

OPTIČKI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI

Zvonimir Šipuš

Marko Bosiljevac, Tin Komljenović

Ocjenjivanje kolegija

Bodovi:

- | | |
|--|----------------|
| ■ Laboratorijske vježbe | Zasebno |
| ■ Domaće zadaće
(termini za predaju zadaća određivat će se
"u hodu") | 10 bodova |
| ■ Međuispiti
(2 međuispita, svaki 20 bodova) | 40 bodova |
| ■ Završni ispit
(pismeni + usmeni, 20+30 bodova) | 50 bodova |



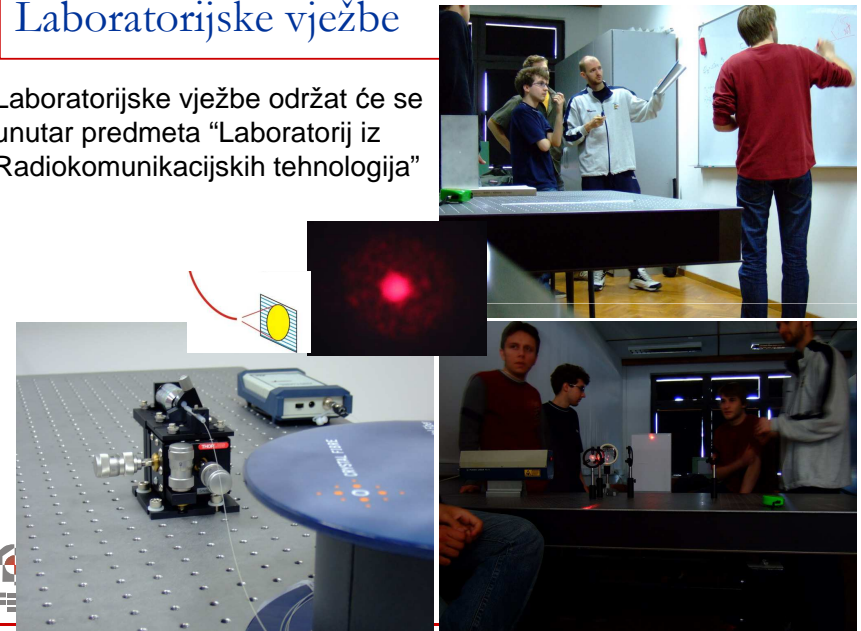
Ocjenjivanje kolegija

- Preduvjeti za prolaznu ocjenu:
 - Minimalno 10 bodova iz usmenog dijela ispita
(posebna pitanja za usmeni za tih 10 bodova)
- Ocjenjivanje - po Gaussu (više od 50 upisanih)
- Cilj ocjenjivanja:
 - 55 – 64 dovoljan (2)
 - 65 – 77 dobar (3)
 - 78 – 90 vrlo dobar (4)
 - 91 – 100 izvrstan (5)



Laboratorijske vježbe

Laboratorijske vježbe održat će se unutar predmeta "Laboratorij iz Radiokomunikacijskih tehnologija"

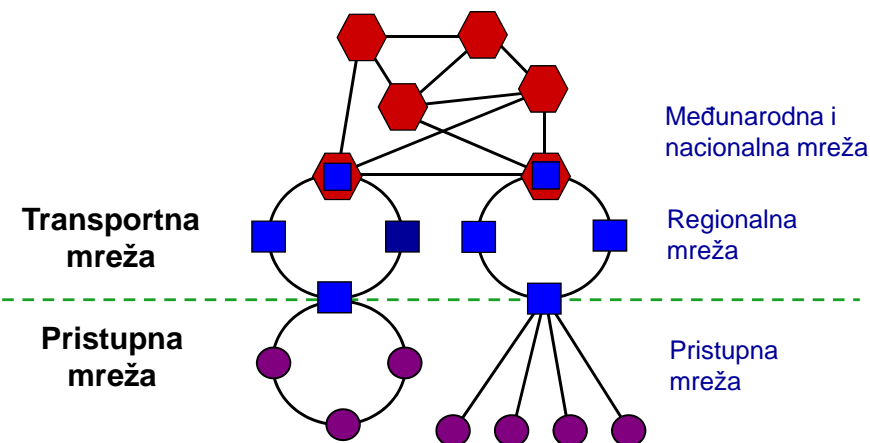


Literatura

- Zvonimir Šipuš, Marko Bosiljevac, Tin Komljenović: *Optički komunikacijski sustavi - Zapisi s predavanja*, Skripta u nastajanju.
- B.E.A. Saleh and M.C. Teich: "*Fundamental of photonics*", Wiley, 2007.
- G.P. Agrawal: "*Fiber-Optic Communication Systems*", John Wiley, 2002.
- R. Ramaswami, K.N. Sivarajan: "*Optical Networks*", Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 2002.



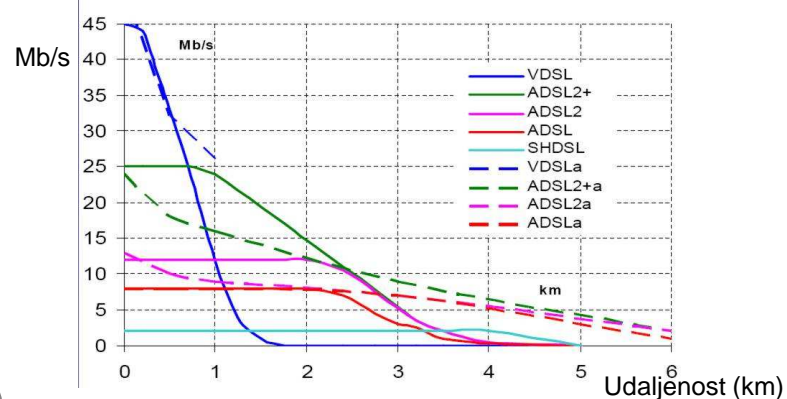
Osnovna struktura komunikacijskih mreža



Pitanje: bakar, radio ili optika ???

Pitanje: bakar ili optika ???

- Optika – komercijalni sustavi i preko 1 Tb/s po svjetlovodu
- Bakar – xDSL sustavi:



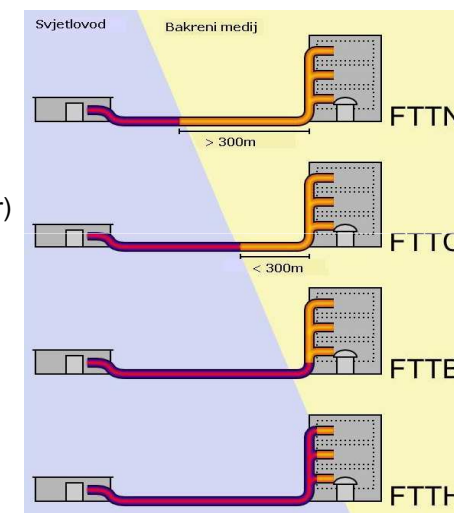
⇒ Bakar – samo u pristupnoj mreži!

Pitanje: bakar ili optika ???

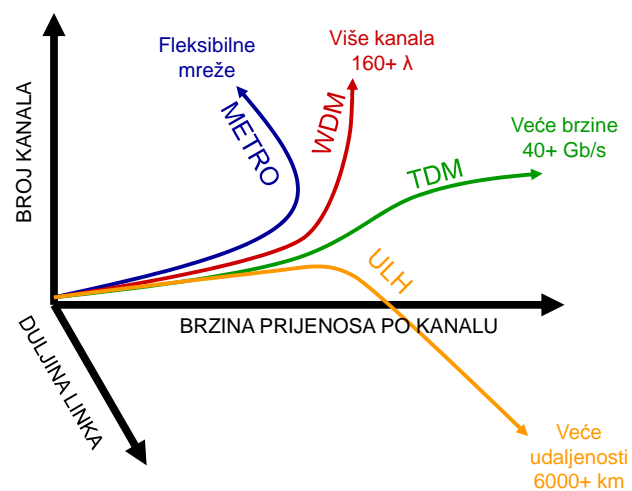
Što je FTTx?

- FTTN (Node – čvor)
- FTTC (Curb – razvodni ormar)
- FTTB (Building – zgrada)
- FTTH (Home - dom)

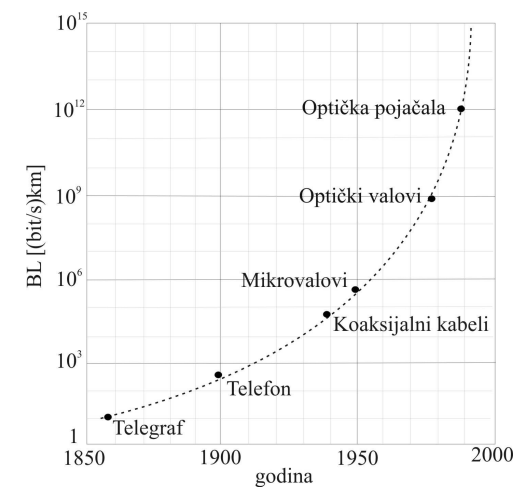
Budućnost: FTTH!



