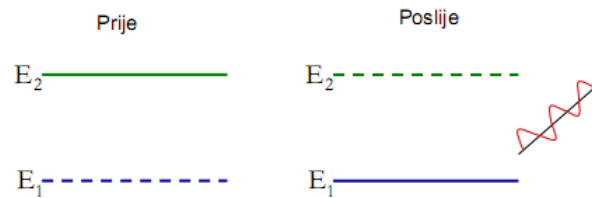


1. Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija; izgled lasera

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

SPONTANA EMISIJA

- Spontana emisija je kada atom spontano prijeđe iz stanja E₂ (stanje veće energije) u stanje E₁ (stanje manje energije) te pri tome emitira foton



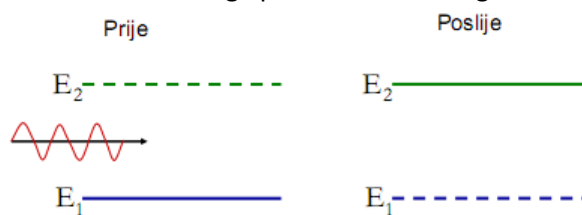
$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

- 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

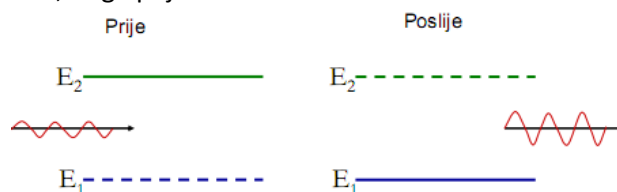
- Atom apsorbira foton iz ulazne zrake i stoga prelazi u više energetska stanje



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

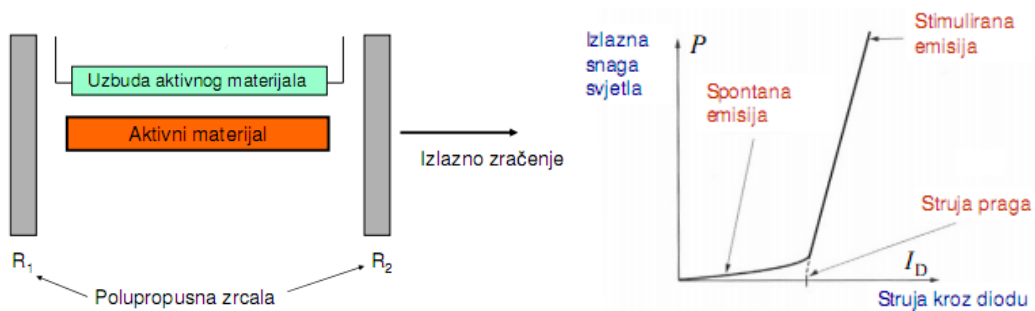
STIMULIRANA EMISIJA

- 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



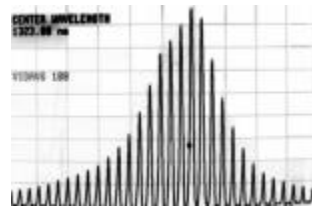
$$P_{stimul} = h \nu_{21} N_2 B_{21} \rho(\nu_{21})$$

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



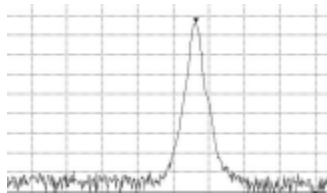
FABRY-PEROT

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



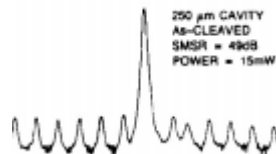
DBR (DISTRIBUIRANO BRAGGOVO ZRCALO)

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



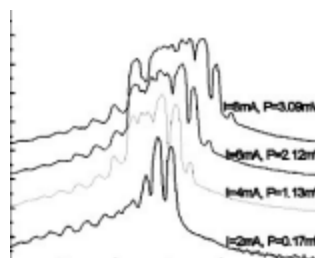
DFB (DISTRIBUTED FEED-BACK LASER)

- 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)

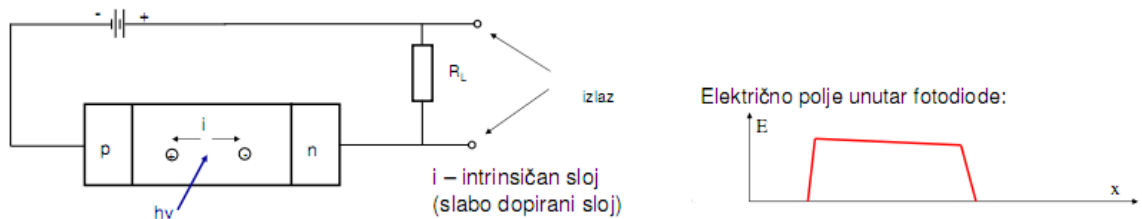
- Rezonator je okomit na ravninu čipa
- Jedan longitudinalni mod, jedan ili više transverzalnih modova
- Pojaćanje mnogo manje nego u laserima u ravnini čipa jer je duljina aktivnog sloja vrlo mala (~ 25 nm)
- Zrcala moraju biti vrlo visokog koeficijenta refleksije (>99.5%)



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

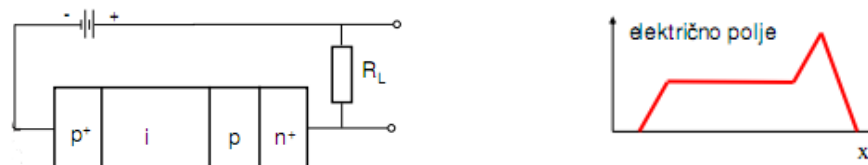
- Fotodetektor - bitan element o kojem ovisi kvaliteta cijelog prijamnog sustava
 - pretvara tok fotona u tok električnih nosioca, tj. električne struje
 - zasniva se na unutarnjem fotoelektričnom efektu (fotoionizacija, lavinski efekt)
 - mora imati veliku osjetljivost, nisku razinu vlastitog šuma, 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.

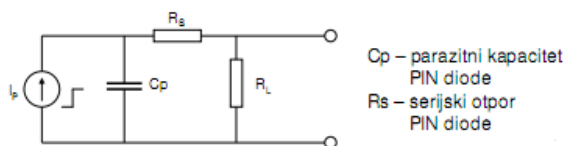
$$\text{PIN} \rightarrow I_D = \frac{\eta e}{h\nu} P = \mathfrak{R}P \qquad \text{APD} \rightarrow I_D = M \frac{\eta e}{h\nu} P = M \mathfrak{R}P$$

- 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:

$$\tau_{RC} = (R_L + R_s) \cdot C_p$$

$$\Delta f = \left[2\pi (\tau_{pr} + \tau_{RC}) \right]^{-1}$$

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

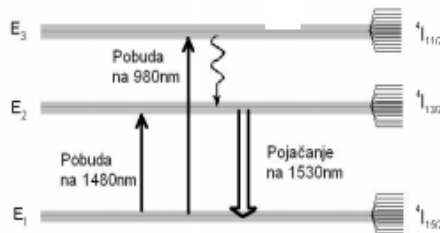
4. Svjetlovodna pojačala, svojstva EDFA-pojačala, saturacija pojačanja, shema EDFA- pojačala

- 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

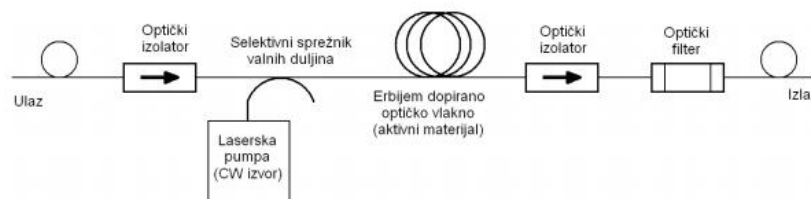
EDFA (ERBIJEM DOPIRANO SVJETLOVODNO POJAČALO)

- 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

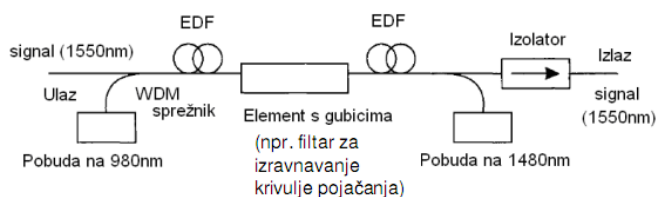
Izgled energetske nivoa



Izvedba s 1 pumpom



Izvedba s 2 pumpe

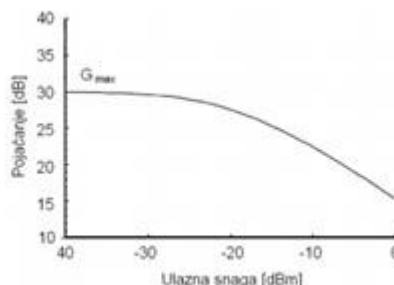


SATURACIJA (ZASIĆENJE) POJAČANJA

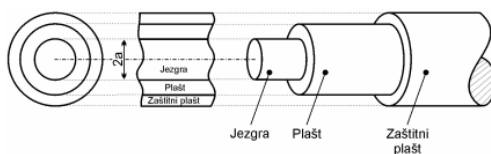
- Za velike ulazne snage ne postoji dovoljan broj atoma erbija (čak i da su svi atomi erbija u višem energetske stanju) pomoću kojih bi se postiglo maksimalno pojačanje, te zbog toga dolazi do zasićenja pojačanja

