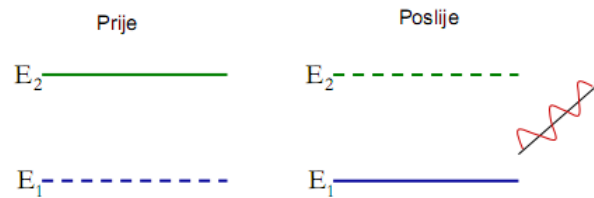


1. Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija; izgled lasera

- Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija su pojave na kojima se bazira rad lasera

SPONTANA EMISIJA

- Spontana emisija je kada atom spontano prijeđe iz stanja E_2 (stanje veće energije) u stanje E_1 (stanje manje energije) te pri tome emitira foton



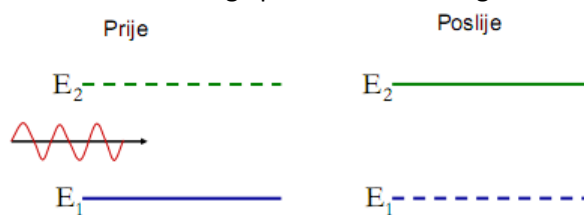
$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

- Frekvencija emitiranja:
- Val se može emitirati u bilo kojem smjeru, te može imati bilo koju polarizaciju

$$P_{spont} = h \nu_{21} N_2 A_{21}$$

APSORPCIJA

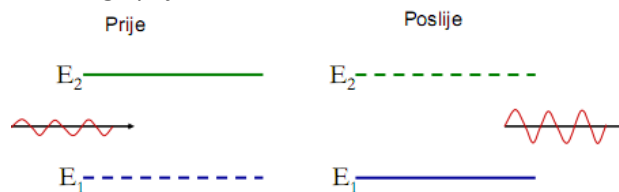
- Atom apsorbira foton iz ulazne zrake i stoga prelazi u više energetska stanje



$$P_{apsoorb} = h \nu_{21} B_{12} N_1 \rho(\nu_{21})$$

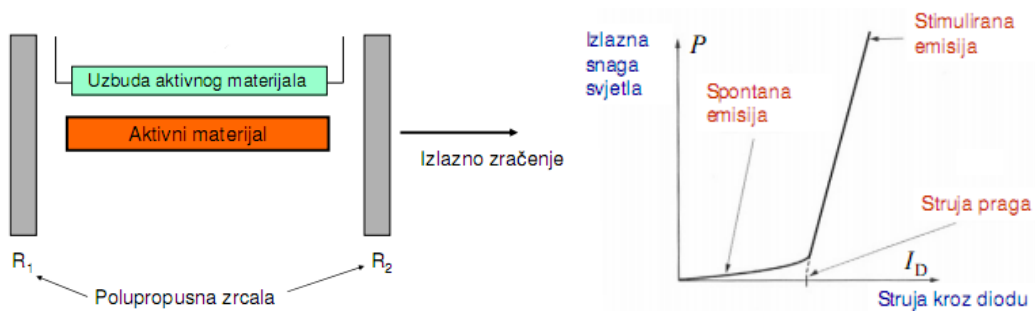
STIMULIRANA EMISIJA

- Reverzni proces u odnosu na apsorpciju. Atom daje energiju $h\nu$ koja se koherentno zbraja (na istoj frekvenciji, iste polarizacije, istog smjera putovanja, te iste faze kao i stimulacijski val) s upadnim elektromagnetskim valom, te ga pojačava



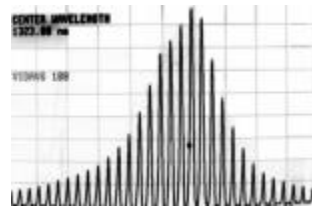
$$P_{stimul} = h \nu_{21} N_2 B_{21} \rho(\nu_{21})$$

2. Vrste laserskih dioda (Fabry-Pérot, DFB, DBR, VCSEL), P-I karakteristika, spektralna karakteristika



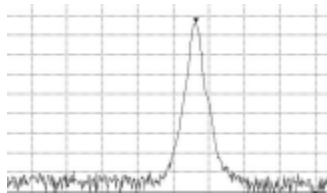
FABRY-PEROT

- Ima jedan transverzalni mod, više longitudinalnih (primjena u CD/DVD, štampači...), najjeftiniji



