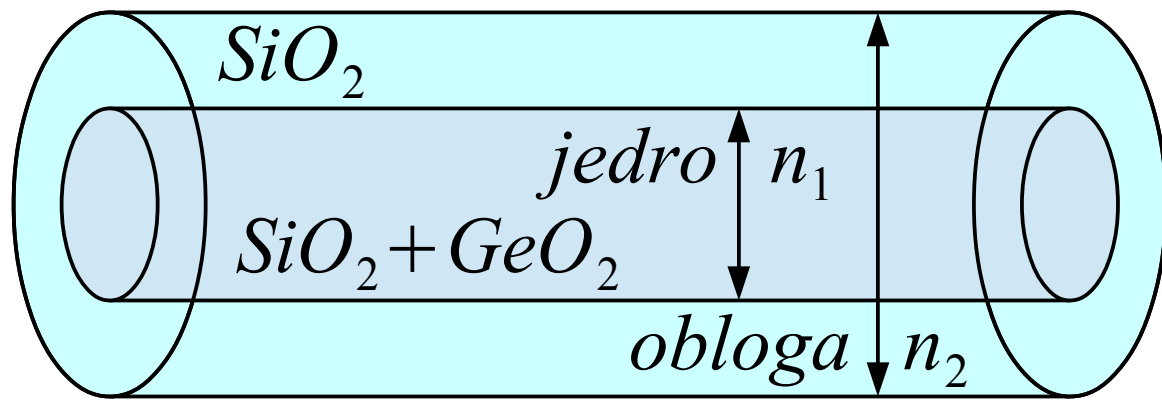


Optične modulacije

..... Seznam slik:

- Slika 1 – Lastnosti svetlobnega vlakna
- Slika 2 – Lastnosti svetlobnih izvorov
- Slika 3 – Zunanji modulatorji svetlobe
- Slika 4 – Spektralna gostota šuma
- Slika 5 – Toplotni in zrnati šum
- Slika 6 – Razmerje Q in pogostnost napak
- Slika 7 – Občutljivost PIN / APD sprejemnika
- Slika 8 – Domet PIN sprejemnika
- Slika 9 – Jakostna modulacija ON/OFF, NRZ ali ASK (Amplitude-Shift Keying)
- Slika 10 – Pasivno Optično Omrežje (PON)
- Slika 11 – Signal in šum v ojačevani svetlobni zvezi
- Slika 12 – Večnivojska modulacija PAM4 (Pulse-Amplitude Modulation)
- Slika 13 – Polarizacijska modulacija PolSK (POLarization-Shift Keying)
- Slika 14 – Solitonska modulacija (RZ)
- Slika 15 – Koherentni svetlobni sprejemnik
- Slika 16 – Balančni svetlobni sprejemnik
- Slika 17 – Dvofazna modulacija BPSK
- Slika 18 – Diferencialna demodulacija BPSK
- Slika 19 – Kvadraturni (QPSK/QAM) svetlobni sprejemnik
- Slika 20 – Štirifazna modulacija QPSK (Quadri-Phase Shift Keying)
ali QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
- Slika 21 – QPSK (QAM) polarizacijski multipleks (MIMO 2x2)
- Slika 22 – Ničelna medfrekvenca (ZIF) za 100Gbit/s 2xQAM16 (MIMO 2x2)
- Slika 23 – Prekoceanski kabel 120 kanalov po 100Gbit/s 2xQAM16
- Slika 24 – Kretnice z valovodno razvrstitevno strukturo AWG
(Arrayed Waveguide Grating)
- Slika 25 – Hitri Ethernet 100 ... 800Gbit/s



jedro/obloga [μm]
 Mnogorodovno SI 100/140
 Mnogorodovno GI 50/125
 Enorodovno SI 9/125
 Enorodovno posebno 9/80

Numerična apertura $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx 0.1 (SMF) \dots 0.2 (MMF)$

Mnogorodovna razpršitev $B = D_M / l$ $D_M \approx 0.1 \dots 3.5 \text{ GHz.km}$

Barvna razpršitev $\Delta t = D_B \cdot \Delta \lambda \cdot l$ $D_B \approx 5 \dots 17 \text{ ps/nm.km}$

Polarizacijska razpršitev $\Delta t = D_P \cdot \sqrt{l}$ $D_P \approx 0.1 \dots 10 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

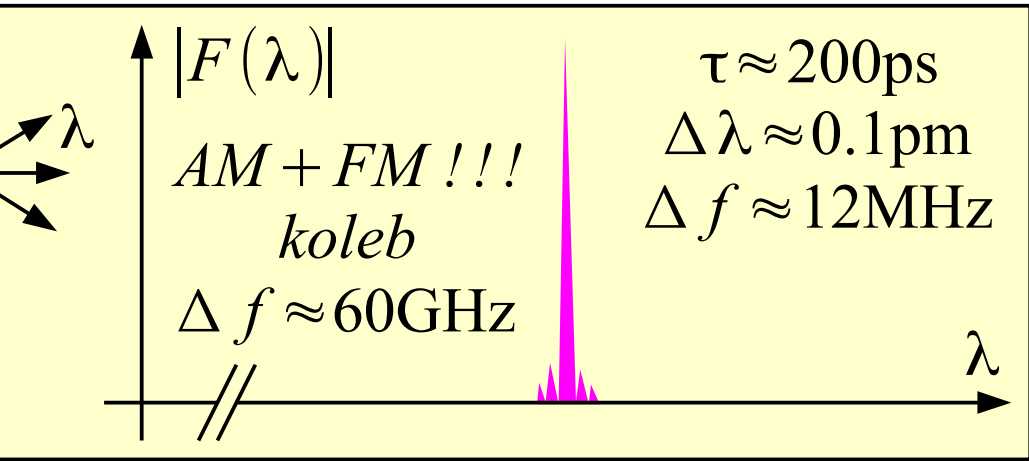
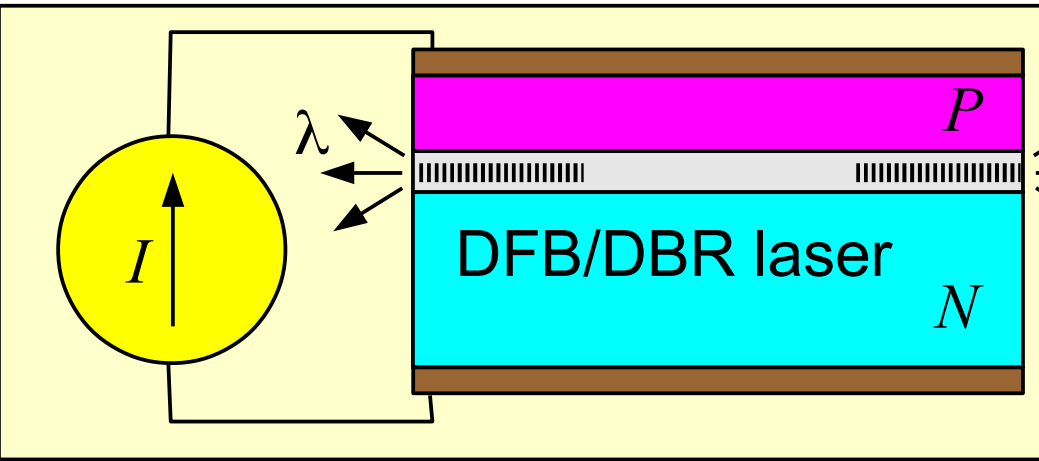
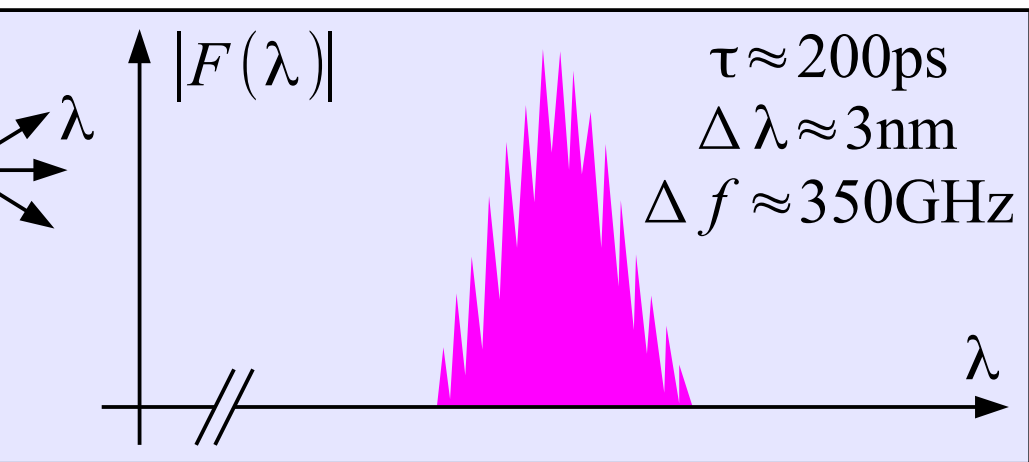
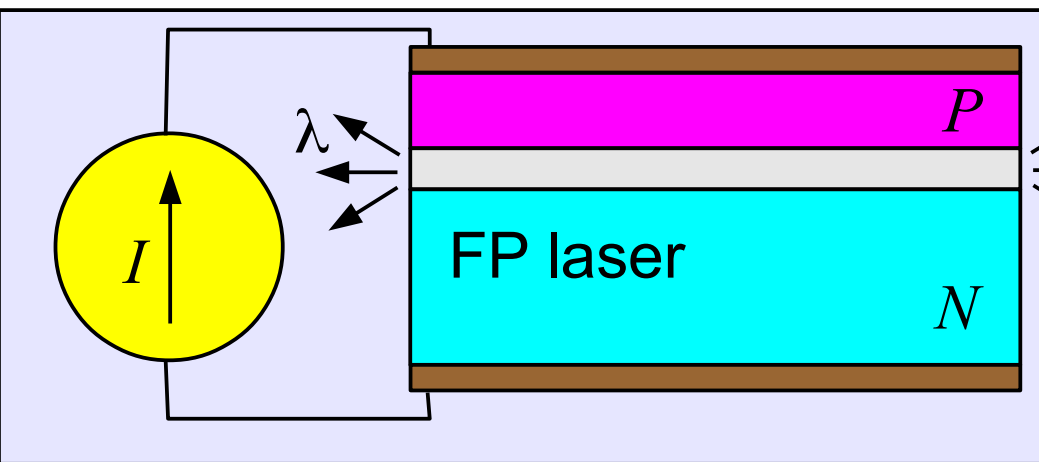
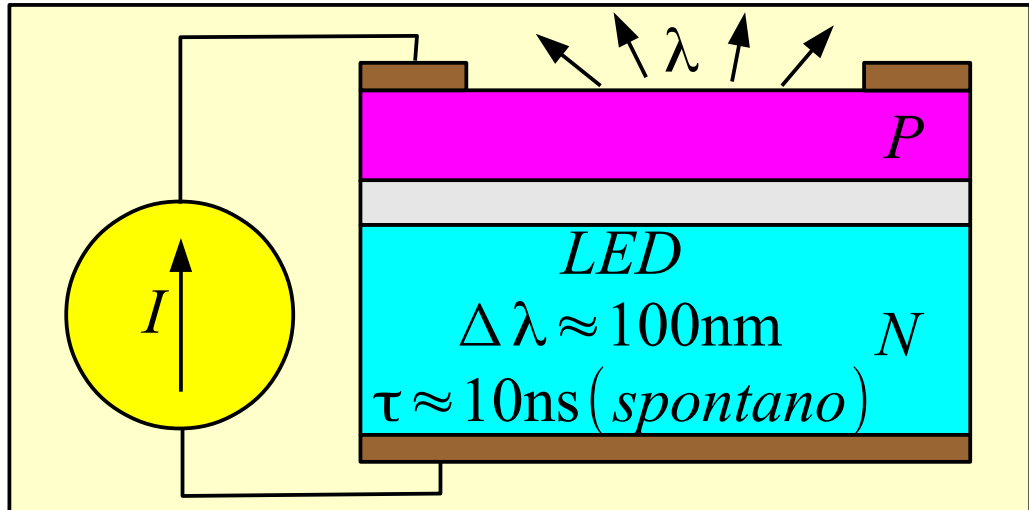
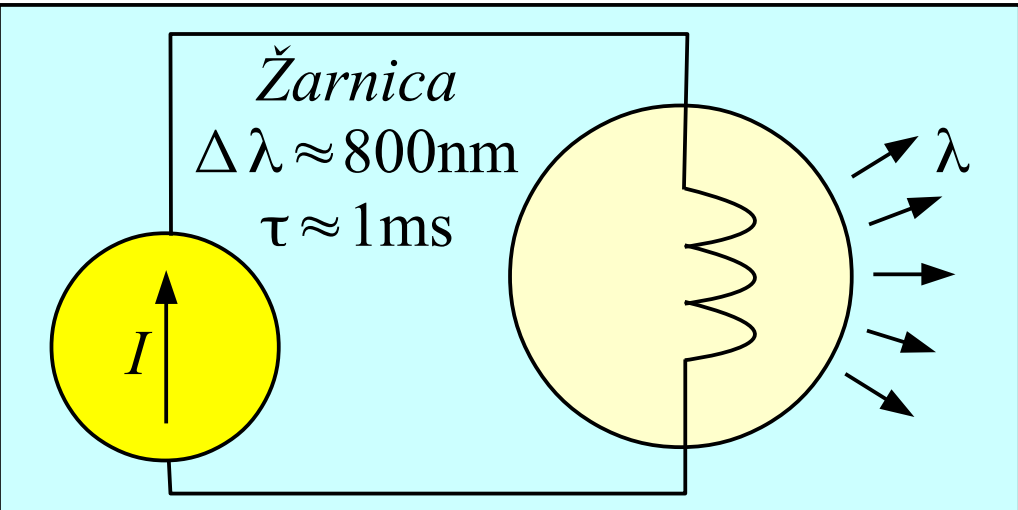
Občutljivost sprejemnika $P_{RX} (1 \text{ Gbit/s}) \approx -36 \text{ dBm} = 250 \text{ nW}$

