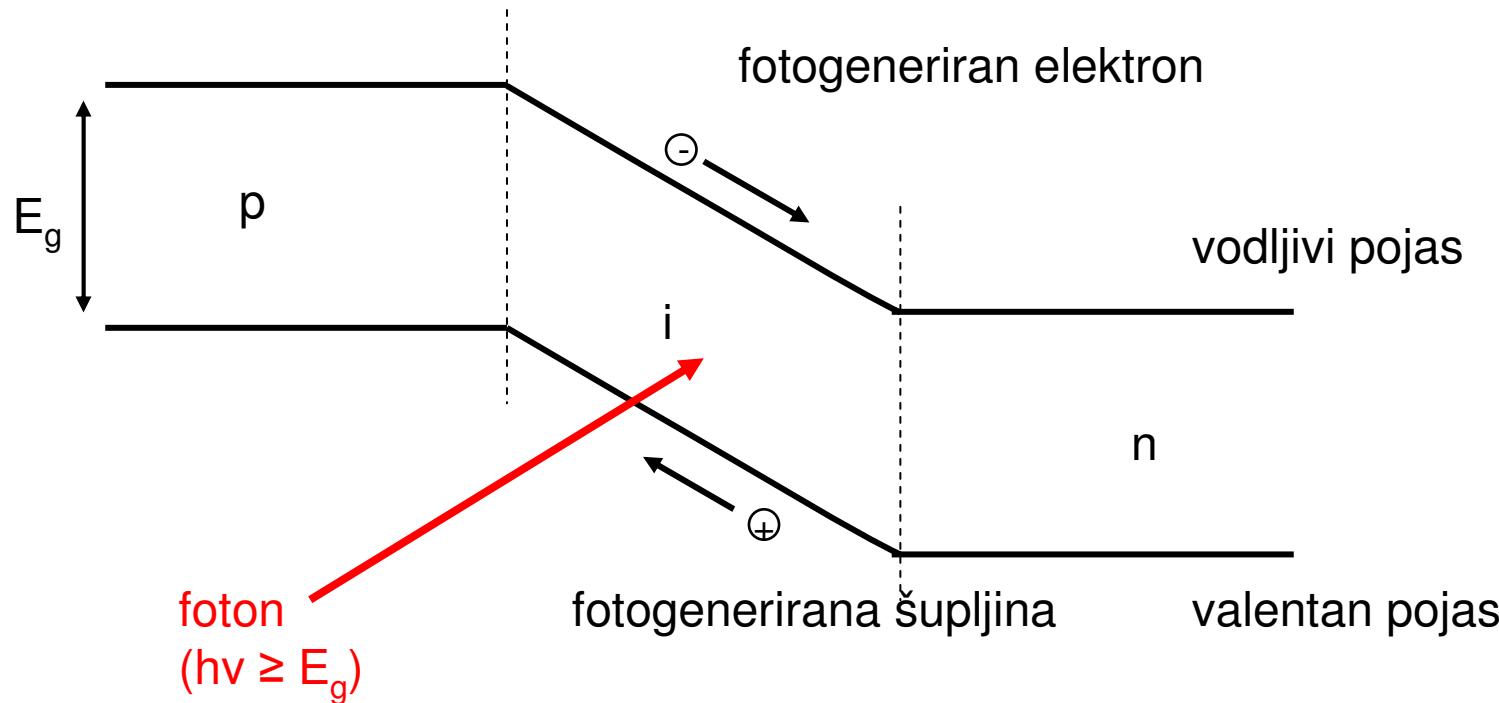
- Najčešći poluvodički detektor



Električno polje unutar fotodiode:



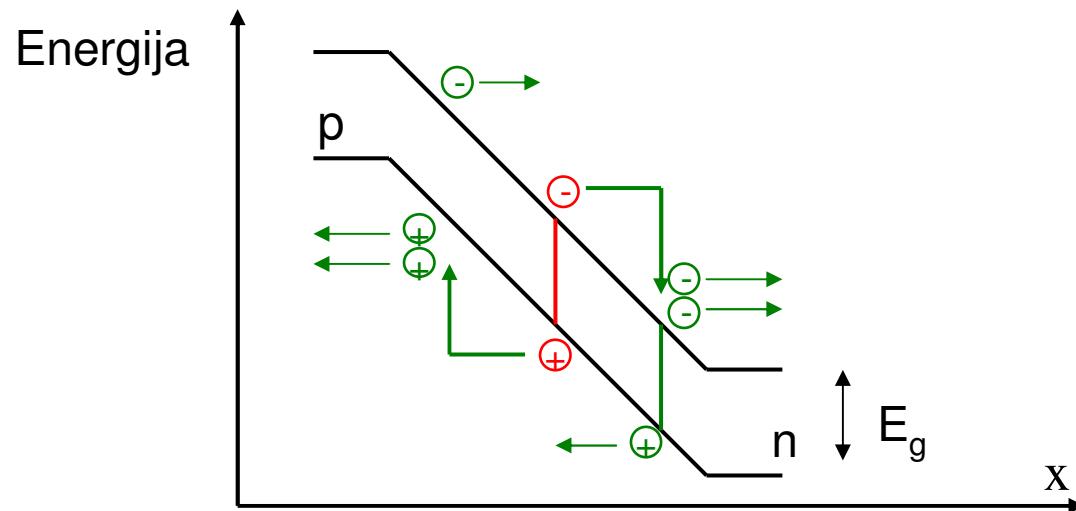
PIN-fotodioda



Uslijed prisudnog električnog polja u intrinsičnom I-sloju PIN diode, elektroni će se gibati prema N-sloju, a šupljine prema P-sloju (treba uočiti da je dioda reverzno polarizirana).

Lavinska fotodioda

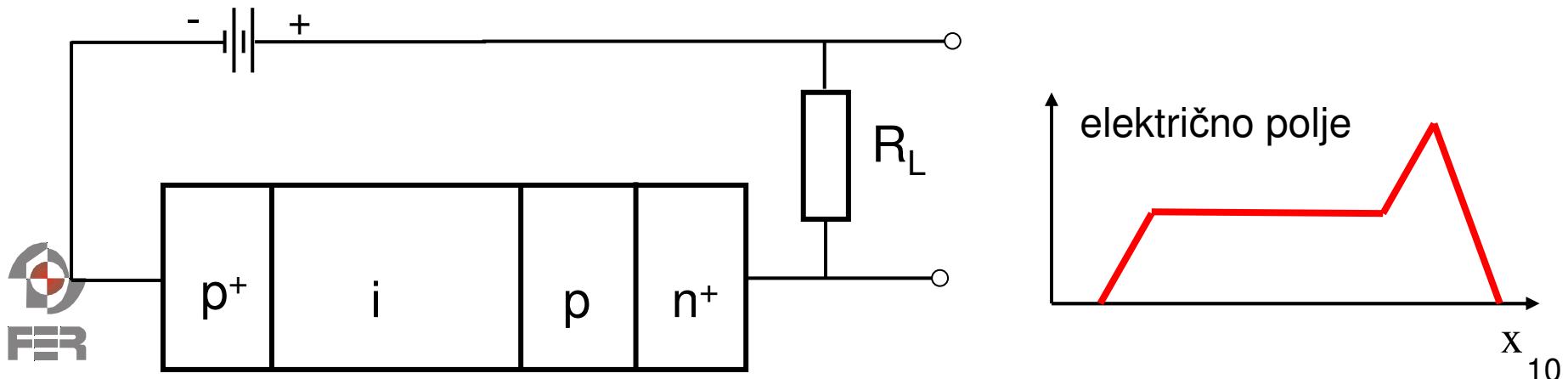
- Moguće je napraviti diodu koja će iskoristiti unutarnje mehanizme pojačanja tako da se generirana struja pojača – time je detektirani signal lakše moguće obraditi budući da ima veći amplitudu.
- Unutarnji mehanizam pojačanja je lavinski efekt. Dakle, ako narinemo veliki reverzno-polarizirani napon doći će do lavinskog efekta i time će se pojačati signal koji je detektiran u intrinzičnom dijelu.



Lavinska fotodioda

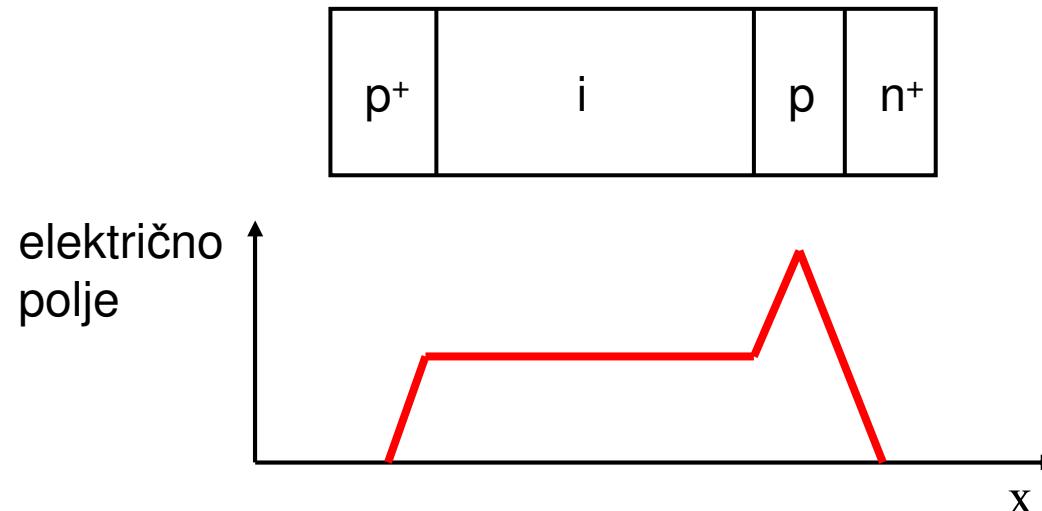
Konstrukcija lavinske foto diode

- APD – kratica za lavinske fotodiode (APD – Avalanche Photo Diode).
- APD dioda je u principu PIN dioda + dio s povećanim poljem gdje dolazi do ionizacije sudarima.
- Elektroni se dodatno ubrzavaju u području s pojačanim električnim poljem i ako dosegnu dovoljno veliku brzinu (dovoljno veliku energiju), u sudaru s kristalnom rešetkom generirat će novi par elektron šupljina.



Lavinska fotodioda

Uočiti: Područje gdje može doći do lavinskog efekta želimo lokalizirati, kako ne bi došlo do nekontroliranog lavinskog efekta
→ dobivamo tzv. separate-absorption-multiplication APD.



Parametri poluvodičkih fotodetektora

Kvantna djelotvornost (η) definirana je kao vjerojatnost da ulazni foton generira par elektron-šupljina.

Drugim riječima, ne generiraju svi dolazni fotoni parove elektron-šupljina. Sam proces apsorpcije fotona je proces vođen vjerojatnošću:

- Neki fotoni biti će reflektirani na granici zrak-poluvodič.
- Neki će se parovi elektron-šupljina, generirani blizu površine poluvodiča, brzo rekombinirati zbog obilja rekombinacijskih centara na površini poluvodiča.
- Ako svjetlost nije fokusirana na aktivno područje, neki fotoni bit će izgubljeni.

Parametri poluvodičkih fotodetektora

Odziv (\mathfrak{R}) daje odnos struje koja teče kroz detektor i upadne optičke snage.

Ako bi svaki foton generirao jedan par elektron-šupljina (jedan fotoelektron), tok fotona Φ bi generirao tog elektrona Φ , što bi odgovaralo struji kroz diodu (tj. struji koja teče kroz diodu s time da su nožice diode kratko spojene).

$$I_D = e \cdot \Phi$$

Optička snaga $P = h\nu \Phi$ [W] na frekvenciji ν bi (u idealnim uvjetima) generirala struju:

$$I_D = \frac{eP}{h\nu}$$

Parametri poluvodičkih fotodetektora

Budući da samo dio fotona sudjeluje u generiranju fotoelektrona, struja kratkog spoja je jednaka

$$I_D = \frac{\eta e}{h\nu} P = \mathfrak{R}P$$

Odziv je dakle faktor proporcionalnosti između optičke snage i električne struje (jedinica A/W).

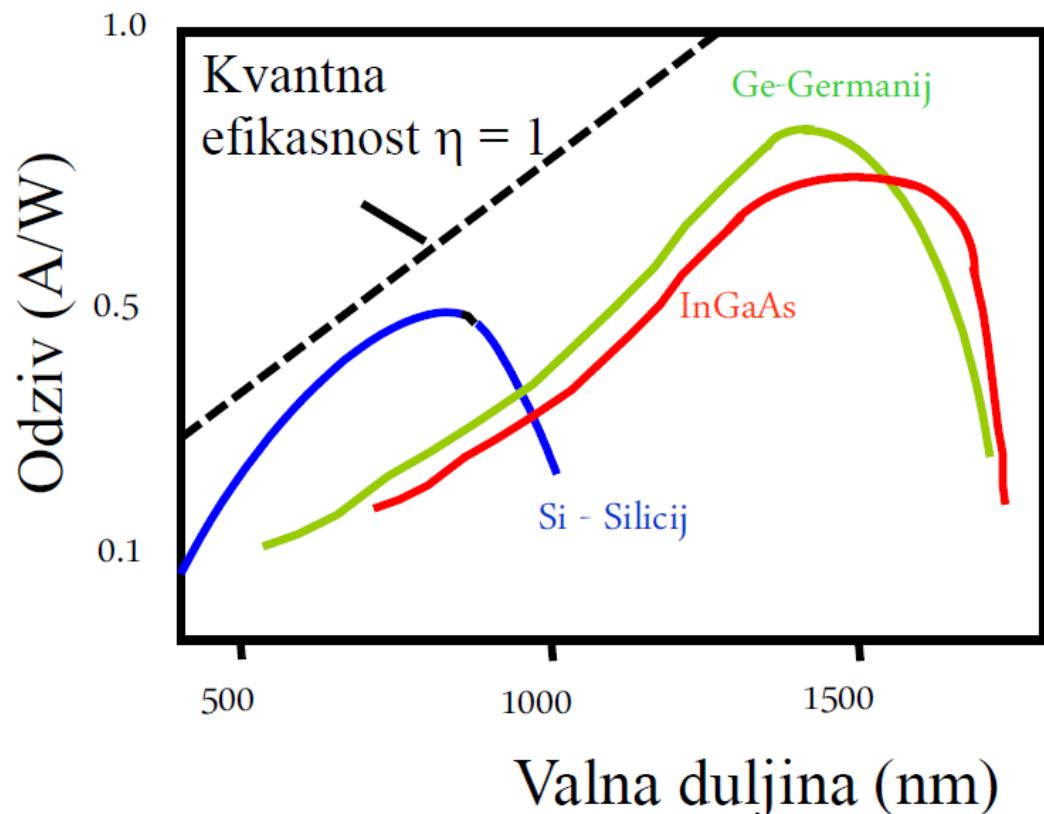
$$\mathfrak{R} = \frac{\eta e}{h\nu} = \eta \frac{\lambda_0 [\mu\text{m}]}{1,24}$$

Odziv \mathfrak{R} raste linearno s valnom duljinom budući da uz konstantnu optičku snagu imamo sve više fotona na ulazu. Uočiti da η ovisi o valnoj duljini, tako da je područje u kojem \mathfrak{R} linearno ovisi o λ_0 ograničeno.



Parametri poluvodičkih fotodetektora

- Ovisnost odziva o valnoj duljini:



Odabir poluvodiča za komunikacijske prozore:

- I kom. prozor ($\sim 0.85 \mu\text{m}$) – Si
- II i III kom. prozor ($\sim 1.3 \mu\text{m}$ i $\sim 1.55 \mu\text{m}$)
- Ge, InGaAs

Parametri poluvodičkih fotodetektora

- Uočiti da kod APD imamo još i faktor multiplikacije M (koji opisuje pojačanje pomoću lavinskog efektra), tako da za APD fotodiode vrijedi:

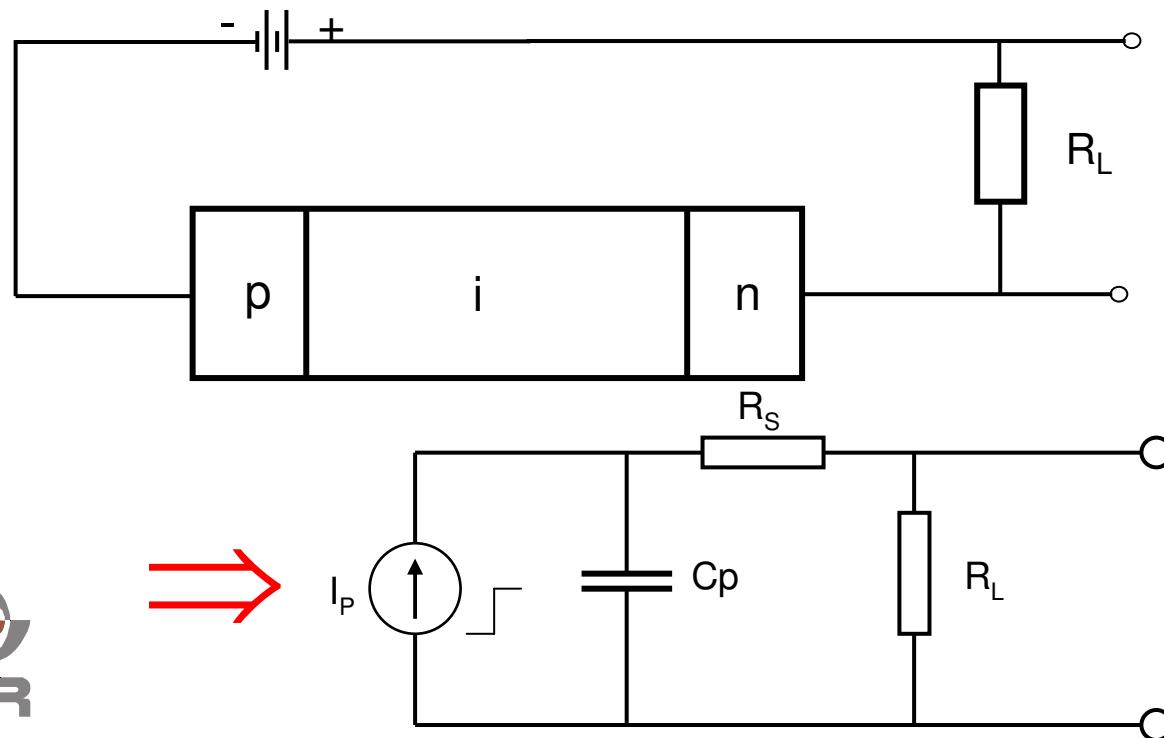
$$I_D = M \frac{\eta e}{h\nu} P = M \Re P$$

- Faktor multiplikacije M u principu govori koliko prosječno svaki elektron koji ulazi iz l -sloja u sloj multiplikacije generira novih parova elektron-šupljina.

