

21. Seminar Optične Komunikacije

Laboratorij za Sevanje in Optiko

Fakulteta za Elektrotehniko

Ljubljana, 5. - 7. februar 2014

Svetlobni sprejemnik

Matjaž Vidmar

..... Seznam prosojnic:

- Slika 1 - Optične komunikacije v zrelih letih
- Slika 2 - Kam pes taco moli?
- Slika 3 - Fizika in merske enote
- Slika 4 - Zvrsti svetlobnih sprejemnikov
- Slika 5 - Režim delovanja fotodiode
- Slika 6 - Zgradba PIN fotodiode
- Slika 7 - Odzivnost PIN fotodiode
- Slika 8 - Shannon-ov izrek o zmogljivosti zveze
- Slika 9 - Spektralna gostota šuma
- Slika 10 - Toplotni in zrnati šum
- Slika 11 - Šum sprejemnika s PIN diodo
- Slika 12 - Razmerje Q in pogostnost napak
- Slika 13 - Domet PIN sprejemnika
- Slika 14 - PON razvod s PIN sprejemnikom
- Slika 15 - Svetlobni sprejemniki z ojačanjem
- Slika 16 - Fotodiode s plazovnim ojačanjem (APD)
- Slika 17 - Lastnosti APD sprejemnika
- Slika 18 - Domet APD sprejemnika
- Slika 19 - PON razvod z APD sprejemnikom
- Slika 20 - Izvedba preprostih sprejemnikov
- Slika 21 - PIN na potujoči val (TW-PIN)
- Slika 22 - Svetlobni predojačevalnik
- Slika 23 - Diferencialni PSK sprejemnik
- Slika 24 - Koherentni sprejemnik
- Slika 25 - Balančni sprejemnik
- Slika 26 - Kvadraturni sprejemnik
- Slika 27 - Sukanje kazalca/vektorja
- Slika 28 - Dvopolarizacijski sprejemnik
- Slika 29 - Stopnje regeneracije sprejema
- Slika 30 - Izvedbe zvez

Dve desetletji seminarjev Optične komunikacije - kaj se je spremenilo?

Nekoč (pre)velika pričakovanja brez inženirske utemeljenosti:

...pred dobrim desetletjem se je "optični balon" razpočil...

Znanstvena odkritja —————> inženirske rešitve!

Laboratorijski poskusi —————> zahteve standardov!

Fizikalna izvedljivost —————> ekonomska upravičenost!

Fizikalne merske enote —————> inženirske merske enote!

Razvoj drugih področij telekomunikacij: stroge OSI ravni protokolov!

Potreba po preglednih predavanjih o ključnih tehnologijah: tutorial!

Elektronika je cenejša in zmogljivejša tehnologija od mehanike (MEMS), akustike (piezoelektriki), mikrovalov, optike, atomskih ur itd.

Silicij je cenejši in zmogljivejši od III-V polprevodnikov.

Številska (digitalna) obdelava signalov je cenejša in zmogljivejša od analogne obdelave signalov.

Optični tranzistor, optični računalnik niti druge uporabne tehnologije optične obdelave signalov zaenkrat NE obstajajo.

Paketni prenos je cenejši in učinkovitejši od drugih vrst prenosa.

Združljivost zahteva uporabo sklada IP na višjih OSI ravneh in uporabo Ethernet standardov na nižjih OSI ravneh.

Nespoštovanje OSI ravni oziroma krpanje nezdružljivih (nepotrebnih) protokolov vodi v katastrofo.

V telekomunikacijskem sprejemniku so signali najšibkejši v celotni zvezi.
 V svetlobnem sprejemniku pride najprej do izraza zrnati (kvantni) značaj
 elektromagnetnega valovanja:

$$\nu [\text{Hz}] \equiv \text{frekvenca svetlobe}$$

$$W_f = h \nu = \frac{h c_0}{\lambda} \equiv \text{energija fotona}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \equiv \text{Planck - ova konstanta}$$

V področju svetlobnih frekvenc je praktična merska enota za energijo
 fotona elektronski volt [eV]:

$$W [\text{eV}] = \frac{1}{|Q_e|} \cdot W [\text{J}]$$

$$Q_e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

$$W_f [\text{eV}] = \frac{h c_0}{\lambda [\mu\text{m}]}$$

$$h \cdot c_0 = 1.24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}$$

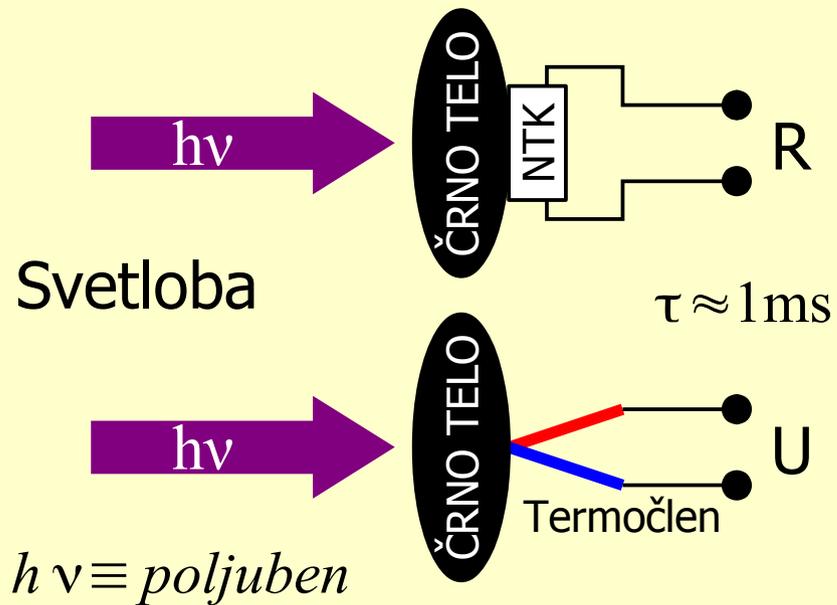
Toplotna energija:

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad T = 293 \text{ K}$$

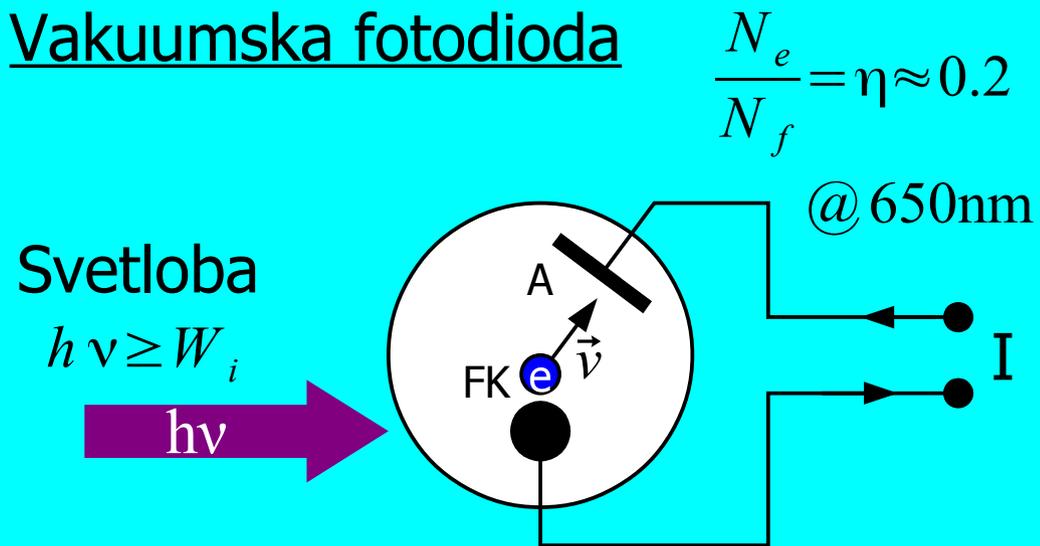
$$W_T = k_B T = 4 \cdot 10^{-21} \text{ J} = 0.025 \text{ eV}$$

Svetloba	Območje λ	Območje W_f	Primerjava W
Vidna	400nm...700nm	3.1eV...1.7eV	$W_f \gg W_T$
Bližnja IR	800nm...2 μm	1.5eV...0.6eV	$W_f > W_T$
Toplotna IR	3 μm ...100 μm	0.4eV...0.012eV	$W_f \approx W_T$

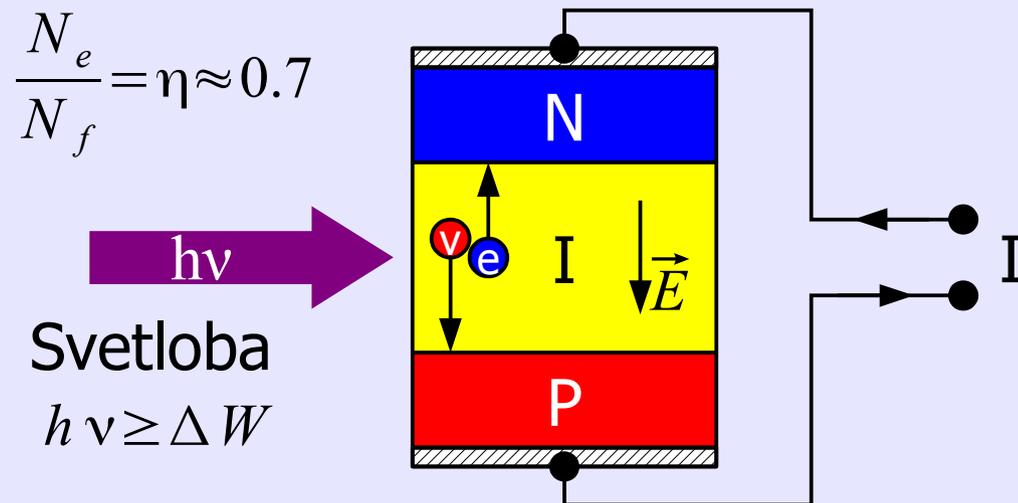
Toplotni sprejemnik



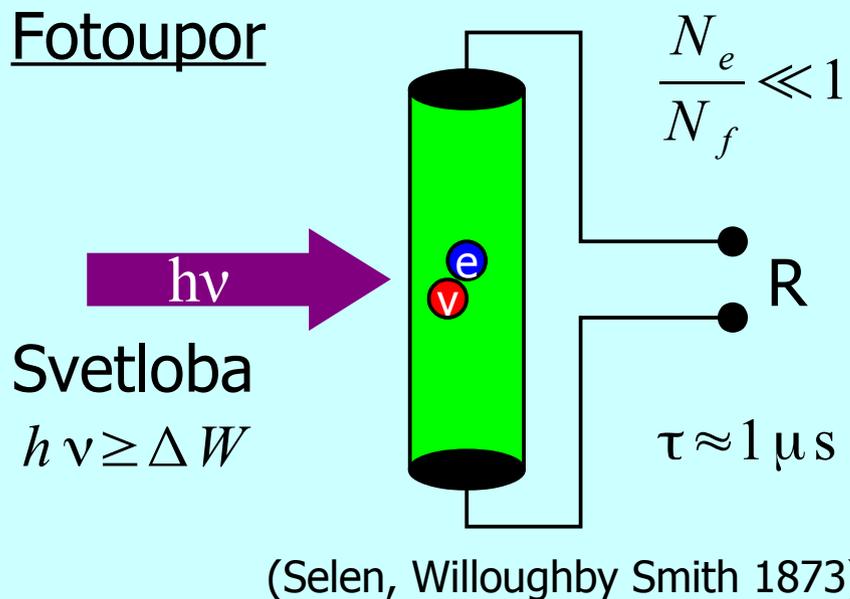
Vakuumska fotodioda



Polprevodniška fotodioda



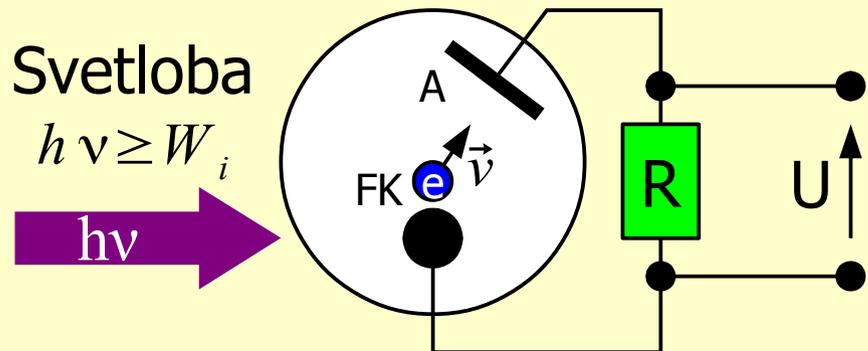
Fotoupor



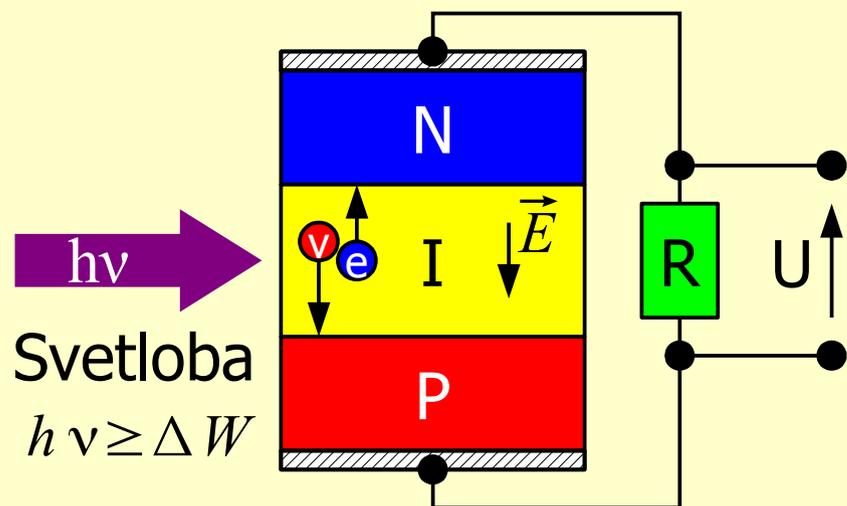
$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \equiv \text{Planck} - \text{ova konstanta}$$

$$W_f = h\nu \equiv \text{energija fotona}$$

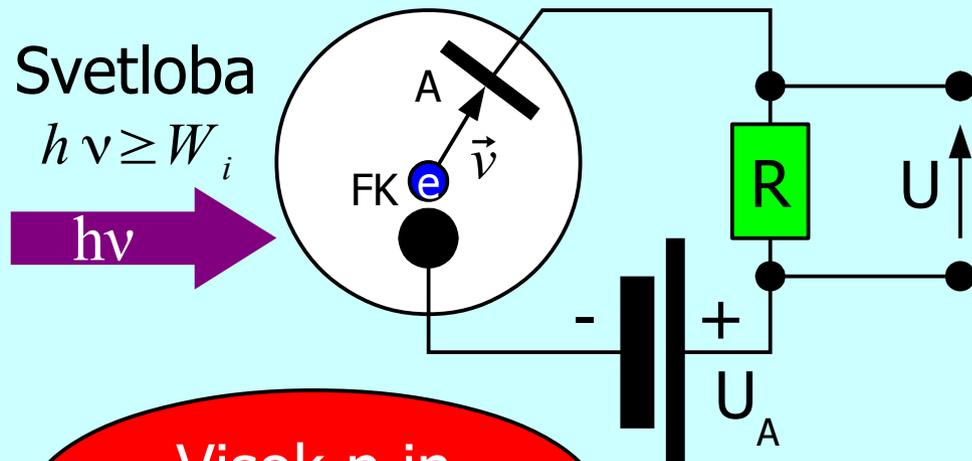
Fotovoltaični režim



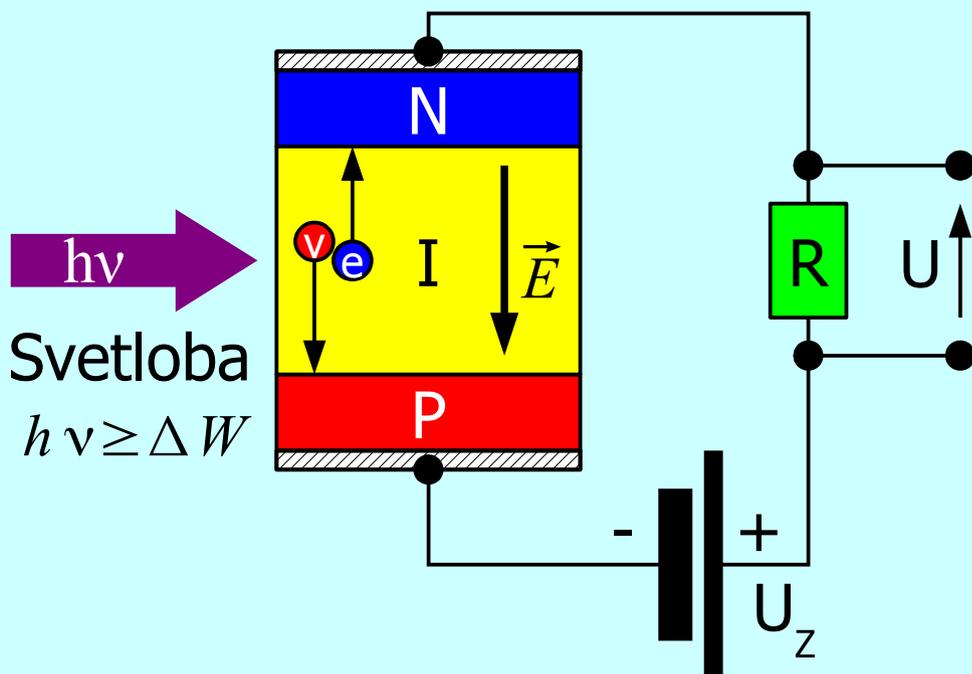
Pretvorba svetlobne
moči v električno...