Nelinearnosti $P_{TX} < 100 \text{ mW} = +20 \text{ dBm}$

Zmogljivost (Shannon) $C \approx 10 \text{ Tbit/s}$

Simbolna hitrost $R \leq 50 \text{ Gbaud/s}$

*Pri $C \gg R$ popačenja
 zahevajo večtonski
 modem FDM
 (OFDM, WDM)*

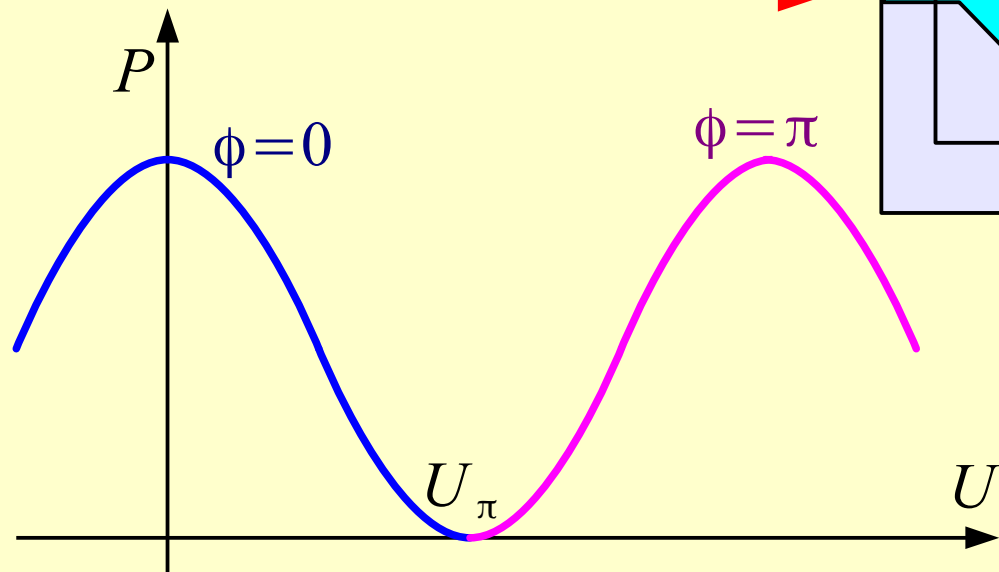


2 - Lastnosti svetlobnih izvorov

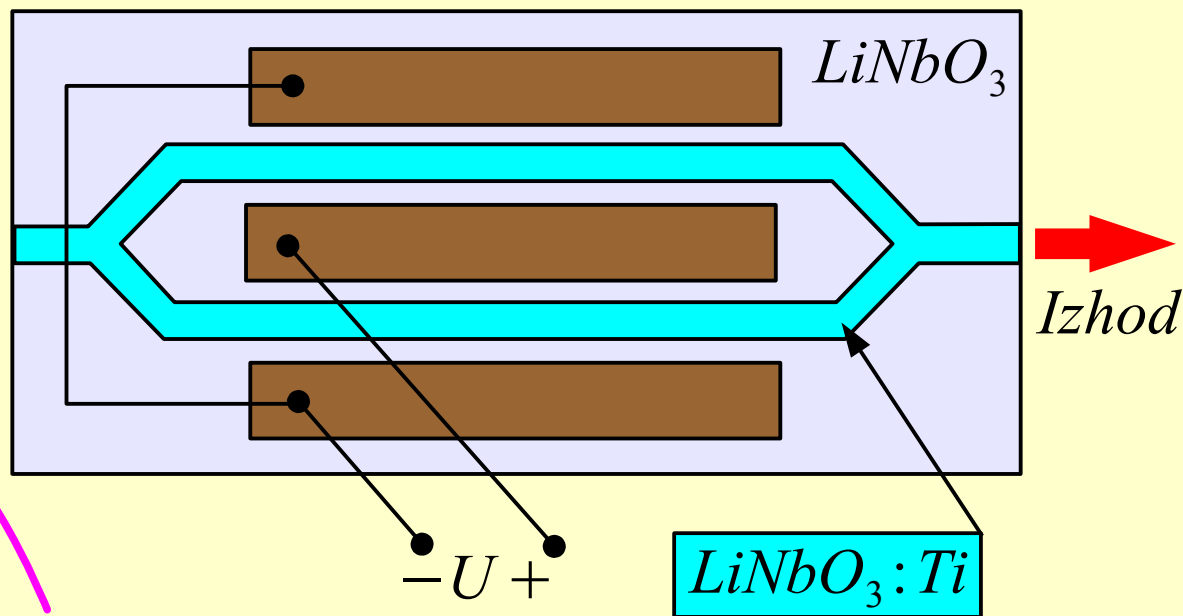
Amplitudni MZM

$$B \approx 10\text{GHz}$$

$$a_{\text{ugasno}} \approx 25\text{dB}$$

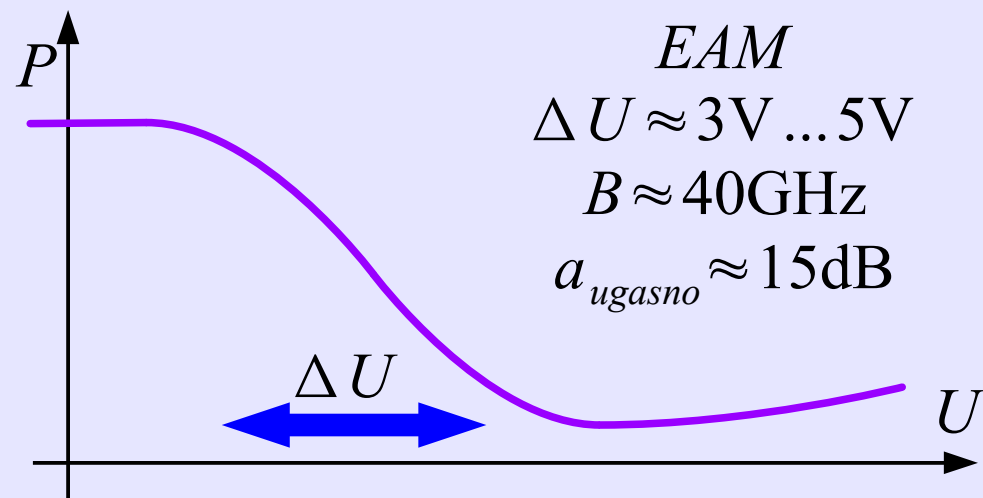
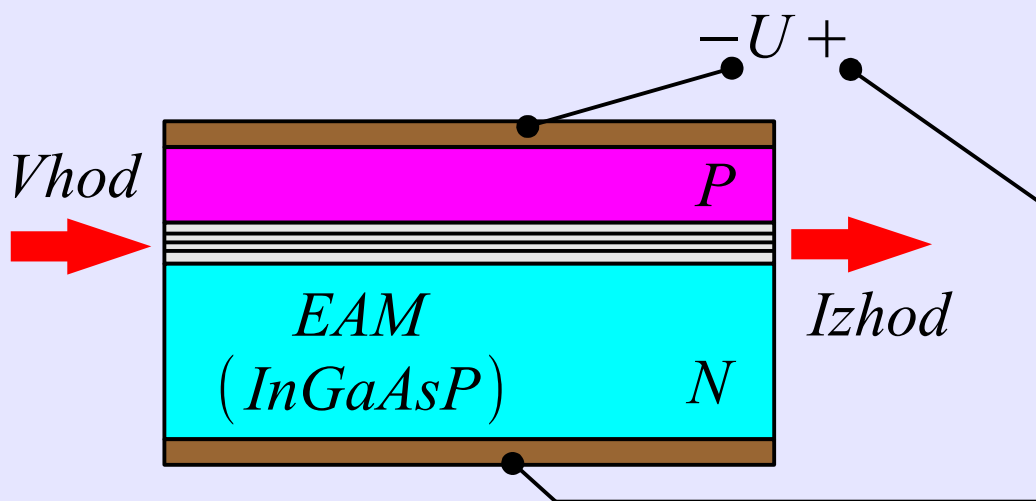


V_{hod}



$$\text{LiNbO}_3: U_{\pi TE} \approx 5\text{V} \quad U_{\pi TM} \approx 14\text{V}$$

$$\text{GaAs}: U_\pi \approx 2\text{V} \dots 4\text{V}$$



EAM

$$\Delta U \approx 3\text{V} \dots 5\text{V}$$

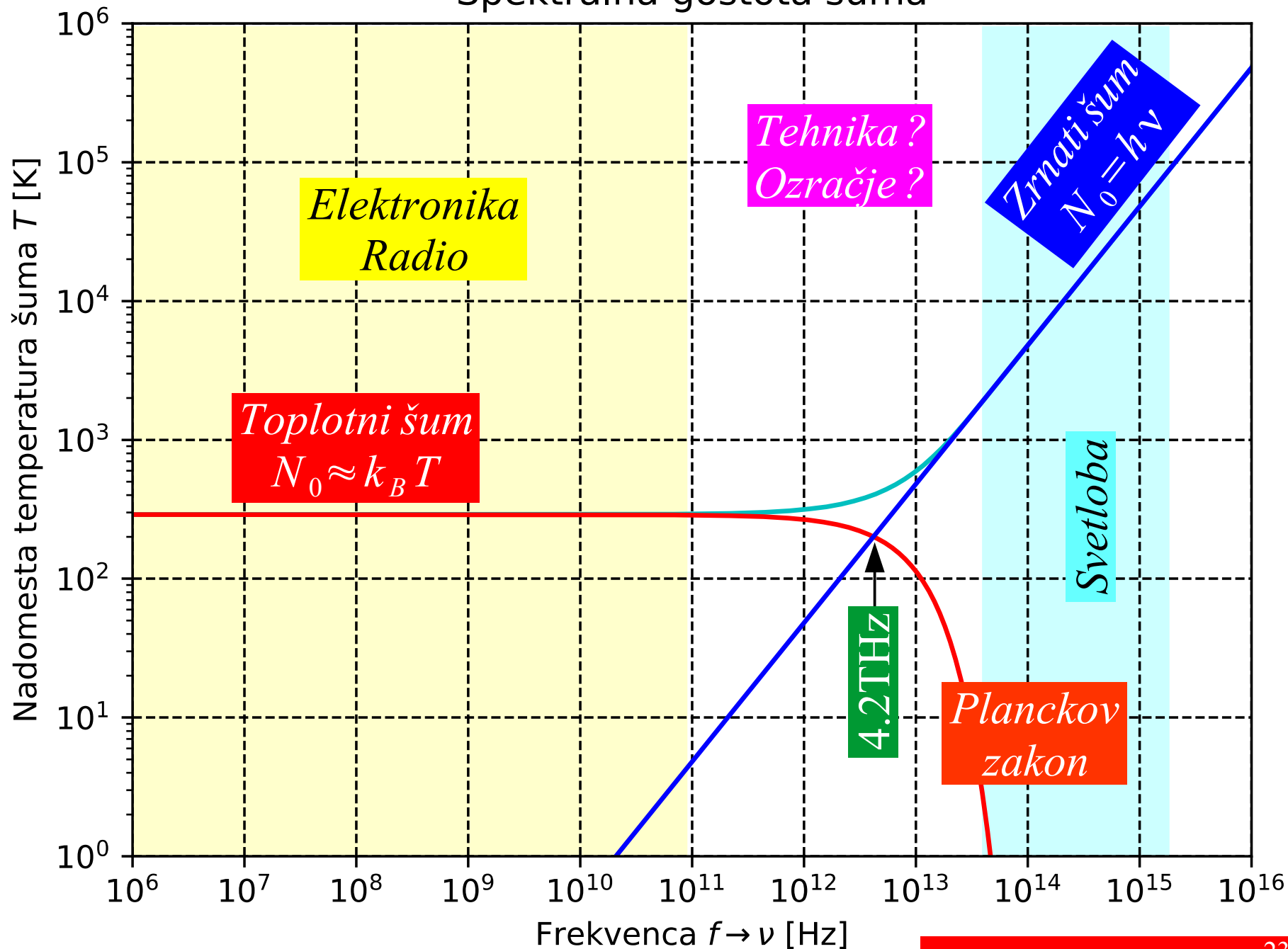
$$B \approx 40\text{GHz}$$

$$a_{\text{ugasno}} \approx 15\text{dB}$$

$$P_N = \Delta f \cdot N_0$$

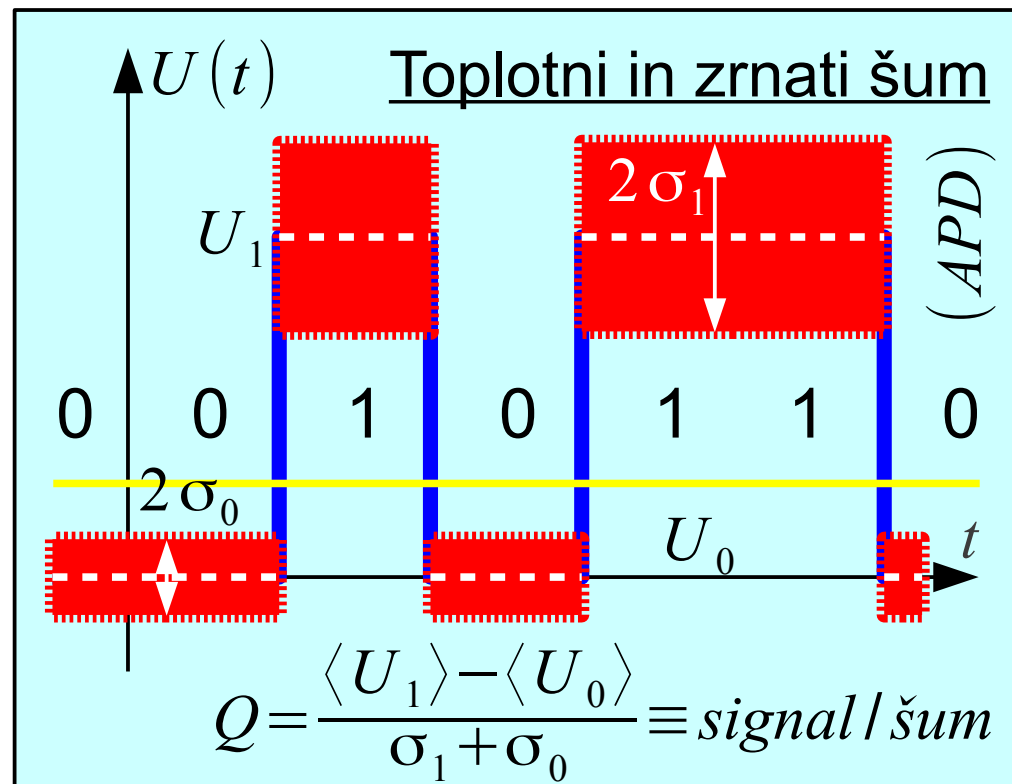
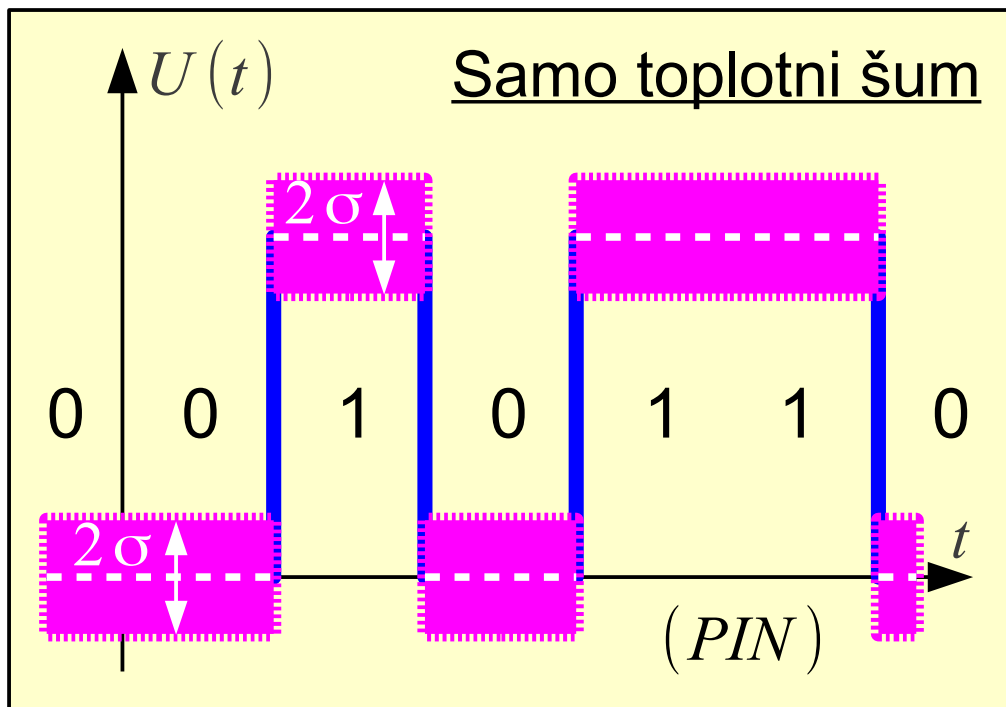
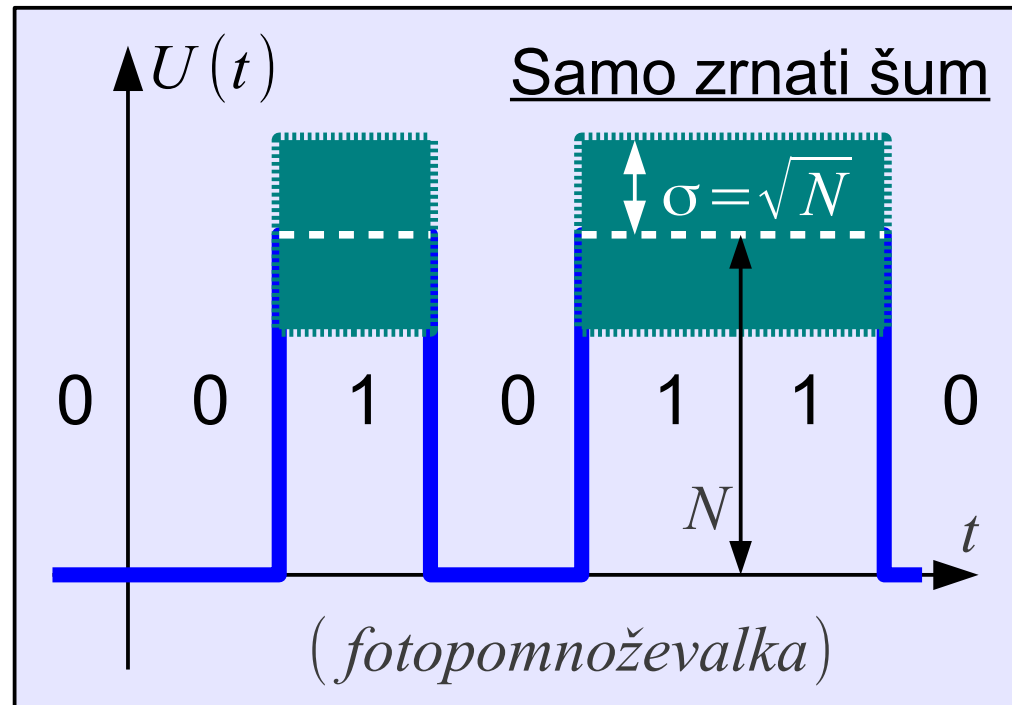
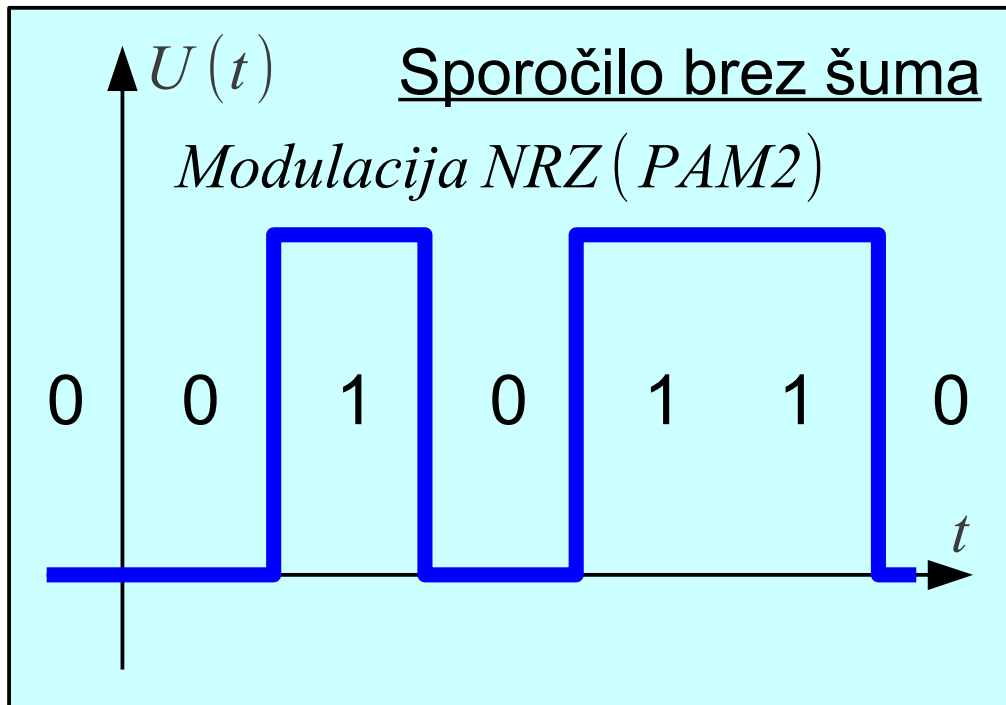
$$h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Spektralna gostota šuma