Parametri poluvodičkih fotodetektora

Širinu pojasa detektora (frekvencijsku širini pojasa) odredit ćemo preko vremena porasta T_r – vrijeme potrebno da struja promjenu od 10% do 90% vrijednosti uz skokovitu promjenu pobude.

Ekvivalentni sklop za PIN diodu:



C_p – parazitni kapacitet
PIN diode
 R_s – serijski otpor
PIN diode

Svojstva poluvodičkih fotodetektorâ

Vrijeme porasta T_r fotodiode (RC nadomjesnog sklopa):

$$T_r = \ln 9 (\tau_{pr} + \tau_{RC}) \quad \text{← } \ln 9 = 2,197$$

gdje je:

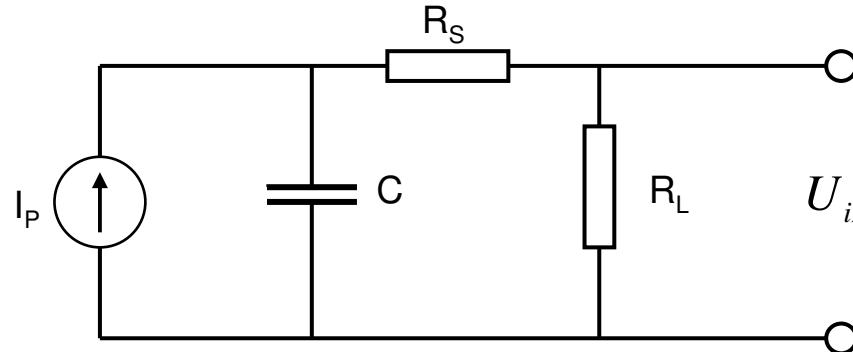
τ_{pr} – vrijeme proleta (vrijeme koje je potrebno da generirani elektro odnosno šupljina napusti l -sloj u fotodetektoru; kod lavinskih dioda treba uračnati vrijeme potrebno za lavinski efekt i vrijeme potrebno da se lavinski generirane šupljine prođu kroz l -sloj)

τ_{BC} – vremenska konstanta ekvivalentnog RC sklopa



Svojstva poluvodičkih fotodetektora

Ekvivalentni sklop za PIN diodu:



$$U_{izl} = I_p R_L \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R_s + R_L} = \frac{I_p R_L}{1 + j\omega(R_s + R_L)C}$$

Frekvencijska širina pojasa:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{pr} + \tau_{RC})]^{-1}, \quad \tau_{RC} = (R_s + R_L) \cdot C_P$$

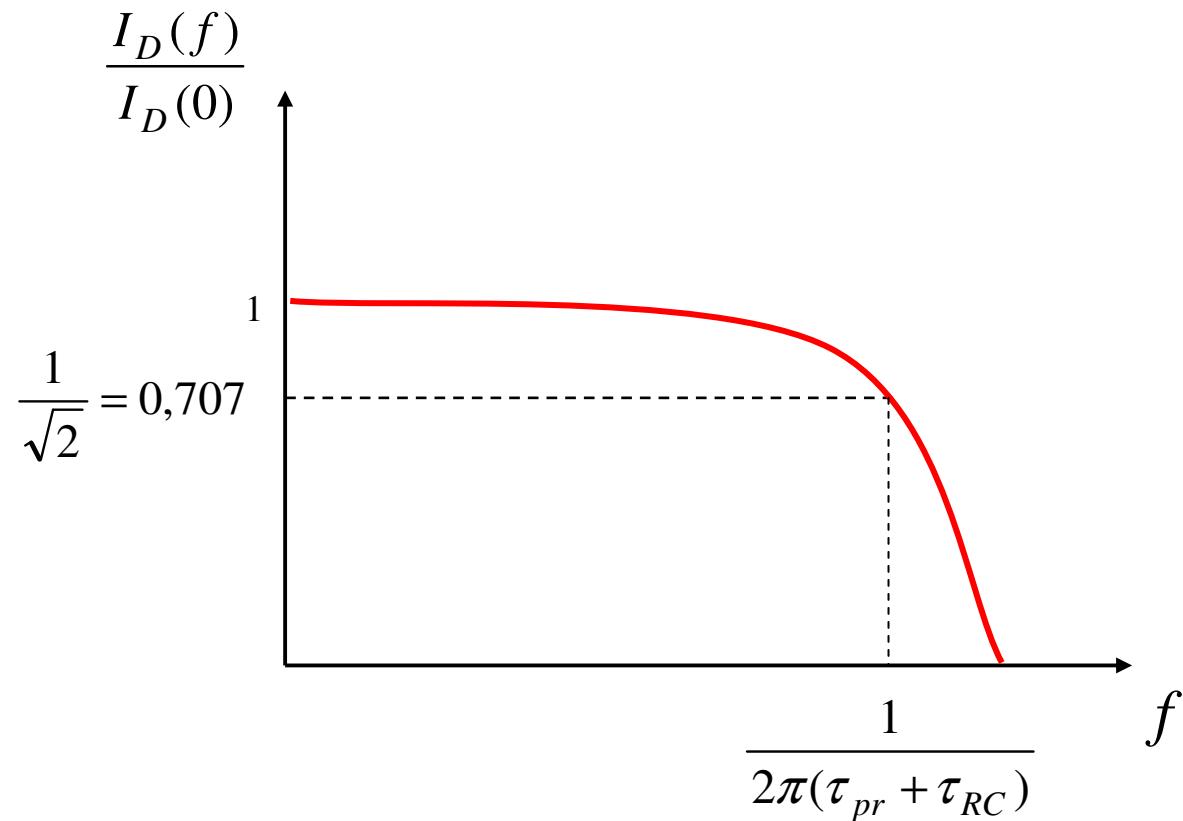
Ovisnos vremena porasta T_r i frekvencijske širine pojasa (dobiveno izjednačavanjem $\tau_{pr} + \tau_{RC}$ iz izraza za T_r i Δf):

$$\Delta f = \frac{2.197}{2\pi T_r} = \frac{0.35}{T_r}$$

PIN diode imaju frekvencijsku širinu pojasa do ~ 50 GHz.

Svojstva poluvodičkih fotodetektora

- Frekvencijska širina pojasa:

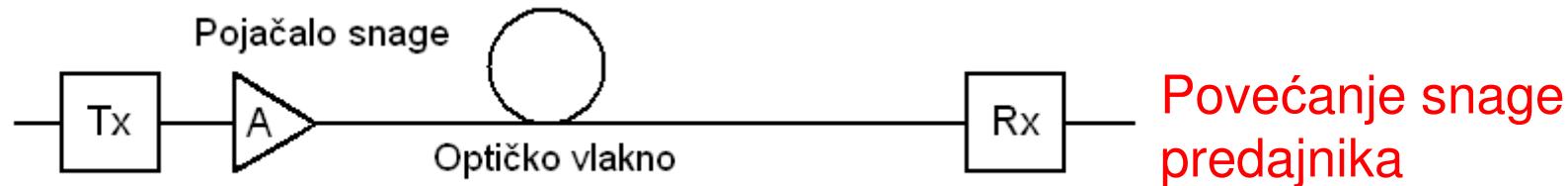


Optička pojačala

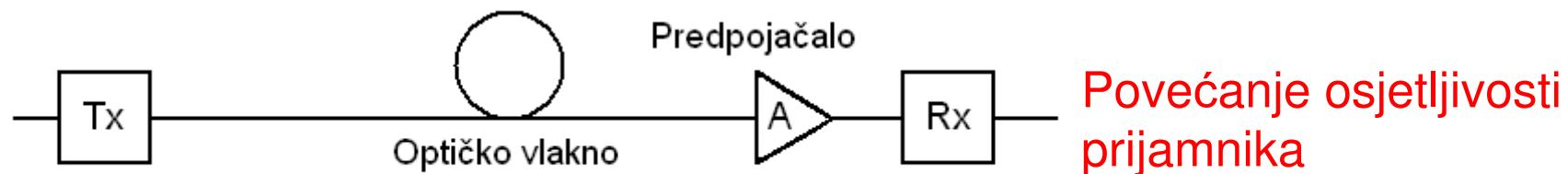
- Optička pojačala su pojačala koja pojačavaju signal u optičkoj domeni.
- Drugim riječima, kod optičkih pojačala nema pretvorbe iz optičke u električnu domenu te nakon pojačanja pretvorbe ponovo u optičku domenu (eliminira se potreba za skupim regeneratorima signala).
- Optička pojačala mogu istovremeno pojačavati više optičkih signala (valnih duljina). To je posebno važno kod WDM sustava.
- Vrste optičkih pojačala:
 - Erbijem dopirano svjetlovodno pojačalo (EDFA)
 - Poluvodičko optičko pojačalo (SOA)
 - Ramanovo pojačalo

Optička pojačala

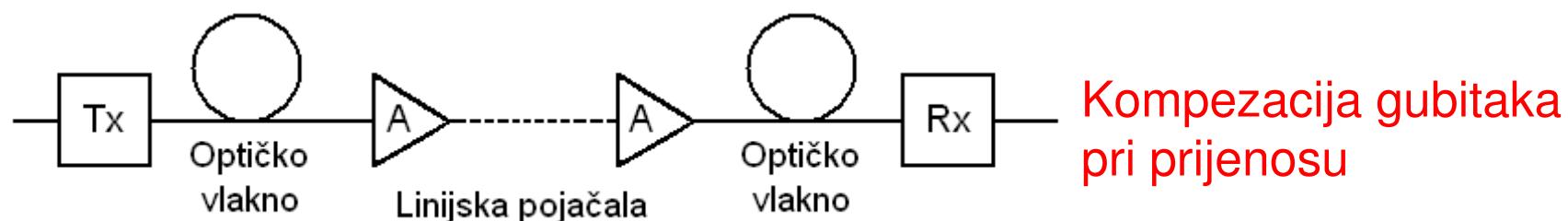
- Primjena optičkih pojačala:



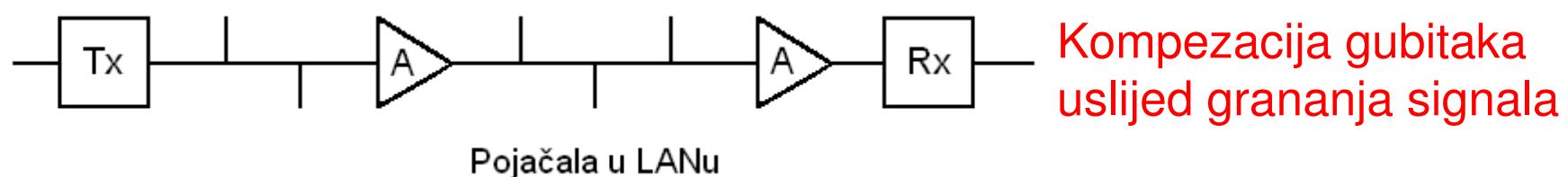
Povećanje snage predajnika



Povećanje osjetljivosti prijamnika

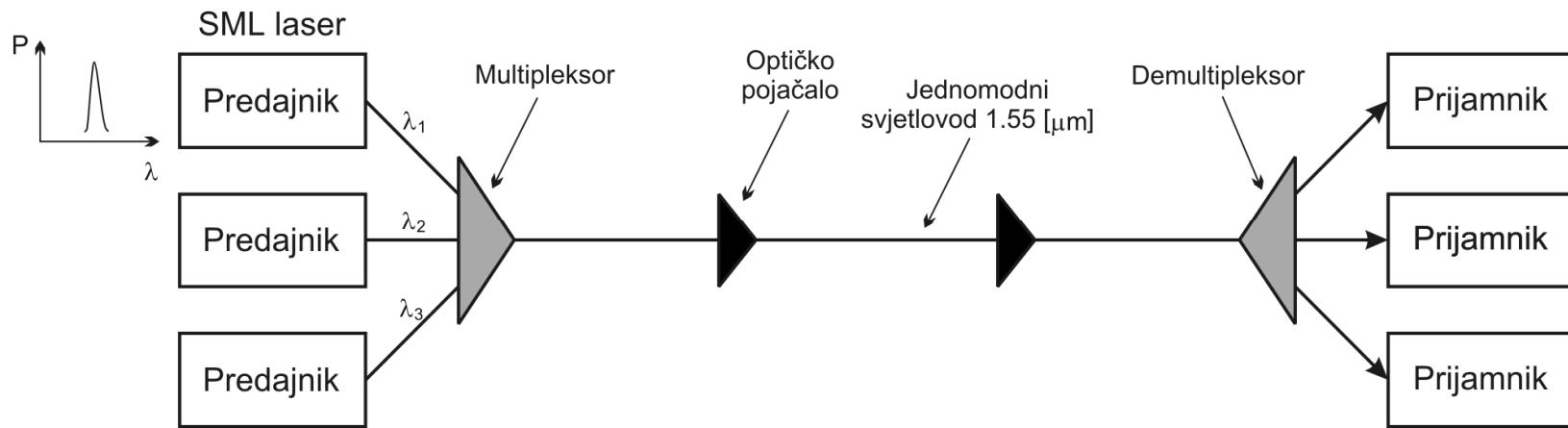


Kompenzacija gubitaka pri prijenosu



Kompenzacija gubitaka uslijed grananja signala

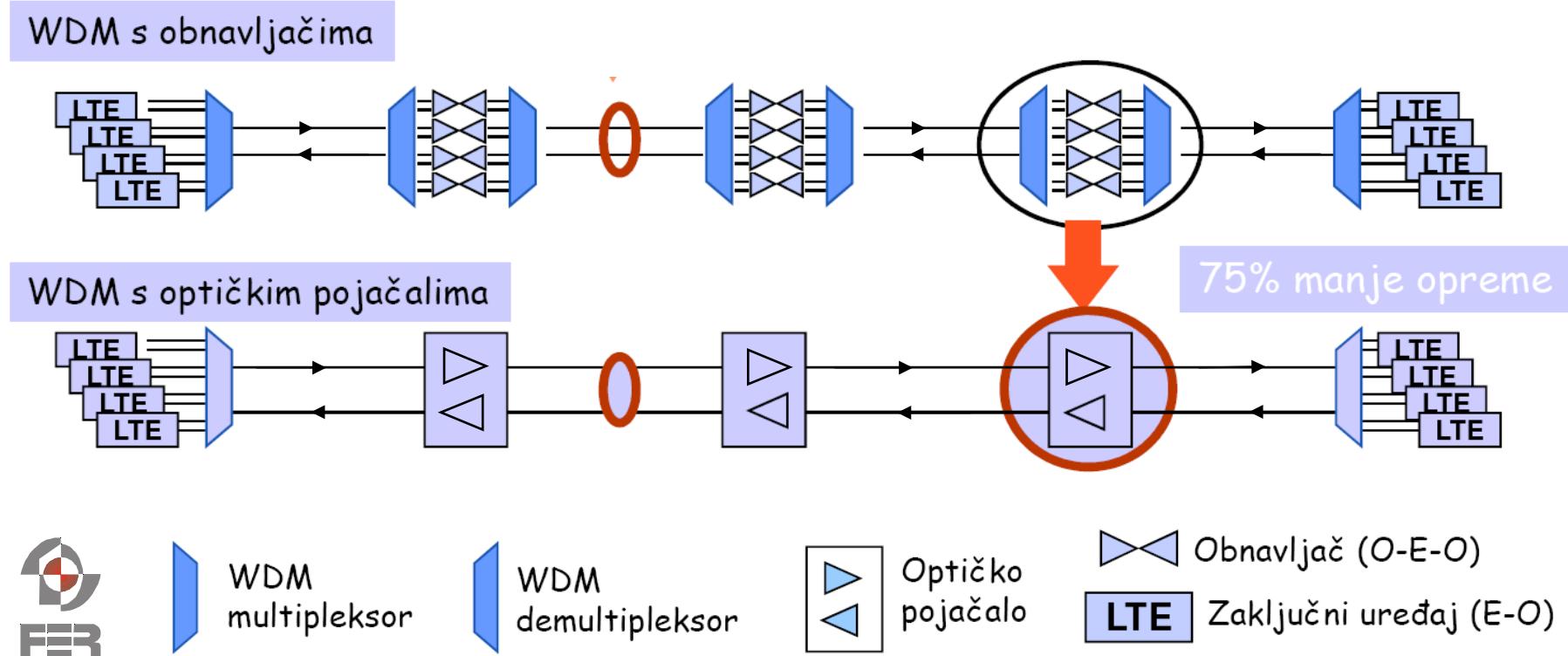
WDM sustav s optičkim pojačalima



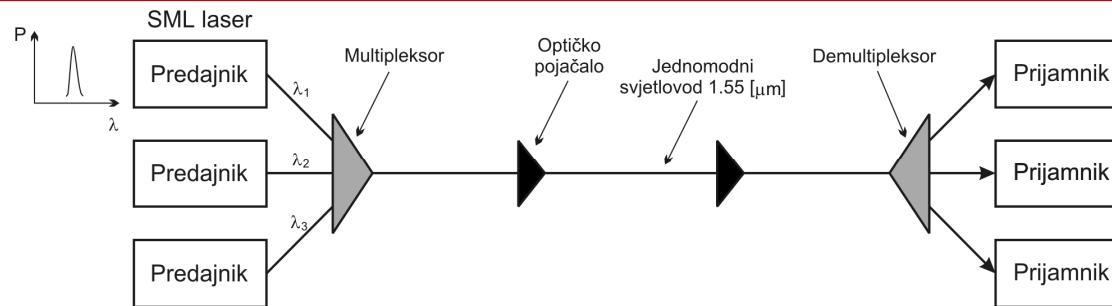
- DWDM sustav s optičkim pojačalima – moguće je postići optičke veze (linkove) na puno veće udaljenosti (primjer: podmorska veza Europa-SAD; svakih ~ 80 km nalazi se optičko pojačalo).

WDM sustav s optičkim pojačalima

- Problem s klasičnim regeneratorima – za svaku valnu duljinu trebalo bi posebno napraviti regenerator (koji u sebi sadrži opto-električnu pretvorbu, sam regenerator te elektro-optičku pretvorbu) \Rightarrow izuzetno složeno i skupo rješenje.



WDM sustav s optičkim pojačalima



- Optičko pojačalo je 1R regenerator – samo pojačava signal (re-amplification).
- Pri tome dodaje šum spontane emisije (ASE noise – amplified spontaneous emission noise).
- Drugim riječima, nakon svakog optičkog pojačala pogoršava se odnos signal šum S/N.
- Razlikujemo stoga:
 - Razmak između optičkih pojačala (tipično ~ 80 km)
 - Maksimalni razmak između 3R regeneratorsa - **optički domet** (eng. optical reach). Kod takvih regeneratorsa se vrši O-E-O pretvorba. Tipične vrijednosti su ~ 1000 km.