Razvoj transportnih (optičkih) mreža



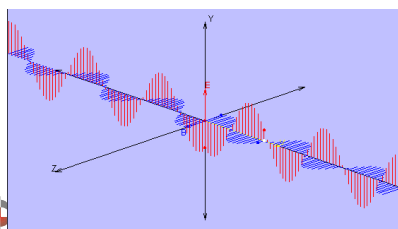
Povijesni prikaz komunikacijskih sustava



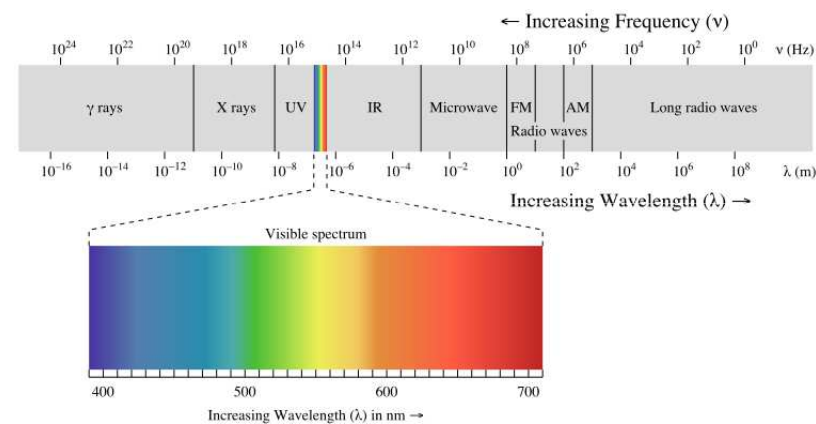
Valovi

U svakidašnjem životu susrećemo se sa:

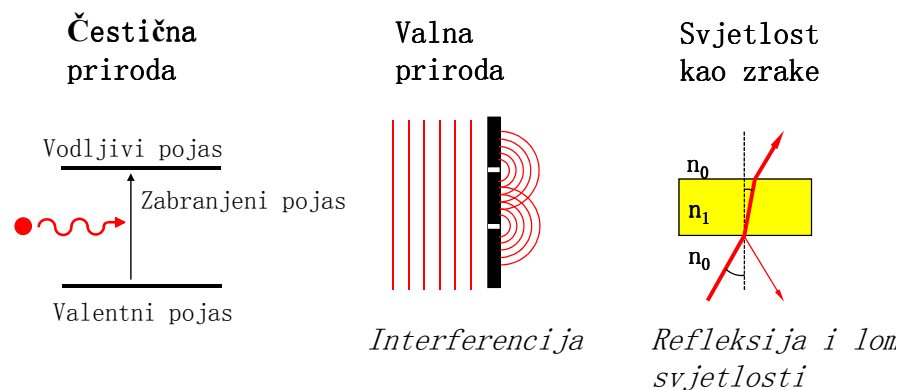
- vodenim valovima
- zvučnim valovima
- elektromagnetskim valovima



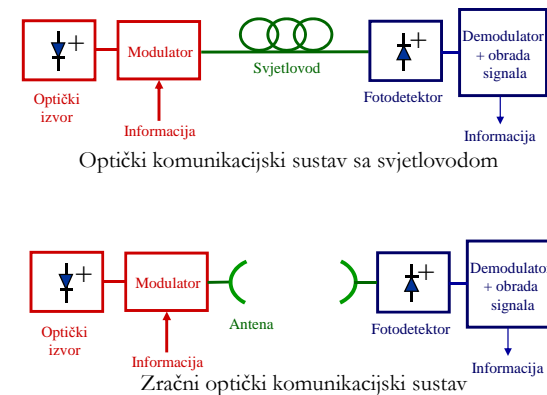
Spektar elektromagnetskih valova



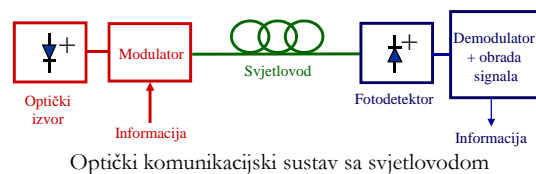
Dualna priroda svjetlosti



Shema optičkog komunikacijskog sustava



Plan predavanja iz OKS

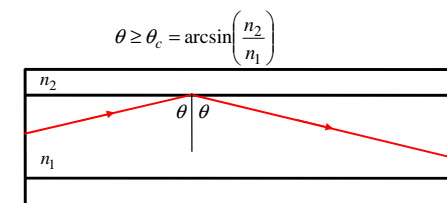
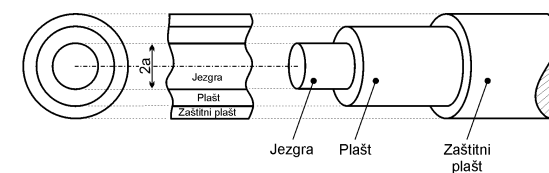


Plan predavanja slijedi osnovnu shemu optičkog komunikacijskog sustava:

- ❑ Optički predajnici
- ❑ Optički prijamnici
- ❑ Optička pojačala
- ❑ Svjetlovodi
- ❑ Mjerenja u optičkim komunikacijskim sustavima
- ❑ Projektiranje optičkih komunikacijskih sustava
- ❑ Vrste optičkih komunikacijskih sustava



Izgled svjetlovoda

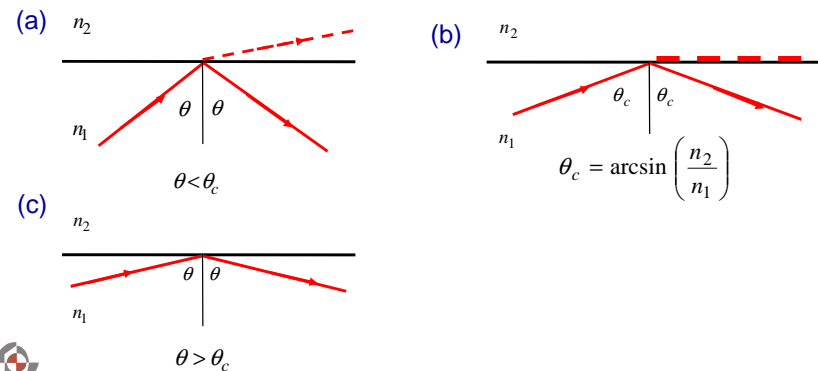


Princip rada: totalna refleksija svjetlosne zrake

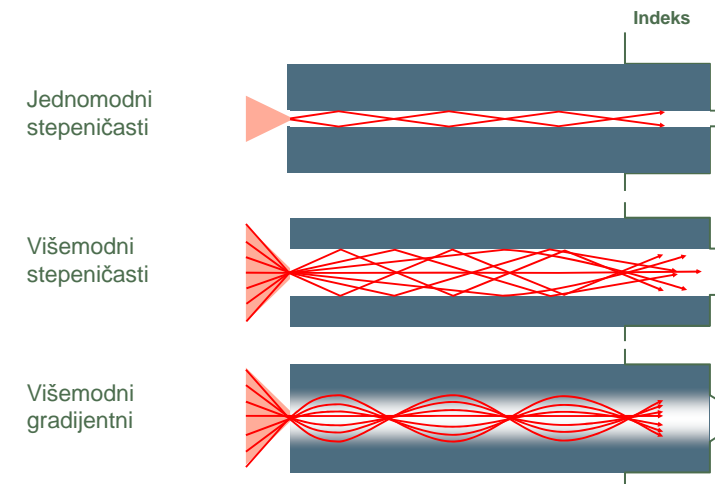


Totalna refleksija – princip rada svjetlovoda

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



Vrste svjetlovoda



Vrste svjetlovoda

Long-haul Metro Inter-building Inter-Office Box-Box Card-Card Chip-Card Intra-chip

