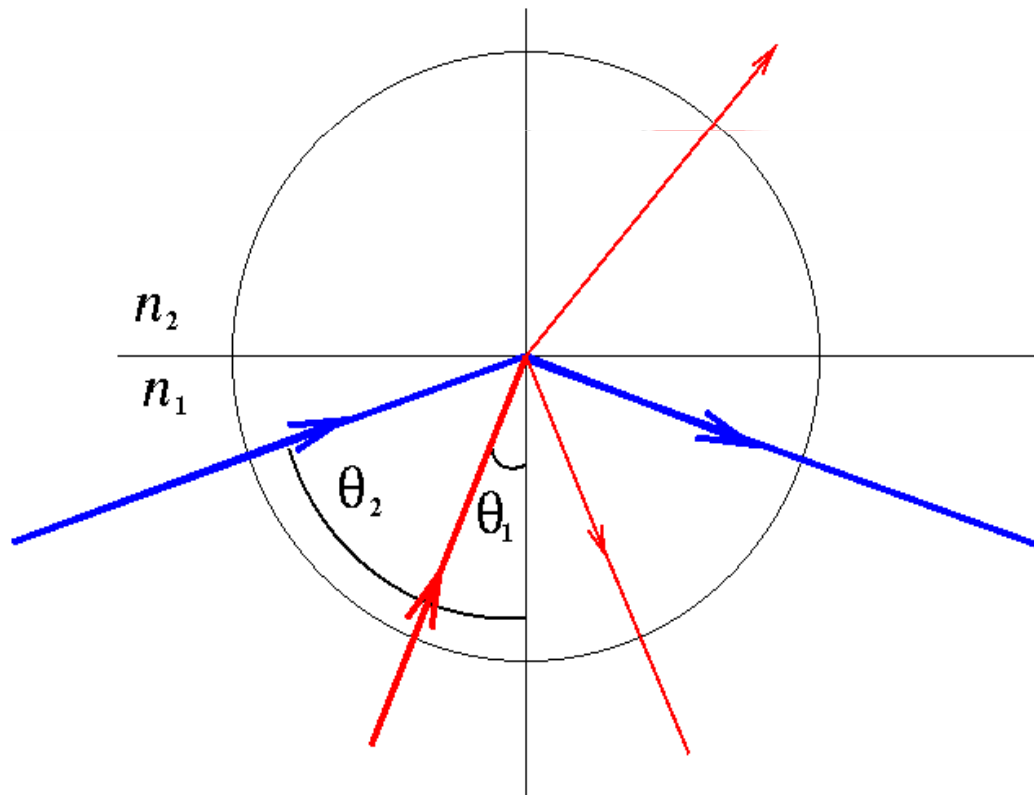


Teme prihodnjih predavanj

- Uvod v nastanek optičnih komunikacij
- Temeljni optični pojavi
- Optično vlakno
- Slabljenje v optičnem vlaknu
- Disperzija v optičnem vlaknu
- Kompenzacija disperzije
- Nelinearnost v optičnem vlaknu
- Mikrostrukturna vlakna
- Zvari in konektorji
- Sestavni deli optične zveze
- Optični viri
- Optični detektorji
- Optični ojačevalniki
- Oddajniki in sprejemniki
- Signali in šumi
- Modulacijski formati
- Razvrščanje
- Razvrščanje WDM
- Optična zveza
- Optična omrežja
- Optično dostopovno omrežje
- Nove tehnologije v transportnem omrežju
- Nove tehnologije v dostopovnem omrežju
- Optične koherentne zveze
- Radio po vlaknu
- Optika v mobilnih omrežjih
- Primeri preprostih zvez
- Optika v notranjih prostorih

Optične komunikacije

Kratek pregled osnov



Mobitel d.d.,
izobraževanje

10. 9. 2010,
predavanje 14

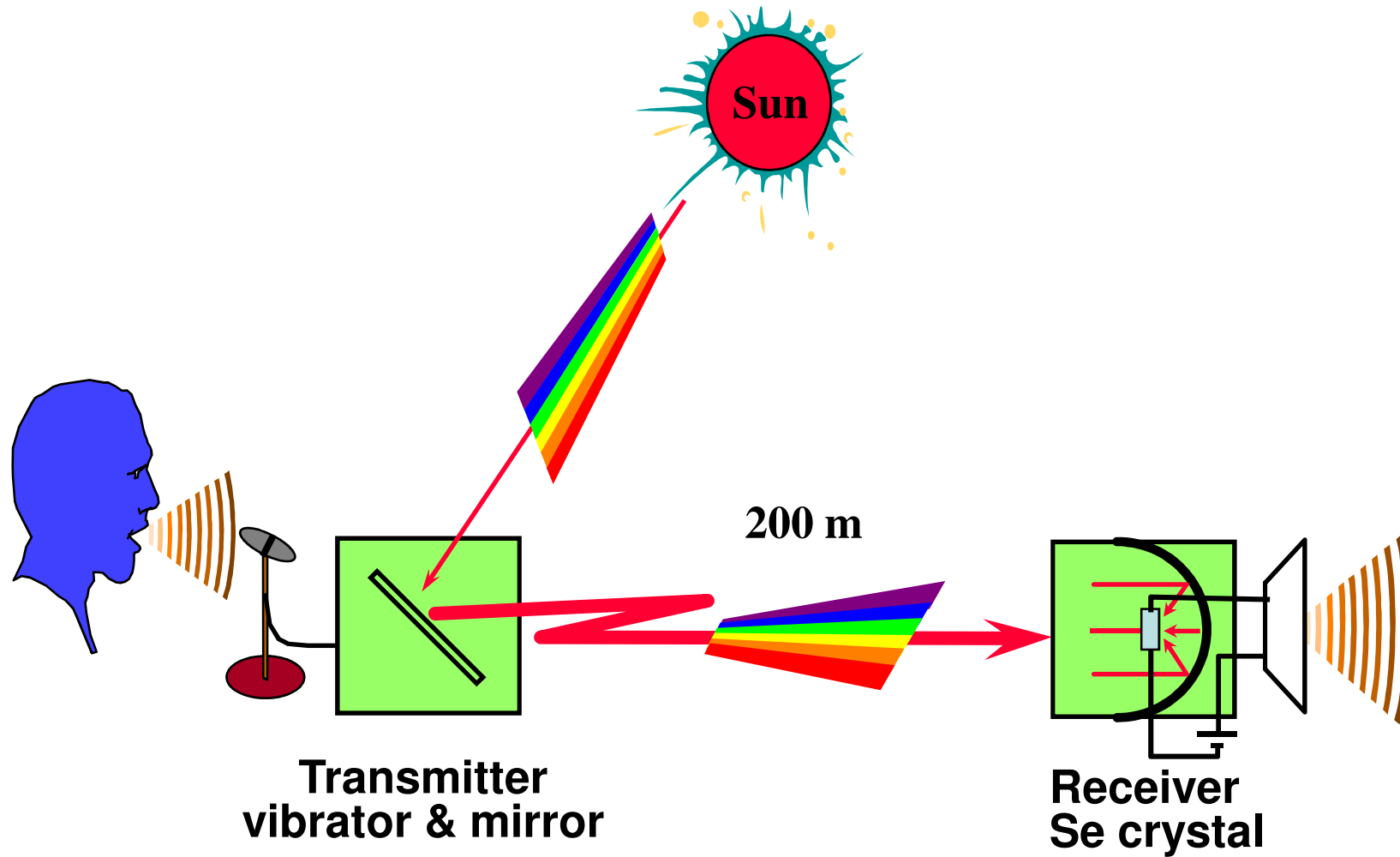
Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

Kratka obnovitev:

1. Optično vlakno
2. Slabljenje
3. Disperzija
4. Nelinearnost
5. Optično ojačevanje
6. Fotodetektor
7. Signal in šumi

Photophone(A.G. Bell, 1880)



Optično vlakno

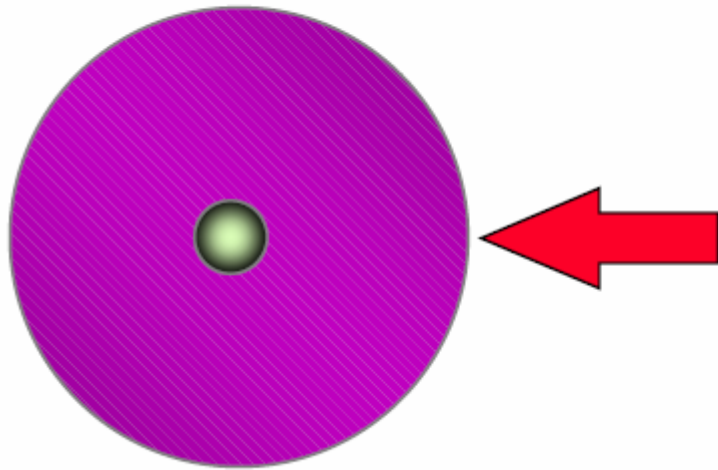
Enorodovno in mnogorodovno vlakno

Enorodovno vlakno:

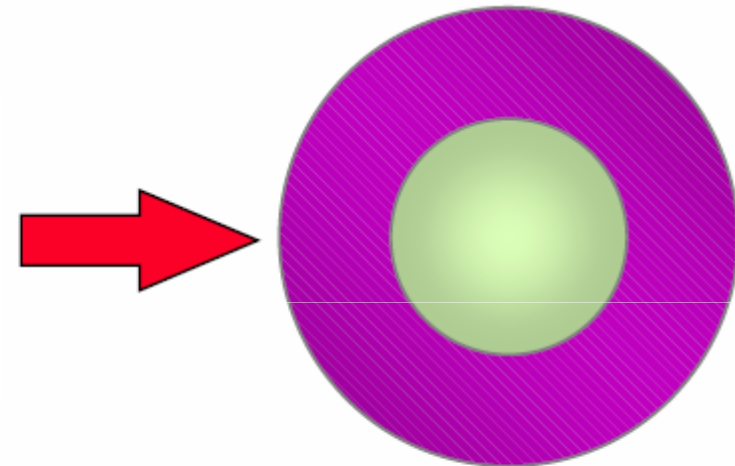
Premer 8-9 μm /125 μm .

Uporaba za vsa omrežja
vključno z dostopom.

Material SiO_2 s primesmi.



Mnogorodovno vlakno:



Premer 50, 62,5, 100 μm /
/125, 250 μm .

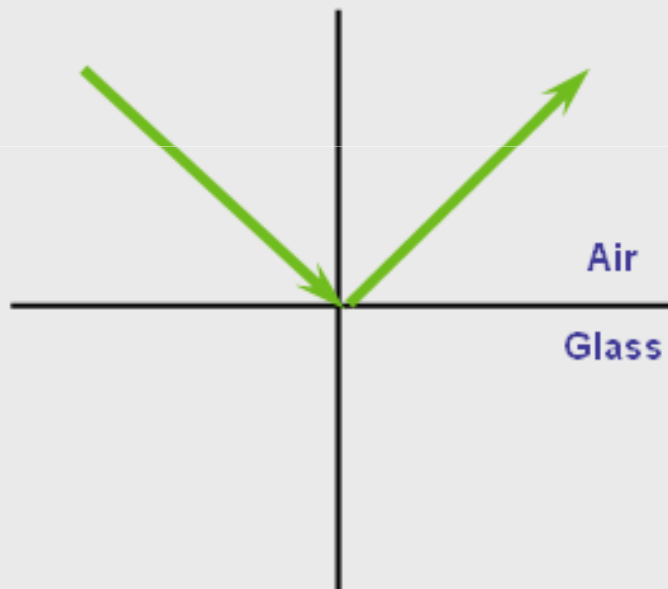
Uporaba za notranja
omrežja.

Material SiO_2 , plastika.

Odboj in lom

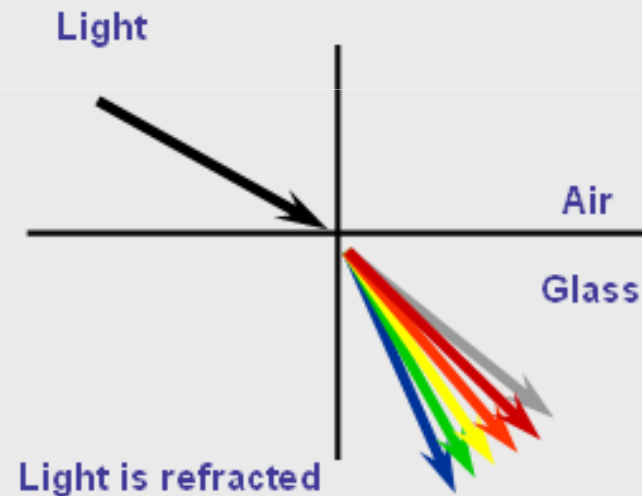
Odboj

Odbojni kot ni odvisen od dielektrikov



Lom

Lomni kot je odvisen od disperzije $\epsilon(\lambda)$ dielektrikov

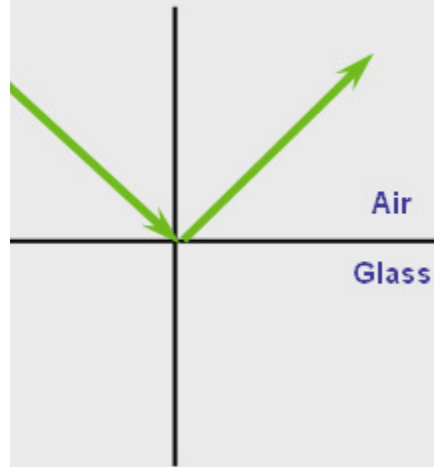


OPVISTA.

Odboj in lom razložimo s pogojem o zveznem prehodu amplitude in faze elektromagnetnega polja na ravni meji dveh dielektrikov (običajno brez izgub)

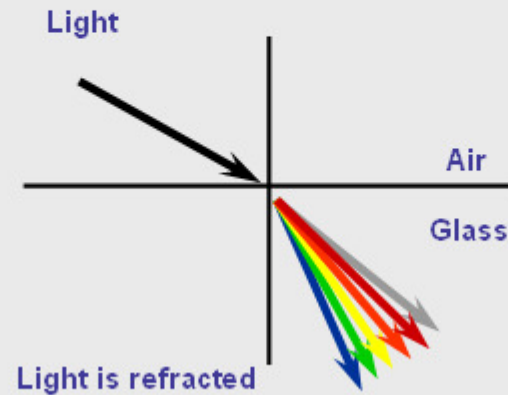
Reflection

reflects *inside* medium



Refraction

Light passes *through* medium boundary



TA.

Confidential / ©2007 OpVista, Inc. 8

Two of the more important factors we need to look at are reflection and refraction because they play a critical role in how fiber optic

works in two mediums, in this case between air and glass, either of two things can happen. The light may be reflected, meaning it does not pass through the boundary; or it may be refracted, where the light penetrates through the transition boundary and penetrates down into the second medium.

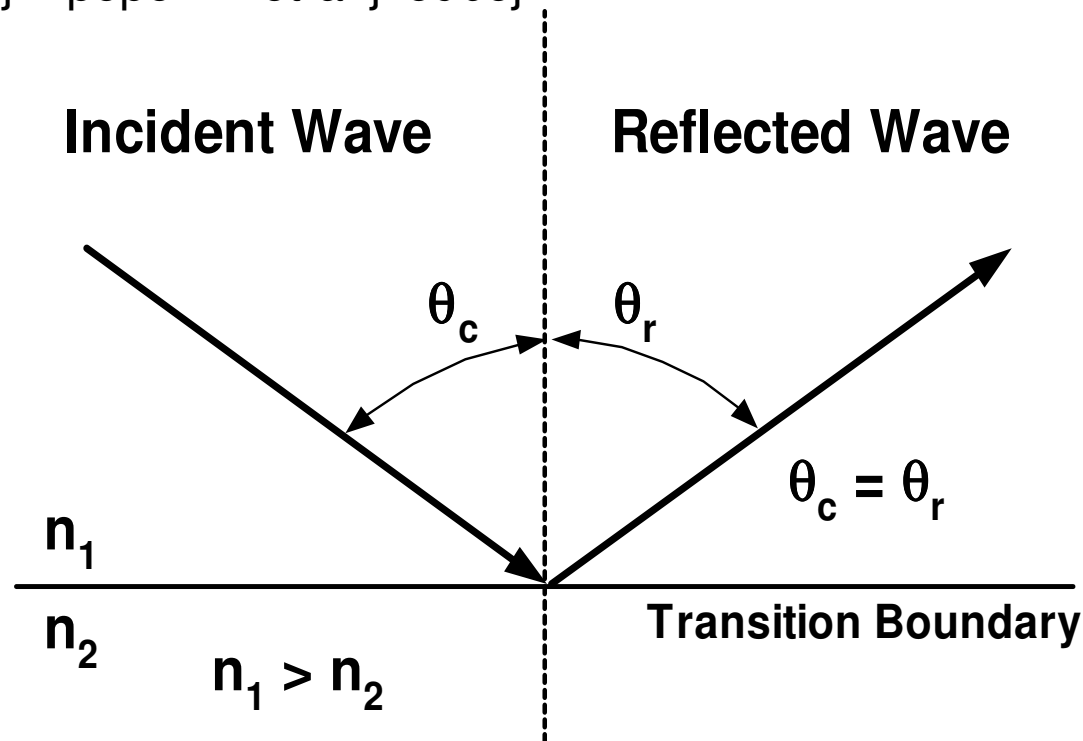
Reflection is the light that bounces back into the first medium and light that is refracted passes from one medium to another.



