

16. Seminar Optične Komunikacije  
Laboratorij za Sevanje in Optiko  
Fakulteta za Elektrotehniko  
Ljubljana, 28.-30. januar 2009

Sistemske omejitve v optičnih komunikacijah

Matjaž Vidmar

## Seznam prosojnic:

- Slika 1 - Elektroni in fotoni: valovne dolžine in hitrosti.
- Slika 2 - Zgradba trdne snovi in tuneliranje.
- Slika 3 - Domet brezvrvične in vrvične zveze.
- Slika 4 - Prostozačne svetlobne zveze: Lichtsprechgeraet 80.
- Slika 5 - Toplotni in zrnati šum kot funkcija frekvence.
- Slika 6 - Statistika zrnatega šuma: potrebno število fotonov.
- Slika 7 - Vakuumska in polprevodniška fotodioda.
- Slika 8 - Toplotni šum v preprostem svetlobnem sprejemniku.
- Slika 9 - Zgradba, delovanje in šum fotopomnoževalke.
- Slika 10 - Razmerje signal/šum pri plazovnih fotodiodah.
- Slika 11 - Izvedbe svetlobnih predojačevalnikov.
- Slika 12 - Signal in šum v ojačevani svetlobni zvezi.
- Slika 13 - Koherentni optični sprejemnik: dobitek in težave.
- Slika 14 - Nekoherentna diferencialna demodulacija DPSK.
- Slika 15 - Razmerje signal/šum, Q in pogostnost napak.
- Slika 16 - Zgledi občutljivosti svetlobnih sprejemnikov.
- Slika 17 - Vrste in lastnosti svetlobnih vlaken.
- Slika 18 - Slabljenje vlaken in telekomunikacijska okna.
- Slika 19 - Mogorodovna, barvna in polarizacijska razpršitev.
- Slika 20 - Nelinearnosti: nelinearni n, Brillouin in Raman.
- Slika 21 - Primerjava omejitev svetlobnih vlaken.
- Slika 22 - Posledice popačenja prenosne poti.
- Slika 23 - Izvori svetlobe: žarnice, tlivke, LED in laserji.
- Slika 24 - Sklopni izkoristek izvora in detektorja.
- Slika 25 - Spekter svetlobnega izvora in spekter modulacije.
- Slika 26 - Komunikacijski laserji: FP, DFB in VCSEL.
- Slika 27 - Neposredna modulacija laserja: AM in FM.
- Slika 28 - Zunanji modulatorji svetlobe: fazni, MZM in EAM.
- Slika 29 - Združevanje oddajnikov: kretnice in WDM.
- Slika 30 - Regeneracija signala v svetlobni zvezi.
- Slika 31 - Vnaprejšnje popraviljanje napak (FEC).
- Slika 32 - Različice optičnega 100Gb/s Ethernet-a.
- Slika 33 - Pasivno svetlobno omrežje (PON).
- Slika 34 - Načrtovalska izbira: optika ali elektronika?

DELEC	<i>frekvenca</i>	$\lambda$	$W [J]$	$W [eV]$	$v$
elektron	$1.2 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$	$2.4 \text{ pm}$	$8.2 \cdot 10^{-14} \text{ J}$	$511 \text{ keV}$	$km/s$
foton svetlobe	$600 \text{ THz}$	$500 \text{ nm}$	$4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	$2.5 \text{ eV}$	$c_o$
radijski foton	$900 \text{ MHz}$	$33 \text{ cm}$	$6 \cdot 10^{-25} \text{ J}$	$3.7 \mu eV$	$c_o$
energetski foton	$50 \text{ Hz}$	$6000 \text{ km}$	$3.3 \cdot 10^{-32} \text{ J}$	$2 \cdot 10^{-13} \text{ eV}$	$c_o$

$$W = m \cdot c_o^2 = h \cdot f$$

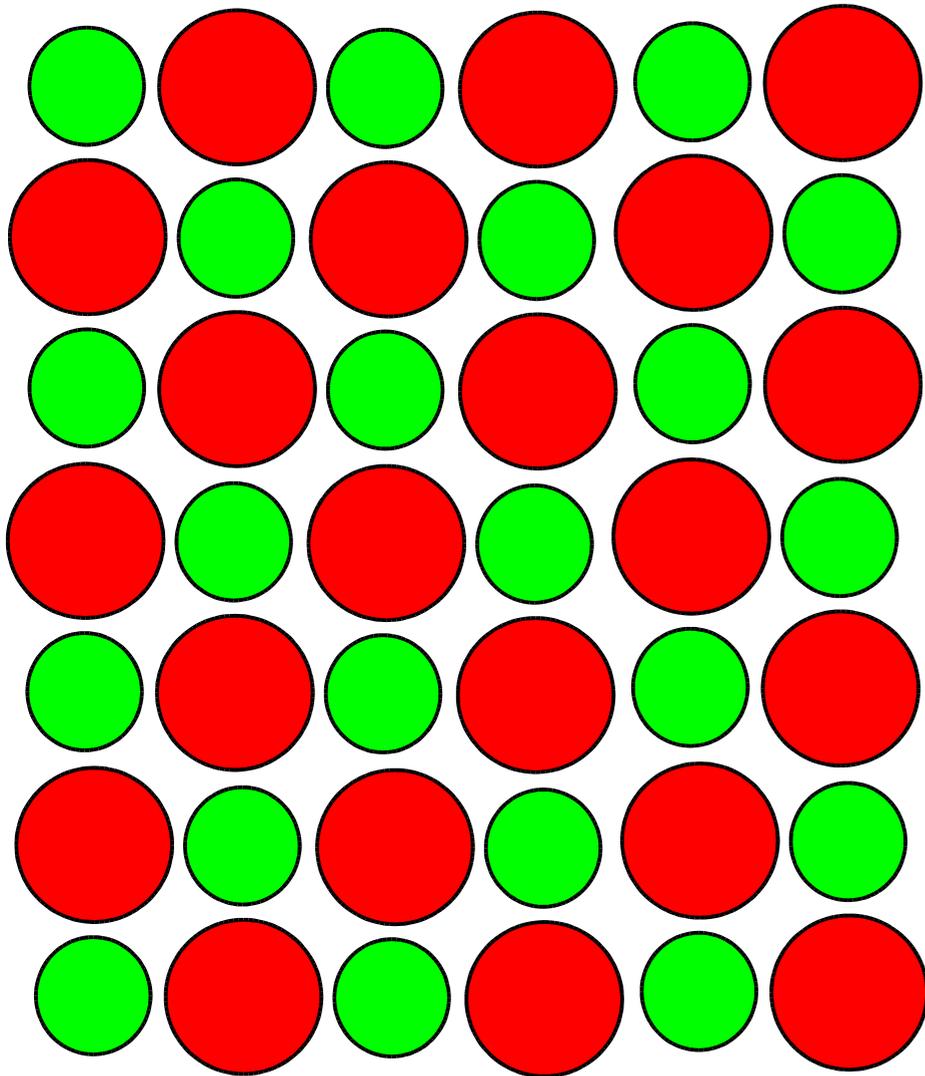
$$\lambda = \frac{c_o}{f}$$

$$c_o = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

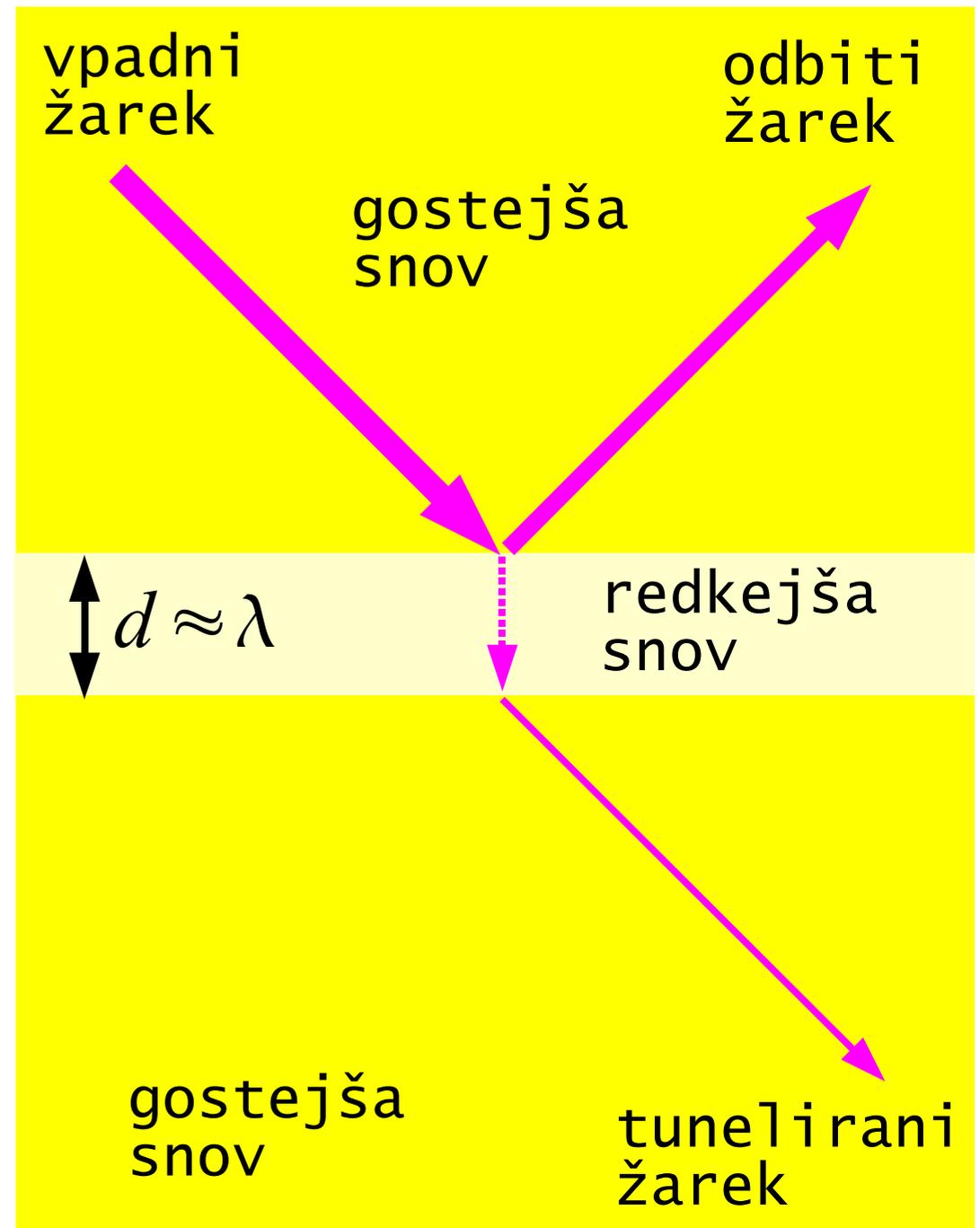
$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

1 – Elektroni in fotoni: valovne dolžine in hitrosti.

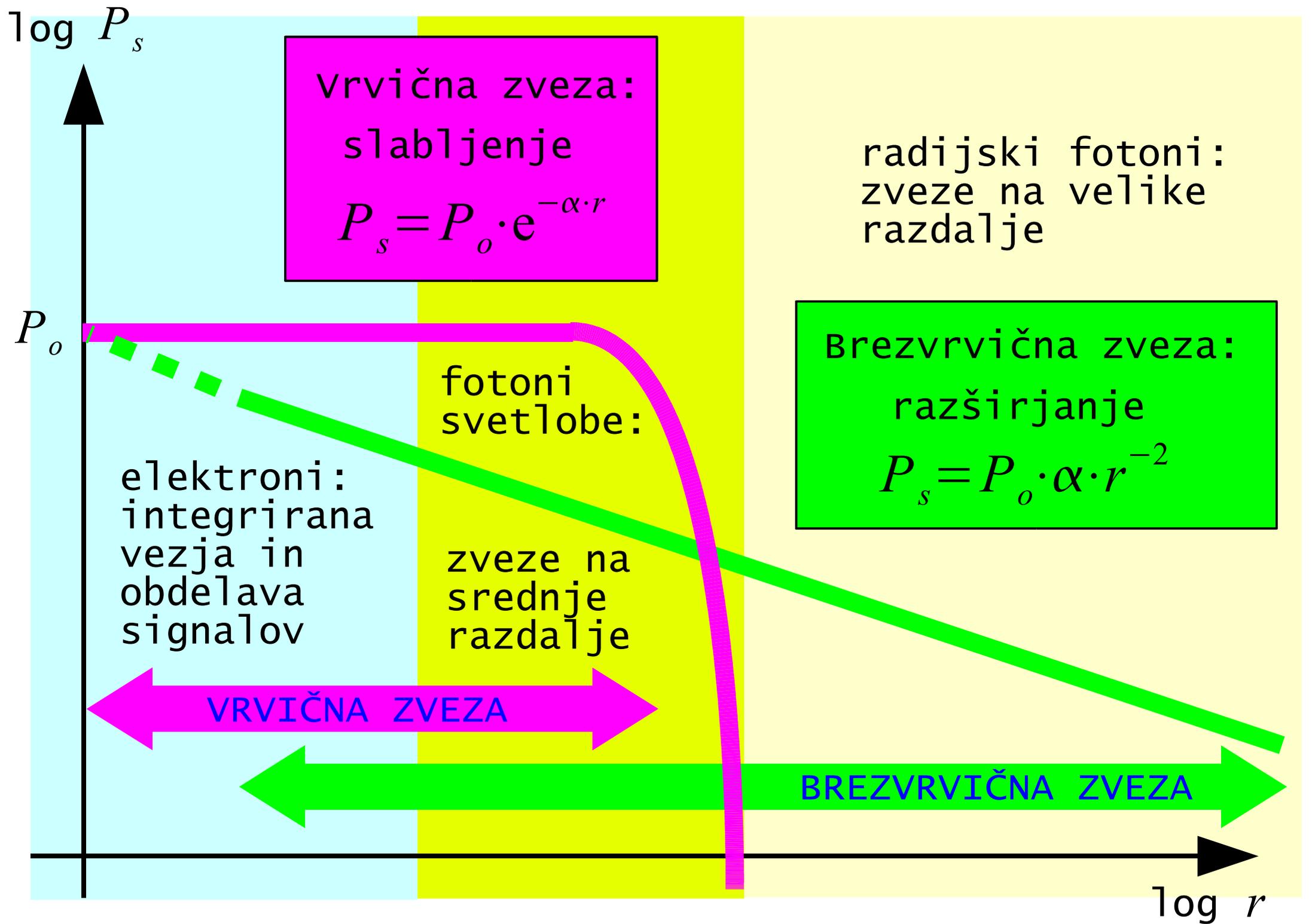
kristalna mreža snovi



1nm



2 - Zgradba trdne snovi in tuneliranje.



3 - Domet brezvrvične in vrvične zveze.

## Lastnosti

Lichtsprechgeraet 80  
(2. svetovna vojna)