Optička pojačala

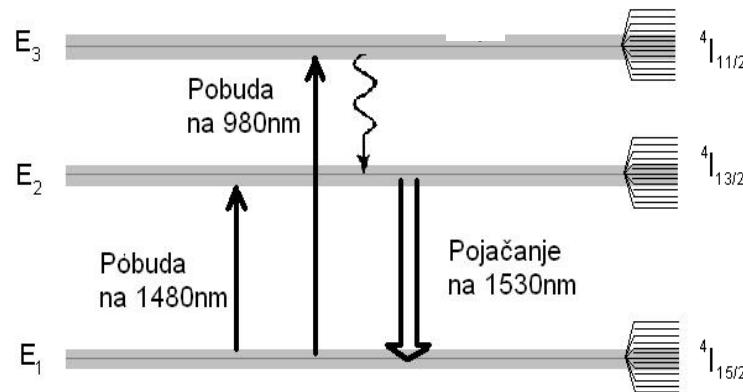
Osnovna ideja:

- Princip pojačanja – stimulirana emisija.
- Optičko pojačalo je u osnovi laser bez rezonantne šupljine.

EDFA – Erbijem dopirano svjetlovodno pojačalo

EDFA – Erbijem dopirano svjetlovodno pojačalo
(engl. Erbium Doped Fiber Amplifier)

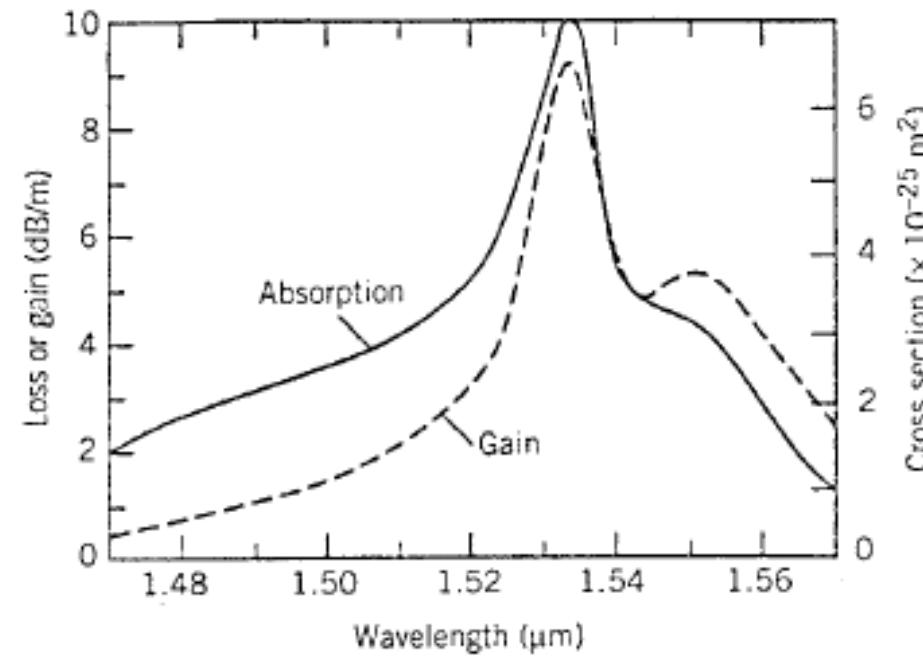
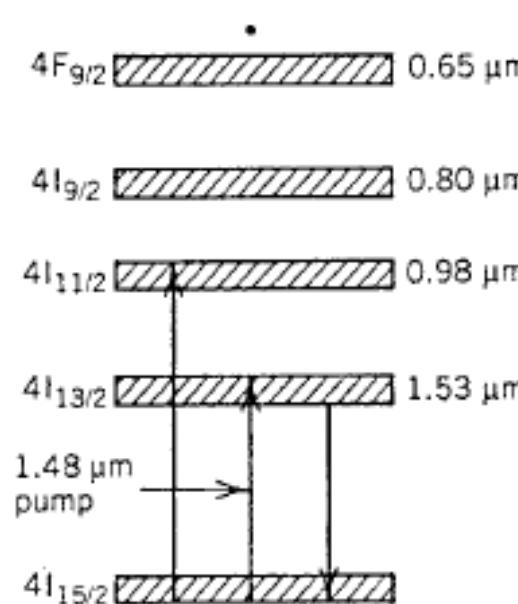
- Izgled energetskih nivoa erbija:



- Zbog amorfne prirode stakla od kojeg je načinjen svjetlovod, energetski nivoi se cijepaju u (široke) energetske pojaseve. To odražava činjenicu da pojedini atomi vide različita okruženja jer struktura nije geometrijski pravilna (odnosno nije kristalna struktura).
- Pumpanje moguće na dvije valne duljine – 980 nm i 1480 nm.

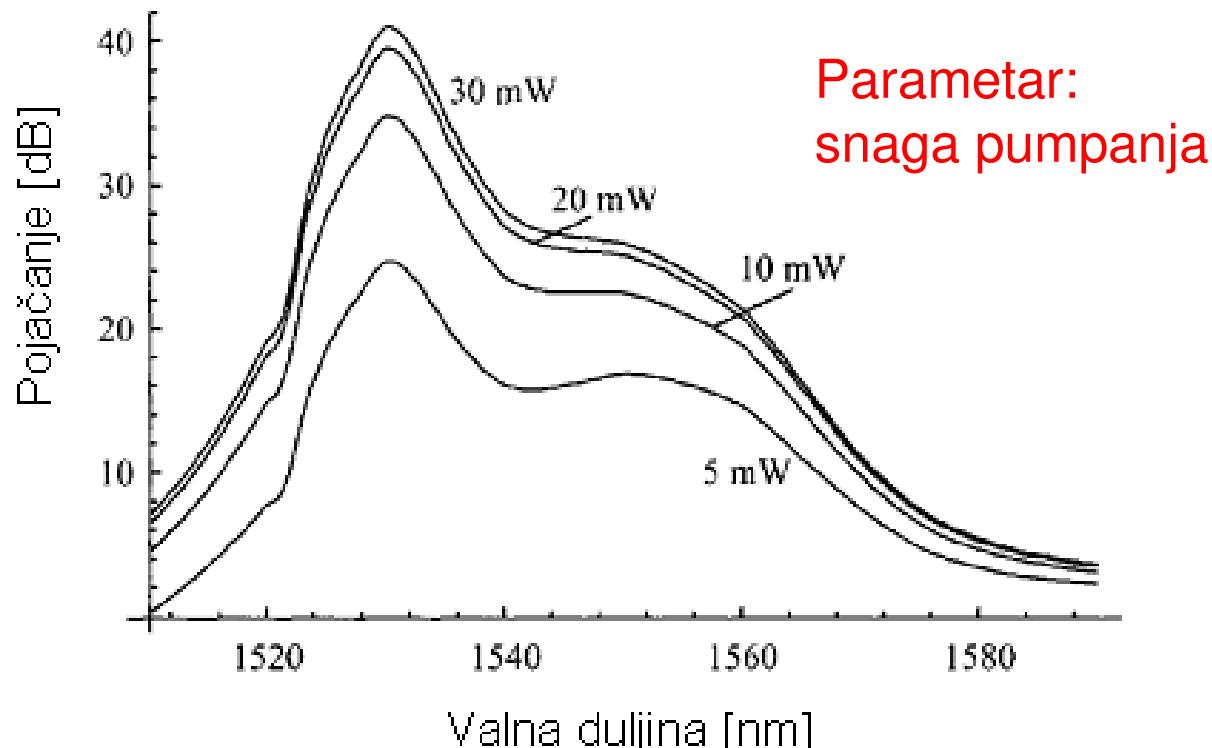
Obilježja EDFA pojačala

- Jezgra optičkog vlakna dopirana je erbijem.
- Erbij - kemijski element iz skupine lantanida (rijetki zemljani elementi).
- Ovisnost apsorpcije i pojačanja o valnoj duljini:



Obilježja EDFA pojačala

- EDFA pojačava signal na 1530nm-1565nm.
- Maksimalno pojačanje na ~1531nm.
- Frekvencijska karakteristika EDFA pojačala (frekvencijska karakteristika je širokopojasna zbog amorfne prirode SiO_2 stakla):



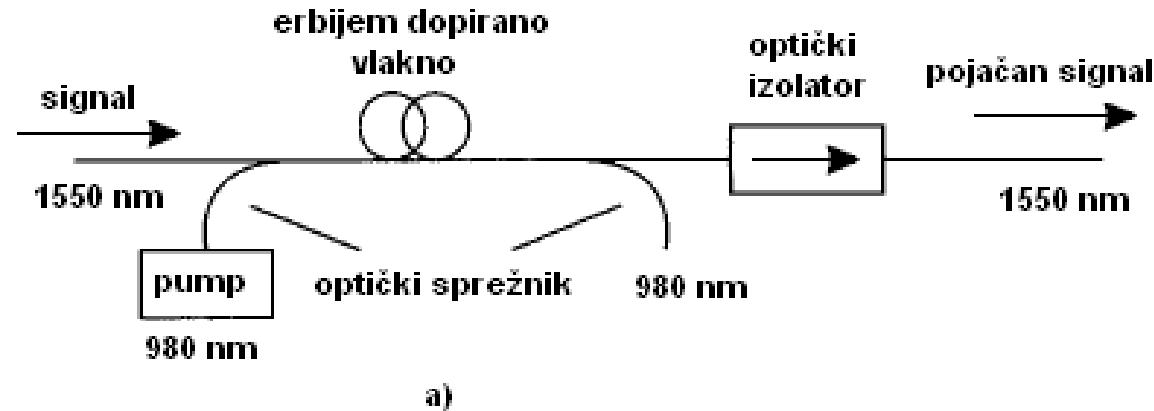
Konstrukcija EDFA pojačala

- EDFA – u principu laser bez rezonatora
- signal samo jednom prolazi kroz aktivni medij
(ne reflektira se neprestano od krajeva rezonatora).

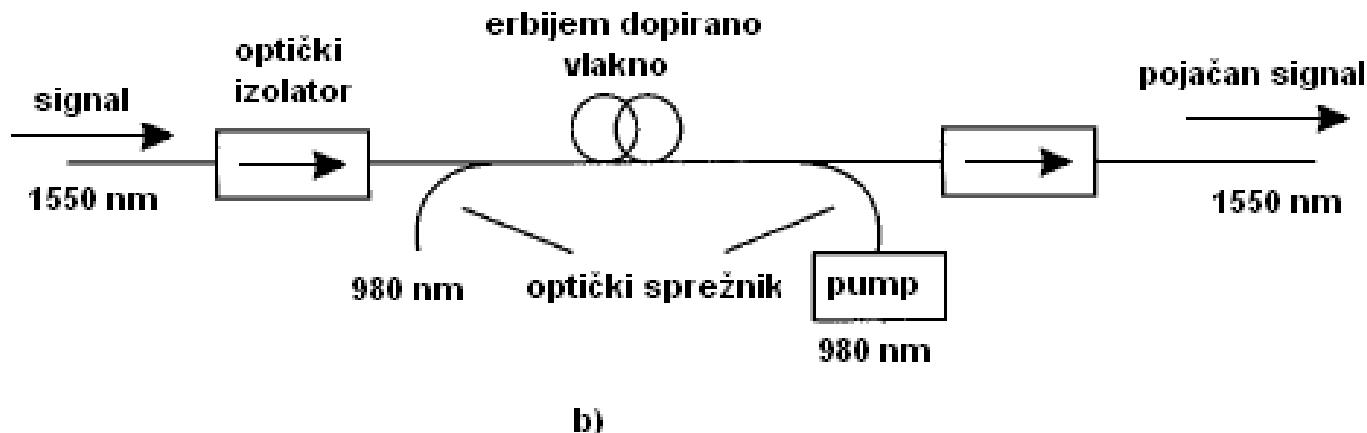


Konstrukcija EDFA pojačala

- Pumpanje može biti i straga i sprijeda:



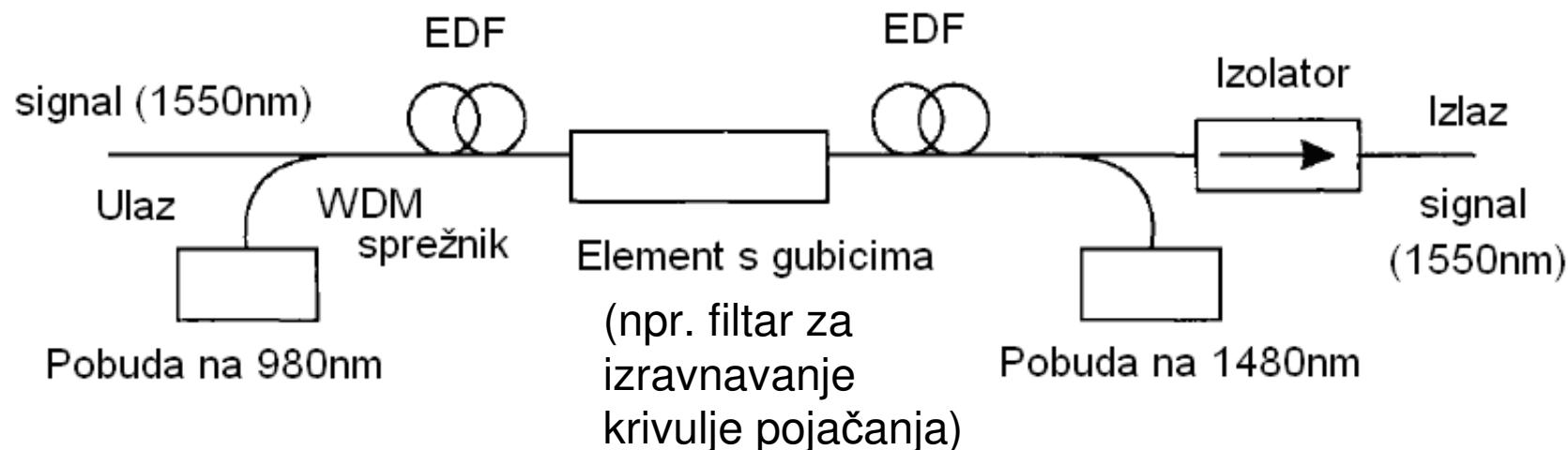
a)



b)

Konstrukcija EDFA pojačala

- Izvedba s dvije pumpe.
- Prvi stupanj je konstruiran tako da ostvari velik dobitak i mali šum dok je zadaća drugog stupnja osigurati veliku izlaznu snagu.



Saturacija pojačanja EDFA pojačala

- Saturacija = zasićenje
- Razlog saturacije pojačanja: za velike ulazne snage ne postoji dovoljan broj atoma erbija (čak i da su svi atomi erbija u višem energetskom stanju) pomoću kojih bi se postiglo maksimalno pojačanje.
- Zasićenje pojačanja se može opisati sljedećom jednadžbom:

$$G = 1 + \frac{P^{sat}}{P_{ul}} \ln \frac{G_{\max}}{G}$$

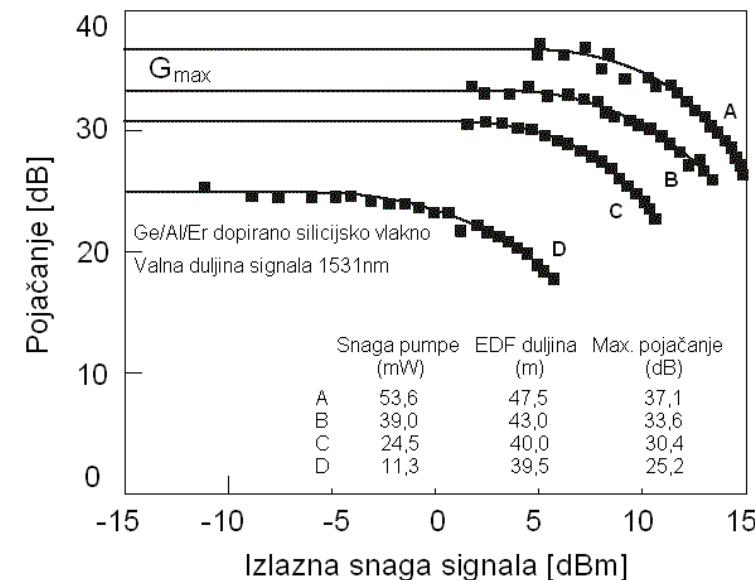
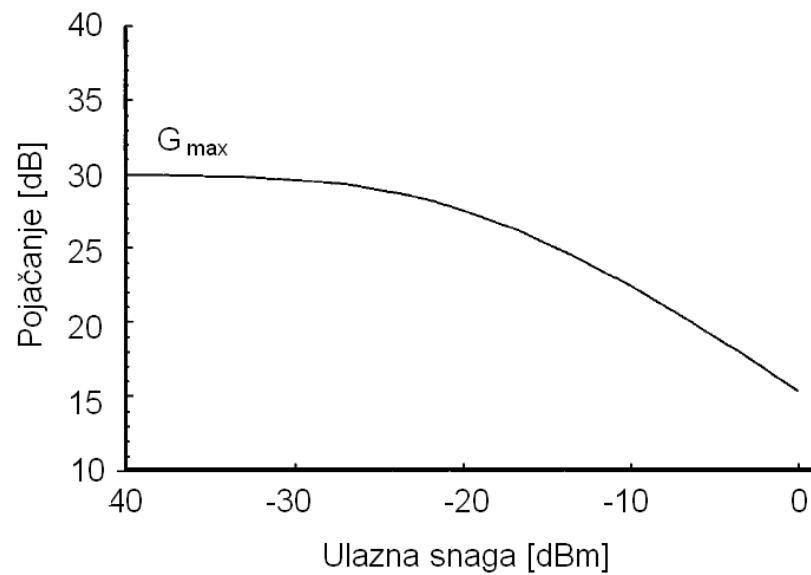
- Pri tome je
 - G_{\max} – maksimalno pojačanje (bez zasićenja)
 - P^{sat} – interna saturacijska snaga
- Ako definiramo P_{izl}^{sat} kao snage na izlazu kod koje je pojačanje palo za 3 dB

$$P_{izl}^{sat} \cong P^{sat} \ln(2)$$

Saturacija pojačanja EDFA pojačala

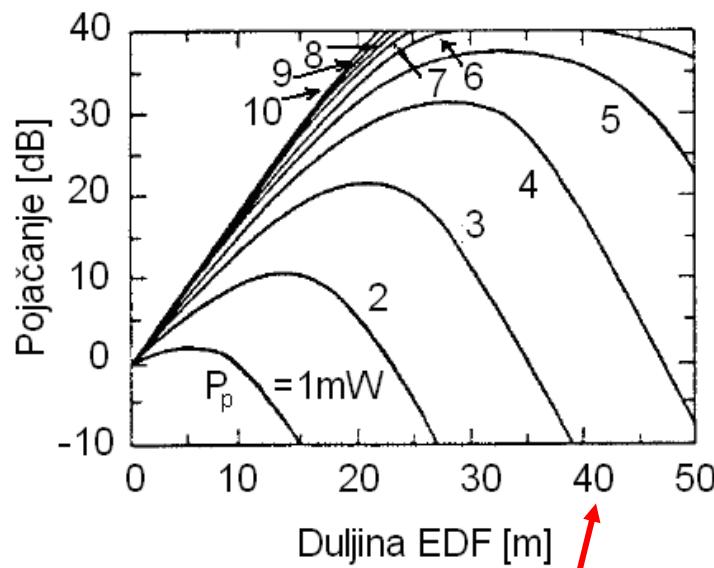
- Ovisnost pojačanja EDFA pojačala o ulaznoj snazi:

$$G = 1 + \frac{P^{sat}}{P_{ul}} \ln \frac{G_{\max}}{G}$$

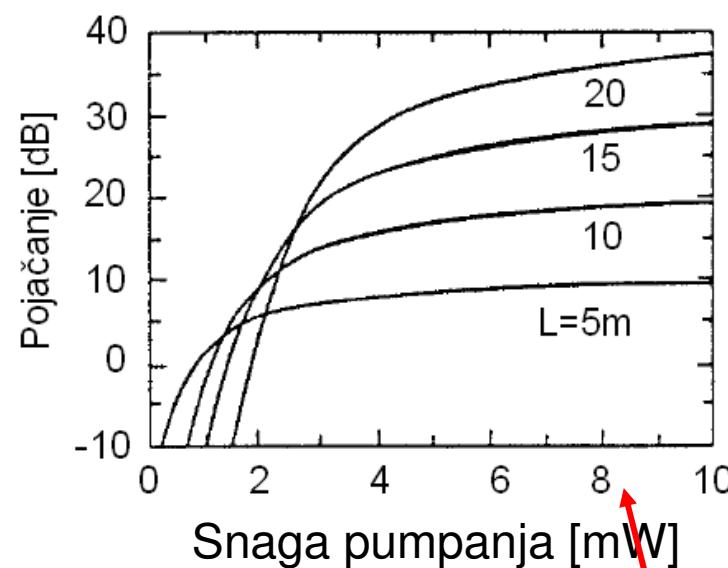


Obilježja EDFA pojačala

- Mala meditacija: ovisnost pojačanja EDFA pojačala o snazi pobude i o duljini erbijem dopiranog svjetlovoda (EDF):