Slovenian

Kot totalnega odboja

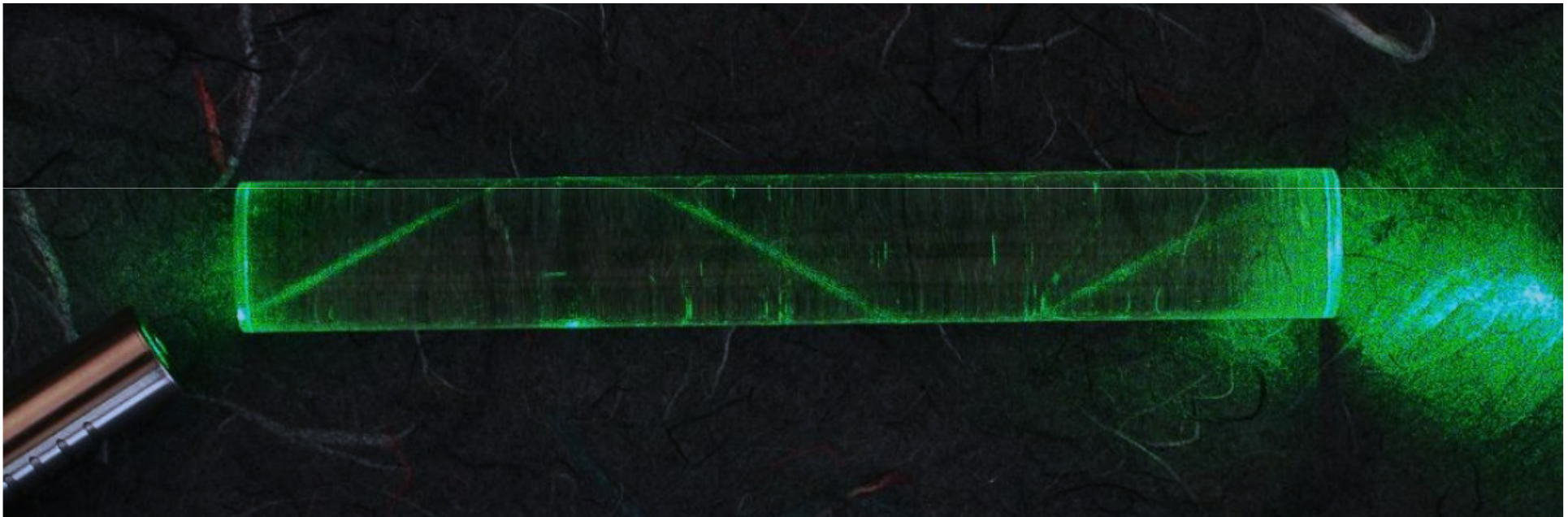
Totalni odboj – popolni notranji odboj



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

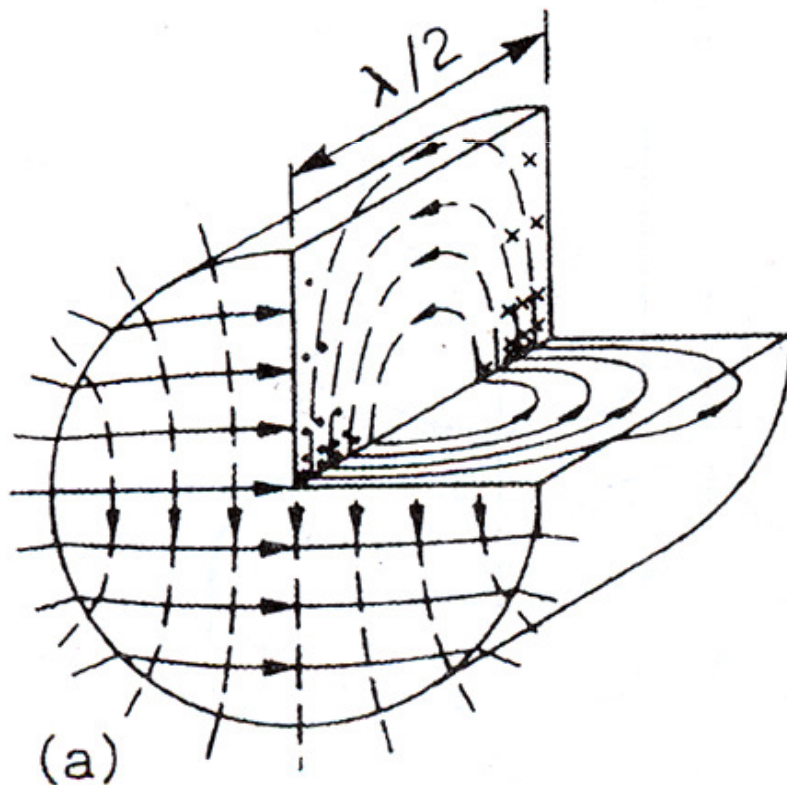
Totalni odboj nastopa
pri kotu $\theta_i > \theta_c$

Žarek v gradientnem vlaknu

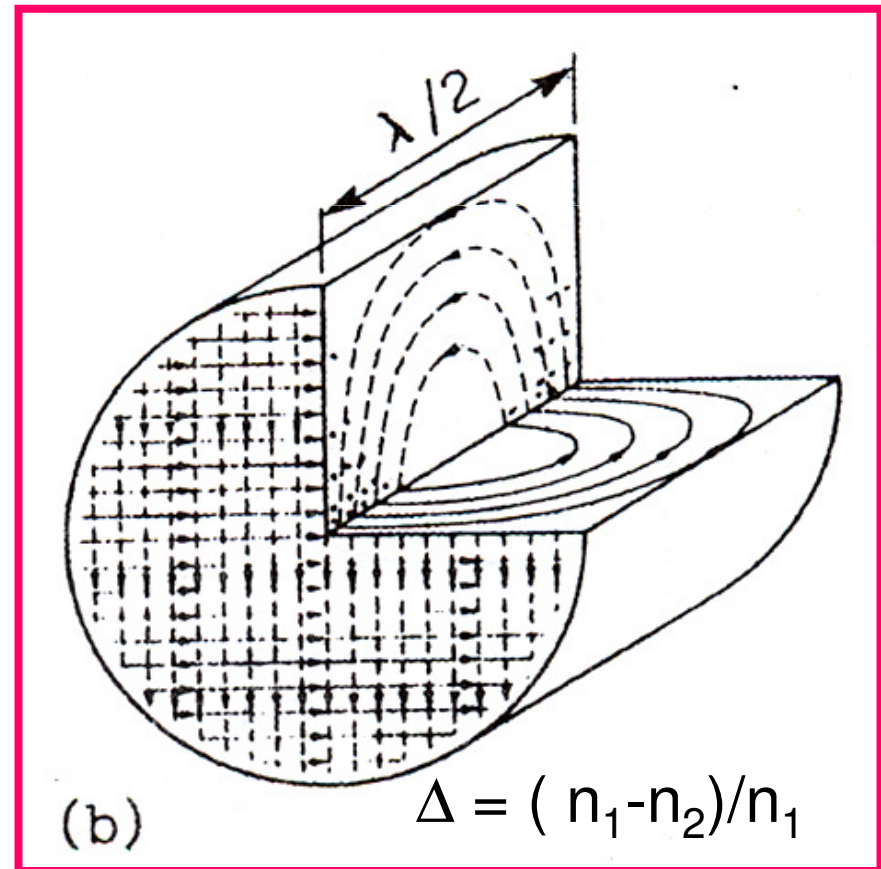


Polje osnovnega rodu HE_{11}

Rod HE_{11} – polje v jedru
(poljubna vrednost Δ)



Rod HE_{11} (LP_{01}) - polje v jedru
(šibkolomni približek $\Delta < 0,01$)



Spekter

Zveza med frekvenčno in časovno širino pasu:

$$|\Delta \nu| = \left(\frac{c}{\lambda^2} \right) |\Delta \lambda|$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{-c}{\lambda^2}$$

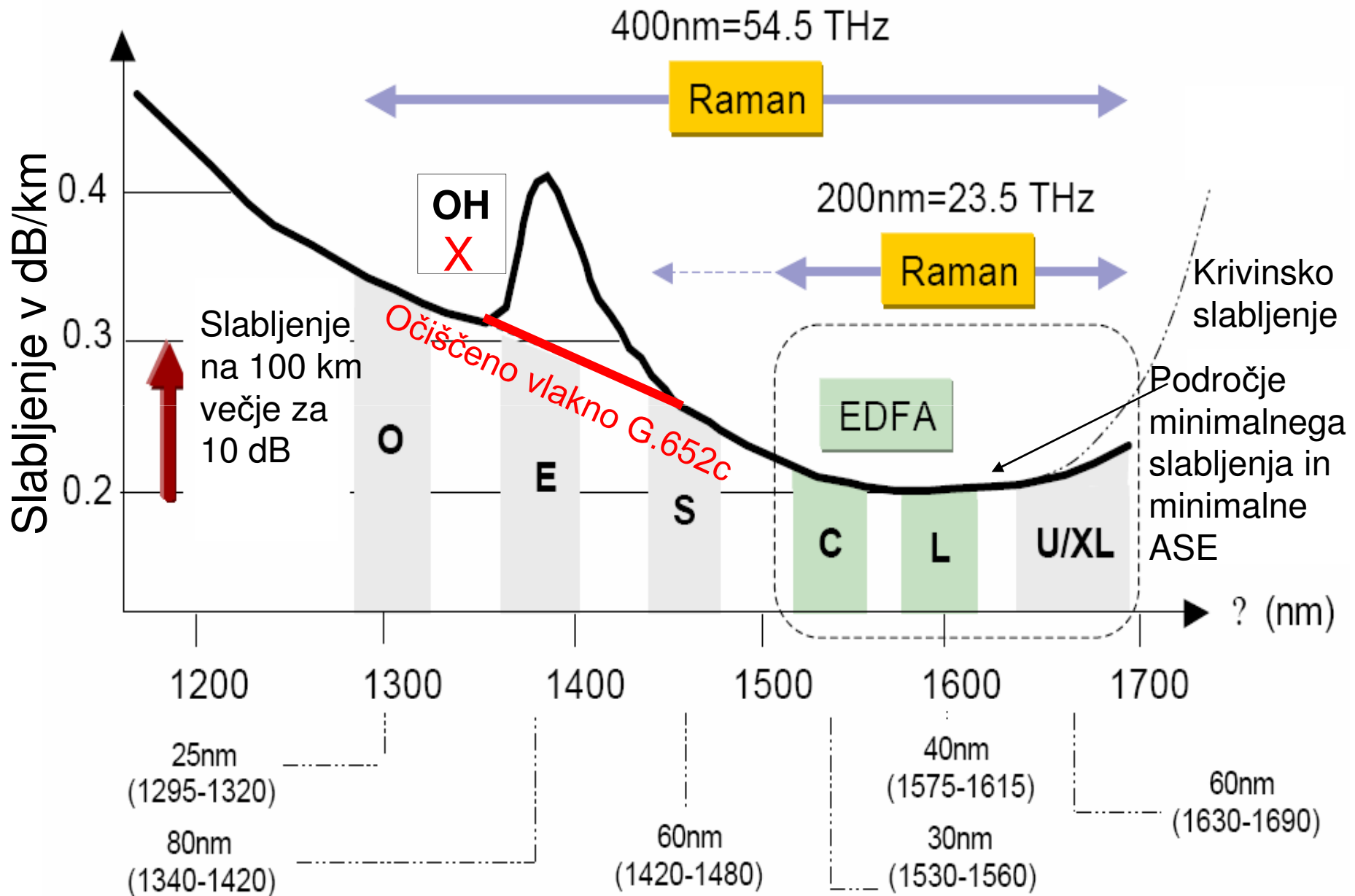
100 GHz frekvenčnega pasu
ustreza

0,8 nm valovnega pasuna
valovni dolžini $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

125 GHz frekvenčnega pasu
ustreza

1,0 nm valovnega pasu
na valovni dolžini $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Spekter optičnega vlakna G.652



Posebne vrste enorodovnih vlaken

G.652 a, b, c, d:	Standardno enorodovno optično vlakno (SSMF)
G.653 a, b:	Optično vlakno nične disperzije na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$
G.654 a, b, c:	Optično vlakno s premaknjeno mejno valovno dolžino λ_m
G.655 a, b, c:	SLO: Optično vlakno nenične disperzije na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$
G.656:	Optično vlakno z nenično disperzijo na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ za širokopasovni prenos

3.652 a, b, c, d:	Single-mode optical fibre (Standard fibre!)
3.653 a, b:	Dispersion-shifted single-mode optical fibre
3.654 a, b, c:	ANGL: Cut-off shifted single-mode optical fibre
3.655 a, b, c:	Non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre
3.656:	Non-Zero Dispersion for Wideband Optical Transport

- a vlakno za dostop, LAN in MAN
- b vlakno za dostop, LAN in MAN
- c vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM
- d vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM

Pojemanje moči na poti skozi vlakno



$$P(z) = P(0)e^{-\alpha_p z}$$

$$P(0)[\text{dBm}]$$

$$P(l) = P(0)e^{-\alpha_p l}$$

$z=0$

z

$z=l$

$$\alpha[\text{dB/km}] = \frac{10}{l} \log \left[\frac{P(0)}{P(l)} \right] = 4.343 \alpha_p [1/\text{km}]$$

$$P(l)[\text{dBm}] = P(0)[\text{dBm}] - \alpha[\text{dB/km}] \times l[\text{km}]$$

Karakteristike prenosnega vlakna

- **Efektivna dolžina (effective length):**

$$L_{ef} \text{ (km)} = \int_0^L e^{-\alpha l} dl = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} = \frac{4,343}{\alpha \text{ (dB/km)}}$$

$$L_{ef} \doteq 20 \text{ km}$$

kjer je α koeficient slabljenja vlakna.

- **Efektivna površina (effective area):**

$$A_{ef} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = 2\pi \frac{\left(\int_A |E|^2 r dr \right)^2}{\int_A |E|^4 r dr}$$

$$A_{ef} = 60 - 80 \mu\text{m}^2$$

kjer je $E(r)$ porazdelitev polja po prečnem prerezu vlakna.

- **Nelinearni koeficient (non - linear coefficient):**

$$\gamma \text{ (W}^{-1}\text{km}^{-1}\text{)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{ef}}$$

$$\gamma \doteq 2,7 \text{ (Wkm)}^{-1}$$

kjer je n_2 Kerrov koeficient nelinearne refrakcije.

- **Ojačevalni koeficient stimuliranega sipanja** - gain coefficient of stimulated (Raman, Brillouin) scattering:

$$g \text{ (mW}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ef}}{P_s P_c} \frac{dP_s}{dz}$$

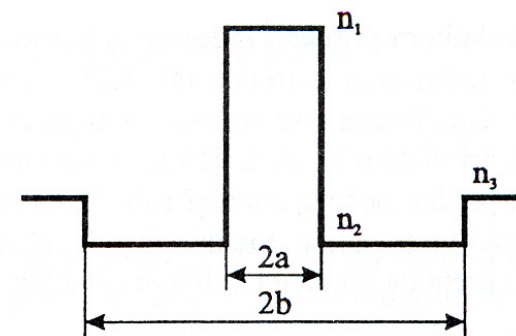
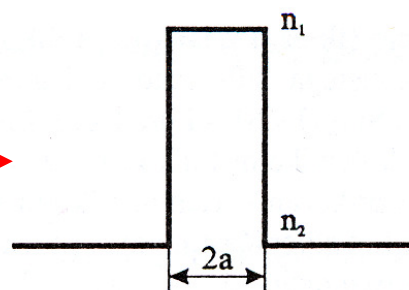
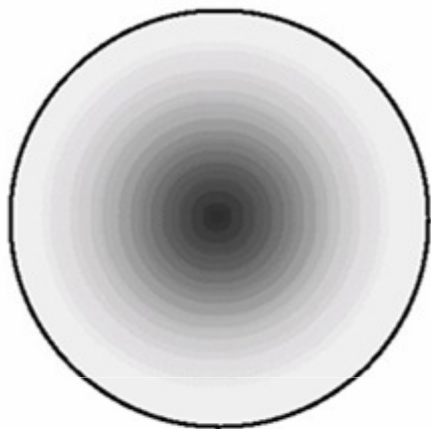
$$g_R \doteq 10^{-13} \text{ m/W}$$

$$g_R \doteq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$$

kjer je P_s moč signala in P_c moč črpalke.

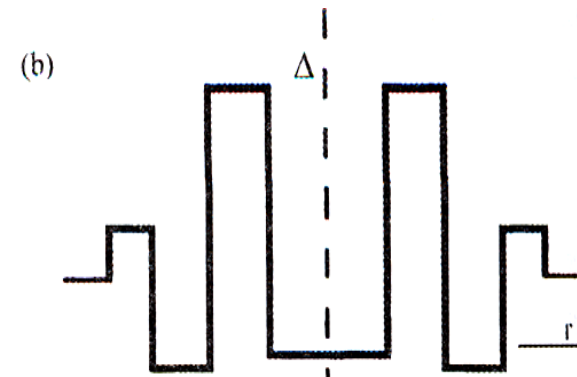
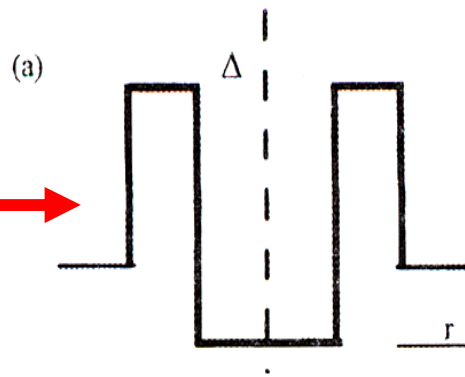
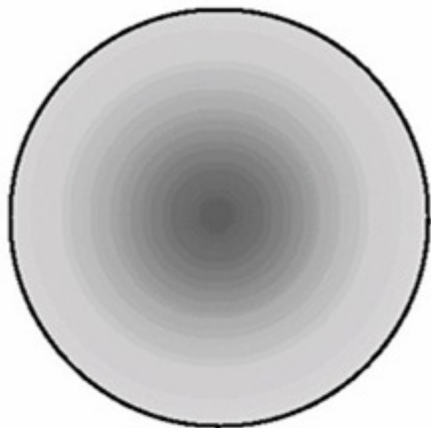
Primerjava vlaken SSMF in LEAF

Vlakno SSMF



Lomni lik impulzne oblike

Vlakno LEAF



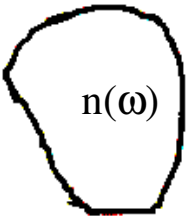
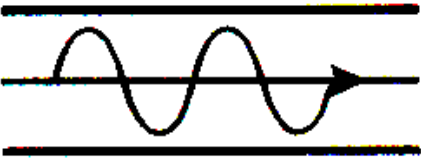
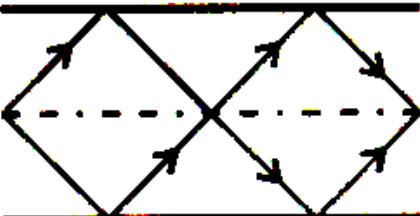
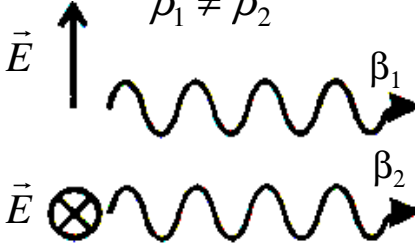
Lomni lik cevaste oblike

Disperzija

Disperzija (razpršitev) skupinske hitrosti svetlobe

Disperzija je razpršitev skupinske hitrosti kot posledica odvisnosti skupinske hitrosti od valovne dolžine oz. frekvence, načina širjenja ter polarizacije svetlobe. Nastaja:

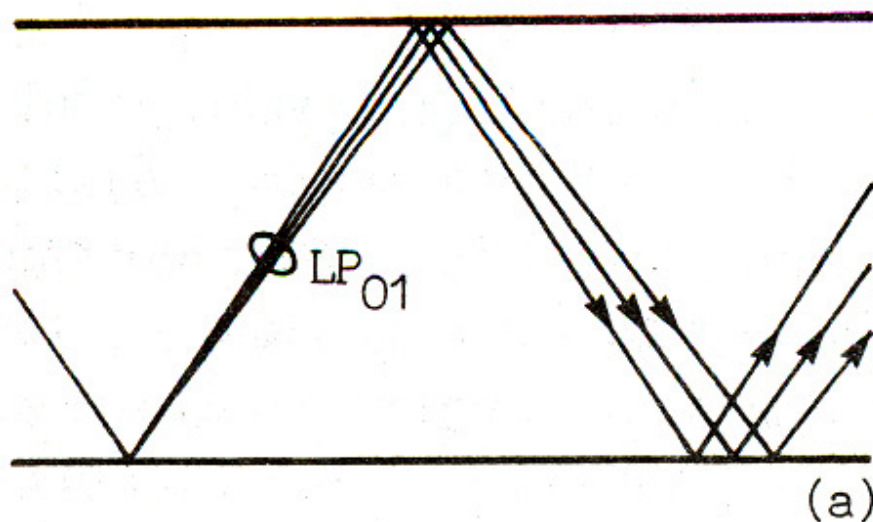
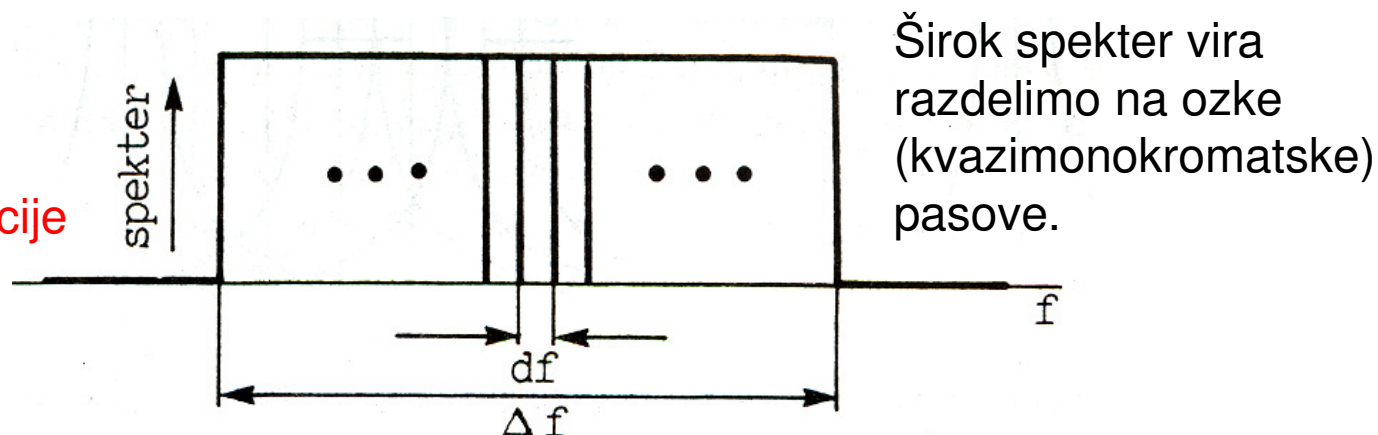
- **v neomejeni disperzni snovi**, lomni količnik katere je odvisen od valovne dolžine (snovna disperzija)
- **v omejenem prostoru**, ki je omejen s totalnim odbojem na plastni ali periodični nehomogenosti snovi (valovodna disperzija). Razlikujemo enorodovni in mnogorodovni način razširjanja (valovodna rodovna in mnogorodovna disperzija)
- **v dvolomni snovi** z različnimi polarizacijskimi parametri se ortogonalna valova širita z različno skupinsko hitrostjo (polarizacijska rodovna disperzija).