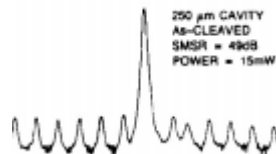
DBR (DISTRIBUIRANO BRAGGOVO ZRCALO)

- Distribuirano Braggovo zrcalo selektira longitudinalni mod (jedan transverzalni i jedan longitudinalni mod)
- Zbog komplicirane tehnologije, cijena takve diode je dosta visoka



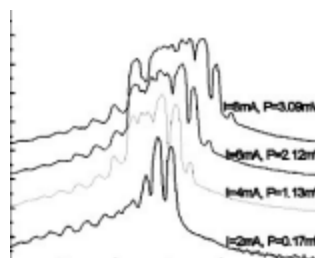
DFB (DISTRIBUTED FEED-BACK LASER)

- Aktivni sloj je ujedno i jezgra planarnog svjetlovoda (jedan transverzalni i jedan longitudinalni mod)
- Distribuirano zrcalo se često kombinira sa zrcalom na kraju čipa



VCSEL (LASER S VERTIKALNIM REZONATOROM)

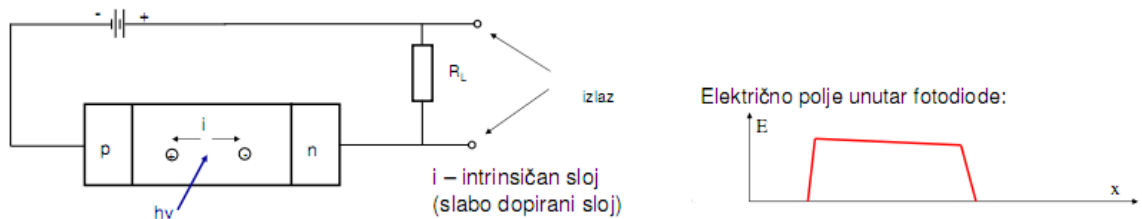
- Rezonator je okomit na ravninu čipa
- Jedan longitudinalni mod, jedan ili više transverzalnih modova
- Pojaćanje mnogo manje nego u laserima u ravnini čipa jer je duljina aktivnog sloja vrlo mala (~ 25 nm)
- Zrcala moraju biti vrlo visokog koeficijenta refleksije (>99.5%)



3. Vrste fotodetektora (PIN i APD fotodetektorske diode), parametri fotodetektora (kvantna djelotvornost, odziv, vrijeme porasta, frekvencijska širina pojasa)

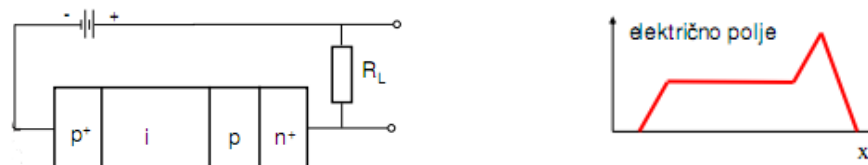
- Fotodetektor - bitan element o kojem ovisi kvaliteta cijelog prijamnog sustava
 - pretvara tok fotona u tok električnih nosioca, tj. električne struje
 - zasniva se na unutarnjem fotoelektričnom efektu (fotoionizacija, lavinski efekt)
 - mora imati veliku osjetljivost, nisku razinu vlastitog šuma, širok frekvencijski pojas, kratko vrijeme odziva i linearnost detekcije u širokom području
- Fotoionizacija - ako svjetlost pri upadu u materijal ima dovoljno visoku frekvenciju tako da je $h\nu \geq E_g$, energija fotona stvarat će par elektron-šupljina

PIN FOTODIODA



- Uslijed prisutnog električnog polja u intrinzičnom I-sloju PIN diode, elektroni će se gibati prema N-sloju, a šupljine prema P-sloju (dioda je reverzno polarizirana)

LAVINSKA FOTODIODA



- APD dioda (lavinska fotodioda) je zapravo PIN dioda 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

KVANTNA DJELOTVORNOST

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

ODZIV

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

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

- 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 linearno ovisi o λ_0 ograničeno.