dvosmerna govorna zveza

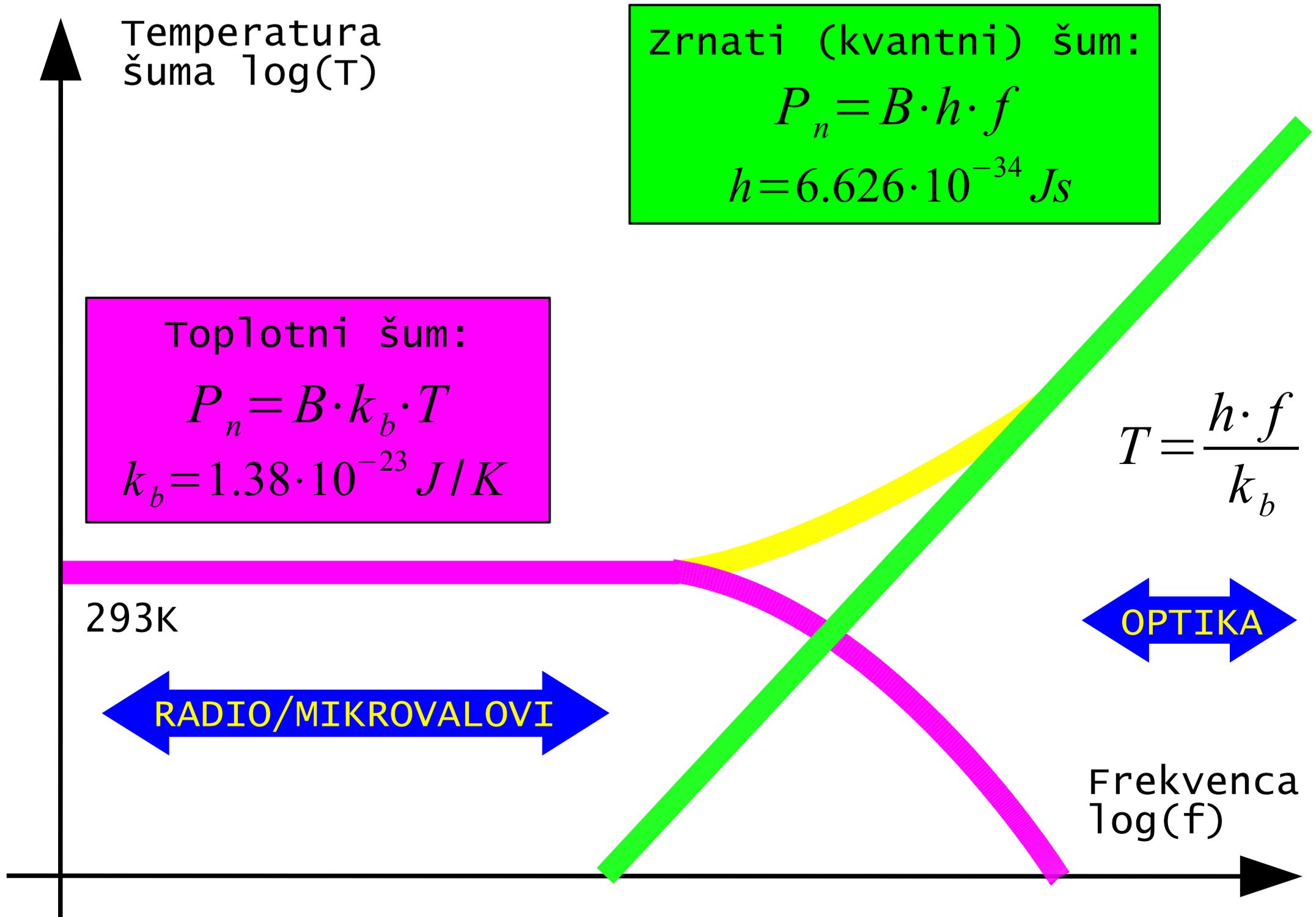
domet 4-5km

širina snopa (ciljanje)  
 $0.2^\circ$  na obeh straneh

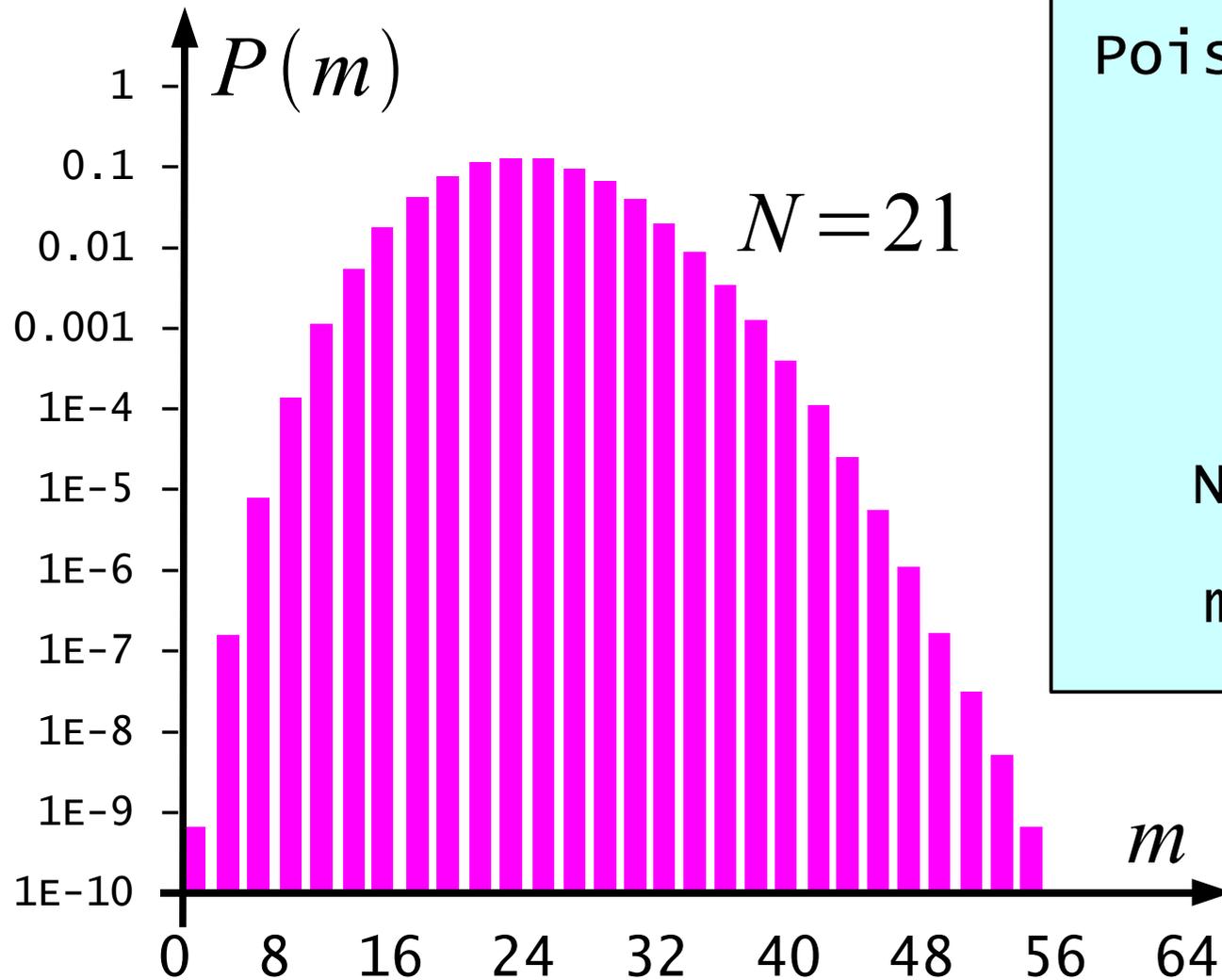
nujna optična vidnost  
med postajama

prisluškovanje zunaj  
snopa skoraj nemogoče





5 - Toplotni in zrnati šum kot funkcija frekvence.



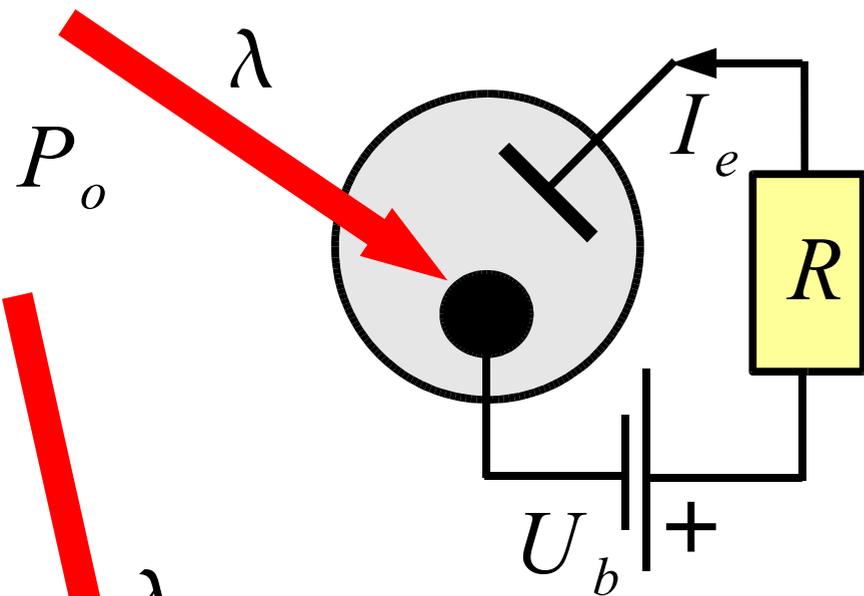
Poisson-ova porazdelitev

$$P(m) = N^m \cdot \frac{e^{-N}}{m!}$$

N povprečno fotonov  
m dejansko fotonov

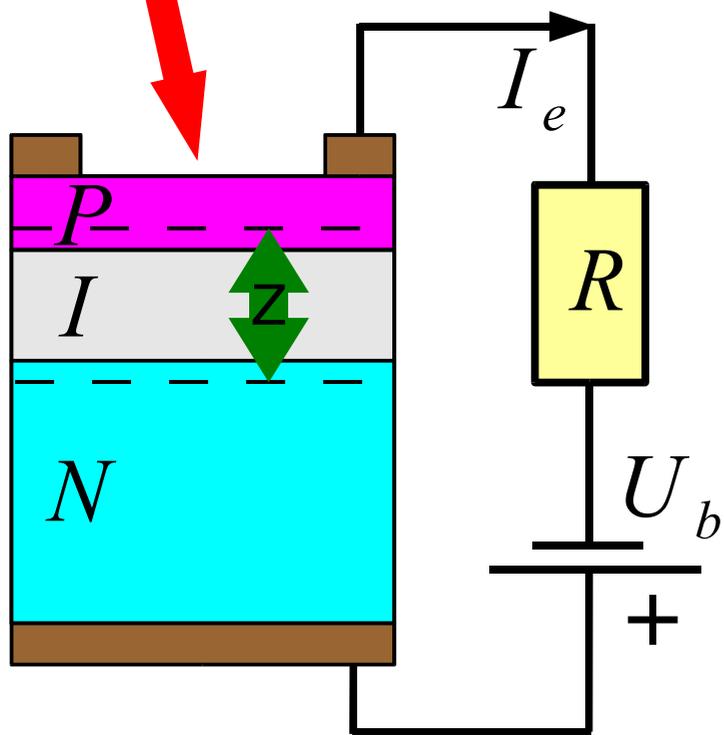
Izgubljena enica:  $BER \leq 10^{-9}$    $N \geq 21$

6 - Statistika zrnatega šuma: potrebno število fotonov.



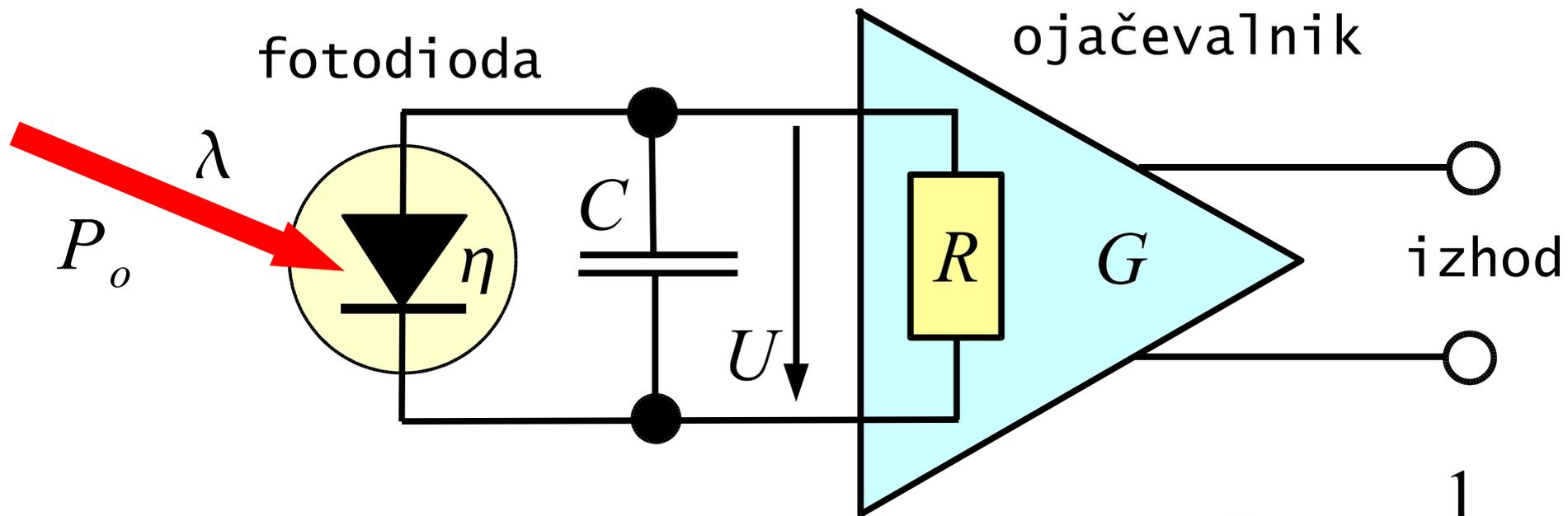
kvantni izkoristek  $\eta = \frac{N_{elektronov}}{N_{fotonov}}$

odzivnost  $\frac{I_e}{P_o} = \frac{\eta \cdot |Q_e| \cdot \lambda}{h \cdot c_o}$



fotodioda @λ	η	I <sub>e</sub> /P <sub>o</sub>
vakuum @500nm	20%	0.08A/w
vakuum @1550nm	1E-6	1.2μA/w
Si @850nm	85%	0.58A/w
InGaAs @1550nm	70%	0.87A/w

7 - vakuumška in polprevodniška fotodioda.



$$U_{neff} = \sqrt{P_n \cdot R}$$

$$P_n = B \cdot k_b \cdot T$$

$$B = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

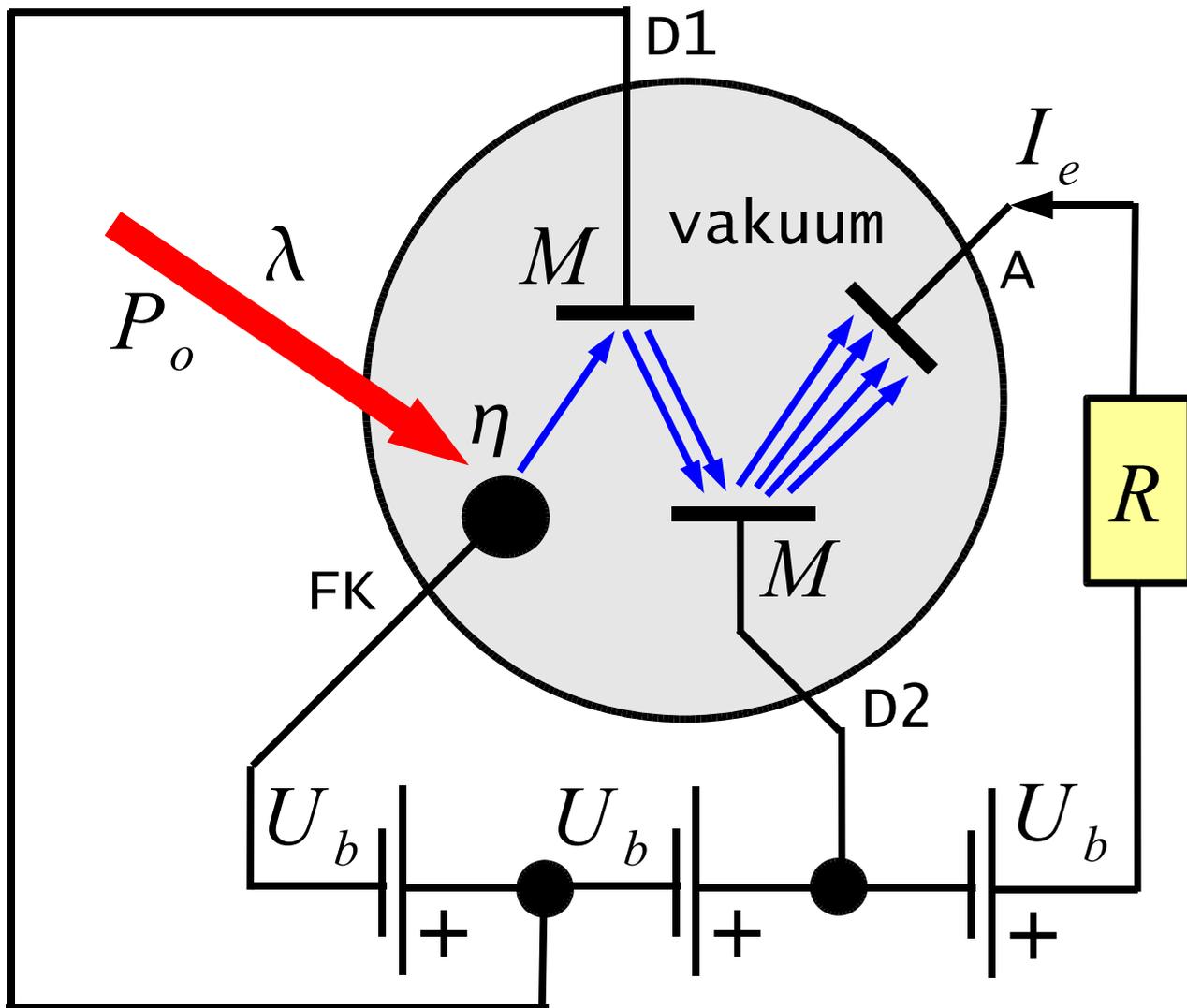
$$U_{neff} = \sqrt{\frac{k_b \cdot T}{2\pi \cdot C}} = 25.7 \mu V \quad @ \quad C=1\text{pF}, \quad T=300\text{K}$$

$$U_s = \frac{Q}{C} = \frac{N_e \cdot |Q_e|}{C}$$

$$U_s = 0.16 \mu V \quad \text{za en elektron}$$

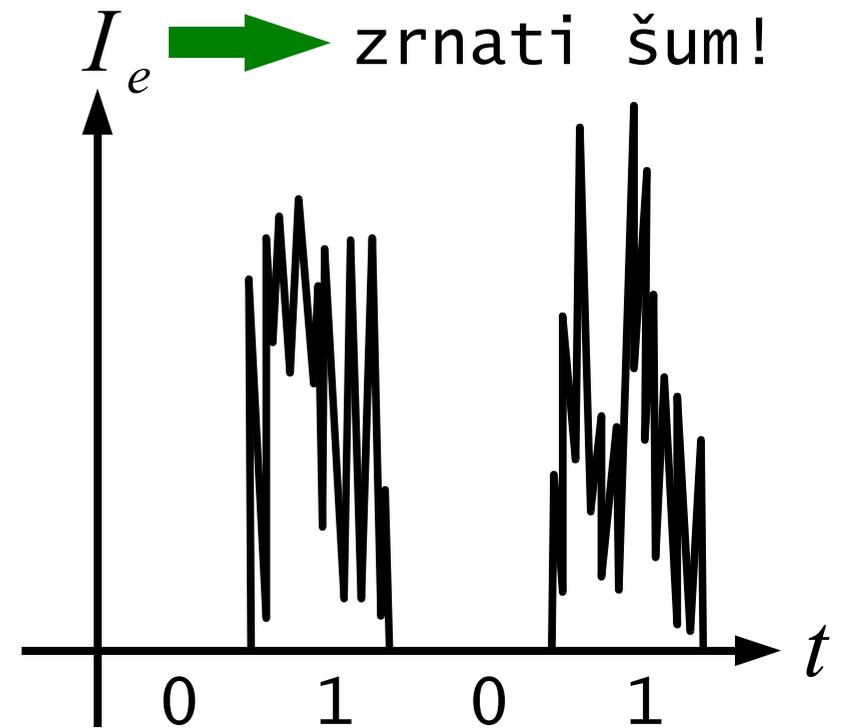
$$U_s = 3.36 \mu V \quad \text{za } N_e = 21$$

8 - Toplotni šum v preprostem svetlobnem sprejemniku.