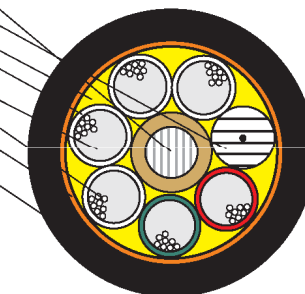
Singlemode silica fiber

Multimode silica fiber

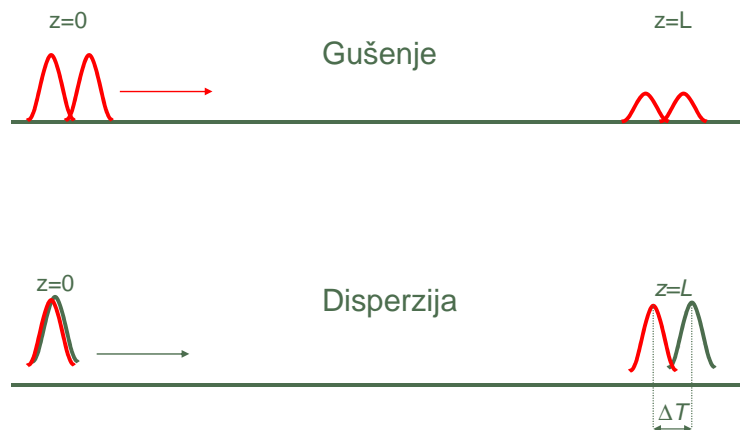
POF, Polymer/silica waveguides

Izgled optičkog kabela

1. Rasteretni centralni nemetalni element
2. Ispuna
3. Petrolatna masa
4. Cjevčica - Pa; PBT; Pa/PBT
5. Tiksotropična masa
6. Svjetlovodno vlakno
7. Aramidna vlakna
8. Plašt - PE

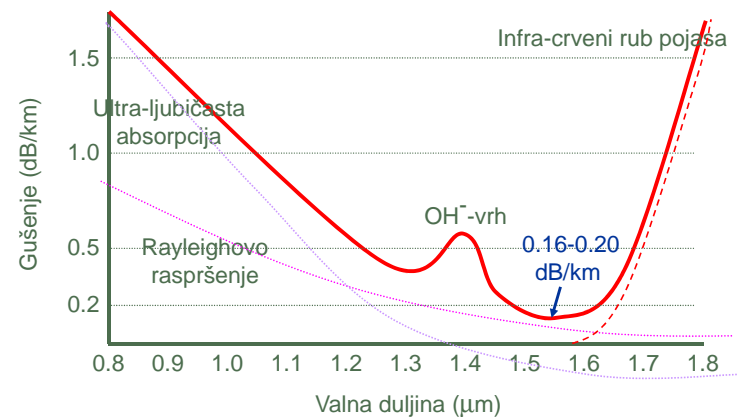


Karakteristike svjetlovoda

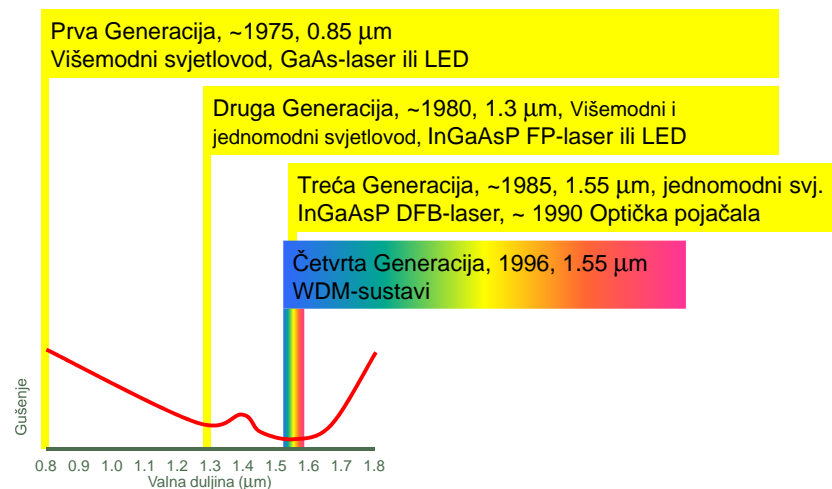


Gušenje u svjetlovodu

- SiO₂ svjetlovodi:

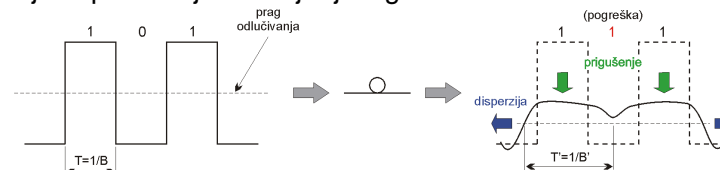


Povjesni pregled komunikacijskih sustava



Disperzija

- Pojava proširenja i slabljenja signala:



- Ograničenje na brzinu prijenosa i maksimalnu duljinu optičke veze:

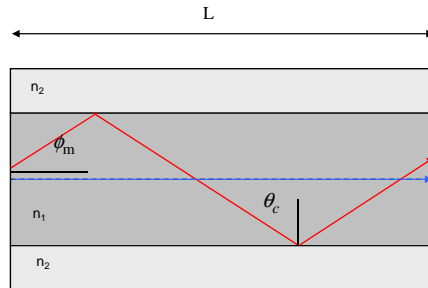
$$\Delta T \leq \frac{T_0}{2} \quad \text{odnosno} \quad B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}$$

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

- Međumodalna disperzija
- Kromatska disperzija
- Polarizacijska disperzija

Primjer - Međumodalna disperzija (disperzija višestrukog puta)

- Promatrajmo dvije zrake – jednu aksijalnu i drugu koja putuje pod maksimalnim kutem ϕ_m (crvena zraka; kut ϕ_m je određen kritičnim kutem θ_c).
- Impuls treba proći kroz svjetlovod duljine L . Uočiti da je potrebno različito vrijeme da te dvije zrake dođu do prijarnika.



Međumodalna disperzija (disperzija višestrukog puta)

- Vrijeme potrebno za prolaz duljine puta L
 - aksijalna zraka

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

- zraka pod kutem ϕ_m

$$T'' = \frac{n_1 L}{c \cdot \cos \phi_m} = \frac{n_1 L}{c \cdot \sin \theta_c} = \frac{n_1^2 L}{n_2 c}$$

$$\Rightarrow \Delta T = T'' - T' = \frac{n_1^2 L}{n_2 c} - \frac{n_1 L}{c} = \frac{L}{c} \left(\frac{n_1^2}{n_2} - n_1 \right) = \frac{L}{c} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \Delta n$$

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

Međumodalna disperzija

- Približna ovisnost: $B_0 \leq \frac{1}{2\Delta T}$
- Iz gornje relacije slijedi ograničenje uslijed međumodalne disperzije:

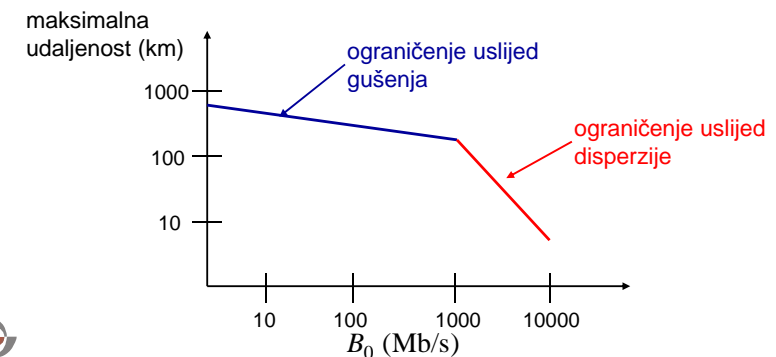
$$B_0 L \leq \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta n}$$

- Tipičan primjer: $n = 1.5$, $\Delta n = 0.01$.
Ograničenje zbog međumodalne disperzije iznosi:

$$B_0 L \leq 15 \text{ Mb/s} \cdot \text{km}$$

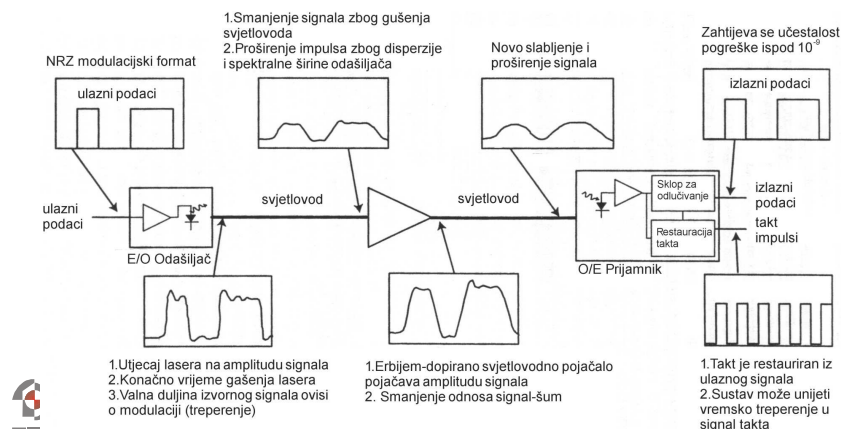
Ograničenja na udaljenost i brzinu prijenosa