4 - Spektralna gostota šuma

$$k_B = 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$



Razmerje signal/šum

$$Q = \frac{\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$Q_{dB} = 20 \cdot \log_{10} Q$$

$$\sigma_1 \approx \sigma_0 \approx 36 \mu V_{eff}$$

$$Q \approx 6 \dots 7 \rightarrow U_s \approx 450 \mu V$$

enica $\rightarrow N_e \approx 1400$
(*ničla* $\rightarrow N_e = 0$)

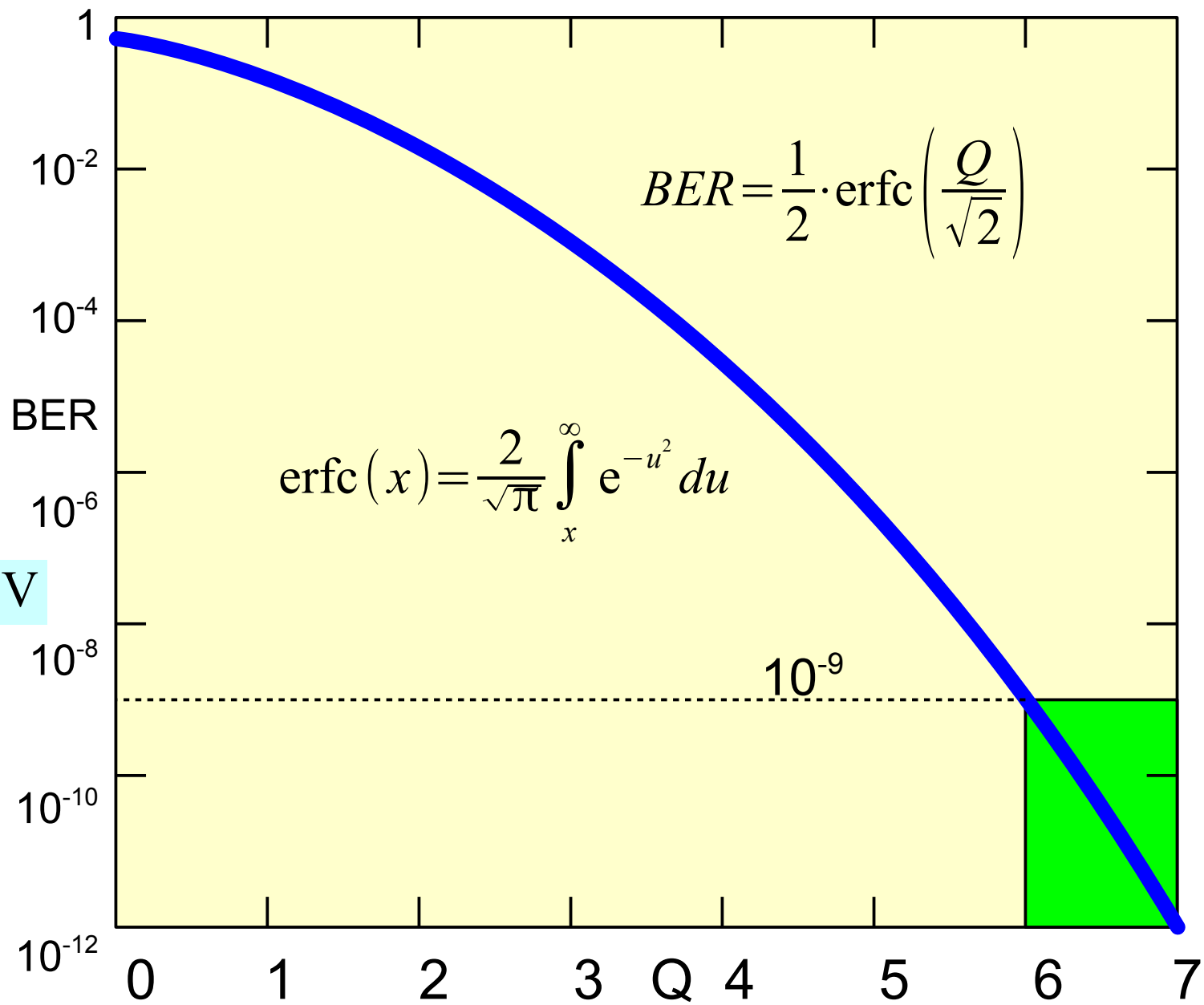
$$U_{ZRNATI} \approx 12 \mu V_{eff}$$

$$\eta \approx 0.7$$

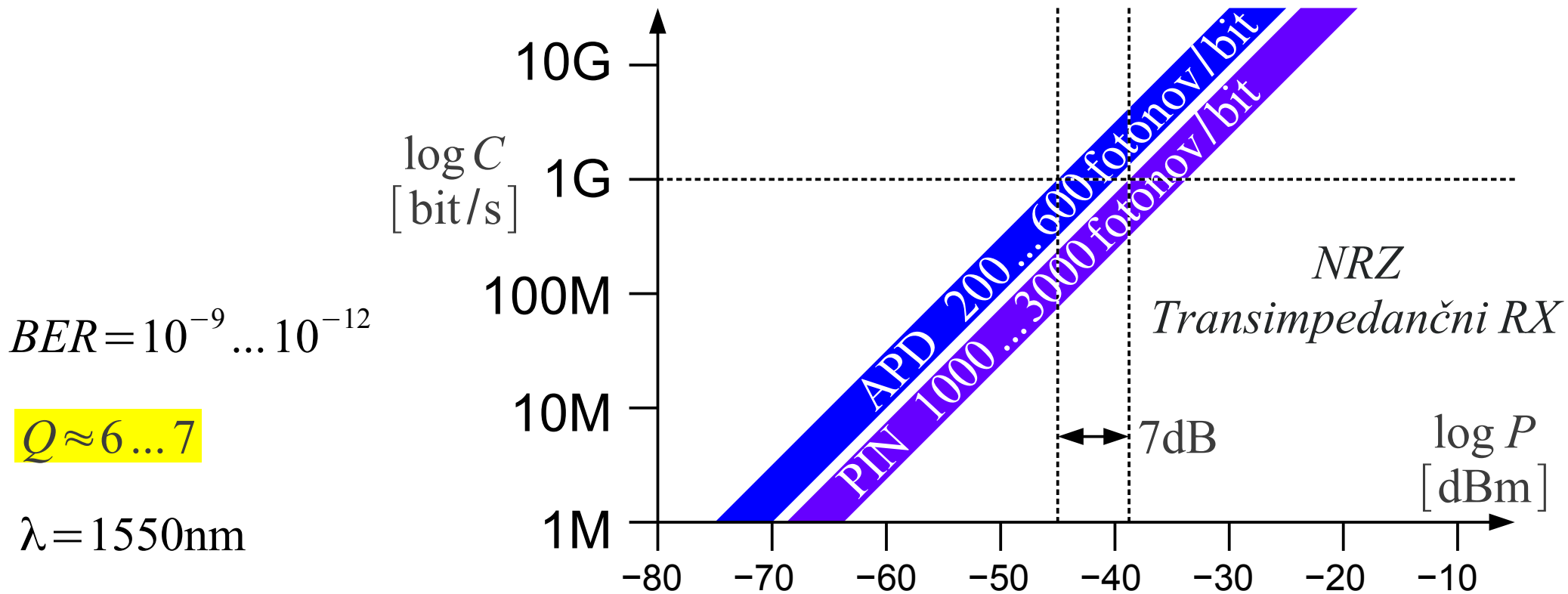
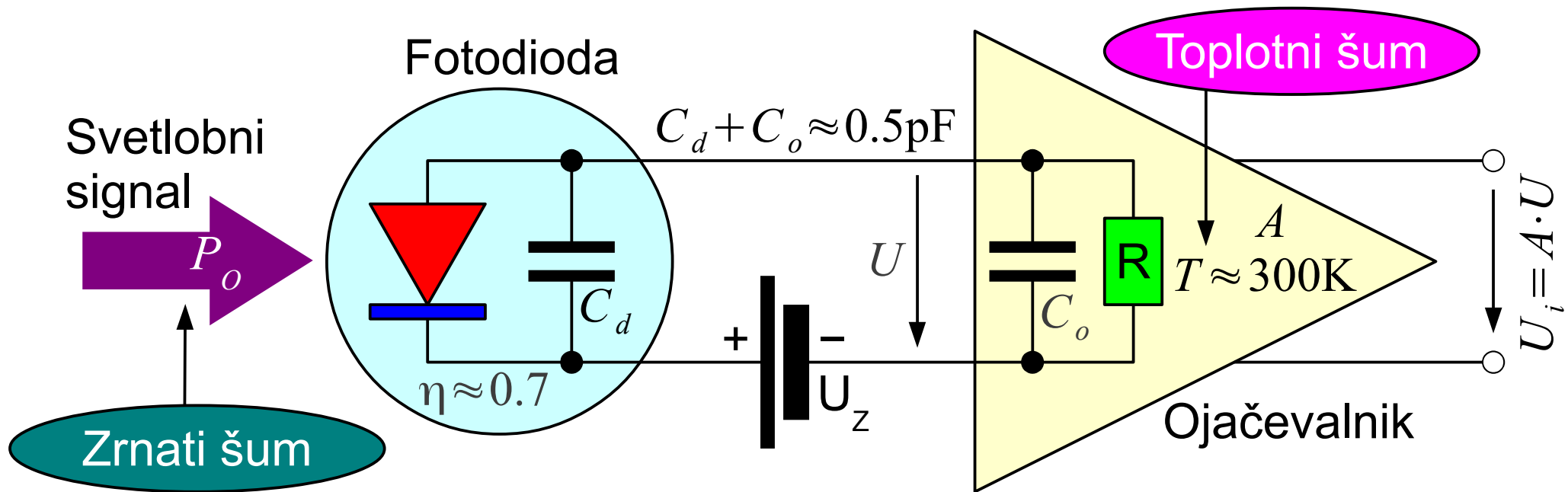
$$\textit{enica} \rightarrow N_f = \frac{N_e}{\eta} \approx 2000$$

50% *enic* \rightarrow

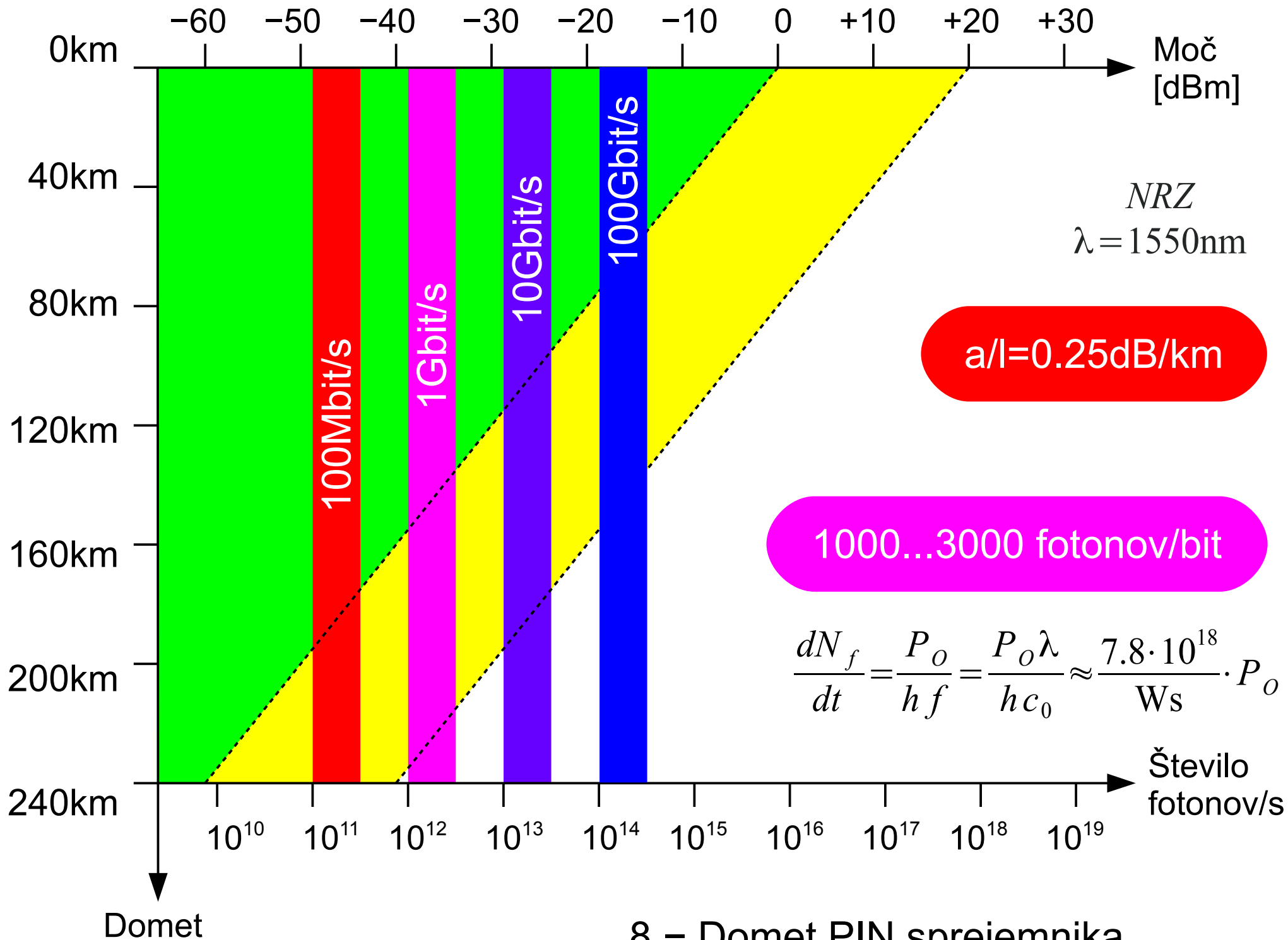
$N_f / \text{bit} \approx 1000$ fotonov/bit