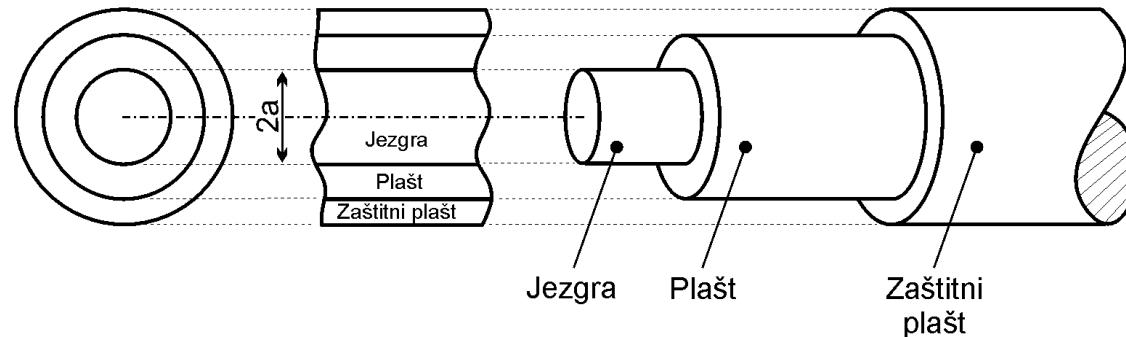


Nepobuđeni atomi erbija
apsorbiraju optički signal

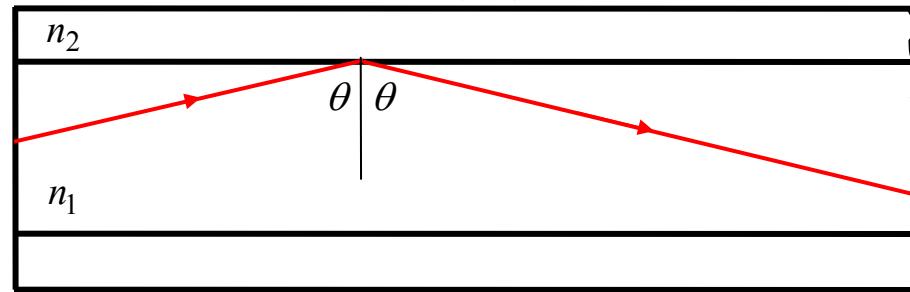


Svi atomi erbija
su pobuđeni

Izgled svjetlovoda



$$\theta \geq \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



Princip rada: totalna refleksija svjetlosne zrake

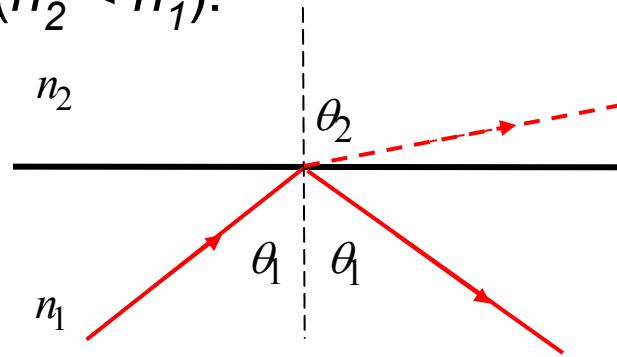
Totalna refleksija – princip rada svjetlovoda

- Snellov zakon:

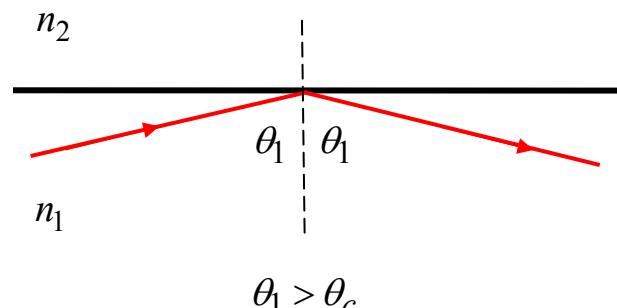
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Promotrimo Snellov zakon za tri karakteristična slučaja ($n_2 < n_1$):

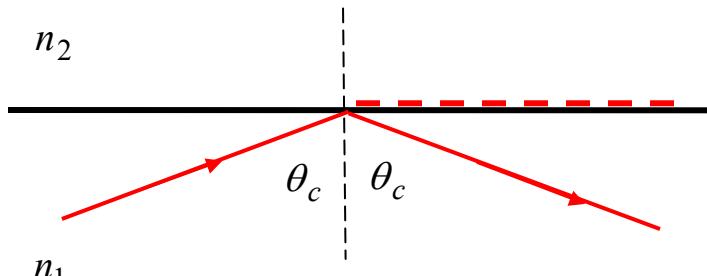
(a)



(c)



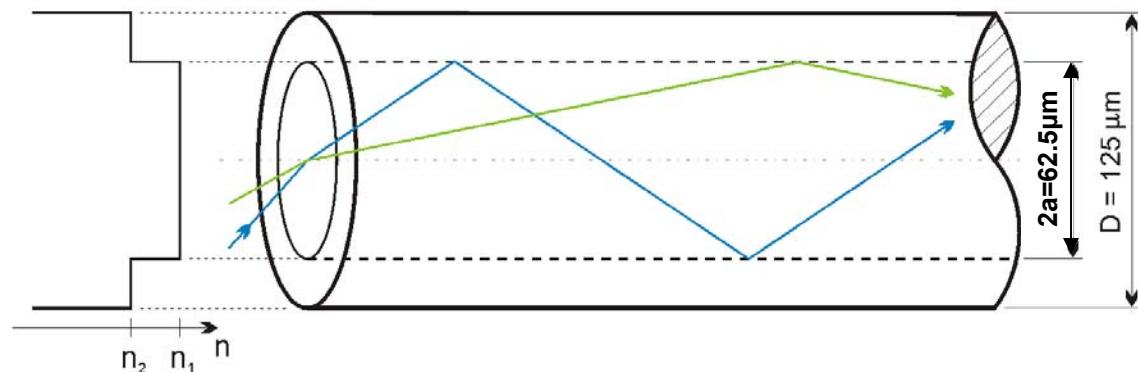
(b) Upadna zraka se širi uz $\theta_1 = \theta_c$
(definicija kritičnog kuta $\theta_2 = 90^\circ$)



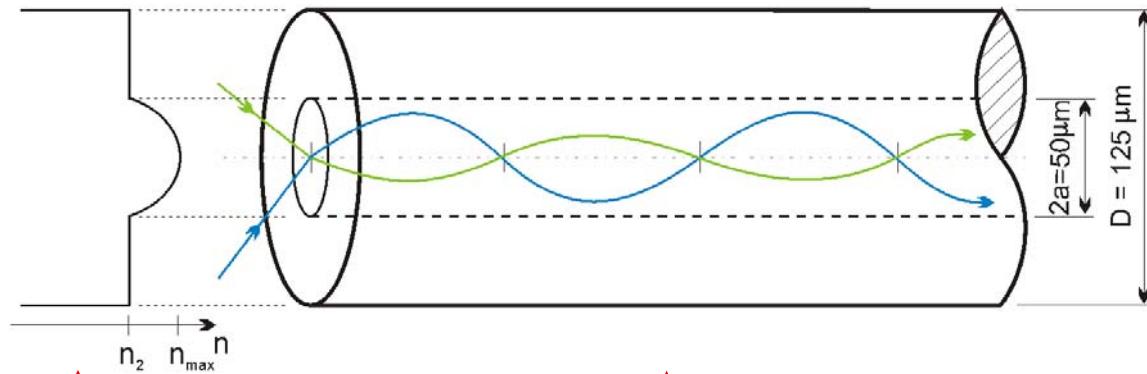
$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Vrste svjetlovoda

(a) Višemodni svjetlovod sa stepeničastim profilom indeksa loma

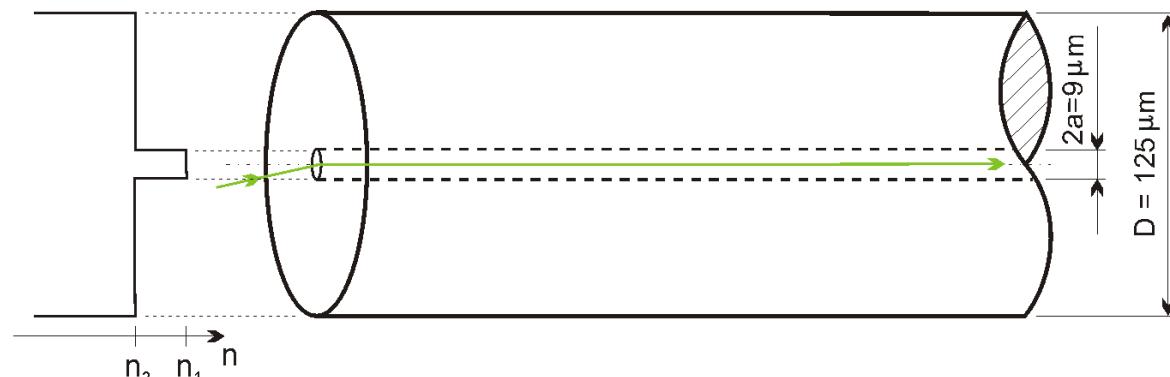


(b) Višemodni svjetlovod s gradijentnim profilom indeksa loma



Vrste svjetlovoda

(c) Jednomodni svjetlovod



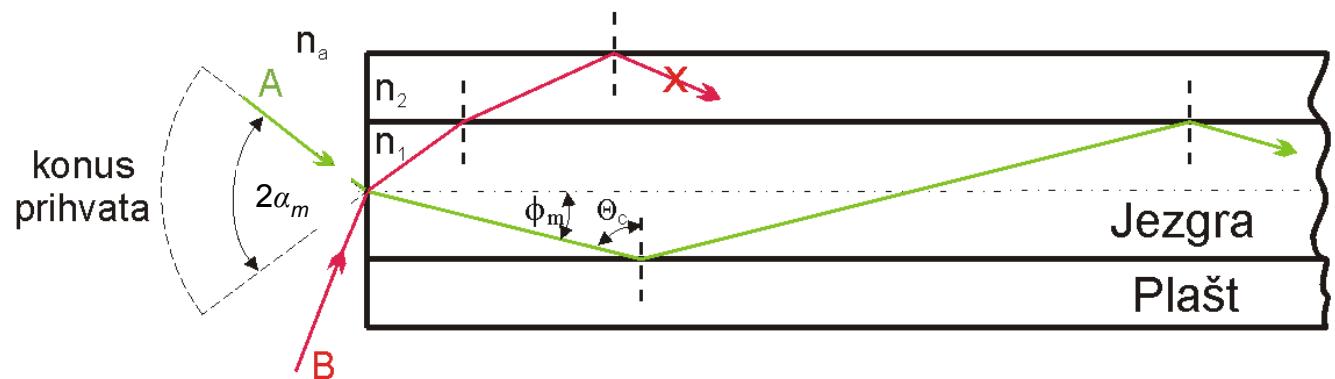
↑
Profil indeksa loma

↑
Izgled svjetlovoda

↑
Tipične dimenzije

Prihvatanje svjetla u svjetlovod

- Promatrajmo konus prihvata svjetla u svjetlovod:



- Definirajmo numeričku aperaturu NA kao mjeru količine svjetlosti sakupljene u svjetlovod:

$$NA = \sin \alpha_m$$

Prihvatanje svjetla u svjetlovod

- Iz Snellovog zakona dobivamo:

$$\underbrace{n_a}_{n_a=1} \cdot \sin \alpha_m = n_1 \sin \phi_m = n_1 \cos \theta_C$$

$$\cos \theta_C = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_C} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1}$$

$$\sin \alpha_m = n_1 \cdot \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sqrt{(n_1 - n_2) \cdot (n_1 + n_2)}$$

- Uvedimo označke:

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}$$

$$\Rightarrow \sin \alpha_m = (2n \cdot \Delta n)^{1/2}$$

Numerička apertura je jednaka:

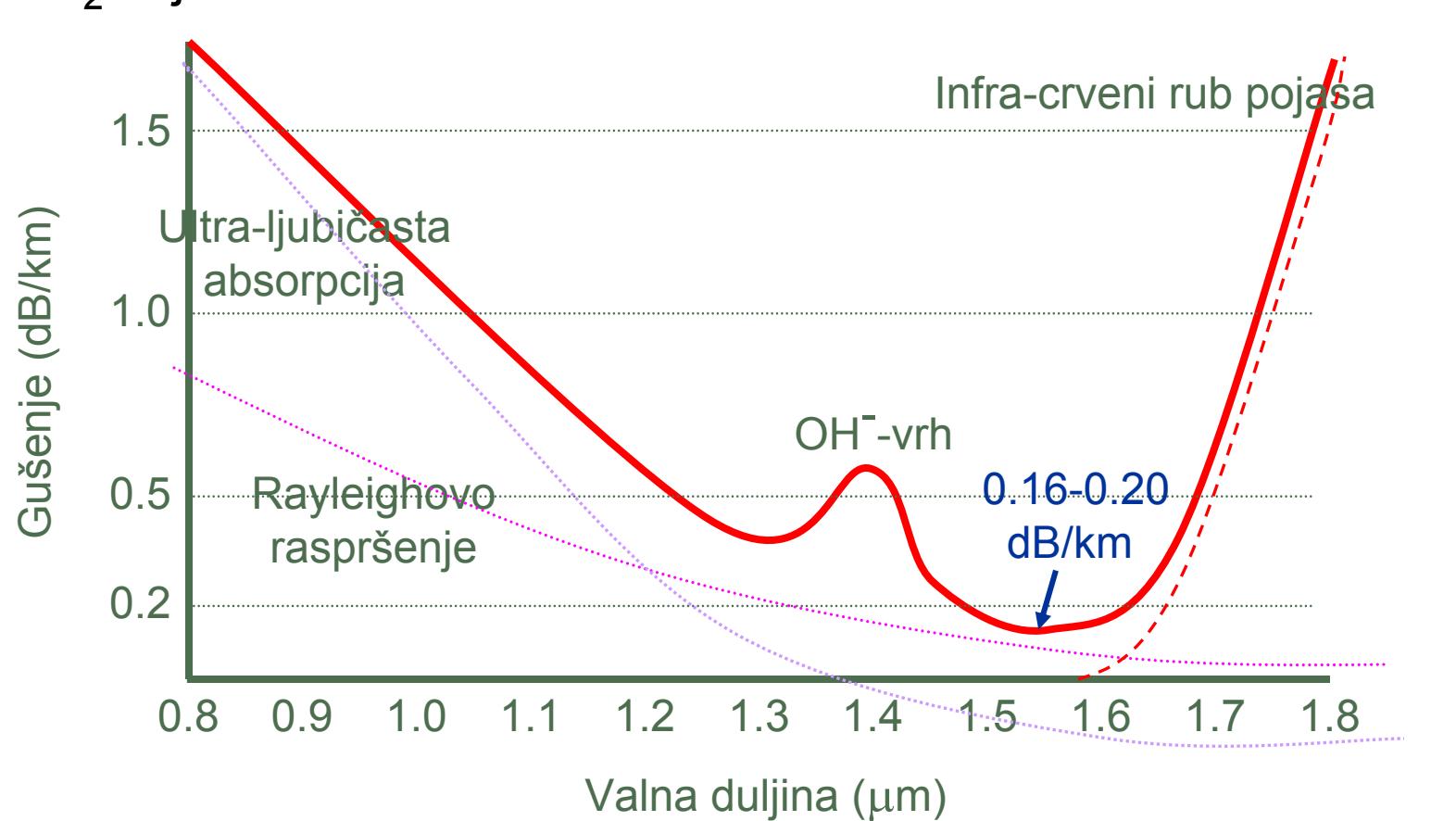
$$NA = n_a \sin \alpha_m = (2n \cdot \Delta n)^{1/2}$$