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

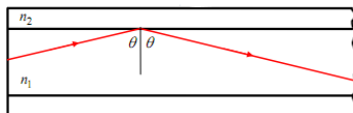
G_{max} – maksimalno pojačanje (bez zasićenja)
 P^{sat} – interna saturacijska snaga



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



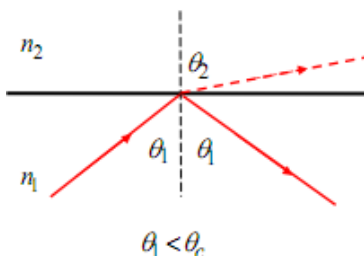
- Princip rada svjetlovoda se zasniva na totalnoj refleksiji svjetlosti unutar svjetlovoda



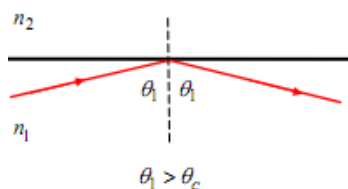
SNELLOV ZAKON

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

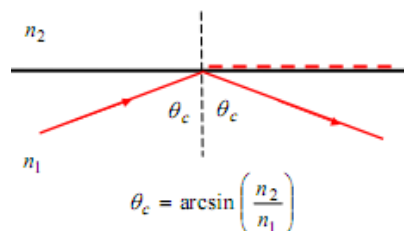
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



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)



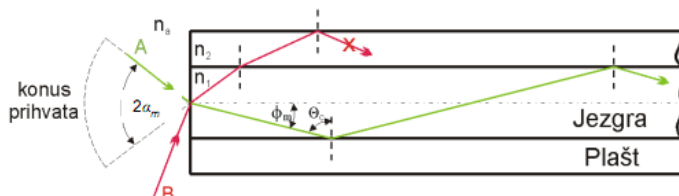
Upadni kut je jednak kritičkom kutu i zraka svjetlosti se širi granicom svjetlovoda

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

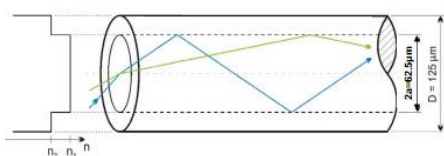
NUMERIČKA APERTURA

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

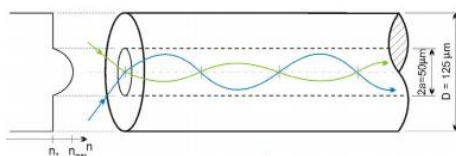
$$NA = n_a \sin \alpha_m = (2n \cdot \Delta n)^{1/2}$$



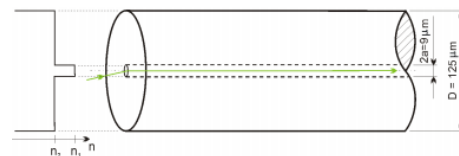
VRSTE SVJETLOVODA



Višemodni svjetlovod s stepeničastim profilom indeksa loma

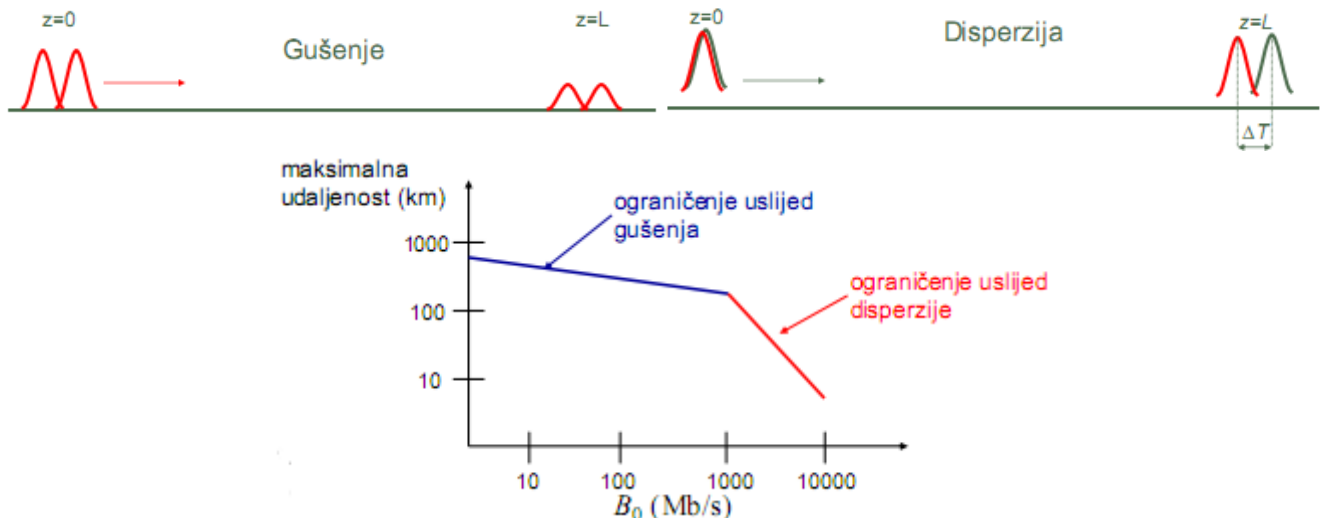


Višemodni svjetlovod s gradijentnim profilom indeksa loma

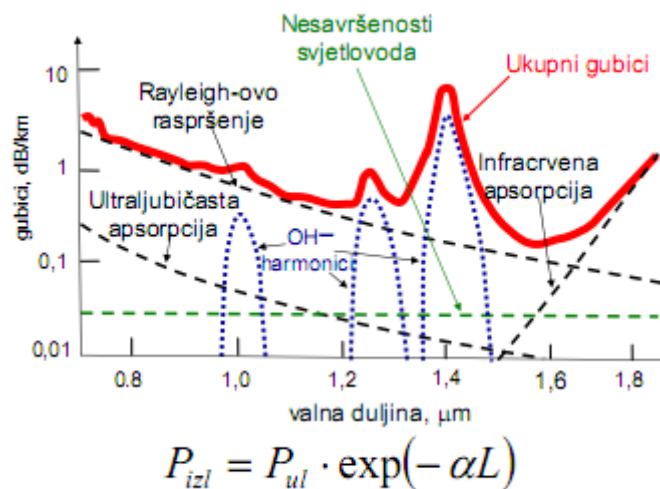


Jednomodni svjetlovod

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 μm
 - 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

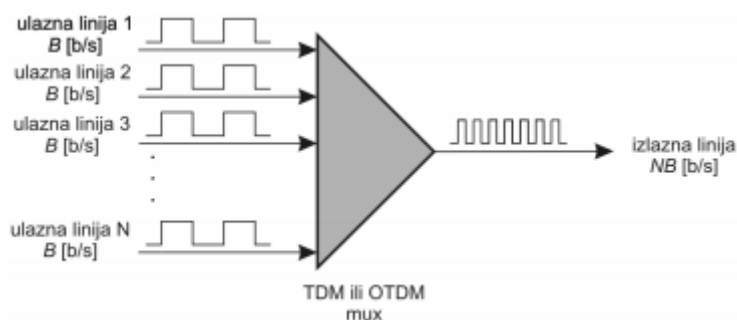
$$B_0 L \leq \frac{1}{4 \sigma_\lambda |D|}$$

7. Multipleksiranje signala - TDM i WDM pristup

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

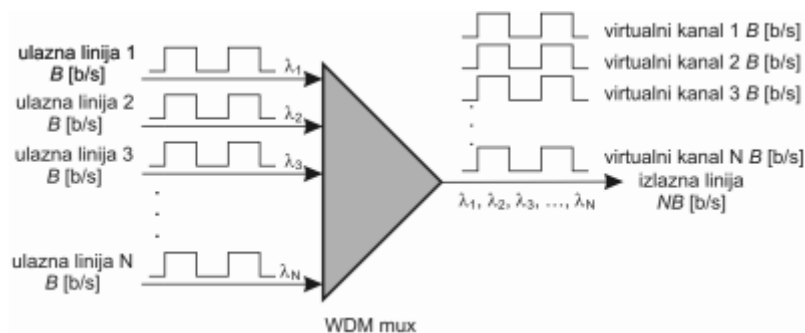
TDM (Time Division Multiplexing)