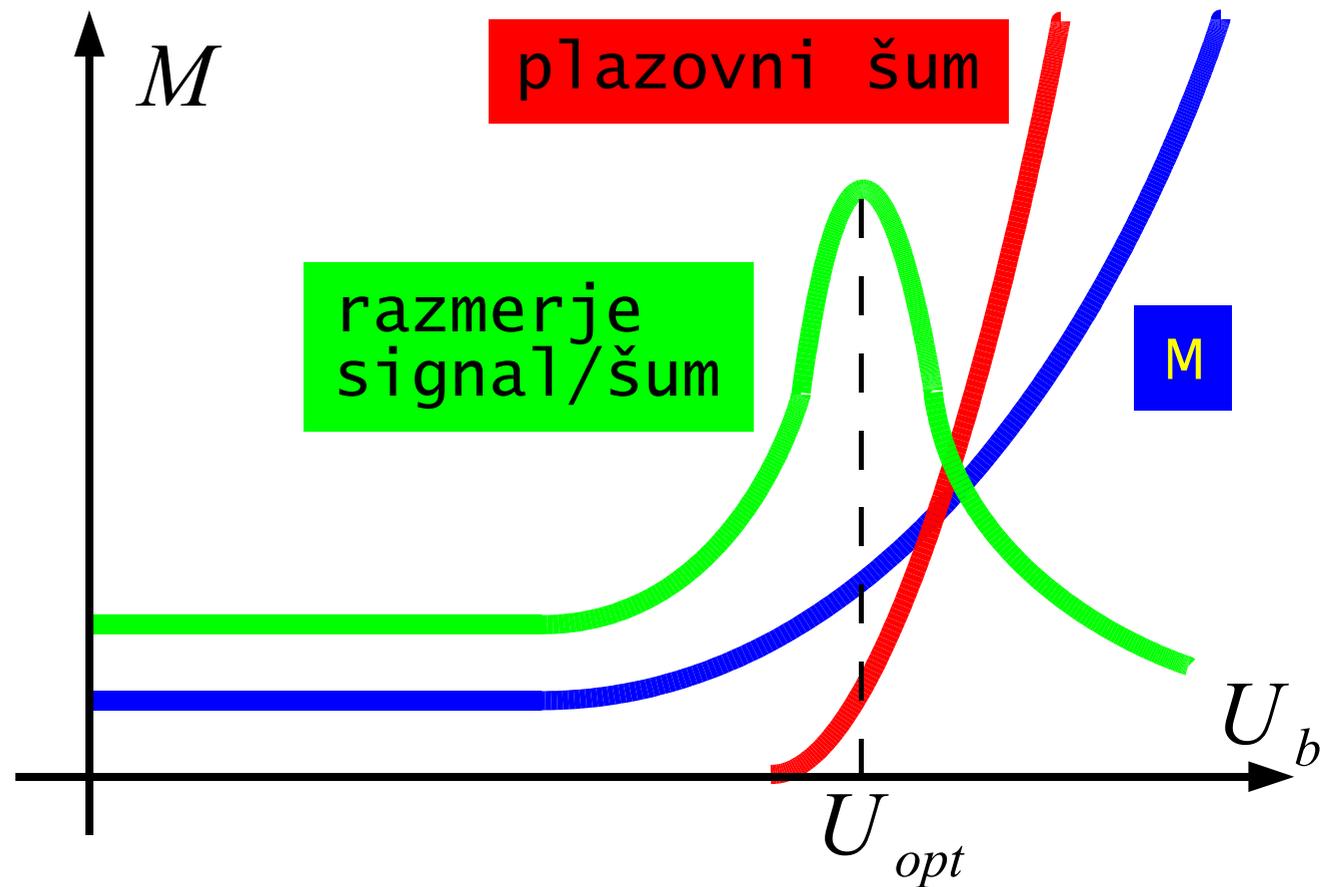
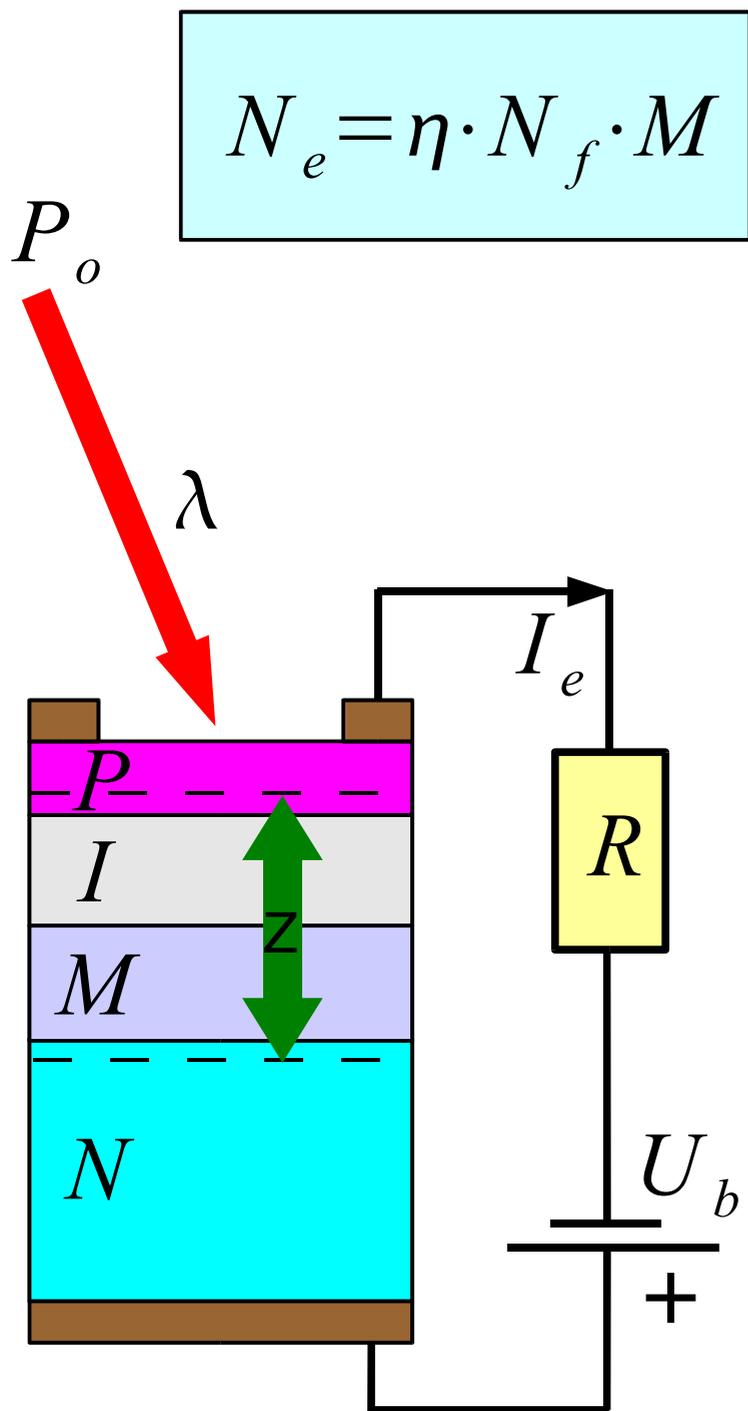
$$N_e = \eta \cdot N_f \cdot M^{N_{\text{dinod}}}$$

M=3...5



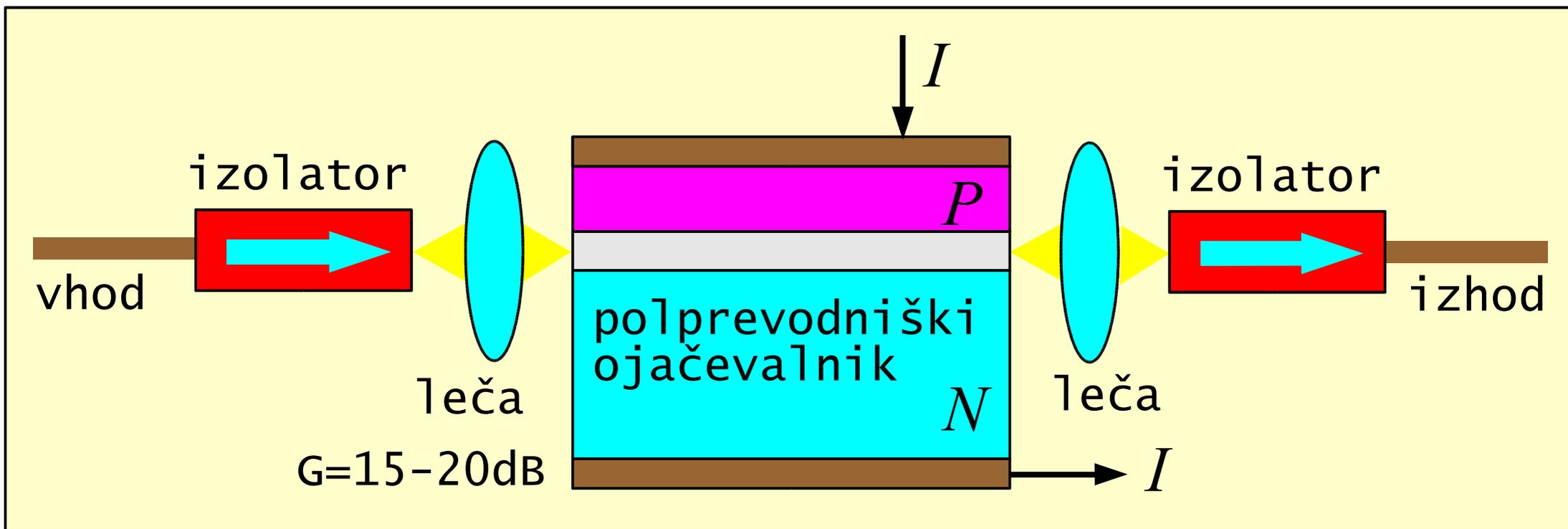
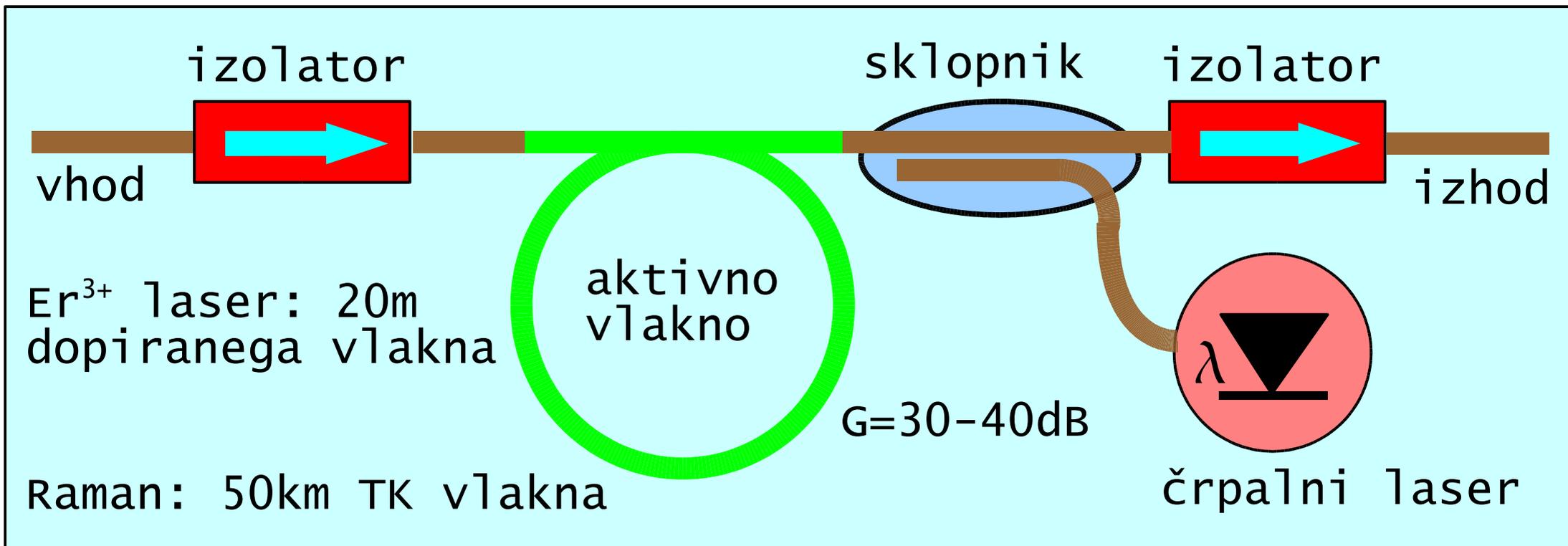
osnova: ojačenje konvektivnega toka elektronov  
 počasen konvektivni tok → počasen odziv  
 slab kvantni izkoristek fotokatode @ 1550nm

9 - Zgradba, delovanje in šum fotopomnoževalke.

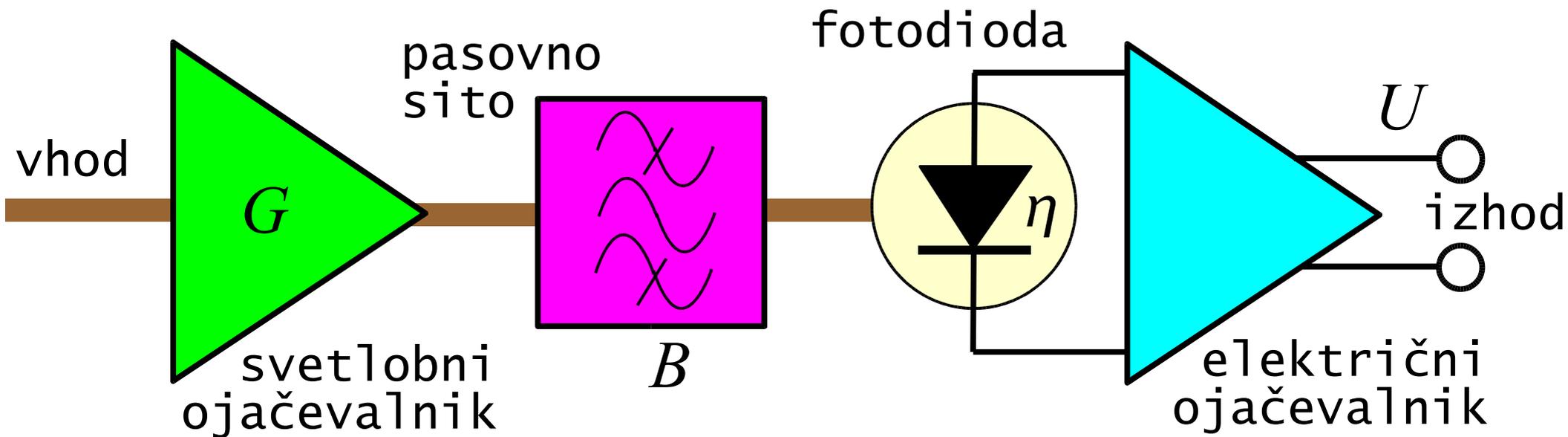


APD	$\lambda$	$U_{opt}$	$M_{opt}$
Si	850nm	150V	100
Ge	1300nm	30V	10
InGaAs	1550nm	70V	20

10 - Razmerje signal/šum pri plazovnih fotodiodah.



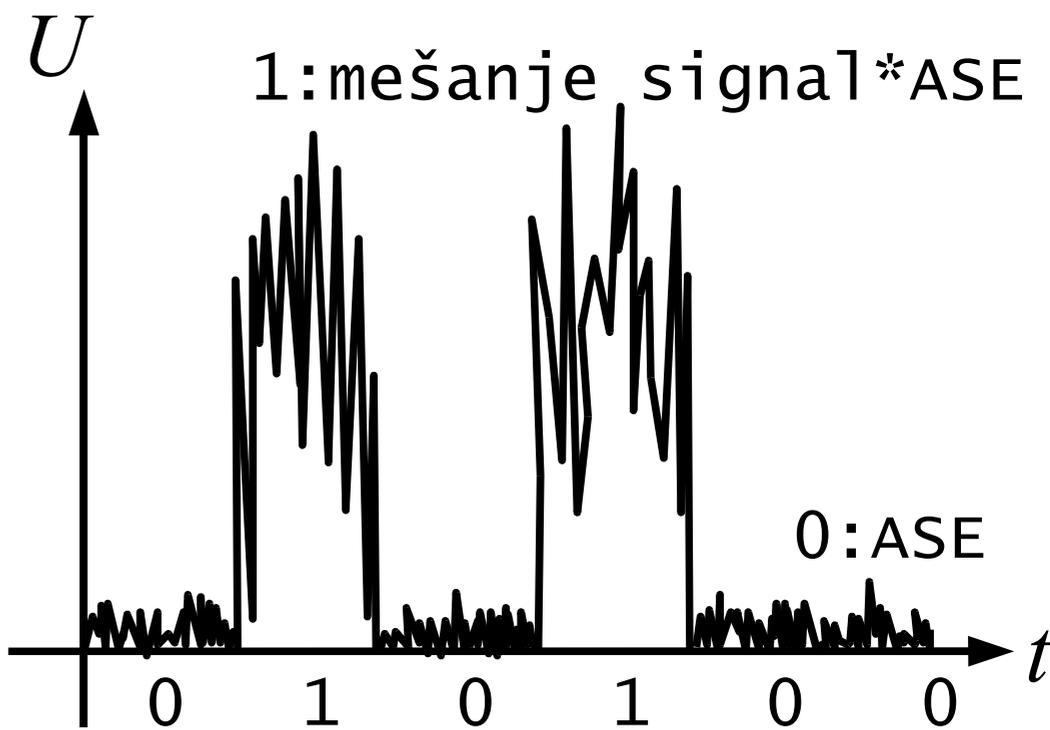
11 - Izvedbe svetlobnih predojačevalnikov.