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



Problemi koje treba riješiti pri projektiranju optičkih komunikacijskih sustava

- Uzroci ograničenja na maksimalnu brzinu prijenosa i na maksimalnu udaljenost:



Projektiranje optičkih komunikacijskih sustava

- Primier - parametri predainika:

Table 8-8/G.959.1 – Single-channel IrDI parameters and values for optical tributary signal class NRZ 10G long-haul applications

Parameter	Units	P1L1-2D1	P1L1-2D2	1L1-2D2F
G.691 Application code		L-64.1	–	–
General information				
Maximum number of channels	–	1	1	1
Bit rate/line coding of optical tributary signals	–	NRZ 10G	NRZ 10G	NRZ OTU2 FEC enabled
Maximum bit error ratio	–	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12} (Note)
Fibre type	–	G.652	G.652	G.652
Interface at point MPI-S				
Operating wavelength range	nm	1290-1320	1530-1565	1530-1565
Source type	–	SLM	SLM	SLM
Maximum spectral power density	mW/10 MHz	ffs	ffs	ffs
Minimum side mode suppression ratio	dB	30	30	30
Maximum mean output power	dBm	+7	+4	+4
Minimum mean output power	dBm	+3	0	–1
Minimum extinction ratio	dB	6	9	8.2
Eye Mask	–	NRZ 10G 1310 nm region	NRZ 10G 1550 nm region	NRZ 10G 1550 nm region

Projektiranje optičkih komunikacijskih sustava

- Primjer - parametri svjetlovodne veze i prijamnika:

Optical path from point MPI-S to MPI-R				
Maximum attenuation	dB	22	22	22
Minimum attenuation	dB	16	11	11
Maximum chromatic dispersion	ps/nm	130	1600	1600
Minimum optical return loss at MPI-S	dB	24	24	24
Maximum discrete reflectance between MPI-S and MPI-R	dB	–27	–27	–27
Maximum differential group delay	ps	30	30	30
Interface at point MPI-R				
Maximum mean input power	dBm	–9	–7	–7
Minimum sensitivity	dBm	–20	–24	–25
Maximum optical path penalty	dB	1	2	2
Maximum reflectance of optical network element	dB	–27	–27	–27

NOTE – The BER for these application codes is required to be met only after the error correction (if used) has been applied. The BER at the input of the FEC decoder can therefore be significantly higher than 10^{-12} .

Ekonomska strana priče

- T-Com – cijena iznajmljivanja linije određenog kapaciteta (cijene su bez PDV-a):

Paket	Priključenje (jednokratno)	Mjesečna naknada
10M full	37.000,00	33.000,00
155M full	100.000,00	140.000,00
622M full	175.000,00	204.000,00
2,5G full	325.000,00	310.000,00
10G full	400.000,00	420.000,00

Znanja koje bi studenti trebali imati nakon položenog ispita

1. **Princip rada optičkog predajnika i prijamnika** (fizikalna slika, modulacijski postupci, svojstva, ograničenja)
2. **Fizikalna slika propagacije signala kroz svjetlovod** (vrste svjetlovoda, modovi, ovisnost konstante širenja o frekvenciji, distribucija gustoće snage,).
3. **Ograničenja na širenje elektromagnetskog vala kroz svjetlovod** (gušenje, disperzija, nelinearni efekti).
4. **Određivanje kvalitete signala na prijemu** (BER, S/N)
5. **Mjerenja u optičkim komunikacijskim sustavima**
6. **Projektiranje optičke veze.**



Optički predajnici - izvori svjetlosnog signala



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 jednačba 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 energetske nivoi** koje prezentiramo pomoću energetskih dijagrama

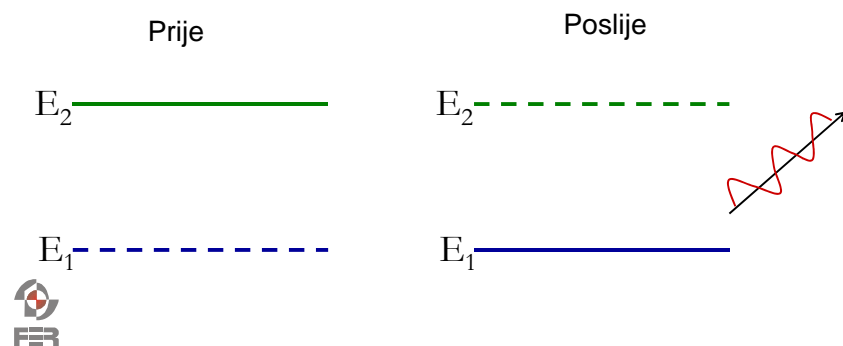
————— E_2

————— E_1



Spontana emisija

Spontana emisija je, kao što već i samo ime kaže, kada atom spontano prijeđe 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:
$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

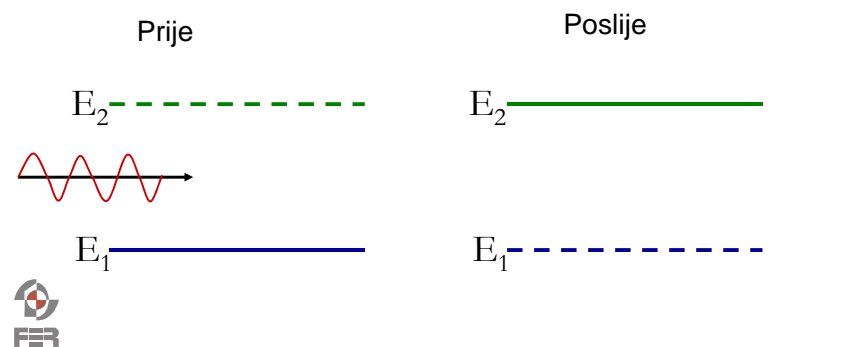
Uočiti

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



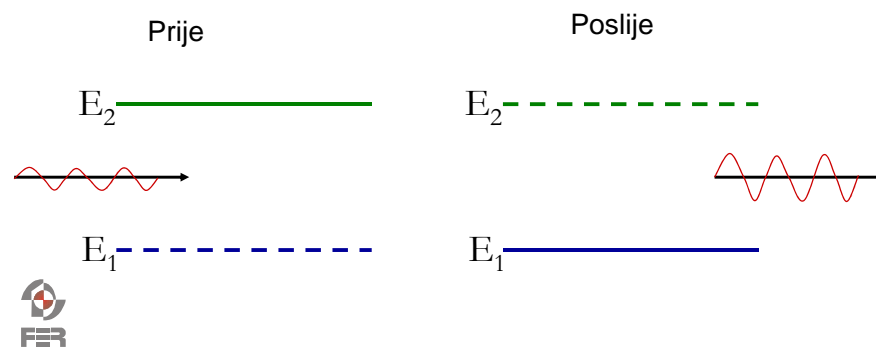
Apsorpcija

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

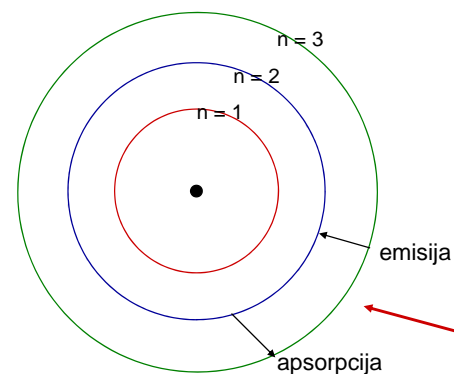
Što to znači koherentno zbrajanje?

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 apsurdna kao npr. kršenja većine termodinamičkih zakona.



Boltzmann-ov zakon



- Elektroni jednog atoma žele postići najniži energetska nivo. Kod zaposjednutih nižih energetskih nivoa, impuls može izbaciti elektron u ljusku većeg energetskog nivoa, a na njegovo mjesto će doći drugi elektron.

POJEDNOSTAVLJENI PRIKAZ



Boltzmann-ov zakon

Boltzmann-ov zakon daje omjer broja atoma na pojedinim energetskim nivoima u stanju termodinamičke ravnoteže:

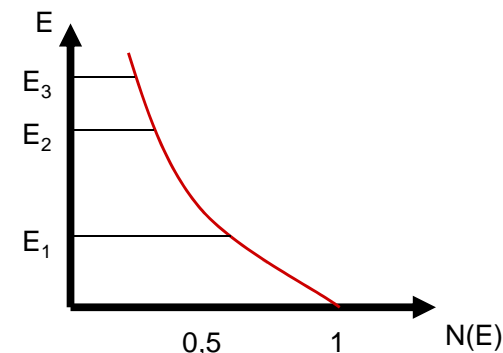
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[-\frac{(E_2 - E_1)}{k_B T}\right] \quad k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

- N_1 i N_2 su gustoće stanja (broj atoma po jedinici volumena) na donjem/gornjem nivou
- g_1 i g_2 su faktori degeneracije (broj mogućih stanja elektrona na nivoima E_1 i E_2).
- k_B je Boltzmannova konstanta.