Fotouporovni režim



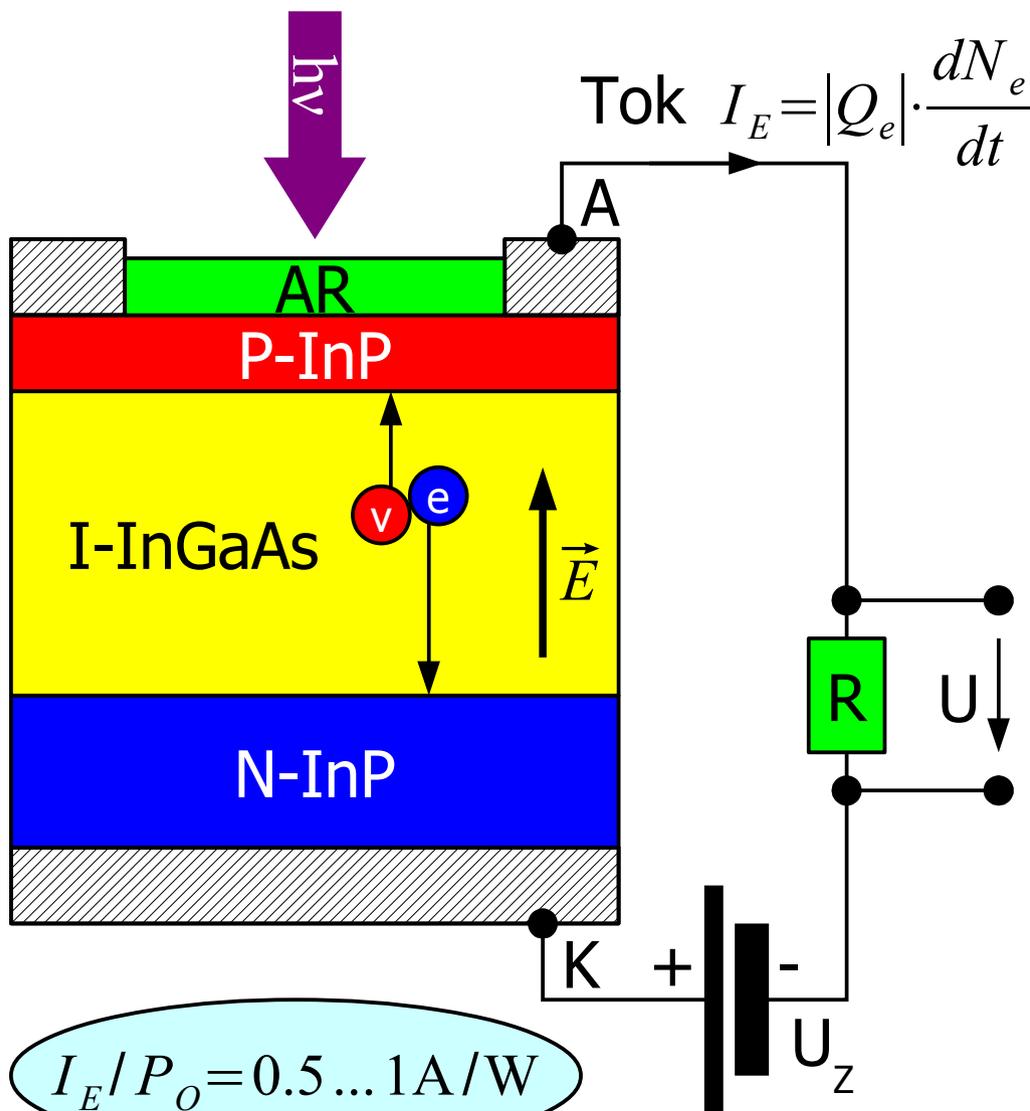
Visok η in
hiter odziv...



Svetlobna
moč
 $P_o = h\nu \cdot \frac{dN_f}{dt}$

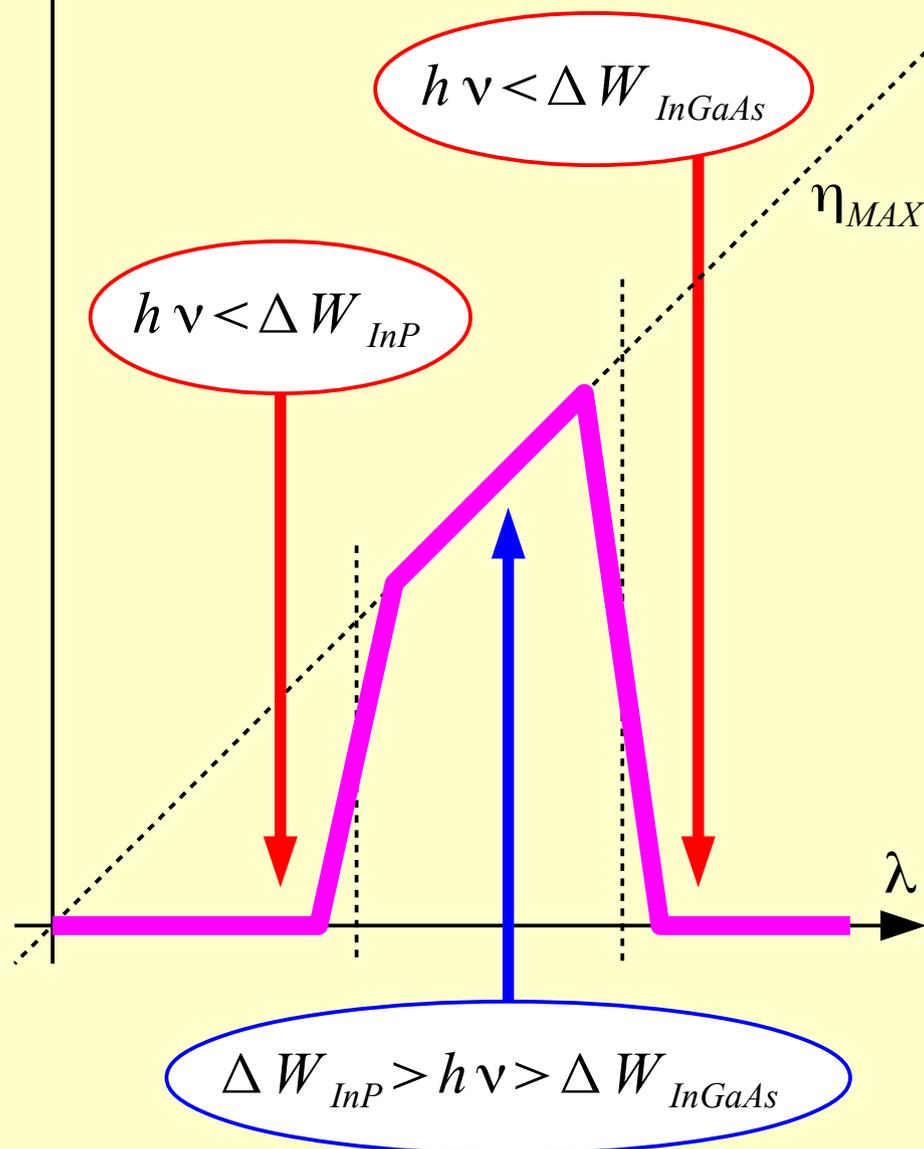
Kvantni izkoristek

$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_f} \quad \eta_{MAX} \approx 0.7$$



Odzivnost

$$I_E / P_o \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right] = \frac{N_e |Q_e|}{N_f h\nu} = \eta(\lambda) \cdot \frac{|Q_e| \lambda}{h c_0}$$

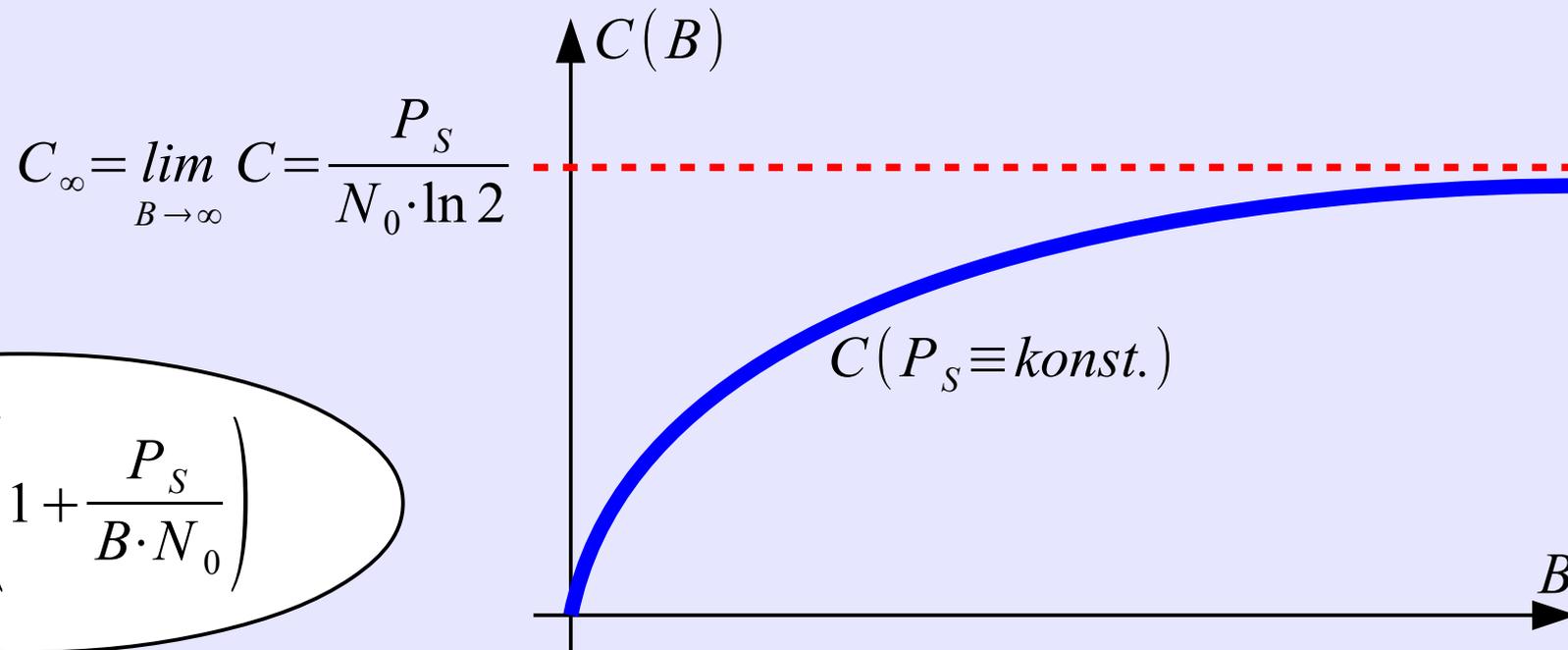


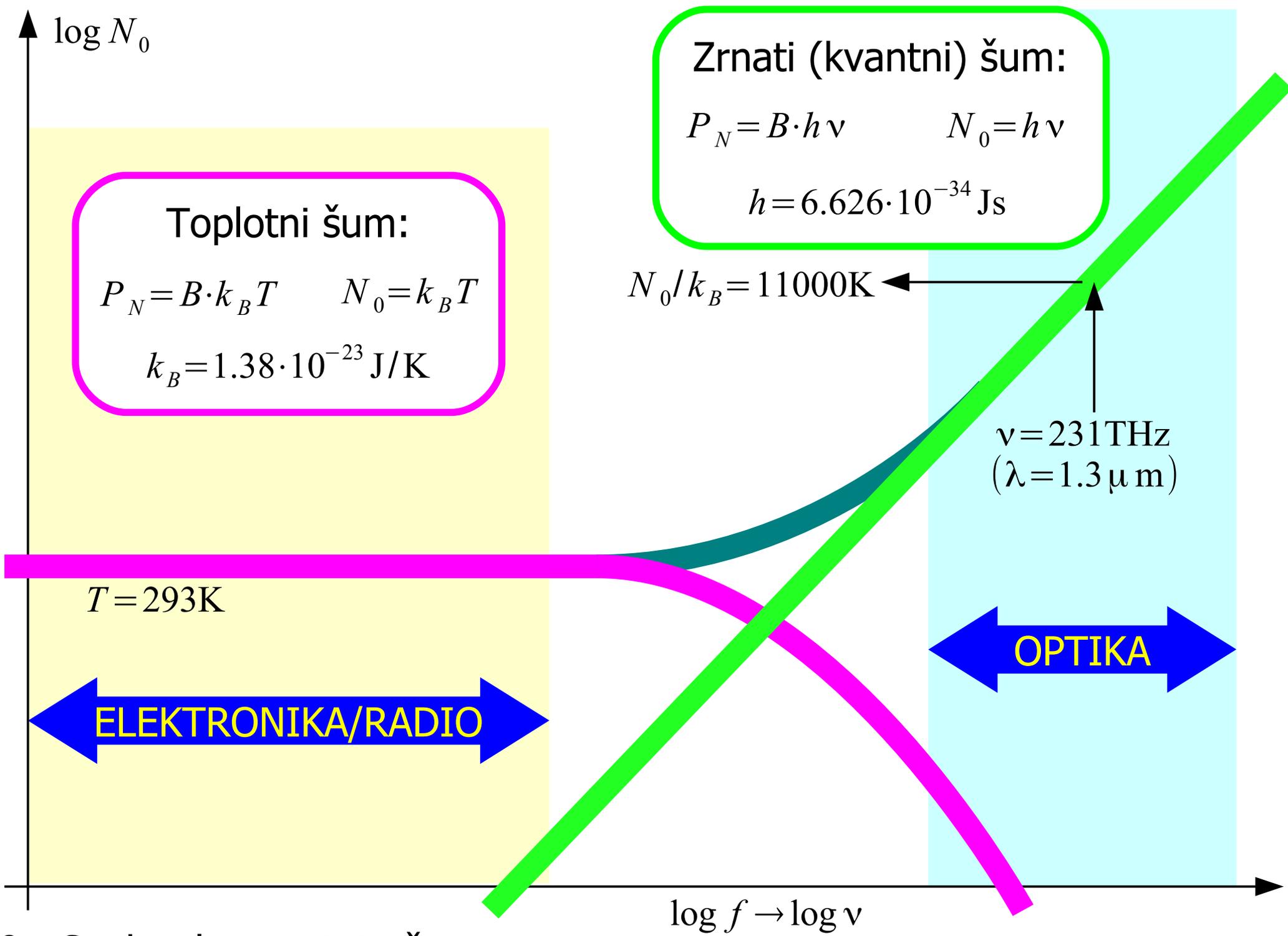
Informacija $I[\text{bit}] = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{W_S}{W_N} \right)$