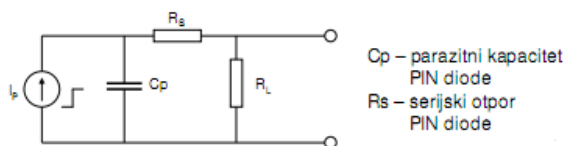
$$\text{PIN} \rightarrow I_D = \frac{\eta e}{h\nu} P = \mathfrak{R}P \qquad \text{APD} \rightarrow I_D = M \frac{\eta e}{h\nu} P = M \mathfrak{R}P$$

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

FREKVENCIJSKA ŠIRINA POJASA DETEKTORA

- Određuje se preko vremena porasta T_r - vrijeme potrebno da struja promjenu od 10% do 90% vrijednosti uz skokovitu promjenu pobude

Ekvivalentni nadomjesni RC sklop



Vrijeme porasta:

$$T_r = \ln 9 (\tau_{pr} + \tau_{RC})$$

Vremenska konstanta RC sklopa: $\tau_{RC} = (R_L + R_s) \cdot C_p$

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{pr} + \tau_{RC})]^{-1} \qquad \Delta f = \frac{2.197}{2\pi T_r} = \frac{0.35}{T_r}$$

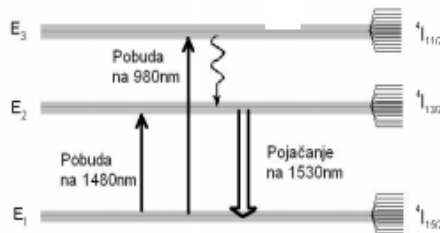
4. Svjetlovodna pojačala, svojstva EDFA-pojačala, saturacija pojačanja, shema EDFA- pojačala

- Optička pojačala su pojačala koja pojačavaju signal u optičkoj domeni, tj. 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), a to je posebno važno kod WDM sustava
- Primjena: Pojačalo snage (povećanje snage predajnika), predpojačalo (povećanje osjetljivosti prijemnika), linijska pojačala (kompenzacija gubitaka pri prijenosu), pojačala u LAN-u (kompenzacija gubitaka uslijed grananja signala)
- Optičko pojačalo je 1R regenerator – samo pojačava signal, pri tome dodaje šum spontane emisije, drugim riječima, nakon svakog optičkog pojačala pogoršava se odnos signal šum S/N
- Optičko pojačalo je u osnovi laser bez rezonantne šupljine

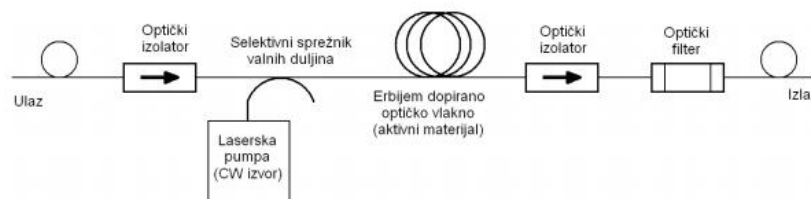
EDFA (ERBIJEM DOPIRANO SVJETLOVODNO POJAČALO)

- Jezgra svjetlovoda dopirana je Erbije
- Zbog amorfne prirode stakla od kojeg je načinjen svjetlovod, energetske 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
- EDFA pojačava signal na 1530nm-1565nm, a maksimalno pojačanje na otprilike 1531nm

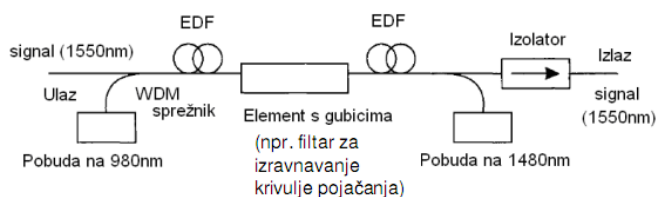
Izgled energetske nivoa



Izvedba s 1 pumpom



Izvedba s 2 pumpe

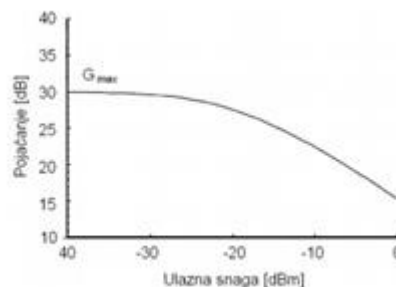


SATURACIJA (ZASIĆENJE) POJAČANJA

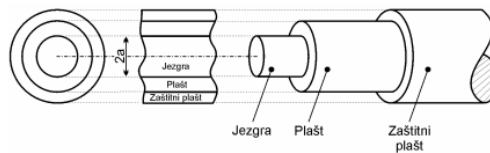
- Za velike ulazne snage ne postoji dovoljan broj atoma erbija (čak i da su svi atomi erbija u višem energetske stanju) pomoću kojih bi se postiglo maksimalno pojačanje, te zbog toga dolazi do zasićenja pojačanja