- 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 gubitci margina sustava

Ukupni gubici:

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

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

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

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

⑨ Laseri - osnovna laserska jednačba, iznos minimalnog potrebnog pojačanja, fazi uvjet kod lasera

Laser možemo promatrati kao oscilator sa rezonantnom suplinom u ulozu povratne veze
- osnovni model rezonatora - Fabry-Pérotov rezonator s 2 zrcala

$$\frac{dI_\nu}{dz} = g \left[\frac{1}{L_m} \frac{\lambda^2}{8\pi n^2} g(\nu) \right] \left[N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right] I_\nu = \gamma(\nu) I_\nu$$

⇒ OSNOVNA
JEDNAČBA
IZ TEORIJE
LASERA

γ -pojačanje po jedinici duljine

γ mora biti veće od gubitaka kako bi došlo do laserskih oscilacija

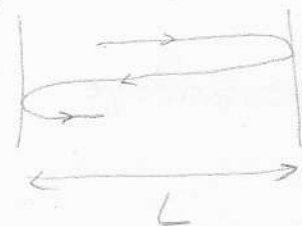
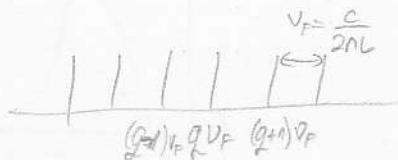
$$\gamma(\nu) \geq \alpha = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$



Uvjet rezonancije (konstruktivne interferencije):

- 2 puta reflektirani val je u fazi s početnim valom

$$b \cdot 2L = q \cdot 2\pi \Rightarrow q \frac{\lambda}{2} = L$$



10. LED diode (osnovna svojstva, unutarnja i vanjska kvantna djelotvornost, P-I karakteristika, spektralna karakteristika, izvedbe LED dioda)

LED dioda - propusno polarizirani p-n spoj koji zrači svjetlost
 - fotoni nastaju rekombinacijom para elektron-supljina

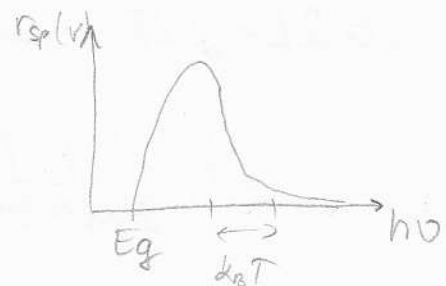
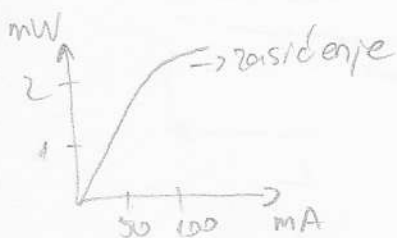
$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad \rightarrow \text{imamo spontanu emisiju}$$

- prednosti:
- jednostavnija proizvodnja, mala cijena
 - veća pouzdanost od LD, manja temp. osjetnost
 - idealna linearnost P-I karakteristike
- mane:
- zasnovana na spontanoj emisiji (prisutne sve valne duljine unutar spektra)
 - manja snaga od LD, veća spektralna širina

- unutarnja kvantna djelotvornost: $\eta_i = \frac{\text{srednji broj fotona}}{\text{srednji broj injektiranih nosioca}} = \frac{\tau}{\tau_r}$

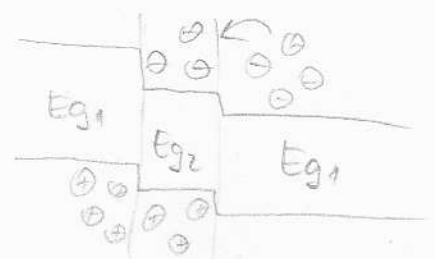
- pokazuje koliko % de injektiranih e^- sudjelovati u generiranju fotona

- vanjska kvantna djelotvornost $\eta_{ex} = \eta_c \cdot \eta_i$ (između 1 i 5%)
 gubici



LED s heterostrukturom

- manje neradijacijskih prijelaza
- smanjena apsorpcija
- veće koncentracije nosioca

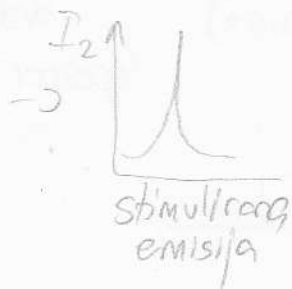


Burrus površinski-emitirajuća LED - strukture za efikasnu spreagu svjetla u fiber

LED s rubnim emiterom - za spremanje što više svjetla u svjetlovod

11. Laserska dioda (izgled, izvedba pomoću heterostrukture, osnovna laserska jdb-a za laserske diode, P-I karakteristika, temperaturna ovisnost P-I karakteristike)

- prednosti:
 - velika izlazna snaga (10mW)
 - uski spektar emitiranog signala
 - širok modulacijski spektar, visoka djelotvornost (do 50%)
- nedostaci:
 - nelinearna P-I karakteristika
 - visoka temperaturna osjetljivost
 - potrebna visoka tehnologija → visoka cijena



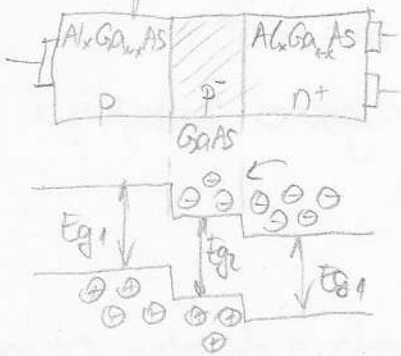
$$I_2 > I_1$$



$$I_{\text{prag}}(T) = I_2 e^{\frac{T}{T_0}}$$

- temperaturni utjecaj možemo kompenzirati optičkom povratnom vezom i/ili temperaturno prilagodljivim sklopovima

izvedba pomoću heterostrukture — debljina sloja u koji su injektirani e^- je dobro definirana aktivnim srednjim slojem



- smanjena reapsorpcija unutar materijala
- moguće postići veće koncentracije nosilaca
- razlika u indeksu loma — omogućuje formiranje planarnog svjetlovoda

OLS za lasersku diodu

$$r(v) = \frac{\lambda_0^2}{4\pi^2 n^2} f(v) [f(E_2) - f(E_1)] \rightarrow f(E_2) - f(E_1) > 0$$

- da bi to vrijedilo, laserska dioda mora biti izvedena od jako dopiranih poluvodiča

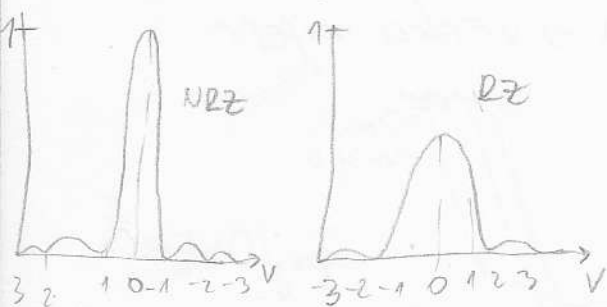
12) Modulacijski postupci kod OKS (Intenzitetna modulacija (OOK),
fazna modulacija (DPSK, DQPSK)); spektralna gustoda snage

kod modulacije se koriste 2 formata: - NRZ (non-return to zero) < 100%
- RZ (return to zero) > 400% b/s

INTENZITETNA MODULACIJA (ON-OFF KEYING)

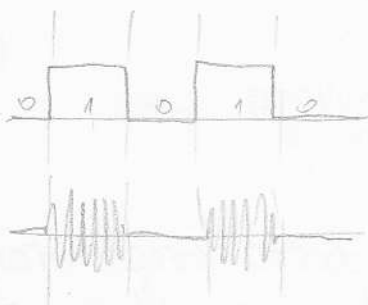
- za brzine < 400 b/s

- spektralna gustoda snage: $S_A(\omega) = |\tilde{A}_p(\omega)|^2 \frac{1}{4T_b} \left(1 + \frac{2\pi}{T_b} \sum_{m=1}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi m}{T_b}\right) \right)$

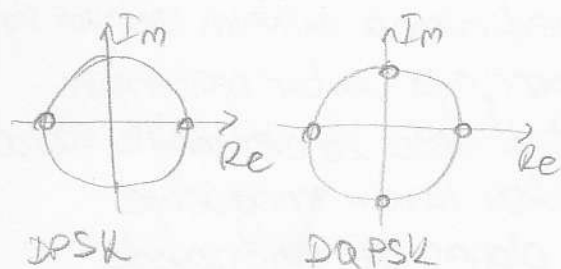


kontinuirani dio
(spektar 1 impulsa)

diskretni dio
(spektar usljed niza impulsa)