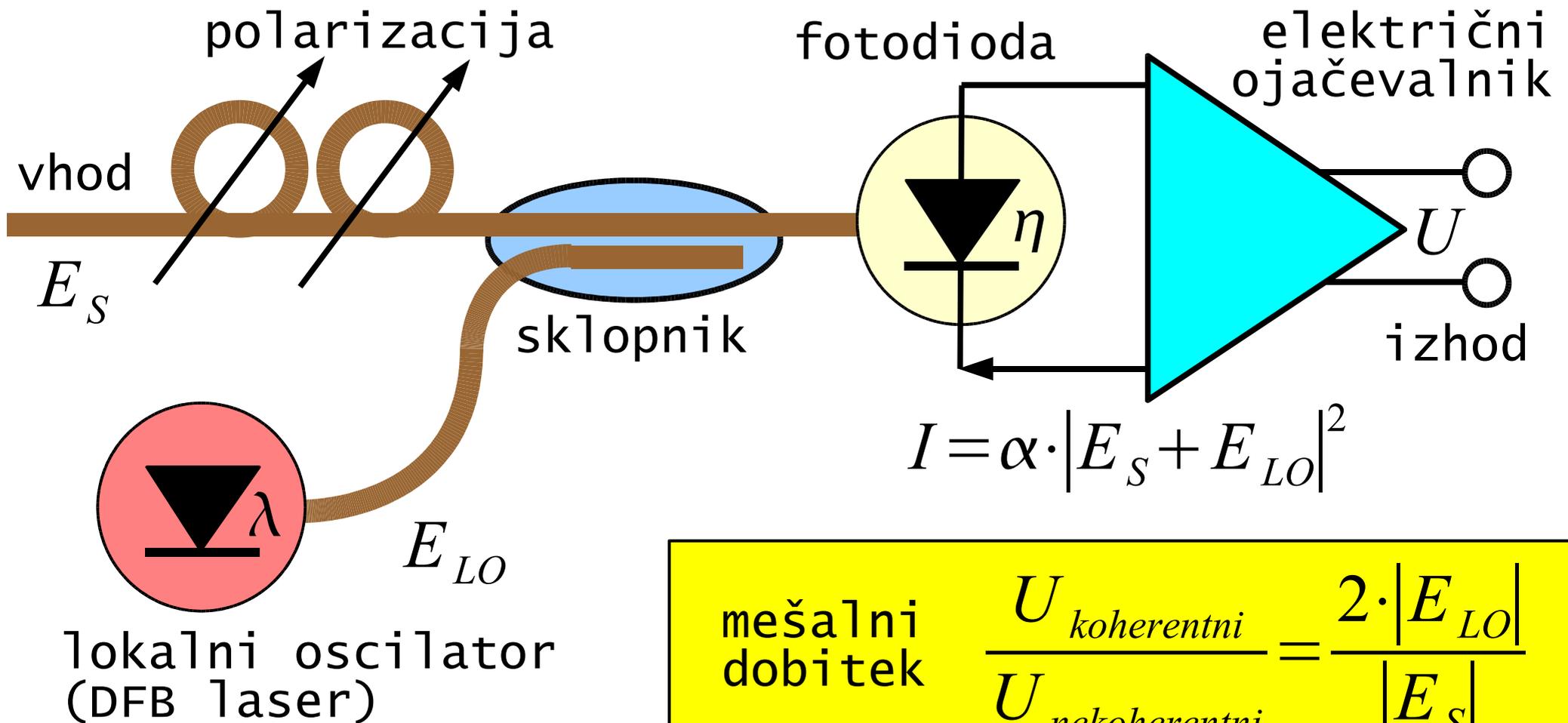
ASE šum ojačevalnika

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

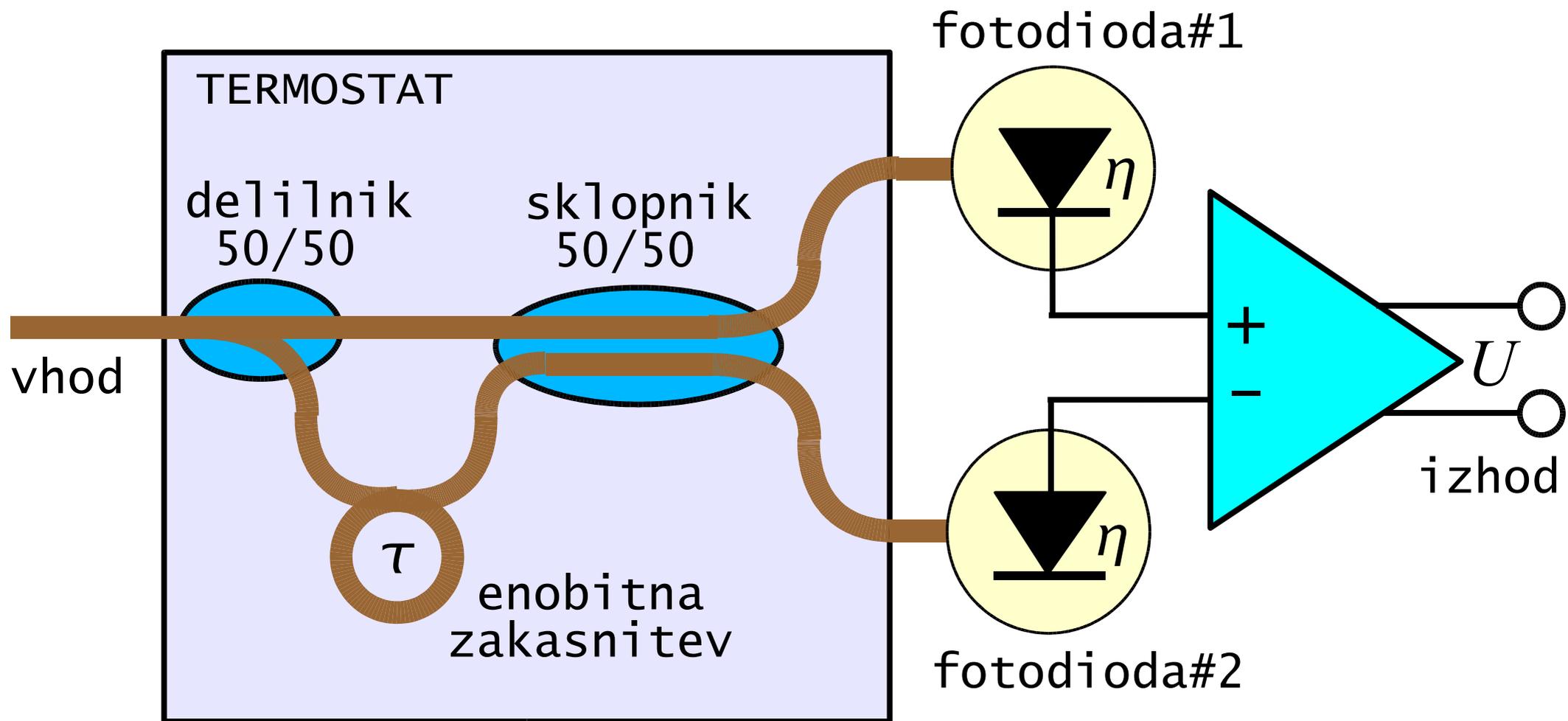
faktor inverzne naseljenosti  $\mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$



12 - signal in šum v ojačevani svetlobni zvezi.

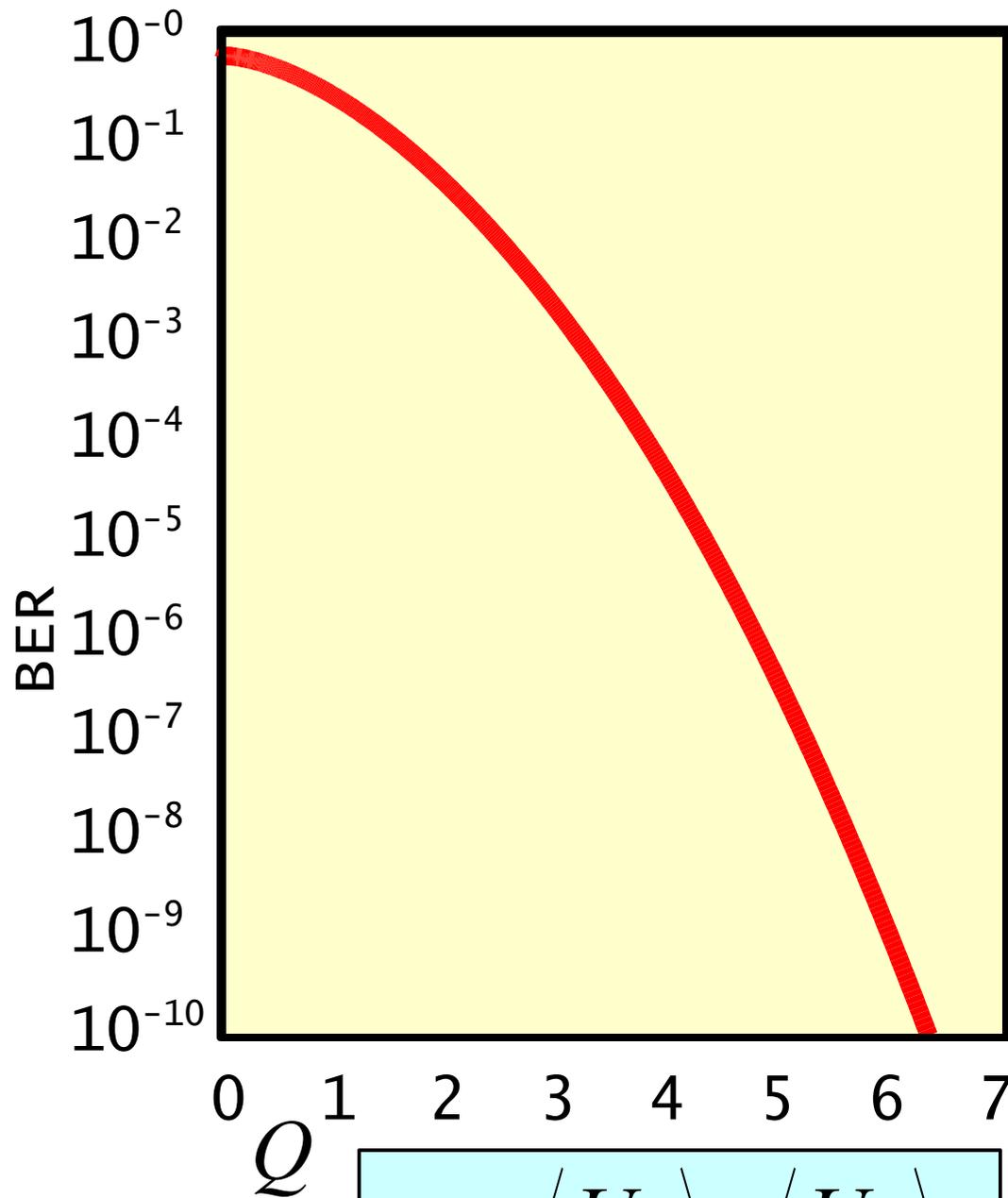
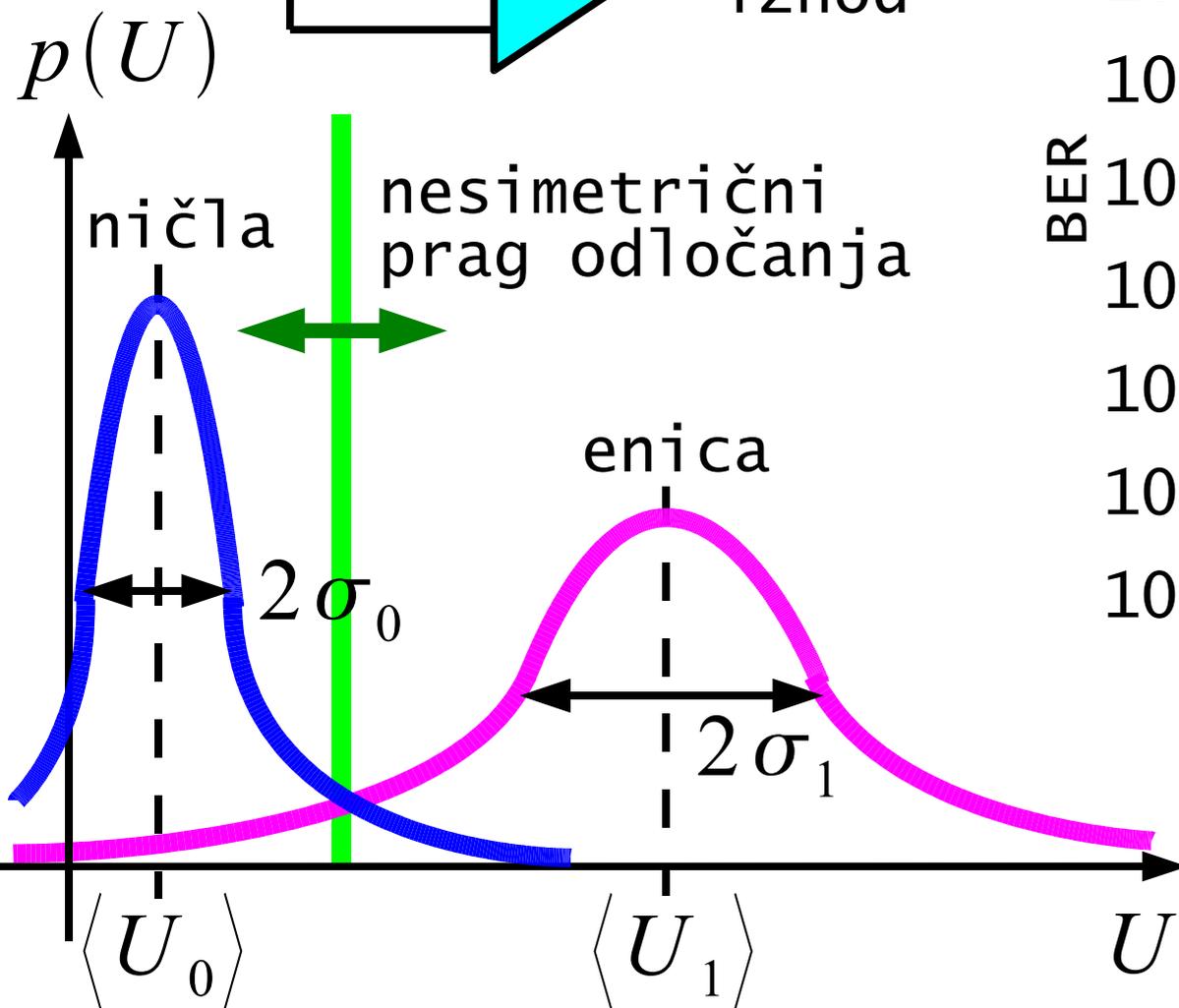
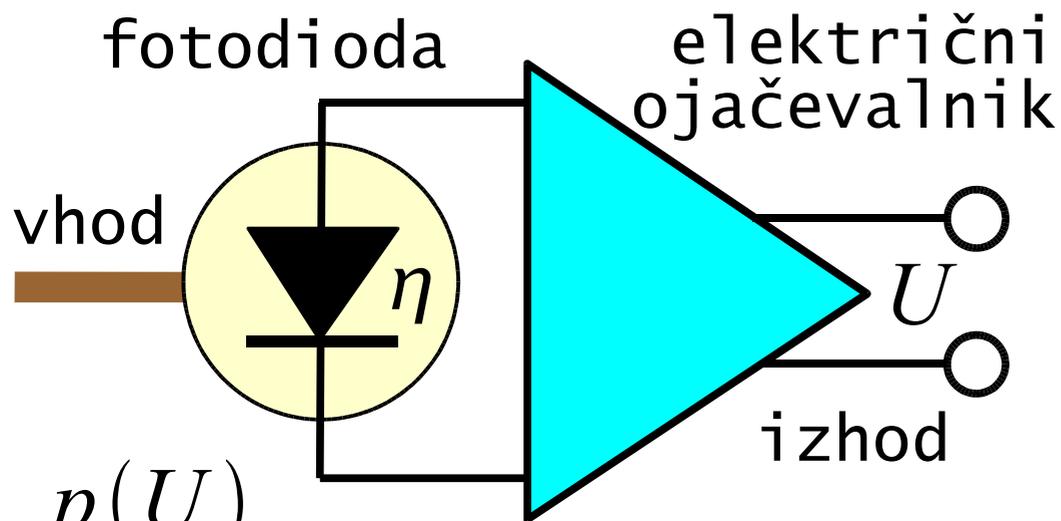


1. težava: nadzor polarizacije sprejetega signala?
2. težava: točna frekvenca lokalnega oscilatorja?