Karakteristike svjetlovoda



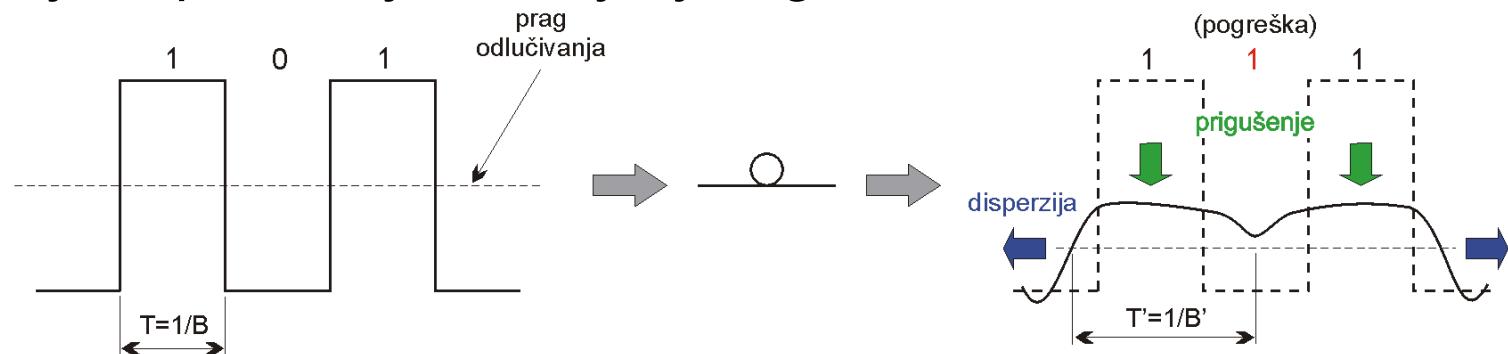
Gušenje u svjetlovodu

- SiO_2 svjetlovodi:



Disperzija

- Pojava proširenja i slabljenja signala:



- Ograničenje na birzinu prijenosa i maksimalnu duljinu optičke veze:

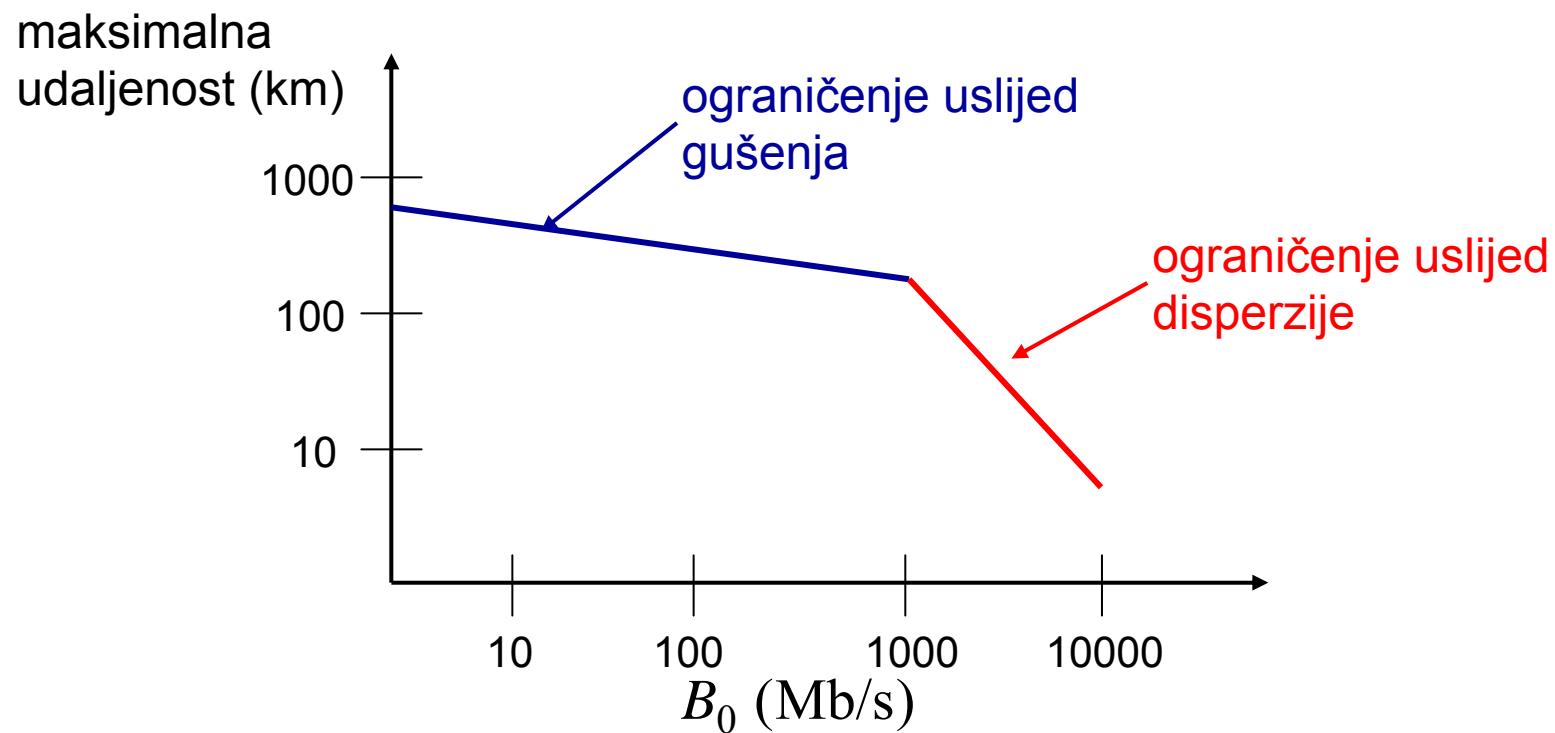
$$\Delta T \leq \frac{T_0}{2} \quad \text{odnosno} \quad B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}$$

- Osnovni uzroci disperzije (poredani po iznosu proširenja signala ΔT):

- Međumodalna disperzija
- Kromatska disperzija
- Polarizacijska disperzija

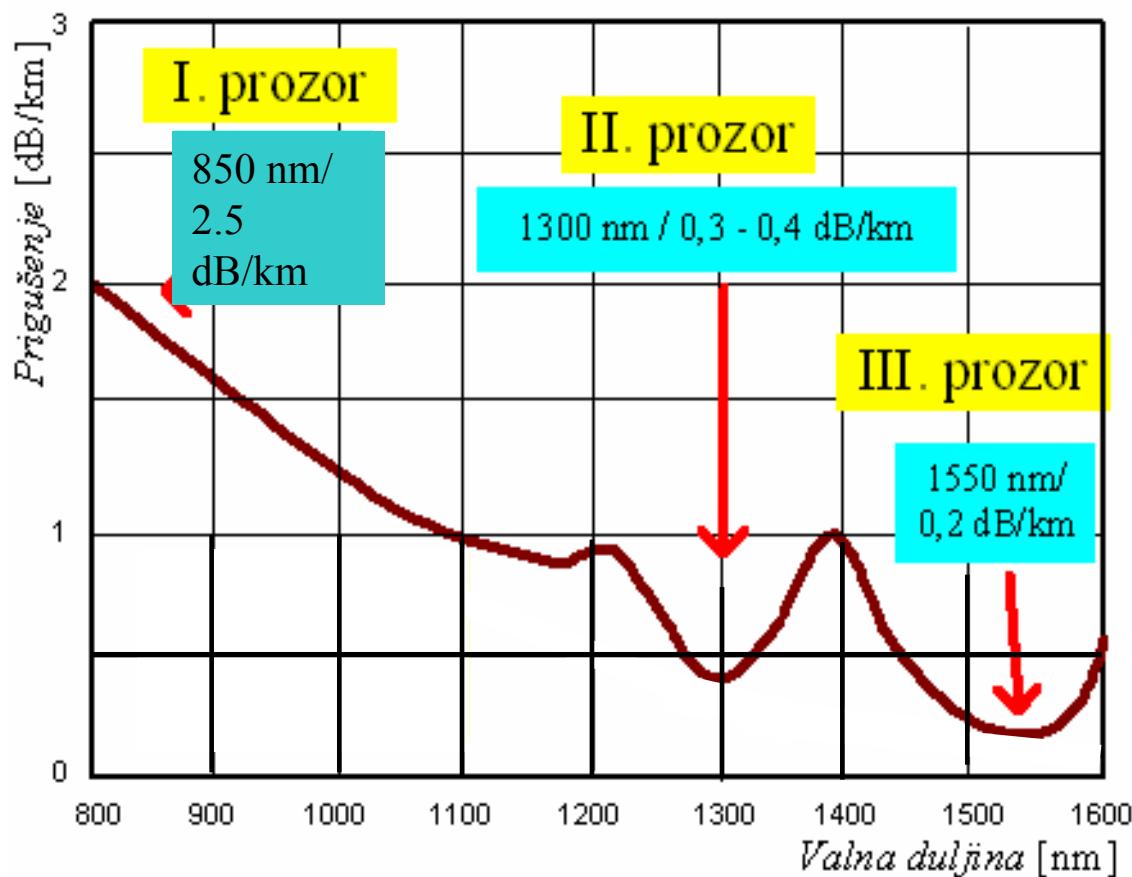
Ograničenja na udaljenost i brzinu prijenosa

Kod nižih brzina prijenosa prevladava ograničenje uslijed gušenja, dok kod većih brzina prijenosa prevladava ograničenje uslijed disperzije:



Gušenje u svjetlovodu

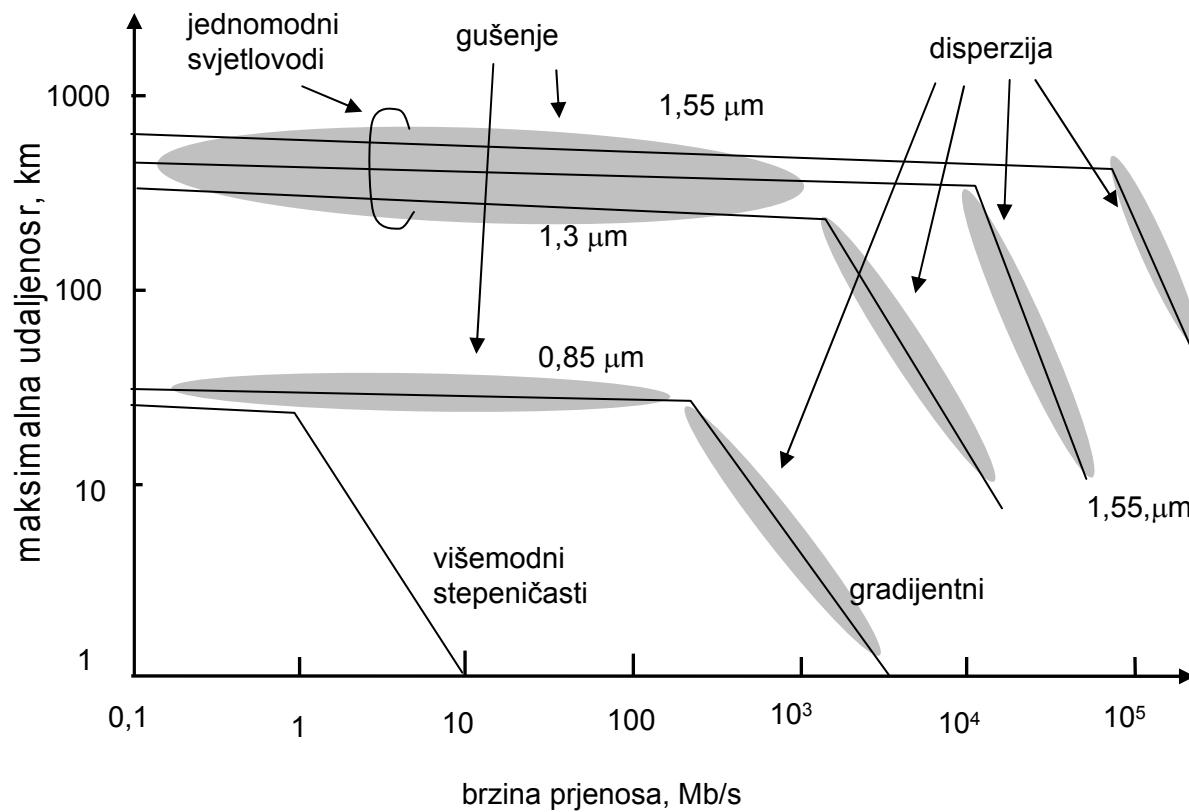
■ Definicija komunikacijskih prozora



1. komunikacijski prozor:
 - $\lambda \sim 0.85 \mu\text{m}$
 - Određen valnom duljinom GaAs lasera
 - $\alpha \approx 2.5 \text{ dB/km}$
2. komunikacijski prozor:
 - $\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$
 - Određen lokalnim minimumom gušenja
 - $\alpha \approx 0.35 \text{ dB/km}$
3. komunikacijski prozor:
 - $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$
 - Određen lokalnim minimumom gušenja
 - $\alpha \approx 0.2 \text{ dB/km}$

Sažetak rezultata o gušenju

- Ograničenje na brzinu prijenosa i maksimalnu udaljenost za različite vrste svjetlovoda:



Sažetak rezultata o gušenju

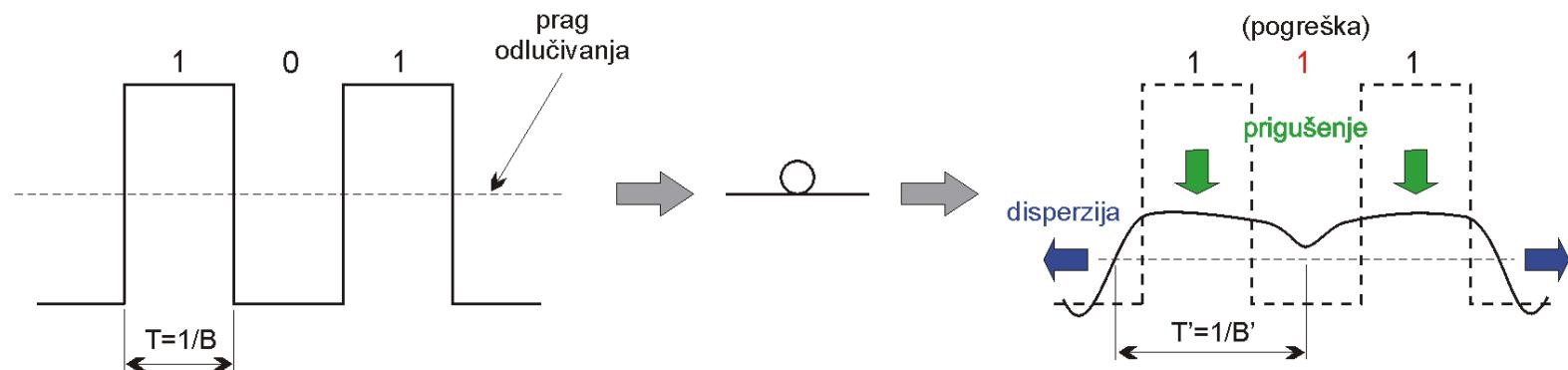
- Pitanje: Zašto se smanjuje maksimalna udaljenost s porastom brzine prijenosa (ograničenje uslijed gušenja)?
- Promatrajmo izraz za osjetljivost prijamnika ($\bar{P}_{pr} = (P_1 + P_0)/2$):

$$\bar{P}_{pr} = \frac{\bar{n}_1}{2} \cdot h\nu \cdot \frac{1}{T} = \frac{\bar{n}_1}{2} \cdot h\nu \cdot B_0$$

- Kako je stalan broj fotona po bitu koji prijamnik treba primiti, sijedi da potrebna srednja optička snaga \bar{P}_{pr} raste kako se povećava brzina prijenosa (odnosno smanjuje vremensko trajanje bita)

Disperzija

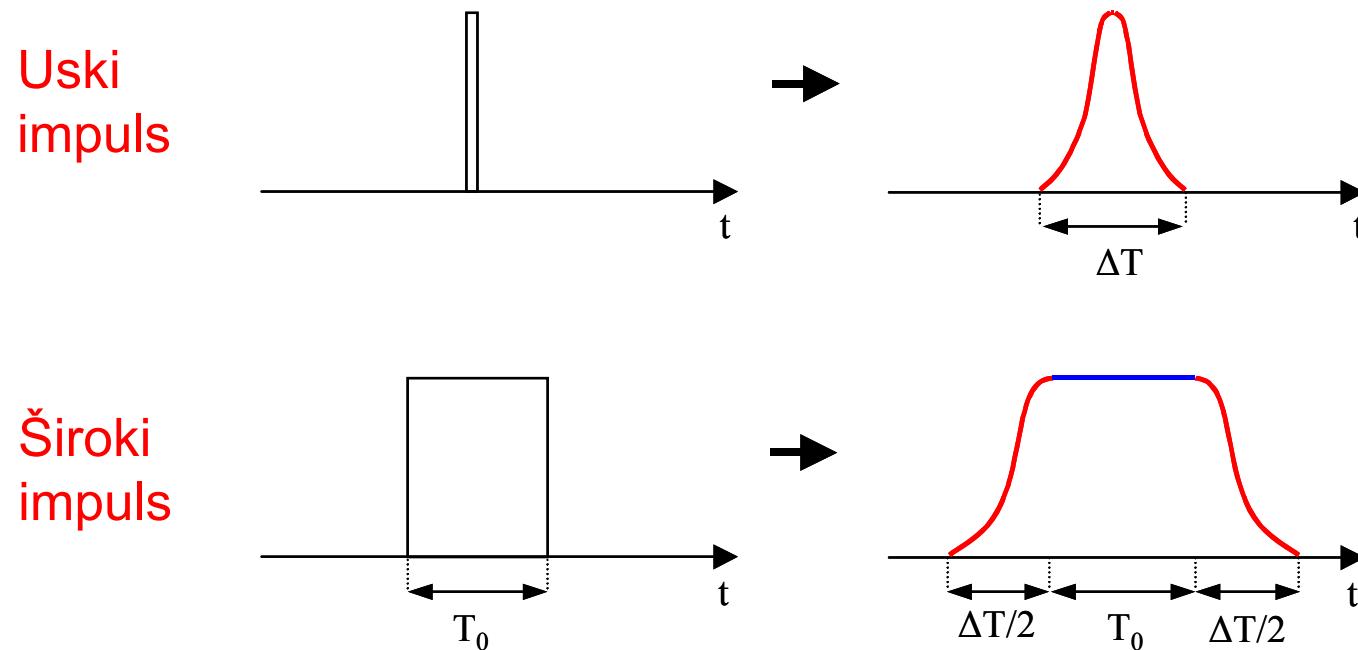
- Pojava proširenja i slabljenja signala:



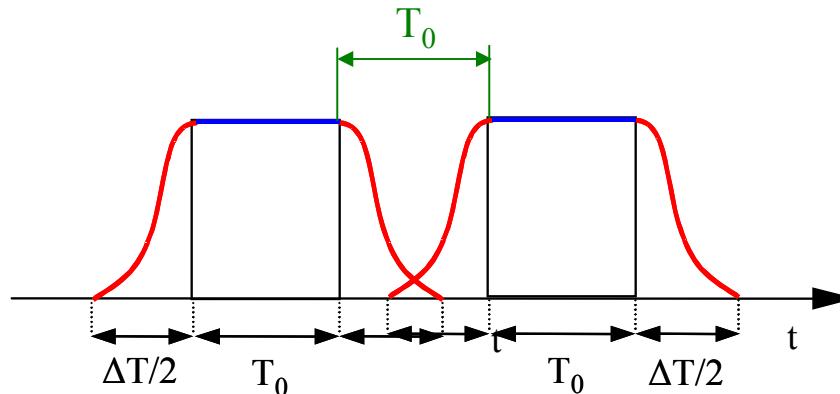
- Osnovni uzroci disperzije (poredani po iznosu proširenja signala ΔT):
 - Međumodalna disperzija (višemodni svjetlovodi)
 - Kromatska disperzija
 - Polarizacijska disperzija

Disperzija – proširenje signala

- Skica proširenja signala
 - proširenje signala opisujemo sa ΔT :



Disperzija – proširenje signala

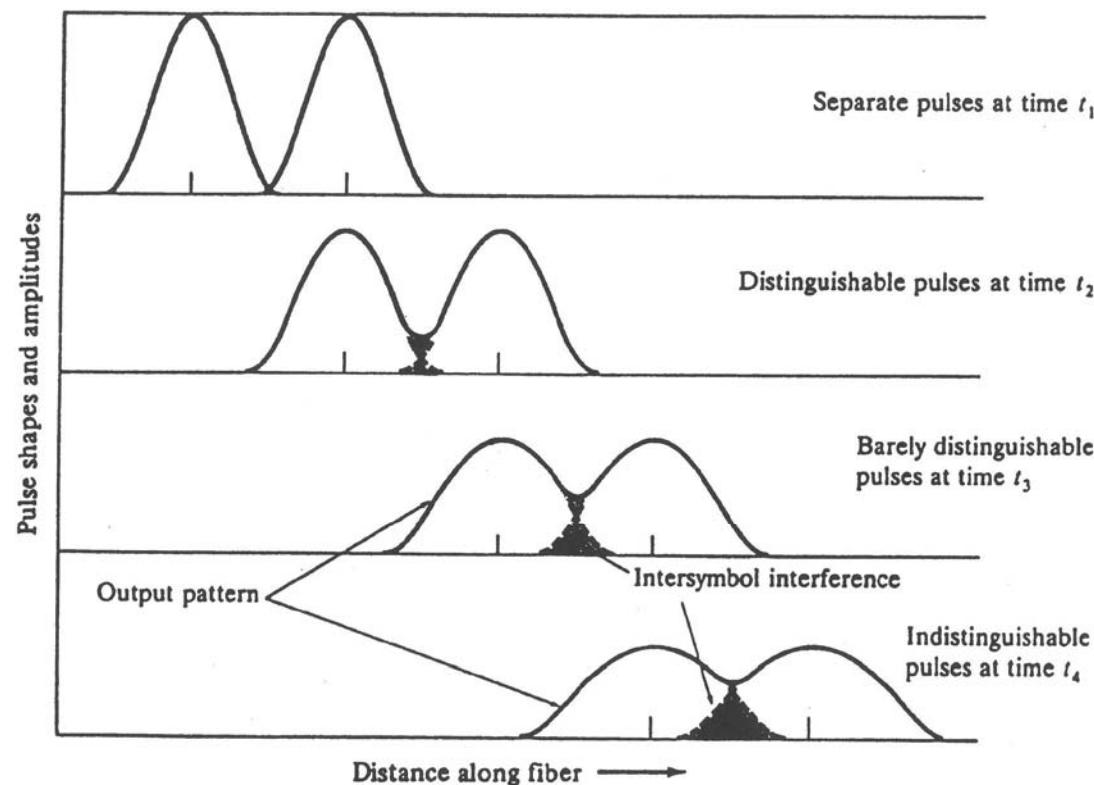


- Uslijed proširenja signala može doći do intersimbolne interferencije.
- Iz gornje slike slijedi da smijemo dozvoliti da se bit proširi za polovicu ($\Delta T_{\max} \approx T_B / 2$) i pri tome će intersimbolna interferencija biti dovoljno mala. Potrebno je uočiti da je to približna ocjena (samo za određivanje reda veličine), tj. mogli smo uzeti i neki drugi faktor (npr. $B_0 \approx 1 / \Delta T$).
- Ograničenje na birzinu prijenosa i maksimalnu duljinu optičke veze:

$$\Delta T \leq \frac{T_0}{2} \quad \text{odnosno} \quad B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}$$

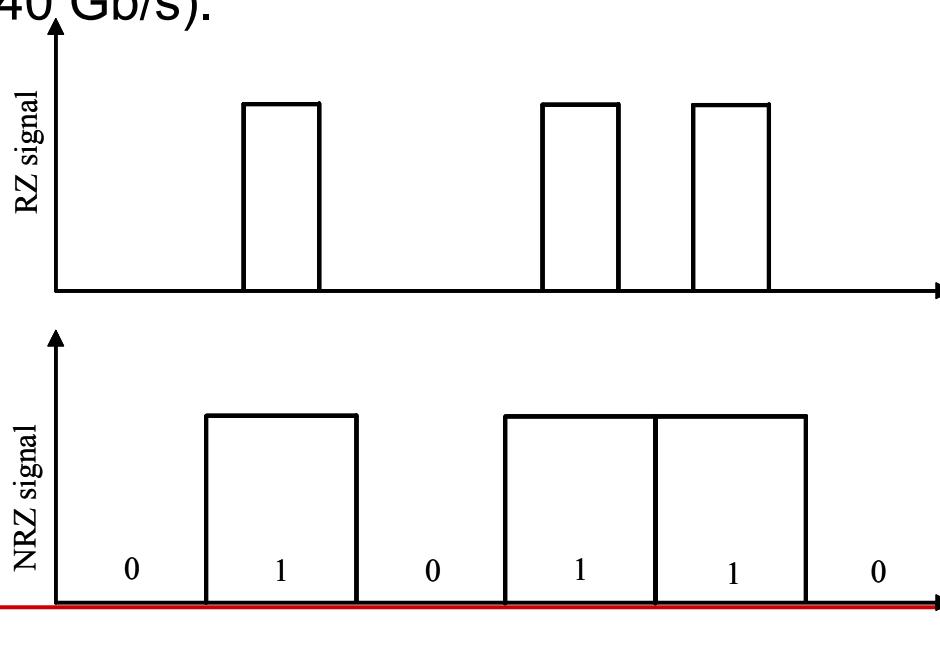
Disperzija – proširenje signala

- Ilustracija intersimbolne interferencije uslijed disperzije:



RZ i NRZ format

- Većina današnjih optičkih komunikacijskih sustava koristi intezitetnu modulaciju. Pri tome je logička jedinica predstavljena signalom optičke snage P_1 , a logička nula signalom optičke snage P_0 .
- U idealnom slučaju P_0 bi trebala biti jednaka nuli, no iz praktičnih razloga uvjek imamo neku malu snagu u logičoj nuli.
- Koriste se dva formata pri prijenosu: NRZ (nonreturn-to-zero) i RZ (return-to-zero). U komercijalnim sustavima uglavnom se koristi NRZ format, dok se RZ format koristi u sustavima koji rade na vrlo velikim brzinama (40 Gb/s).



Disperzija - ograničenje na brzinu prijenosa

- Spektralna širina signala Δf definira se kao 3 dB širina, odnosno širina kada spektar padne za 3dB u odnosu na maksimalnu vrijednost.
- Za NRZ format približna je veza između spektralne širine signala i maksimalne brzine bita (argument sinus funkcije približno je jednak $\pi/2$):

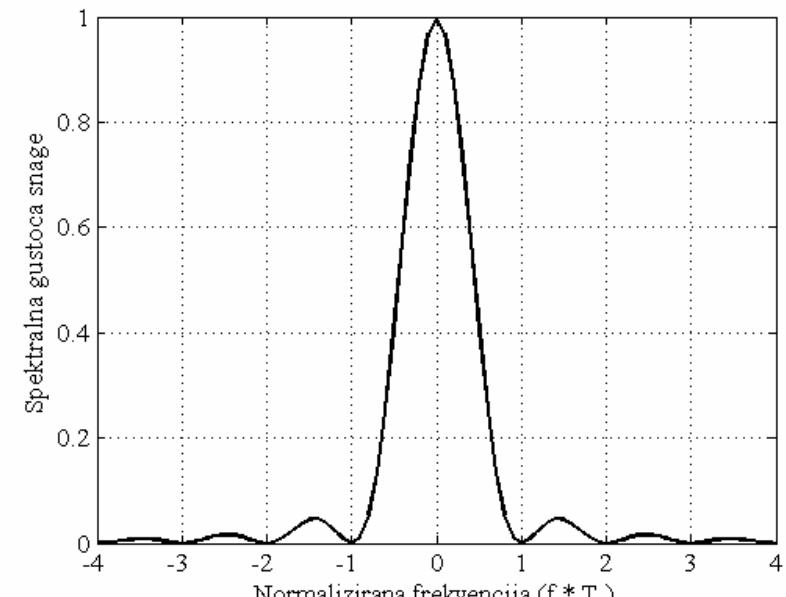
$$(\Delta\omega) \cdot T_b / 2 = 2\pi (\Delta f) \cdot T_b / 2 \cong \pi/2$$

$$T_b \cong 1/(2 \cdot \Delta f)$$

$$B_0 \cong 2 \cdot \Delta f$$

- Za RZ format signala sa $T_b = T_0 / 2$ približno vrijedi

$$B_0 \cong \Delta f$$



$$S_A(\omega) = \frac{P_0 T_b}{4} \left(\frac{\sin(\omega T_b / 2)}{\omega T_b / 2} \right)^2$$

Primjer strateške odluke

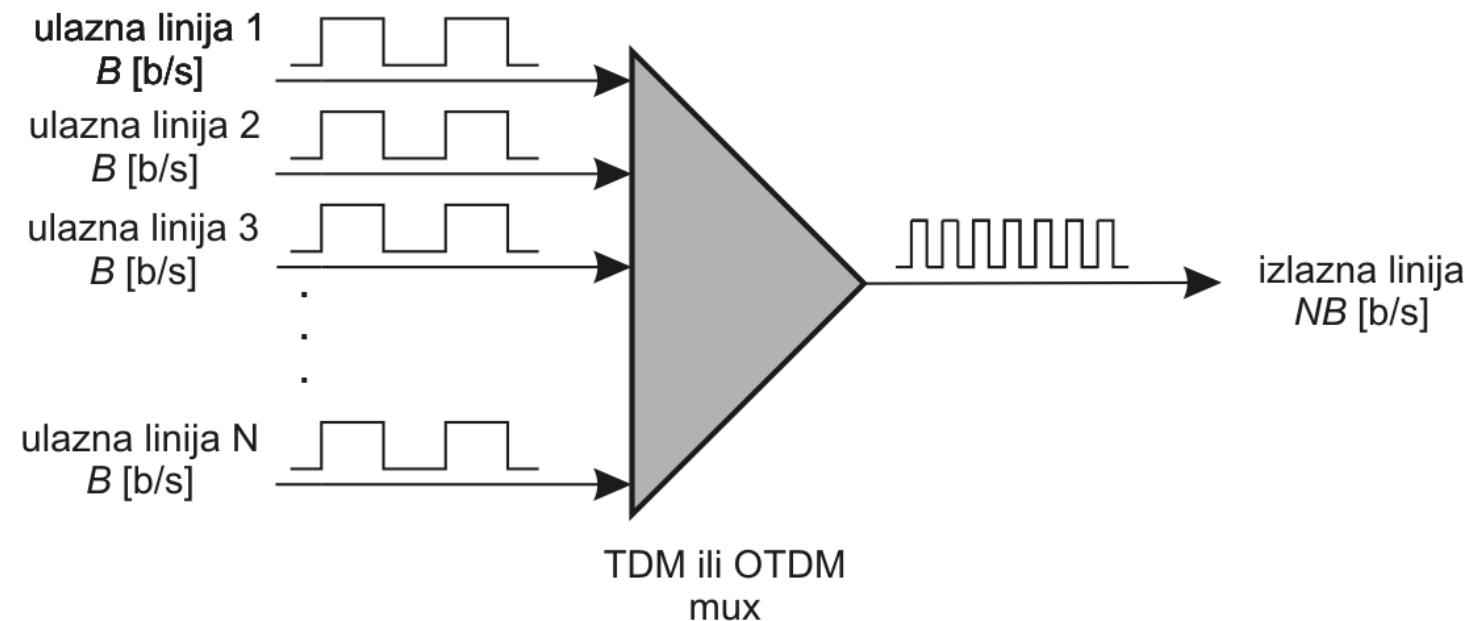
- tehnike multipleksiranja signala

Dva osnovna načina multipleksiranja u optičkim komunikacijskim sustavima:

- TDM - multipleksiranje u vremenskoj domeni
(TDM – time division multiplexing)
- WDM - multipleksiranje po valnim duljinama
(WDM – wavelength division multiplexing)

Tehnike multipleksiranja signala

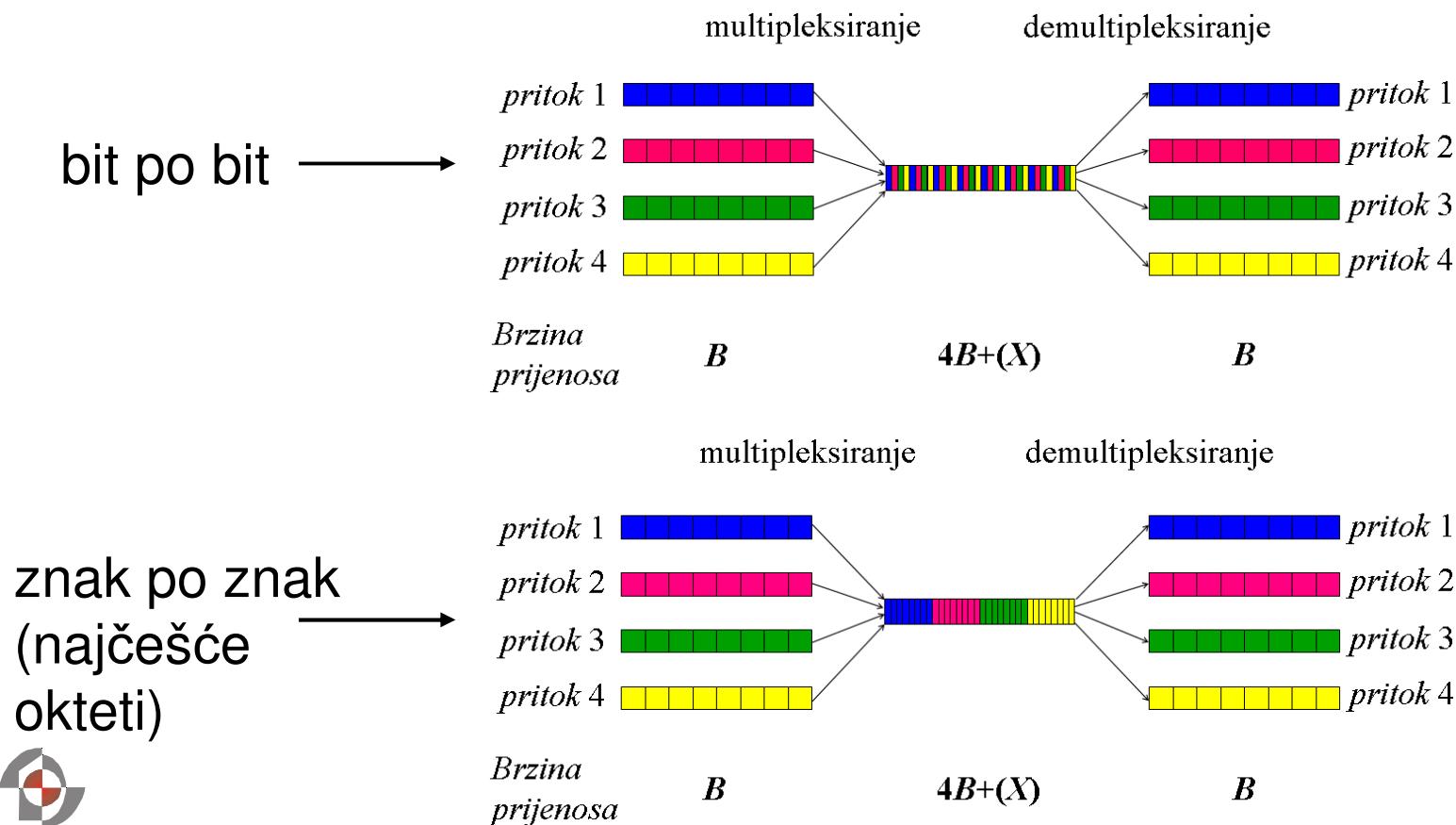
TDM - multipleksiranje u vremenskoj domeni
(TDM – time division multiplexing)



Uočiti: brzina prijenosa i format ulaznih podataka
je strogo određeno.

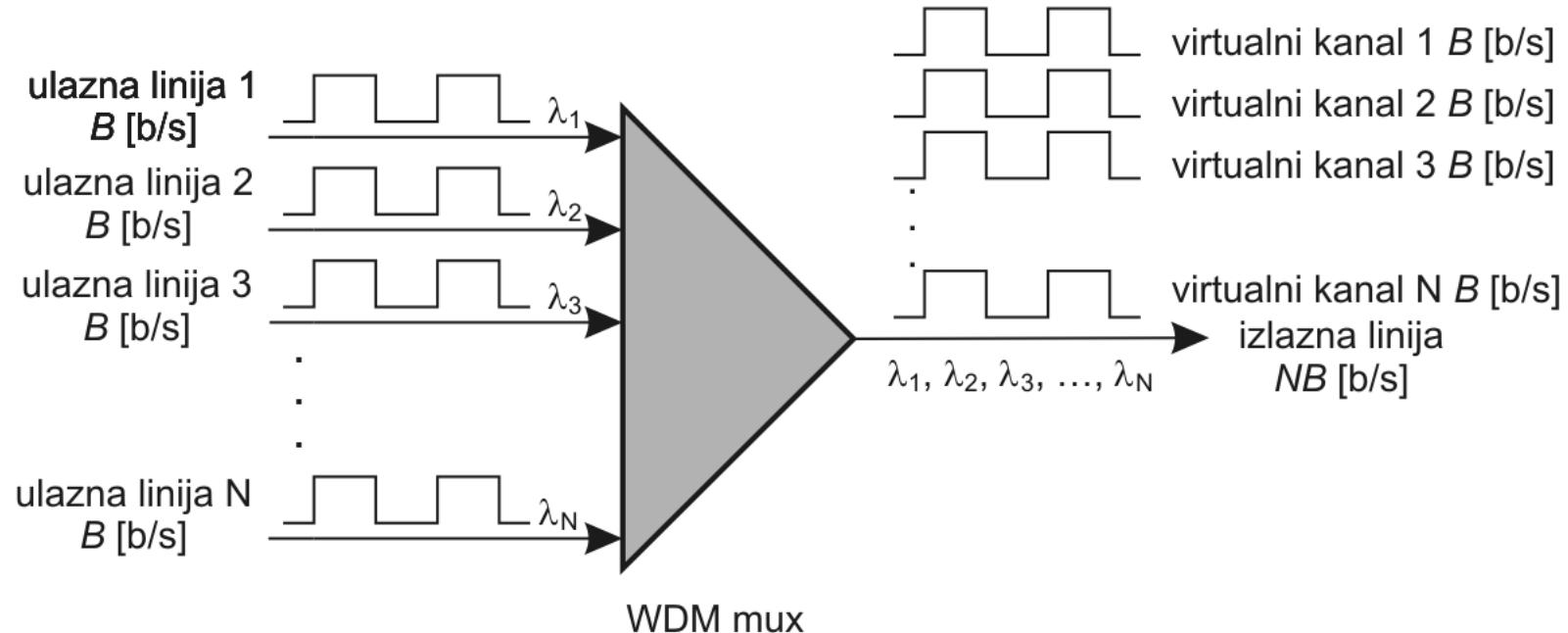
Tehnike multipleksiranja signala

TDM multipleksiranje digitalnih pritoka provodi se na dva načina:
bit po bit i znak po znak.