6 – Razmerje Q in pogostnost napak

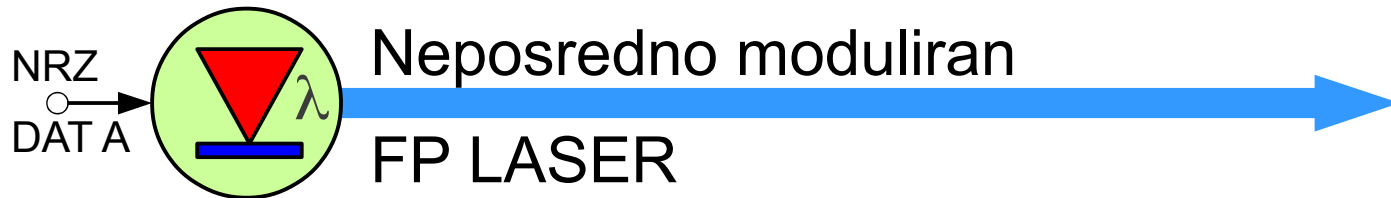


7 – Občutljivost PIN / APD sprejemnika

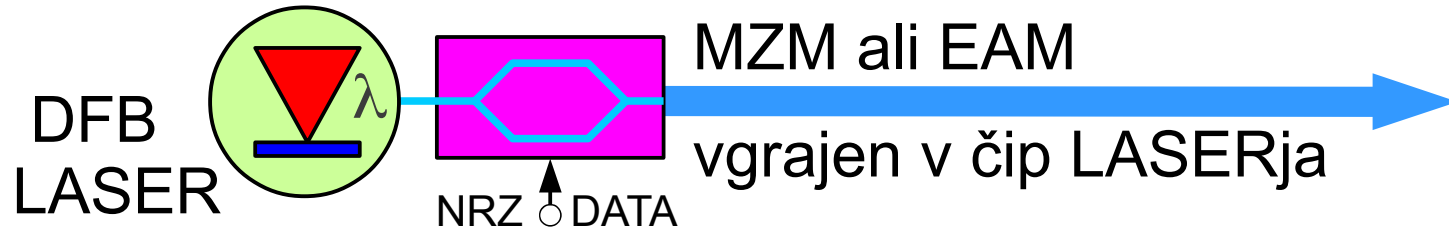


8 – Domet PIN sprejemnika

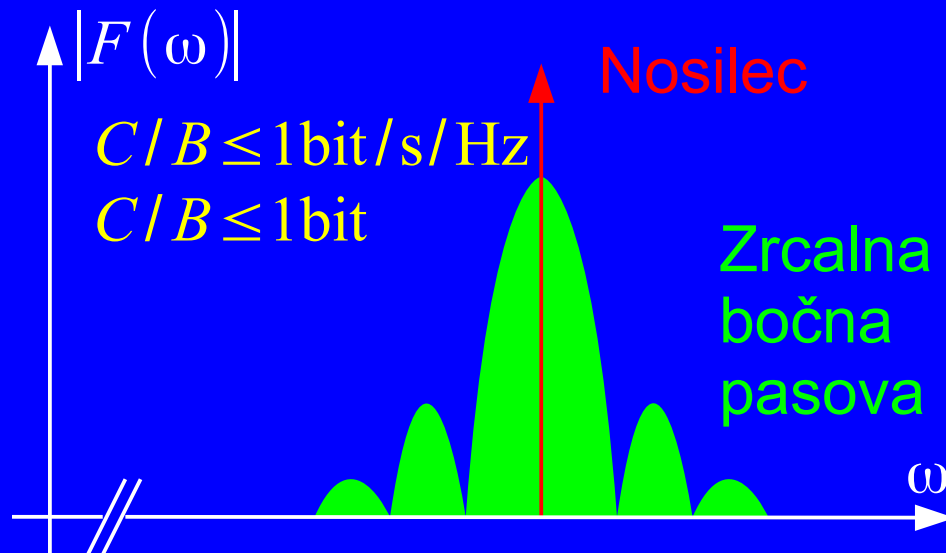
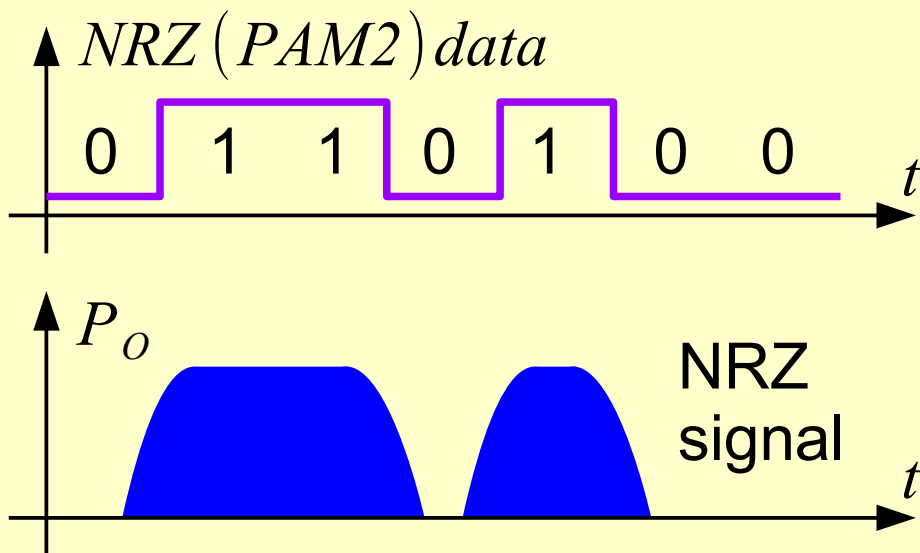
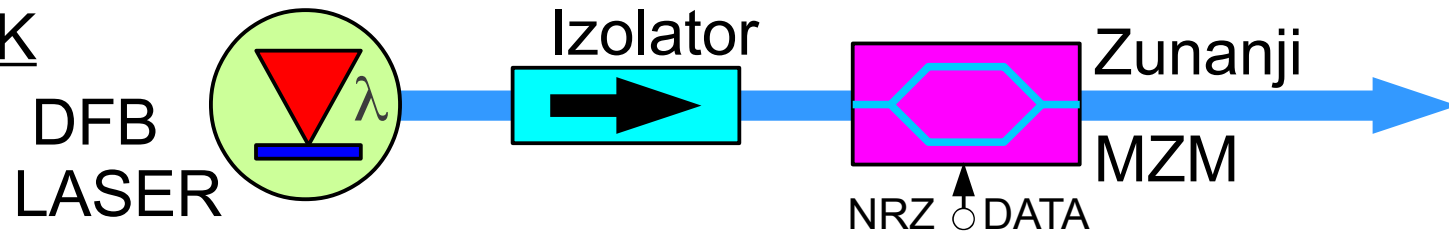
Dostopovni ASK
(spekter nepomemben)



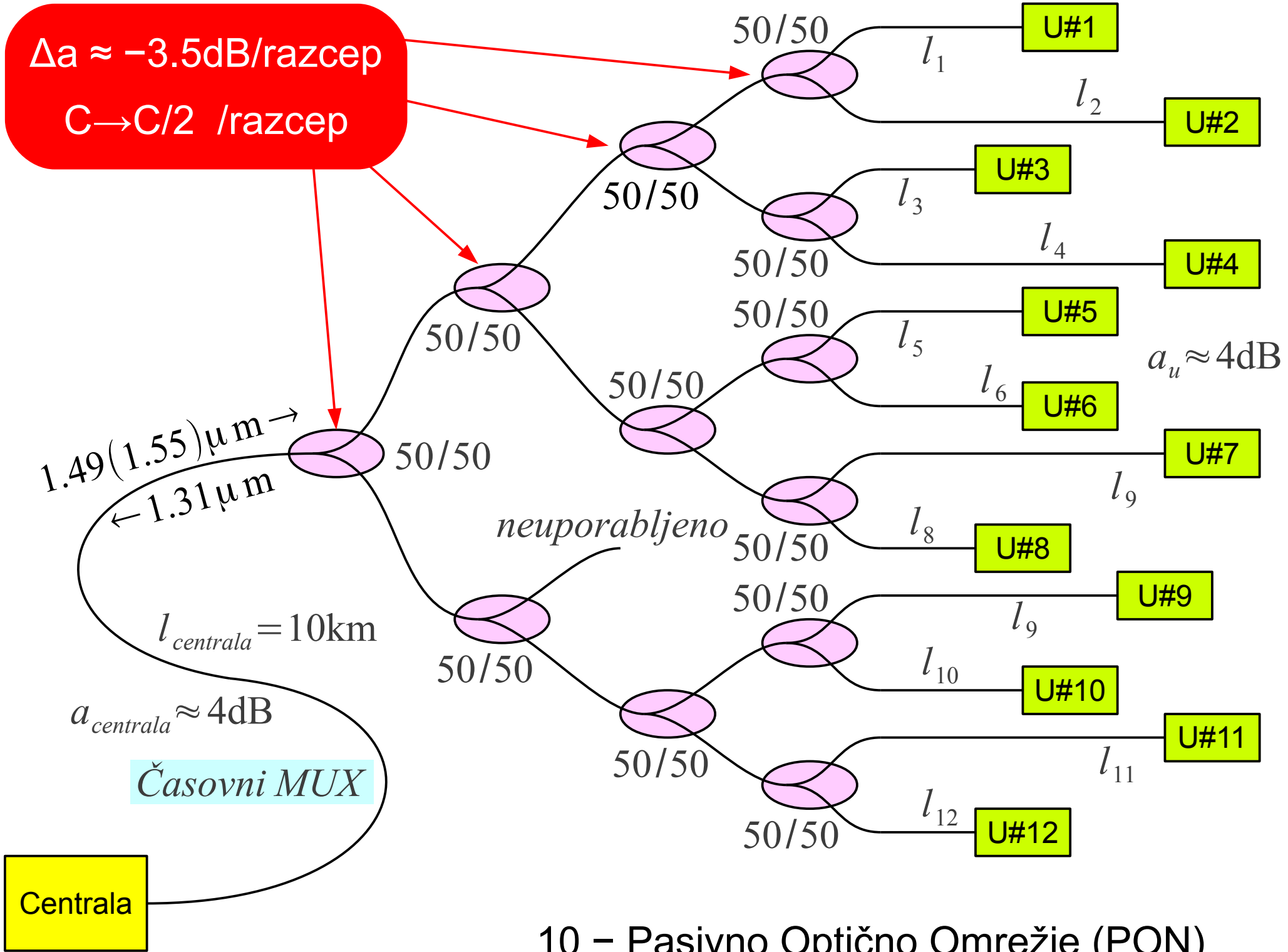
Medkrajevni ASK
(malo FM)



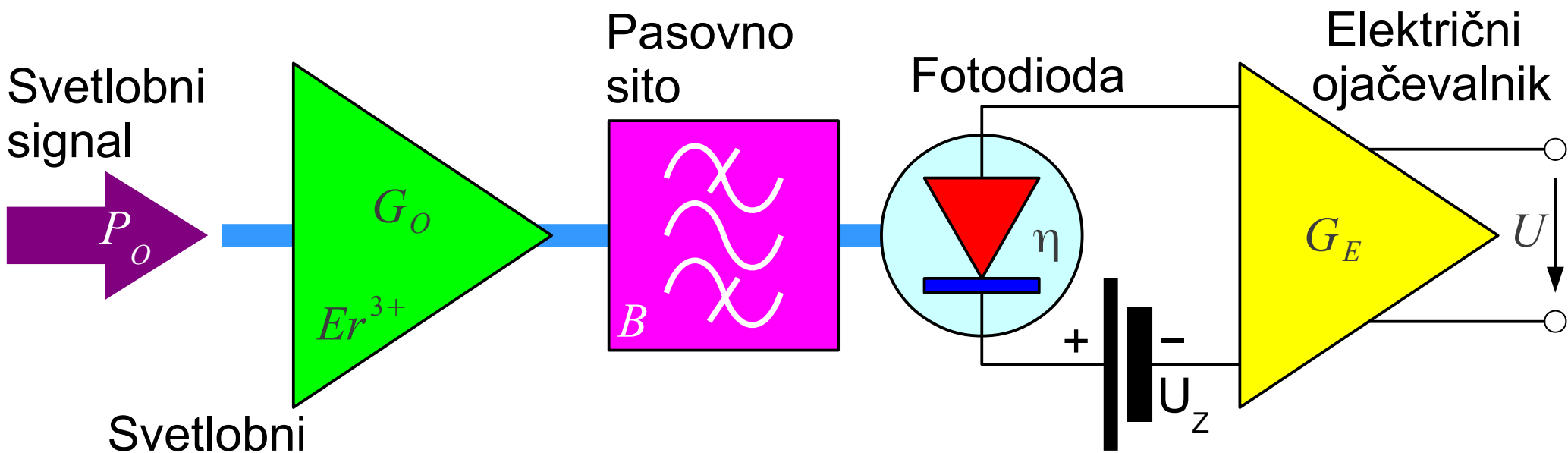
Prekooceanski ASK
(brez FM)



$\Delta a \approx -3.5\text{dB/razcep}$
 $C \rightarrow C/2$ /razcep



10 – Pasivno Optično Omrežje (PON)



$$U = \alpha \left| \vec{E}_{\text{šum}} + \vec{E}_{\text{signal}} \right|^2 = \alpha \left(\left| \vec{E}_{\text{šum}} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left[\vec{E}_{\text{šum}} \cdot \vec{E}_{\text{signal}}^* \right] + \left| \vec{E}_{\text{signal}} \right|^2 \right)$$

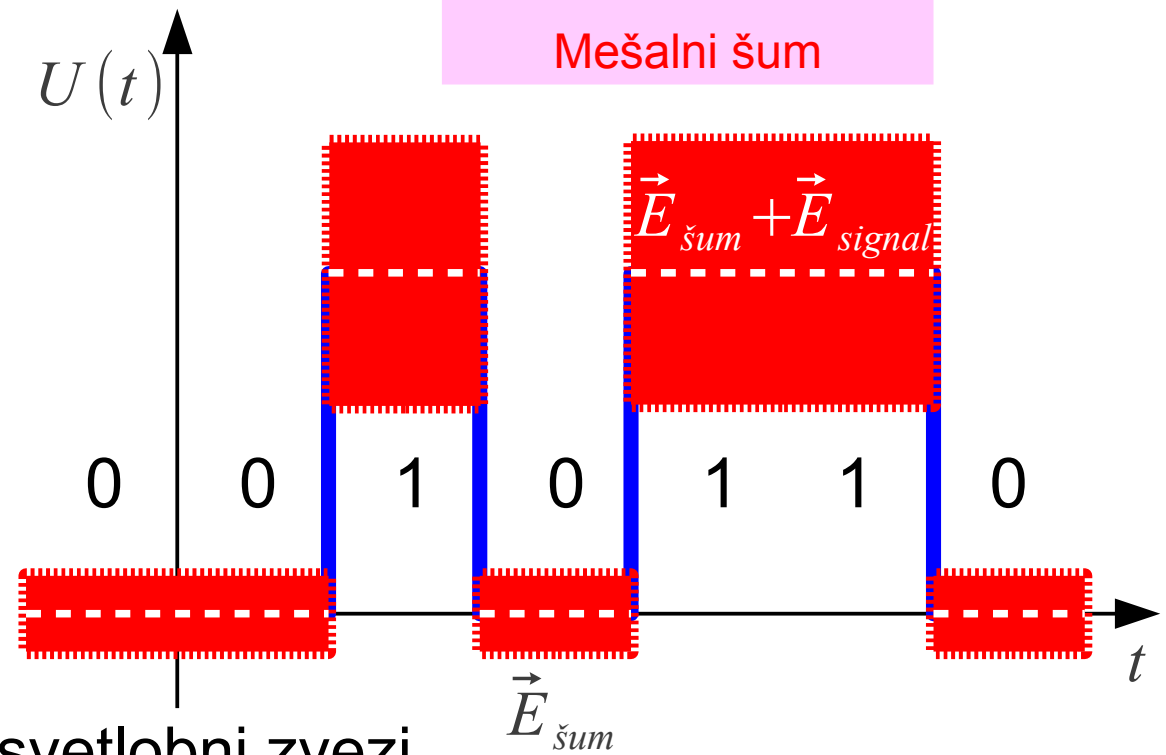
ASE šum ojačevalnika enrod, ena polarizacija