DPSK:  
 konst. ovojnica  
 manjši učinek  
 nelinearnosti

zahteva za točnost  
 svetlobnega nosilca  $\Delta f \leq \frac{C}{10}$   
 $C = 40 \text{ Gb/s} \rightarrow \Delta f \leq 4 \text{ GHz}$

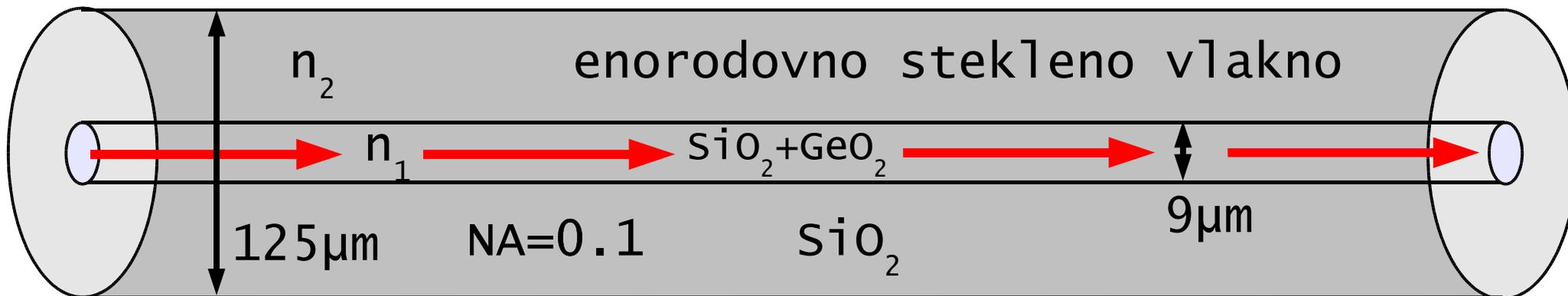
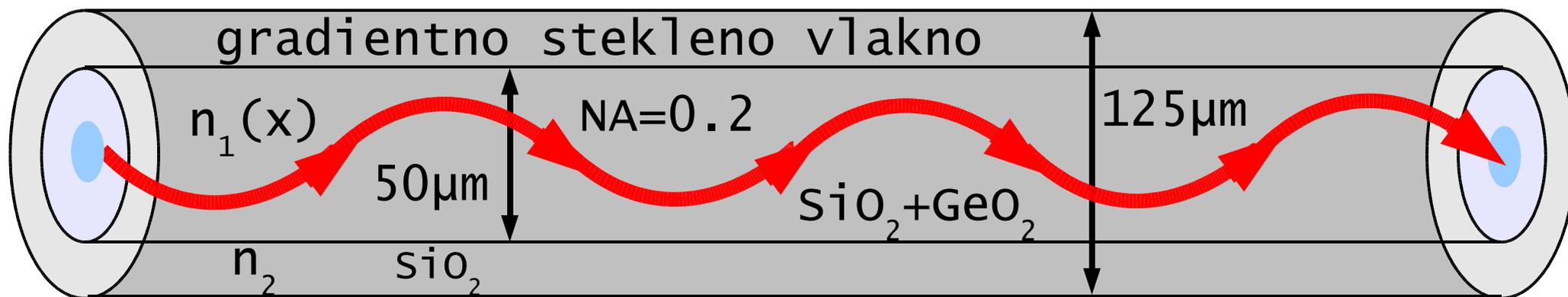
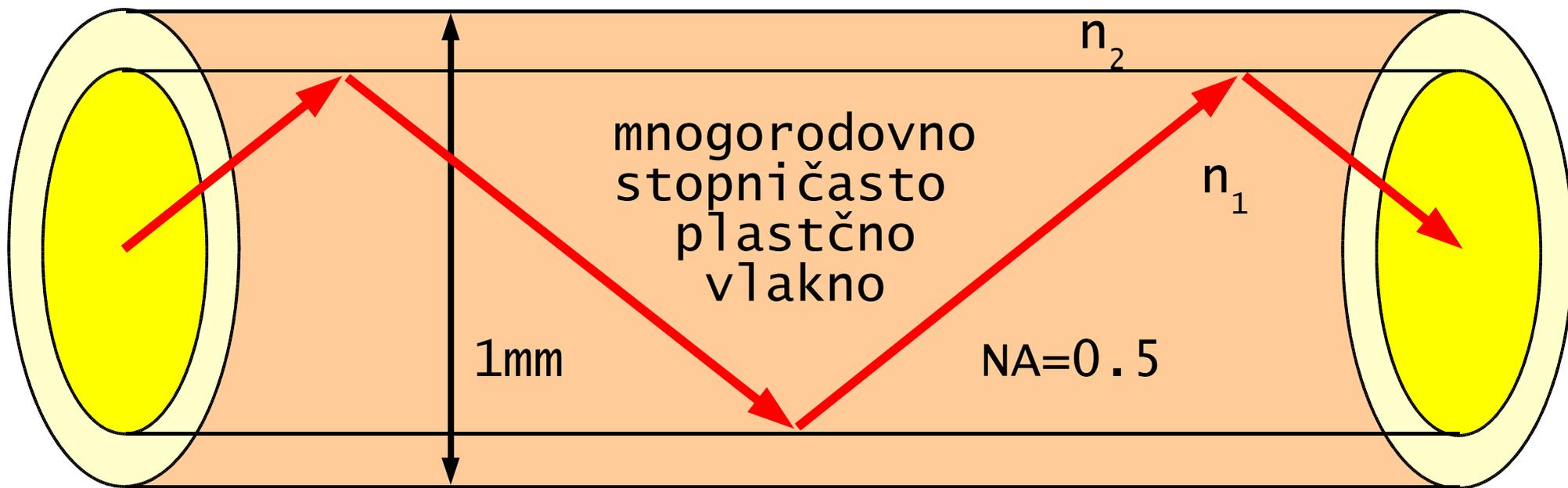


$$Q = \frac{\langle U_1 \rangle - \langle U_0 \rangle}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

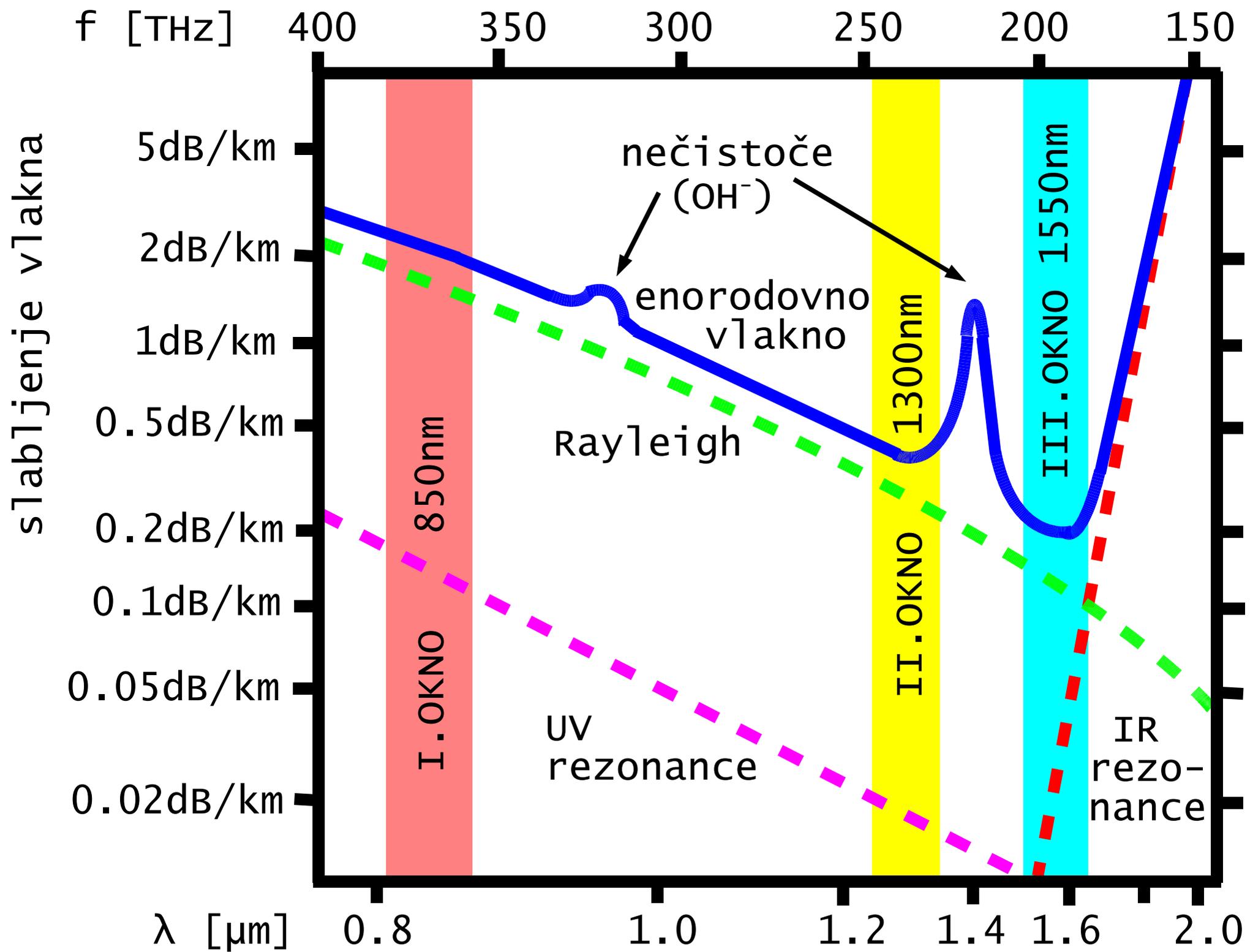
15 - Razmerje signal/šum,  $Q$  in pogostnost napak.

vrsta RX @ 1550nm	$\frac{\langle N_f \rangle}{bit}$	155Mb/s	622Mb/s	2.5Gb/s	10Gb/s	40Gb/s
idealni	10.5	-66.8 dBm	-60.8 dBm	-54.7 dBm	-48.7 dBm	-42.7 dBm
vrhunski poskus	50	-60dBm	-54dBm	-48dBm	-41.9 dBm	-35.9 dBm
APD-FET	200	-54dBm	-48dBm	-41.9 dBm	-35.9 dBm	-29.9 dBm
PIN-FET	1000	-47dBm	-41dBm	-34.9 dBm	-28.9 dBm	-22.9 dBm
PIN nizka-z	$10^4$	-37dBm	-31dBm	-24.9 dBm	-18.9 dBm	-12.9 dBm

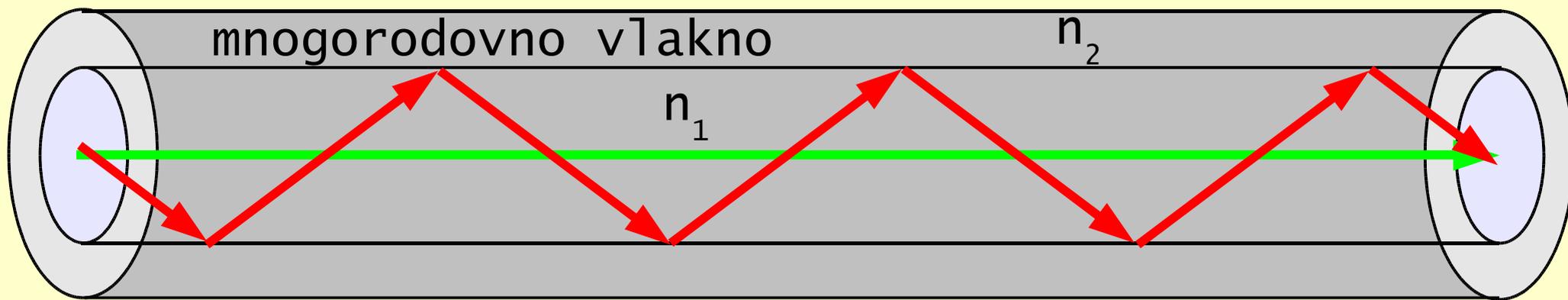
16 - Zgledi občutljivosti svetlobnih sprejemnikov.



17 - vrste in lastnosti svetlobnih vlaken.



18 - slabljenje vlaken in telekomunikacijska okna.



različne poti ➡ mnogorodovna razpršitev



$n_1(\lambda), n_2(\lambda)$ , valovod ➡ barvna razpršitev



nesimetrija ➡ polarizacijska razpršitev

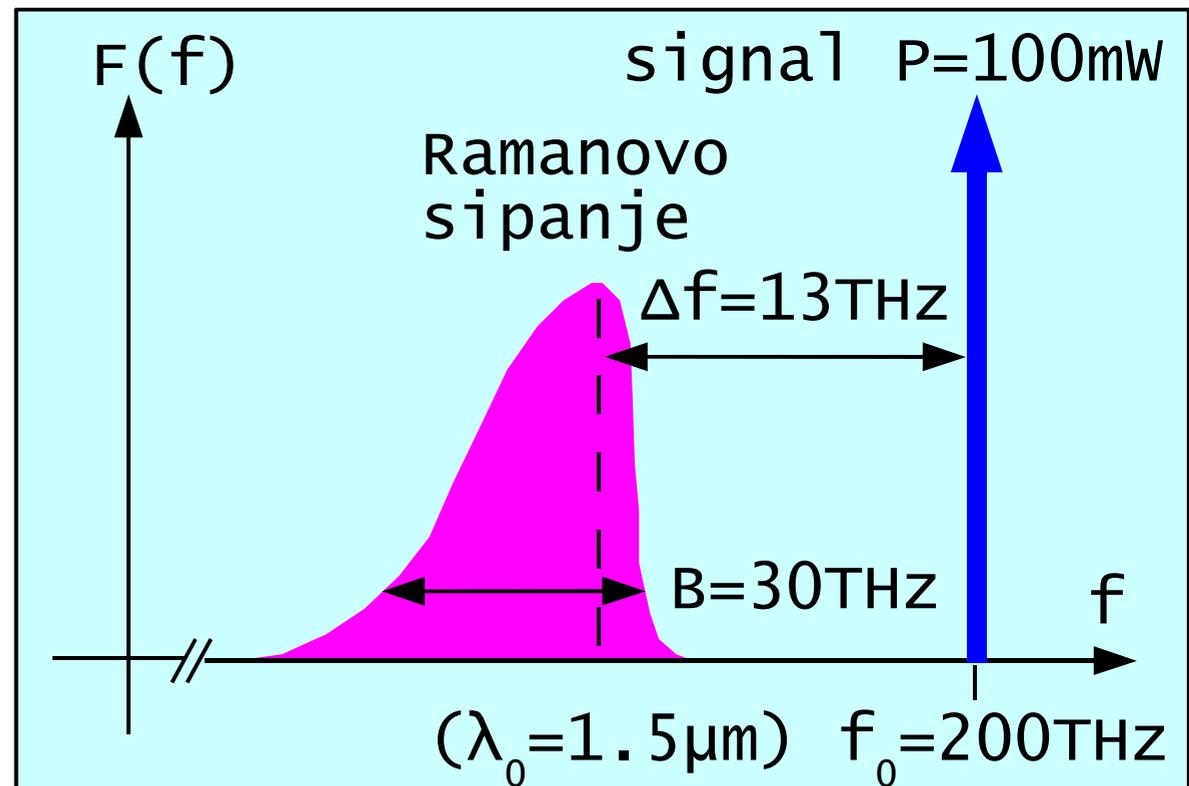
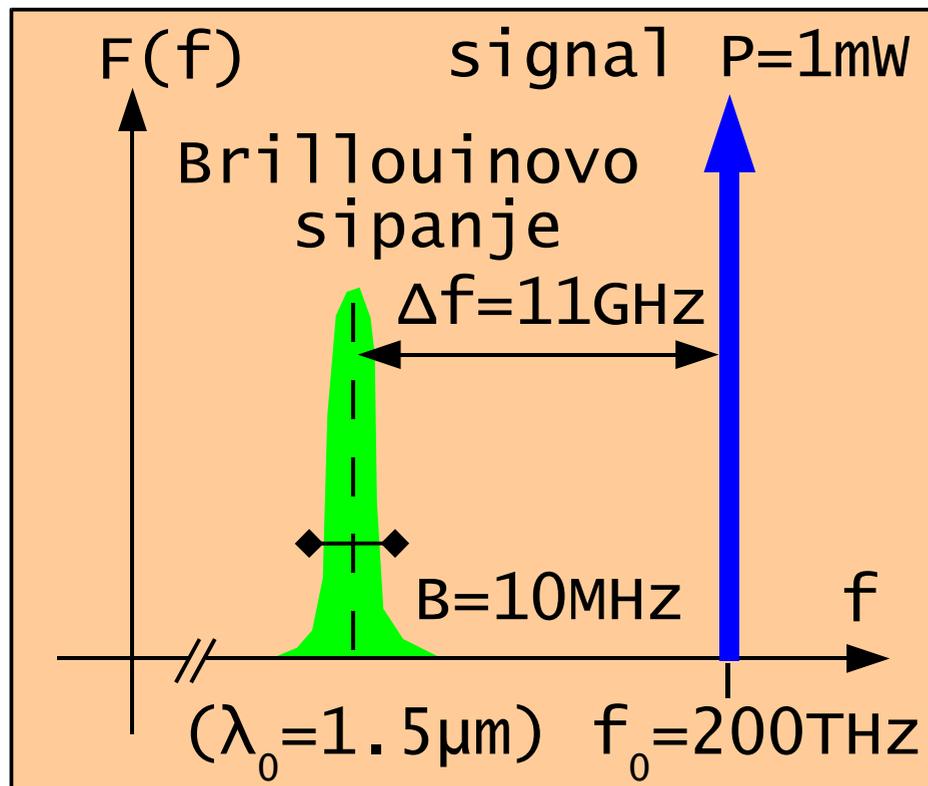
nelinearni lomni količnik:  $n = n_0 + n_2 \cdot S$

SiO<sub>2</sub>:  $n_0 = 1.46$ ,  $n_2 = 3.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

(lastna) fazna modulacija:  $\Delta \phi = \Delta n \cdot k_0 \cdot l$

$P = 100 \text{ mW}$ ,  $S = 1.43 \text{ GW}/\text{m}^2$   $\longrightarrow$   $\Delta n = n_2 \cdot S = 4.58 \cdot 10^{-11}$

$l = 50 \text{ km}$ ,  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$   $\longrightarrow$   $\Delta \phi = \Delta n \cdot (2\pi/\lambda_0) \cdot l = 9.3 \text{ rd}$



razširitev impulza @ $l = 50\text{km}$		
mnogorodovna razpršitev	stopničasto	$\Delta t = 2.5\mu\text{s}$
	gradientno	$\Delta t = 25\text{-}250\text{ns}$
barvna razpršitev $\Delta\lambda = 1\text{nm}$	G.652 @ $\lambda=1.3\mu\text{m}$	$\Delta t \approx 100\text{ps}$
	G.652 @ $\lambda=1.55\mu\text{m}$	$\Delta t \approx 850\text{ps}$
polarizacijska razpršitev	G.652 stari	$\Delta t \approx 21\text{ps}$
	G.652 novi	$\Delta t \approx 0.7\text{ps}$

$P_{\text{MAX}} \approx 100\text{mW}$  (Raman oziroma nelinearni n)

$P_{\text{MAX}} \approx 1\text{mW}$  (Brillouin v ozkopasovnih zvezah)