kromatska se povečuje z večanjem širine spektra		nekromatska ni odvisna od širine spektra	
<p>Snovna</p>  <p>$n(\omega)$</p> <p>n je odvisen od frekvence</p>	<p>Valovodna (rodovna)</p> $\beta(\omega) = \frac{\omega n_e}{c} \neq k = \frac{\omega n}{c}$  <p>β je nelinearno odvisen od frekvence</p>	<p>Večžarkovna (mnogorodovna)</p> $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots$  <p>β je različen za različne žarke (rodove)</p>	<p>Polarizacijska rodovna (dvolomnost)</p> $\beta_1 \neq \beta_2$  <p>β je odvisen od polarizacije</p>

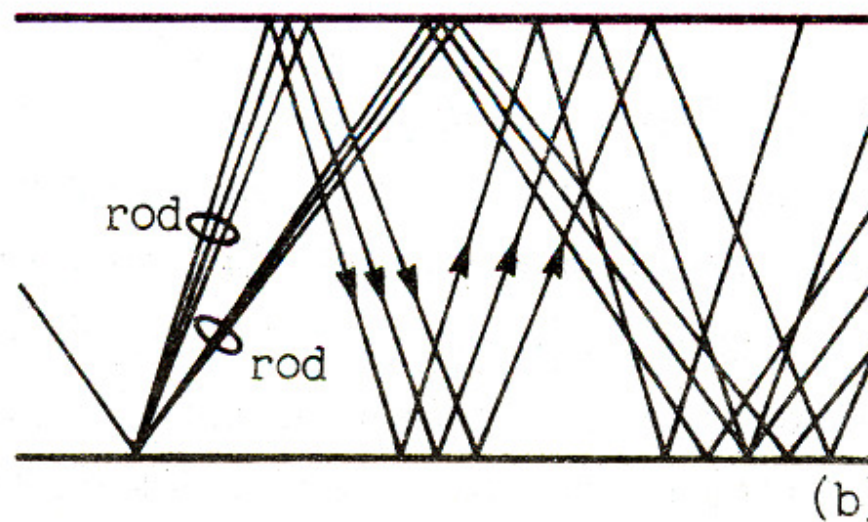
(Inter- in intra-) rodovna disperzija

Spekter:

- spekter vira
- spekter modulacije



Intrarodovna disperzija



Inter- in intrarodovna disperzija

Definicije

Temeljne definicije pri širjenju valov v disperznem mediju:

- Skupinska (grupna) hitrost širjenja (m/s):
- Skupinski zakasnilni čas na dolžini poti 1 m (s):
- Koeficient disperzije (ps/nm/km):

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1}$$

$$\tau_g = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$$

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

Definicija disperzije

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

D koeficient disperzije
(ps/nm/km)

τ_g skupinski zakasnilni čas
(ps)

λ valovna dolžina (nm)

Disperzija je razpršitev skupinskega zakasnilnega časa:

1. Mnogorodovna disperzija:

Različni rodovi valovanja se širijo z različno skupinsko hitrostjo

2. Enorodovna (barvna) disperzija:

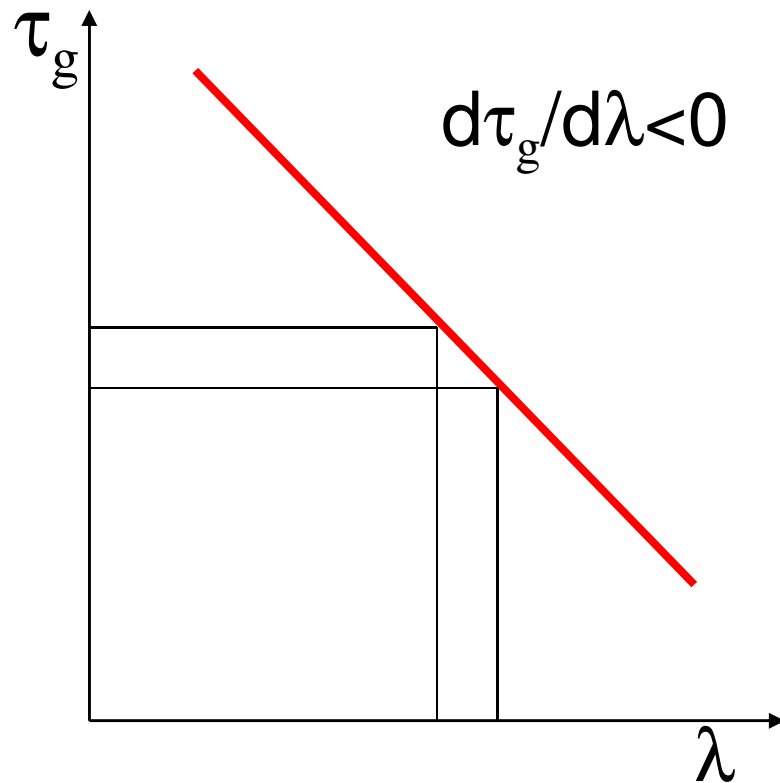
- Snovna disperzija. Skupinska hitrost je odvisna od snovi.
- Valovodna disperzija. Sk. hitrost je odvisna od načina širjenja.

3. Polarizacijska (ali polarizacijska rodovna) disperzija.

Hitrost je odvisna od polarizacije (dvolomnost).

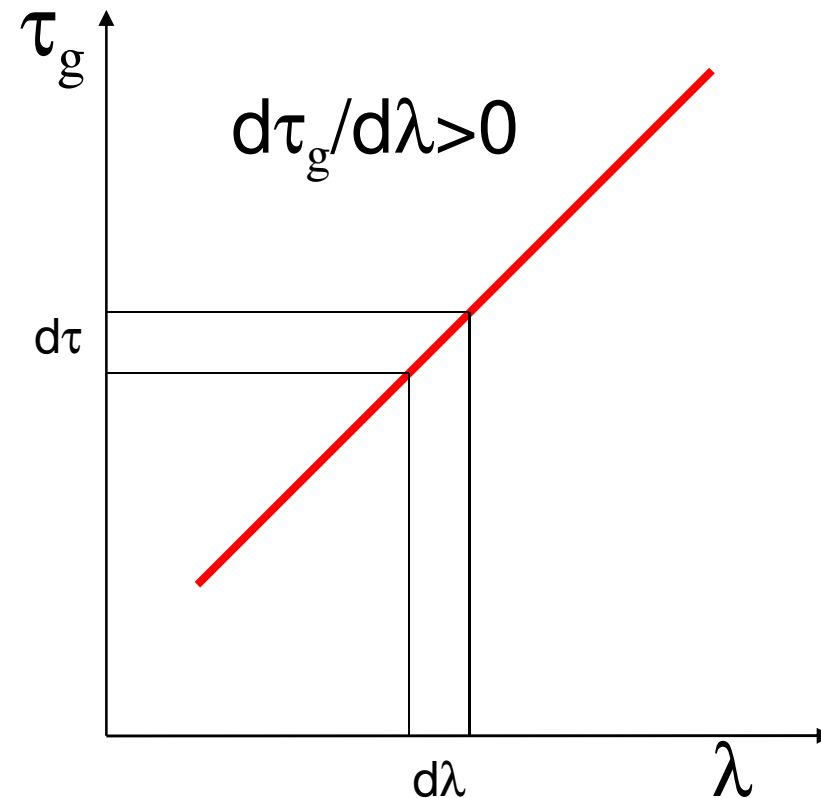
Normalna in anomalna disperzija

Normalna disperzija $D < 0$



Pri krajših valovnih dolžinah je zakasnitev manjša.

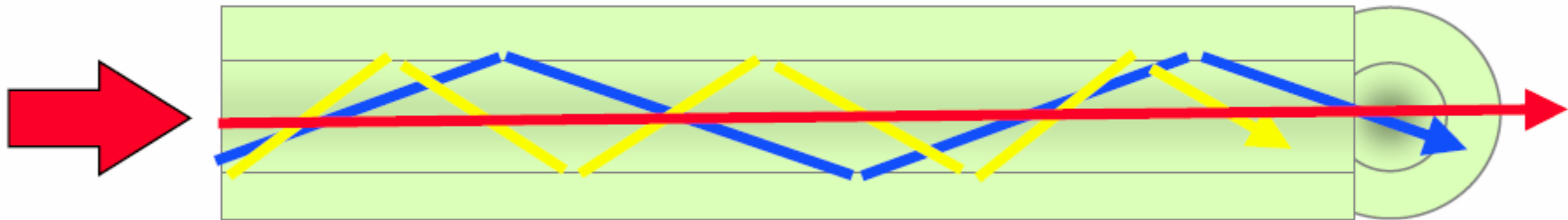
Anomalna disperzija $D > 0$



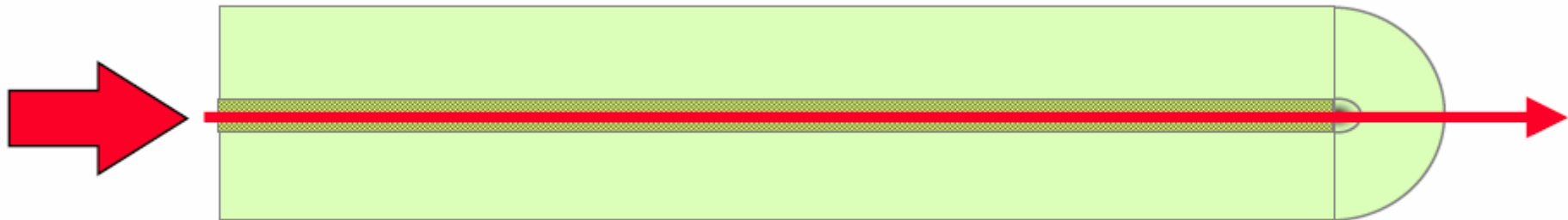
Pri daljših valovnih dolžinah je zakasnitev večja.

Mnogorodovna in enorodovna disperzija

Mnogorodovno vlakno:

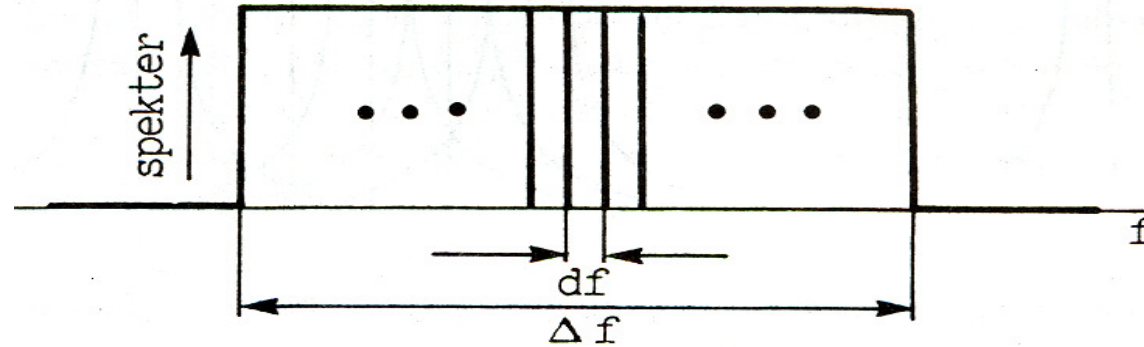


Enorodovno vlakno:

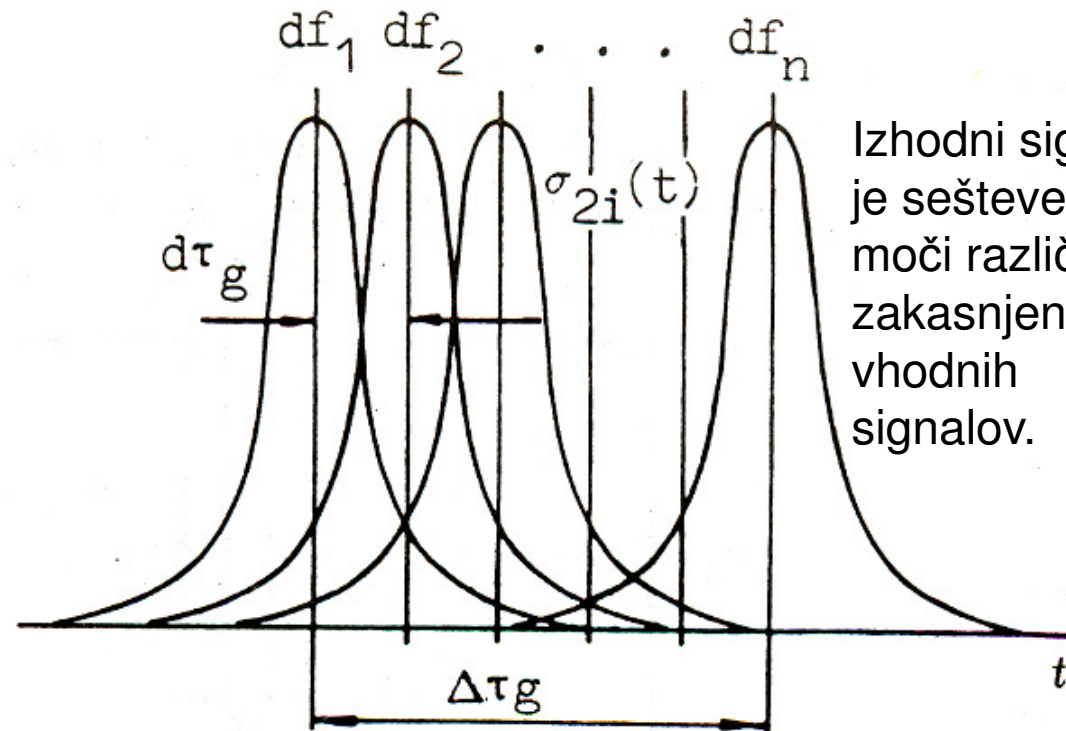
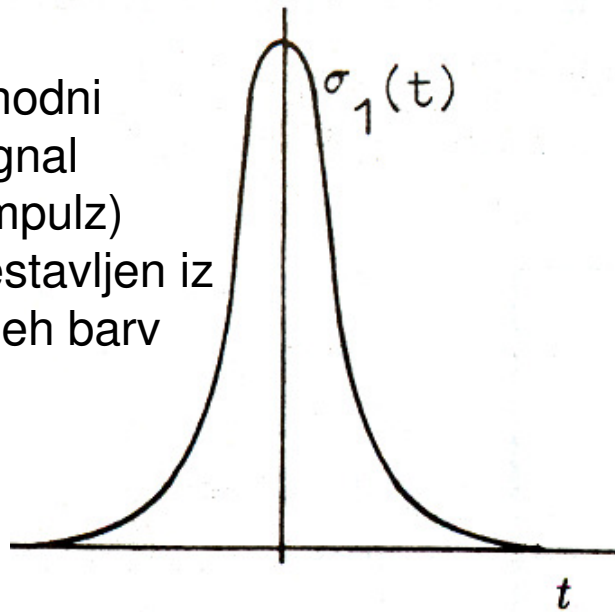


- Žarki, ki izpolnjujejo pogoj totalnega odboja, so v vlaknu ujeti in se širijo po cik-cak trajektoriji. Velja za mnogorodovno in enorodovno vlakno.
- V enorodovnem vlaknu so žarki toliko položni, da jih lahko v približku rišemo kot osni žarek.

Spekter in signal



Vhodni signal (impulz) sestavljen iz vseh barv



Izhodni signal je seštevek moči različno zakasnenih vhodnih signalov.

Ekspanzija in kompresija

Podobnega pomena kot razklon vidne svetlobe na prizmi je kromatska (snovna in valovodna) disperzija v kremenovem vlaknu. V prenosnem mediju, čigar prenosna karakteristika $\beta(\omega)$ odstopa od linearne frekvenčne odvisnosti, se posamezni deli spektra signala različnih frekvenc širijo z različno skupinsko hitrostjo (razpršitev skupinske hitrosti). Je linearnen pojav, pri katerem se ohranja amplituda prenašanega spektra, zakasnitev (oz. hitrost širjenja) spektralnih komponent pa se spremeni, zato se ovojnica (impulz) razširi tem bolj, čim večja je širina $\Delta\lambda$ spektra.

$$\Delta\tau_g = DL\Delta\lambda$$

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$$

$$n_e = \frac{\beta}{k_0}$$

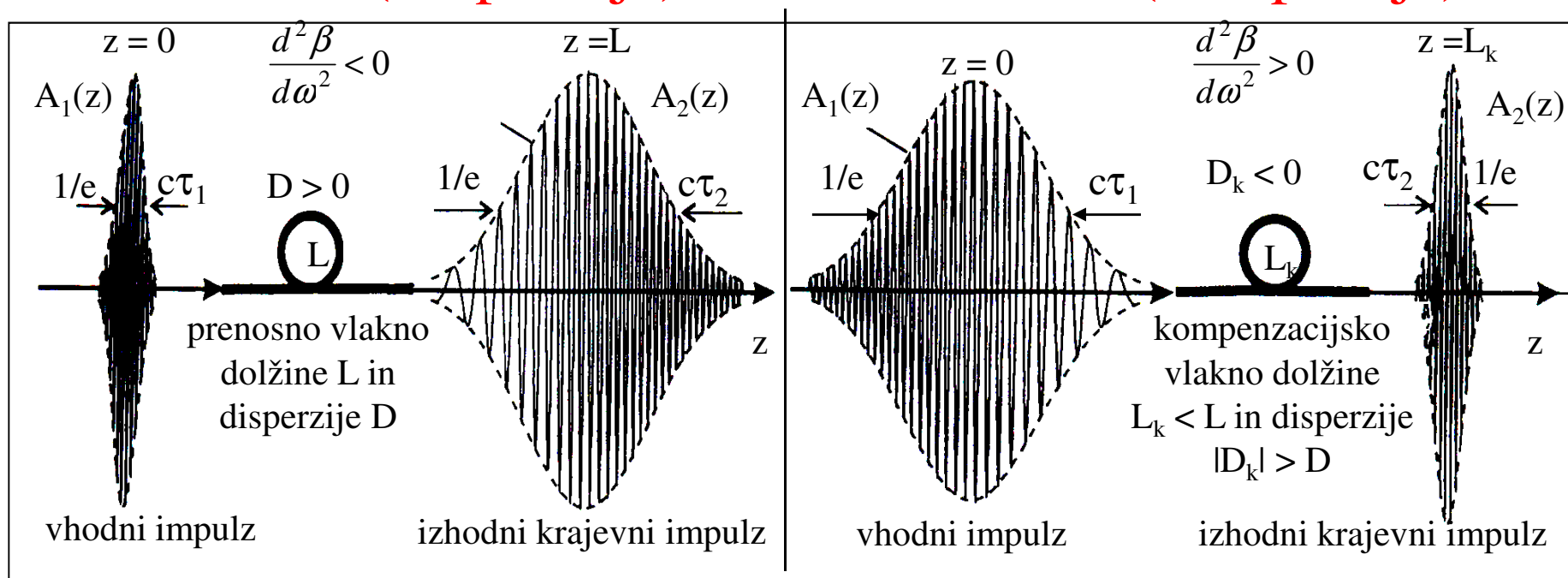
$\Delta\tau_g$ razširitev impulza

D disperzijski koeficient v ps/nm/km

n_e efektivni lomni količnik

razširitev (ekspanzija)

skrčitev (kompresija)



Omejitev dosega optične zveze z disperzijo

Razširitev NRZ impulza zaradi disperzije ne sme preseči določene tolerance; izhodni impulz mora ostati znotraj bitnega intervala. Ta je tem manjši, čim večja je bitna hitrost. Omejitev zveze zaradi disperzije zato narašča z bitno hitrostjo. Razlikujemo:

- **kromatska disperzija - nezahtevna optična zveza.** V spektru prevladuje spekter vira nad modulacijskim spektrom ($\Delta v \gg \Delta f$). Vir je npr. laser F-P.

$$4BL|D|\Delta\lambda \leq 10^3$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrto bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
$\Delta\lambda$	širina spektra v nm
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo že pri bitnih hitrostih pod 1 Gb/s.

- **Kromatska disperzija - sodobna optična zveza.** V spektru prevladuje modulacijski spekter nad spektrom vira ($\Delta f \gg \Delta v$). Vir je npr. laser DFB ali DBR z zunanjo modulacijo.

$$B^2 L |D| \leq 10^5$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrto bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo zlasti pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s.