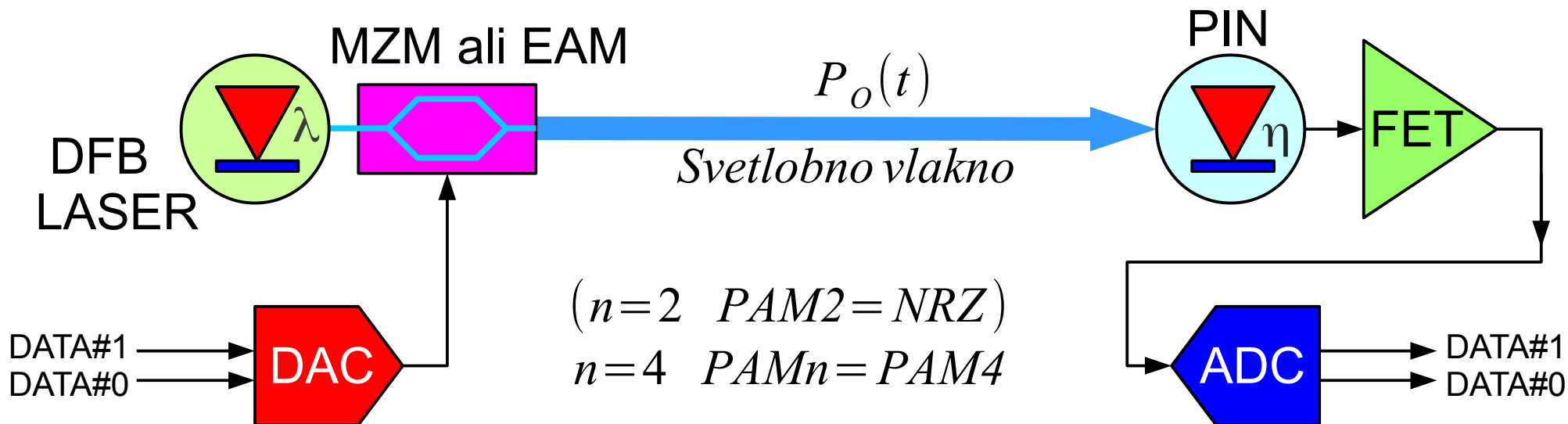
$$P_{ASE} = \mu \cdot (G_o - 1) \cdot h \cdot f \cdot B$$

Faktor inverzne naseljenosti

$$\mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \geq 1$$

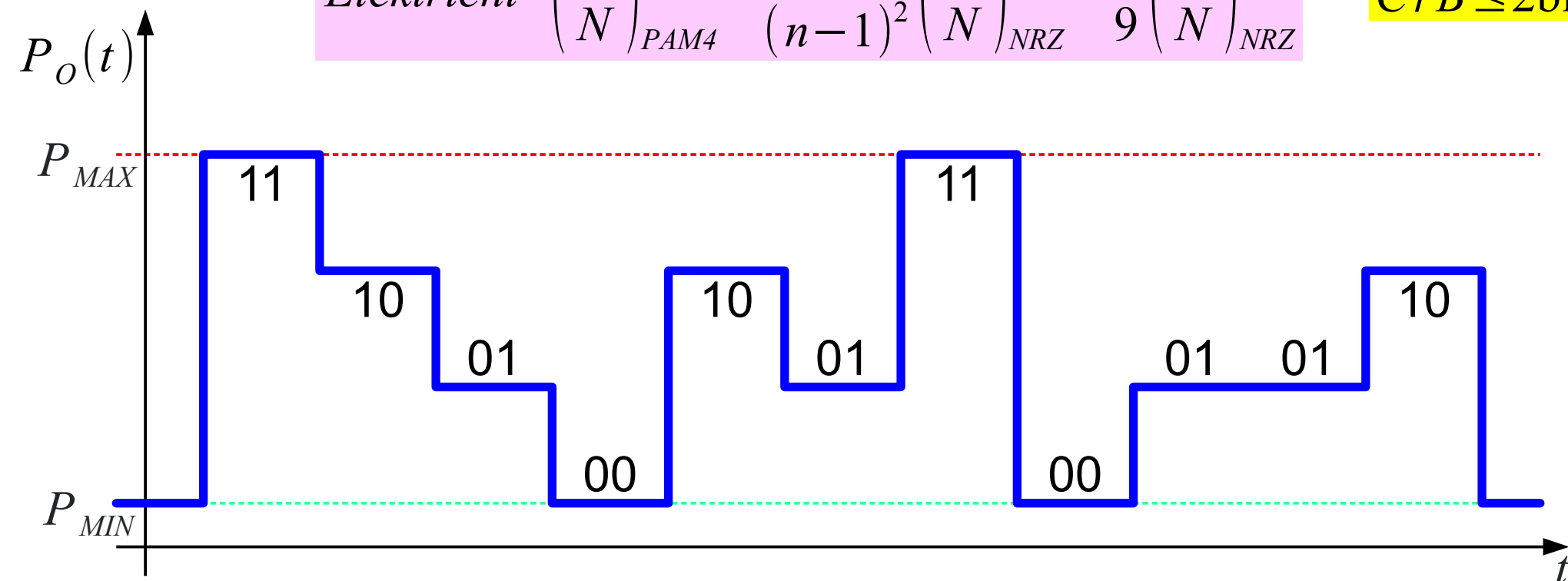
<100 fotonov/bit



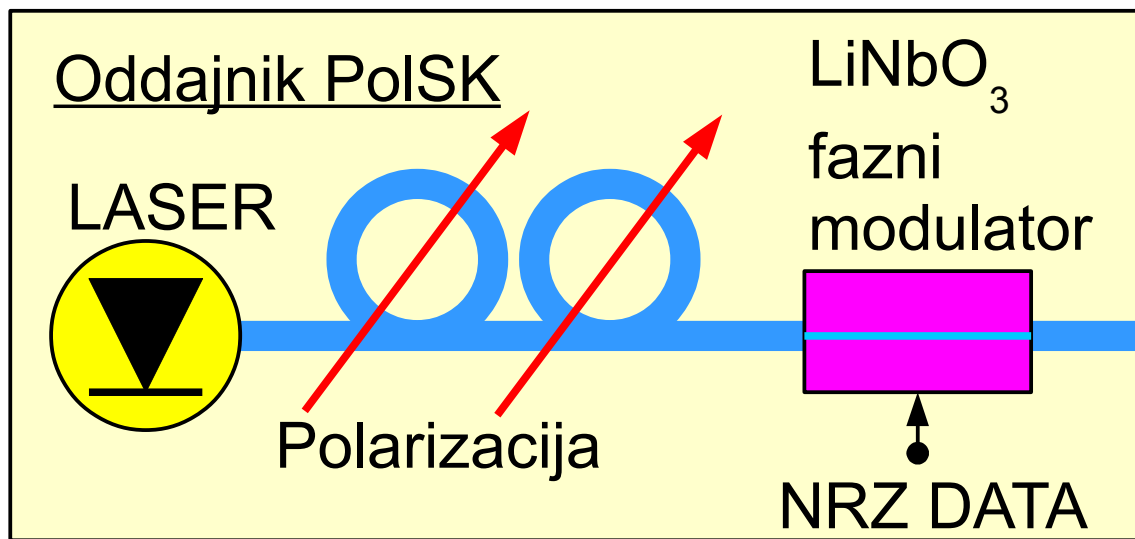


Električni $\left(\frac{S}{N}\right)_{PAM4} = \frac{1}{(n-1)^2} \left(\frac{S}{N}\right)_{NRZ} = \frac{1}{9} \left(\frac{S}{N}\right)_{NRZ}$

$C/B \leq 2\text{bit}$



12 – Večnivojska modulacija PAM4 (Pulse-Amplitude Modulation)

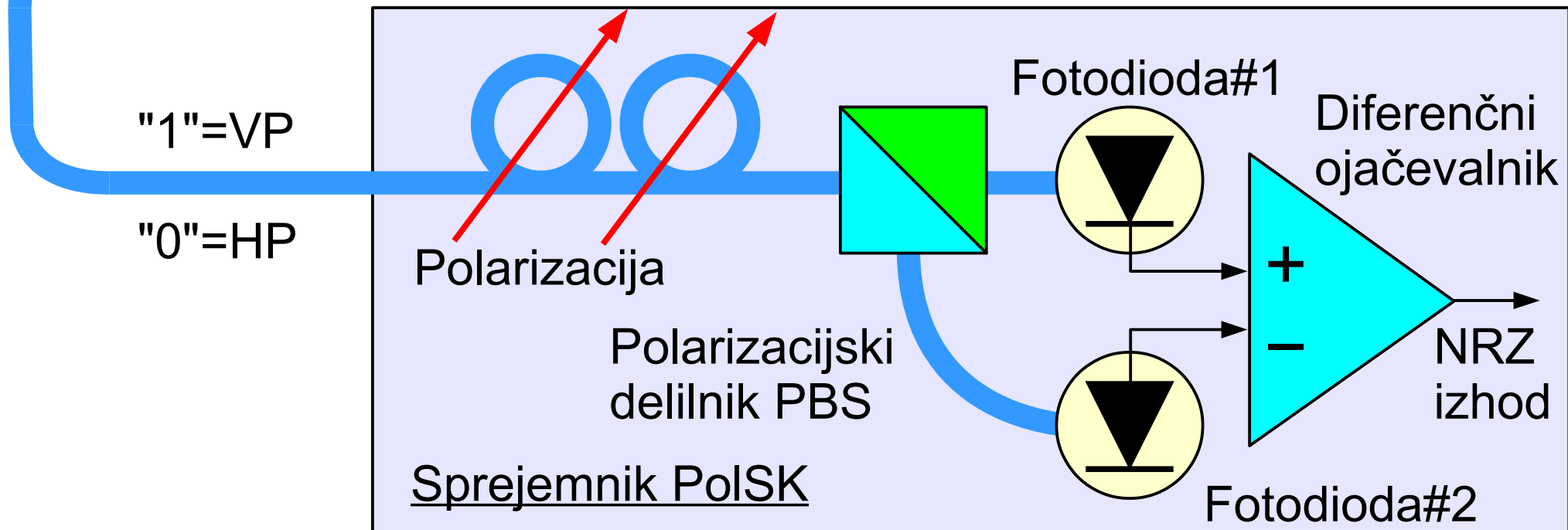


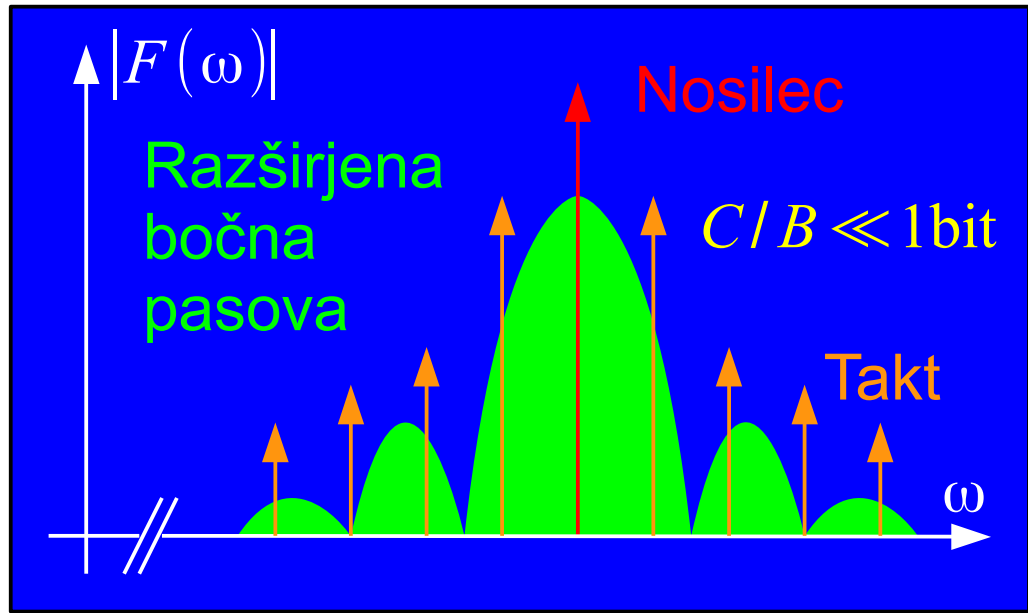
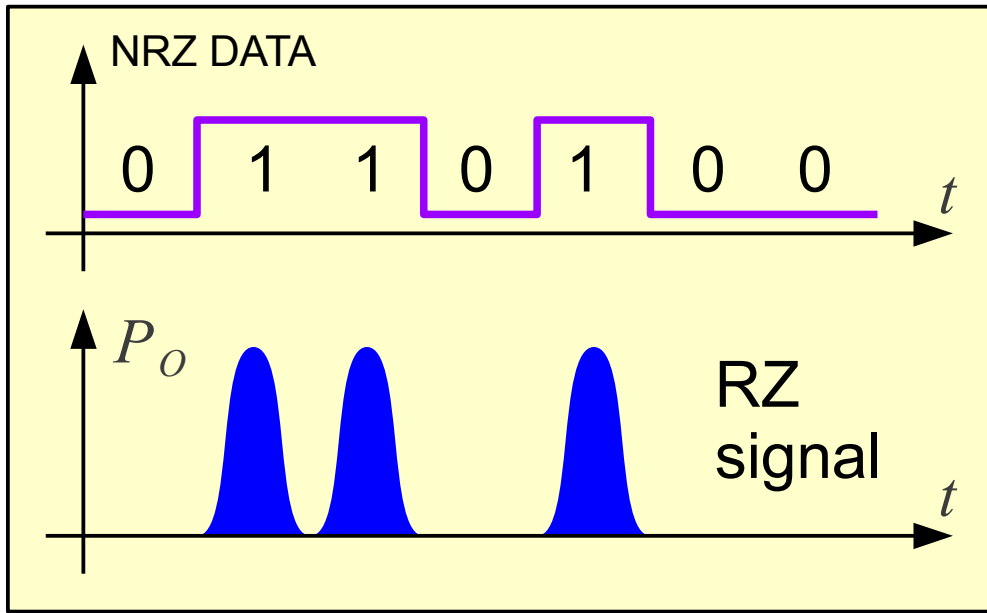
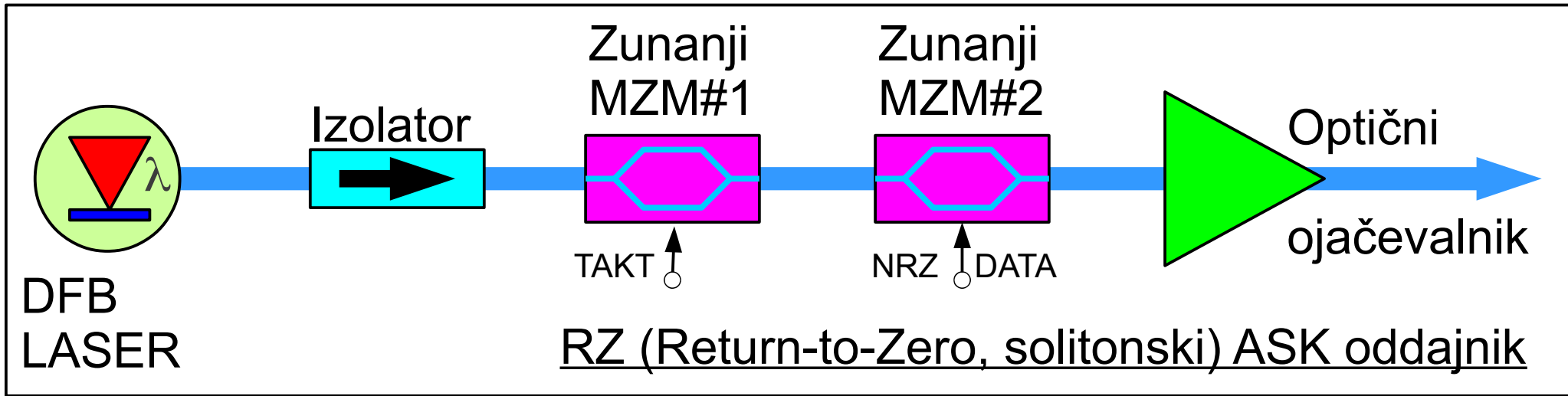
Lastnosti PoISK:

- (1) učinkovitost BPSK
- (2) preprost TX
- (3) nekoherenten RX
- (4) odporna na določene pojave prenosne poti

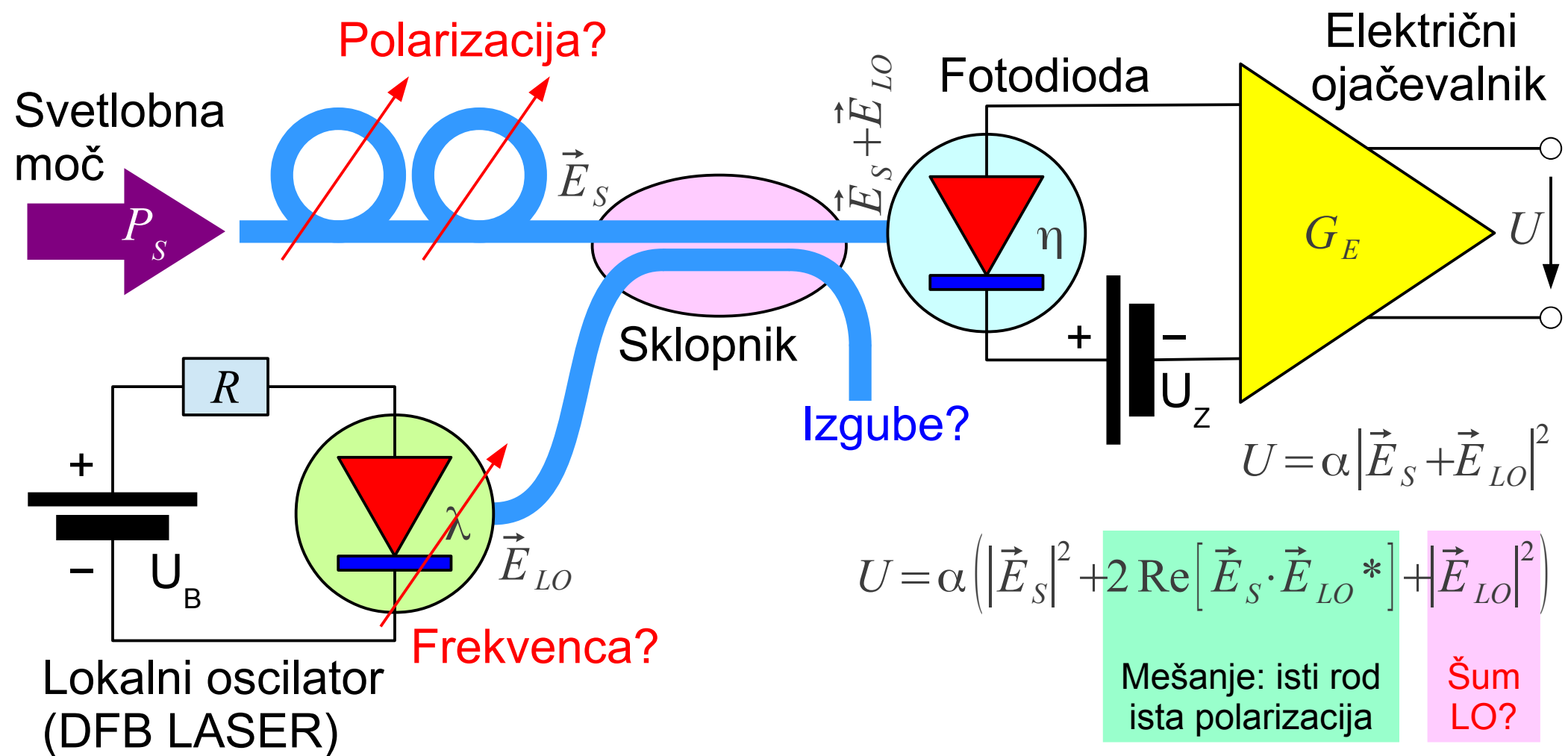
Prenosna pot:

ojačevani WDM kanal





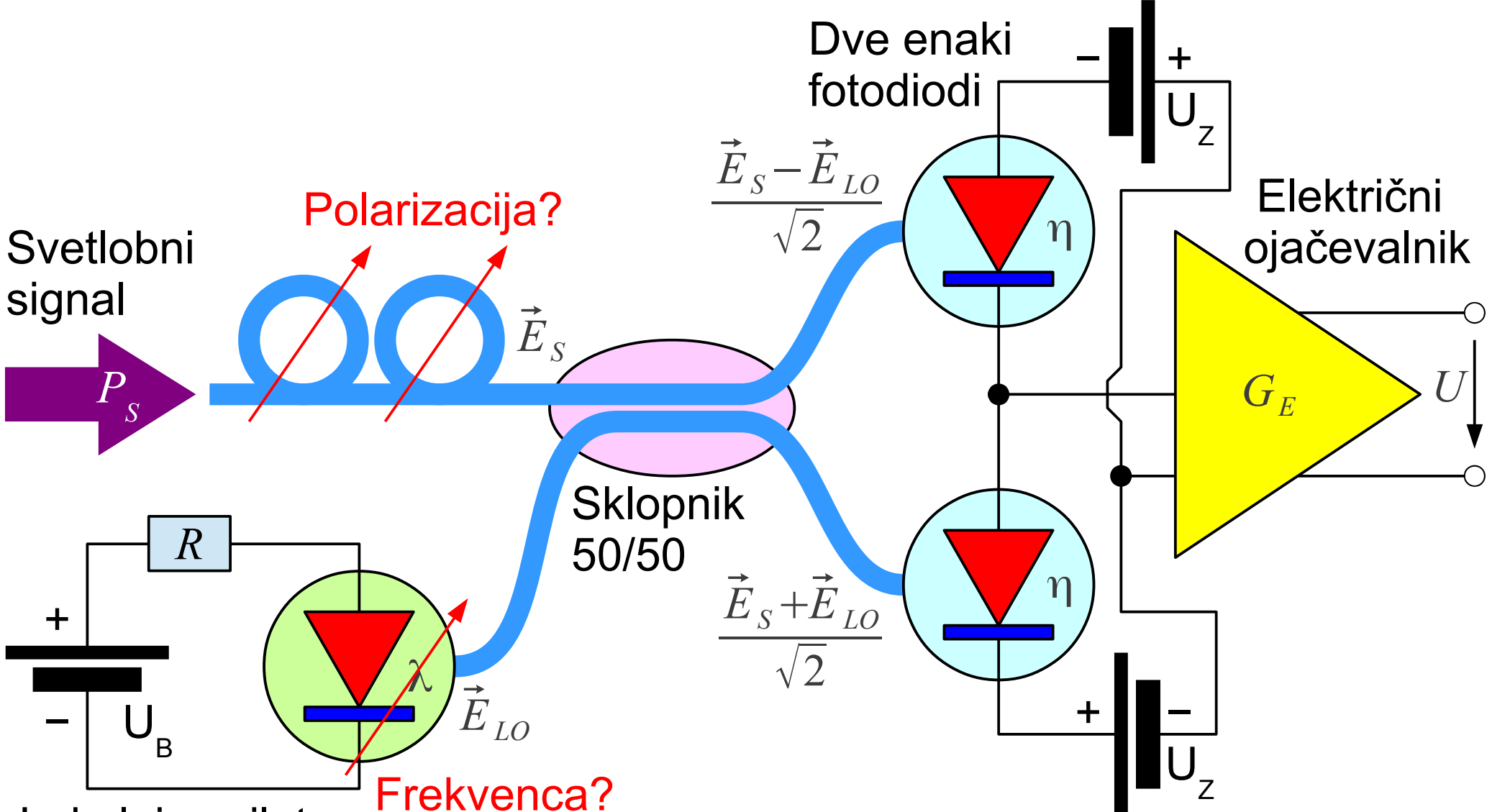
Namen: kompenzacija linearnih in nelinearnih popačenj pri najzahtevnejših visokozmogljivih zvezah.
 Velika vlaganja v razvoj, danes brez praktične uporabe!



Dobitek mešanja $\frac{U_{koherentni}}{U_{nekoherentni}} \leq \frac{2|\vec{E}_{LO}|}{|\vec{E}_S|} = 2\sqrt{\frac{P_{LO}}{P_S}}$

- (1) Občutljivost!
- (2) Selektivnost!
- (3) Modulacije!

Amplitudni šum LO?
 Točna frekvenca LO?
 Skladnost polarizacije?

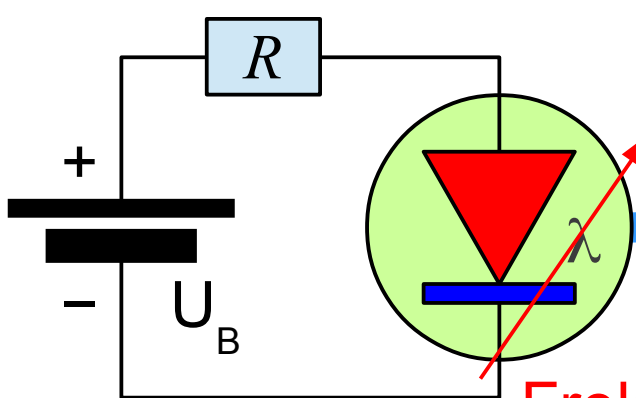


Svetlobni signal

Polarizacija?

Dve enaki fotodiodi

Električni ojačevalnik



Lokalni oscilator (DFB LASER)

Frekvenca?

Sklopnik 50/50

$$U = \frac{\alpha}{2} \left[\left| \vec{E}_S + \vec{E}_{LO} \right|^2 - \left| \vec{E}_S - \vec{E}_{LO} \right|^2 \right]$$

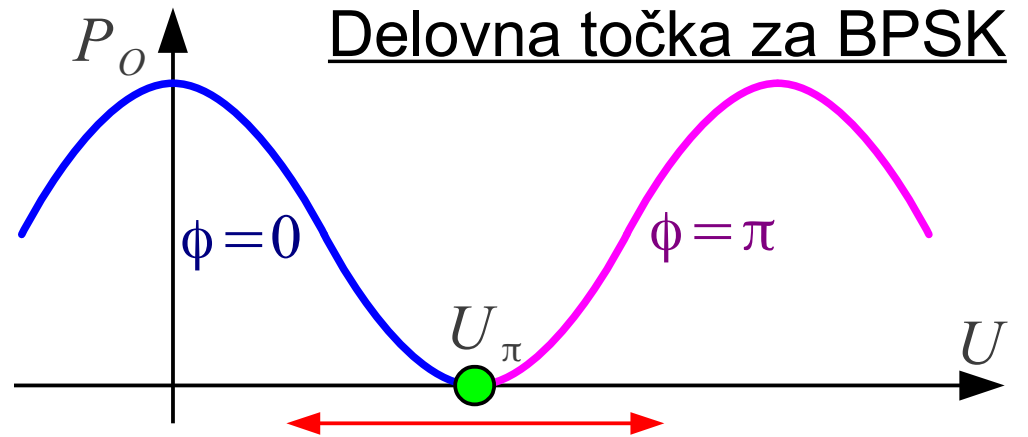
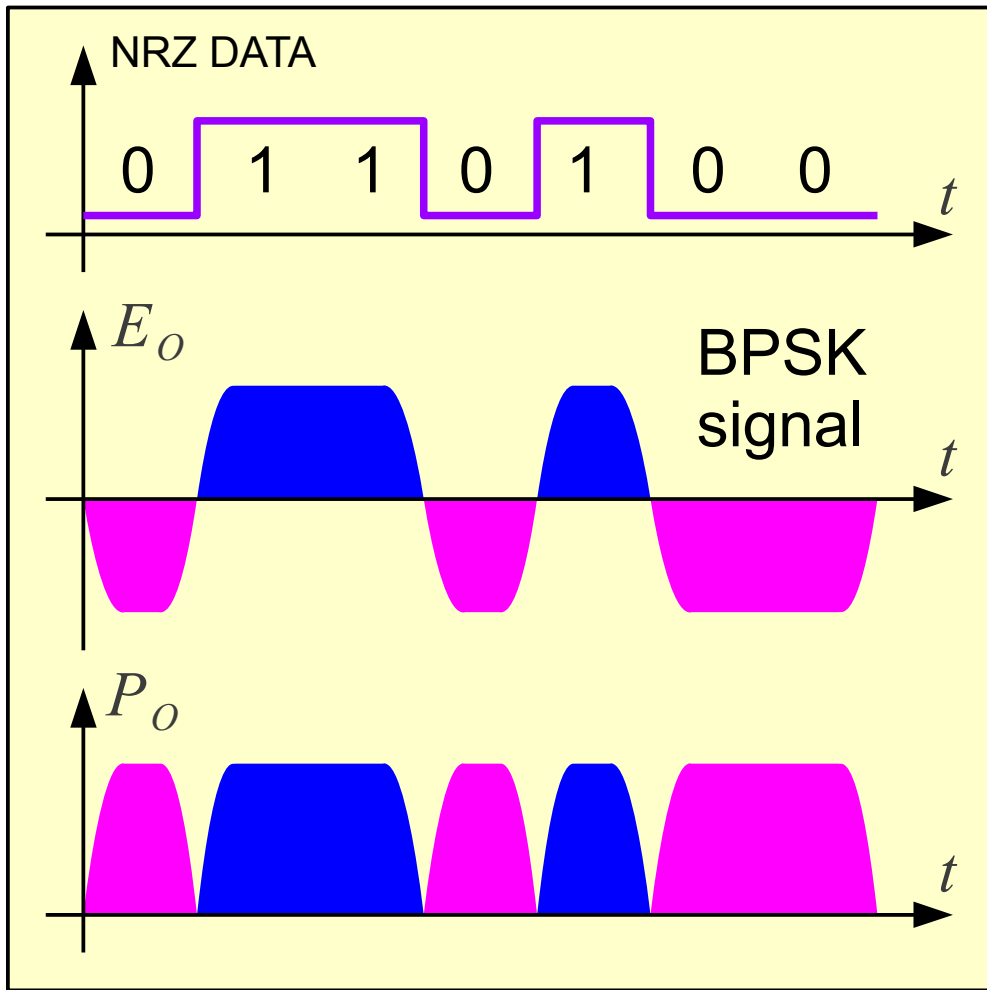
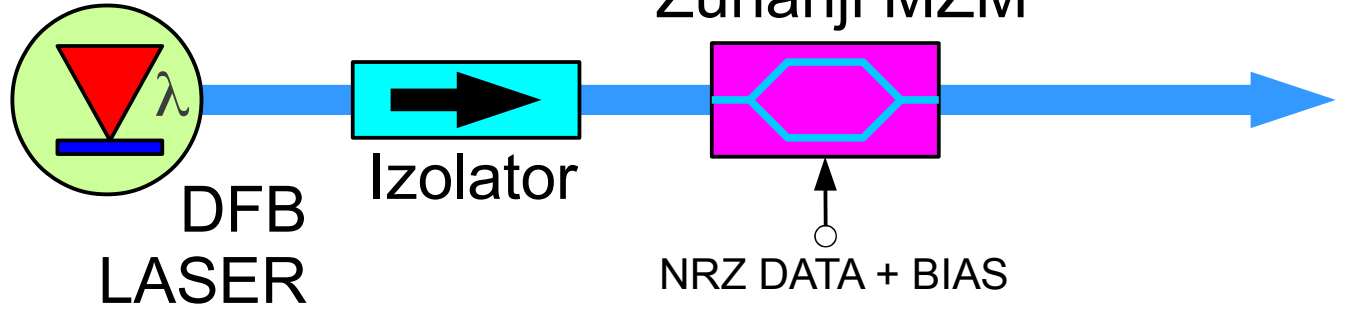
BPSK < 30 fotonov/bit

$$U = \alpha \cdot 2 \operatorname{Re} \left[\vec{E}_S \cdot \vec{E}_{LO}^* \right]$$