Boltzmann-ov zakon (2)

- Kod sobne temperature $kT \approx 1/40$ eV.
- Za optičke prijelaze u vidljivom ili infracrvenom području (gdje je $E_2 - E_1 \geq 1$ eV) populacija višeg nivoa je zanemarivo mala u odnosu na populaciju nižeg nivoa.



Boltzmann-ov zakon (3)

Objašnjenje faktora degeneracije:

- Ako se npr. vodikov atom nalazi u osnovnom stanju, tj. ako je elektron u $1s$ nivou, tada je valna funkcija sferno simetrična i $g = 1$ (odnosno 2 ako uzmemo spin elektrona u obzir).
- Ako je elektron pobuđen u sljedeći $2p$ nivo, tada je valna funkcija u obliku broja 8, tj. imamo tri različite (ortogonalne) valne funkcije koje imaju istu energiju i koje mogu biti orijentirane u smjeru x, y i z osi. Stoga je $g = 3$ (odnosno 6 ako uzmemo spin u obzir).
- Omjer g_2 / g_1 za slučaj $2p$ i $1s$ energetskeg nivoa je stoga $g_2 / g_1 = 3$.



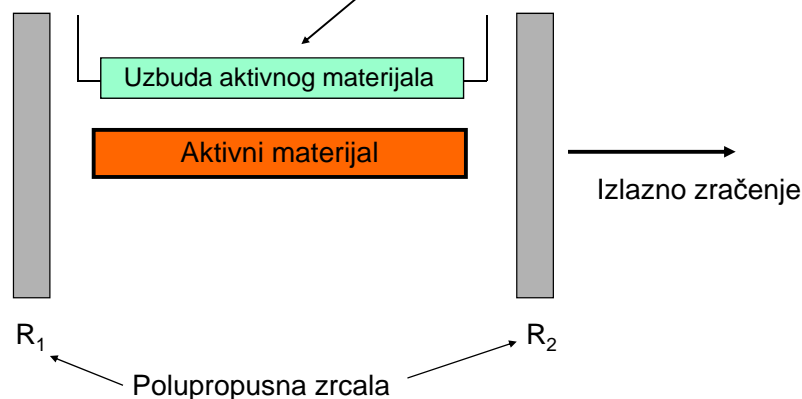
Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija

- Pitanje: Zašto mi u prirodi ne primjećujemo stimuliranu emisiju, već samo apsorpciju?
- Snaga apsorbiranog signala proporcionalna je N_1 (broj atoma po jedinici volumena na donjem energetskeg nivou)
- Snaga signala uslijed stimulirane emisije proporcionalna je N_2 (broj atoma po jedinici volumena na gornjem energetskeg nivou)
- U uvjetima termodinamičke ravnoteže vrijedi $N_1 > N_2$.
- Ako želimo postići da prevladava stimulirana emisija (odnosno da imamo pojačanje signala), moramo postići tzv. inverziju populacije: $N_2 > N_1$.
- Drugim riječima, moramo narušiti stanje termodinamičke ravnoteže.

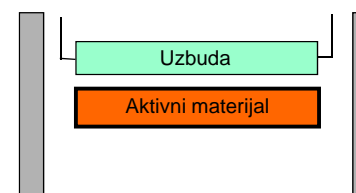


Izgled lasera

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



Laser (2)

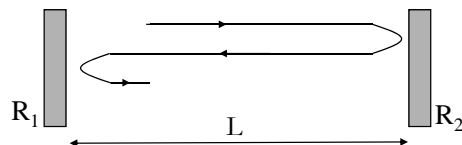


- Laser možemo promatrati kao oscilator. Povratna veza je *rezonantna šupljina*.
- Osnovni model rezonatora – Fabry-Perot-ov rezonator (rezonator s dva paralelna zrcala).
- *Rezonator* – oklopljena elektromagnetska struktura sa sposobnošću pohranjivanja elektromagnetske energije.



⇒ 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 – reflektivnosti zrcala

(reflektivnost R – odnosi se na intenzitet,

faktor refleksije Γ – odnosi se na električno polje E ,

$R = |\Gamma|^2$)

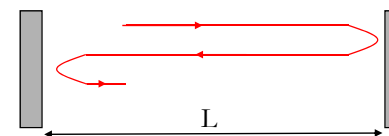
γ – pojačanje po jedinici duljine

I – intenzitet elektromagnetskog vala

Uočiti: $1 - R$ = dio energije koji se propušta kroz polupropusno zrcalo.

Laser (4)

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



Matematički zapis minimalnog potrebnog pojačanja po jedinici duljine γ

$$Ie^{2\gamma L} R_1 R_2 \geq I$$

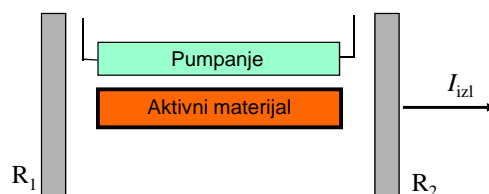
Uvjet postojanja laserskih oscilacija

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



Napomena. Indirektno smo pretpostavili $\beta \cdot 2L = q \cdot 2\pi$, odnosno da se signal vraća u fazi ($q \in \mathbf{N}$).

Laser (5)



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

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

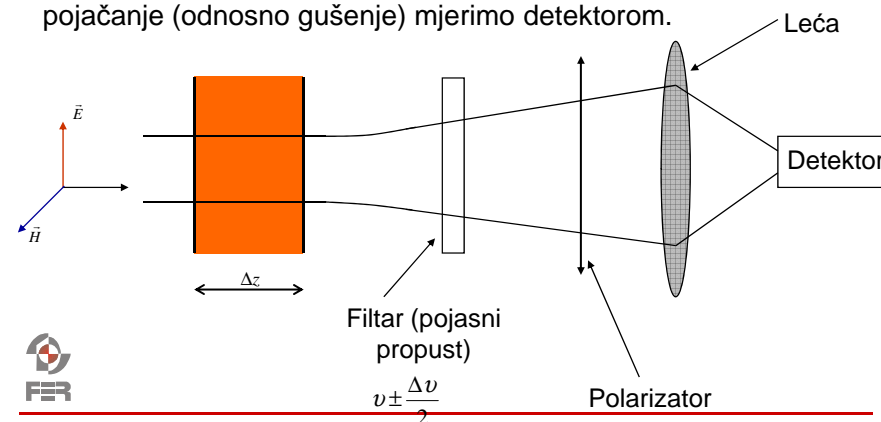
Izlazni intenzitet zračenja je:

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

Osnovna laserska jednadžba

■ Koliko je pojačanje po jedinici duljine aktivnog materijala?

■ Pretpostavimo da imamo sloj materijala debljine Δz koji je obasjan elektromagnetskim valom intenziteta I_v [W/m²], te pojačanje (odnosno gušenje) mjerimo detektorom.



Osnovna laserska jednađžba (2)

▪ Uočimo da detektor ne može razlikovati različite fizikalne procese (spontana emisija, stimulirana emisija, apsorpcija). Stoga filter i polarizator minimiziraju „šum“ u našem eksperimentu koji je posljedica spontane emisije.

▪ Minimizacija šuma pomoću filtra i polarizatora:

- frekvencijski pojas $\left[\nu - \frac{\Delta \nu}{2}, \nu + \frac{\Delta \nu}{2} \right]$
- polarizacija – samo pola snage šuma će proći polarizator (i cijeli korisni signal)



Osnovna laserska jednađžba (3)

Posložimo sve procese koji utječu na veličinu ΔI_ν (promjena inteziteta) u tablicu. Pojedini uzroci su poredani u stupcima, a stimulirana emisija, apsorpcija i spontana emisija su redovi.