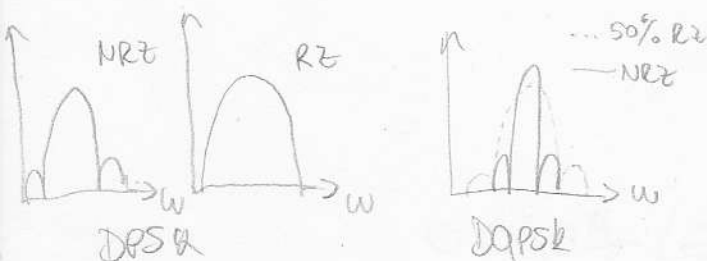


DPSK, DQPSK



DPSK - logička jedinica odgovara
promjeni faze za 180°

- logička nula odgovara razstavljanju
promjene faze



- postiže se veća spektralna efikasnost
- manja osjetljivost na šum
- manja osjetljivost na kromatsku i
polarizacijsku disperziju

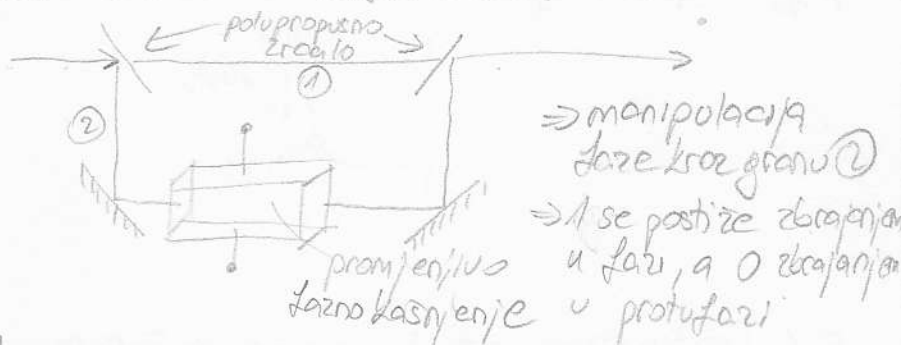
13) Načini modulacije laserske diode (direktna modulacija ili vanjski modulator), problemi kod direktne modulacije

DIREKTNNA MODULACIJA

- najčešći oblik modulacije → intenzitetna modulacija
- koristi se kod manje zahtjevnih sustava
- mijenjanjem struje kroz diodu se mijenja intenzitet generiranog optičkog signala
- kod zahtjevnih sustava se zbog promjene valne duljine unutar bita događa efektivno proširenje spektra - FREKVENCIJSKO TREPERENJE, pa se tu koriste vanjski modulatori
- posljedica frekv. treperenja je kromatska disperzija

MODULACIJA POMODU VANJSKOG MODULATORA

Elektrooptički modulator - koriste se materijali čiji indeks loma ovisi o nainutom električnom polju, uz Mach-Zender interferometar



- problem je nemogućnost integracije s LD zbog specifičnosti materijala

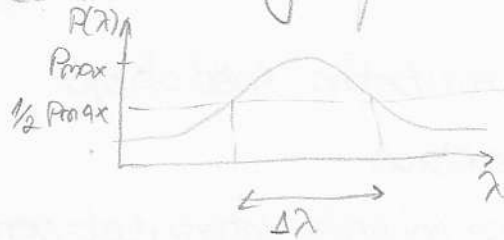
Elektroapsorpcijski modulator - bazira se na Frano-Keldyshovom efektu (veličina E_g mijenja se promjenom nainutog el. polja)

- bez nainutog polja je $E_g > h\nu$ i nema apsorbacije
- sa nainutim poljem je $E_g < h\nu$ i ima apsorbaciju
- može se koristiti materijalima korištenim za LD (integracija sa LD u isti krug)
- postoji malo frekv. treperenje

14. Parametri optičkih predajnika ($\Delta\lambda$, σ_λ , -20dB širina, omjer gašenja, potiskivanje bočnih modova)

$\Delta\lambda$ - širina spektra kad snaga padne na $1/2$

$$\Delta\lambda = \lambda_{FWHM}$$



σ_λ^2 - srednja kvadratna spektralna širina (RMS) spektralna ovisnost snage izvora

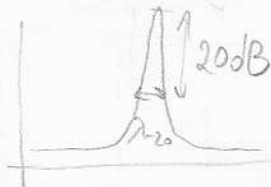
$$\sigma_\lambda^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\lambda - \bar{\lambda})^2 P(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) d\lambda}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) d\lambda}$$

srednja vrijednost

$$\frac{\Delta\lambda}{\sigma_\lambda} = 2,355$$

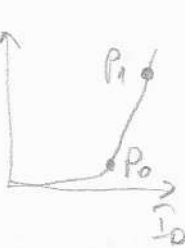
λ_{-20} - širina spektra na -20dB od vrha (pogodno za jednamodne lasere)



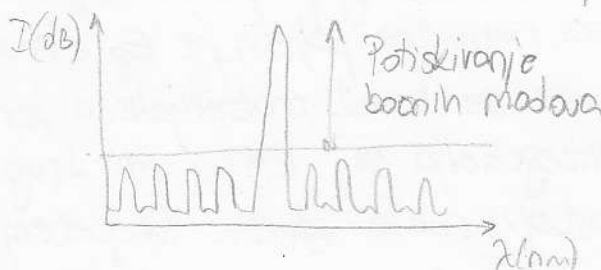
$$\frac{\lambda_{-20}}{\sigma_\lambda} = 6,07$$

EX (extinction ratio) - omjer gašenja
- idealno ∞

$$EX = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$



Potiskivanje bočnih modova - filtriranje glavnog moda



15. Sum kod PIN i APD fotodetektorskih dioda; usporedba S/N za PIN i APD detektorske diode

-kvalitetu prijama u analognim sustavima mjerimo omjerom S/N, a kod digitalnih BER, oni su međusobno povezani, pa je dovoljno odrediti samo 1

$$S/N = \frac{\text{srednja snaga signala}}{\text{snaga suma}} = \frac{I_D^2}{\sigma_N^2}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{(M R P)^2}{F_A \cdot M^2 \cdot 2e (R P + I_{dark}) \cdot \Delta f + \underbrace{\frac{4k_B T e \cdot \Delta f}{R_L}}_{\sigma_T^2}}$$

$$\sigma_N^2 = \sigma_k^2 + \sigma_T^2$$

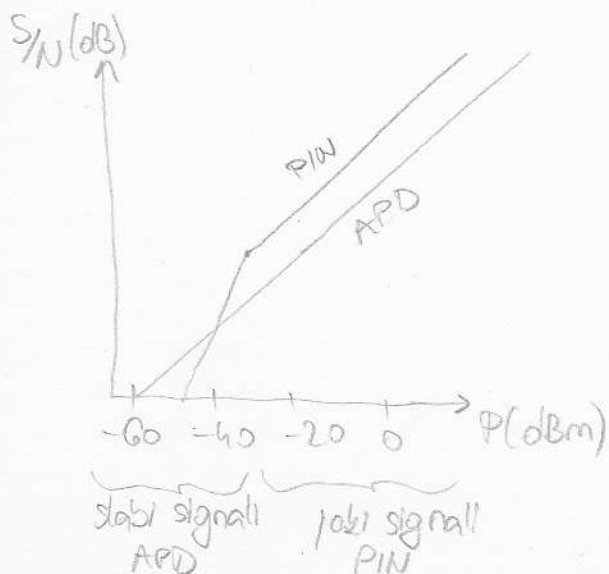
$$I_D = M R P \quad (M=1 \text{ za PIN})$$

-vrijedi za PIN i APD

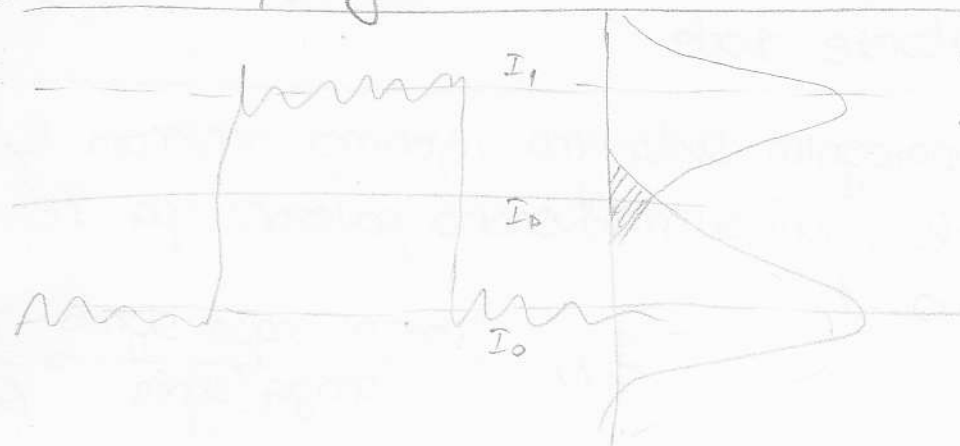
-za PIN $M=1$, $F_A=1$

-ako prevladava kvantni sum: - PIN ima bolji odnos S/N od APD za F_A
-PIN diode su bolje za jake signale