Pasovna širina $B = \frac{1}{2 \cdot T_{bit}}$

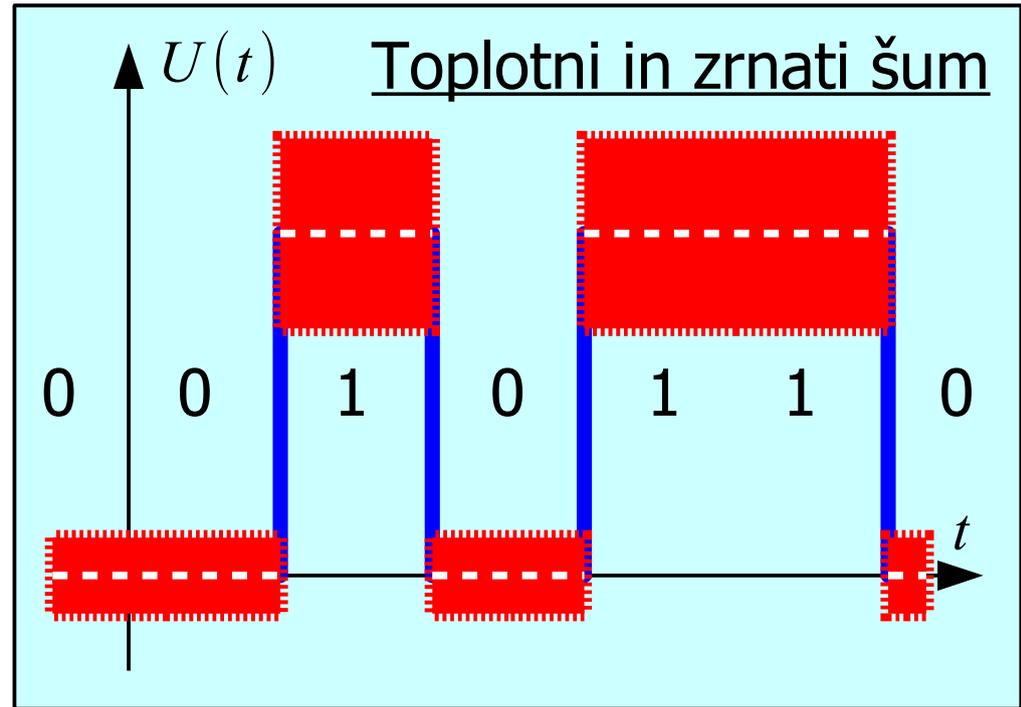
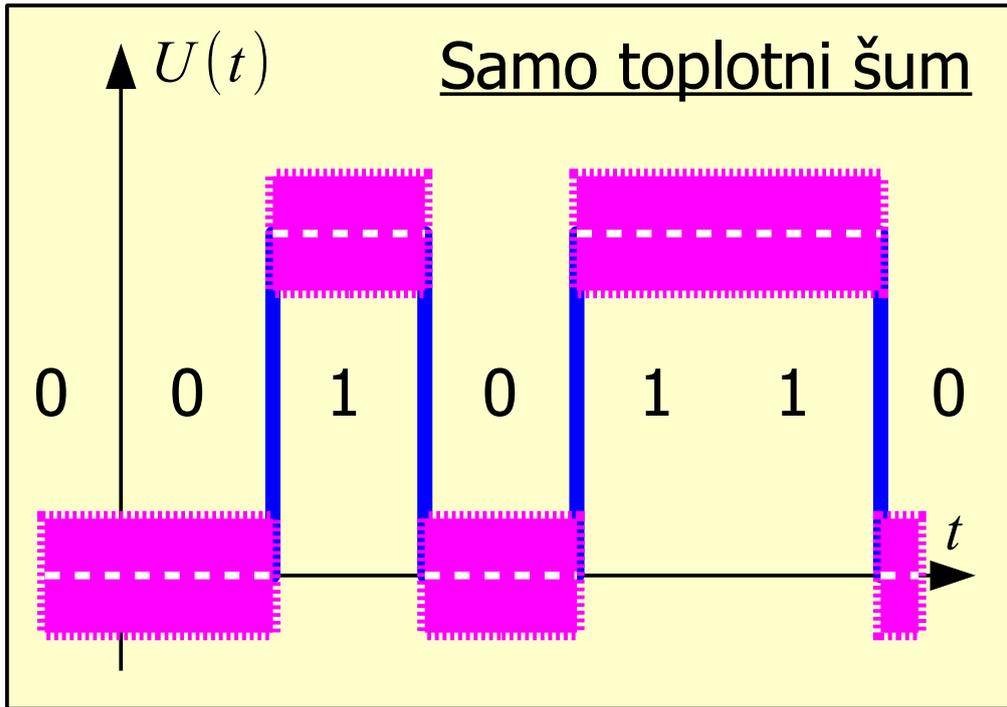
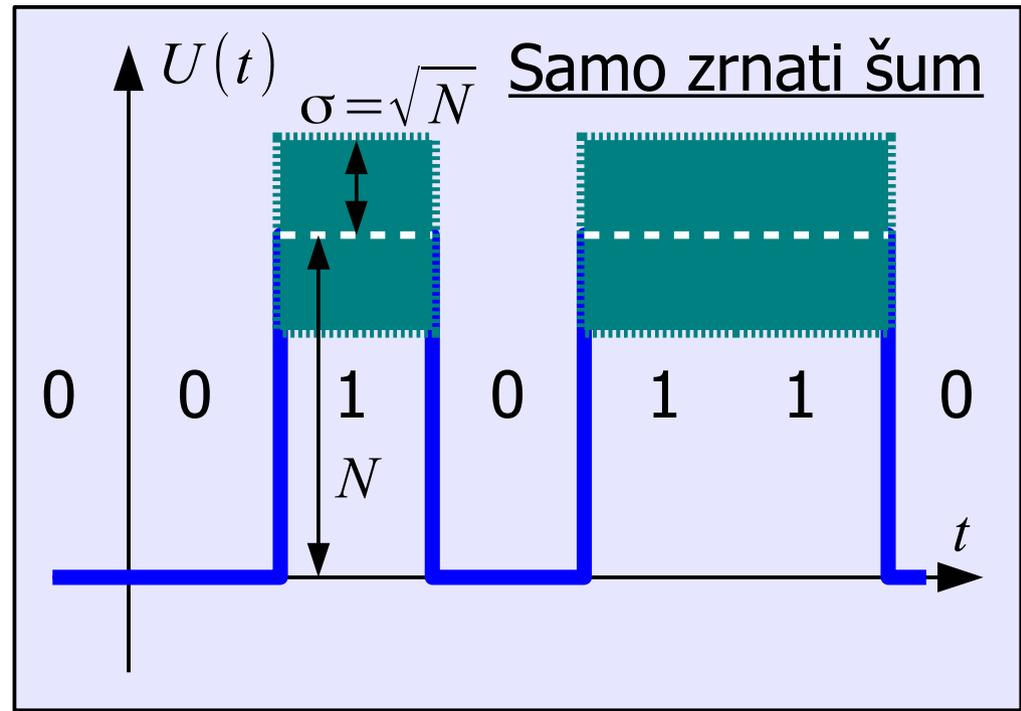
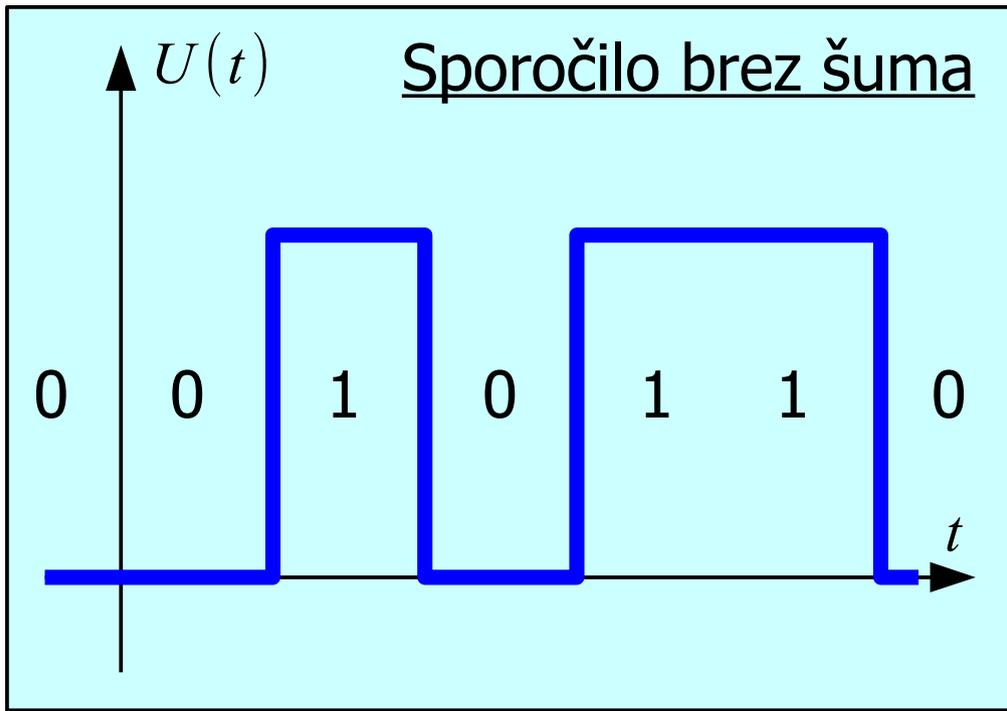
Zmogljivost $C[\text{bit/s}] = \frac{dI}{dt} = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$

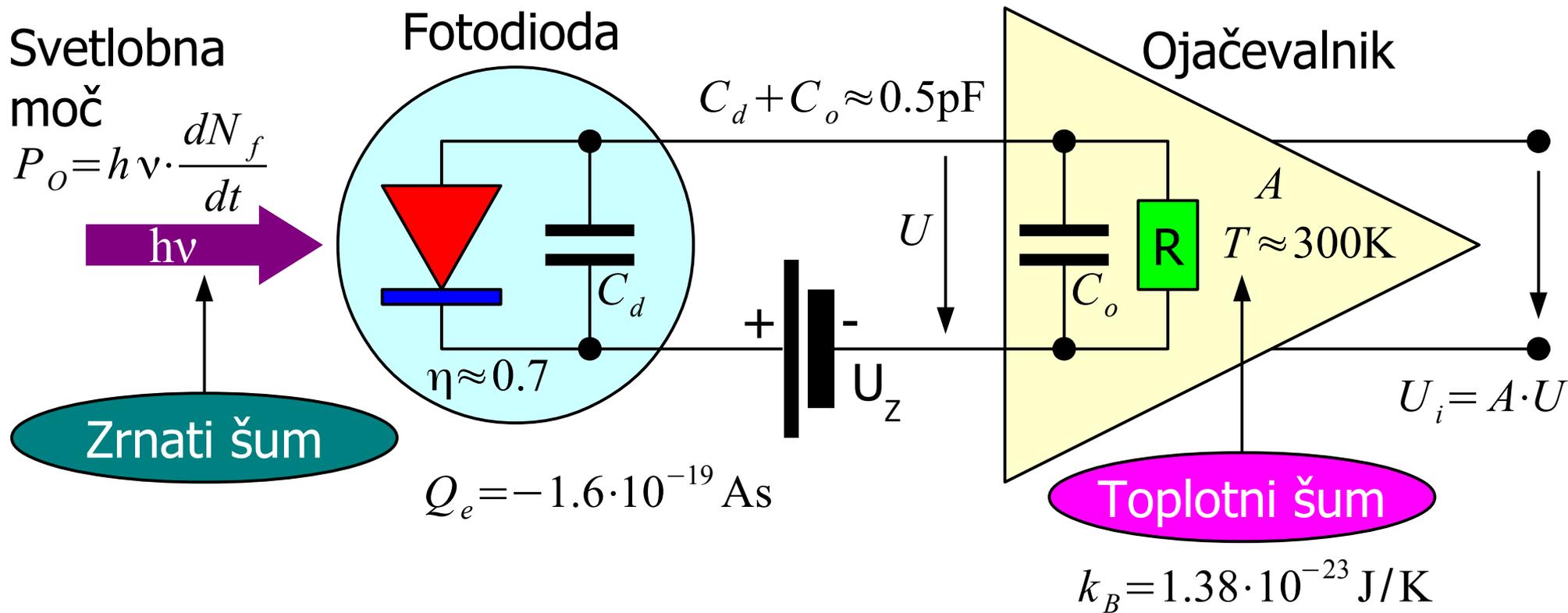
Moč šuma $P_N = B \cdot N_0$





9 - Spektralna gostota šuma





$$U_s = \frac{N_e |Q_e|}{C_d + C_o} = \frac{\eta N_f |Q_e|}{C_d + C_o} = N_e \cdot 0.32 \mu \text{ V}$$

$$U_{\text{ZRNATI}} \approx 0.32 \mu \text{ V}_{\text{eff}} \cdot \sqrt{N_e}$$

Toplotni šum ojačevalnika je dosti večji od zrnatega šuma elektronov:

$$B \approx \frac{1}{2\pi R(C_d + C_o)} \quad U_{\text{TOPLOTNI}} = \sqrt{P_N R} = \sqrt{B k_B T R} \approx \sqrt{\frac{k_b T}{2\pi(C_d + C_o)}} \approx 36 \mu \text{ V}_{\text{eff}}$$