$\Delta I_\nu =$	$+ h\nu$	$\times B_{21} \frac{I_\nu}{(c/n)}$	$\times g(\nu)$	$\times 1$	$\times 1$	$\times N_2 \Delta z$	St. em.
	$- h\nu$	$\times B_{12} \frac{I_\nu}{(c/n)}$	$\times g(\nu)$	$\times 1$	$\times 1$	$\times N_1 \Delta z$	Ap
	$+ h\nu$	$\times A_{21} \Delta \nu$	$\times g(\nu)$	$\times \frac{1}{2}$	$\times \frac{d\Omega}{4\pi}$	$\times N_2 \Delta z$	Sp. em.
	1	2	3	4	5	6	

Osnovna laserska jednađžba (4)

Značenje kolona:

1. Svaki proces je uzrokovan fotonom energije $h\nu$.
2. Omjer pojedinog procesa po atomu $\Rightarrow 1 \times 2$ daje snagu uslijed pojedinog atoma. (Napomena: Uzeli smo u obzir indeks loma materijala od kojeg je načinjen laser.)
3. Oblik spektralne linije – nemamo idealnu liniju (slučaj usamljenog atoma) već spektralna linija ima oblik \Rightarrow moramo skalirati jednađžbu s $g(\nu)$
4. Vjerojatnost ispravne (željene) polarizacije.
5. Vjerojatnost da je doprinos unutar prostornog kuta određenog eksperimenta.
6. Broj atoma uključenih u "eksperiment".



Osnovna laserska jednađžba (5)

▪ Tri ekvivalentne definicije oblika spektralne linije $g(\nu)$:

- (1) $g(\nu')d\nu'$ – vjerojatnost da spontano emitirani fotoni budu u frekvencijskom intervalu $[\nu', \nu' + d\nu']$
- (2) $g(\nu')d\nu'$ – relativna jakost apsorpcije elektromagnetskog vala frekvencije u intervalu $[\nu', \nu' + d\nu']$ od strane atoma u stanju E_1
- (3) $g(\nu')d\nu'$ – relativna jakost stimulacije uslijed elektromagnetskog vala frekvencije u intervalu $[\nu', \nu' + d\nu']$ od strane atoma u stanju E_2 .

Pri tome vrijedi ($g(\nu)$ predstavlja funkciju gustoće vjerojatnosti):

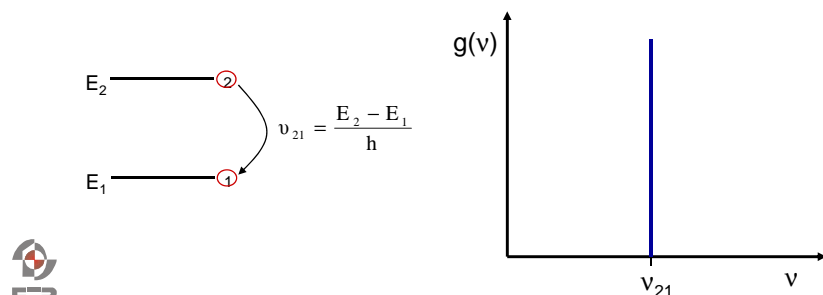
$$\int_0^\infty g(\nu') d\nu' = 1$$



Osnovna laserska jednađžba (6)

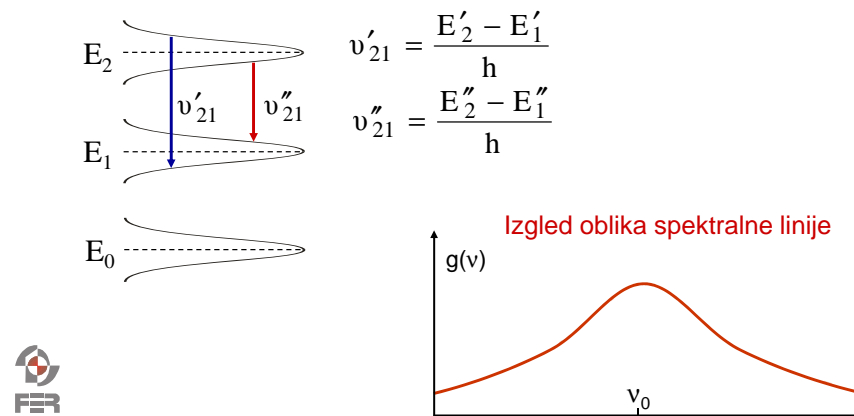
Oblik spektralne linije:

- Kada bi energetske nivoe za promatrani materijal bili diskretni (što NIJE slučaj u praksi zbog Paulijevog principa da u sustavu atoma koji izmjenjuju elektrone svaki energetski nivo može biti zauzet s najviše jednim elektronom), tada bi oblik spektralne linije bio



Osnovna laserska jednađžba (7)

- Postoje mnogi faktori zbog kojih dolazi do proširenja linije.
- Jedan od razloga homogenog proširenja – uslijed širine energetskih stanja



Osnovna laserska jednađžba (8)

- Nakon sređivanja izraza:

$$\frac{\Delta I_\nu}{\Delta z} \cong \frac{dI_\nu}{dz} = \left[\frac{h\nu}{(c/n)} (B_{21}N_2 - B_{12}N_1) g(\nu) \right] I_\nu + \frac{1}{2} \left[h\nu A_{21} N_2 g(\nu) \Delta\nu \frac{d\Omega}{4\pi} \right]$$

- Zadnji dio izraza možemo proglasiti šumom, budući da predstavlja doprinos na detektoru bez prisutstva ulaznog signala (postoji i kada je $I_\nu = 0$). Iako je krucijalan za rad lasera (inicijalne oscilacije) za sada ćemo ga zanemariti.

Osnovna laserska jednađžba (9)

Uz korištenje izraza za Einsteinove koeficijente:

$$\frac{B_{12}}{B_{21}} = \frac{g_2}{g_1} \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad \tau_{21} = \frac{1}{A_{21}}$$

proizlazi:

$$\frac{dI_\nu}{dz} = \left\{ \left[\frac{1}{\tau_{21}} \frac{\lambda^2}{8\pi n^2} g(\nu) \right] \left[N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right] I_\nu \right\} = \gamma(\nu) I_\nu$$

Pri tome je $\gamma(\nu)$ koeficijent pojačanja.

Ovo je **osnovna jednađžba iz teorije lasera** i stoga je treba poštivati.

Osnovna laserska jednađžba (10)

Napomena: Pojaćanje imamo uz bilo koju pozitivnu vrijednost $\gamma(\nu)$:

$$I_\nu + \Delta I_\nu = I_\nu (1 + \gamma(\nu) \Delta z)$$

Budući da su τ_{21} , λ , n i $g(\nu)$ pozitivne veličine, da bi $\gamma(\nu) > 0$ (tj. da imamo pojaćanje) treba biti zadovoljeno

$$N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 > 0$$

Drugim rijećima, moramo imati **inverziju populacije**.

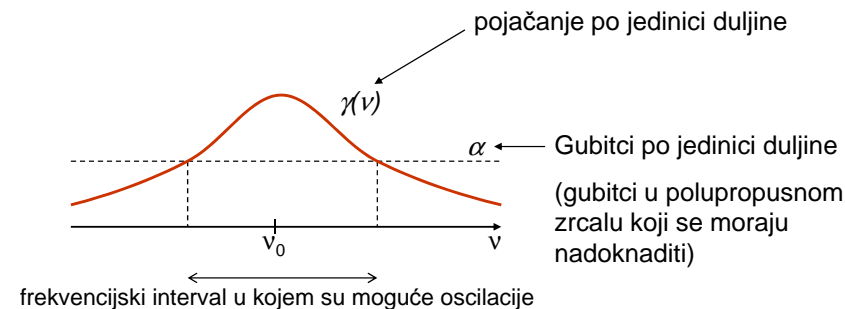
Kolika mora biti minimalna vrijednost $\gamma(\nu)$ (pojaćanje po jedinici duljine)?

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



Osnovna laserska jednađžba (11)

Drugim rijećima, pojaćanje po jedinici duljine mora biti veće od gubitaka kako bi moglo doći do laserskih oscilacija.



Uočiti: oblik pojaćanja po jedinici duljine $\gamma(\nu)$ je ponajviše diktiran s oblikom spektralne linije $g(\nu)$.