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

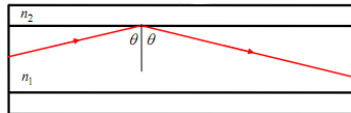
G_{max} – maksimalno pojačanje (bez zasićenja)
 P^{sat} – interna saturacijska snaga



5. Princip rada svjetlovoda, Snellov zakon, kritični kut, numerička apertura, vrste svjetlovoda



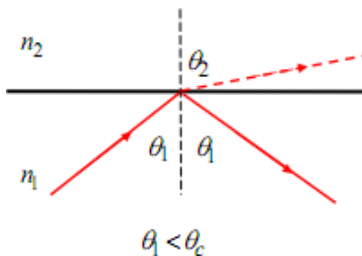
- Princip rada svjetlovoda se zasniva na totalnoj refleksiji svjetlosti unutar svjetlovoda



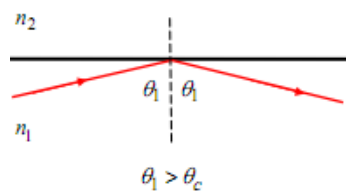
SNELLOV ZAKON

- Refleksije unutar svjetlovoda možemo opisati Snellovim zakonom u 3 karakteristična slučaja

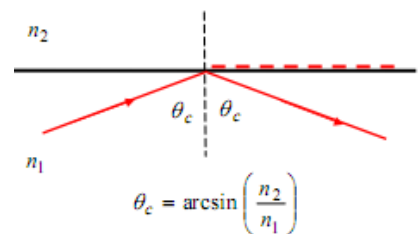
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Upadni kut je prevelik i dio zrake se reflektira van svjetlovoda



Upadni kut je manji od kritičnog kuta i sva svjetlost ostaje unutar svjetlovoda (Totalna refleksija)

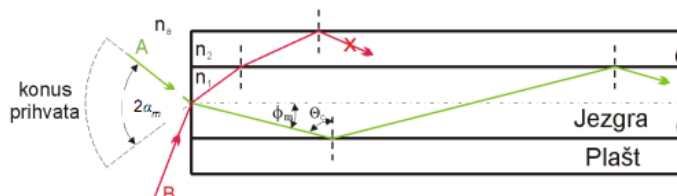


Upadni kut je jednak kritičkom kutu i zraka svjetlosti se širi granicom svjetlovoda

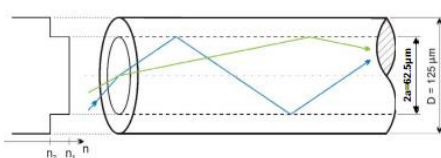
NUMERIČKA APERTURA

- Numerička apertura (NA) je mjera količine svjetlosti sakupljene u svjetlovod

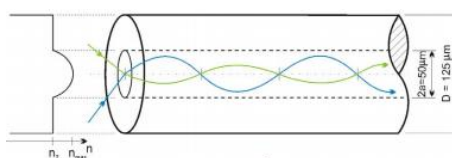
$$NA = n_a \sin \alpha_m = (2n \cdot \Delta n)^{1/2}$$