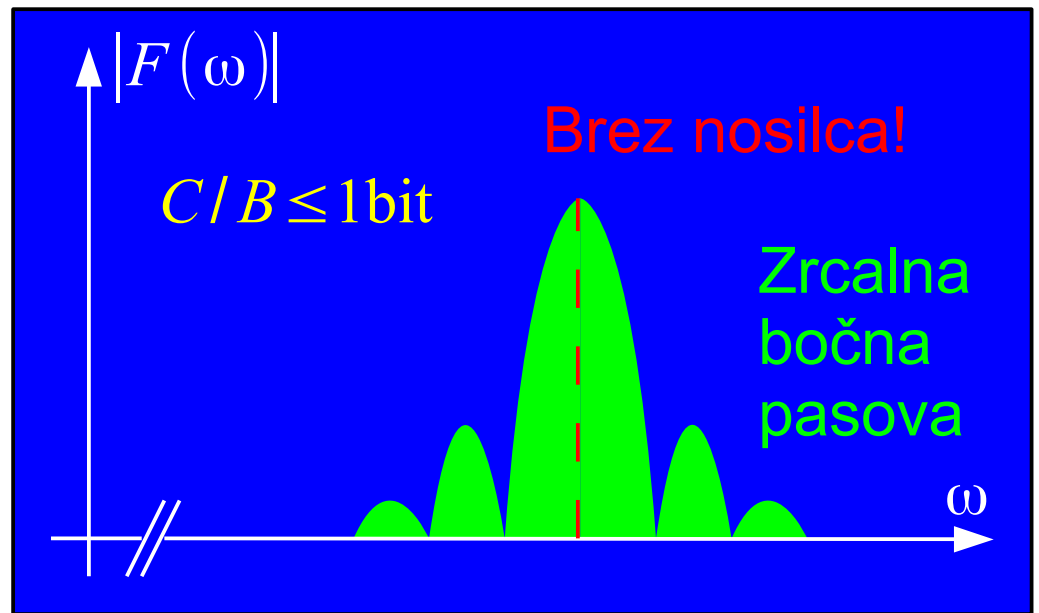
Odštevanje šuma LO!

Simetrični BPSK (Bi-Phase Shift Keying) (AM brez nosilca)

Strogo brez FM !!!
 $\Delta f_{\text{vira}} \ll B_{\text{modulacije}}$

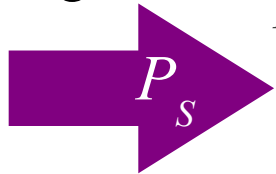


Delovna točka za BPSK



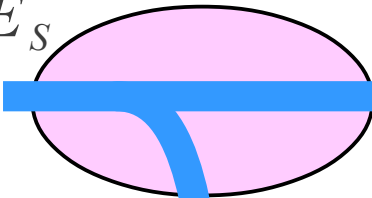
Neodvisen od polarizacije!

BPSK svetlobni signal



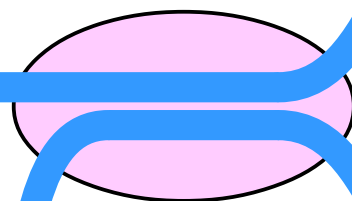
E_s

Delilnik 50/50



$\frac{E_s}{\sqrt{2}}$

Sklopnik 50/50



$\frac{E_{s\tau}}{\sqrt{2}}$

Kasnilni vod

$\tau = T_{bit}$

Planarno optično vezje + termostat!

$\Delta l = m \frac{\lambda}{2}$

Dodatni pogoj:

$$\omega \tau = m \pi$$

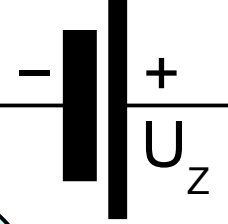
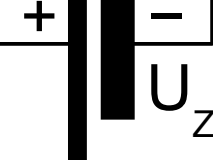
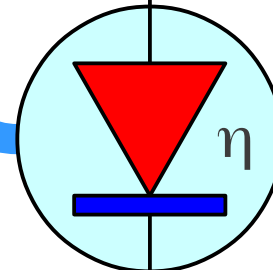
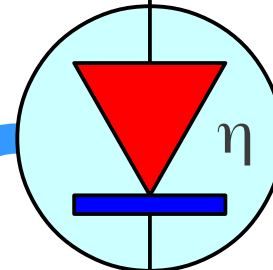
$m = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \dots$

$S/N - 3dB!!!$

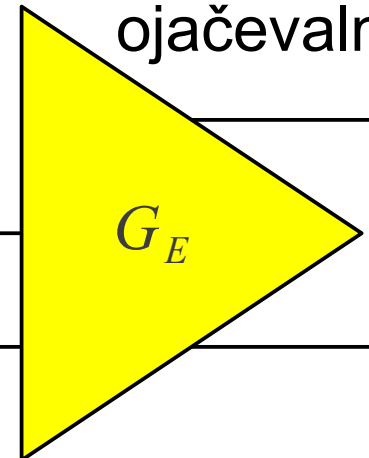
$$C = 1/T_{bit}$$

$\Delta f < \frac{C}{10} = 4GHz$ @ $C = 40Gbit/s$

Dve enaki fotodiodi

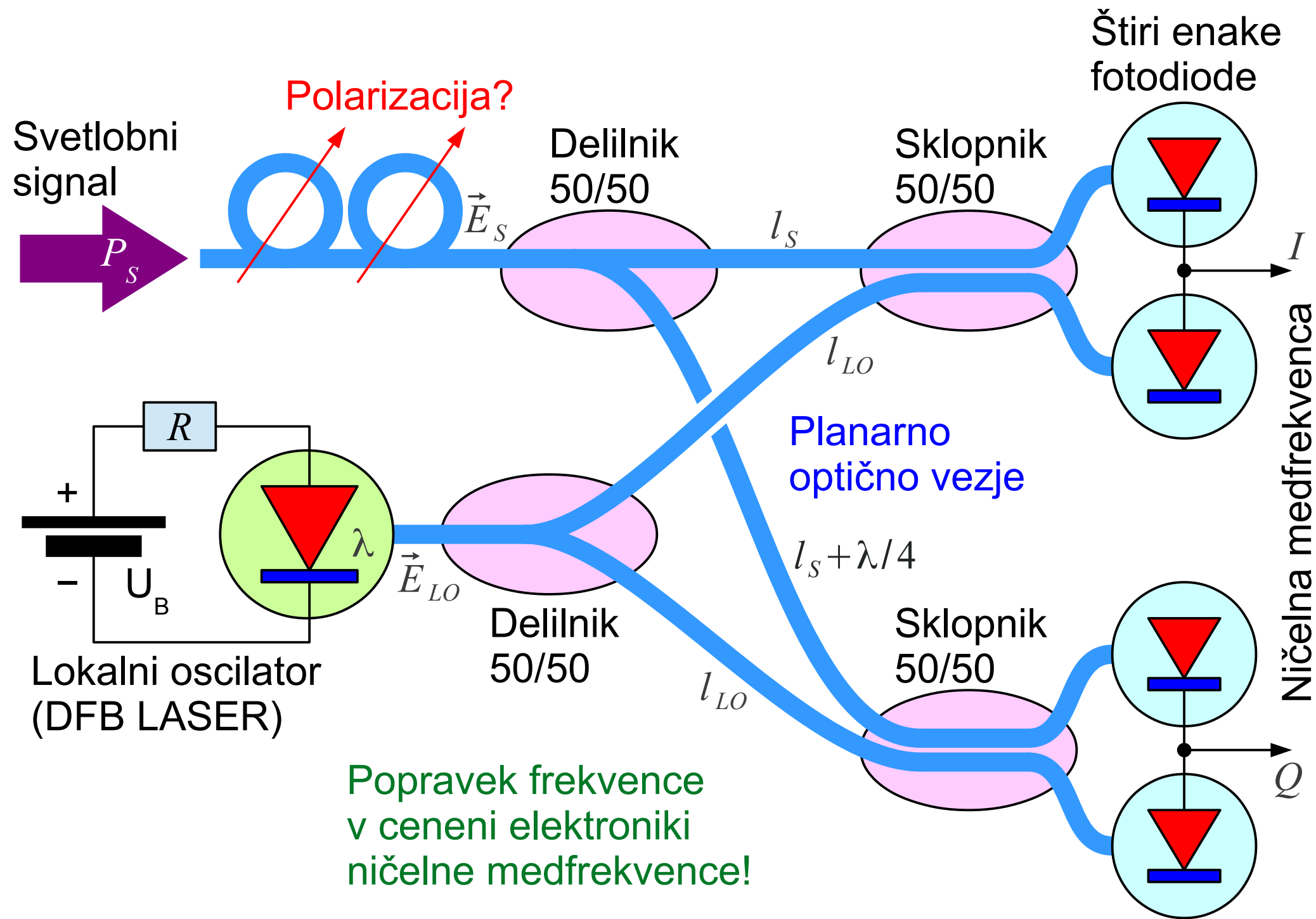


Električni ojačevalnik

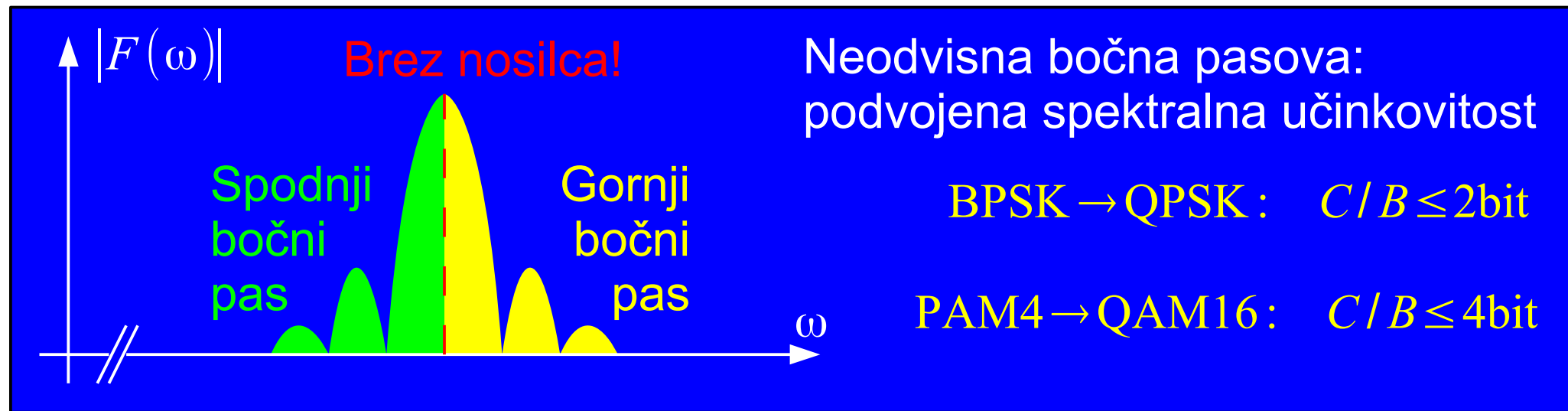
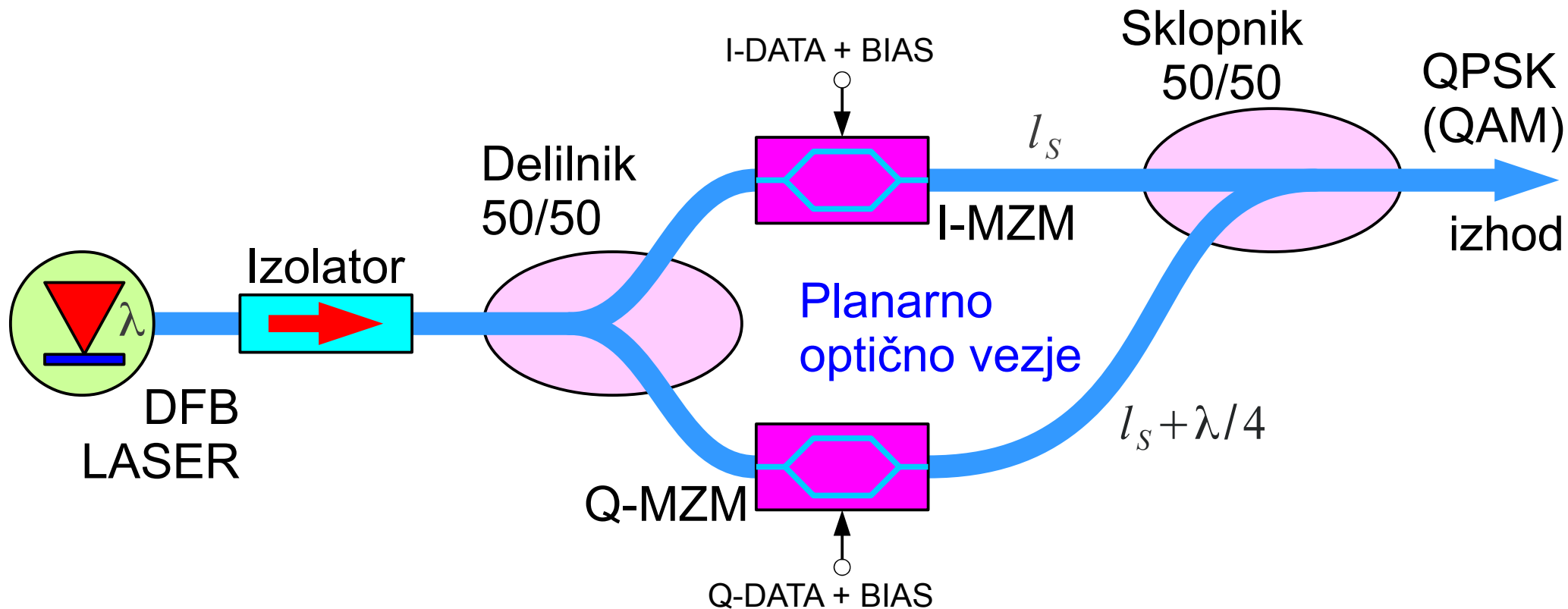


$$U = \frac{\alpha}{4} \left[\left| \vec{E}_s + \vec{E}_{s\tau} \right|^2 - \left| \vec{E}_s - \vec{E}_{s\tau} \right|^2 \right]$$