Osnovna laserska jednađžba za lasersku diodu

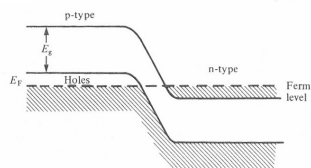
- Za laserske diode koeficijent pojaćanja $\gamma(\nu)$ iznosi ($f(E)$ – Fermijeva funkcija)

$$\gamma(\nu) = \frac{\lambda_0^2}{\tau_r 8\pi n^2} \rho(\nu) [f(E_2) - f(E_1)]$$

- Uočiti – da bi imali pojaćanje treba vrijediti

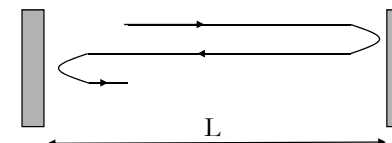
$$f(E_2) - f(E_1) > 0$$

- Da bi to vrijedilo treba biti $E_2 < E_{fc}$ i $E_1 > E_{fv}$, odnosno laserska dioda mora biti izvedena od degeneriranih poluvodića (jako dopiranih poluvodića):



Laser – fazni uvjet

- Za postizanje stimulirane emisije nije dovoljno postići samo inverziju populacije, već želimo istovremeno iz velikog broja atoma dobiti zraćenje iste faze. To se postiže smještajem aktivnog medija u rezonator:



- Uvjet rezonancije – uvjet konstruktivne interferencije (dva puta reflektirani EM val je u fazi s početnim EM valom)



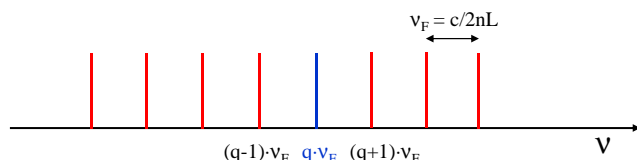
$$\beta \cdot 2L = q \cdot 2\pi, \quad \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2L = q \cdot 2\pi \Rightarrow q \frac{\lambda}{2} = L$$

Laser – fazni uvjet

- Rezonantna frekvencija iznosi:

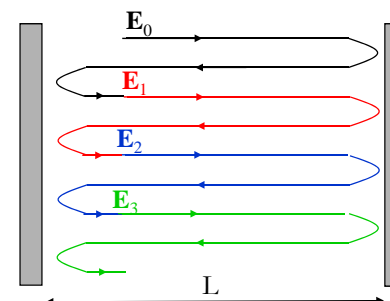
$$q \frac{\lambda}{2} = q \frac{c}{2n\nu} = L \Rightarrow \nu = \frac{qc}{2nL} = q \cdot \nu_F$$

- Izgled modova (fazni uvjet):



Laser – fazni uvjet (za one koje žele znati više)

- Problem – kako izračunati ovisnost inteziteta unutar rezonatora o frekvenciji
⇒ moramo zbrojiti sve reflektirane signale!



Laser – fazni uvjet (za one koje žele znati više)

- Ako fazni pomak $\beta \cdot 2L$ nije točno $q \cdot 2\pi$ ($\beta \cdot 2L = q \cdot 2\pi + \phi$) možemo pisati ($r = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$)

$$\begin{aligned} \vec{E}_r &= \vec{E}_0 + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \\ &= \vec{E}_0 + r\vec{E}_0 e^{-j\phi} + r^2\vec{E}_0 e^{-j2\phi} + \dots \end{aligned}$$

$$\vec{E}_r = \frac{\vec{E}_0}{1 - r e^{-j\phi}} \quad \leftarrow \text{suma geometrijskog reda}$$

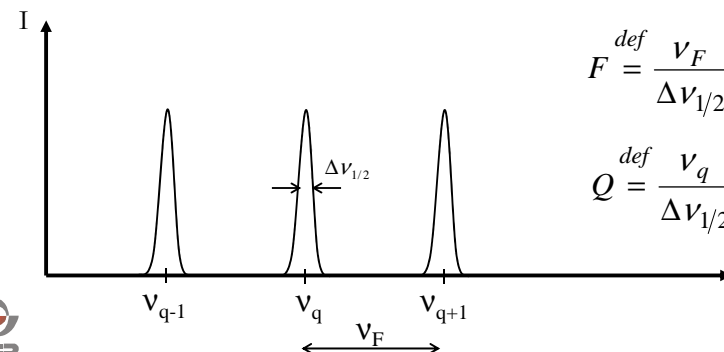
$$\begin{aligned} I &= \frac{I_0}{|1 - r e^{-j\phi}|^2} = \frac{I_0}{[(1 - r \cos \phi)^2 + (r \sin \phi)^2]} = \frac{I_0}{[1 + r^2 - 2r \cos \phi]} = \frac{I_0}{(1-r)^2 + 4r \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \\ &= \frac{I_0}{(1-r)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \end{aligned}$$

$\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x = 1 - 2\sin^2 x$



Laser – fazni uvjet (za one koje žele znati više)

- Kvalitetu svakog rezonatora, odnosno širinu spektralne linije, možemo opisati preko faktora dobrote Q i finoće rezonatora F
- I faktor dobrote Q i finoće rezonatora F opisuju razmak frekvencija kod kojih intezitet pada na polovicu maksimalne vrijednosti
(što je manja refleksivnost zrcala, to je manji F i Q, odnosno veći je $\Delta\nu_{1/2}$)



$$F \stackrel{def}{=} \frac{\nu_F}{\Delta\nu_{1/2}}$$

$$Q \stackrel{def}{=} \frac{\nu_q}{\Delta\nu_{1/2}}$$



Laser – fazni uvjet (za one koje žele znati više)

- Definirajmo finoću rezonatora F kao ($r = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$):

$$F = \frac{\pi \cdot r^{1/2}}{1 - r}$$

$$I = \frac{I_{\max}}{1 + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}, \quad I_{\max} = \frac{I_0}{(1 - r)^2}$$

- Faza ϕ se promijeni za $2 \cdot \pi$ ako se frekvencija promijeni za $\nu_F = c/2nL$

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\nu}{\nu_F}$$

$$\Rightarrow I = \frac{I_{\max}}{1 + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi \nu}{\nu_F}\right)}$$



Laser – fazni uvjet (za one koje žele znati više)

- Širina spektralne linije je definirana frekvencijama kada intenzitet padne na $1/2$.

$$\left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi \Delta \nu_{1/2}}{2\nu_F}\right) \approx \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \left(\frac{\pi \Delta \nu_{1/2}}{2\nu_F}\right)^2 = 1 \Rightarrow \Delta \nu_{1/2} = \frac{\nu_F}{F}$$

- Veza između faktora dobrote Q i F :
 - U mikrovalnim rezonatorima kvalitetu rezonatora se prikazuje s faktorom dobrote Q . Može se pokazati da je

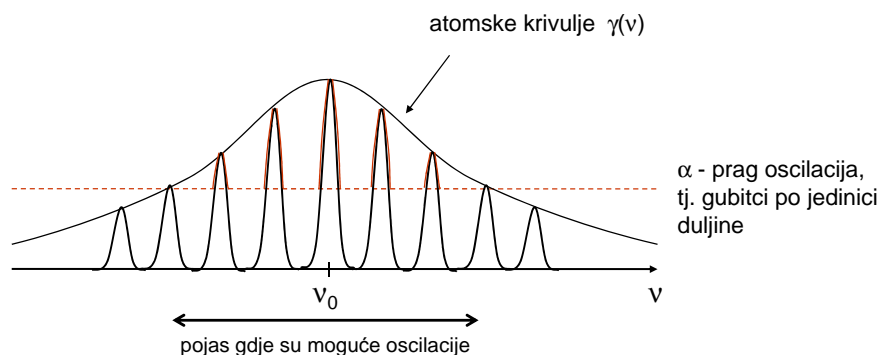
$$Q = \frac{\nu_0}{\nu_F} F$$

- Primjer:** $L = 1$ m, $R_1 = R_2 = 0.99$, $\lambda = 632.8$ nm (He – Ne laser)
 $\Rightarrow Q = 9.88 \cdot 10^8$
 $F = 313$

Izuzetno (nepraktično) velika vrijednost



Laser – amplitudni i fazni uvjet



- Višestrukost modova je obično nepoželjna. Mogu se izbjeći skraćivanjem šupljine tako da neželjeni modovi padnu ispod praga.
- Time se međutim smanjuje snaga i kvaliteta lasera. Postoje i drugi načini postizanja jednomodnosti.



Poluvodički izvori svjetlosti

- LED diode
- Laserske diode:
 - Fabry-Pérot laserske diode
 - Jednomodne laserske diode (DFB, DBR)
 - Laserske diode s vertikalnim rezonatorom (VCSEL)



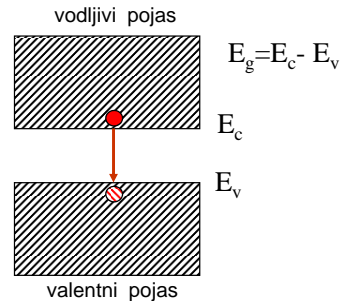
LED diode

LED (Light-Emitting Diode) – je propusno polarizirani p-n spoj (dioda) koji zrači svjetlost. Fotoni nastaju rekombinacijom para elektron-šupljina tako da je približna vrijednost valne duljine koju zrači LED dioda:

$$E_g \cong h\nu = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_g}$$

$$\left(\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1,24}{E_g(\text{eV})} \right)$$

Uočiti: Imamo **spontanu** emisiju.