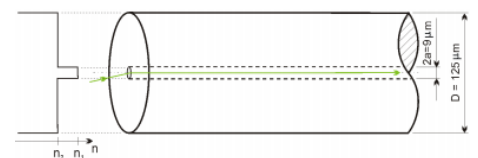
VRSTE SVJETLOVODA



Višemodni svjetlovod s stepeničastim profilom indeksa loma

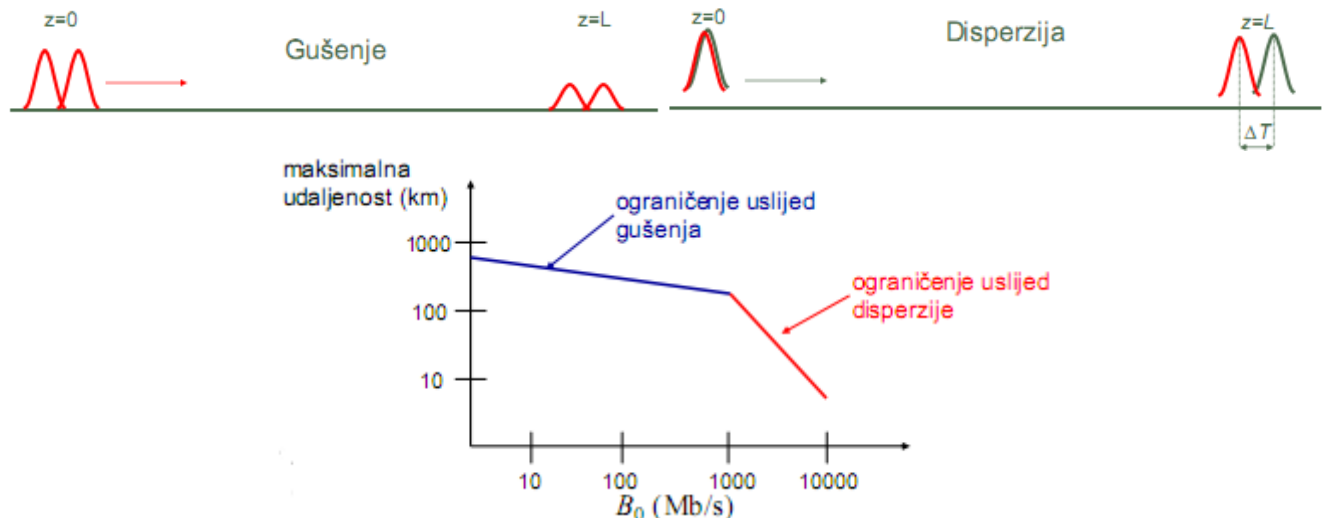


Višemodni svjetlovod s gradijentnim profilom indeksa loma

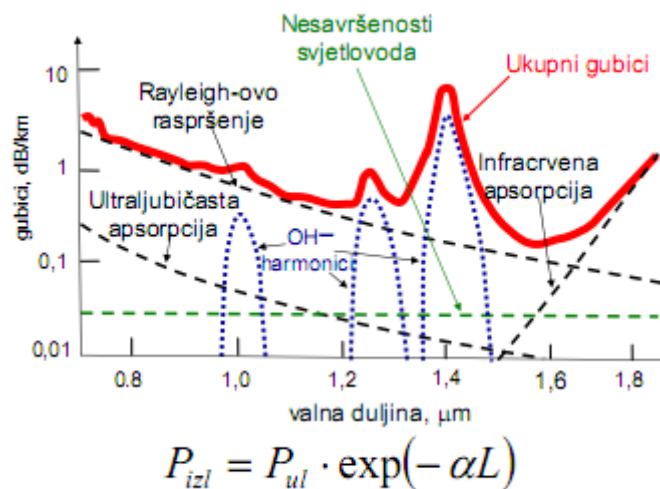


Jednomodni svjetlovod

6. Ograničenja u svjetlovodu: gušenje i disperzija; ovisnost maksimalne udaljenosti veze o brzini prijenosa, valnoj duljini i vrsti svjetlovoda