- **Polarizacijska rodovna disperzija - zelo hitra optična zveza:**

$$B^2 L D_p^2 \leq 10^4$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi največ za 0,1 bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D_p	koeficient polarizacijske rodovne disperzije v ps/km ^{1/2}

Disperzija močno omejuje optično zvezo pri bitnih hitrostih $B > 40$ Gb/s.

4.15 OMEJITVE S KROMATSKO DISPERZIJO

Omejitveni pogoj $B^2|D|L < 104.000$ (Gb/s) ps/nm

Omejitev dolžine L prenosnega vlakna različne disperzije D (ps/nm/km) pri nekaterih B hitrostih B (Gb / s) in omejitev dopustne vrednosti $T = |D|L$ (ps/nm) :

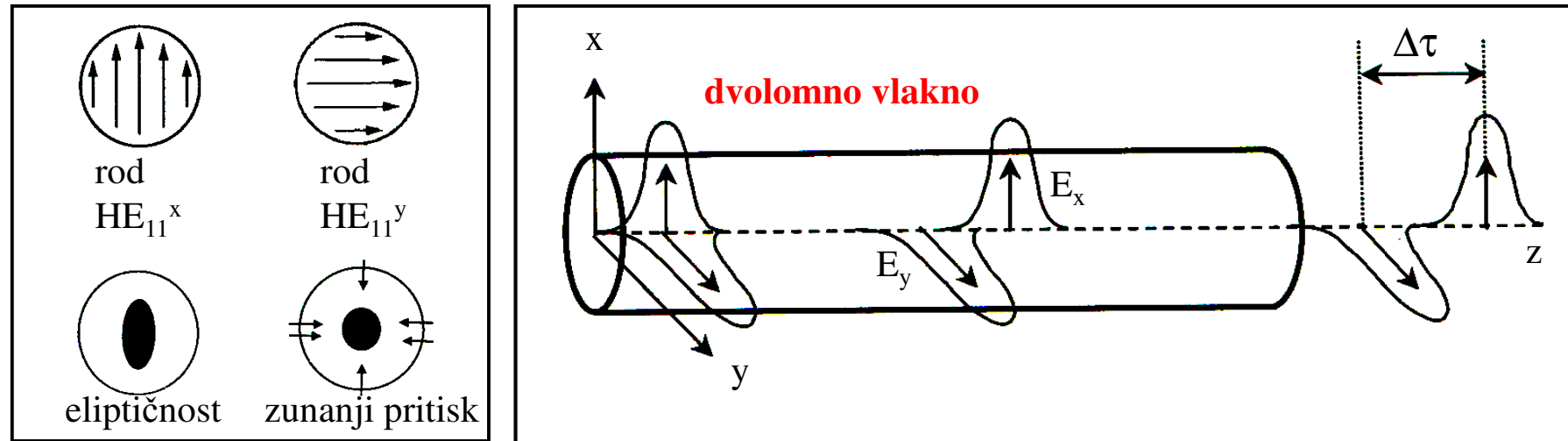
- vlakno SMF (G.652) disperzije $D = 17$ ps/nm/km in dolžine L_1
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 8$ ps/nm/km in dolžine L_2
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 4$ ps/nm/km in dolžine L_3

B (Gb/s)	L_1 (km)	L_2 (km)	L_3 (km)	T (ps/nm)
2,5	1000	2000	4000	
10	60	130	250	1000
40	4	8	16	65
80	1	2	4	16
160	0,25	0,5	1	4

Na optičnih zvezah, ki uporabljajo ozkopasovni laserski vir (dioda DFB ali DBR z zur modulacijo), omejuje disperzija doseg zveze pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s. Pri manjših B hitrostih $B < 10$ Gb/s je zveza omejena predvsem s slabljenjem.

Polarizacijska rodovna disperzija

Naključna dvolomnost (različna skupinska hitrost širjenja dveh ortogonalnih polj) vzdolž optične poti (vlakna). Impulz skupne moči dveh polarizacij se raztegne.



Povprečna vrednost diferenčne skupinske zakasnitve

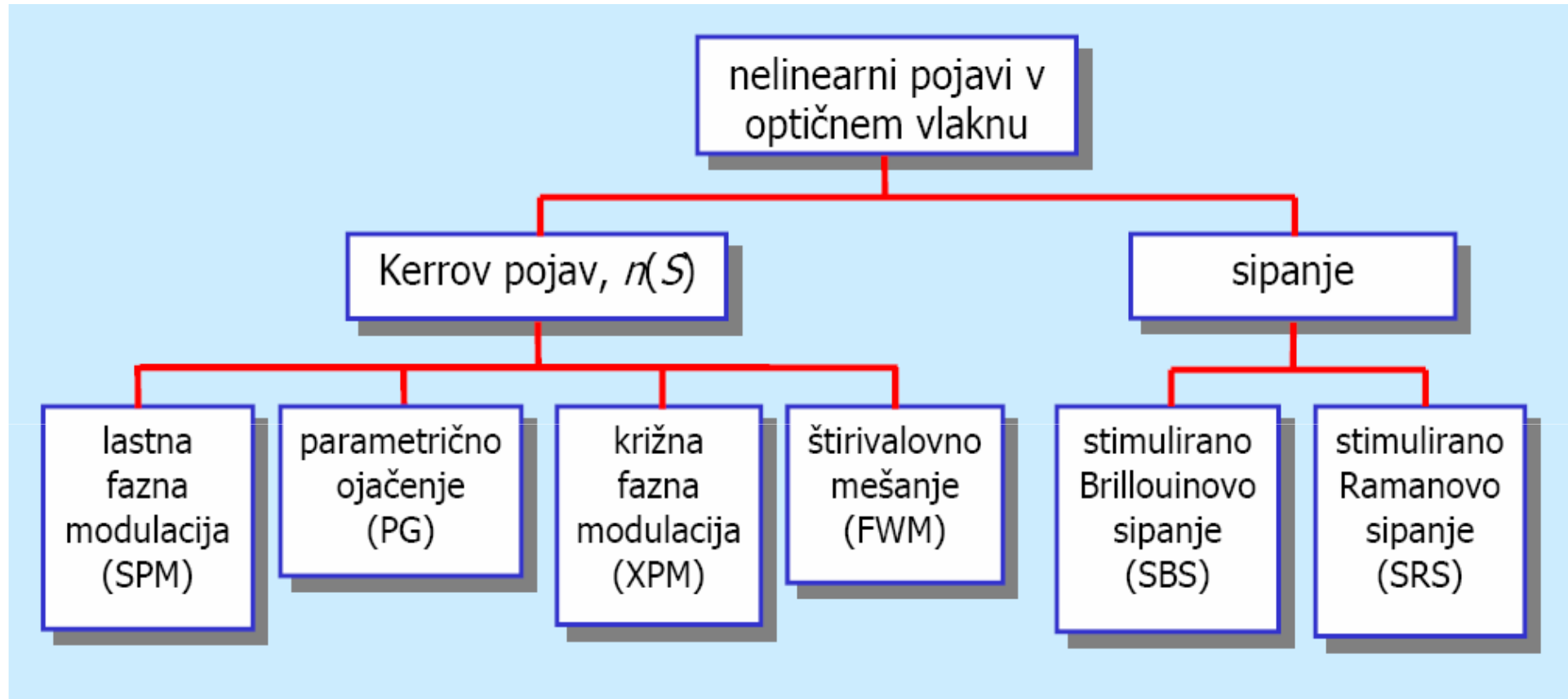
$$\sigma = D_p \sqrt{L}, \quad \sigma = \sqrt{\Delta\tau^2} \quad D_p \text{ koeficient polarizacijske rodovne disperzije}$$

D_p položenih vlaken	$D_p = 0,1 - 1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$
D_p novih vlaken	$D_p = 0,05 - 0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$
D_p vrhunskih (prihodnjih) vlaken	$D_p < 0,01 - 0,05 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$

Zaradi svoje statistične narave in odvisnosti od zunanjih vplivov je polarizacijska rodovna disperzija tehnično težko obvladljiva. Postaja končna omejitev pri zelo hitrih optičnih zvezah.

Nelinearnost

Vrste nelinearnih pojavov



Pomen nelinearnosti za temeljne lastnosti optičnega vlakna:

- škodljivi
- koristni

Nelinearni lomni količnik (Kerrov pojav)

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + \left(\frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \right) P$$

$n_0(\omega)$ je linearni del lomnega količnika, ki ni odvisen od moči. Odvisen je od frekvence in daje disperzijo.

$n_2 P/A_{\text{eff}} = n_2 S$ je nelinearni del lomnega količnika, ki je sorazmeren gostoti moči S v vlaknu

SiO₂: $n_2 = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ } \mu\text{m}^2/\text{mW}$

Efektivna dolžina

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

Definicija je pomembna za nelinearne pojave in optično porazdeljeno ojačevanje

$$P(z) = P e^{-\alpha z}$$

$$PL_{eff} = \int_{z=0}^L P(z) dz$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

Porabljena (eksponentno upadajoča) moč na celotni dolžini L vlakna je ekvivalentna porabljeni (neupadajoči) moči na efektivni dolžini $L_{ef} = 1/\alpha$.

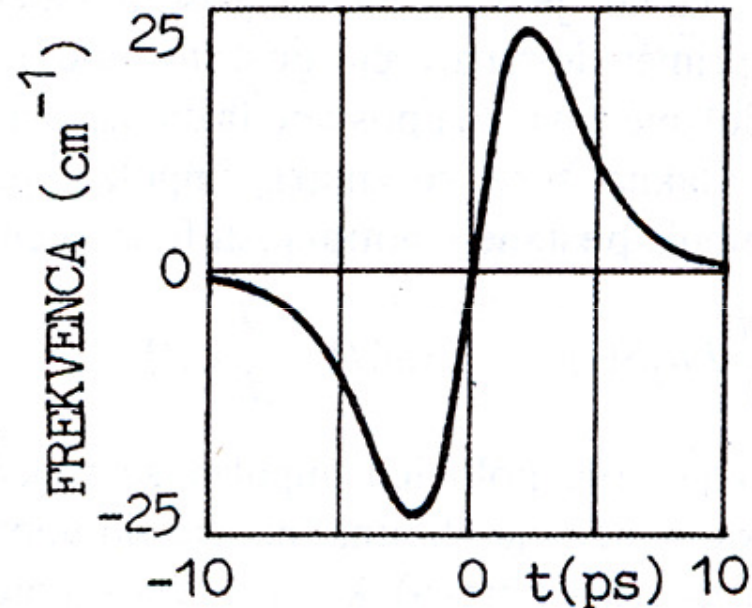
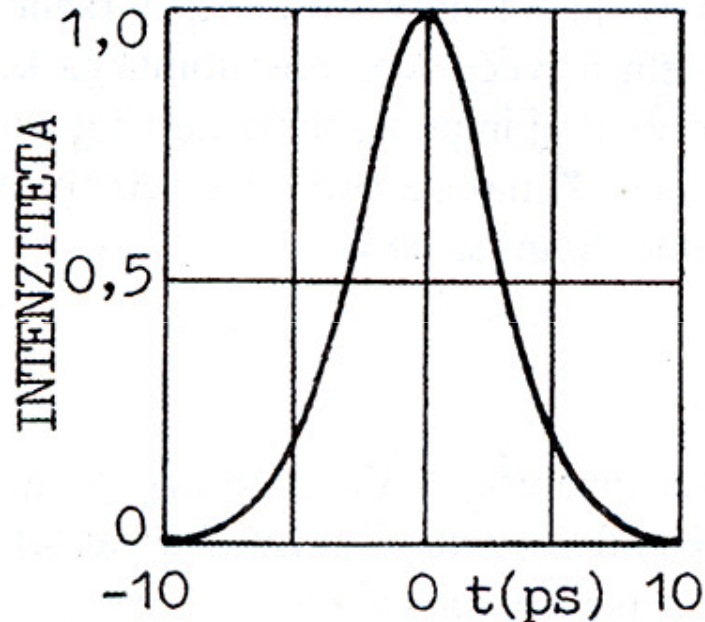
$$\alpha_{dB} = 0,22 \text{ dB/km} \quad \text{pri } \lambda = 1550 \text{ nm}$$

Pri $L \gg 1/\alpha$ je L_{ef} približno 20 km

Nelinearna modulacija v vlaknu

Intenziteta \rightarrow lomni količnik \rightarrow faza \rightarrow frekvenca

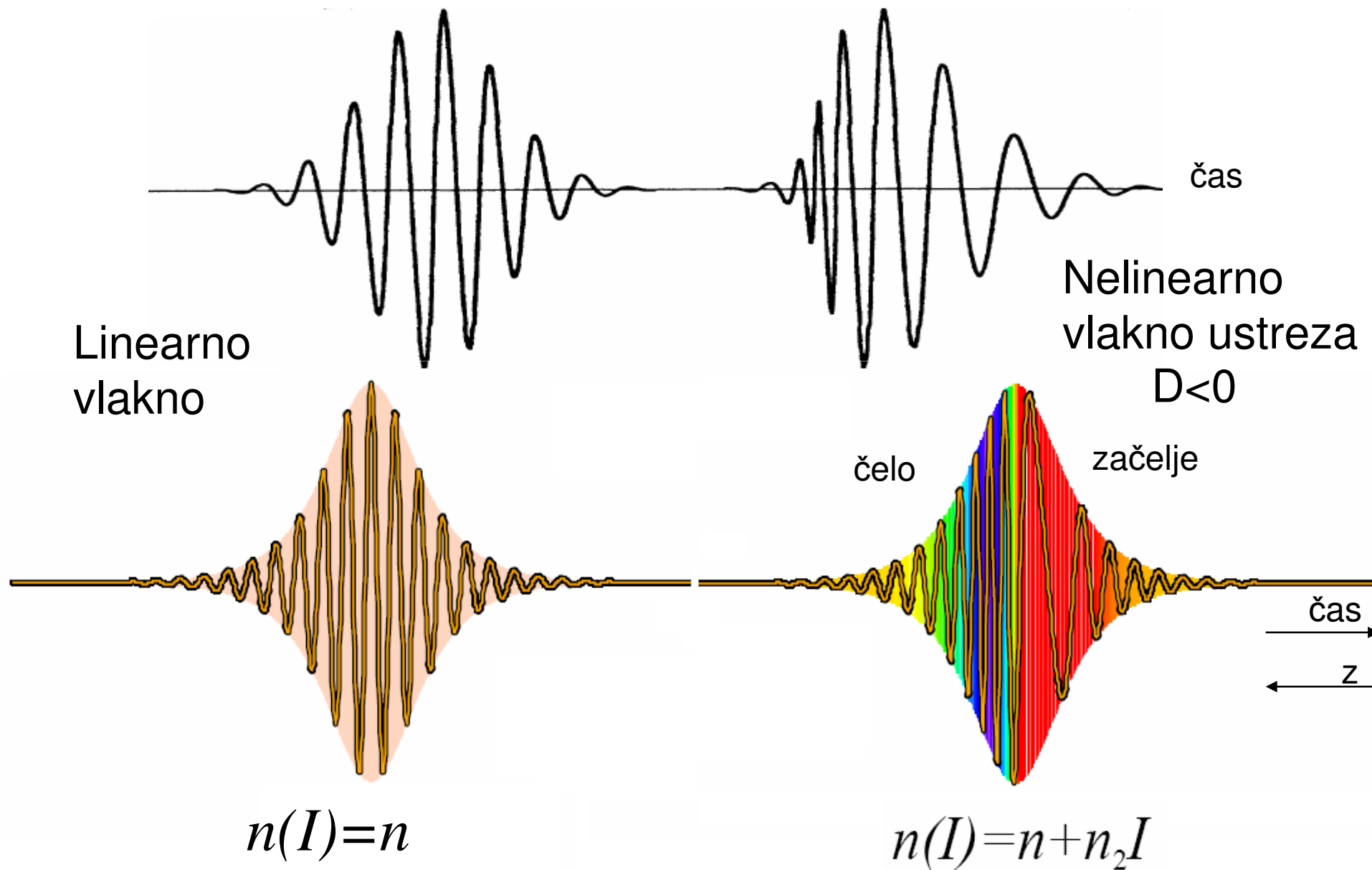
- Lastna fazna modulacija



$$\Delta\Phi(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}L\Delta n(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}Ln_2S(t). \quad \Delta\omega(t) = \frac{d}{dt}\Delta\Phi(t) = -\frac{2\pi}{\lambda}Ln_2\frac{d}{dt}S(t).$$

Nelinearnost povzroča notranjo frekvenčno modulacijo znotraj impulza. Sredi impulza se frekvenca spreminja linearno. V čelnem delu impulza (glede na smer širjenja) se frekvenca zviša, v začetnem delu impulza se frekvenca zniža.

Lastna fazna modulacija



Nelinearna refrakcija – Kerrov pojav

1. Lastna fazna modulacija

Modulacija faze signala zaradi intenzitetne modulacije lomnega količnika vlakna, ki jo pri širjenju povzroča signal sam (frekvenčni žvižg v impulzu).

2. Prečna fazna modulacija

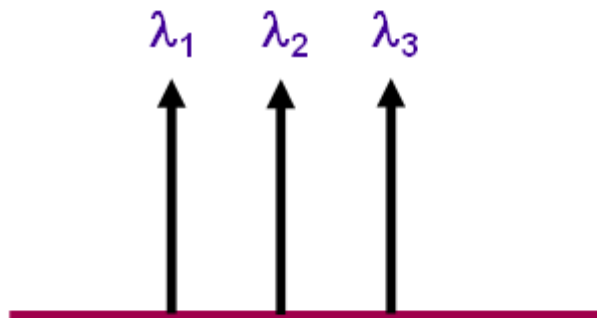
Modulacija faze signala zaradi intenzitetne modulacije lomnega količnika vlakna, ki jo povzročajo signali drugih motilnih kanalov.

3. Štirivalovno mešanje (intermodulacija)

Presluh med sosednimi kanali zaradi generacije novih frekvenc v nelinearnem vlaknu.

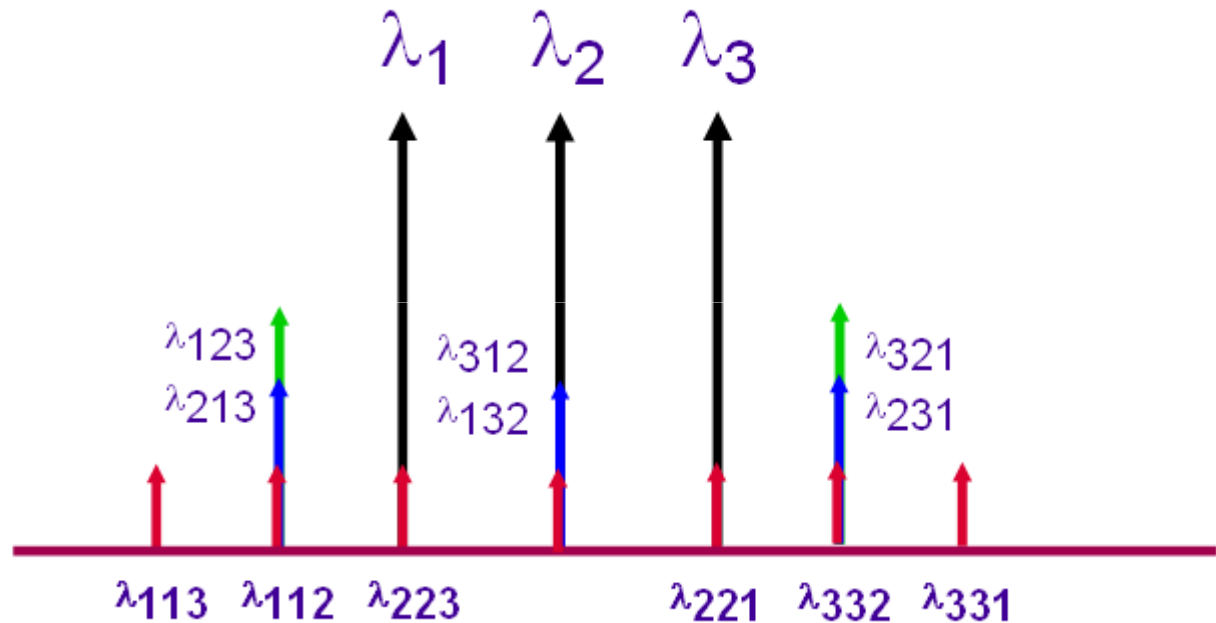
Štirivalovno mešanje - intermodulacija

Tri valovne dolžine
na vходу vlakna



Enakomerna porazdelitev
vhodnih valovnih dolžin

Valovni produkti na izhodu
iz nelinearnega vlakna



Izmed 12 novih valovnih dolžin so 4 take, da
se prekrivajo z vhodnimi valovnimi dolžinami

Nelinearno sipanje

Interakcija svetlobe s fononi:

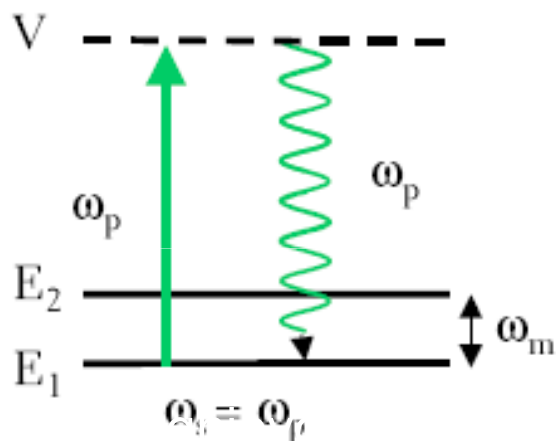
1. Stimulirano Brillouinovo sipanje (SBS)
 - Interakcija svetlobe z akustičnimi fononi nizke energije
2. Stimulirano Ramanovo sipanje (SRS)
 - Interakcija svetlobe z “optičnimi” fononi visoke energije

Oba pojava omejujeta moč v vlaknu.