-ako prevladava termički sum: - APD ima bolji odnos S/N od PIN za M^2
-APD bolje za slabe signale



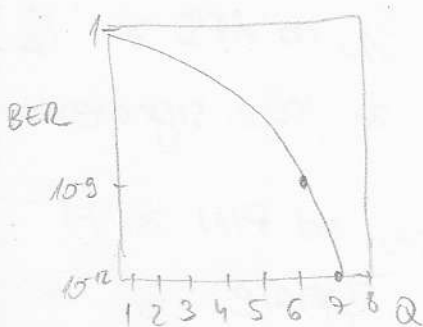
16. određivanje greške bita (BER)



I_D - struja praga odlučivanja
(iznad I_D 1, ispod 0)

- u komunikacijskim sustavima je podjednako broj 0 i 1, pa vrijedi da je $BER = \frac{1}{2} [BER(0) + BER(1)]$

- BER možemo izraziti kao $BER = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$, $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$
erfc - komplementarna 4-ja greške



17) Osjetljivost prijemnika, ovisnost osjetljivosti prijemnika o Q i S/N
 principijelna shema optičkog prijemnika, zahtjevi na parametre O.P.

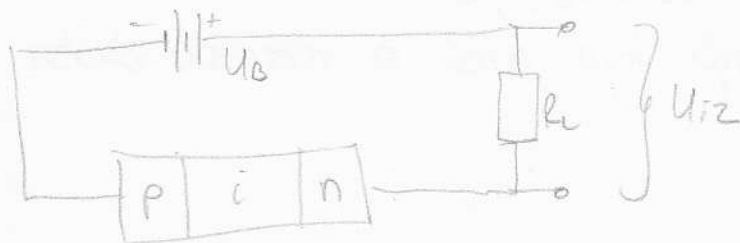
- osjetljivost prijemnika \bar{P}_{re} je minimalna srednja optička snaga $\frac{P_s + P_n}{2}$ koju je potrebno dovesti na prijemnik da bi se detektirao signal uz $BER < BER_{max}$

$$\bar{P}_{re} = \frac{P_n}{2} h\nu B_0$$

$$\bar{P}_{re} = \frac{Q}{2} (e F_A Q \Delta f + \frac{\sigma_n^2}{M}), \quad \Delta f = \frac{B_0}{2}$$

VEZA IZMEĐU BER i S/N

$$S/N = \frac{I_s^2}{\sigma_n^2} \Rightarrow \begin{aligned} S/N &= 4Q^2 && \text{- za termički šum} \\ S/N &= Q^2 && \text{- za kvantni šum} \end{aligned}$$



$$\Delta f = \frac{1}{2\pi(\tau_{re} + R_L C_p)} \quad \text{birati maleni } R_L \text{ za veliki } \Delta f$$

$$\sigma_n^2 = \frac{4k_B T \Delta f}{R_L} \quad \text{birati veliki } R_L \text{ za mali } \sigma_n$$

$$U_{iz} = R_L P_L \quad \text{birati veliki } R_L \text{ za veliki } U_{iz}$$

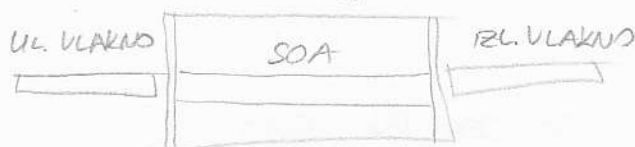
$$P_{max} = \frac{U_0}{R_L} \quad \text{birati maleni } R_L \text{ za maksimalnu ulaznu optičku snagu}$$

18.) Vrste optičkih pojačala (EDFA, poluvodička optička pojačala, Ramanova pojačala)

EDFA - vidi (4)

Poluvodička optička pojačala

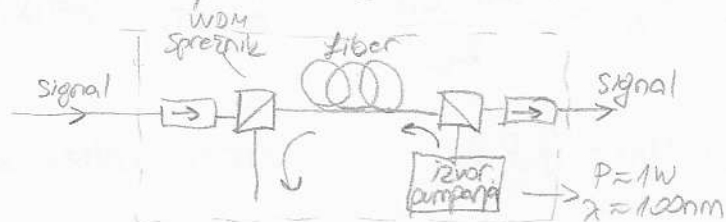
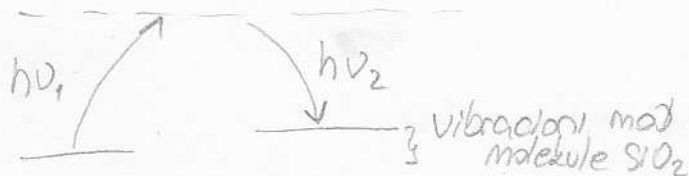
- poluvodički laser kod kojeg nije zadovoljen uvjet za lasersku emisiju zbog male reflektivnosti zrcala
- rubne površine valovoda premazane antirefleksivskim slojem koji sprječava laserski rezonanciju, a omogućuje veliko pojačanje



- polarizacijski su osjetljiva, pojačanje varira između 5 i 8 dB, osjetljivost se može ublažiti kaskadom ortogonalnih pojačala, polarizacijskim diverzifikacijom i rotacijom polarizacije
- postoji problem preslušavanja koje ovisi o vremenu života spontane emisije τ_{sp}

Ramanova pojačala

- koriste nelinearnu pojavu stimuliranog Ramanovog raspršenja - to je pojava kod koje pri prijenosu više signala sjetlovodom dolazi do prijenosa snage iz kanala s manjom valnom dužinom u kanal veće λ
- fizikalna pojava je pobuđivanje vibracijskih stanja SiO_2 molekula



- SES je širokopojasni efekt s maksimumom pojačanja na otpr 13 THz nižoj frekvenciji od frekv. signala pumpanja, tj. na 1480nm nižoj λ
- smjer pumpanja suprotan smjeru širenja signala (usrednjavanje snage pumpanja)
- proširivanje pojasa valnih dužina pojačanja kombiniranjem sa EDFA
- prednosti: - pojačanje proizvoljne valne dužine, veća Δf , koristi klasične sjetlovode, kompatibilan s postojećim vezama
- mane: - veća potrebna snaga pumpanja, veće dužine sjetlovoda, preslušavanje

19. Sum u optičkim sustavima s EDFA pojačalima

- vrsta šuma je spontana emisija

- spektralna gustoća šuma je gotovo konstantna

$$S_{sp}(\nu) = (G-1) \cdot n_{sp} \cdot h\nu$$

G - pojačanje

n_{sp} - faktor spontane emisije

- faktor šuma optičkog pojačala: $F_n = \frac{S/N_{ul}}{S/N_{iz}} = 2n_{sp}$, $F_n \geq 2$ (3dB)

- odnos S/N će se pogoršati bar za 3dB nakon pojačala

20. Planarni svjetlovodi, analiza planarnih svjetlovoda, određivanje broja modova u svjetlovodu

- propagiraju se samo zrake koje nakon 2 refleksije imaju istu fazu kao direktno naddirekne zrake (konstruktivna interferencija)

$$\tan\left(\frac{\pi n_s d \cos\theta}{\lambda_0} - \frac{m\pi}{2}\right) = \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta - n_2^2}}{n_1 \cos\theta}$$

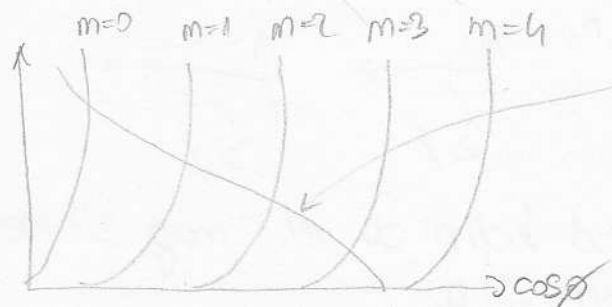
$m = 0, 1, 2, \dots$

modalna poba
 \Rightarrow za domitu (TE)
polarizaciju

$$\tan\left(\frac{\pi n_s d \cos\theta}{\lambda_0} - \frac{m\pi}{2}\right) = \frac{n_1}{n_2} \frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta - n_2^2}}{n_1 \cos\theta}$$