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

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

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

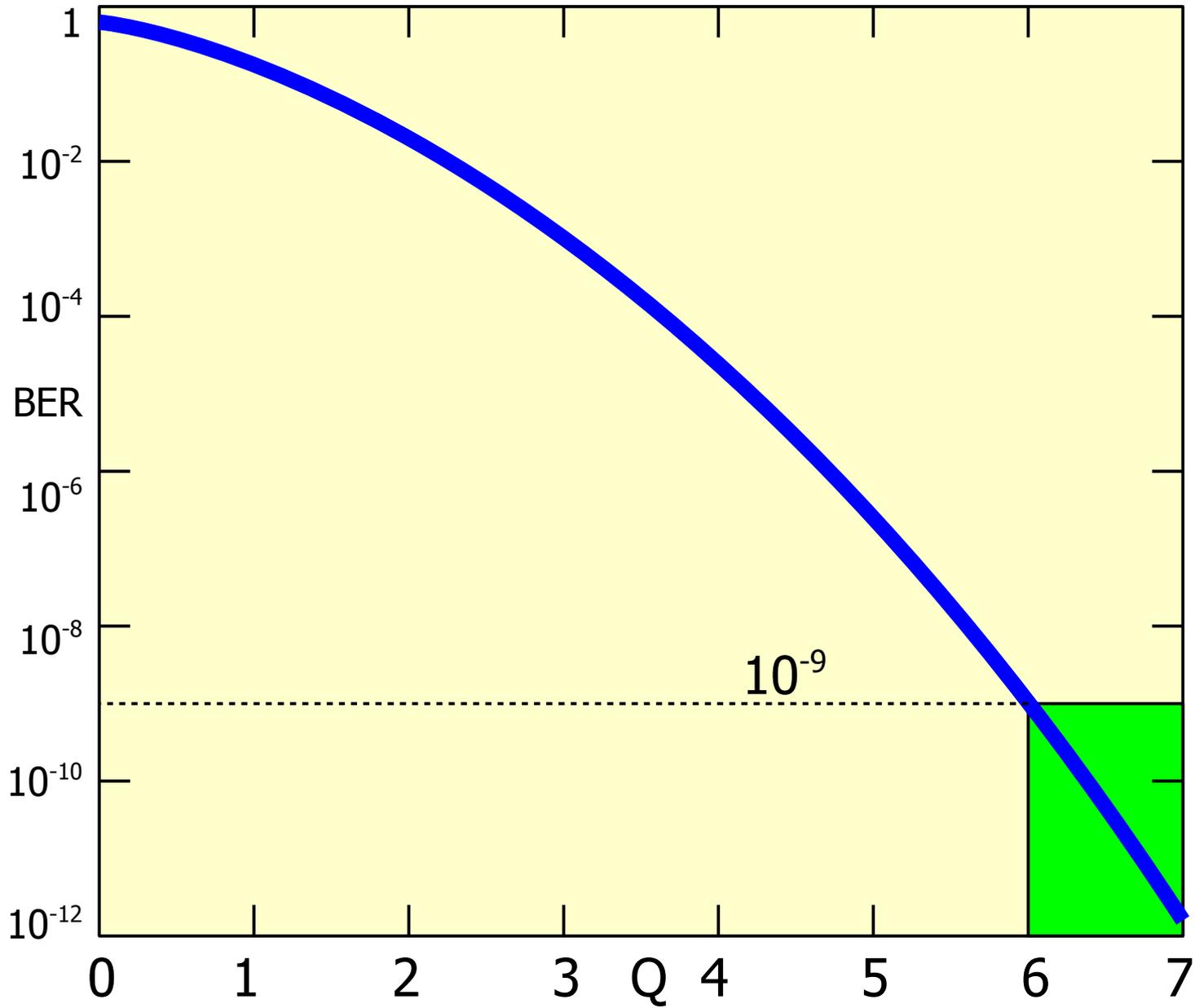
$$Q \approx 6 \dots 7$$

$$U_s \approx 450 \mu V$$

$$\text{enica} \rightarrow N_e \approx 1400$$

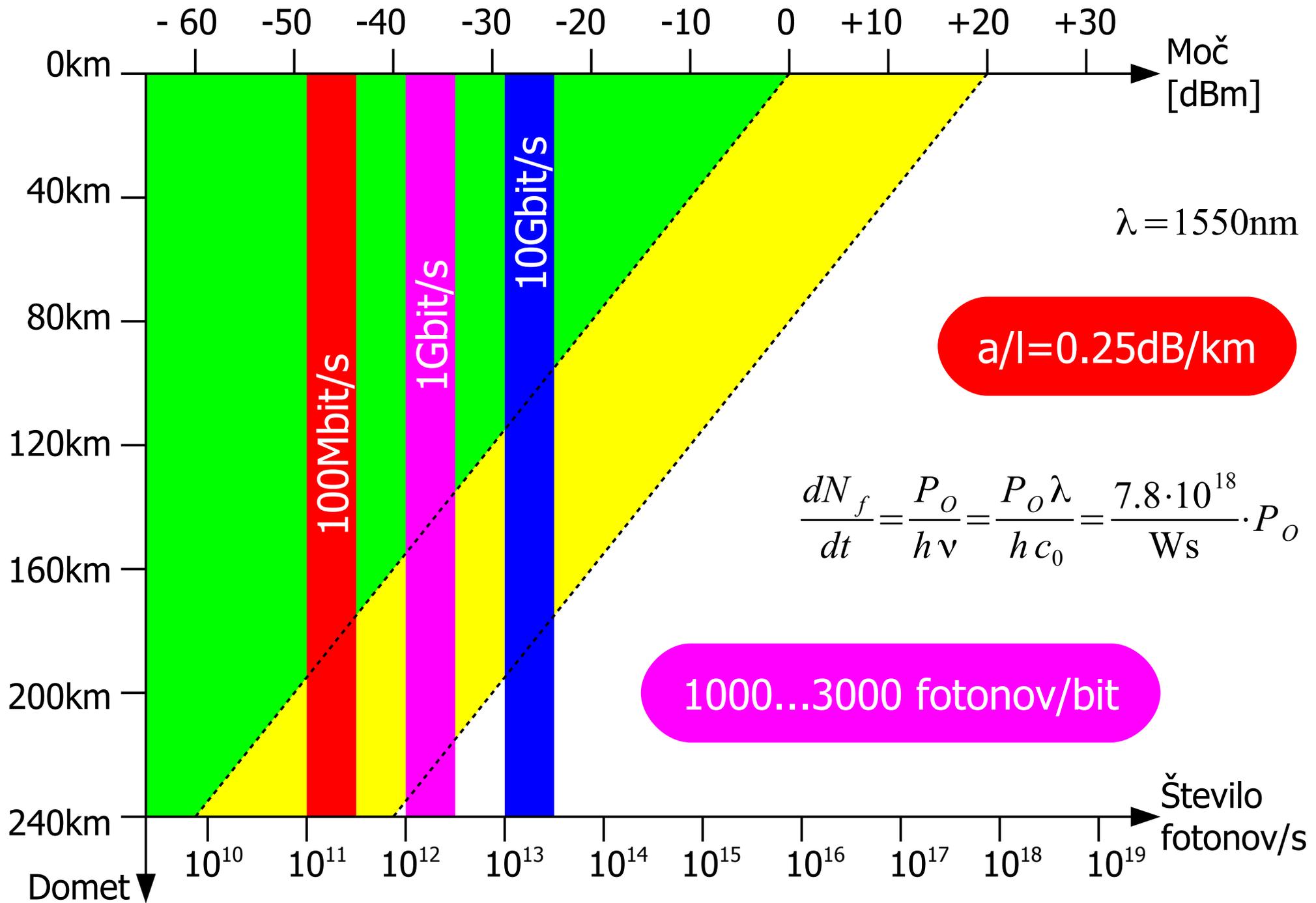
$$\eta \approx 0.7$$

$$\text{enica} \rightarrow N_f \approx 2000$$

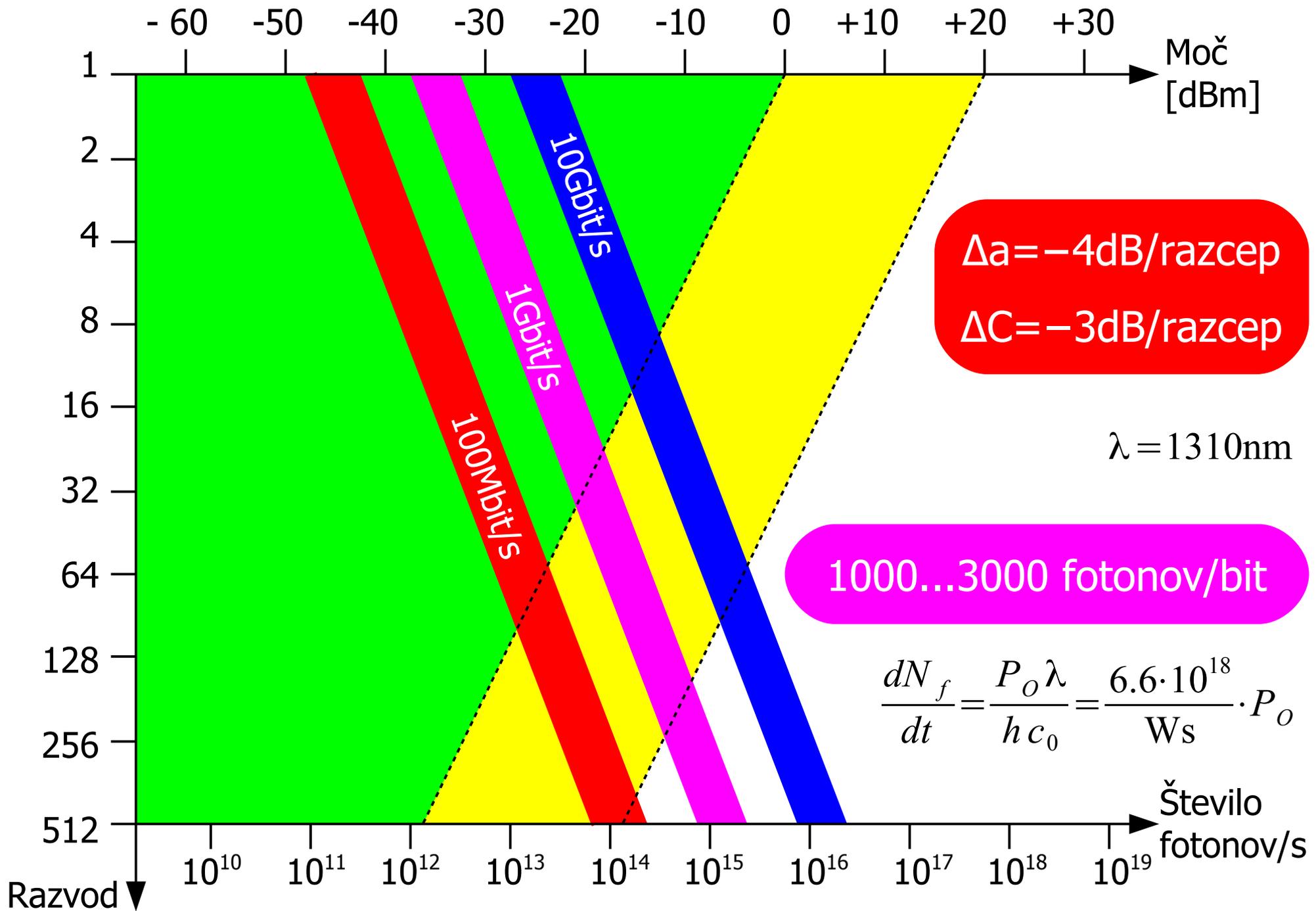


50% enic —>

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



13 - Domēt PIN sprejemnika



14 - PON razvod s PIN sprejemnikom

Fotopomnoževalka

$$I_A = I_{FK} \cdot M^N$$

$$U_B \approx 100V$$

$$M \approx 3...5$$

$$N = 3$$

($N = 8...14$)