GUŠENJE



$$P_{izl} = P_{ul} \cdot \exp(-\alpha L)$$

MEHANIZMI KOJI UTJEČU NA GUŠENJE

- *Infracrvena apsorpcija* - zbog nje su svjetlovodi izrađeni na bazi kvarcnog stakla neupotrebljivi iznad $1.7 \mu\text{m}$
 - interakcijom foton – fonon prenosi se djelić svjetlosne energije u vibraciju molekula kremenog stakla SiO_2 , pojava je rezonantna i ima vrh kod $\lambda = 8 \mu\text{m}$.
- *Ultraljubičasta apsorpcija* - djelić svjetlosne energije se koristi pri interakciji foton - elektron za podizanje elektrona iz valentnog u vodljivi pojas na otprilike $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$
 - na valnoj duljini $\lambda \approx 0.14 \mu\text{m}$ se javlja rezonantni vrh gušenja
- *Rayleighovo raspršenje* - mehanizam raspršenja signala zbog lokalne varijacije indeksa loma (gustoće materijala) u amorfnoj masi (staklu) kojeg ne bi bilo da je staklo kristalna struktura
 - zbog lokalne varijacije indeksa loma dolazi do male djelomične refleksije (raspršenja) signala, ali pritom nema pretvorbe energije
 - frekvencijski je ovisno ($\alpha_{\text{Ray}} \sim 1/\lambda^4$)
- *Tehnološko gušenje* - vezano je uz tehnološke postupke pri proizvodnji svjetlovoda
 - moguće ih je smanjiti poboljšanjem postupka proizvodnje
 - gušenje od iona OH, gušenje uslijed nesavršenosti valovodne strukture, gušenje od nečistoće materijala
- *Gušenje uslijed savijanja* - kod savijanja svjetlovoda može se dogoditi da nisu ispunjeni uvjeti totalne refleksije na vanjskom obodu jezgre, pa dio zrake izlazi iz jezgre te zrači u okolinu
 - uslijed savijanja vlakna naravno može doći i do puknuća samog vlakna

DISPERZIJA

- Pojava proširenja i slabljenja signala

MEĐUMODALNA DISPERZIJA

- Za zrake koje putuju pod različitim kutovima, moraju proći različite udaljenosti, te zbog toga ne dolaze na odredište onako kako su poslone, tu pojavu zovemo *međumodalna disperzija*

$$T' = \frac{n_1 L}{c}$$

Aksijalna zraka

$$\frac{\Delta T}{L} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\Delta n}{c}$$

Zraka pod kutom φ

$$B_0 L \leq \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta n}$$

Ograničenje zbog
međumodalne disperzije

KROMATSKA DISPERZIJA

- Nastaje zbog ovisnosti grupne brzine o valnoj duljini i dijeli se na materijalnu i valovodnu disperziju
- Materijalna disperzija nastaje uslijed činjenice da indeks loma ovisi o valnoj duljini
- Valovodna disperzija nastaje uslijed činjenice da je koeficijent rasprostiranja β z funkcija valne duljine

$$D = \frac{\Delta T}{L \Delta \lambda}$$

Parametar kromatske
disperzije

$$B_0 L \leq \frac{1}{2 \Delta \lambda |D|}$$

Ograničenje na brzinu uslijed kromatske disperzije

$$B_0 L \leq \frac{1}{4 \sigma_\lambda |D|}$$

POLARIZACIJSKA DISPERZIJA

- Razlika u brzini propagacije ortogonalnih modova
- Najmanja od svih vrsta disperzije i zbog toga se često zanemaruje
- Kod sustava s vrlo velikom brzinom prijenosa (10 Gb/s i više) ona postaje jedan od bitnih faktora ograničenja

$$\langle \Delta T \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L}$$

OGRANIČENJA BRZINE I UDALJENOSTI

$$B_0 L \leq \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta n}$$

Višemodni svjetlovod
sa stepeničastim
indeksom loma

$$B_0 L \leq \frac{2c}{n_0 \Delta^2}$$

Višemodni svjetlovod
s gradijentnim
indeksom loma

$$B_0 L \leq \frac{1}{2 \Delta \lambda |D|}$$

Jednomodni svjetlovod

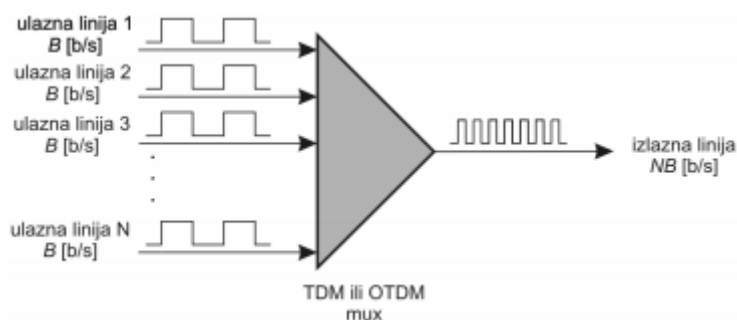
$$B_0 L \leq \frac{1}{4 \sigma_\lambda |D|}$$