\Rightarrow za paralelnu (TM)
polarizaciju

za $\theta = \theta_c$



- šire se modovi kod kojih je
 $\theta > \theta_c \Rightarrow \cos\theta < \cos\theta_c$

- za najviši mod: $\tan\left(\frac{\pi n_s d \cos\theta}{\lambda_0} - \frac{m\pi}{2}\right) = 0$

ukupan broj modova koji se šire: $M_{TE} = 1 + \text{int}\left\{2 \frac{d}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right\}$

- uvijek se širi barem 1 TE, barem 1 TM mod

- uvjet jednomodnosti: $\frac{d}{\lambda_0} < \frac{1}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$

21. Rigorna metoda analize - NE PITA

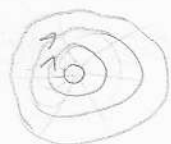
22. Modovi u svjetlovodu (TE, TM i hibridni modovi), ovisnost koeficijenta rasprostiranja o frekvenciji, normirana frekvencija, dominantni mod, prvi viši modovi, LP modovi, ovisnost broja modova o frekv., omjer optičke snage u jezgri i platu

TE modovi - transversalni električni modovi, ne postoji el. komponenta u smjeru širenja vala

TM modovi - transversalni magnetski modovi, ne postoji komponenta magnetskog polja u smjeru širenja vala

HE modovi - hibridni modovi, postoje obje komponente el. mag. polja u smjeru širenja vala, prevladava magnetsko polje

EH modovi - -"- , prevladava električno polje



TE₀₁



TM₀₁



HE₁₁



HE₂₁

HE₁₁
varijacija u ρ-smjeru varijacija u φ-smjeru

- koef. rasprostiranja β_z na početku širenja svakog moda jednak je $\frac{2\pi}{\lambda_0} n_2$
- porastom frekv. β_z se približava frekv. $\frac{2\pi}{\lambda_0} n_1$



- kombiniranjem modova iz pojedinih grupa dobivamo linearno polarizirane modove (LP) kod kojih su el. i mag. silnice međusobno okomite i paralelne $\text{HE}_{11} = \text{LP}_{01}$

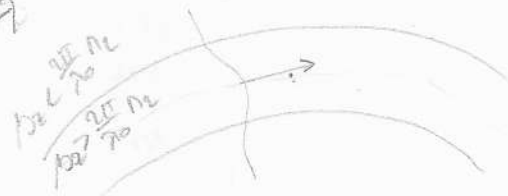
- normirana frekvencija: $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, za $V < 2.405$ je svjetlovod jednomodan

- ovisnost broja modova o frekvenciji: $M \approx \frac{V^2}{2}$ za stepeničasti n

(23) Vidi (6)

(24) Gubenje uslijed savijanja, nove vrste svjetlovoda, svjetlovodi za dalje IC područje ($\lambda > 1,7 \mu\text{m}$)

- kod savijanja svjetlovoda može doći do izljetanja zrake iz svjetlovoda jer nije ispunjen uvjet totalne refleksije
- može doći i do puknuća svjetlovoda
- može se objasniti i pomoću valne teorije: - u vanjskom dijelu plašta zbog dužeg puta je β_z manja i približava se granici $\frac{2\pi}{\lambda_0} n_2$
- ako je $\beta_z < \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2$, nestaje radialno širenje EM energije i ona se gubi
- puno veće gubenje uslijed savijanja za veće λ
- da bi svjetlovod postao neosjetljiv na savijanje, dodajemo zračne rupe unutar plašta svjetlovoda
- također, nove vrste svjetlovoda koriste varijacije strukture svjetlovoda



SVJETLOVODI ZA IC PODRUČJE

- izvedba pomoću egzotičnih materijala → skupo rješenje
- drugo rješenje je svjetlovod sa zračnom jezgrom i plaštom izrađenim od Bragove rešetke (obrzavanje totalne refleksije) sa periodom rešetke $\lambda/2$, pa se reflektirani valovi zbrajaju u fazi
- refleksivnost Bragovog zrcala ovisi o frekvenciji

(25)

VIDI

(6)

(26)

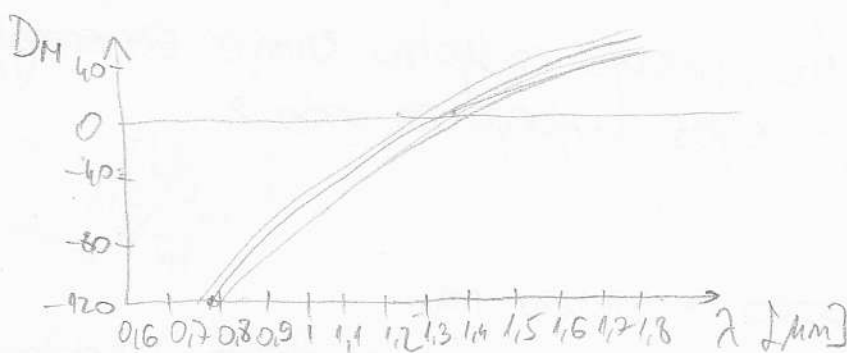
(27)

Materijalna disperzija, valovodna disperzija

- primjese su nužne za postizanje varijacije u indeksu loma
- pri određivanju parametara mat. disp. možemo upotrijebiti empirijsku formulu:

$$D_M = 122 \left(1 - \frac{\lambda_{ND}}{\lambda} \right) \left[\frac{ps}{nm \cdot km} \right]$$

λ_{ND} - valna dužina nulte disperzije

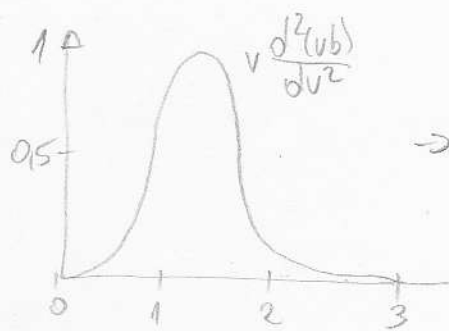


- materijalna disperzija ovisi o činjenici da indeks loma ovisi o valnoj dužini

- $b = \frac{\frac{n_2}{\lambda_0} - n_2}{n_1 - n_2}$ - normirani koef. valovodne disperzije

$V = \frac{\omega}{c} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ - normirana frekv.

$D_V = -\frac{1}{c} \Delta n \frac{V}{\lambda} \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$ -> parametar valovodne disperzije



-> grafičko određivanje parametra valovodne disperzije

- valovodna disperzija nastaje uslijed činjenice da koef. rasprostiranja β_2 ovisi o valnoj dužini

(28.) Vrste svjetlovođa, ITU-T preporuke G 652 - G 657

za vrste svjetlovođa vidi (5.)

ITU-T G 652 - standardni jednomodni svjetlovod

- $\lambda_0 \approx 1,31 \mu\text{m}$ - nulta disperzija
- većina jednomodnih svjetlovođa
- vrijednost $D(\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}) \approx 17 \frac{\text{ps}}{\text{nmkm}}$

ITU-T G 653 - jednomodni svjetlovod s pomaknutom disperzijom

- nulta disp. na $\lambda_0 \approx 1,55 \mu\text{m}$
- uglavnom se ne koristi zbog problema kod WDM sustava

ITU-T G 655 - jednomodni svjetlovod s pomaknutom disperzijom $\neq 0$

- mala vrijednost disperzije na $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ (različit od 0)
- moderan svjetlovod, nešto skuplji od standardnog
- pogodan za WDM sustave

ITU-T G 656 - jednomodni svjetlovod s pomaknutom disp. $\neq 0$ za širokopojasni optički transport

- unaprijeđena preporuka G 655 za DWDM sustave na velike udaljenosti

29. Kompenzacija kromatske disperzije (DCF svjetlovod, kompenzacija pomoću Braggove rešetke, elektronička kompenzacija disperzije, kompenzacija polarizacijske disperzije)

Kompenzacija pomoću DCF svjetloвода

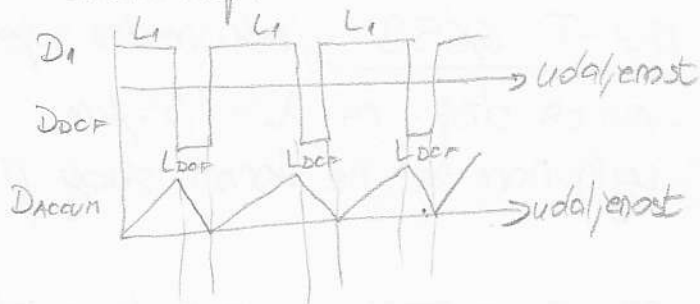
- kromatska disperzija - različite valne dužine putuju različitim brzinama
- rješenje: svjetlovod s suprotnim predznakom parametra krom. disp.