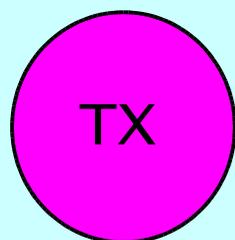
omejitev barvne razpršitve:

$$l_{max} \leq \frac{c_0}{D \cdot \lambda^2 \cdot R^2}$$

$D=17\text{ps/nm.km}$  @  $\lambda=1550\text{nm}$  

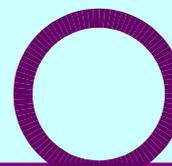
$R$	$l_{max}$
$2.5\text{ Gb/s}$	$1175\text{ km}$
$10\text{ Gb/s}$	$73.5\text{ km}$
$40\text{ Gb/s}$	$4.59\text{ km}$

samo barvna:

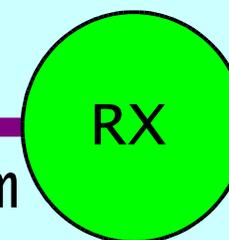


prenosna pot  
 $D=17\text{ps/nm.km}$

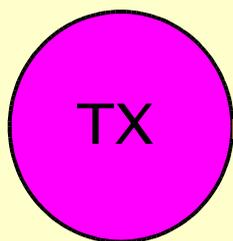
komp. barvne D



$D=-80\text{ps/nm.km}$

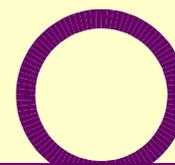


barvna in PMD:



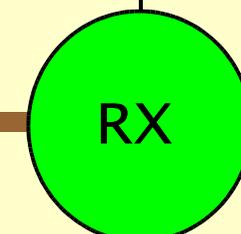
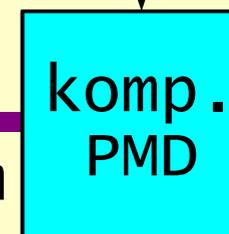
prenosna pot  
 $D=17\text{ps/nm.km}$

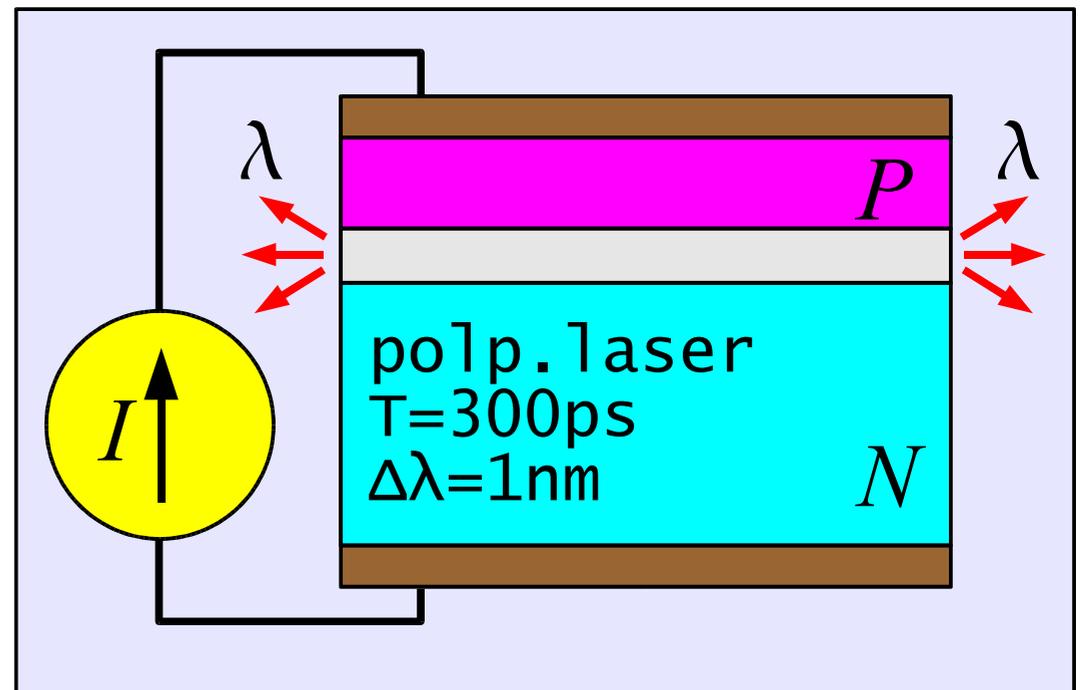
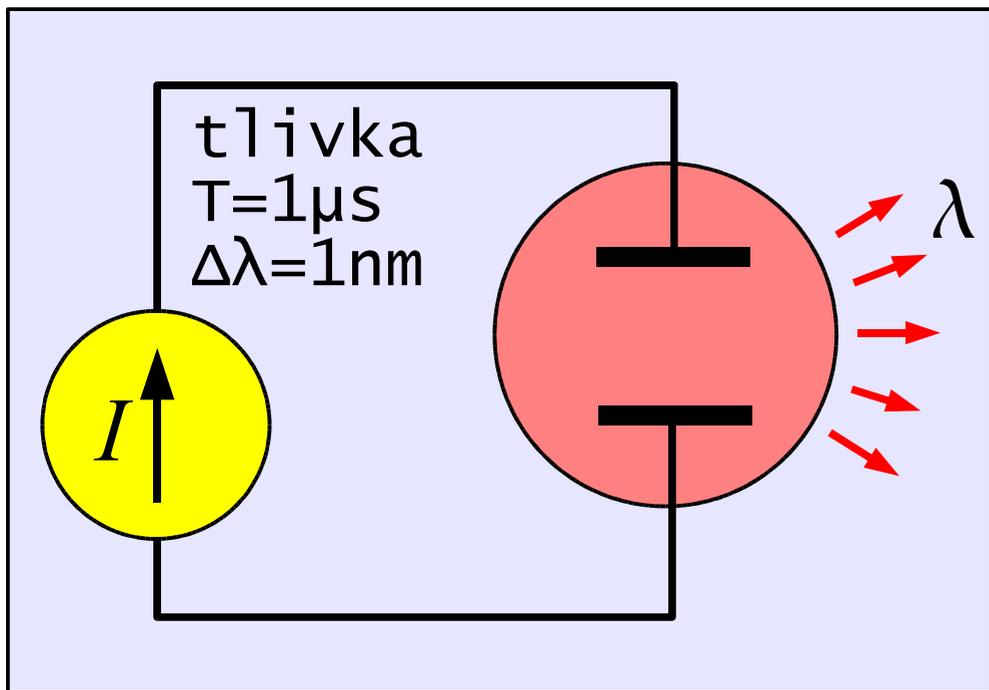
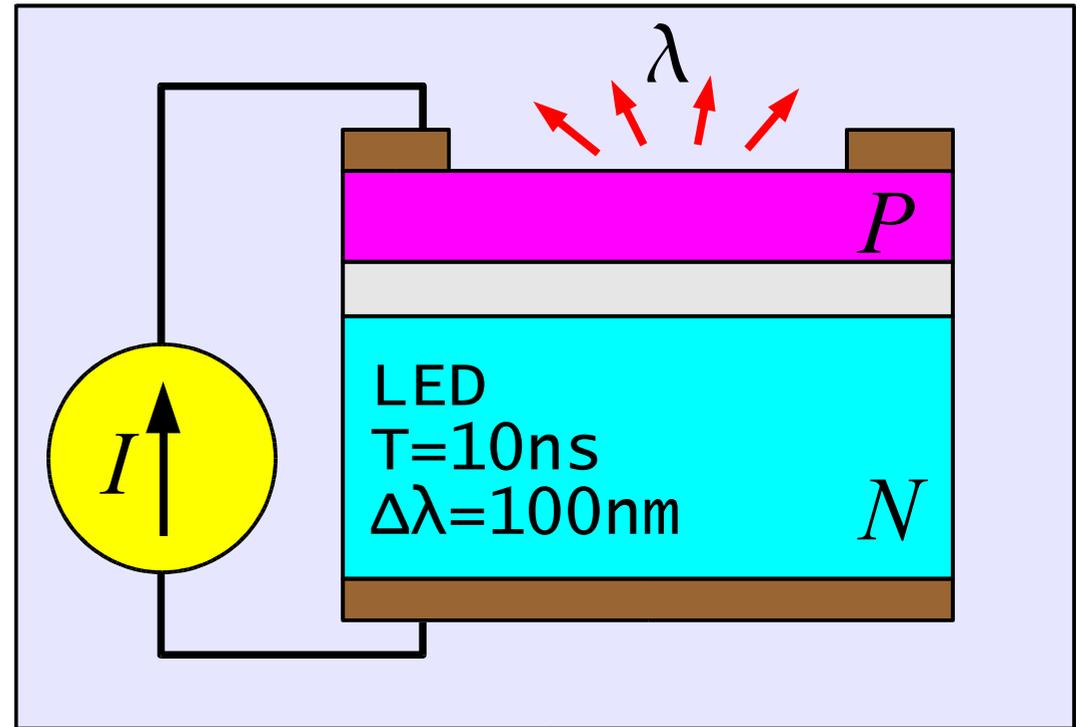
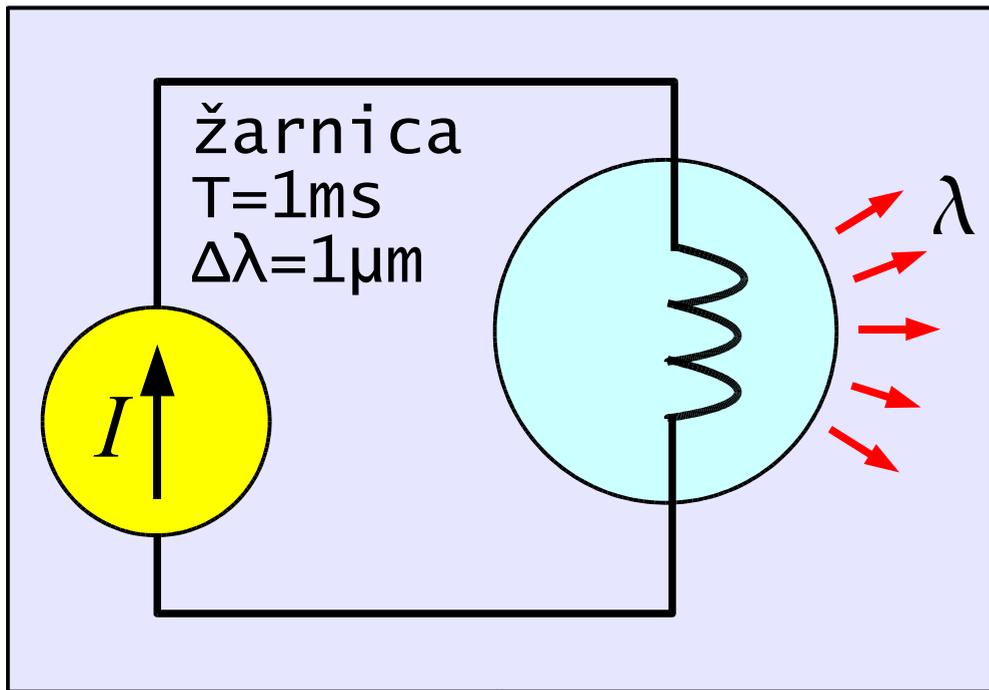
komp. barvne D



$D=-80\text{ps/nm.km}$

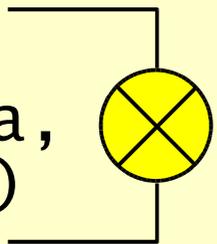
adapt.





23 - Izvori svetlobe: žarnice, tlivke, LED in laserji.

nekoherentni  
izvor (tlivka,  
LED, žarnica)



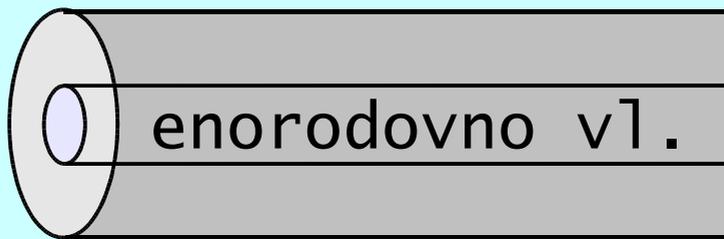
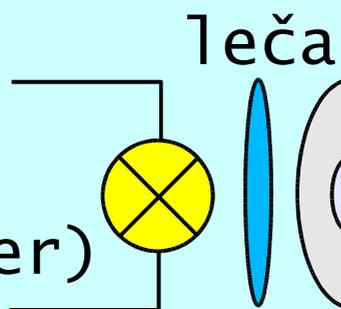
sklopni  
izkoristek  
 $\eta = 1-3\%$   
 $P \approx -10\text{dBm}$

nekoherentni  
izvor (tlivka,  
LED, žarnica)



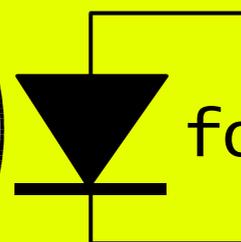
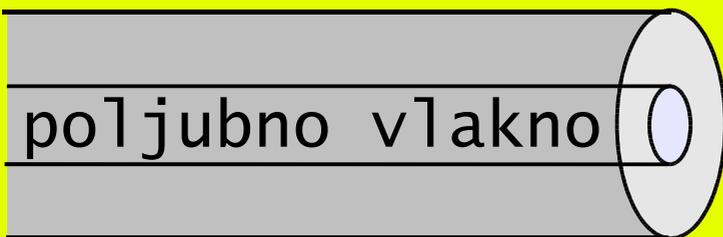
sklopni  
izkoristek  
 $\eta = 0.03-0.1\%$   
 $P \approx -25\text{dBm}$

koherentni  
izvor (laser)



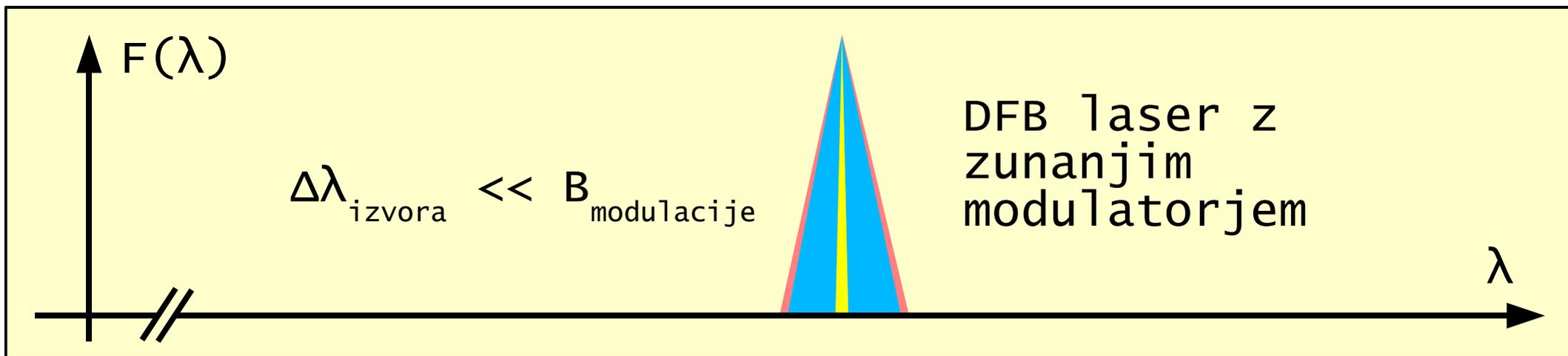
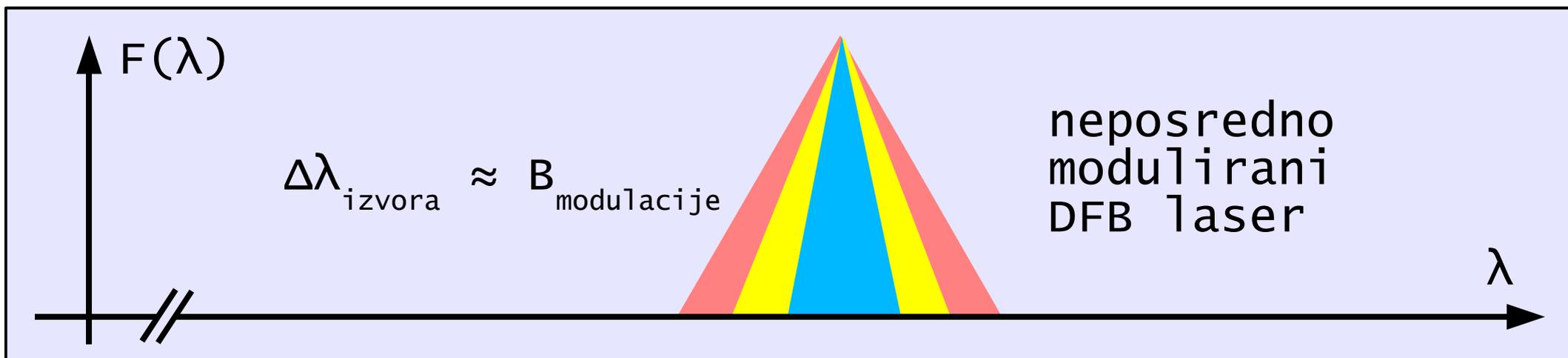
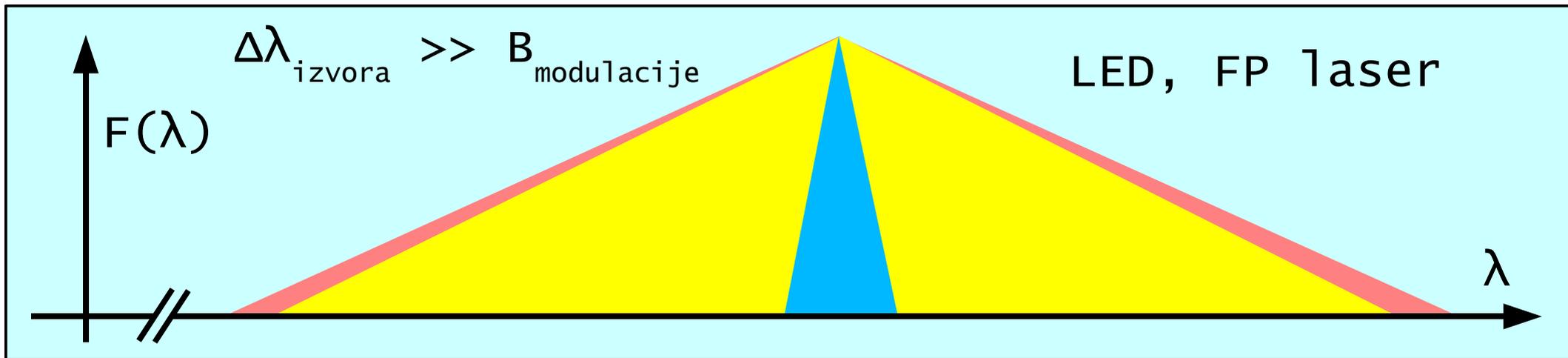
sklopni  
izkoristek  
 $\eta = 30-70\%$   
 $P \approx +15\text{dBm}$