Linearno in nelinearno sipanje

Rayleighjevo sipanje:

$V =$ virtualni nivo

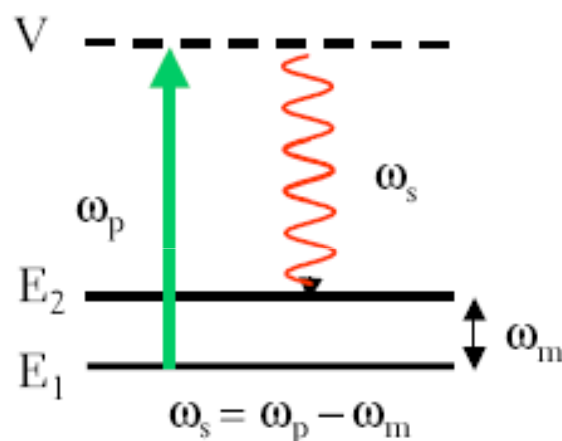


Linearno sipanje

Fotoni se sipajo v vse smeri
(dipolsko sevanje)

Spontano Ramanovo sipanje:

Stokes



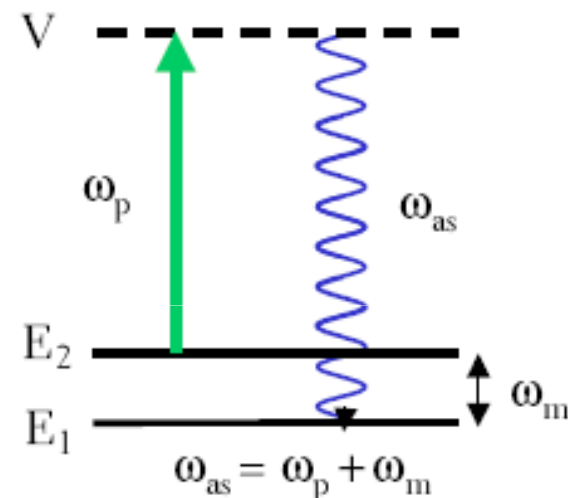
Nelinearno sipanje

Fotoni se sipajo v poljubnih smereh

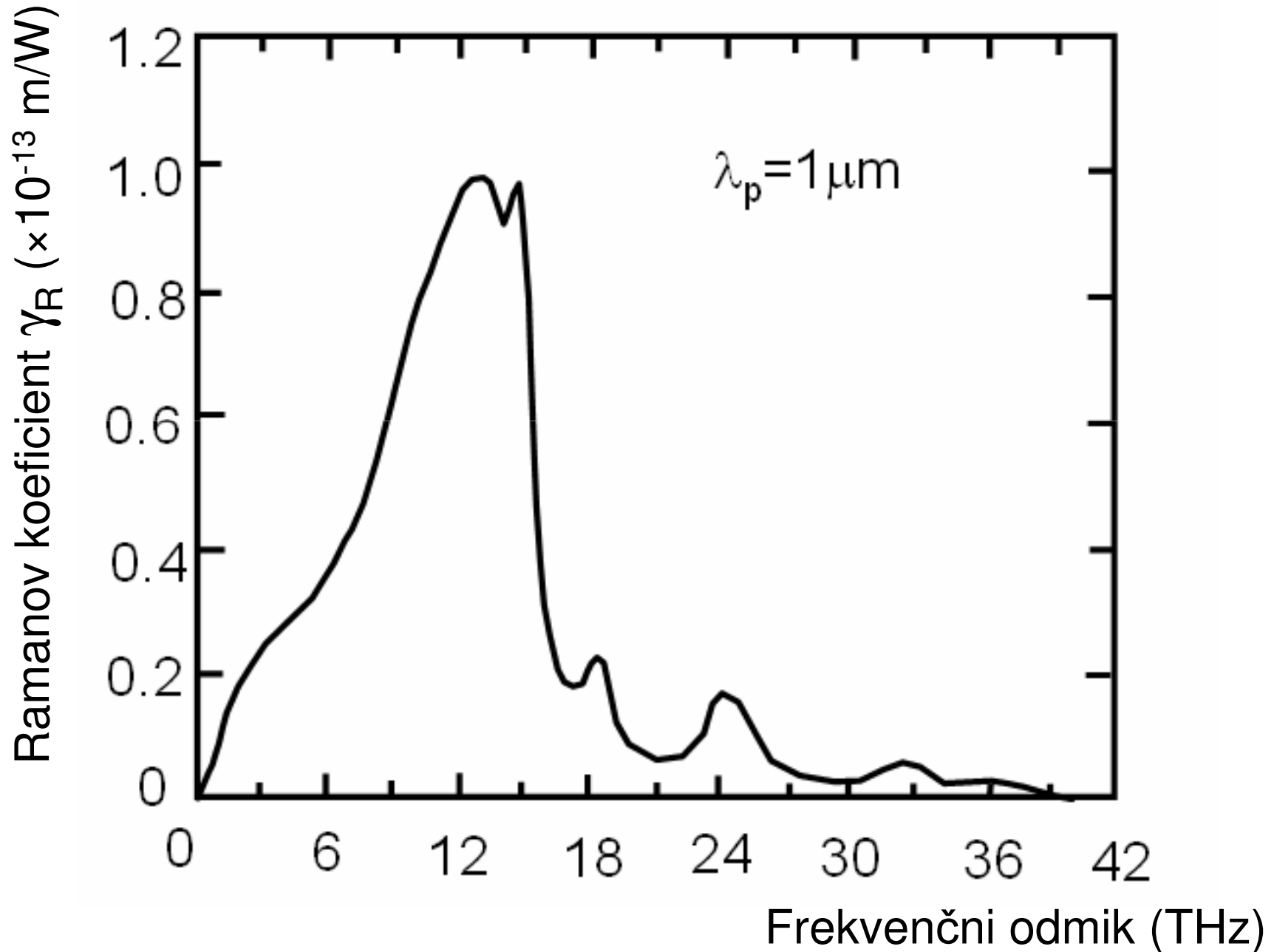
$$N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega_m / kT} \quad \text{število fotonov na } E_2 \text{ in } E_1$$

Sevanje anti-Stokes mnogo šibkejše.

anti-Stokes



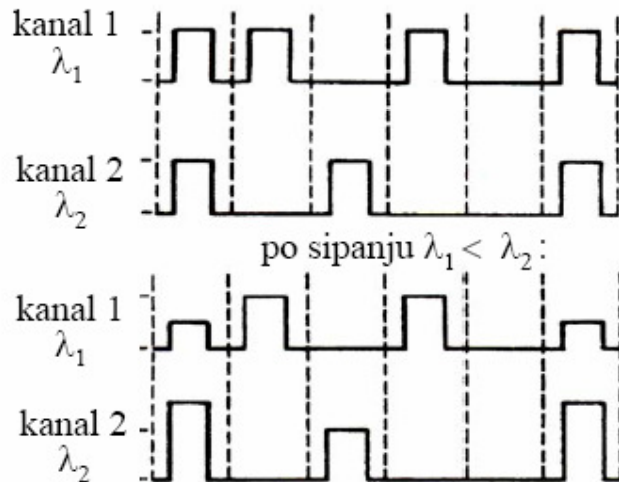
Spekter Ramanovega ojačenja



Omejitve zaradi SRS

• **stimulirano Ramanovo sipanje pri razmeroma veliki vpadni moči $P_s > P_R$:**

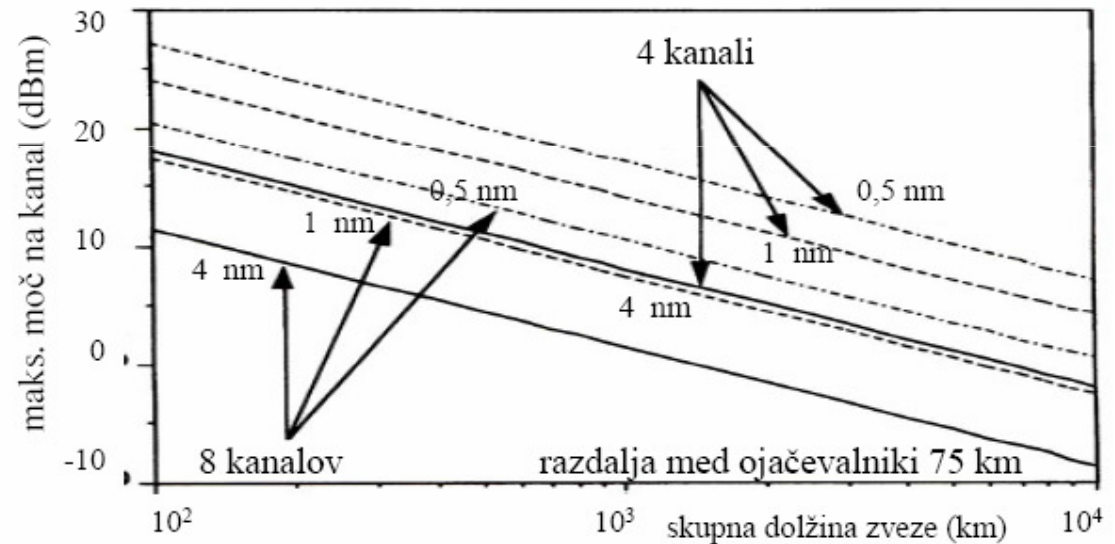
- presluh med kanali WDM v primeru sočasnih enic, ojačitev signala nižje frekvence in izčrpavanje moči višje frekvence (nagib spektra)
- degradacija razmerja S / N



• **Ramanova pragovna moč:**

$$P_R = 16 \frac{A_{ef} \alpha}{g_R} = 16 \frac{A_{ef}}{g_R L_{ef}}, \quad g_R = 10^{-13} \text{ m/W}$$

Ramanova pragovna moč $P_R > 500 \text{ mW}$. Sipanje povzroča sklope med kanali v WDM prenosu. V enokanalnem prenosu ni omejitve.



Dopustna prenašana moč se zmanjšuje z večanjem števila kanalov WDM, z večanjem frekvenčne razlike med kanali in z večanjem razdalje.

• **Ukrepi:**

- omejitev moči pri velikem številu kanalov
- z zmanjšanjem valovnega razmika med kanali se zmanjšuje sklop med njimi
- z večanjem disperzije vlakna zmanjšujemo sklop

Optično ojačevanje

Razvrstitev načinov optičnega ojačevanja

A. Ojačevanje na osnovi stimulirane emisije:

1. Polprevodniški optični ojačevalnik (SOA)
2. Vlakenski optični ojačevalniki (FOA) s primesjo redkih zemelj:
 - EDFA (erbij), C in L pas
 - TDFA (tulij), S pas
 - PDFA (praseodimij), O pas

B. Ojačevanje na osnovi nelinearnih pojavov v vlaknu:

1. Optični Ramanov ojačevalnik:
 - Diskretni Ramanov ojačevalnik
 - Porazdeljeni Ramanov ojačevalnik (DRA)

C. Hibridni (diskretni in porazdeljeni) ojačevalniki.

Optični ojačevalniki - razvrstitev in pregled

1. Polprevodniški ojačevalnik (planarna tehnika, množična uporaba)

- polprevodniški optični ojačevalnik (Semiconductor Optical Amplifier) - **SOA**

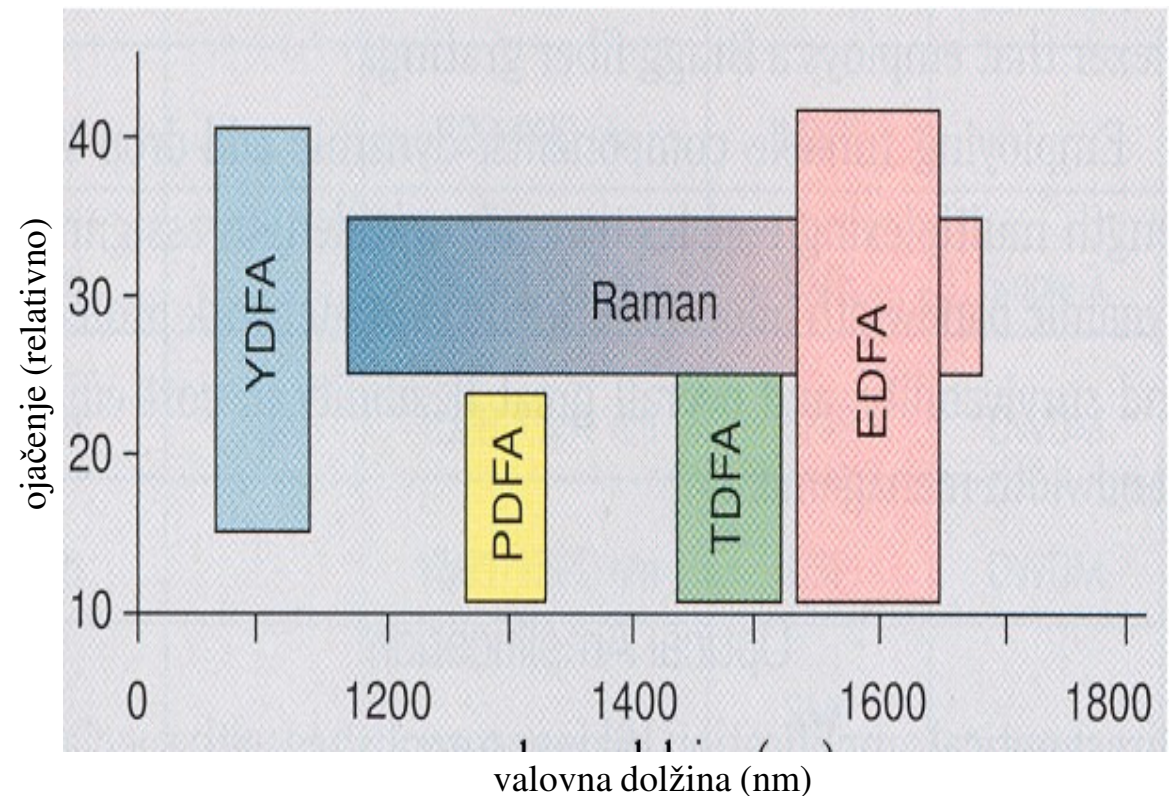
2. Vlakenski ojačevalniki (vlakenski optični ojačevalnik) - **FOA**

• *aktivne primesi v vlaknu:*

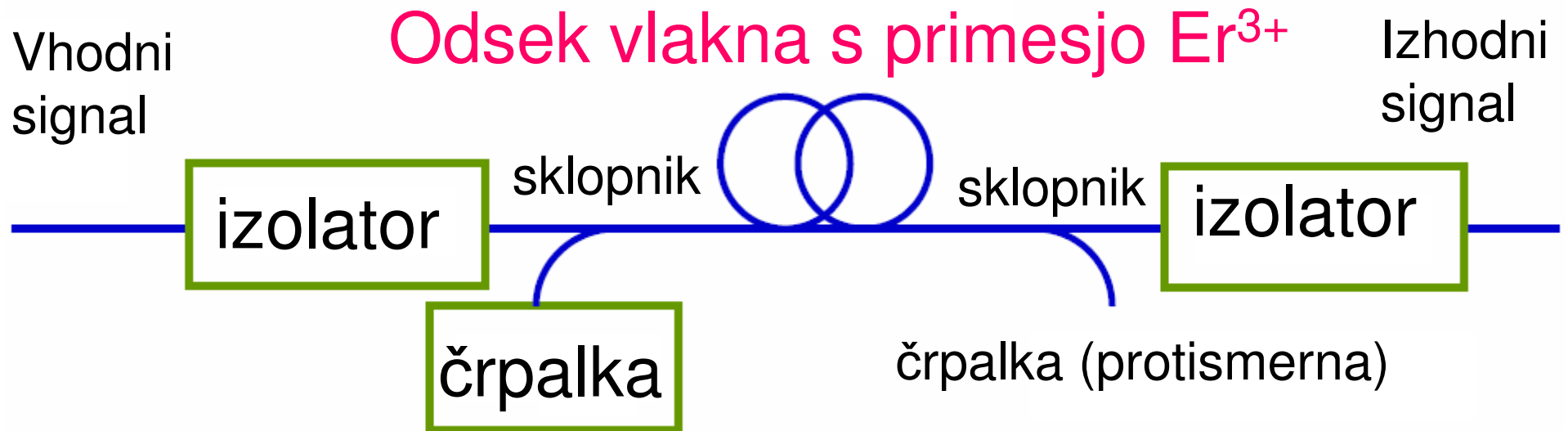
- vlakenski ojačevalnik s primesjo Erbija (Erbium Doped Fiber Amplifier) - **EDFA**
- vlakenski ojačevalnik s primesjo Tulija (Thulium Doped Fiber Amplifier - **TDFA**

• *nelinearno sipanje v vlaknu:*

- porazdeljeni Ramanov ojačevalnik (*Distributed Raman Amplifier*) - **DRA**
- diskretni Ramanov ojačevalnik (*Lumped Raman Amplifier*) - **LRA**