$$\Delta T = \Delta \lambda DL$$

Akumulirana disperzija: $\frac{\Delta T}{\Delta \lambda} = \int_0^L D(z) \cdot dz$

uvjet nulte akum. disp.

$$L D_1 + L_{DCF} D_{DCF} = 0$$



- DCF ima veće gusenje od običnih svjetloвода ($\alpha \approx 0.5$), pa se definiše

$$FOM = \frac{|D|}{L} \left[\frac{ps}{nm \cdot dB} \right]$$

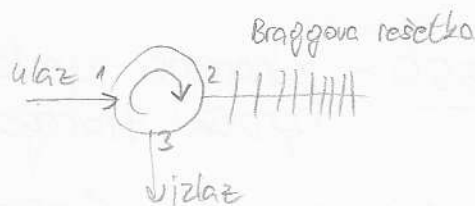
- DCF se uglavnom namotaju u kolut unutar kutije kompenzatora disperzije
- često sadrže EDFA pojačalo



Kompenzacija pomoću Braggove rešetke

- dužina nije veća od 10cm
- uz mež ≈ 1.5 kašnjenje $T_g \approx \frac{2L n_{eff}}{c} \approx 1ns$

- možemo kompenzirati $D_{akum} = \frac{T_g}{\Delta \lambda} = \frac{2L n_{eff}}{c \Delta \lambda} \approx 1000 \frac{ps}{nm}$



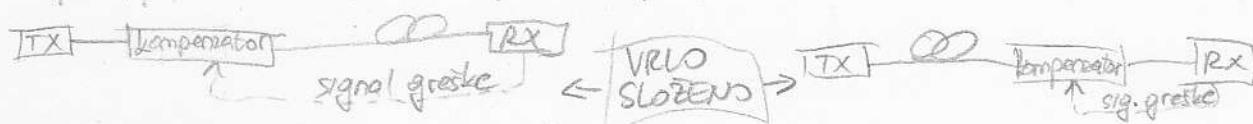
Elektronička kompenzacija disperzije

- ideja: na ulaz u prijemnik staviti filter sa suprotnom frekvencijskom karakteristikom
- filter može biti analogan (Fabry-Perot sa jednim zrcalom 100% refleksije) ili digitalan

Kompenzacija polarizacijske disperzije

- na prednjoj strani (potreban pozitivan signal)

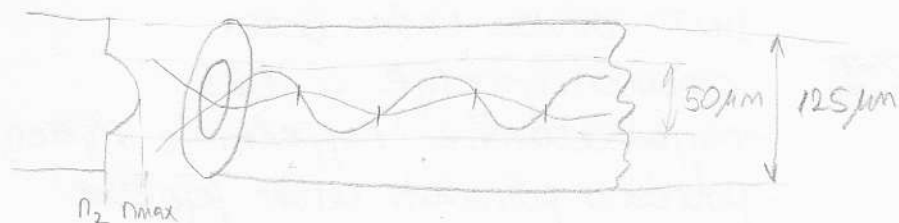
- na prijemnoj strani (složen sustav)



- bolje spriječiti nego liječiti - koristiti svjetlovođe s $\ll D_{pmo}$

(30.) Gradijentni svjetlovodi (profil indeksa loma, osnovna ideja konstrukcije, broj modova, varijacija grupe brzine, disperzija)

- bolji od višemodnih sa stepeničastim indeksom loma, losiji od jednomodnih



- osnovna ideja: pronaći profil indeksa loma tako da sve zrake dođu istovremeno na detektor (samo za meridionalne zrake)
- zrake se šire unutar cilindra koji je određen sučeljem jezgra-plast
- zrake koje prevaljuju duži put prolaze kroz dio svjetlovoda s manjim indeksom loma; kako je brzina jednaka $v = \frac{c}{n(r)}$, slijedi da su te zrake brže



- broj modova: $M = \frac{V^2}{4}$, $V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ → 2 puta manji broj modova u odnosu na stepeničasti indeks loma

- vrijednost međumodalne disperzije je ovisnost grupe brzine o modu u višemodnom svjetlovodu

$$\Delta T \approx \frac{Ln_0 \Delta^2}{4c}$$

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

$$(\Delta f) L \leq \frac{c}{n_0 \Delta^2}$$

$$B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}$$

digitalni sustavi

analogni sustavi

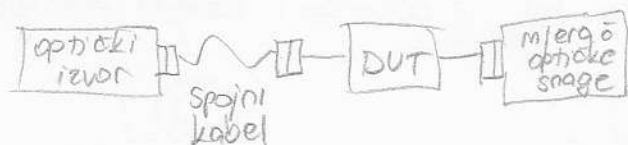
(31.) Mjerne metode u svjetlovodnim komunikacijama - mjerenje snage, greške i ograničenja kod mjerenja snage

mjerenje gušenja



glavni uzrok nesigurnosti

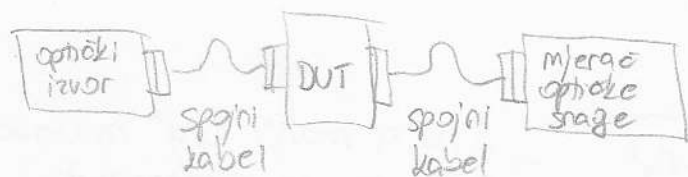
- gušenje konektora 0,15-0,5 dB
- ovisi o ostadi konektora



DUT - device under test

- osnovno mjerenje u OKS
- najjednostavnije i najjeftinije mjerenje
- potrebno poznavati uzroke pogreške

DUT direktno spojen na izvor



DUT ne možemo spojiti direktno na izvor / detektor



uzroci pogreške: - višestruke refleksije → prenesena snaga $P = 1 - \Gamma_{uk}^2$

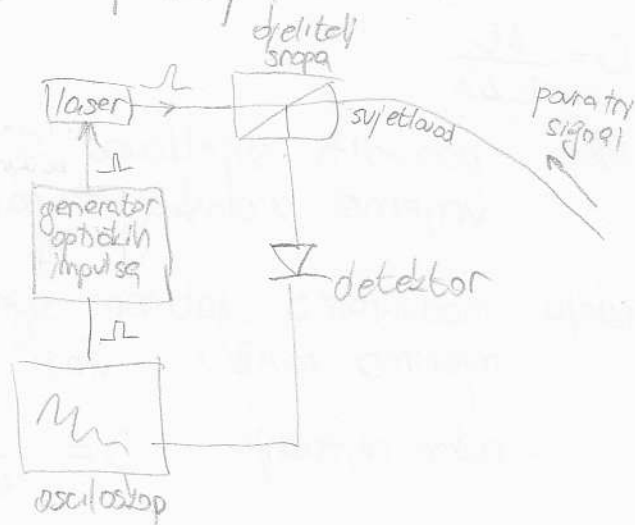
→ bolji (osilji) izvori - kraće vrijeme koherencije Δt

- nesigurnost zbog gušenja konektora
- greška uslijed refleksija na konektorima
- polarizacijska ovisnost gušenja
- valna ovisnost parametara izvora i detektora
- nekompatibilni svjetloводи...

32) Mjerne metode u svjetlosnim komunikacijama - OTDR, nadzor optičkih mreža

OTDR - optički reflektometar u vremenskoj domeni

- koristi se svojstvom Rayleighovog raspršenja
- jednodimenzionalni radar
- radi se više mjerenja i uzima srebnja vrijednost radi poboljšanja S/N
- male snage povratnog signala (50-60 dB manje snage)



- pogledati (6) za Rayleighovo raspršenje

$$P_{\text{Ray}} = P_0 \cdot \alpha_{\text{Ray}} \cdot S \cdot W \cdot e^{-2\alpha L}$$

Labels for the equation components:

- P_0 : ulazna snaga
- α_{Ray} : Rayleighov koeficijent raspršenja
- S : dio uhvaćene reflektirane snage
- W : dužina ulaznog optičkog impulsa
- $e^{-2\alpha L}$: dolazni i povratni signal