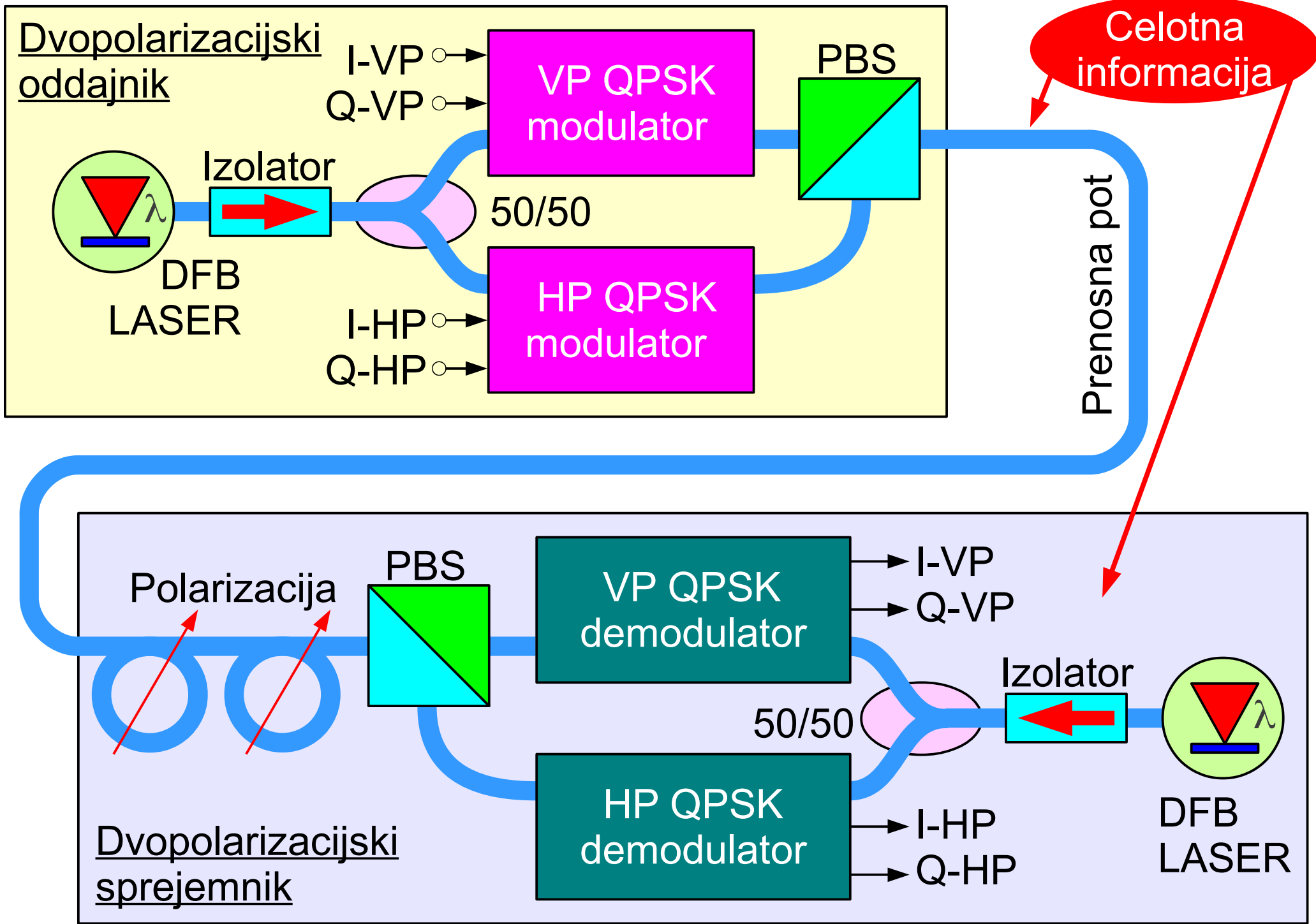
$U = \alpha \cdot \text{Re} \left[\vec{E}_s \cdot \vec{E}_{s\tau}^* \right]$



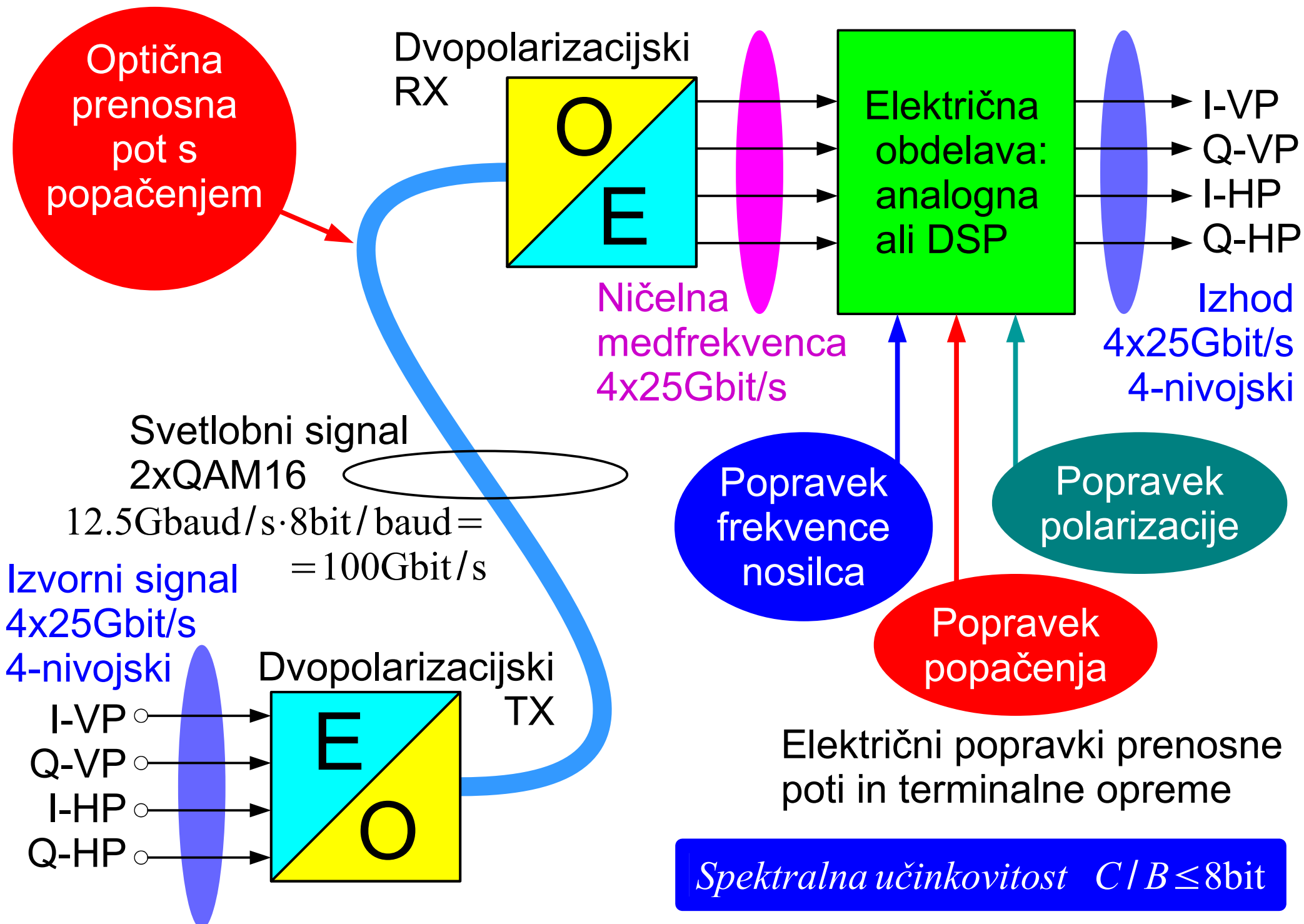
19 – Kvadraturni (QPSK/QAM) svetlobni sprejemnik



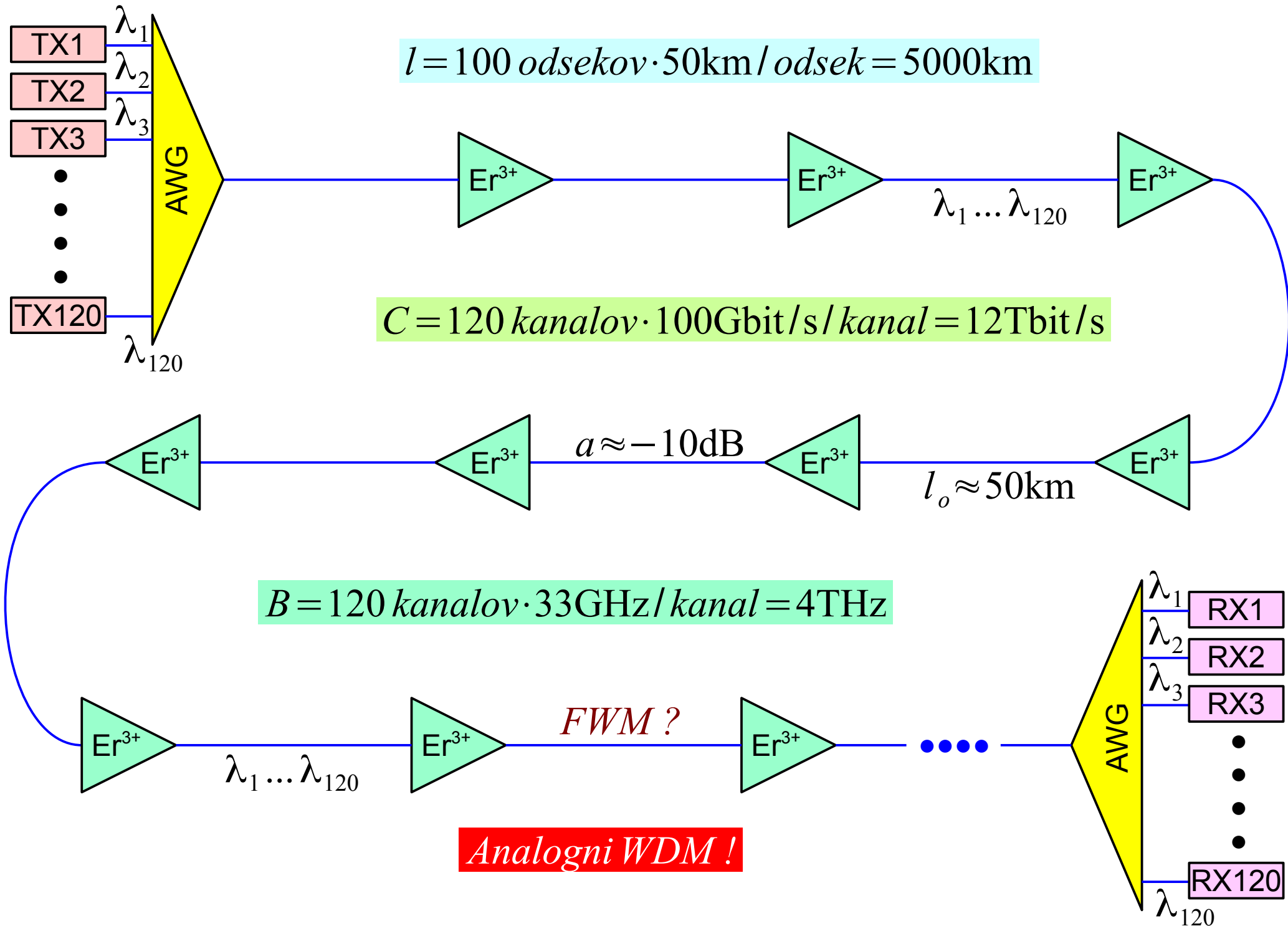
20 – Štirifazna modulacija QPSK (Quadri-Phase Shift Keying) ali QAM (Quadrature Amplitude Modulation)



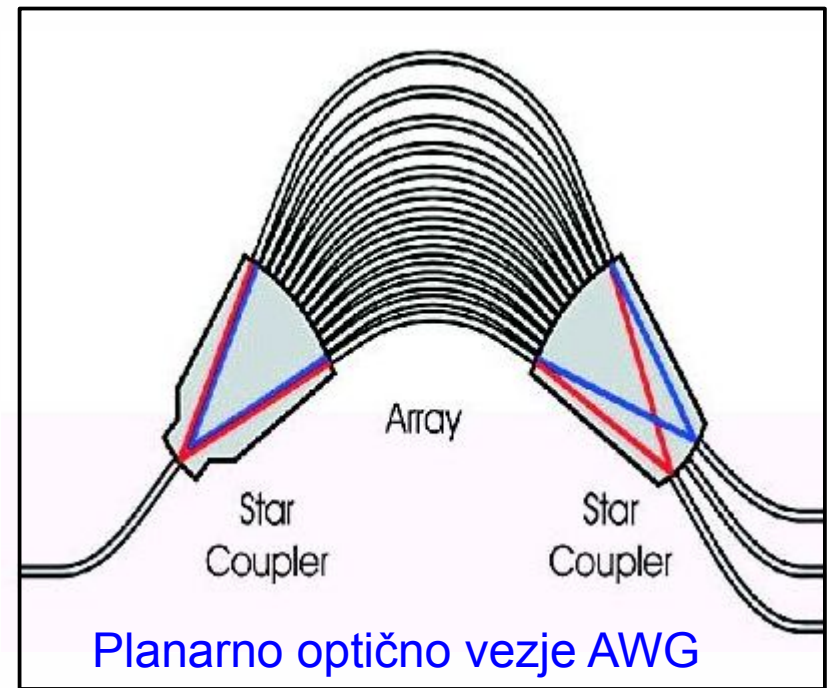
21 – QPSK (QAM) polarizacijski multipleks (MIMO 2x2)



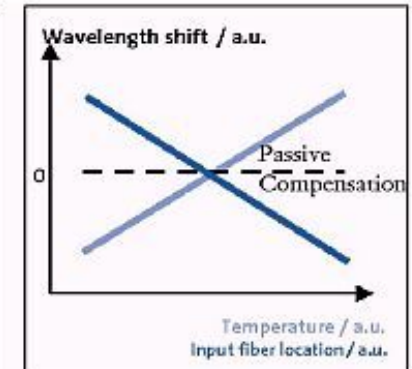
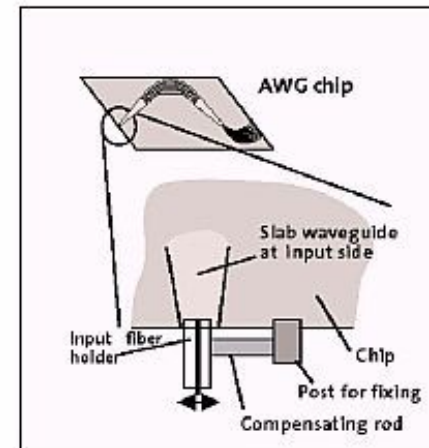
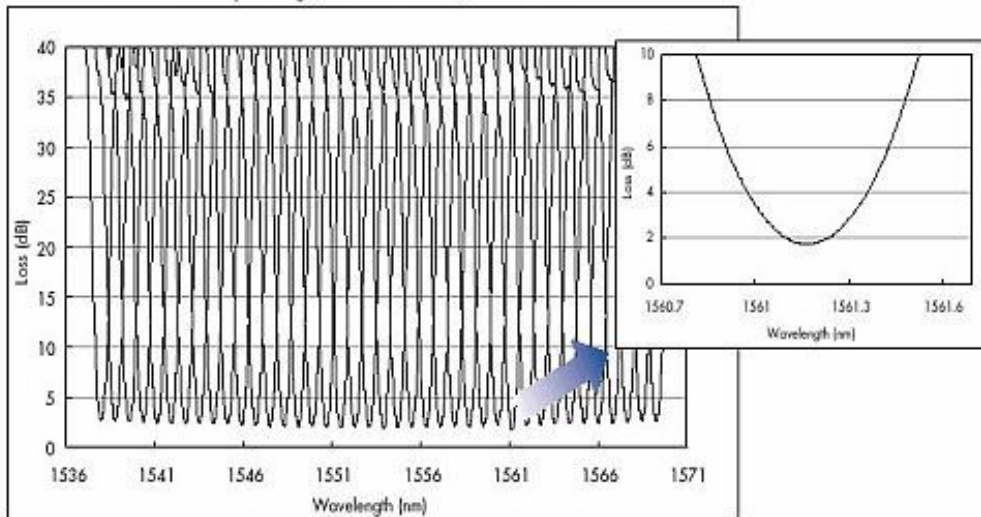
22 – Ničelna medfrekvenca (ZIF) za 100Gbit/s 2xQAM16 (MIMO 2x2)



23 – Preoceanski kabel 120 kanalov po 100Gbit/s 2xQAM16



100 GHz Spacing, 40 channels, Gaussian



24 – Kretnice z valovodno razvrstitevno strukturo AWG (Arrayed Waveguide Grating)

Hitri vtični moduli za Ethernet – najpogostejše tehnične rešitve:

Najpogostejša modulacija PAM4 na optični ravni (vlakno) in električni ravni (twinax), starejši uporabljajo NRZ (PAM2) za nižje hitrosti

Linijska koda 256b/257b in RS-FEC (544,514) za PAM4

Povezave (3m) twinax več vzporednih kablov

Kratke razdalje (100m) do 4 vzporedna mnogorodovna vlakna 50/125 do 3.5GHz.km na 850nm

Srednje razdalje (10km) do 4 kanalni WDM po enorodovnem vlaknu 9/125 v pasu 1300nm

Koherentne modulacije do QAM16 za največje razdalje v pasu 1550nm

Dvosmeren WDM prenos

Veliko število različnih standardov