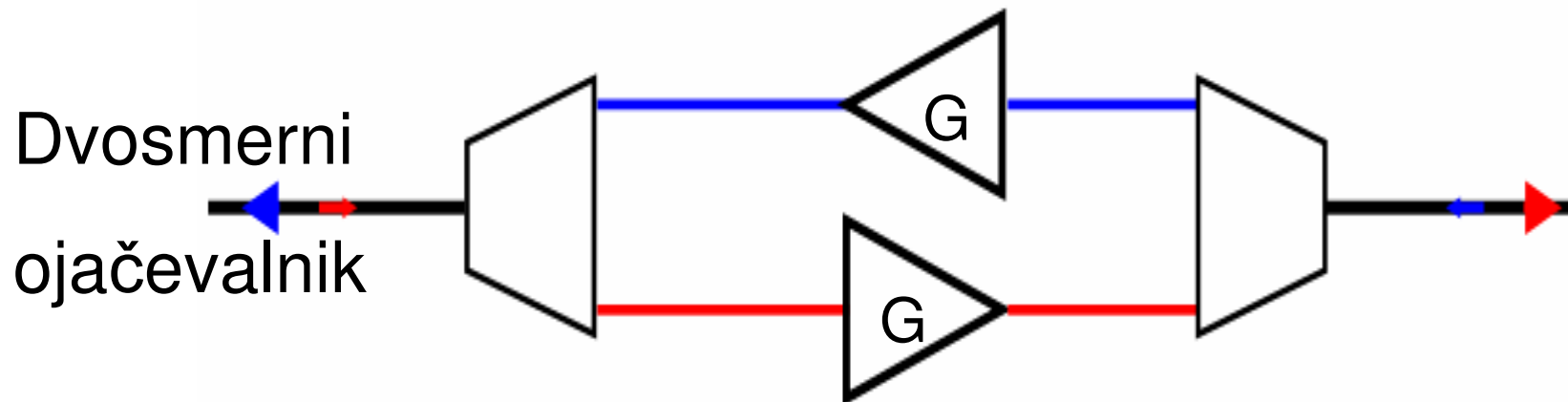
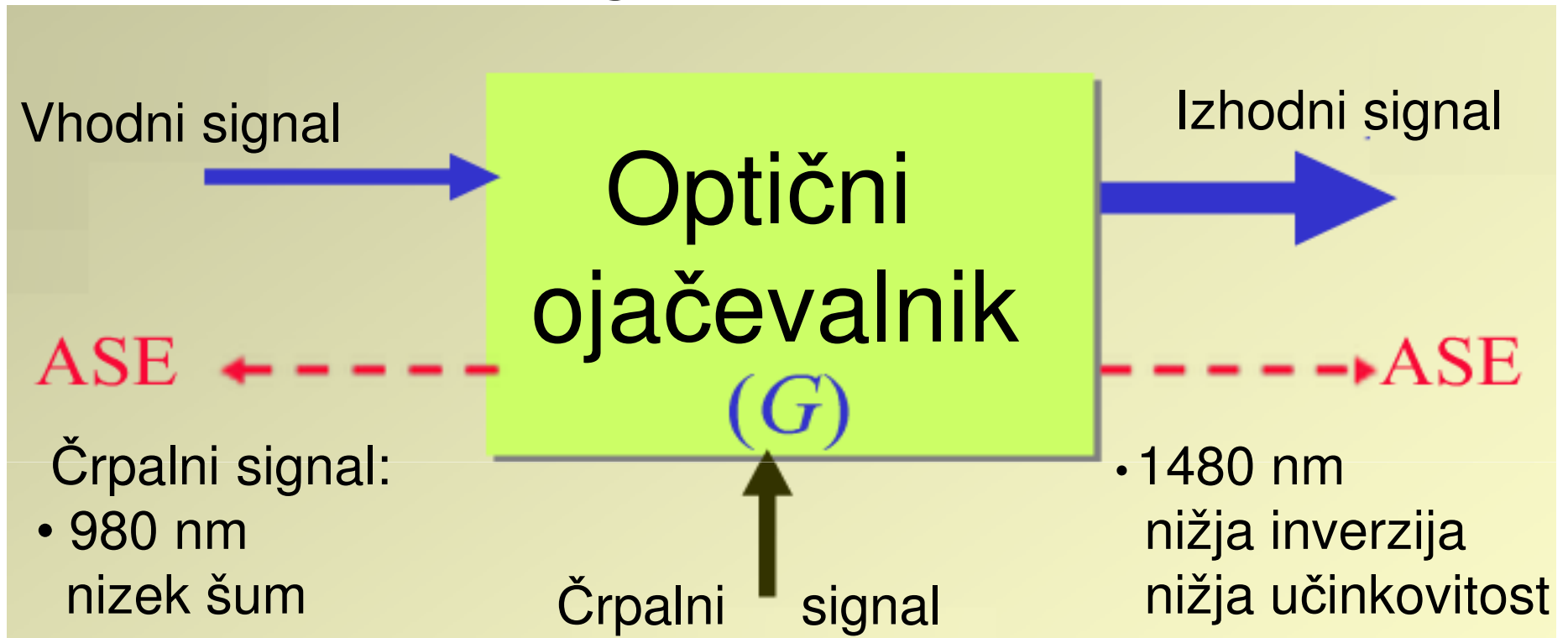
EDFA – sestavni deli in lastnosti



Optični vlakenski ojačevalnik (FOA, npr. EDFA):

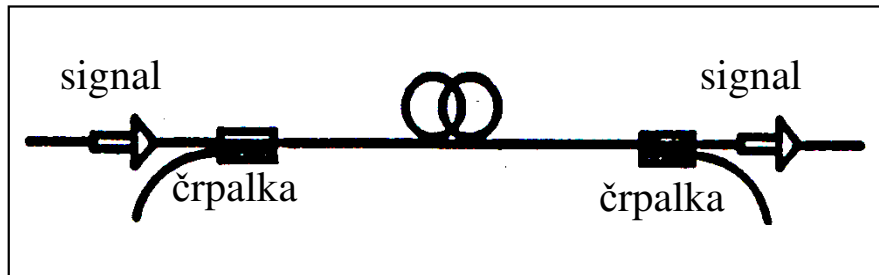
- vlakenska naprava, ki jo varimo na prenosno vlakno
- polarizacijska neodvisnost !
- visoko ojačenje (20-40 dB), razpoložljivost črpalnih laserjev
- velika moč do 200 mW, primeren za poojačevanje, linijsko ojačevanje in predojačevanje
- ugodna vrednost šumnega števila $\text{NF} < 5 \text{ dB}$, (teor. $\text{NF} > 3 \text{ dB}$)
- širok valovni pas $> 40 - 70 \text{ nm}$.

Signal in šum

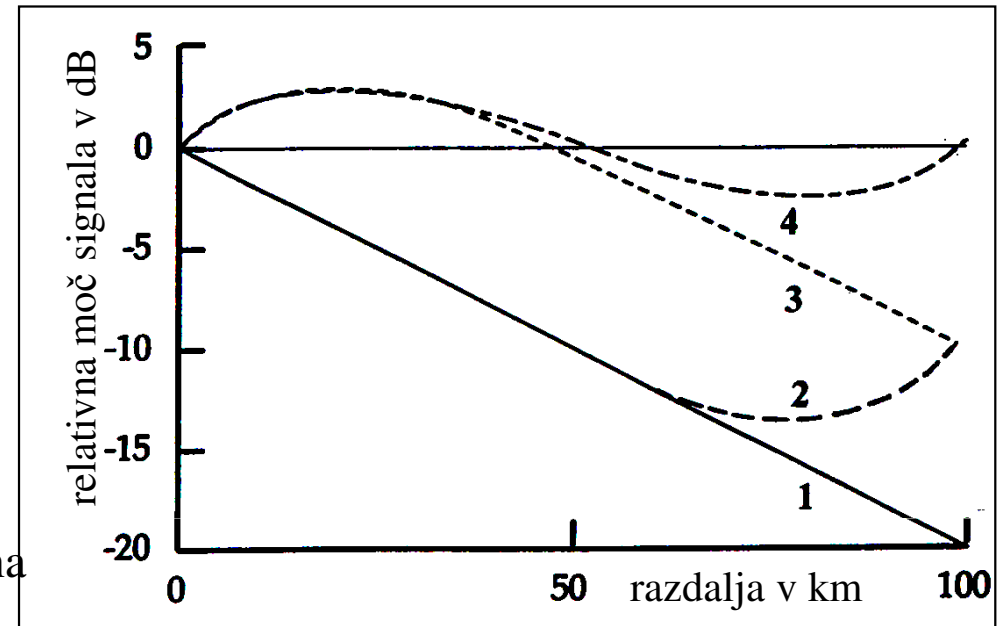


Ramanovo ojačevanje - črpalni načini

- Sosmerna in protismerna črpalna



- Potek ojačenega signala v vlaknu



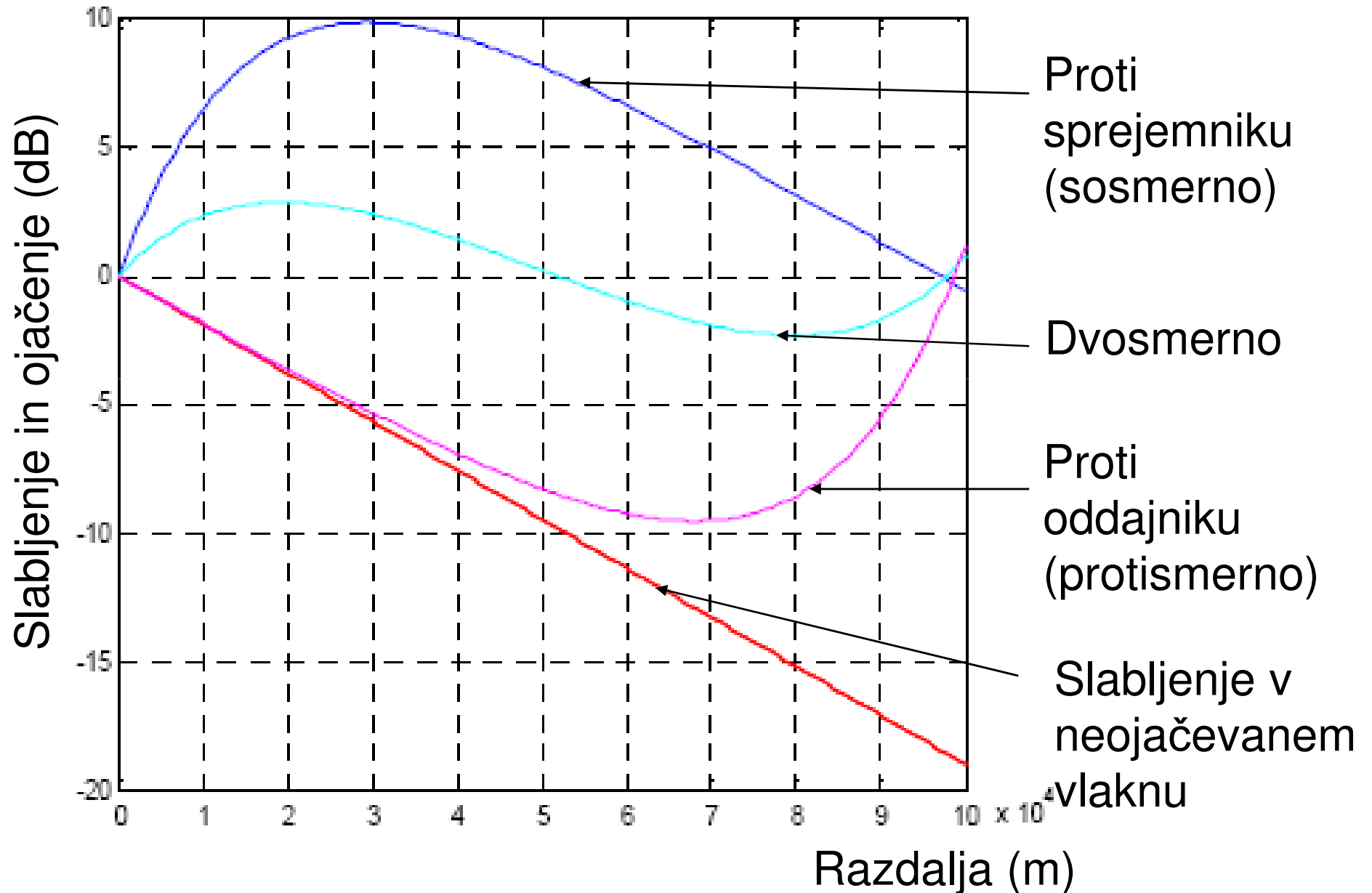
- Načini črpanja vlakna

1. nečrpano vlakno
2. črpalna 200 mW na koncu vlakna
3. črpalna 200 mW na začetku vlakna
4. črpalni po 200 mW na vsakem koncu vlakna

- Lastnosti črpanja vlakna

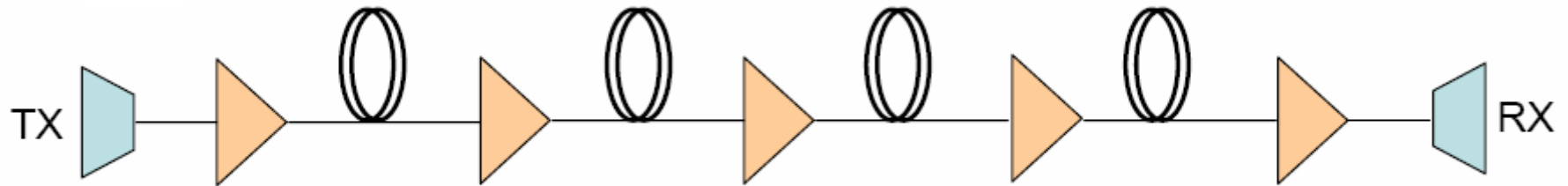
1. vlakno ni črpano; zaradi slabljenja upada signalna moč v dB linearno na dolžini 100 km za približno 20 dB.
2. vlakno je črpano na koncu; moč signala na končnih nekaj 10 kilometrih narašča. Nelinearni pojavi so najmanjši.
3. vlakno je črpano na začetku; moč signala sprva na začetnih nekaj 10 kilometrih narašča, po izrabi črpalne moči pa začne upadati zaradi slabljenja vlakna.
4. vlakno je črpano na začetku in koncu; moč signala na začetnih in končnih nekaj 10 kilometrih vlakna narašča. V prikazanih razmerah postane izhodna moč približno enaka vhodni. Ojačenje v vlaknu pokriva izgube zaradi slabljenja. Moč signala se po vlaknu mnogo ne spreminja.

Ramanovo porazdeljeno ojačenje

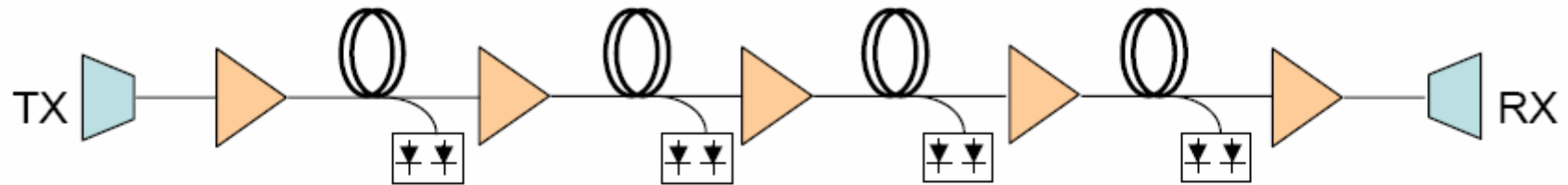


EDFA, EDFA + DRA, DRA

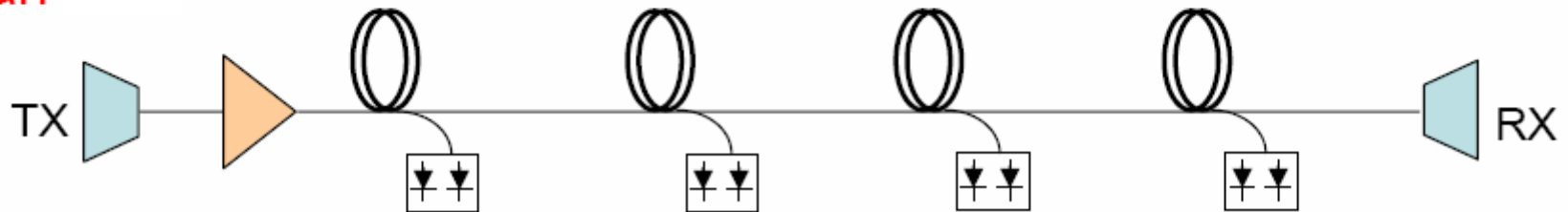
EDFA



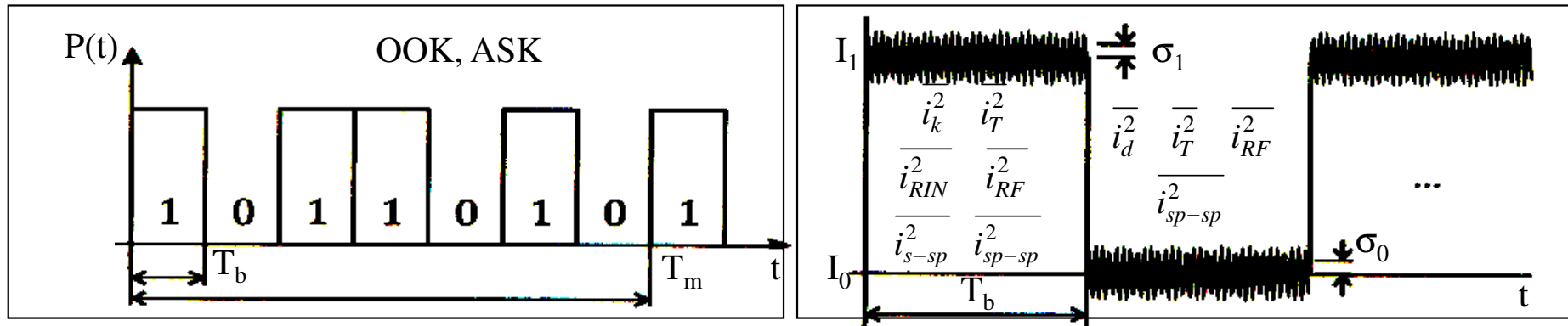
EDFA + Raman



Raman



Optični in električni šumi



1. Šumi v času trajanja impulza (bitna perioda 1)

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}
- intenzitetni šum P_{RIN}

• šumi v električnem delu zveze

- zrnati (kvantni in plazovni) šum i_k^2
- mešalni šum signala in ASE i_{ASE}^2
- mešalni šum spontane emisije i_{sp-sp}^2
- toplotni šum i_T^2
- relativni intenzitetni šum i_{RIN}^2
- ojačevalni šum RF ojač. i_{RF}^2

2. Šumi v odsotnosti impulza (bitna perioda 0) pri idealnem ugasnem razmerju

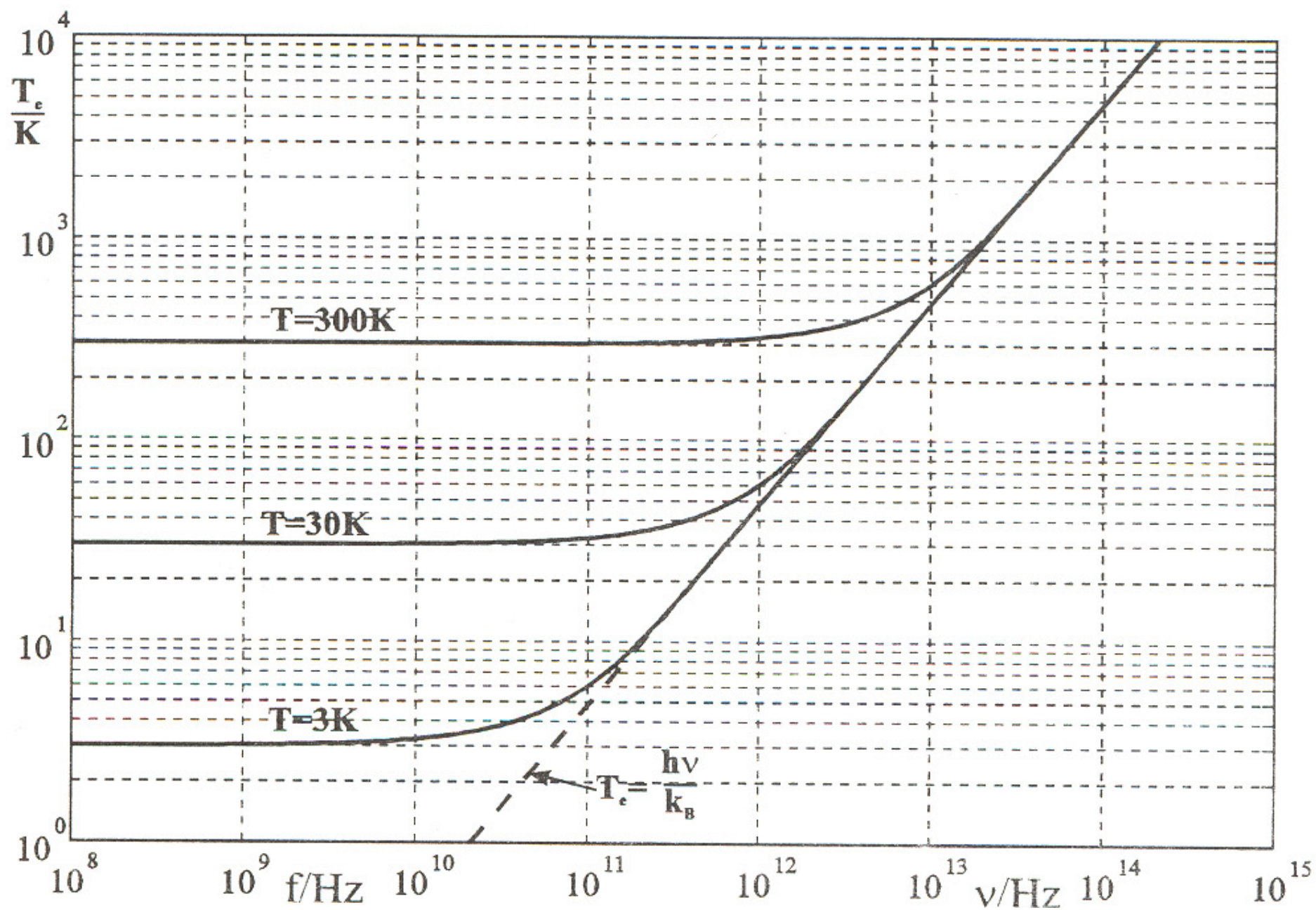
• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum (vakuumsko polje) P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}