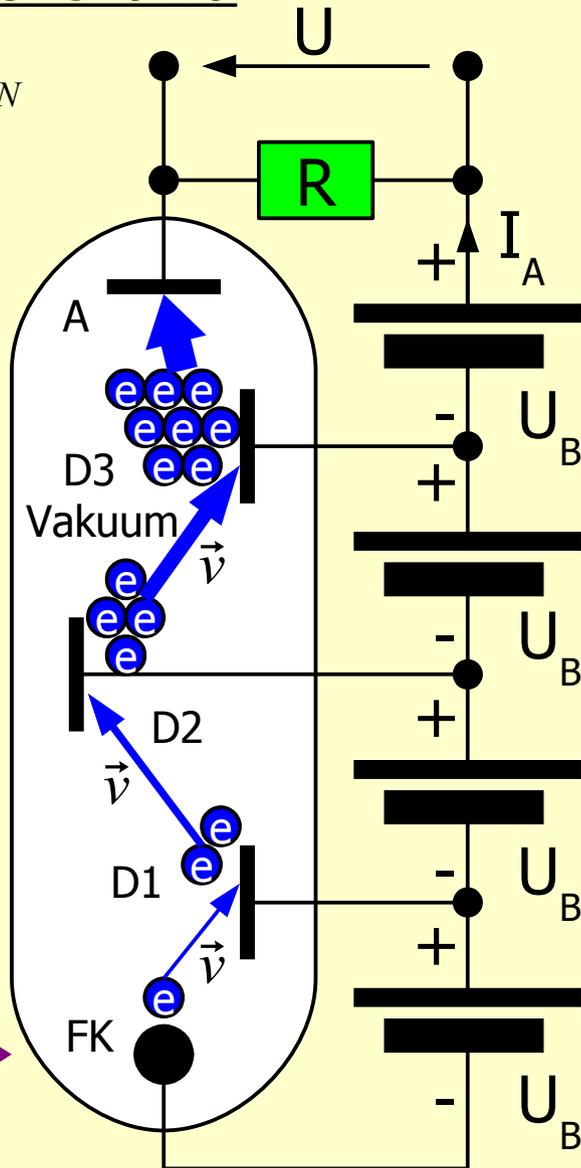
$$\tau \approx 1 \mu s$$

Svetloba

$$h\nu \geq W_i$$

$$h\nu$$

$$\frac{N_{eFK}}{N_f} = \eta_{FK} \approx 10^{-6} @ 1550nm$$



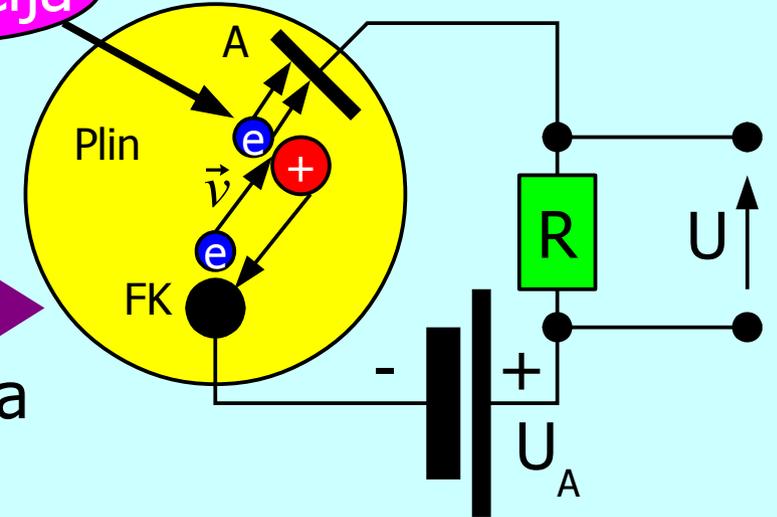
Ionizacija

Plinska fotodiioda

$$h\nu$$

Svetloba

$$h\nu \geq W_i$$



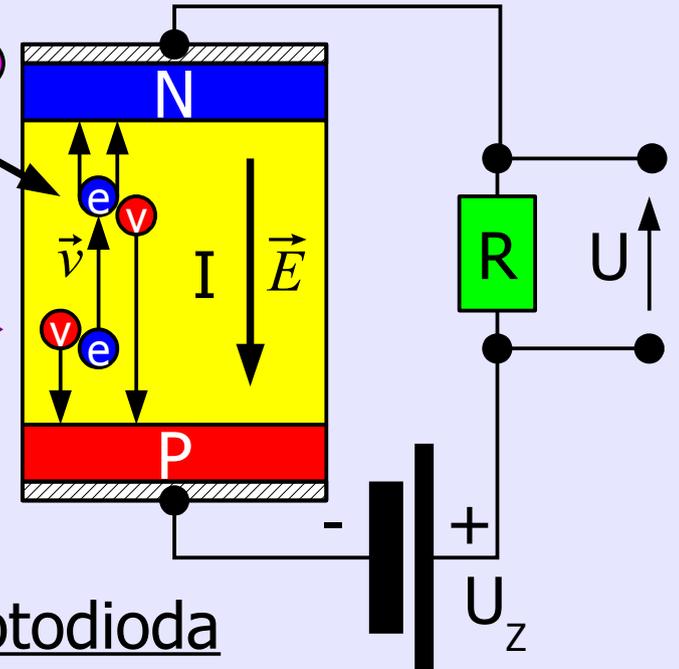
Ionizacija

$$h\nu$$

Svetloba

$$h\nu \geq \Delta W$$

Plazovna fotodiioda

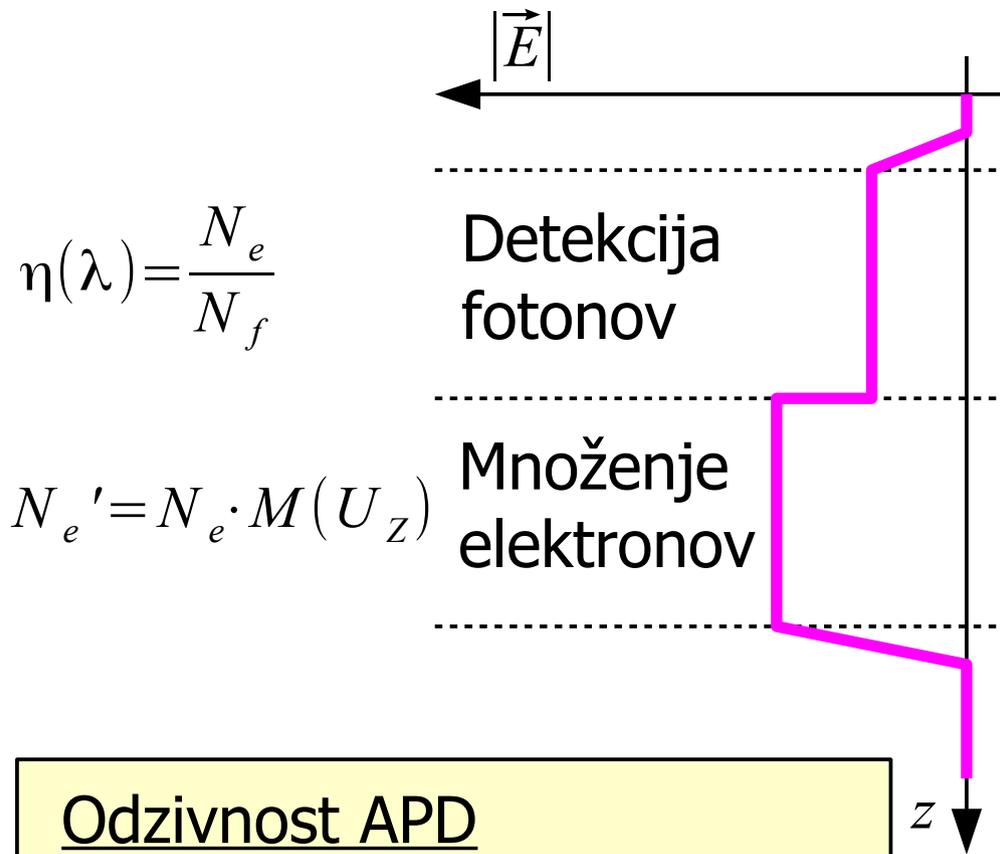


Svetlobna moč

$$P_o = h\nu \cdot \frac{dN_f}{dt}$$

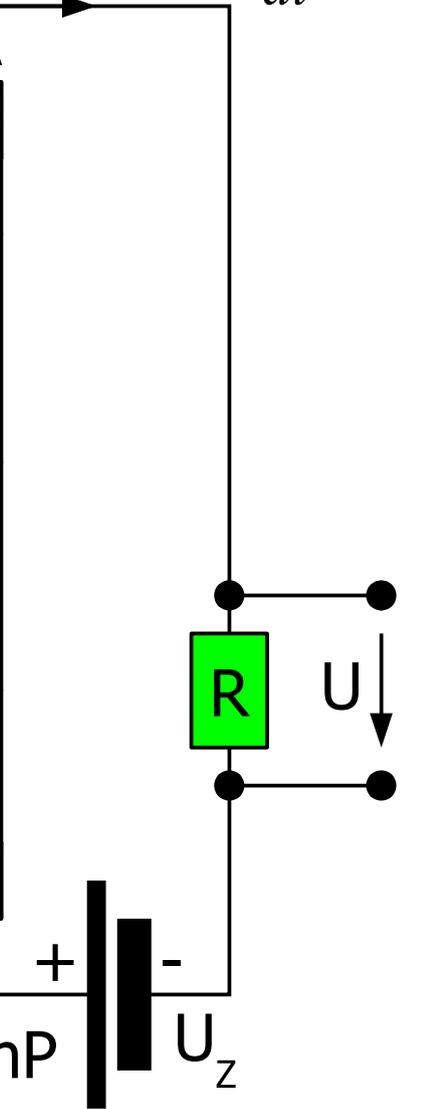
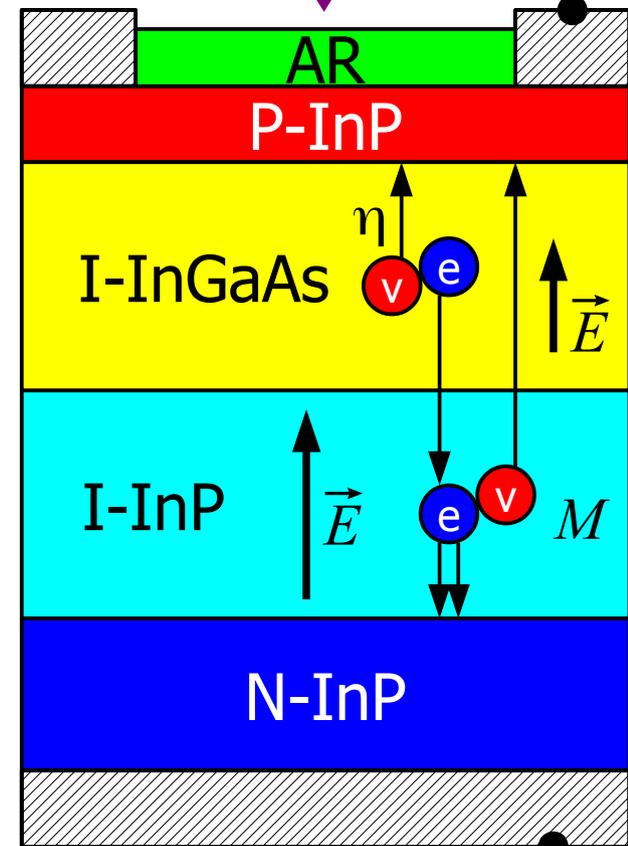


Tok $I_E = |Q_e| \cdot \frac{dN_e}{dt} \cdot M$



$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_f}$$

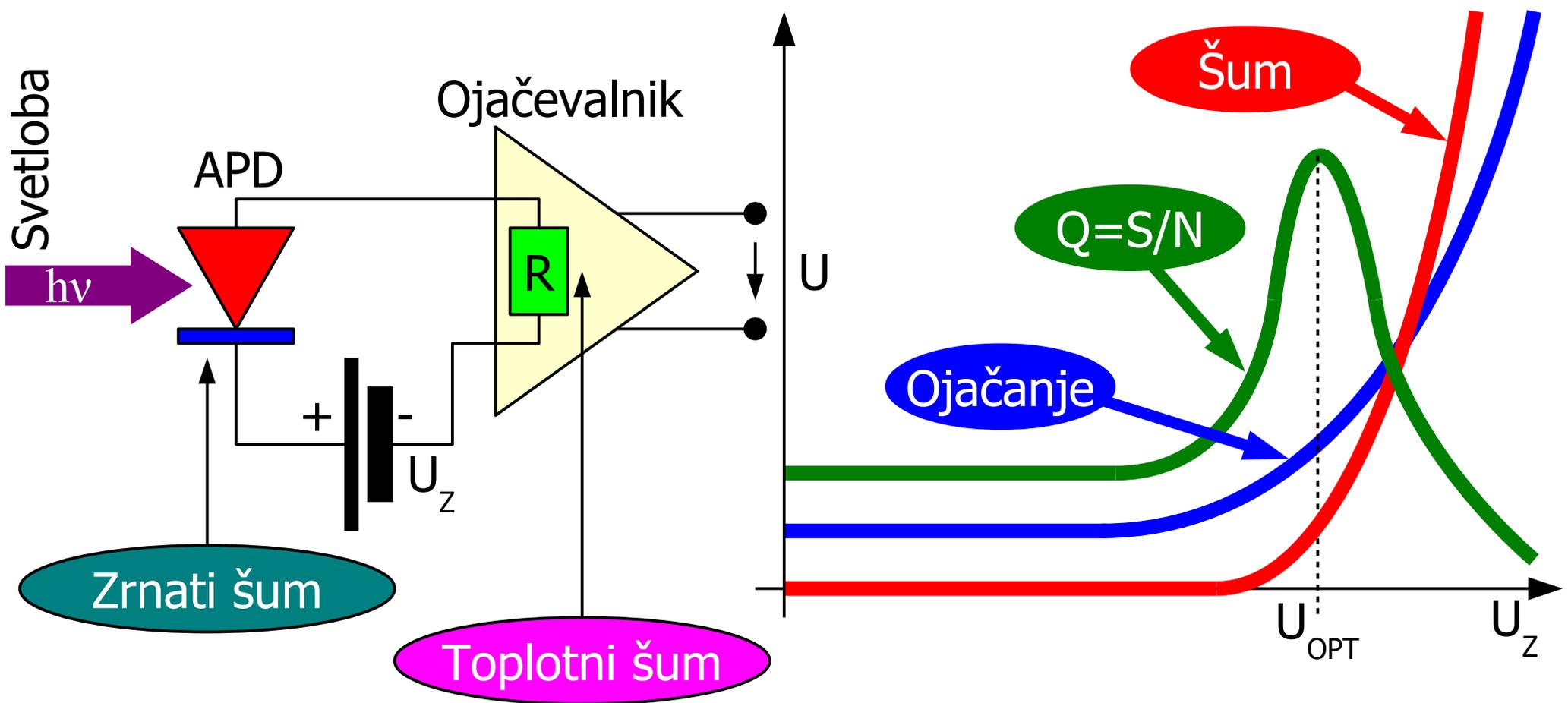
$$N_e' = N_e \cdot M(U_z)$$



Heterostruktura InGaAs/InP

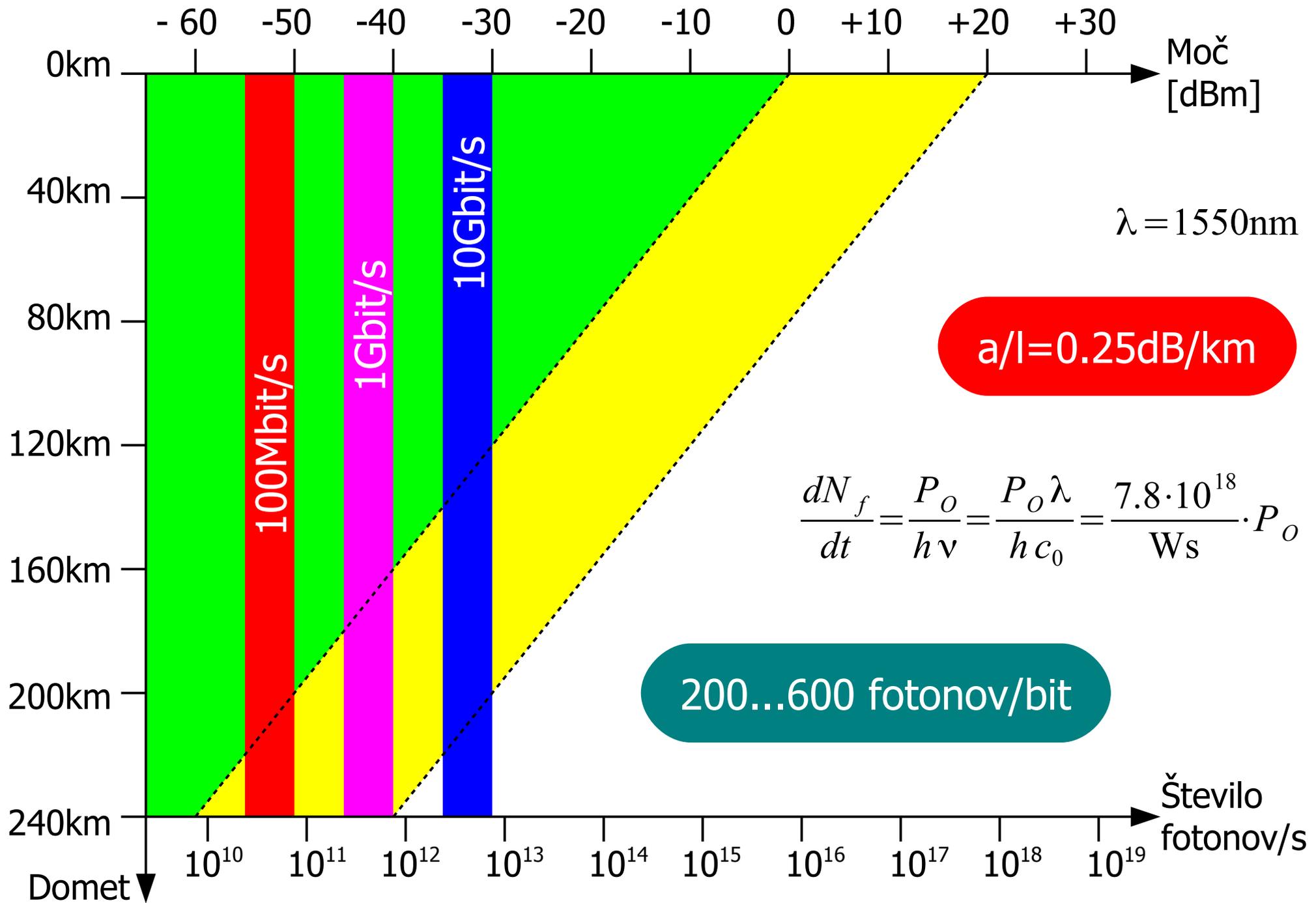
Odzivnost APD

$$I_E / P_o \left[\frac{A}{W} \right] = \eta(\lambda) \cdot \frac{|Q_e| \lambda}{h c_0} \cdot M(U_z)$$

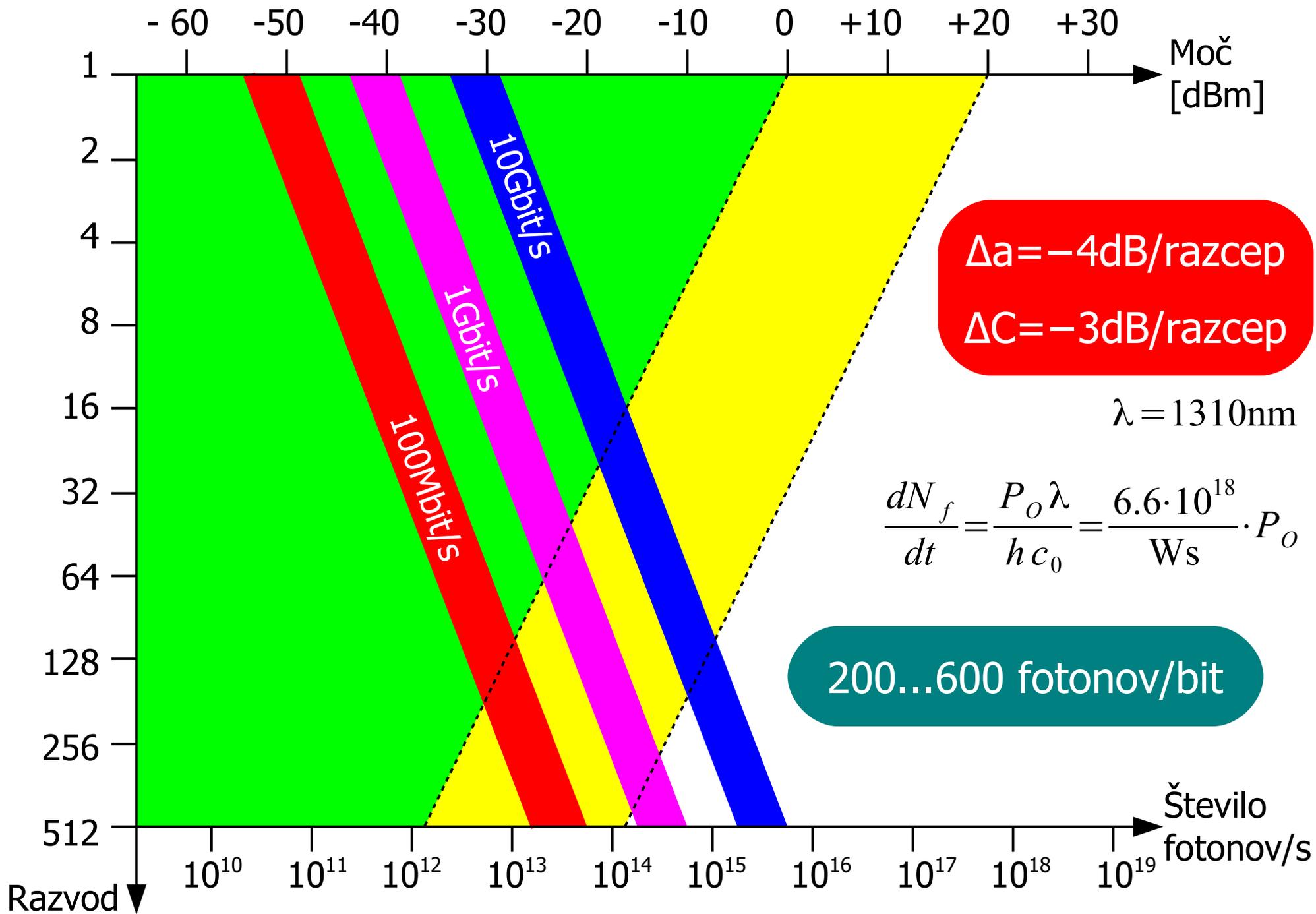


APD	ΔW	λ	$h\nu$	U_{OPT}	M_{OPT}	Občutljivost
Si	1.11eV	850nm	1.46eV	$\sim 150V$	~ 100	~ 60 fotonov/bit
Ge	0.67eV	1310nm	0.95eV	$\sim 30V$	~ 10	~ 500 fotonov/bit
InGaAsP	$\sim 0.75eV$	1550nm	0.80eV	$\sim 70V$	~ 20	~ 200 fotonov/bit