Tehnike multipleksiranja signala

WDM - multipleksiranje po valnim duljinama
(WDM – wavelength division multiplexing)



Uočiti: brzina prijenosa i format ulaznih podataka mogu biti proizvoljni.

WDM

WDM – sustav gdje se različiti kanali prenose različitim valnim duljinama.

Uočiti da pojedini signali mogu već biti multipleksirani (npr. TDM ili FDM).

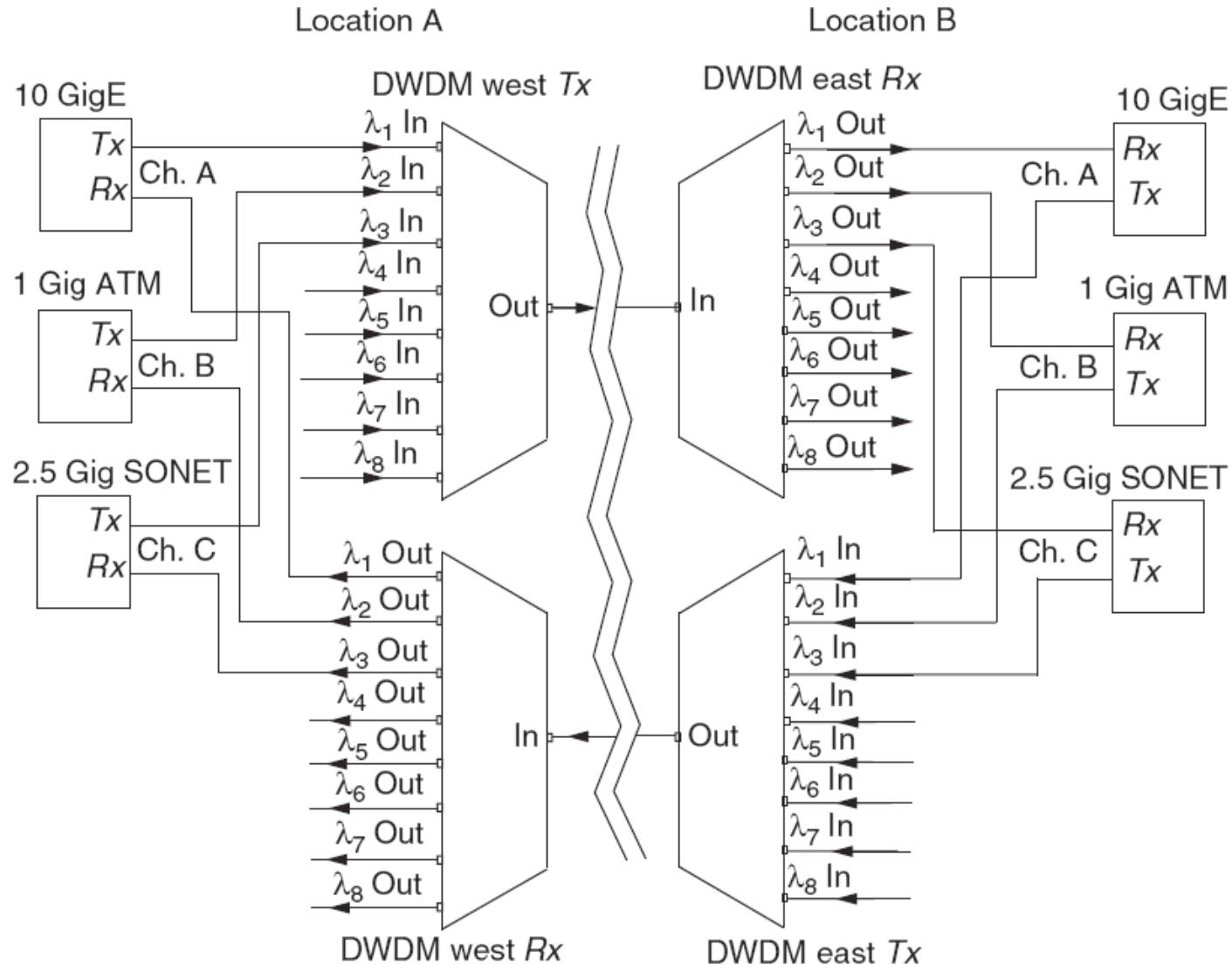
Stoga je prirodni put multipleksiranja:

1. TDM način mutipleksiranja - do brzine prijenosa $\sim 10 \text{ Gb/s}$
2. WDM način multipleksiranja – za veće brzine prijenosa.

Za razliku od TDM gdje pojedini signali moraju imati određeni format (kako bi mogli biti multipleksirani), kod WDM-a nema nikakvog ograničenja na pojedine signale. Npr. jedan signal može biti analogno modulirani, a drugi digitalno.

Najjednostavniji WDM – jedan kanal na $1,3 \mu\text{m}$, a drugi kanal na $1,55 \mu\text{m}$. Budući da su detektori širokopojasni, potrebno je filtrom razdvojiti signale na prijemu.

Primjer WDM sustava



DWDM

Gusti WDM (DWDM - Dense WDM)

Nema stroge definicije, odnosi se na WDM gdje razmak kanala nije veći od nekoliko nm.

Standardi:

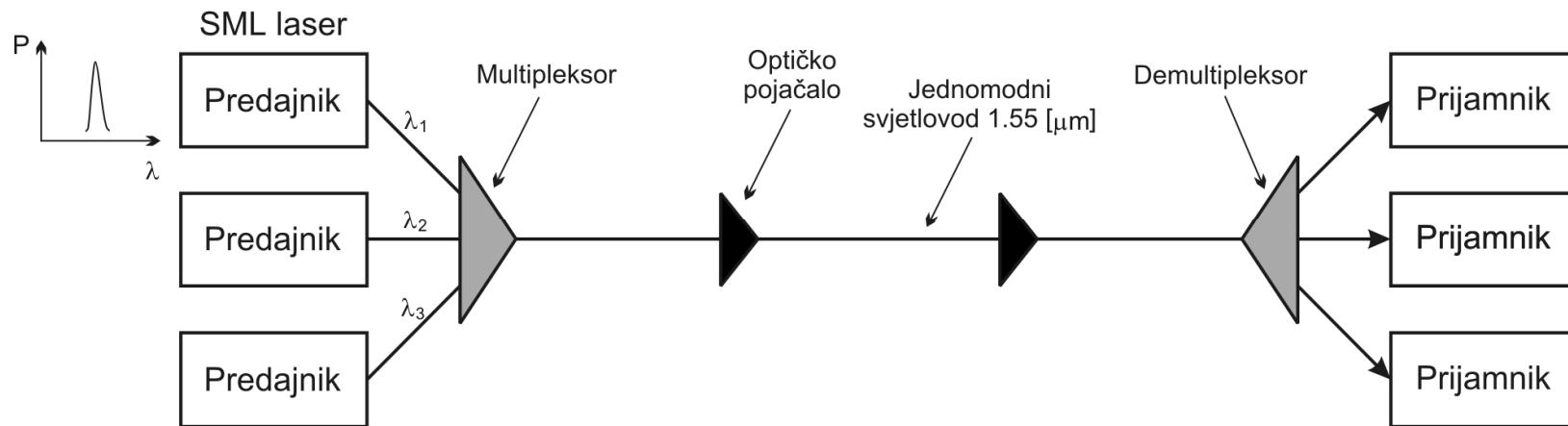
- razmak kanala 100 GHz (~0.8 nm)
- razmak kanala 50 GHz (~0.4 nm)

Danas su komercijalno dostupni sustavi od 160 kanala ($\times 10 \text{ Gb/s} = 1,6 \text{ Tb/s}$).

Problem kod velikog broja kanala je bliski razmak valnih duljina. To predstavlja stroge zahtjeve na opremu, posebno lasere, što podiže cijenu opreme (potrebno je imati temperaturno stabilizirane lasere).

Ponajviše se koriste se valne duljine u C pojasu (1530 – 1560 nm) i L pojasu (1570 – 1605 nm) gdje postoje optička EDFA pojačala.

DWDM sustav s optičkim pojačalima



- DWDM sustav s optičkim pojačalima – moguće je postići optičke veze (linkove) na puno veće udaljenosti (primjer: podmorska veza Europa-SAD; svakih ~ 80 km nalazi se optičko pojačalo)
- Problem s klasičnim regeneratorima – za svaku valnu duljinu trebalo bi posebno napraviti regenerator (koji u sebi sadrži opto-električnu pretvorbu, sam regenerator te elektro-optičku pretvorbu) \Rightarrow izuzetno složeno i skupo rješenje.

CWDM

Grubi WDM (CWDM - Coarse WDM)

Jeftiniji WDM (jeftinija oprema), pogodan za sustave s manjim udaljenostima između repetitora (\Rightarrow regionalne mreže).

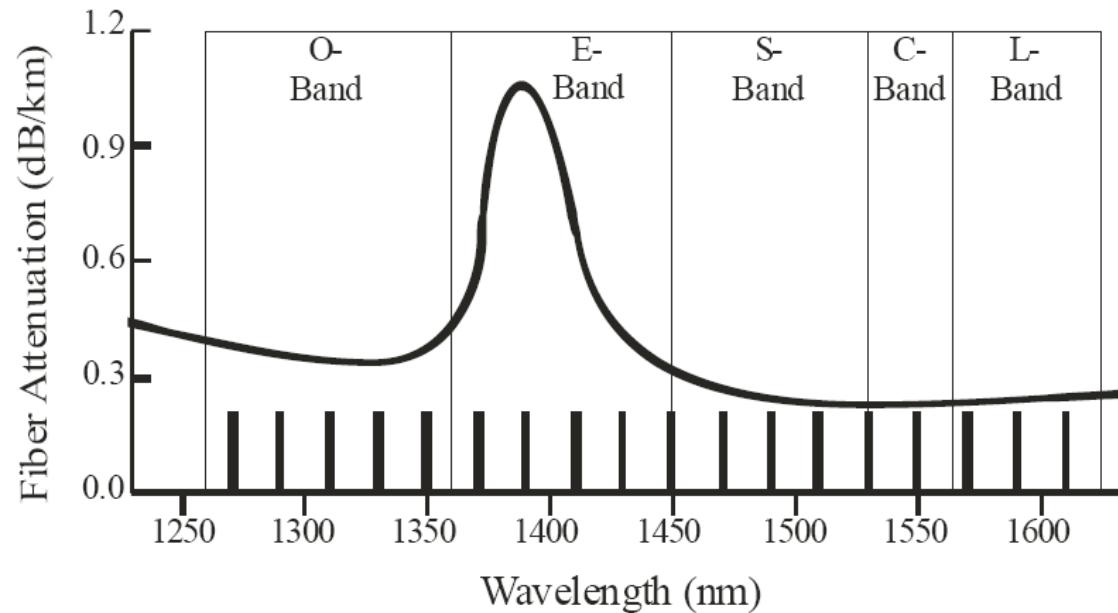
Standard koji dopušta jeftinije komponente za WDM mreže koje dopuštajue veće tolerancije (posebno u odnosu na valnu duljinu).

Standard :

- 20 nm razmak kanala (kanali su smješteni u II. i III. komunikacijskom prozoru)
- Korištene valne duljine (ITU-T G 694.2):
1.271 μm , 1.291 μm , 1.311 μm , ..., 1.531 μm , 1.551 μm , 1.571 μm , 1.591 μm i 1.611 μm (ukupno 18 valnih duljina).

CWDM

- Valne duljine u CWDM sustavima:



- Definicija frekvencijskih pojaseva (odnosno pojaseva valnih duljina):

Band	Name	Wavelength Range [nm]
O-band	Original	1260 - 1360
E-band	Extended	1360 - 1460
S-band	Short	1460 - 1530
C-band	Conventional	1530 - 1565
L-band	Long	1565 - 1625
U-band	Ultra-long	1625 - 1675

Usporedba DWDM i CWDM

Parametar	DWDM	CWDM
Razmak kanala	0.8 nm ili 0.4 nm (100GHz ili 50 GHz)	20 nm
Broj kanala	preko 160	do 18
Optičko pojačanje	da	vrlo skupo i komplikirano
Tehnološka kompleksnost	velika	srednja
Laseri	Jednomodni, potrebna regulacija temperature odnosno valne duljine	Jednomodni, nema regulacije temperature odnosno valne duljine
Tržište	Velike udaljenosti, metro	Metro, pristupne, lokalne

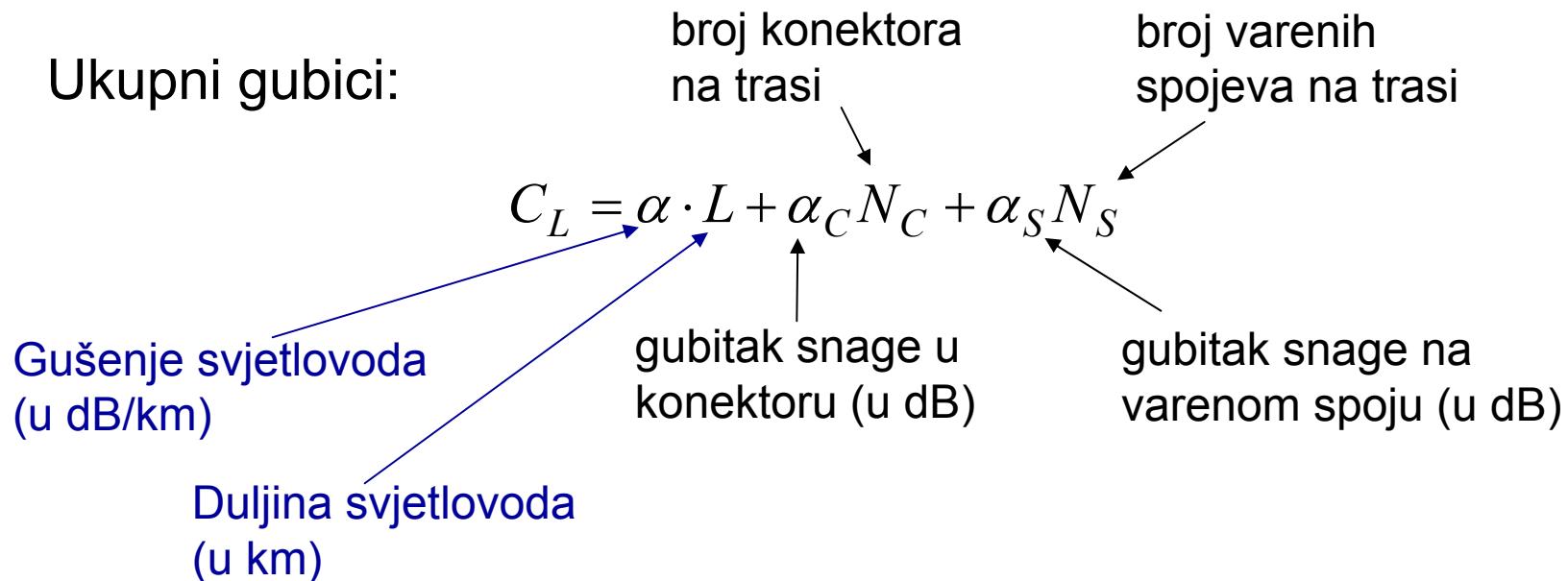
Projektiranje optičkog sustava

1. Proračun snage ("power budget")

- Proračun snage optičkog sustava radi se kako bi se osigurala potrebna razina snage na ulazu u optički prijemnik
 - Najmanja srednja razina optičke snage koja je potrebna da sitigne na prijamnik (uz BER manji od maksimalno dozvoljenoga) naziva se osjetljivost prijemnika i označava se \bar{P}_{pr}
 - Izražavat ćemo vrijednost u decibelima, s time da se optičke snage (\bar{P}_{od} i \bar{P}_{pr}) izražavaju u dBm