• šumi v električnem delu zveze

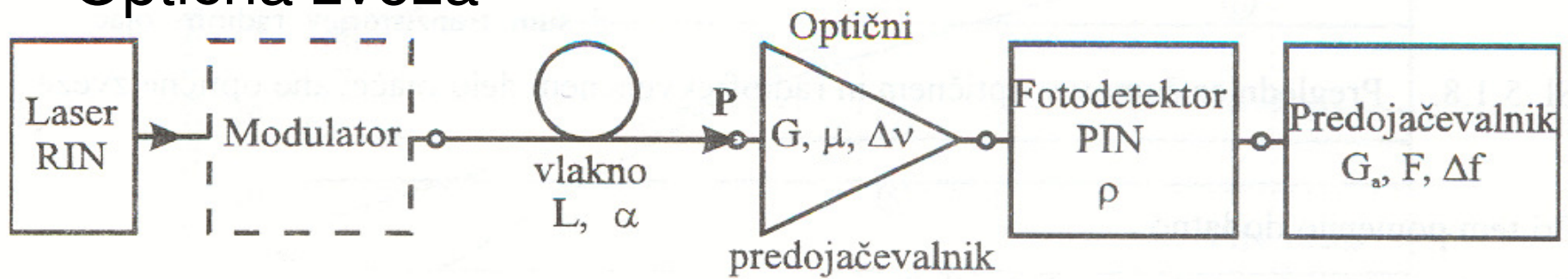
- šum temnega toka i_d^2
- mešalni šum spontane emisije i_{sp-sp}^2
- toplotni šum i_T^2
- ojačevalni šum RF ojač. i_{RF}^2

Fotodetektor

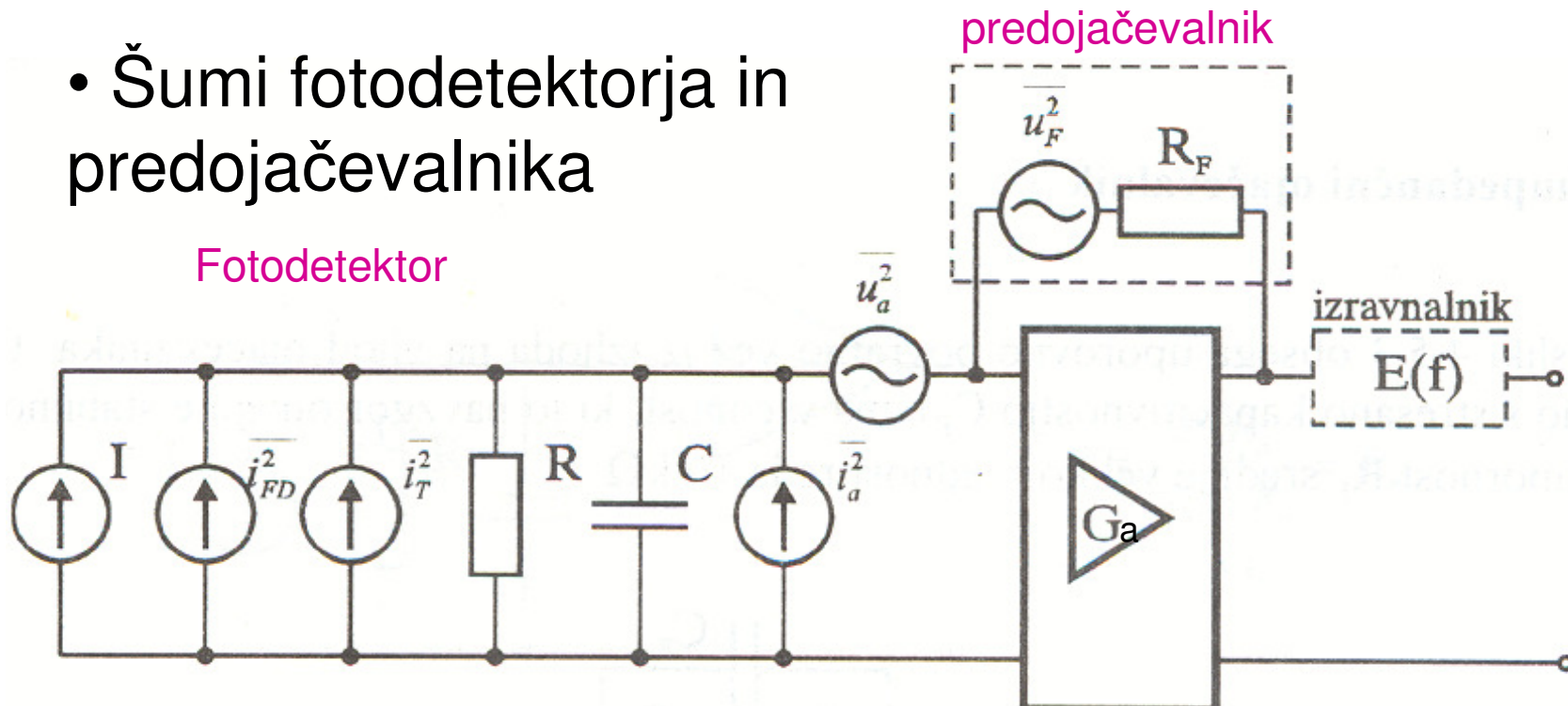


Fotodetektor in predojačevalnik

- Optična zveza

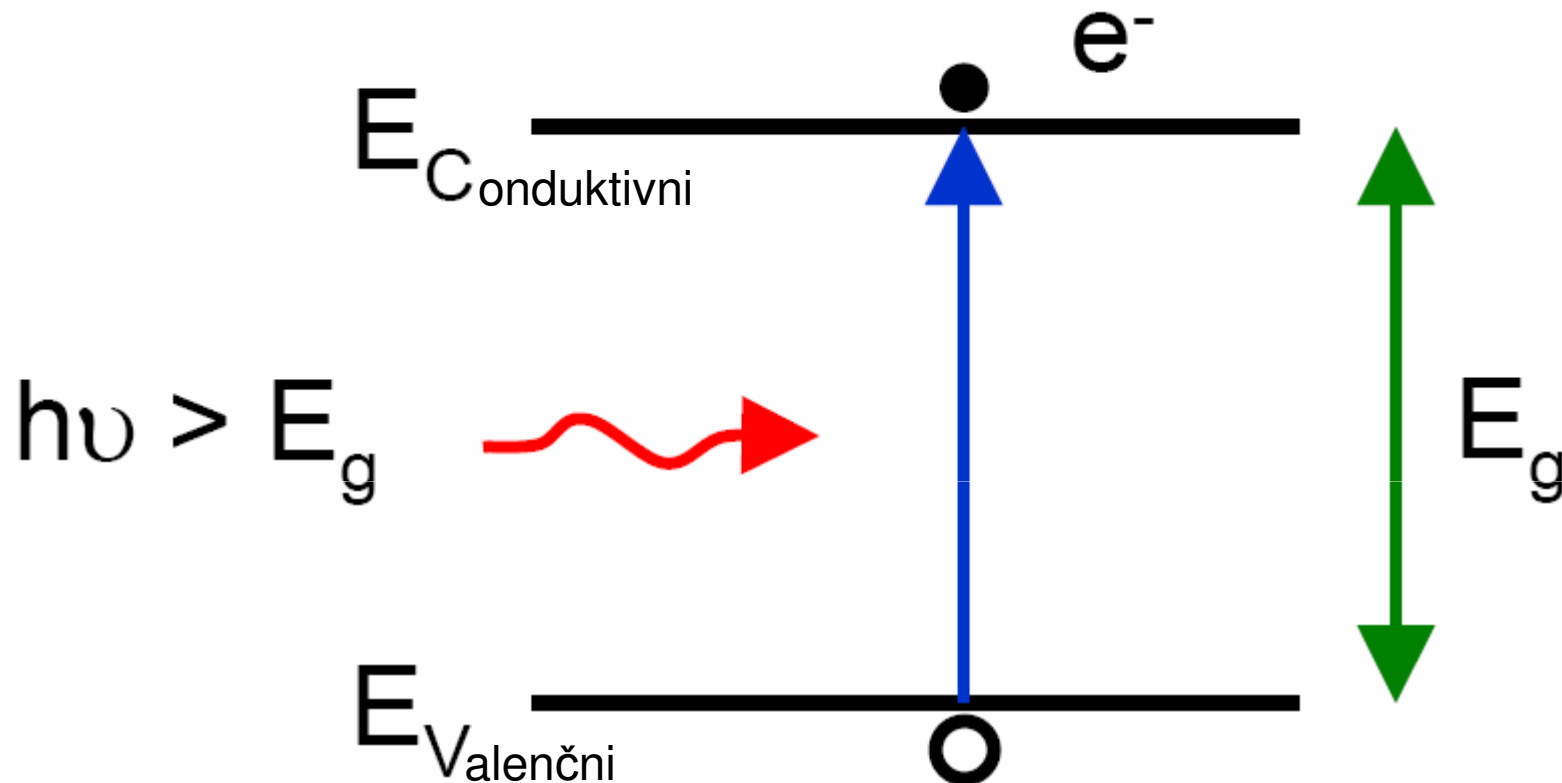


- Šumi fotodetektorja in predojačevalnika



Fotoionizacija

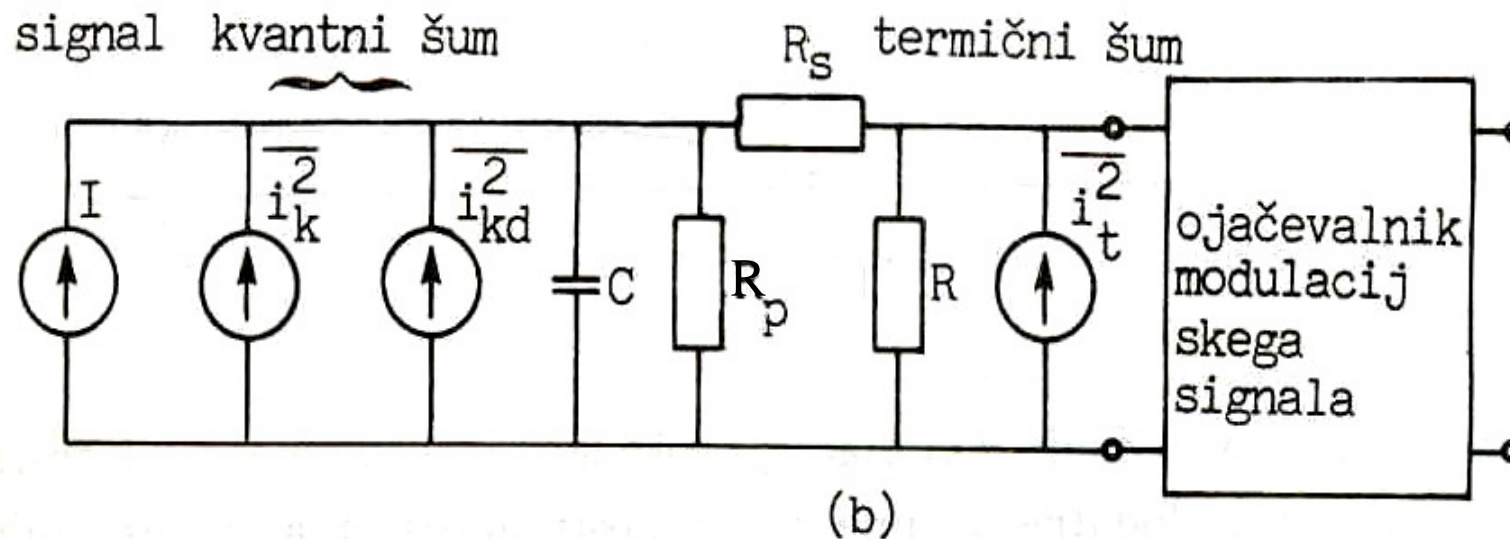
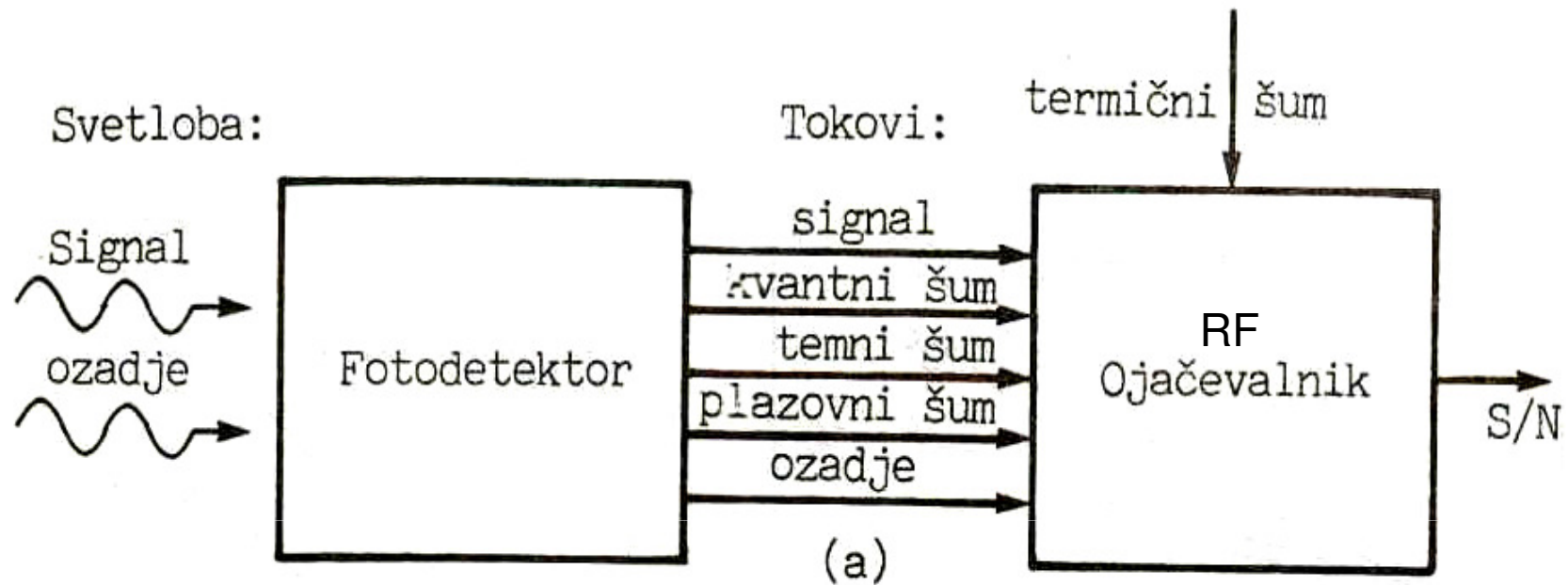
Princip fotodetekcije je fotoionizacija (fotoefekt, A. Einstein, 1905)



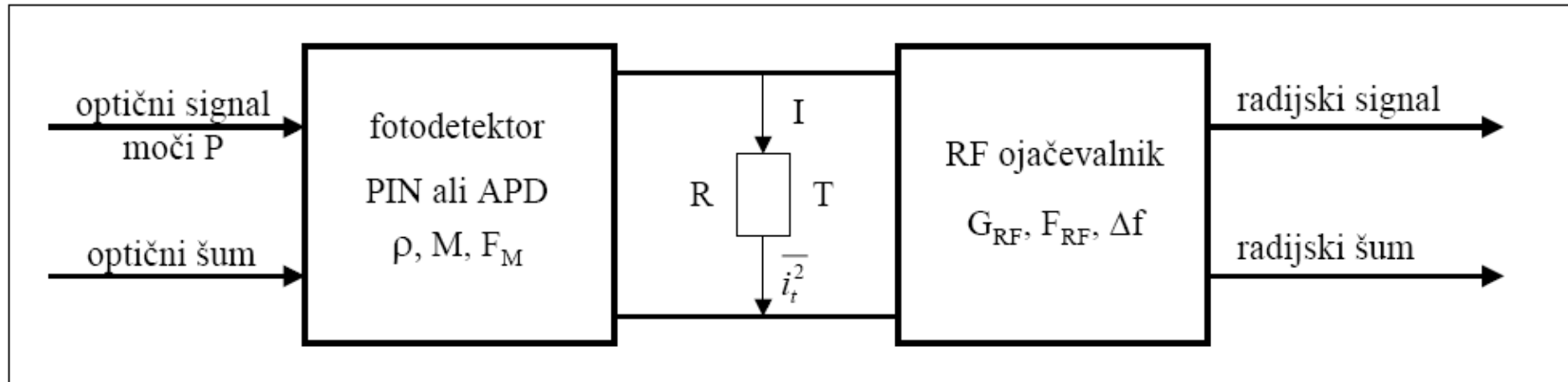
Foton, ki ima večjo (ali enako) energijo, kot je energija energijskega pasu polprevodnika, lahko spodbudi elektron v valenčnem pasu za prehod v prevodni pas. S tem nastane ioniziran par elektron–vrzel. Enačba fotoionizacije:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \mu\text{m}$$

Signal, šumi in nadomestna vezava



Šumi fotodetektorja in RF ojačevalnika



- Šum na izhodu plazovne fotodiode APD - kvantni in dodatni šum (multiplikativni šum)

$$\overline{i_{APD}^2} = 2e\rho P\Delta f M^2 F_M \quad (\text{dioda PIN : } M = 1, F_M = 1), \quad \rho = \frac{\eta e}{h\nu} \text{ odzivnost}$$

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja

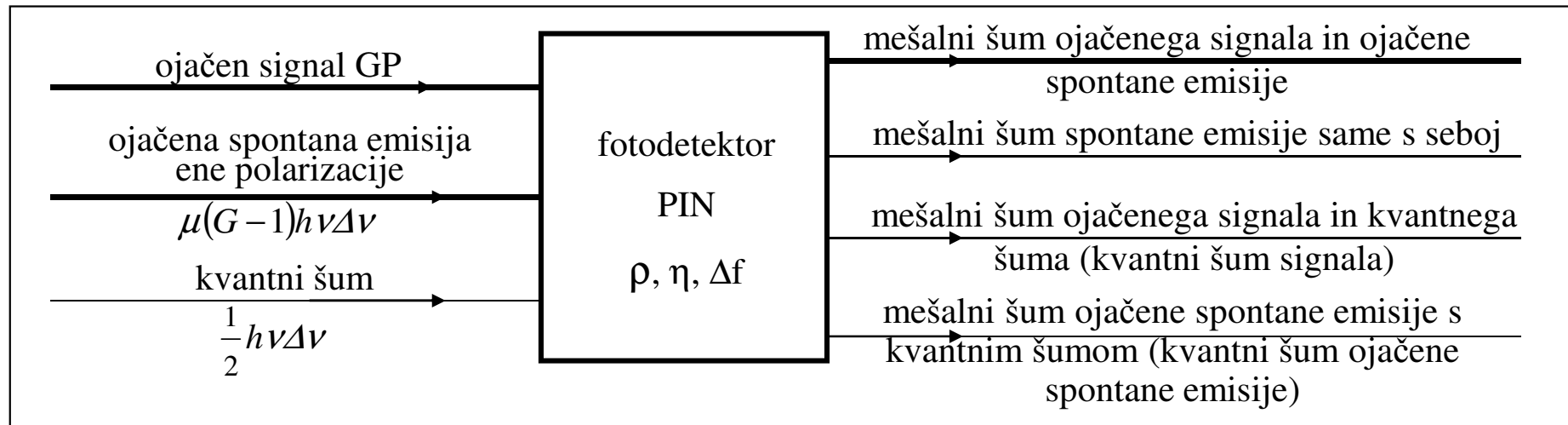
$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R} \quad R, \text{ upornost bremena}$$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, Boltzmannova konstanta

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja vključno s šumom RF ojačevalnika

$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T F_{RF} \Delta f}{R} \quad F_{RF}, \text{ šumni faktor RF ojačevalnika}$$

Mešalni šumi fotodetektorja (nad.)