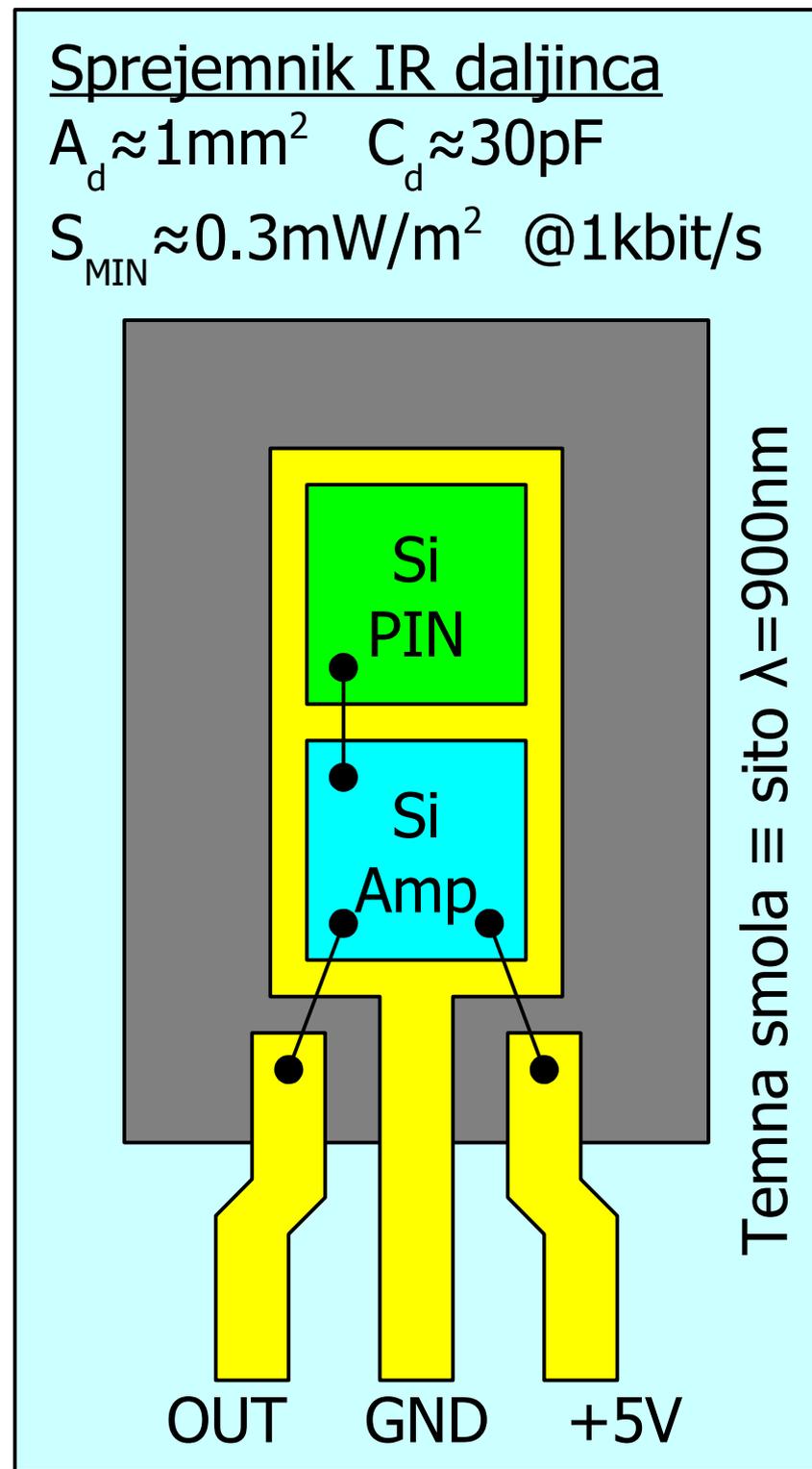
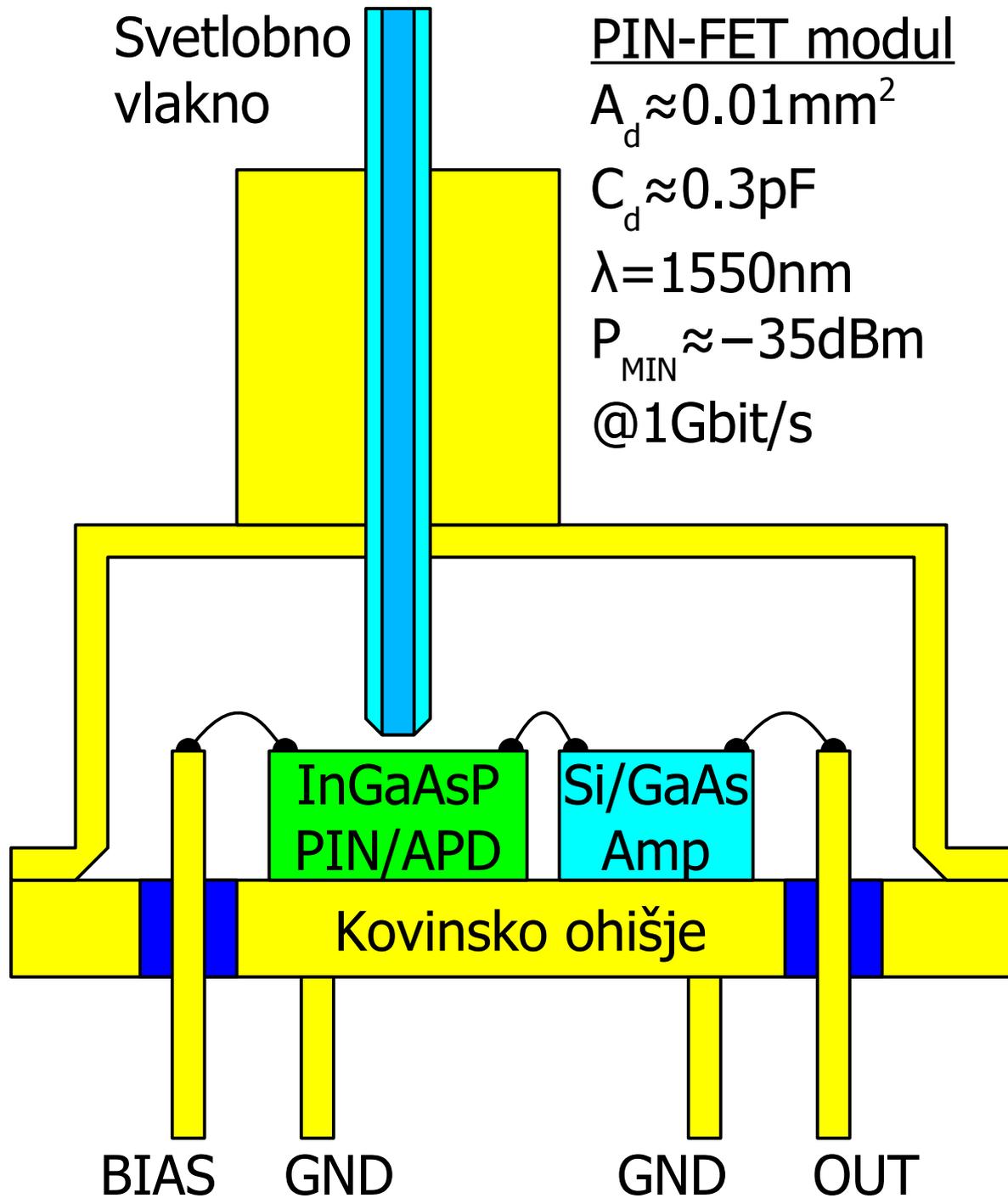
17 - Lastnosti APD sprejemnika

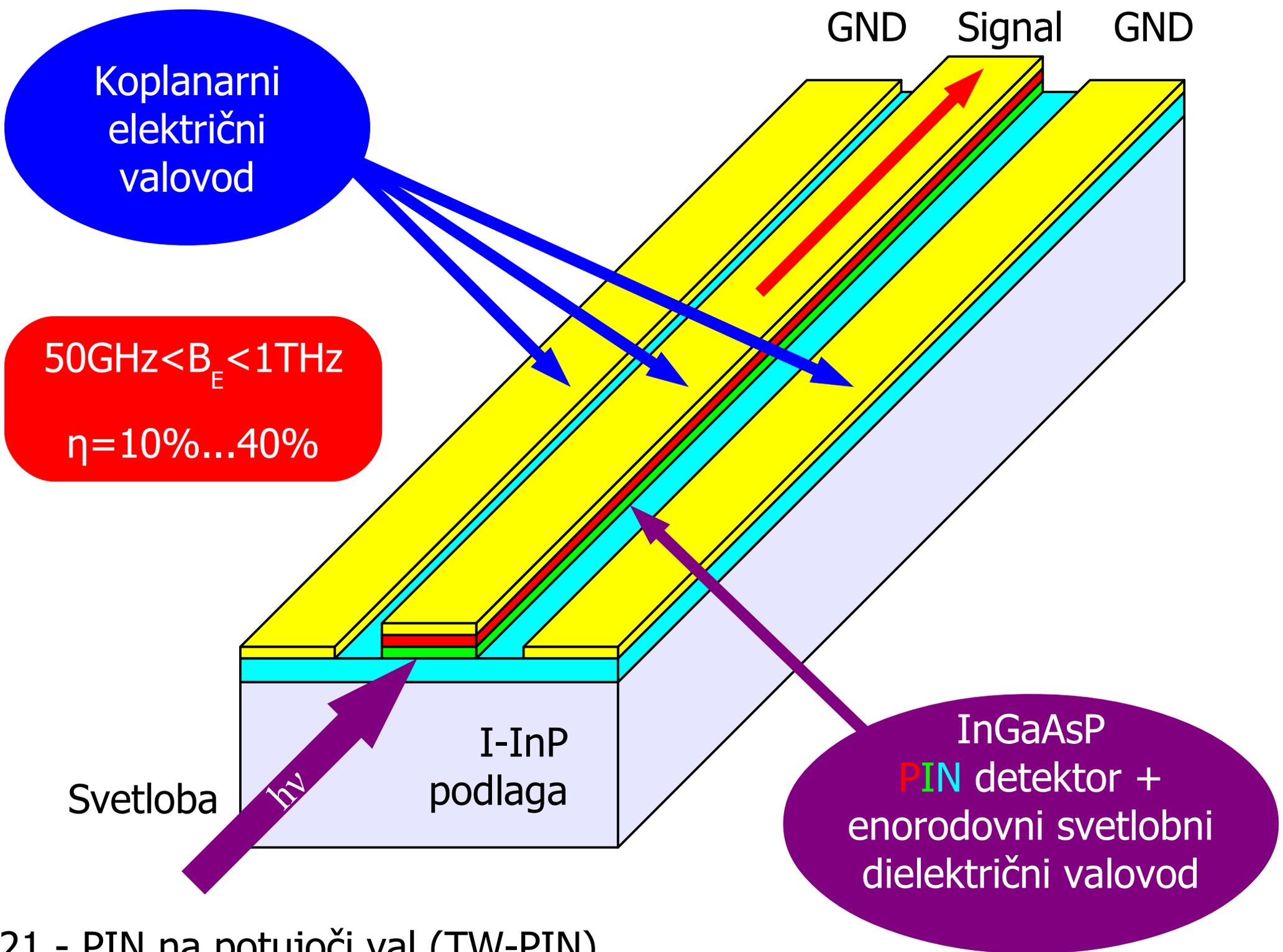


18 - Domet APD sprejemnika

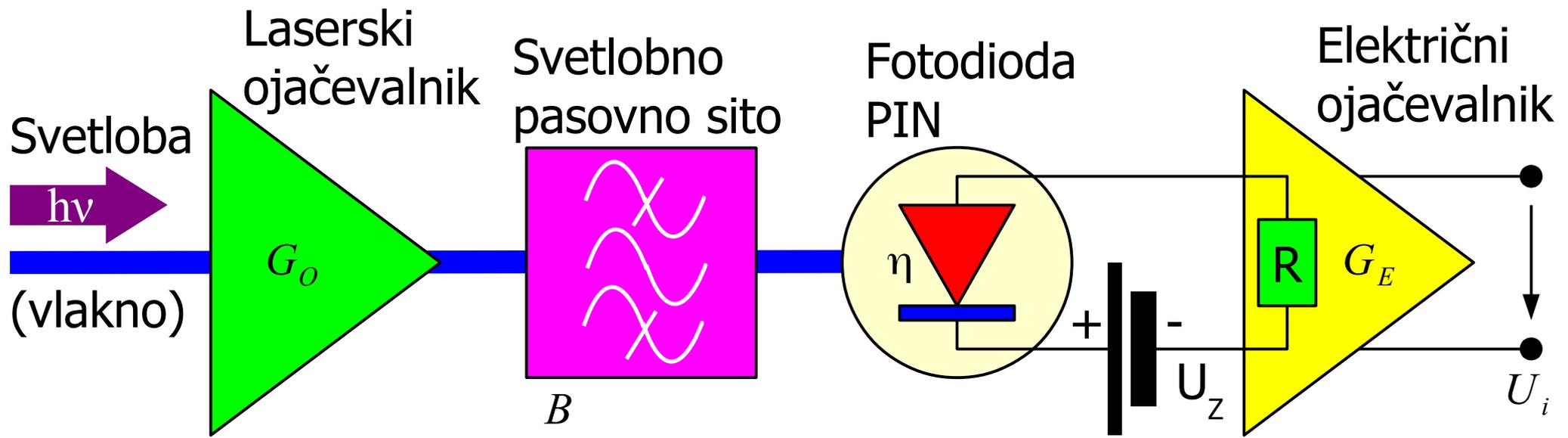


19 - PON razvod z APD sprejemnikom





21 - PIN na potujoči val (TW-PIN)



ASE šum predojačevalnika

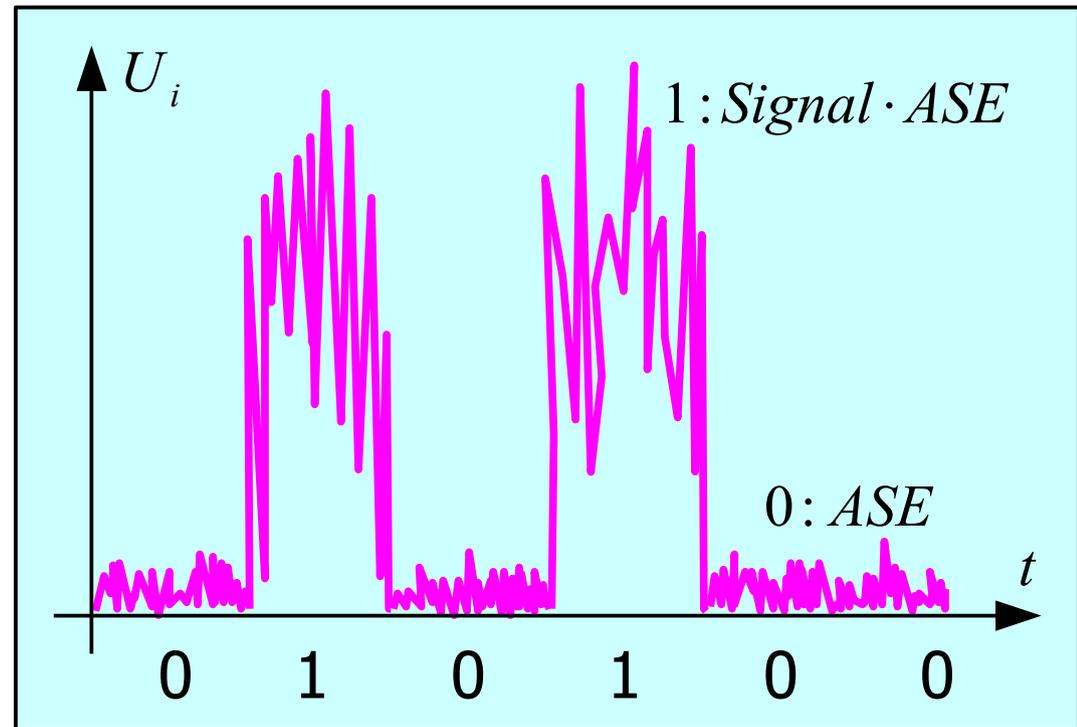
$$P_{ASE} = \mu \cdot (G_O - 1) \cdot h \nu \cdot B \quad N_0 = h \nu$$

