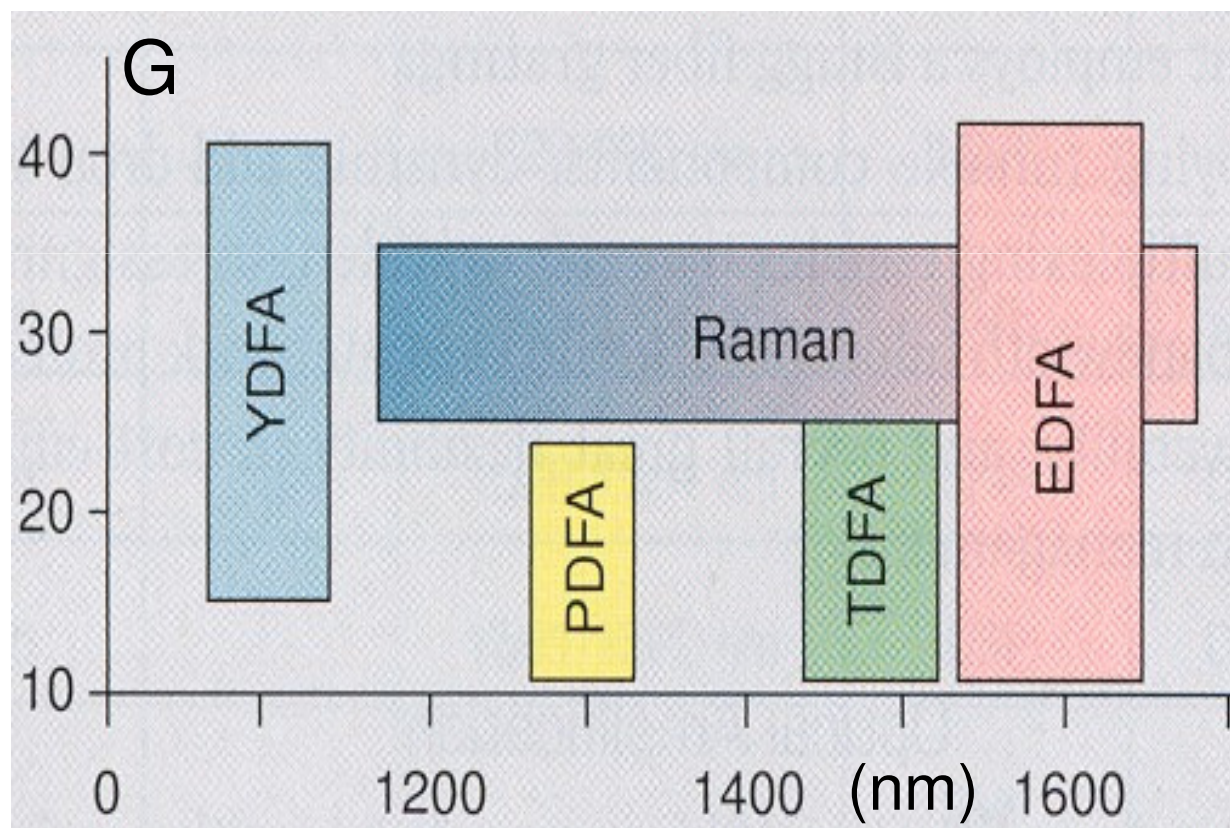


Optični ojačevalniki

Diskretni in porazdeljeni ojačevalniki



Mobitel d.d.,
izobraževanje

28. 5. 2010,
predavanje 11

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Mehanizmi ojačevanja
2. Diskretni in porazdeljeni ojačevalniki
3. EDFA
4. TDFA in PDFA
5. Kombinirani ojačevalniki
6. Faktor ojačenja
7. Ojačena spontana emisija
8. Šumno število
9. Regeneracija
10. Področja uporabe