7. Multipleksiranje signala - TDM i WDM pristup

- 2 osnovna načina multipleksiranja: - TDM (Time Division Multiplexing)
 - WDM (Wavelength Division Multiplexing)

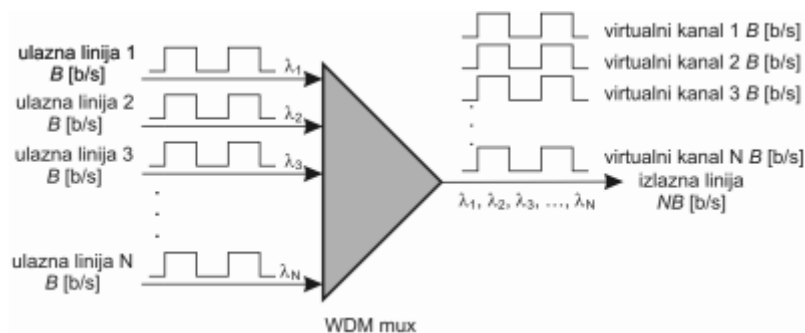
TDM (Time Division Multiplexing)

- Multipleksiranje u vremenskoj domeni
- Brzina prijenosa i format ulaznih podataka su strogo određeni
- 2 moguća načina multipleksiranja: bit po bit ili znak po znak



WDM (Wavelength Division Multiplexing)

- Multipleksiranje po valnim duljinama
- Brzina prijenosa i format ulaznih podataka mogu biti proizvoljni
- Pojedini signali već mogu biti multipleksirani (TDM, FDM)



- Prirodni put multipleksiranja: 1. TDM način multipleksiranja - do brzine prijenosa ~ 10 Gb/s
2. WDM način multipleksiranja – za veće brzine prijenosa

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – Gusti WDM

- Odnosi se na WDM gdje razmak kanala nije veći od nekoliko nm (0,8nm ili 0,4nm)
- Problem kod velikog broja kanala je bliski razmak valnih duljina što predstavlja stroge zahtjeve na opremu
- Mogućnost korištenja pojačala, pogodan za velike udaljenosti

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – Grubi WDM

- Jeftinija oprema, pogodan za sustave s manjim udaljenostima između repetitora (regionalne mreže)
- 20 nm razmak kanala

8. Projektiranje optičke veze - proračun snage i proračun vremena odziva

PRORAČUN SNAGE

- Radi se kako bi se osigurala potrebna razina snage na ulazu u optički prijemnik
- Najmanja srednja razina optičke snage koja je potrebna da stigne na prijamnik (uz BER manji od maksimalno dozvoljenoga) naziva se osjetljivost prijemnika i označava se P_{pr}
- Margina sustava M_s - 3dB zbog kratkoročnih (temperatura) i 3dB zbog dugoročnih (starenje) promjena
- >6dB
- Osjetljivost prijemnika pada s porastom brzine

$$\bar{P}_{od} = \bar{P}_{pr} + C_L + M_s \quad [dB]$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 ukupni gubici margina sustava

Ukupni gubici:

$$C_L = \alpha \cdot L + \alpha_c N_c + \alpha_s N_s$$

α → Gušenje svjetlovoda (u dB/km)
 L → Duljina svjetlovoda (u km)
 α_c → gubitak snage u konektoru (u dB)
 N_c → broj konektora na trasi
 α_s → gubitak snage na varenom spoju (u dB)
 N_s → broj varenih spojeva na trasi

PRORAČUN VREMENA ODZIVA

- Proračun vremena porasta služi da se provjeri da li je sustav sposoban ostvariti željenu brzinu prijenosa
- Vremena porasta za odašiljač u pravilu je poznato za konkretne komponente

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

\uparrow \uparrow \uparrow
 vrijeme porasta vrijeme porasta vrijeme porasta
 odašiljača svjetlovoda prijemnika

$$T_r = \frac{2,2}{2\pi\Delta f} = \frac{0,35}{\Delta f} \quad \text{Vrijeme porasta}$$

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

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

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

Višemodni svjetlovod
s stepeničastim
indeksom loma

Gradijentni svjetlovod

Jednomodni svjetlovod

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

$$B_0 \leq \frac{0,7}{T_r} \quad \text{za NRZ}$$

$$B_0 \leq \frac{0,35}{T_r} \quad \text{za RZ}$$