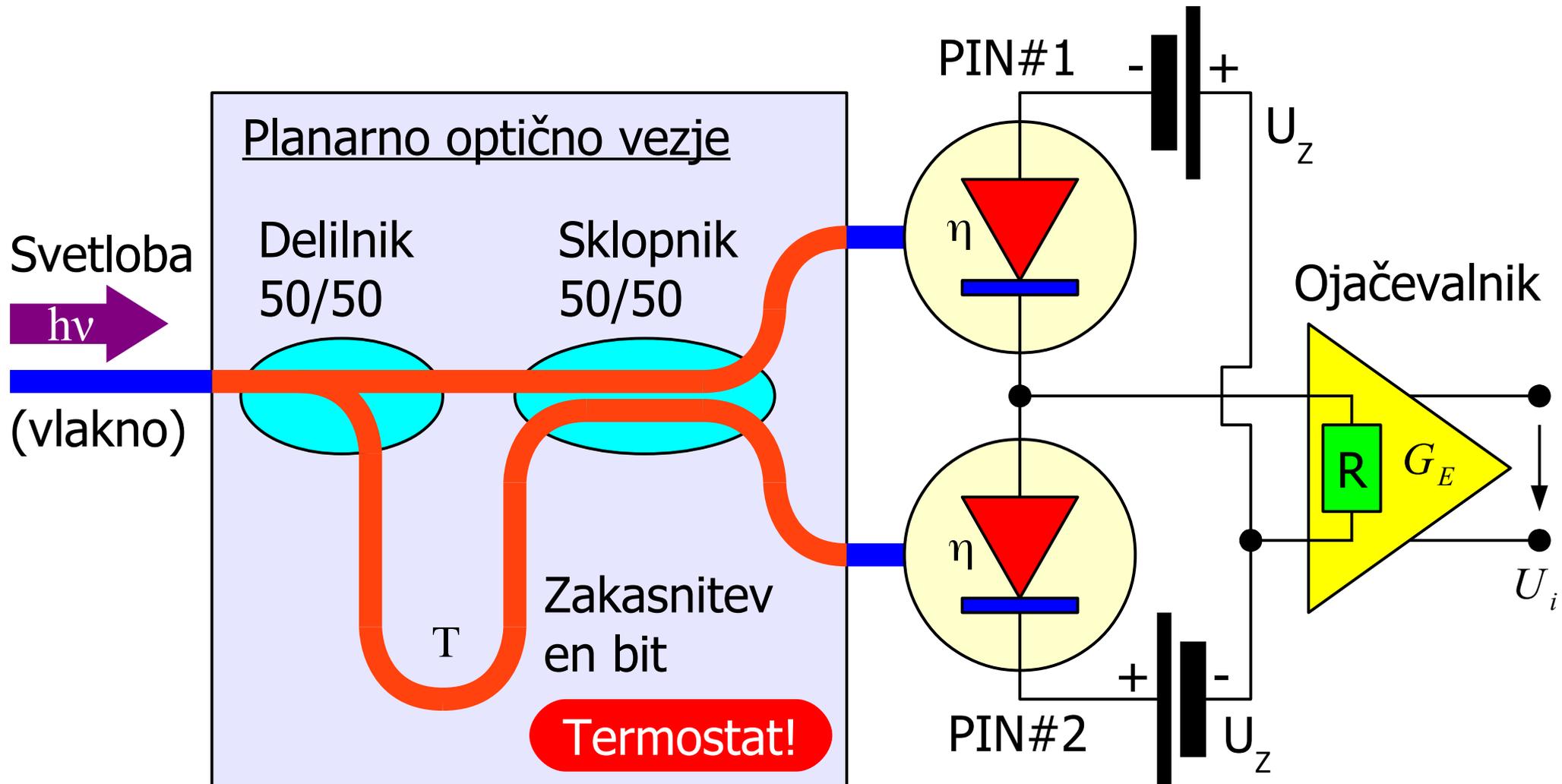
Faktor inverzne naseljenosti

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

$$P_{ASE} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \cdot (G_O - 1) \cdot \frac{h c_0}{\lambda} \cdot B$$

$$N_f / \text{bit} \approx 45 \text{ fotonov/bit}$$



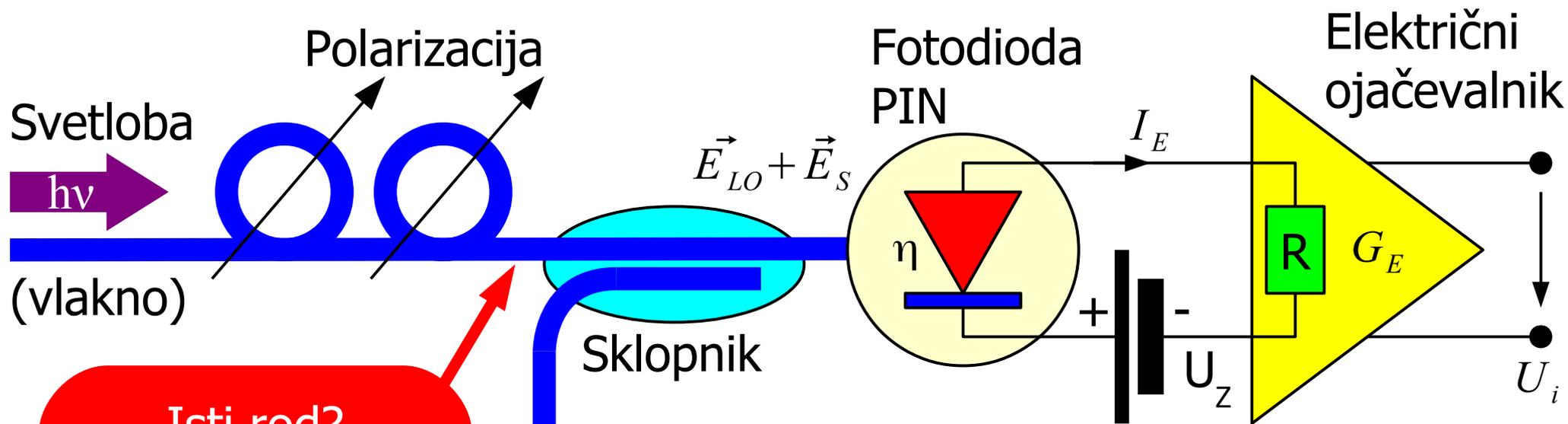


DPSK:

- konstantna ovojnica
- manjši učinek nelinearnosti

Zgled: $C = 40 \text{ Gbit/s} \rightarrow T = 25 \text{ ns}$

Točnost frekvence: $\Delta \nu \leq \frac{C}{10} \approx 4 \text{ GHz}$

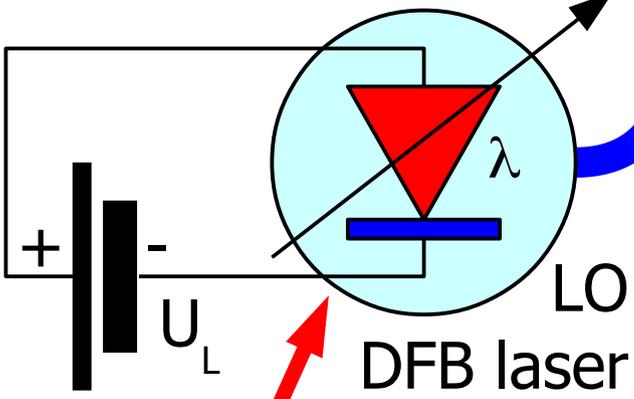
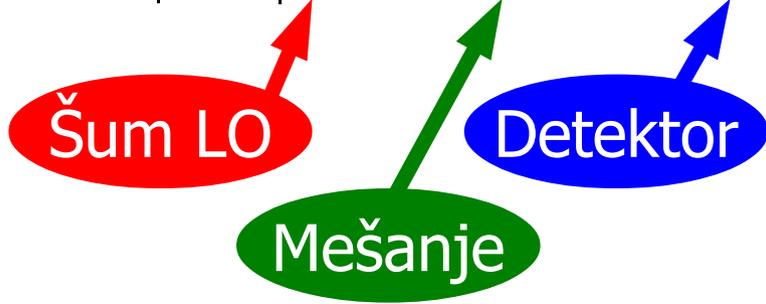


Isti rod?
Ista polarizacija?

$$I_E = \frac{\eta |Q_E| \lambda}{h c_0} P_O = \alpha |\vec{E}_{LO} + \vec{E}_S|^2 = \alpha |E_{LO}^2 + 2 \vec{E}_{LO} \cdot \vec{E}_S + E_S^2|$$

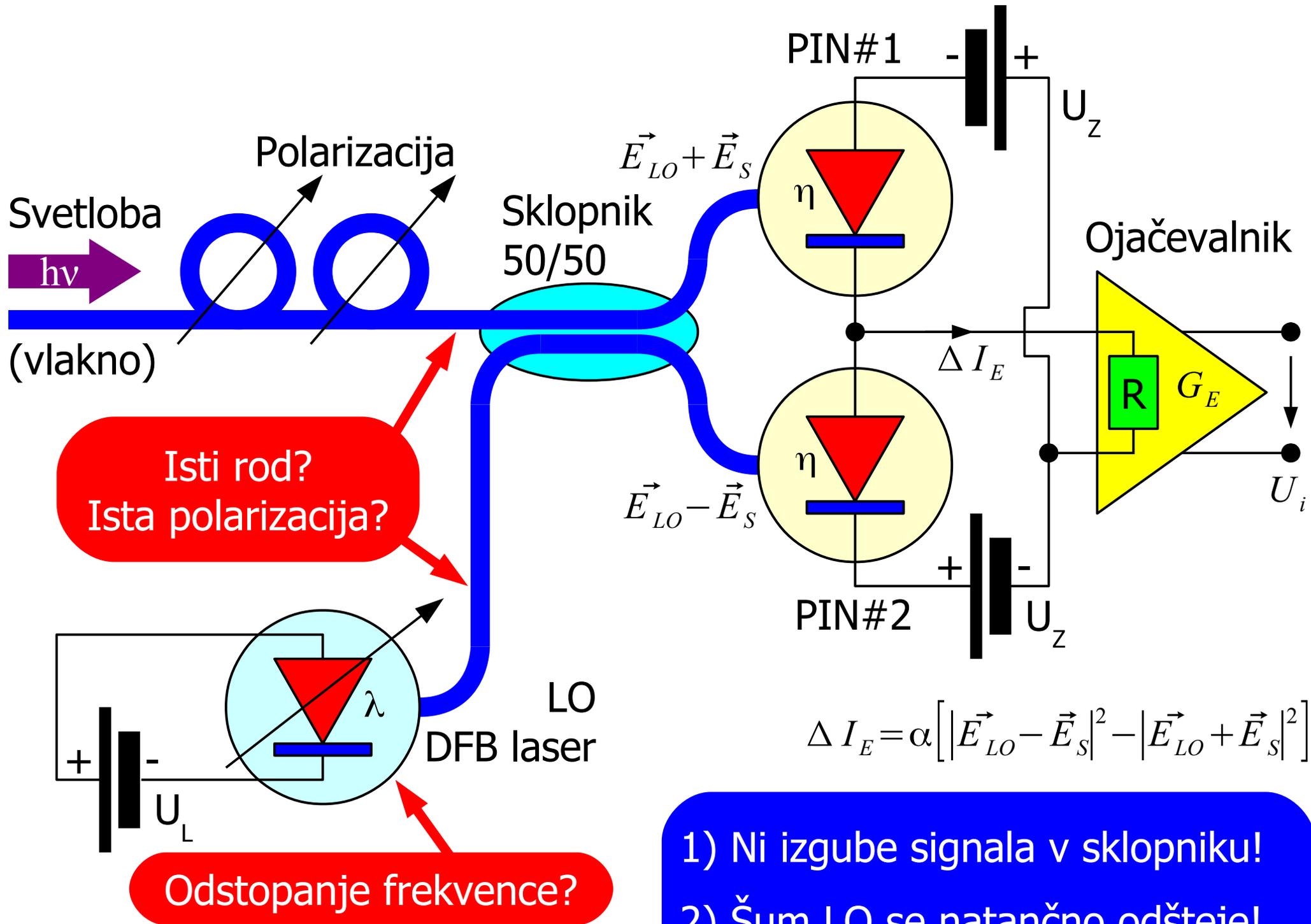
Mešalni dobitek

$$\frac{I_{mešanje}}{I_{detektor}} = \frac{2 |E_{LO}|}{|E_S|}$$

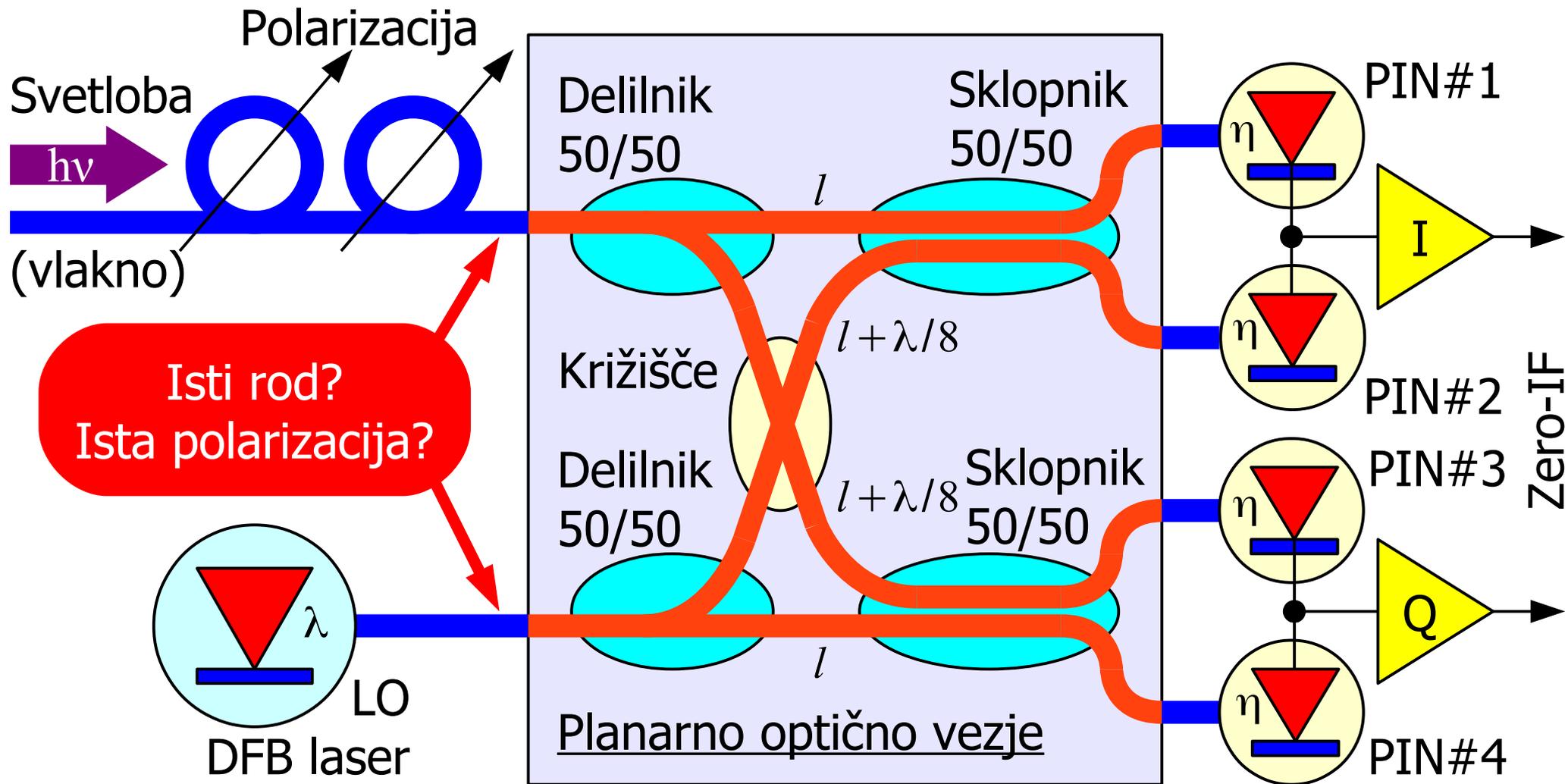


Odstopanje frekvence?