poljubno vlakno

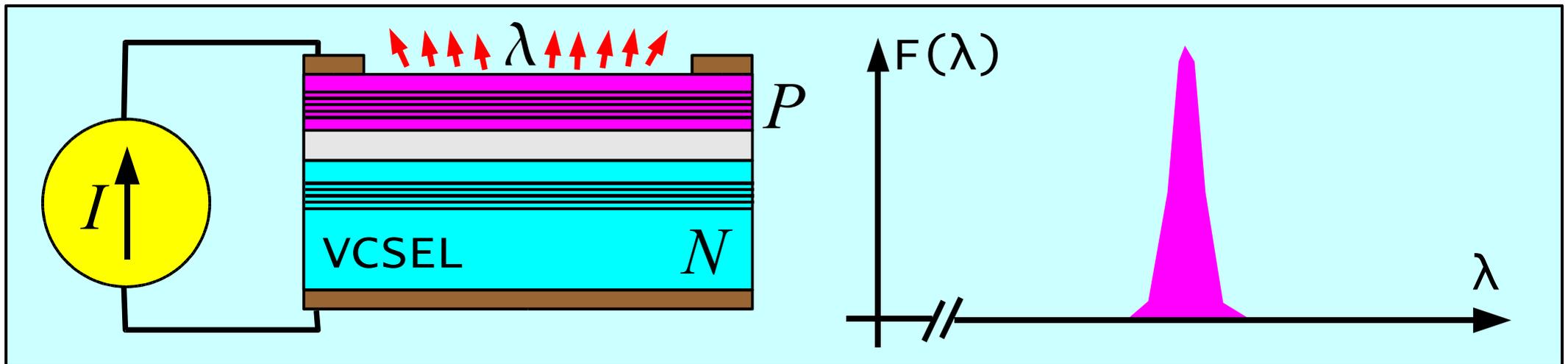
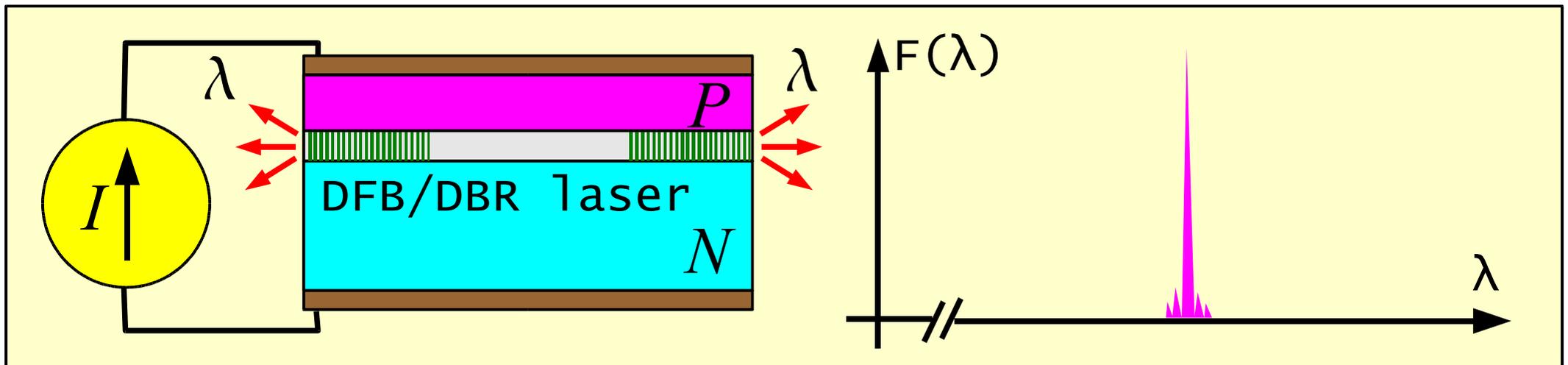
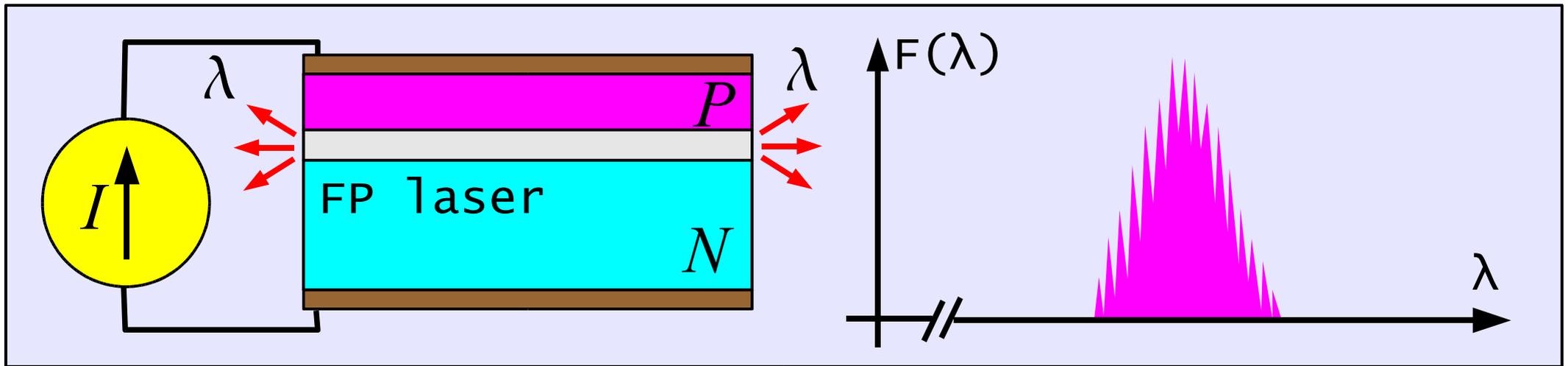


fotodioda

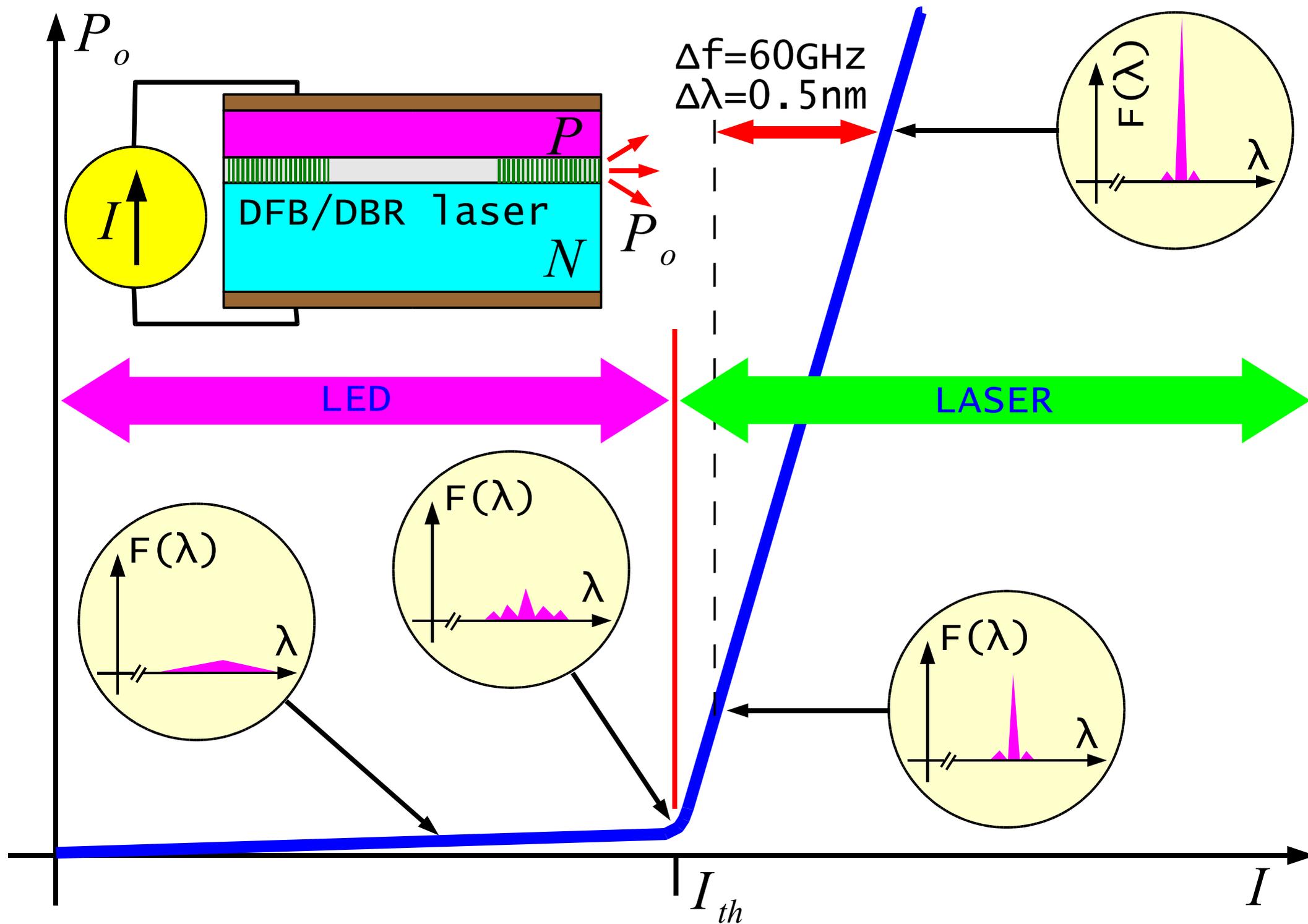
sklopni  
izkoristek  
 $\eta = 50-90\%$



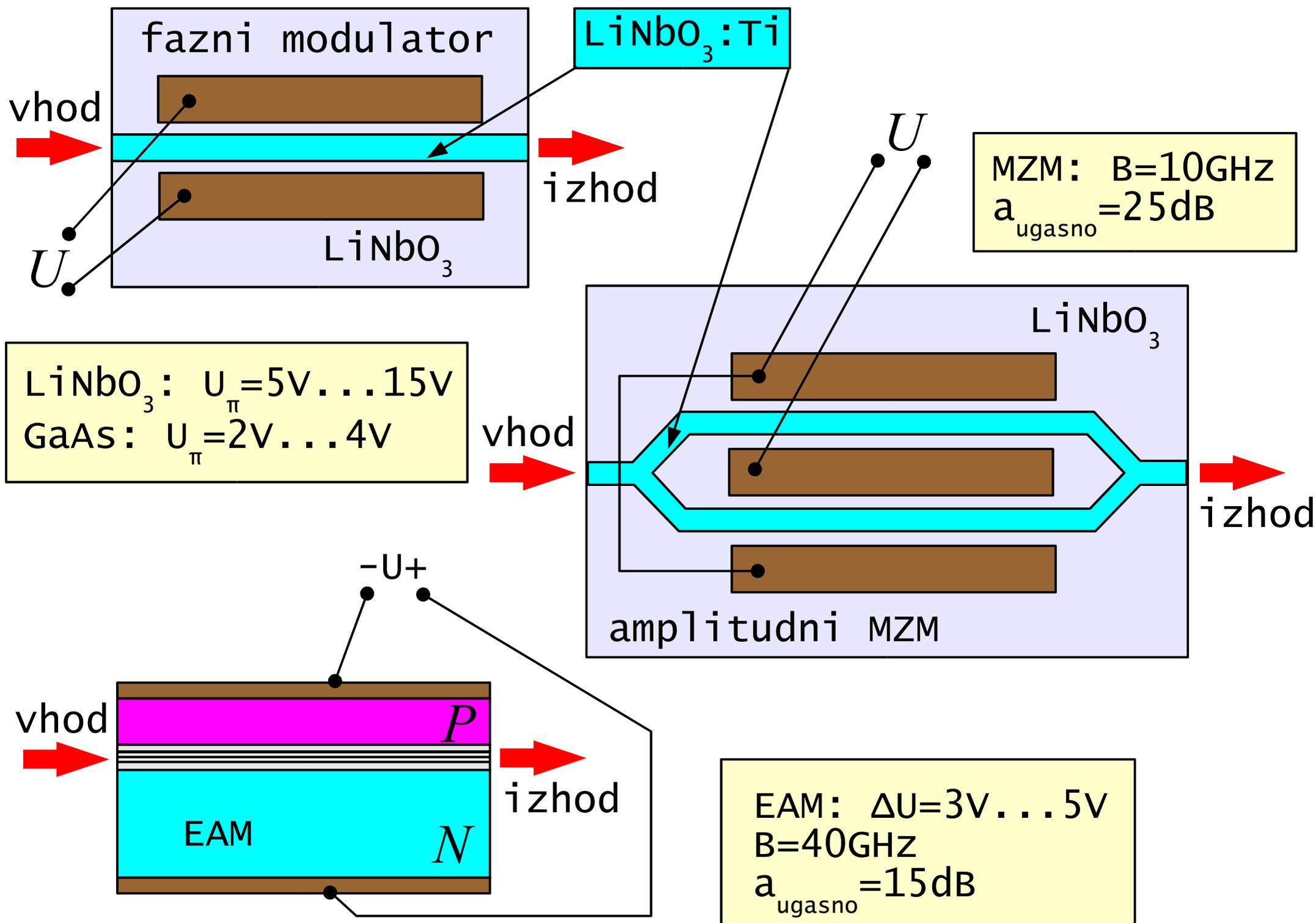
25 - spekter svetlobnega izvora in spekter modulacije.



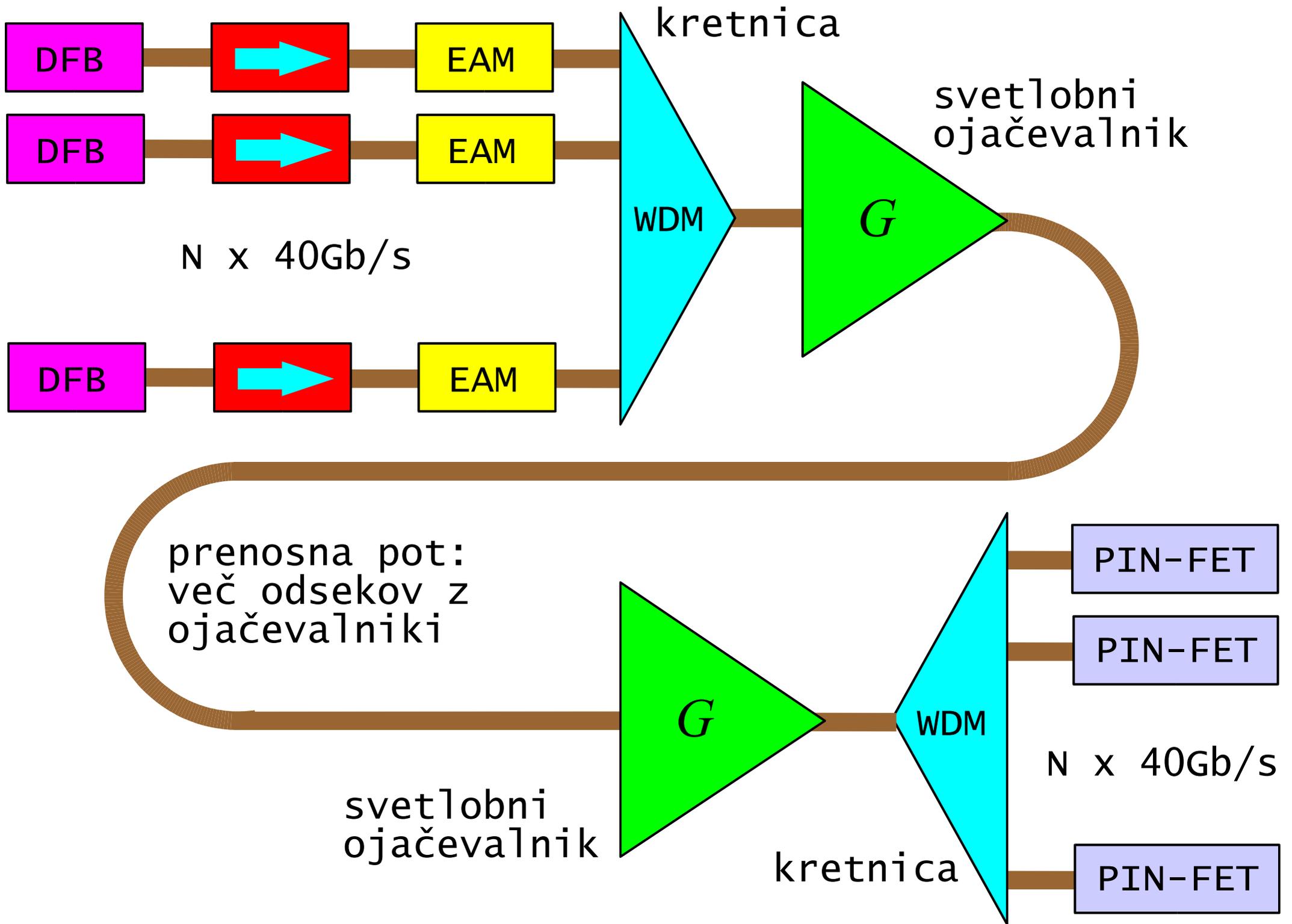
26 - komunikacijski laserji: FP, DFB in VCSEL.