- Mešalni šum ojačenega signala ni ojačena spontana emisija

$$\overline{i_{sig-sp}^2} = 4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu_0 \Delta f = 4e\eta I(G-1)\mu \Delta f$$

- Mešalni šum ojačene spontane emisije same s seboj

$$\overline{i_{sp-sp}^2} = 2\rho^2 \mu^2 (G-1)^2 (h\nu_0)^2 (2\Delta\nu - \Delta f) \Delta f \doteq 4e^2 \eta^2 \mu^2 (G-1)^2 \Delta\nu \Delta f$$

- Mešalni šum ojačenega signala in kvantnega šuma

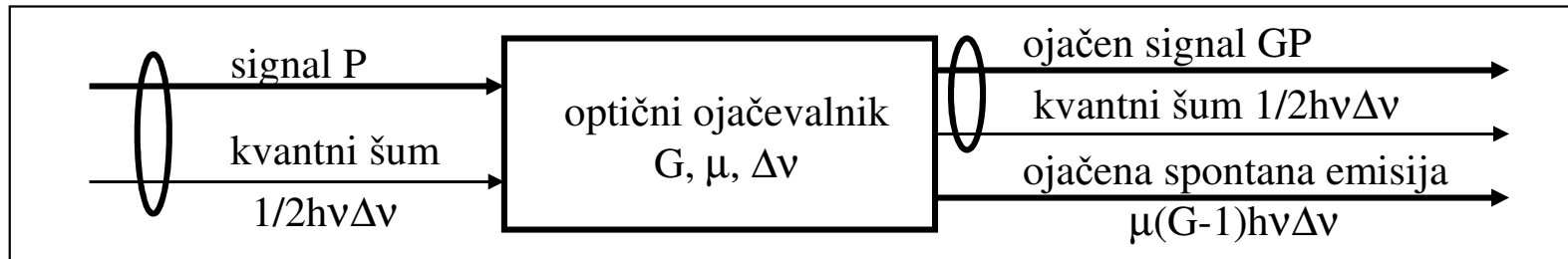
$$\overline{i_{sig-kv}^2} = 2e\rho GP \Delta f \doteq 2eI \Delta f$$

- Mešalni šum (polarizirane) ojačene spontane emisije s kvantnim šumom

$$\overline{i_{sp-kv}^2} = 4e\eta\rho\mu(G-1)h\nu_0\Delta\nu\Delta f = 4e^2\eta^2\mu(G-1)\Delta\nu\Delta f \doteq 2eI_{ASE} \Delta f, \quad I_{ASE} = 2\mu(G-1)\Delta\nu$$

Šumni faktor optičnega ojačevalnika

- Šumni faktor (optični) na osnovi optičnega signala in šuma

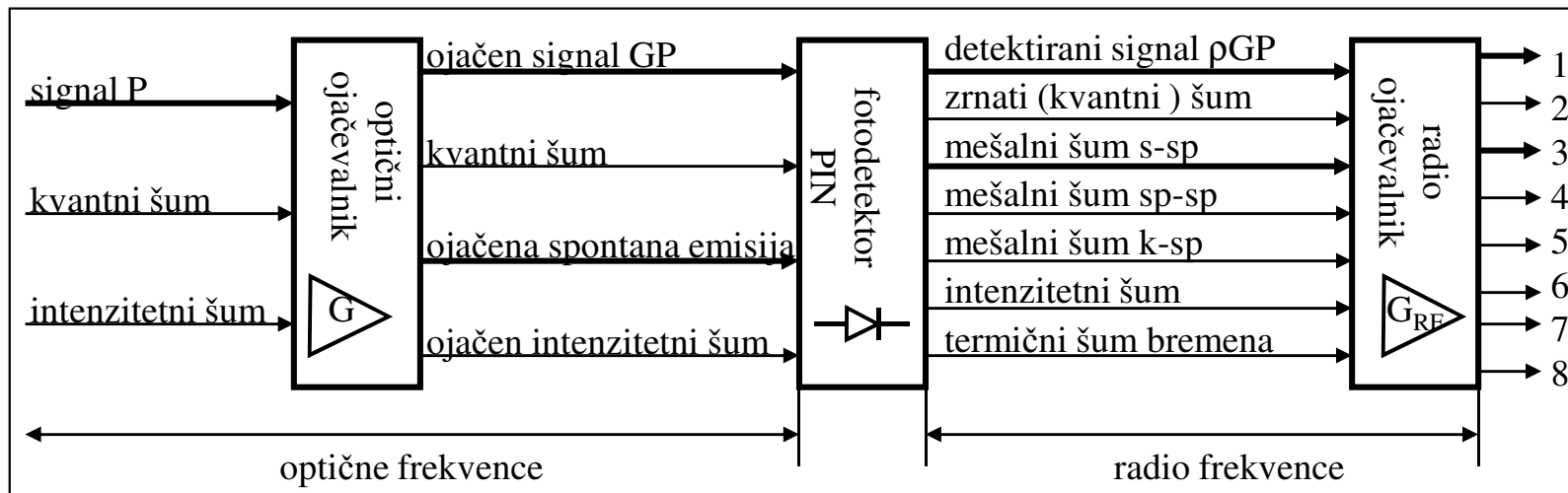


$(S/N)_{vh}$
razmerje
na vходу

$(S/N)_{izh}$
razmerje
na izhodu

$$F = \frac{(S/N)_{vh}}{(S/N)_{izh}} = 2\mu \frac{G-1}{G} \doteq 2\mu, \text{ kjer je } \mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \text{ parameter inverzne naseljenosti}$$

- Šumni faktor (električni) na osnovi električnega signala in šuma po detekciji



$(S/N)_1$
izhodno
razmerje
brez optičnega
ojačevalnika

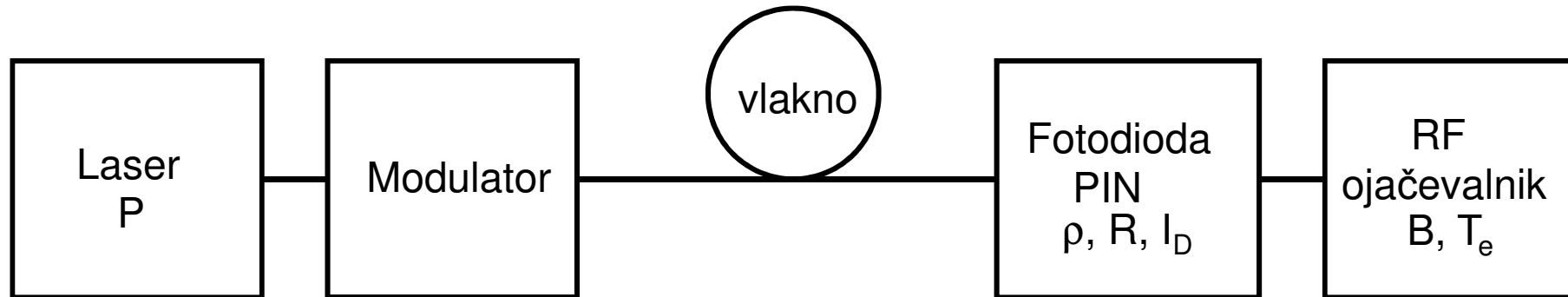
$(S/N)_2$
izhodno
razmerje
z optičnem
ojačevalnikom

$$F = \frac{(S/N)_1}{(S/N)_2} = 2\mu \frac{G-1}{G} \doteq 2\mu, \text{ kjer je } \mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \text{ parameter inverzne naseljenosti}$$

- Optični in električni šumni faktor imata enaki vrednosti.
- Najmanjša vrednost šumnega faktorja pri $\mu = 1$ (popolna inverzija naseljenosti) znaša 2 (3 dB)

Razmerje
signal/šum

Neojačevana optična zveza - PIN



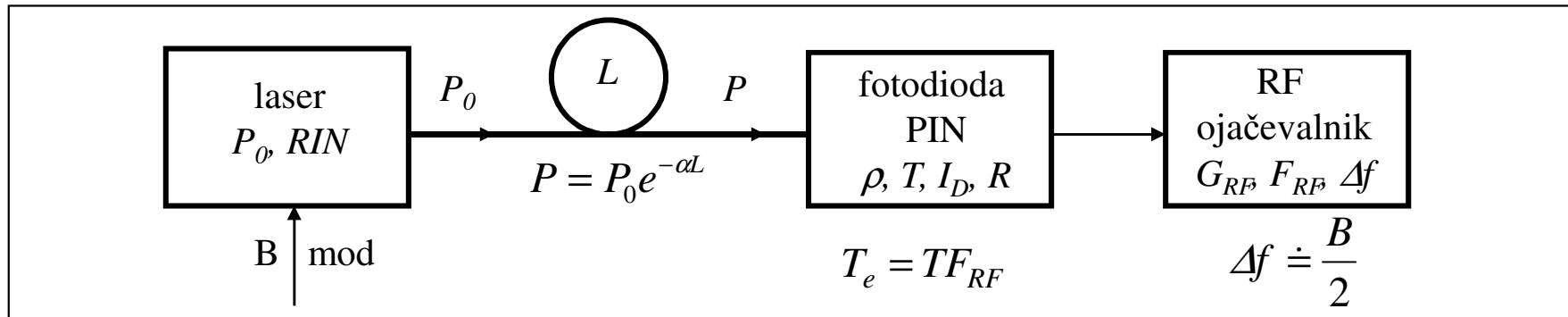
Skrajšana formula:

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\eta \frac{eP}{hf}\right)^2 R}{2e \left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B}$$

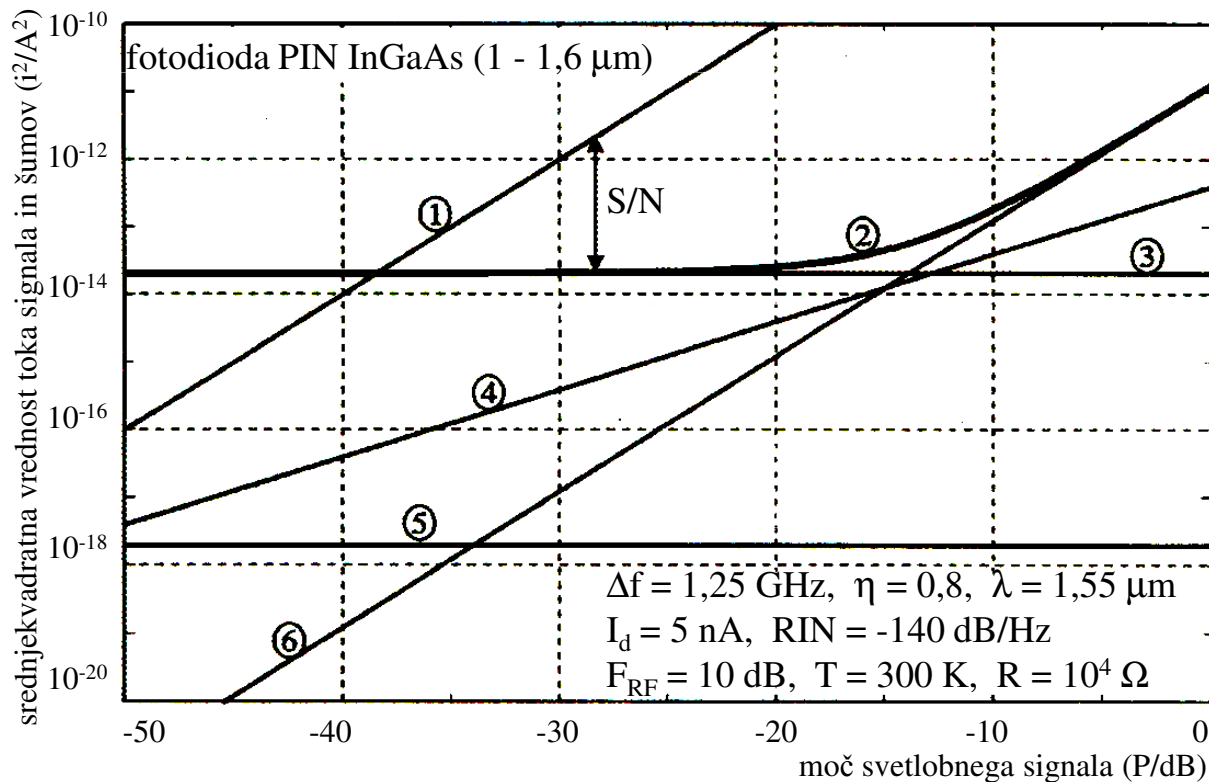
Kvantni šum signala Kvantni šum temnega toka Termični šum

(zanemarjen RIN)

Neojačevana optična zveza - dioda PIN



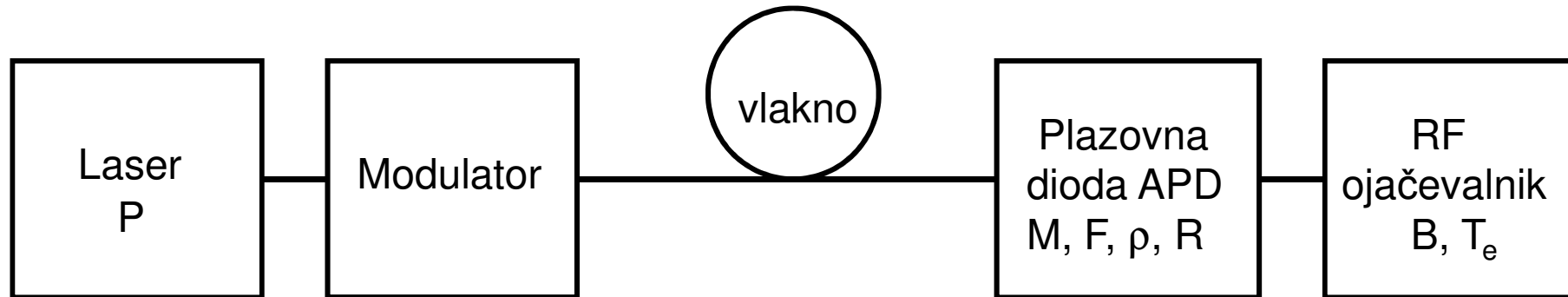
$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(\rho P)^2 R}{(2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF})\Delta f} \doteq \frac{(\rho P)^2 R}{4kTF_{RF}\Delta f} \quad \text{termična meja}$$



srednjekvadratni tok signala in šumov:

- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni šum signala
- 5 kvantni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Neojačevana optična zveza - APD



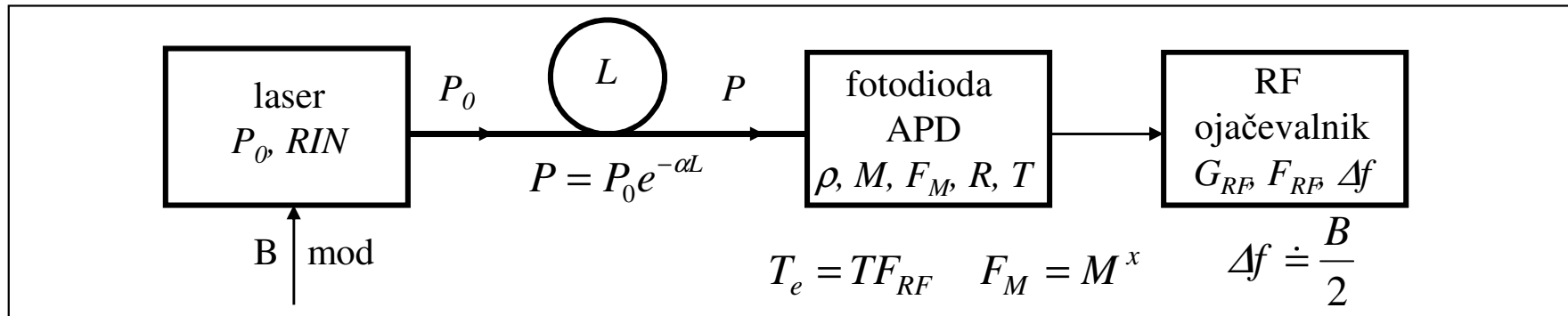
Skrajšana formula:

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(M \eta \frac{eP}{hf} \right)^2 R}{M^2 F(M) 2e \left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D \right) BR + 4kT_e B}$$

Ojačen kvantni šum signala
Ojačen kvantni šum temnega toka
Termični šum

zanemarjen RIN

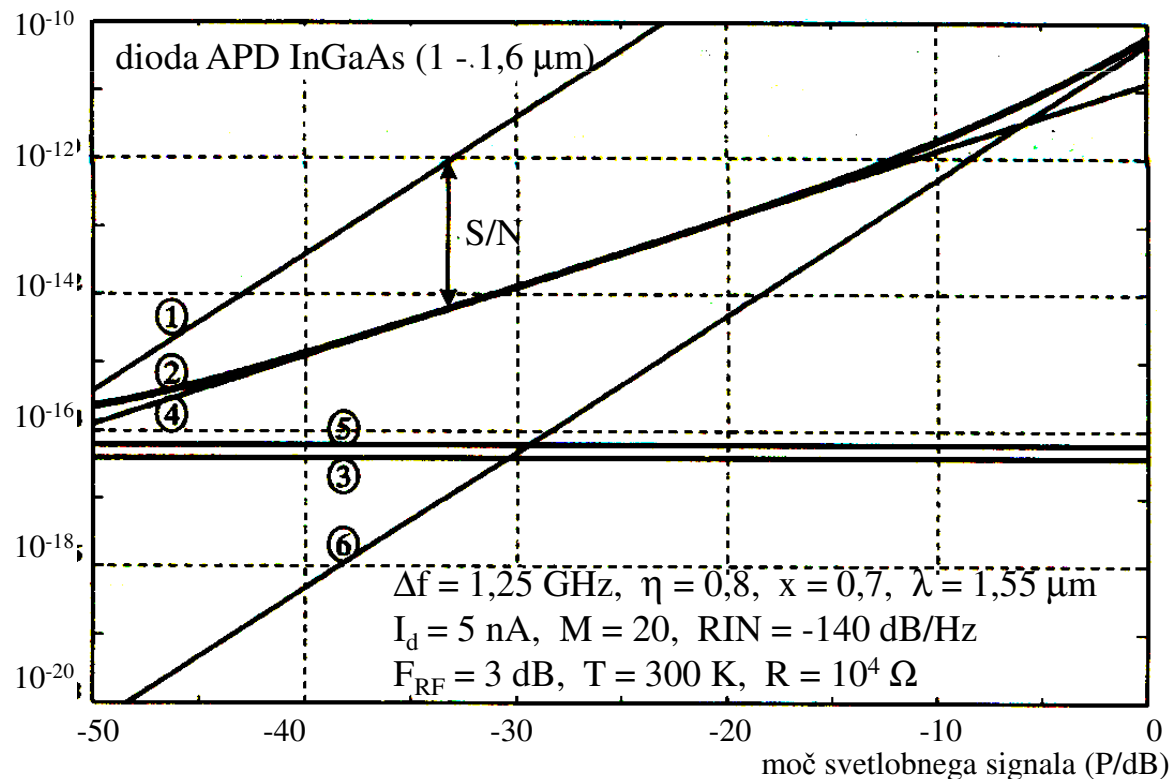
Neojačevana optična zveza - dioda APD



$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(M\rho P)^2 R}{(M^2 F_M 2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF})\Delta f} \doteq \frac{\rho P}{F_M 2e\Delta f}$$

kvantna meja

srednjekvadratna vrednost toka signala in šumov (i^2/A^2)



srednjekvadratni tok signala in šumov:

- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni (in plazovni) šum signala
- 5 kvantni in plazovni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Razmerje signal/šum na kvantni meji

Kvantni šum signala lokalnega oscilatorja

hf: energija fotona,

n_b : srednje število fotonov na bit,

R: $\eta\lambda/hc$ odzivnost fotodiode

Razmerje S/N za primer neojačevane zveze

$$= \frac{|I(t)|^2}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$= \frac{2R^2P_sP_{LO}}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$\xrightarrow{P_{LO} \rightarrow \infty} \frac{\eta P_s}{hfB} = \begin{matrix} 2\eta n_b & \textit{hetero} \\ 4\eta n_b & \textit{homo} \end{matrix}$$

Termični šum

B: širina MF ali osnovnega pasu,

kT: termična energija,

R_d : upornost bremena

η : kvantni izkoristek

Optimalni sprejem **na kvantni meji** pri zadostni moči lokalnega oscilatorja oz. pri prevladujočem kvantnem šumu lokalnega oscilatorja nad termičnim šumom. Heterodinski sprejem je 3 dB nad kvantno mejo. Homodinski sprejem je za 3 dB občutljivejši od heterodinskega sprejema zaradi polovičnega spektra.