Razvrstitev načinov optičnega ojačevanja

A. Ojačevanje na osnovi stimulirane emisije:

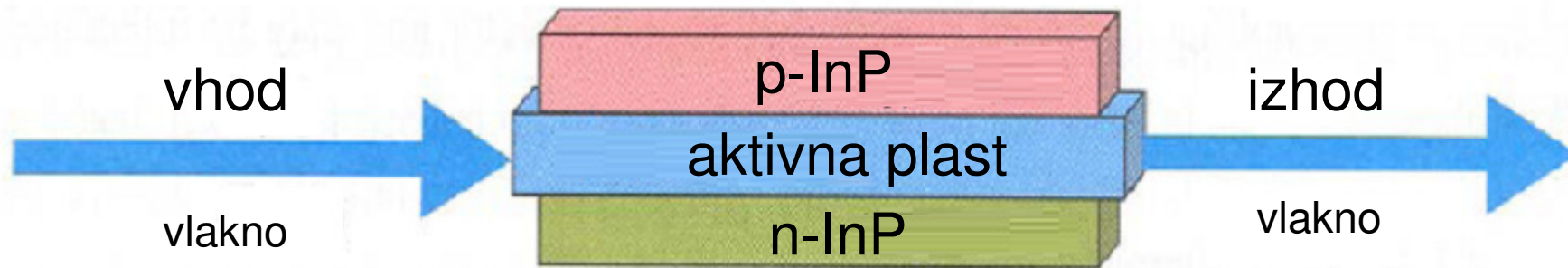
1. Polprevodniški optični ojačevalnik (SOA)
2. Vlakenski optični ojačevalniki (FOA) s primesjo redkih zemelj:
 - EDFA (erbij), C in L pas
 - TDFA (tulij), S pas
 - PDFA (praseodimij), O pas

B. Ojačevanje na osnovi nelinearnih pojavov:

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

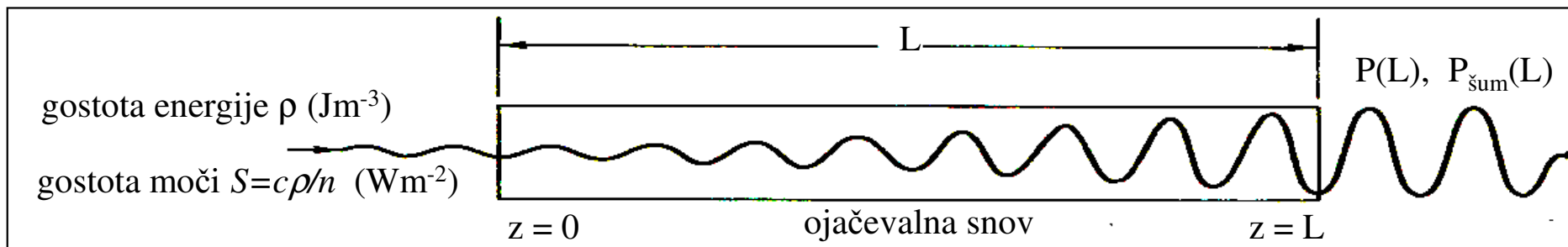
C. Hibridni (diskretni in porazdeljeni) ojačevalniki.

Polprevodniški ojačevalnik (SOA)



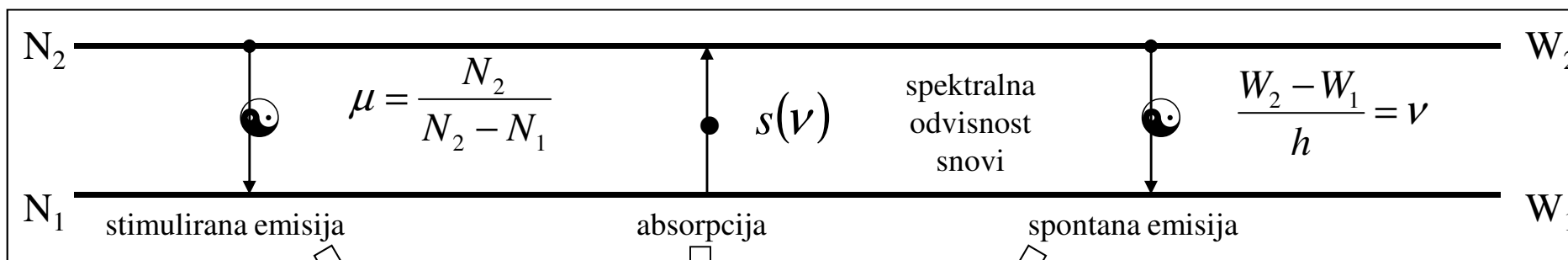
- nizka cena za množično uporabo v vezjih in napravah
- zaradi svojih karakteristik je manj primeren za prenos.