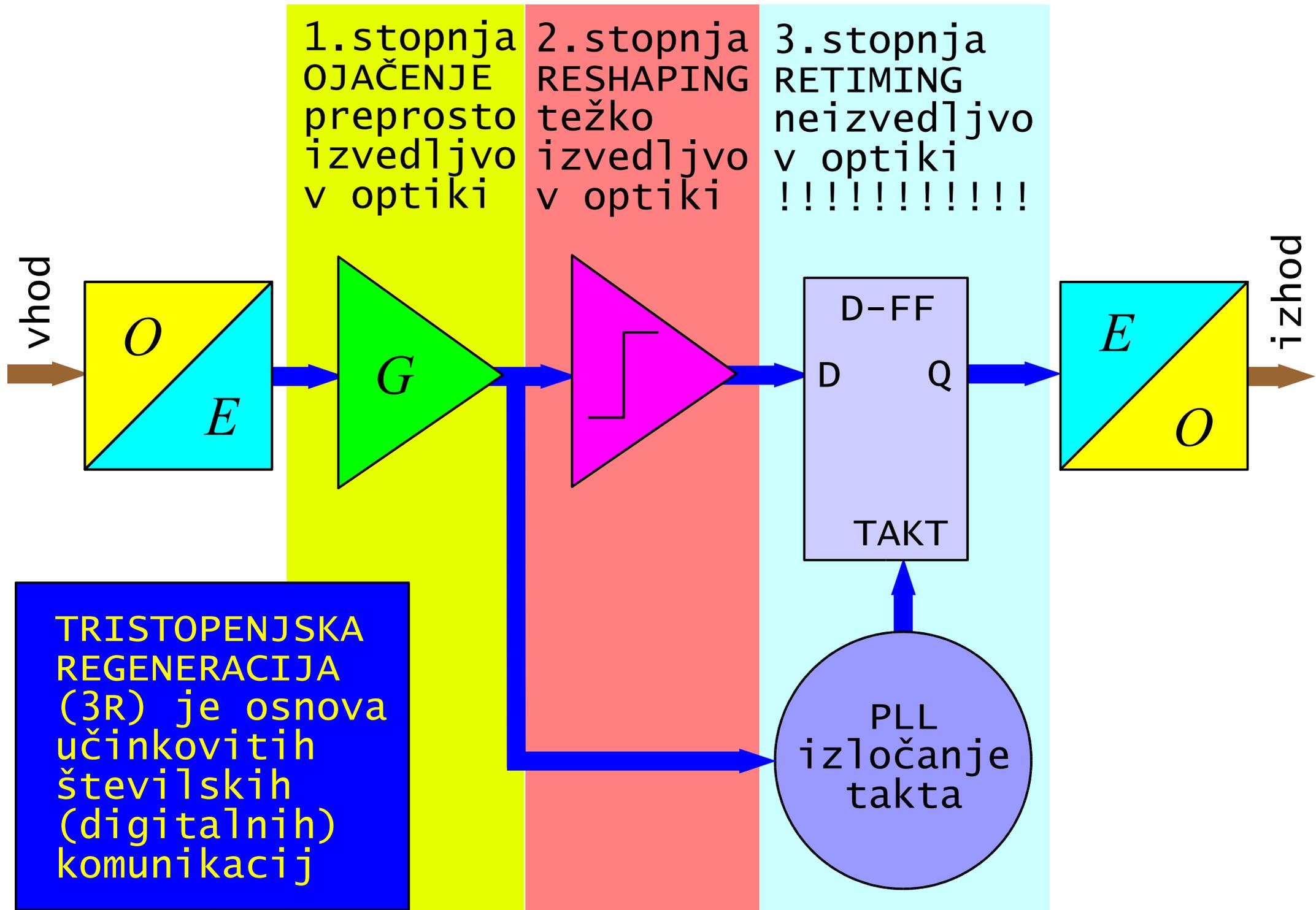
27 - Neposredna modulacija laserja: AM in FM.



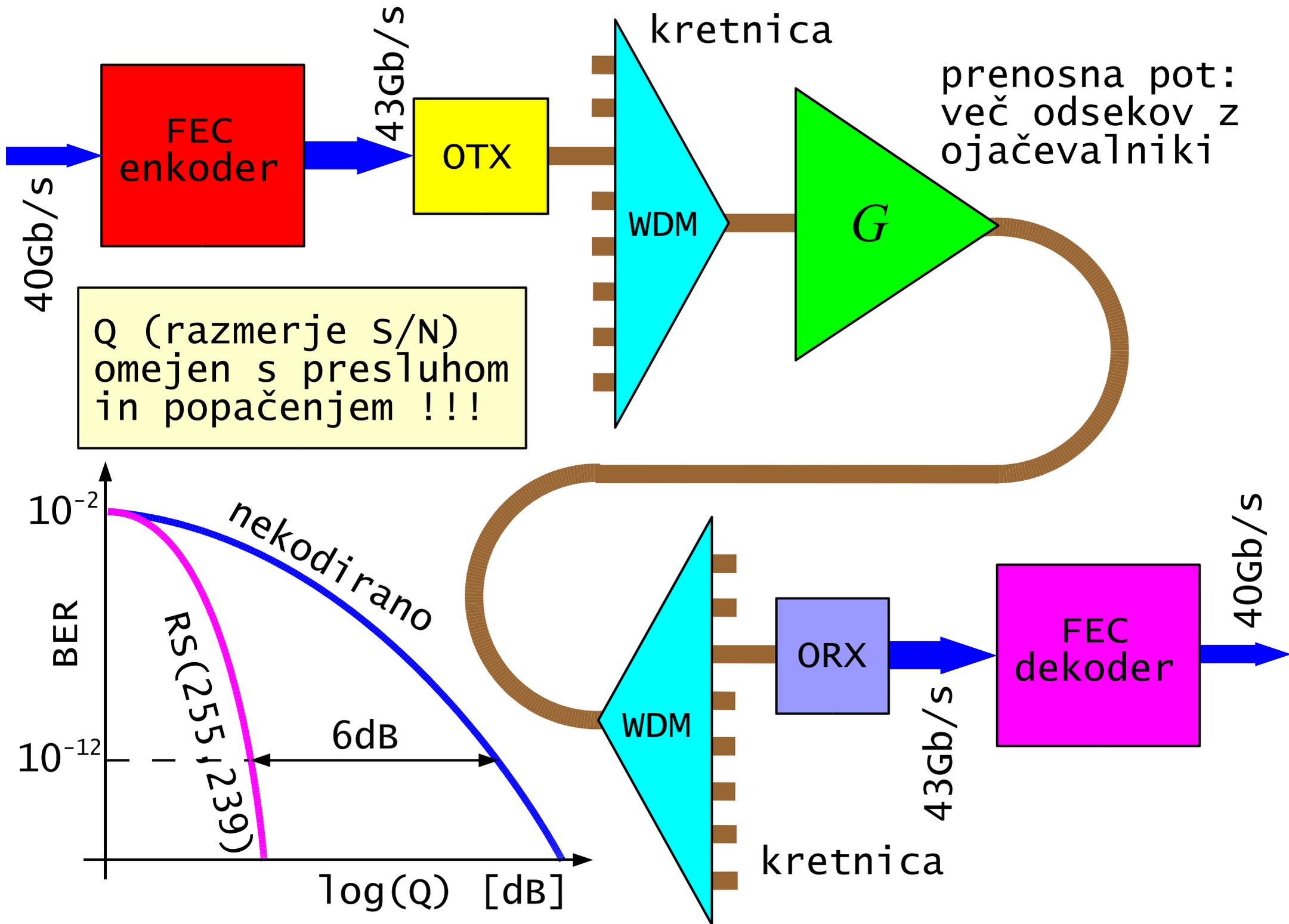
28 - zunanji modulatorji svetlobe: fazni, MZM in EAM.



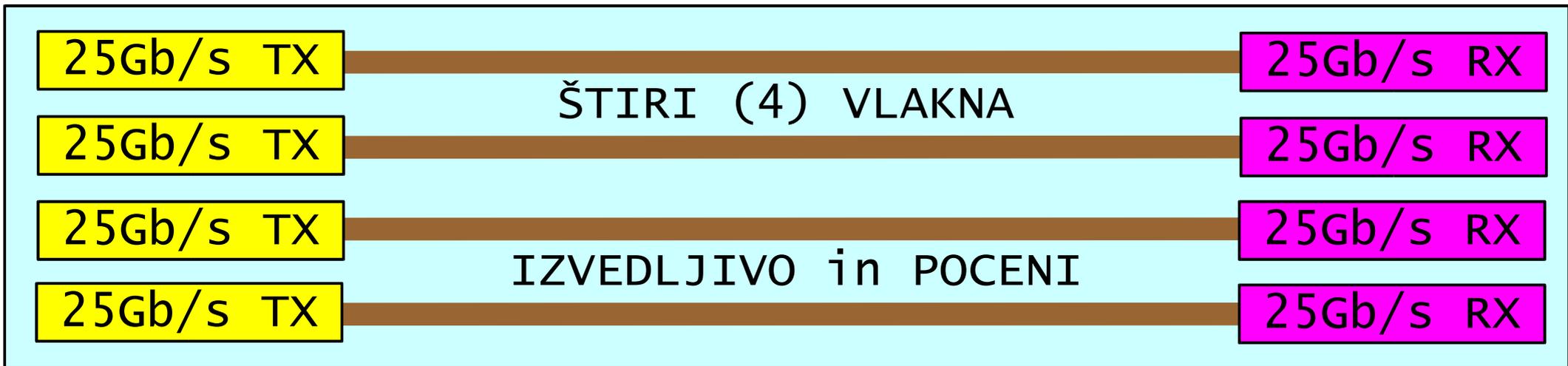
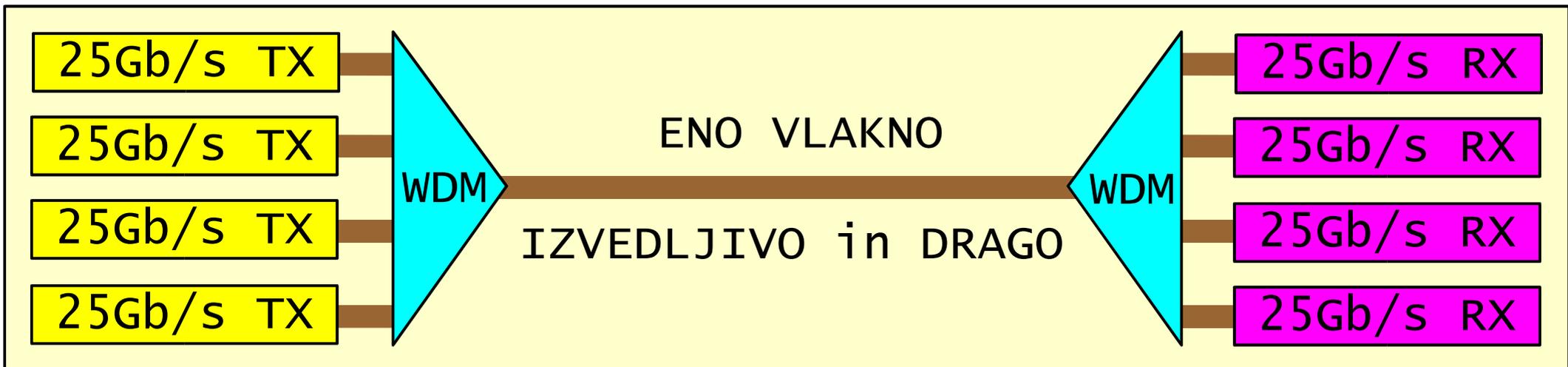
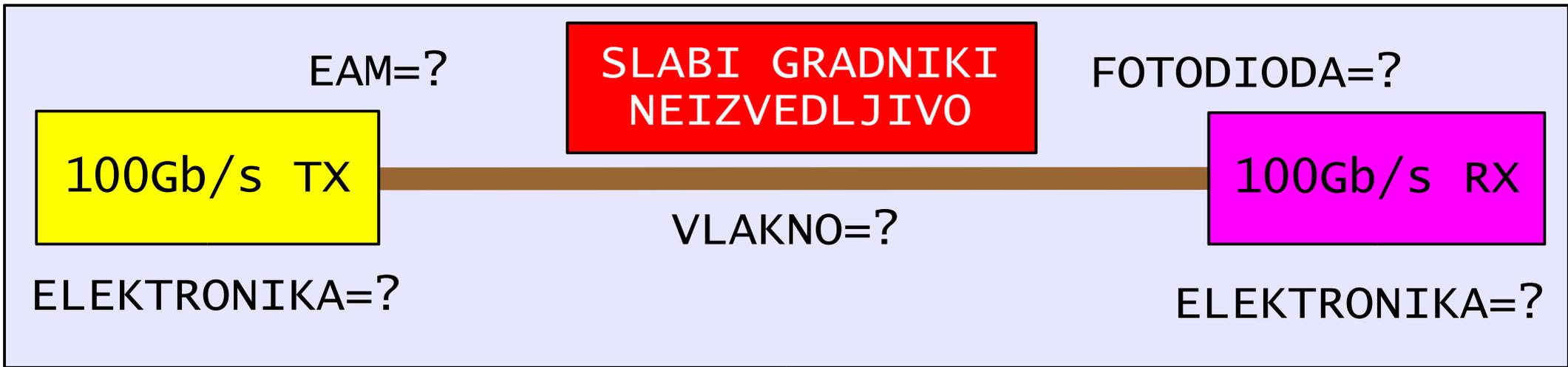
29 - Združevanje oddajnikov: kretnice in WDM.



30 - Regeneracija signala v svetlobni zvezi.

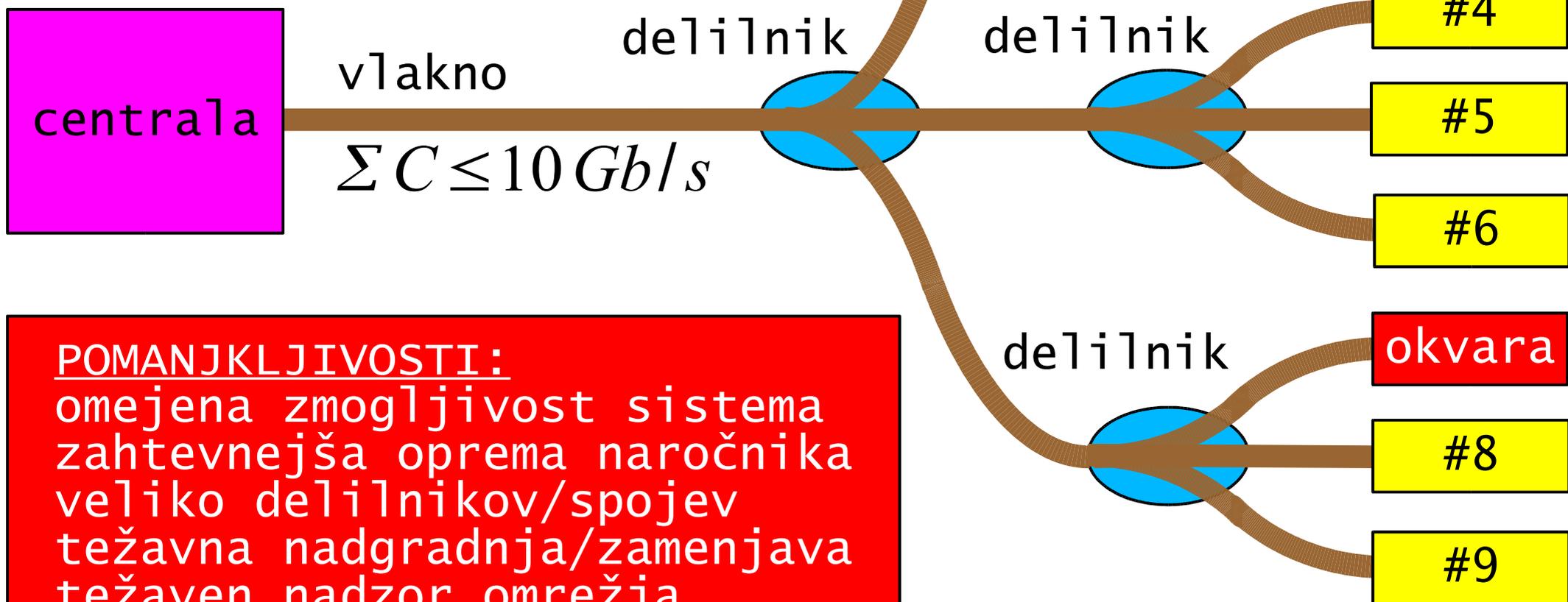


31 - vnaprejšnje popravljanje napak (FEC).



32 - Različice optičnega 100Gb/s Ethernet-a.

PRIHRANKI:  
enostavnejša oprema centrale  
manj svetlobnih vlaken  
statistika aktivnosti?



9 naročnikov

POMANJKLJIVOSTI:  
omejena zmogljivost sistema  
zahtevnejša oprema naročnika  
veliko delilnikov/spojev  
težavna nadgradnja/zamenjava  
težaven nadzor omrežja  
težavno iskanje napak  
pričakovani odpor uporabnikov

## OPTIKA

### PREDNOSTI:

nizka cena vlakna  
nizko slabljenje vlakna  
velika pasovna širina

### POMANJKLJIVOSTI:

težavna obdelava  
težavna integracija  
polprevodnik ni silicij  
popačenja vlakna

## ELEKTRONIKA

### PREDNOSTI:

visoka integracija  
različni tranzistorji  
preprosta obdelava  
nizka cena obdelave

### POMANJKLJIVOSTI:

visoko slabljenje vodov  
frekvenčna meja 100GHz?