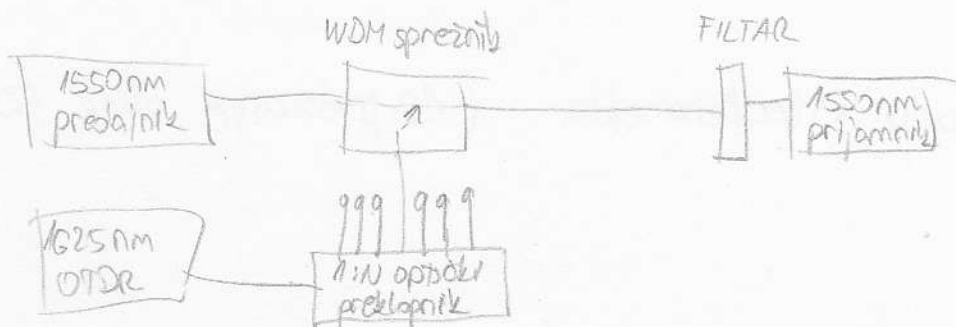
$$W = \frac{c}{n_1} \cdot \tau_{\text{otpor}} \rightarrow \text{vremensko trajanje impulsa}$$

$$S = \frac{NA^2}{4n_1^2}$$

- OTDR detektira i reflektirani signal (refleksije na konektorima, kraju svjetlovoda...)
- iz nagiba krivulje možemo odrediti gusenje svjetlovoda $\alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] = \frac{\Delta P(\text{dB})}{\Delta L(\text{km})}$
- može locirati spojeve i nesavršenosti svjetlovoda, izračunati dužinu optičke veze na temelju ulaznog i krajnjeg impulsa
- vrlo djelotvorna metoda za mjerenja optičkih veza

NADZOR OPTIČKIH MREŽA

- koristi se valna dužina koja se uglavnom ne koristi u komunikacijama



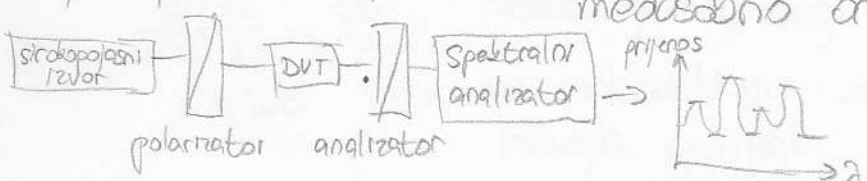
33. Mjerenja u svjetlovodnim komunikacijama - mjerenje kromatske i polarizacijske disperzije

MJERENJE PARAMETARA KROMATSKE DISPERZIJE

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

- ideja: pobuditi svjetlovod s 2 bliske valne dužine i mjeriti vrijeme prolaska signala \rightarrow teško ostvarivo
- ideja: moduliramo svjetlosni signal s npr. pravokutnim signalom i mjerimo razliku u fazi dolaznog i referentnog signala
- nakon mjerenja $D = \frac{\Delta \phi}{360 f L \Delta \lambda} \rightarrow$ veoma točan način
- potrebna dva kraja svjetlovoda \rightarrow rješenje je OTDR
- u 1550nm potrebno mjeriti s 3 valne dužine

MJERENJE PARAMETARA POLARIZACIJSKE DISPERZIJE

- polarizacijska disperzija je jedina koja se mjeri kroz vrijeme
 - mjerenjem određujemo Δt - razlika u vremenu dolaska s 2 vala s međusobno ortogonalnim polarizacijama
- 

$$\langle \Delta t \rangle = \frac{\Delta \text{spreza} \cdot N_E \cdot \lambda_{\text{start}} \cdot \lambda_{\text{stop}}}{2c (\lambda_{\text{start}} - \lambda_{\text{stop}})} \quad N_E - \text{broj ekstrema}$$

$$\Delta \lambda_{\text{razliku vrhova}} = \frac{65}{\langle \Delta t \rangle (\text{ps})} [\text{nm}]$$

- moguće mjerenje pomoću interferometra (10. predavanje, slide 50-52)

12. predavanje

(36) Projektiranje optičke veze - princip narušavanja snage
(primjer: kromatska disperzija), polarizacijska disperzija, parazitne optičke refleksije

(Power Penalty) PP - promatramo sustav sa i bez nesavršenosti (disperzije)
- predstavlja optičku snagu koju trebamo povećati u sustavu s nesavršenosti kako bi dobili isti BER kao i u sustavu bez nesavršenosti

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} = 2 \frac{P_1 - P_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

PP uslijed
kromatske
disperzije

- umjesto proširenja impulsa promatramo smanjenje snage u "1" do kojeg je došlo zbog proširenja impulsa

$$|D|LB_0\sigma_n \leq \epsilon, \quad PP = 5 \log_{10}(1 + 2\pi\epsilon^2)$$

PP uslijed
polarizacijske
disperzije

- nastaje zbog različitih brzina ortogonalnih polarizacija
- prisutno narušavanje snage od 1dB ili manje ako je ispunjen uvjet $\langle \Delta T \rangle = D_{\text{PMD}} \sqrt{L} < 0,1 T_0 = 0,1 / B_0$

Parazitne optičke refleksije

- svjetlost se reflektira zbog diskontinuiteta (konекtori, splice-ovi...), te može proizvesti oscilacije u snazi predajnika, vremensko treperenje...
- utjecaj parazitne veze može se reducirati ubacivanjem opt. izolatora nakon predajnika
- većina refleksija događa se prelaskom sa stakla na zrak - smanjuje se nanošenjem antirefleksivnog sloja ili rezanjem kablava pod kutem od 80°
- APC konекtori uklanjaju mogućnost refleksije

37. Multiplexiranje signala - TDM i WDM pristup, načini sinhronizacije takta u TDM sustavima, TDM komunikacijski sustavi: PDH, SDH/Sonet

TDM

- osnove pogledati (7)

- asinkrone mreže - svaki smjer ima svoj takt određen predajnikom
- uvođenjem digitalnog prespajanja došlo je do potrebe zajedničkog takta koji može biti plesiolokroni ili sinkroni

- plesiolokrone mreže - plesiolokroni taktovi se ne razlikuju od nominalnih za više od Δf u frekvenciji

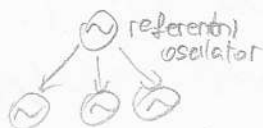
$$f(c_p) = f(c_{pnom}) = \Delta f$$

- odstupanje za manje od Δf garantira da će se mehanizmima za prevladavanje razlike u taktu izbjeći pogreška u prijenosu

- mehanizam se zasniva na dodatnim bitovima u multiplexiranju

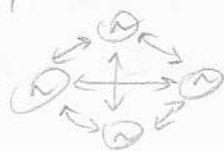
- sinkrone mreže - kao izvori takta koriste se cenzij

zavisna sinhronizacija



+ jednostavnost, stabilnost, struktura
- pouzdanost

uzajamna sinhronizacija



+ pouzdanost, struktura
- kompleksnost, stabilnost

PDH - plesiolokrona digitalna hijerarhija

- definira način multiplexiranja osnovnih kanala

a) osnovna razina ($E_1 = 2.048 \text{ Mb/s}$) - multiplexira se znak po znak

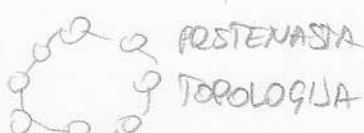
b) više razine - multiplexiraju se bit po bit

- nedostatak: kod izdvajanja signala potrebno raditi cijeli postupak demux-anja

SDH/Sonet - pojednostavljeno multiplexiranje - direktno sinkrono mux-anje, precizno definirana optička sučelja, definirano puno upravljačkih informacija
uvede se tehnike zaštite mreže, jednostavno izdvajanje signala



nacionalna i
međunarodna
razina



- regionalne mreže
- usmjerene količine
podataka

38 WDM sustavi, svojstva DWDM i CWDM sustava, komponente za WDM sustave

- za osnovne pogledaj ②

KOMPONENTE

Izvori - jednodimenzionalni laseri s ugodnom λ
- DBR, DFB

optički spreznici - El. mag. energija se inducira u susjednom svjetlovodu
- jakost signala ovisi o udaljenosti između svjetlovoda
te o dužini područja sprege

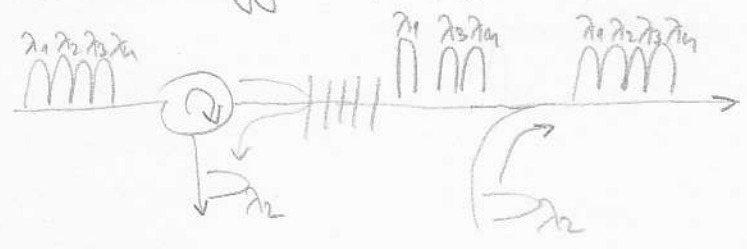
Dielektrični filtri - 2 paralelna polupropusna zrcala tvore rezonator
s prijenosnom karakteristikom ovisnom o λ

$$T = \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\sigma}{2}\right) \right]^{-1}, \quad \sigma = \frac{2\pi}{\lambda} 2nD$$

- prijenosnu karakteristiku "kroqimo" serijskim spajanjem filtera

Filteri s Braggovom rešetkom → poznat princip rada

optički Add/drop multipleksor - koristi Braggovu rešetku



MUX-ovi i DEMUX-ovi - najčešći s valovodnom rešetkom (AWG)