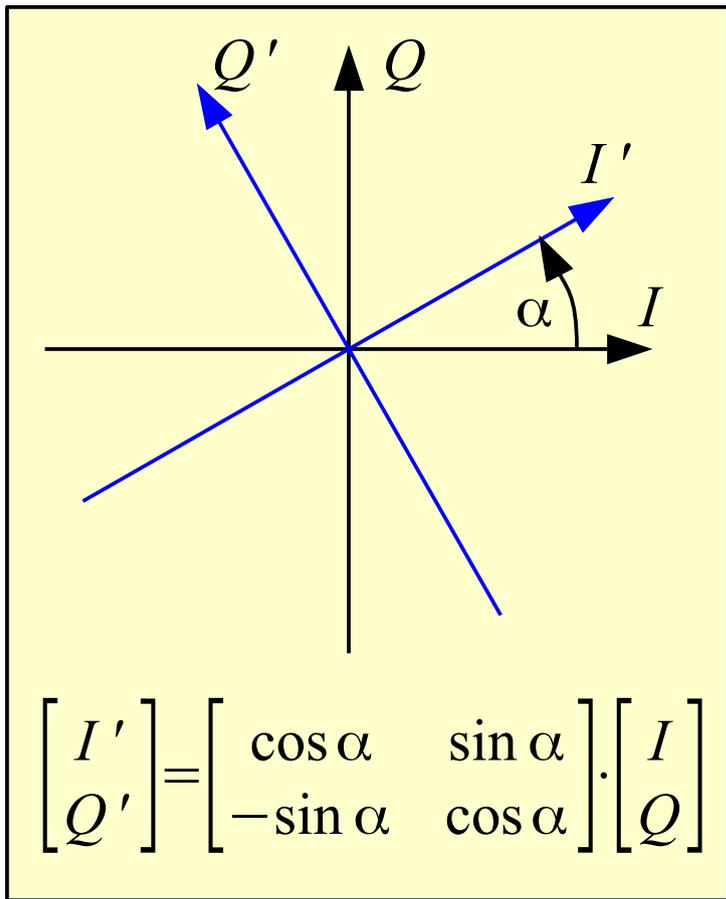
- 1) Šum LO?
- 2) Odstopanje frekvence?
- 3) Ista polarizacija?



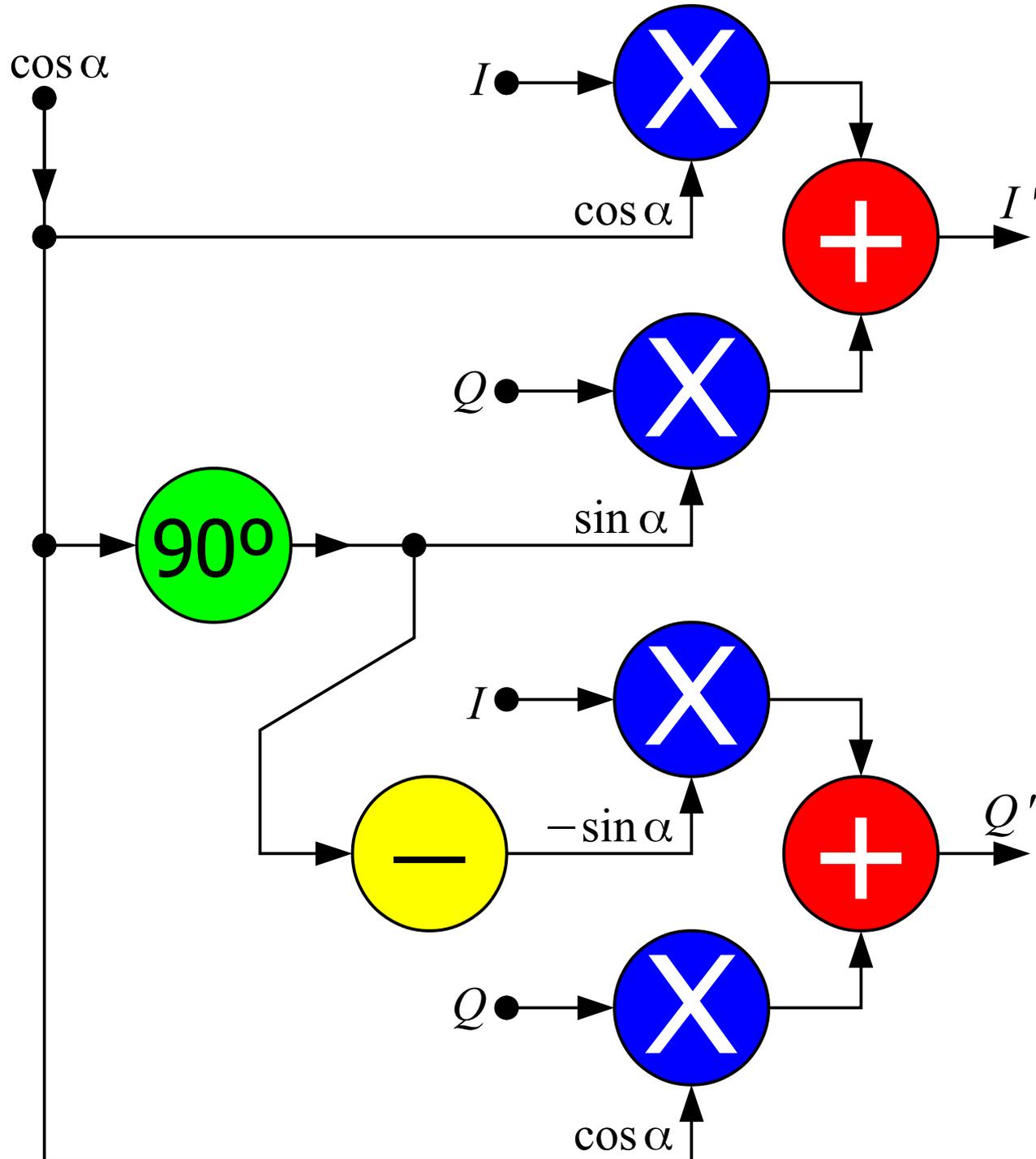
- 1) Ni izgube signala v sklopniku!
- 2) Šum LO se natančno odšteje!

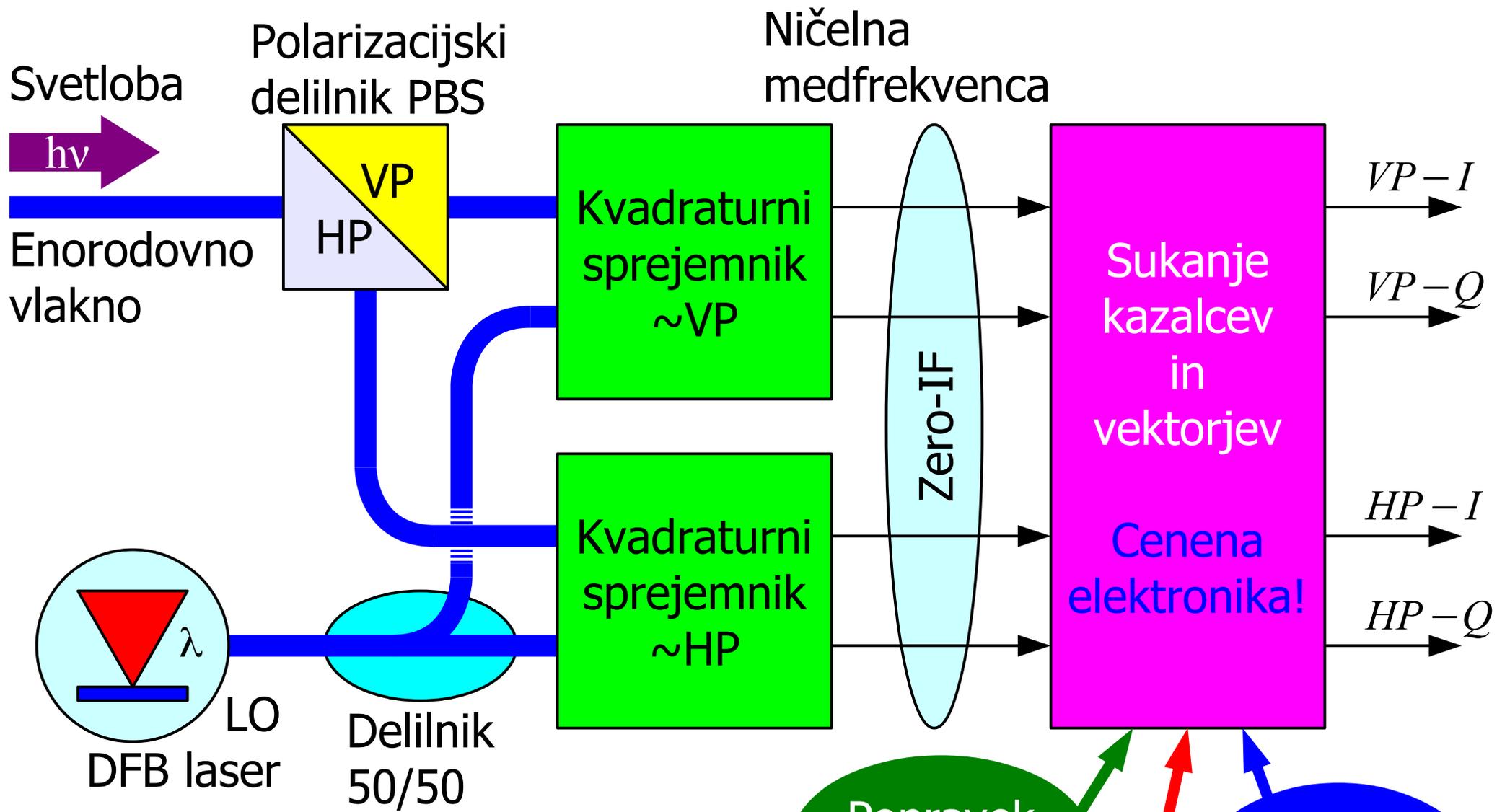


Stabilen DFB laser in sodobna hitra elektronika omogočata preslikavo odstopanja frekvence na električno ničelno medfrekvenco (Zero-IF)!



Popravek frekvence:
 $\alpha = \Delta\omega t$
 Popravek polarizacije:
 $\alpha \equiv \text{zasuk}$





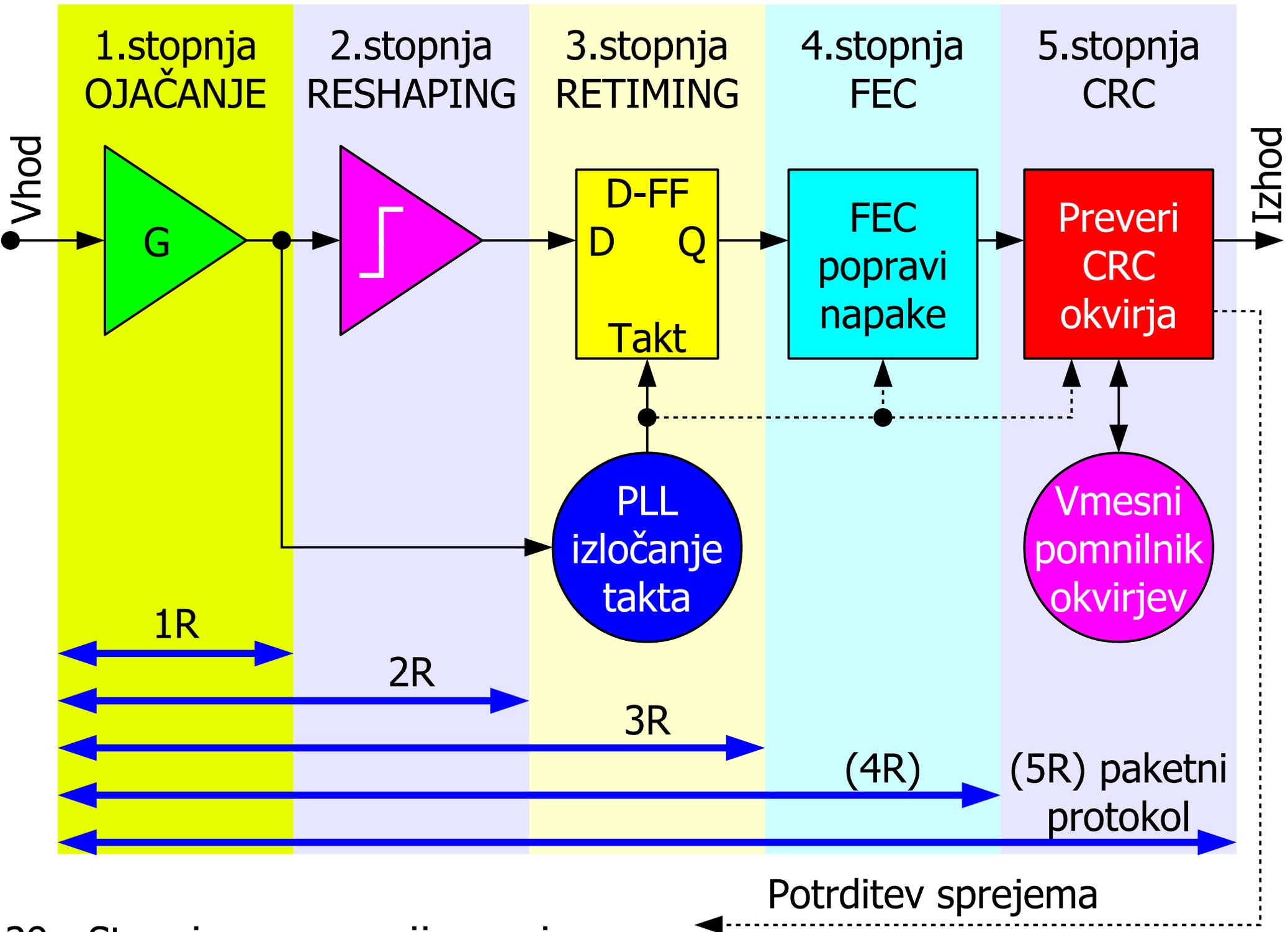
MIMO 2X2 = 2X QAM-16
 12.5 Gsymbol/s = 100 Gbit/s

Popravek polarizacije

Popravek popačenja

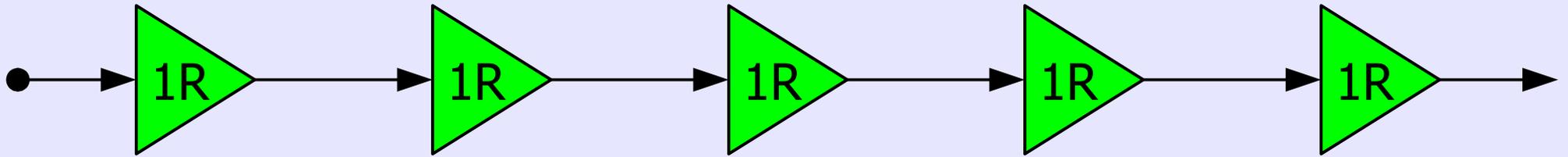
Popravek frekvence nosilca

28 - Dvopolarizacijski sprejemnik



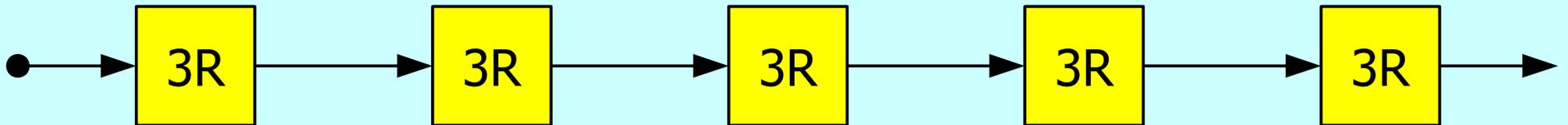
29 - Stopnje regeneracije sprejema

Analogna zveza



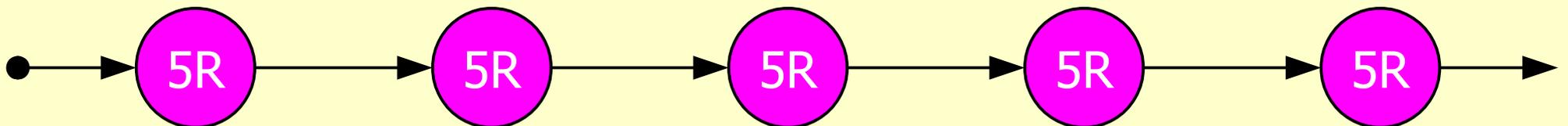
Seštevanje šuma! Presluh?

Sinhrona zveza



Seštevanje drhtenja! Sinhronizacija spremenljivih poti?

Paketna zveza



Uravnavanje pretoka? Nespoštovanje OSI ravni?