LED diode

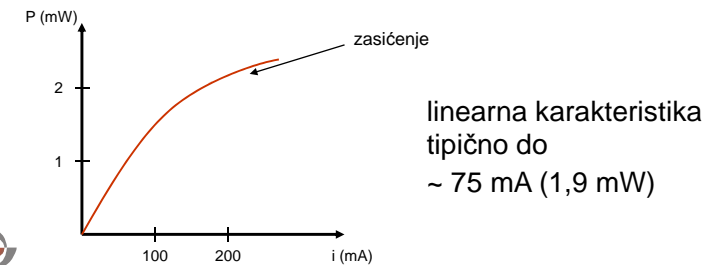
Izračena snaga:

$$P = \eta_{ex} h\nu \frac{I_d}{e}$$

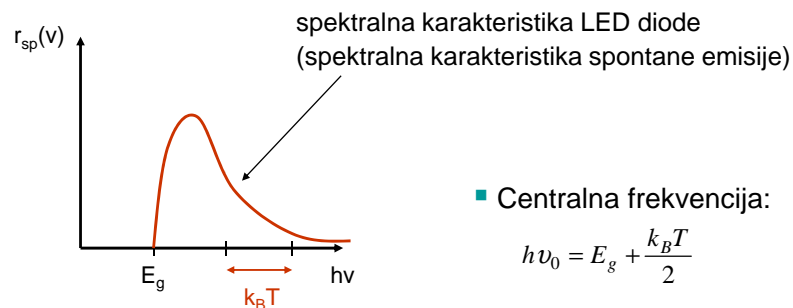
Vanjska kvantna djelotvornost tipične vrijednosti između 1 i 5%

Koja je interpretacija ove jednadžbe?

Imamo **linearnu ovisnost** izlazne optičke snage i struje kroz diodu.



Frekvencijska karakteristika LED diode



■ Centralna frekvencija:

$$h\nu_0 = E_g + \frac{k_B T}{2}$$

■ Širina spektralne linije:

$$\Delta\lambda = \Delta\nu \frac{\lambda_0^2}{c} = \frac{1,8k_B T}{hc} \lambda_0^2$$

$\lambda_0 (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda (\text{nm})$
0,85	27
1,3	63
1,55	90



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:

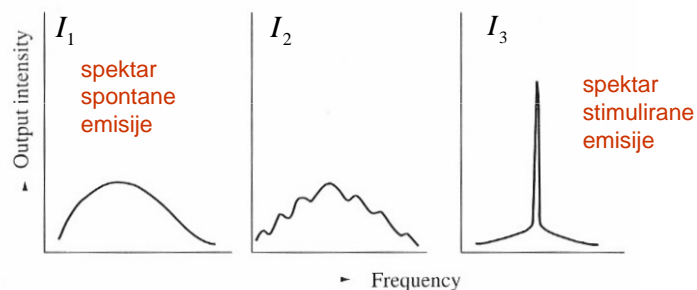
- P-I karakteristika više nije linearna
- Velika temperaturna osjetljivost
- Visoka potrebna tehnologija (heterostruktura, rezonator, Braggova periodička struktura, ...)

⇒ relativno visoka cijena.



Spektralna ovisnost emitirane svjetlosti

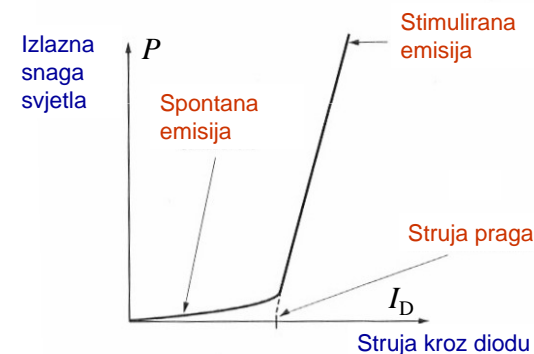
Povećavanjem struje kroz propusno polariziranu lasersku diodu, bitno se mijenja spektar emitiranog optičkog signala:



$$I_1 < I_2 < I_3$$

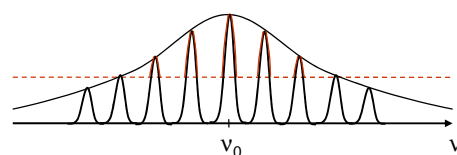
P-I karakteristika

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

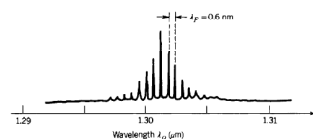


Spektralna ovisnost emitirane svjetlosti

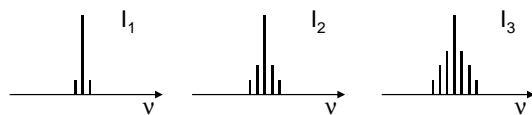
- Spektar emitiranog signala (višemodna Fabry-Perot laserska dioda)



Izmjerena karakteristika

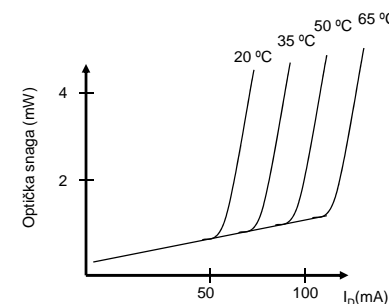


- Ovisnost broja modova o struji kroz diodu (odnosno ovisnost o izlaznoj optičkoj snazi)



$$I_1 < I_2 < I_3$$

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:

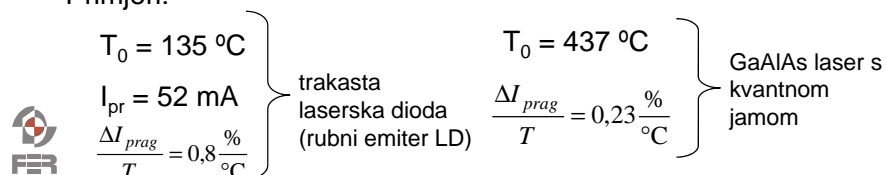
$$I_{\text{prag}}(T) = I_z e^{T/T_0}$$

I_z - konstanta

T_0 - mjera relativne temperaturne neosjetljivosti

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

Primjeri:



Laserske diode – temperaturni utjecaj

Regulacija konstantne izračene optičke snage:

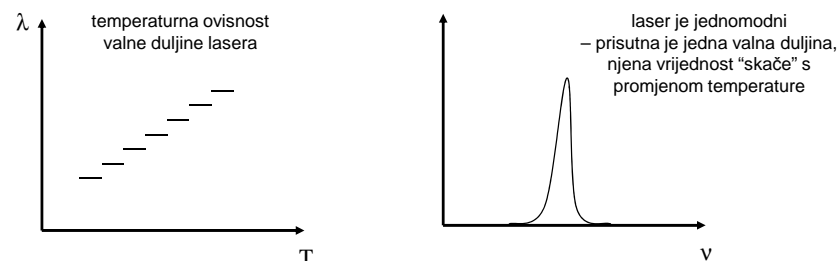
- optičkom povratnom vezom
 - dio optičke snage se odvoji iz prednjeg čela diode (prije ulaska npr. u svjetlovod), ili sa stražnjeg čela diode
 - dio snage iz stražnjeg čela se prati fotodetektorom
- temperaturno prilagodljivim sklopovima za prepoznavanje praga

Drugi razlog podešavanja predstruje – 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

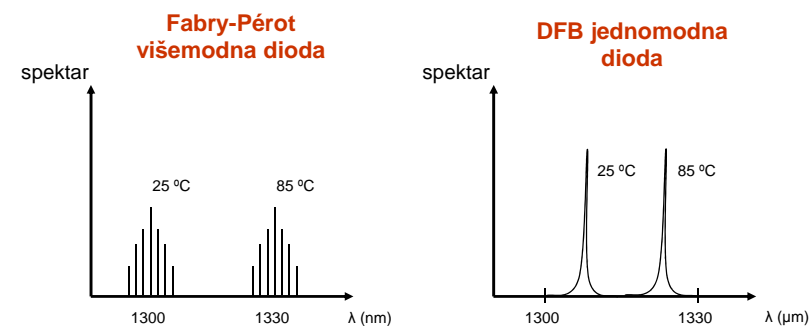


Slika prikazuje valnu duljinu jednomodnih lasera kao funkciju temperature (bitno kod DWDM sustava da valna duljina ne "pobjegne" u drugi komunikacijski kanal!)

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 višemosodne laserske diode.



Valna dužina emitirane svjetlosti

Primarno određena 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**