Projektiranje optičkog sustava

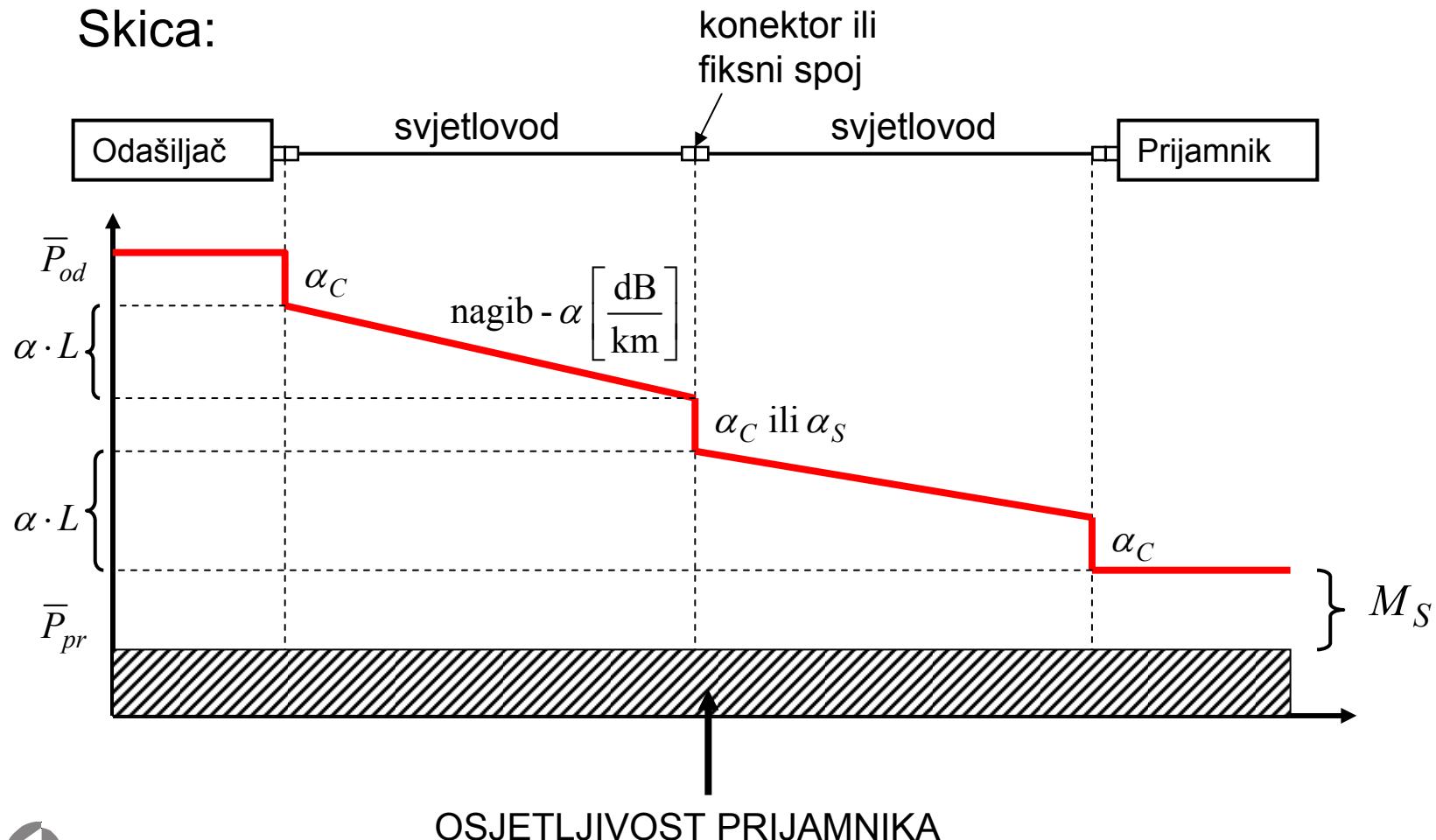


Margina sustava M_S :

- zbog kratkoročnih promjena u sustavu - ponajviše zbog temperaturne varijacije (**tipično 3 dB**)
 - zbog dugoročnih promjena u sustavu – ponajviše zbog starenja komponenti odnosno degradacije komponenti (**tipično 3 dB**)
- ⇒ **tipična margina sustava $\geq 6 \text{ dB}$!**

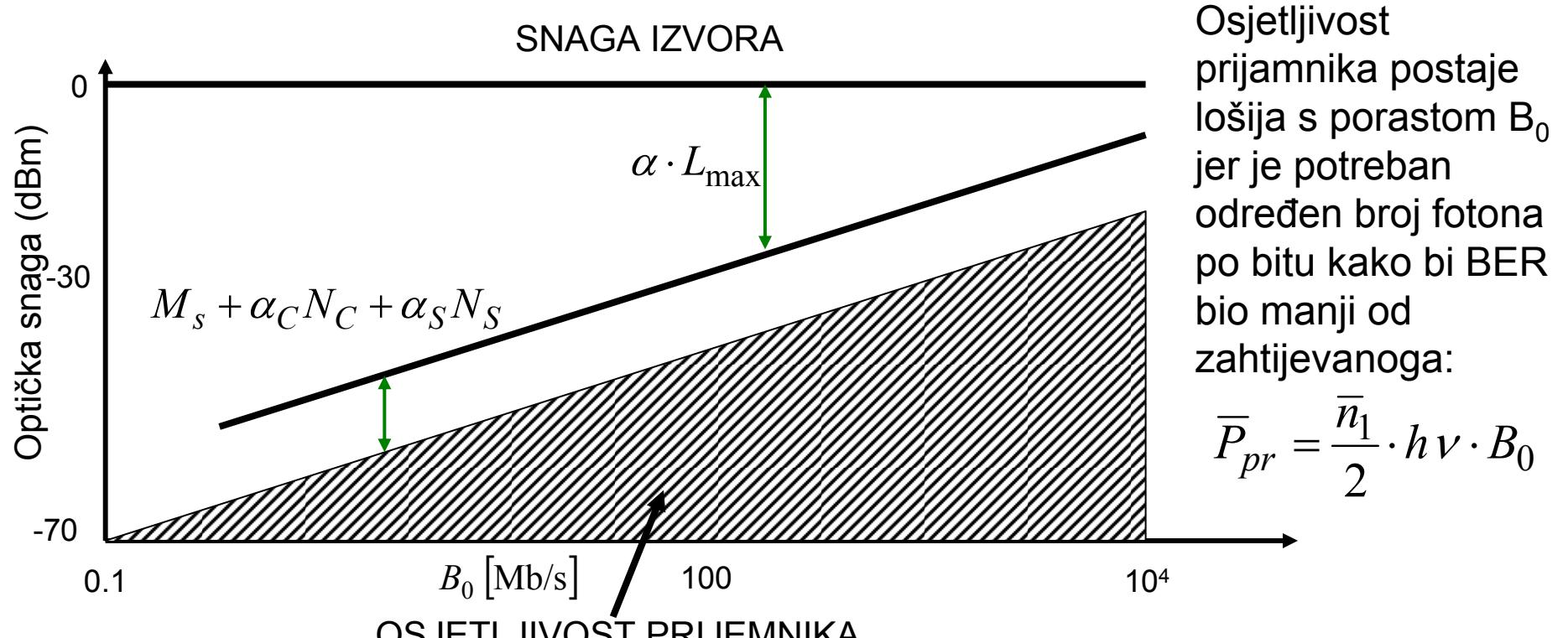
Projektiranje optičkog sustava

Skica:



Projektiranje optičkog sustava

Ovisnost maksimalne duljine linka L_{\max} o brzini prijenosa:



Projektiranje optičkog sustava

- Osjetljivost prijamnika postaje lošija s porastom B_0 jer je potreban određen broj fotona po bitu kako bi BER bio manji od zahtijevanoga:

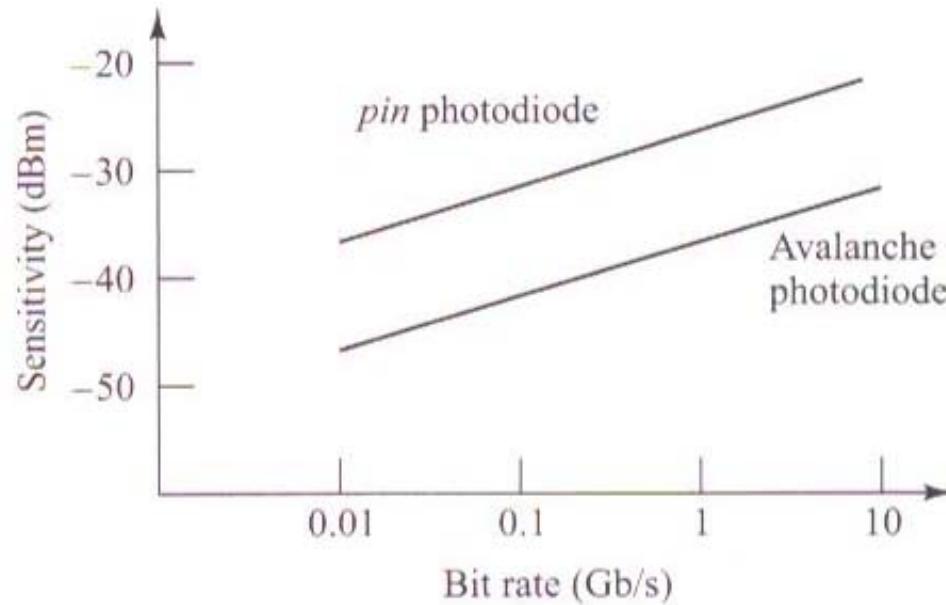
$$\bar{P}_{pr} = \frac{\bar{n}_1}{2} \cdot h\nu \cdot B_0$$

- Točnu ovisnost dobivamo iz izraza za osjetljivost prijamnika dobivenu uz ograničenje na maksimalni iznos BER-a:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{pr} &= \frac{Q}{\Re} \left(eF_A Q \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \\ &= \frac{Q}{\Re M} \left(\frac{eM F_A Q B_0}{2} + \left(\frac{4k_B T_{ef} B_0}{2R_L} \right)^{1/2} \right)\end{aligned}$$

Projektiranje optičkog sustava

- Ovisnos osjetljivosti PIN i APD prijamnika o brzini prijenosa (primjer dvije fotodiode):



- Približna ovisnost (primjer ove dvije fotodiode):

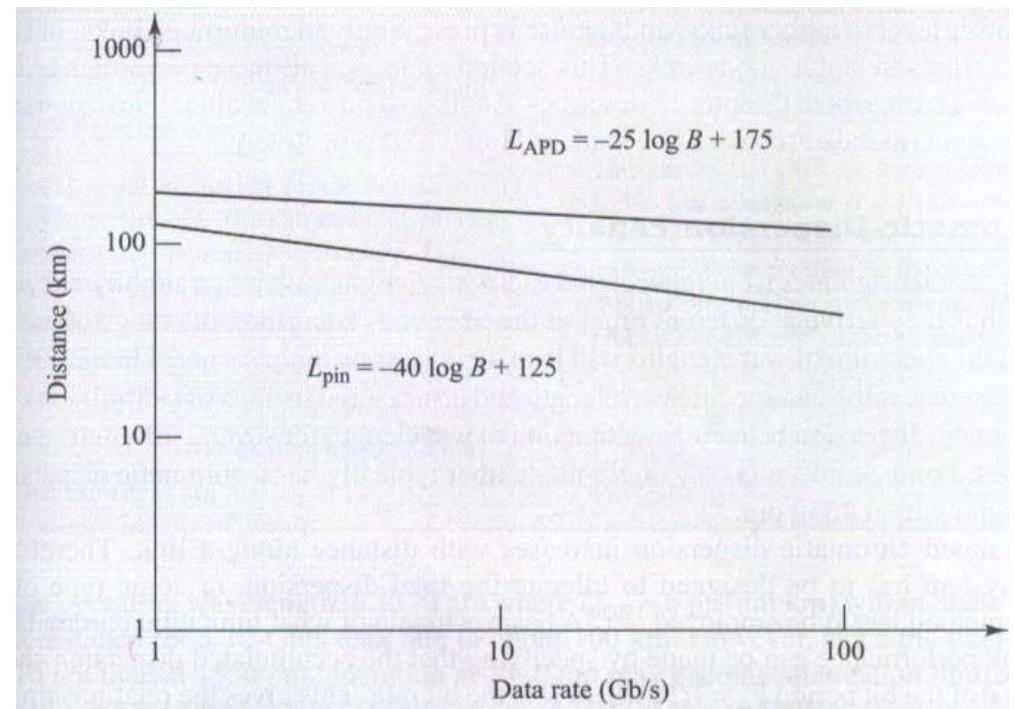
$$\bar{P}_{pr}^{PIN} \approx 8 \cdot \log_{10} B_0 - 28 \quad [\text{dBm}]$$

$$\bar{P}_{pr}^{APD} \approx 5 \cdot \log_{10} B_0 - 38 \quad [\text{dBm}]$$

Projektiranje optičkog sustava

- Pitanje – kolika je maksimalna udaljenost linka za prijamnik sa predhodne prozirnice uz $\bar{P}_{od} = 0 \text{ dBm}$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$ i $M_S = 3 \text{ dB}$.

$$\begin{aligned}L_{PIN} &= (\bar{P}_{od} - \bar{P}_{pr} - M_S) / \alpha \\&= (0 - 8 \cdot \log_{10} B_0 + 28 - 3) / 0.2 \\&= -40 \cdot \log_{10} B_0 + 125 \\L_{APD} &= (\bar{P}_{od} - \bar{P}_{pr} - M_S) / \alpha \\&= (0 - 5 \cdot \log_{10} B_0 + 38 - 3) / 0.2 \\&= -25 \cdot \log_{10} B_0 + 175\end{aligned}$$

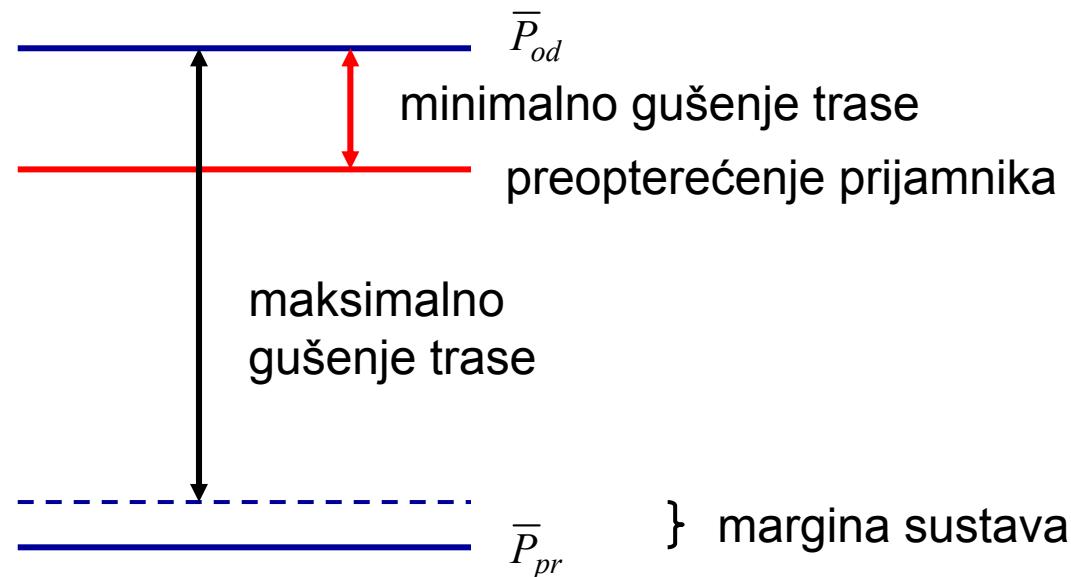


Projektiranje optičkog sustava

Kod projektiranja veze treba paziti i na preopterećenje prijamnika.

Ako imamo premalo gušenje trase, treba ugraditi atenuator na prijamniku (npr. 10 dB atenuator)

Priručno rješenje – par namotaja svjetlovoda oko olovke (za $\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$).



Projektiranje optičkog sustava

2. Proračun vremena porasta

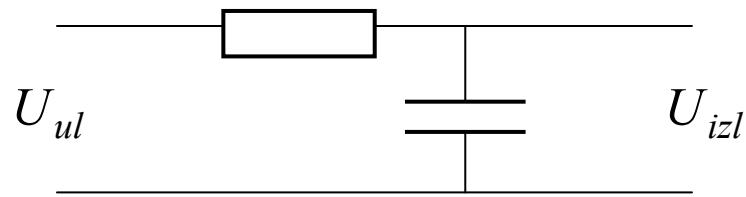
- proračun vremena porasta služi da se provjeri da li je sustav sposoban ostvariti željenu brzinu prijenosa
- čak i kada je svaka komponenta sustava sposobna ostvariti veću brzinu prijenosa od zadane brzine, može se dogoditi da sustav u cijelini to nije sposoban

Vrijeme porasta T_r linearog sustava je vrijeme koje je potrebno da odziv sustava poraste sa 10% na 90% konačne vrijednosti.



Projektiranje optičkog sustava

Kao primjer uzet ćemo linearni RC sklop:



Vrijeme porasta iznosi:

$$T_r \approx 2,2RC$$

$\ln 9$

Fourierovom transformacijom dobivamo prijenosu funkciju RC sklopa:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j2\pi f RC}$$

Širina pojasa odgovara frekvenciji za koju je $|H(f)|^2 = \frac{1}{2}$

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi RC}$$

imamo niskopropusni filter



$$\text{Dobivamo: } T_r = \frac{2,2}{2\pi\Delta f} = \frac{0,35}{\Delta f}$$

Projektiranje optičkog sustava

Inverzni odnos T_r i Δf vrijedi za sve linearne sustave, ali općenito produkt T_r i Δf ima različitu vrijednost od 0,35. Za projektiranje optičkih sustava može se koristiti vrijednost 0,35 kao konzervativna granica.

U digitalnim sustavima možemo koristiti dva formata: RZ (return to zero) i NRZ (non-return to zero).

Za NRZ/RZ vrijedi približna ovisnost maksimalne brzine bita i širine pojasa:

$$B_0 \approx 2\Delta f \text{ za NRZ} \longrightarrow B_0 \leq \frac{0,7}{T_r} \text{ za NRZ}$$

$$B_0 \approx \Delta f \text{ za RZ} \longrightarrow B_0 \leq \frac{0,35}{T_r} \text{ za RZ}$$

Projektiranje optičkog sustava

Ukupno vrijeme porasta optičkog sustava približno je jednako:

$$T_r^2 = T_{r,od}^2 + T_{r,sv}^2 + T_{r,pr}^2$$

vrijeme porasta
odašiljača vrijeme porasta
svjetlovoda vrijeme porasta
prijemnika

Vremena porasta za odašiljač u pravilu je poznato za konkretnе komponente.

Vrijeme porasta za odašiljač ovisi o elektroničkim sklopovima koji pogone optički izvor. Za LED diodu T_r iznosi nekoliko nanosekundi dok za laser može biti manje od 0,1 ns.

Projektiranje optičkog sustava

Vrijeme porasta za prijemnik određeno je s 3 dB širinom pojasa ($T_r = 0,35/\Delta f$).

Vrijeme porasta za svjetlovod:

$$T_{r,sv}^2 = T_{r,\text{mod}}^2 + T_{r,\text{krom}}^2$$

vrijeme porasta uslijed međumodalne disperzije vrijeme porasta uslijed kromatske disperzije

Možemo aproksimirati $T_{r,sv}$ s vremenom rasipanja:

$$T_{r,sv} \cong \Delta T$$

Projektiranje optičkog sustava

(a) Višemodni svjetlovod s stepeničastim indeksom loma

$$T_{r,sv} \cong T_{r,mod} \cong \Delta T \cong \frac{n_1 \Delta}{c} L$$

(b) Gradijentni svjetlovod

$$T_{r,sv} \cong T_{r,mod} \cong \Delta T \cong \frac{n_1 \Delta^2}{4c} L$$

(c) Jednomodni svjetlovod

$$T_{r,sv} \cong T_{r,krom} \cong |D| \Delta \lambda L$$