Ojačevanje signala in šuma



• Val v ojačevalni (aktivni, vzbujeni) snovi:

- **princip polprevodniškega ojačevalnika (SOA):** Gaussov snop v aktivnem polprevodniku (spoju p-n z inverzijo naseljenosti). Električno vzbujanje
- **princip ojačevalnika z obogatenim vlaknom (DFA):** jedro enorodovnega vlakna, obogateno z ioni aktivnih primesi. Optično vzbujanje



$$\frac{dS}{dz} = \frac{1}{dz} \frac{dN}{dt} h\nu = BS \frac{n}{c} s(\nu) N_2 h\nu - BS \frac{n}{c} s(\nu) N_1 h\nu + \frac{1}{2} A s(\nu) N_2 h\nu \frac{d\Omega}{4\pi}$$

$$B_{12} = B_{21} = B$$

• **Izhodni signal:** $P(L) = GP(0), G = e^{gL}, g = B(N_2 - N_1) \frac{nh}{\lambda} s(\nu)$

• **Izhodni šum:**
(spontana emisija):

$$P_{\text{šum}}(L) = \mu(G - 1) h\nu \Delta\nu$$

polariziran

$$P_{\text{šum}}(L) = 2\mu(G - 1) h\nu \Delta\nu$$

nepolariziran

Optični ojačevalniki - razvrstitev in pregled

1. Polprevodniški ojačevalnik (planarna tehnika, množična uporaba)

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

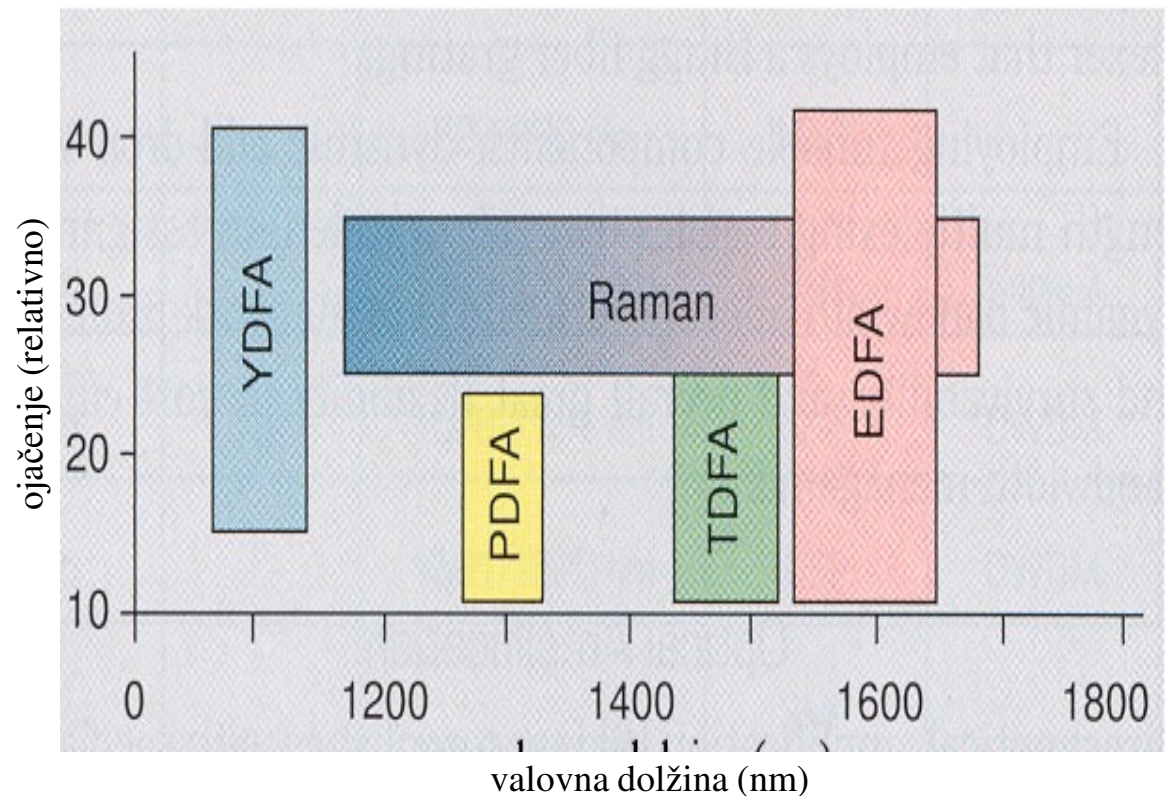
2. Vlakenski ojačevalniki (vlakenski optični ojačevalnik) - **FOA**

• *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**



Optični ojačevalniki - primesi in vrste

- **Ojačevalniki na podlagi stimulirane emisije v vlaknih s primesmi redkih zemelj Er^{3+} , Tm^{3+} in Pr^{3+} .** Dolžina vlakna okoli 10 m (diskretni ojačevalniki). Sosmerno (prevladujoče), protismerno in kombinirano črpanje. Visok izkoristek črpalne moči. Dolga življenjska doba nasetitve, dolg odzivni čas

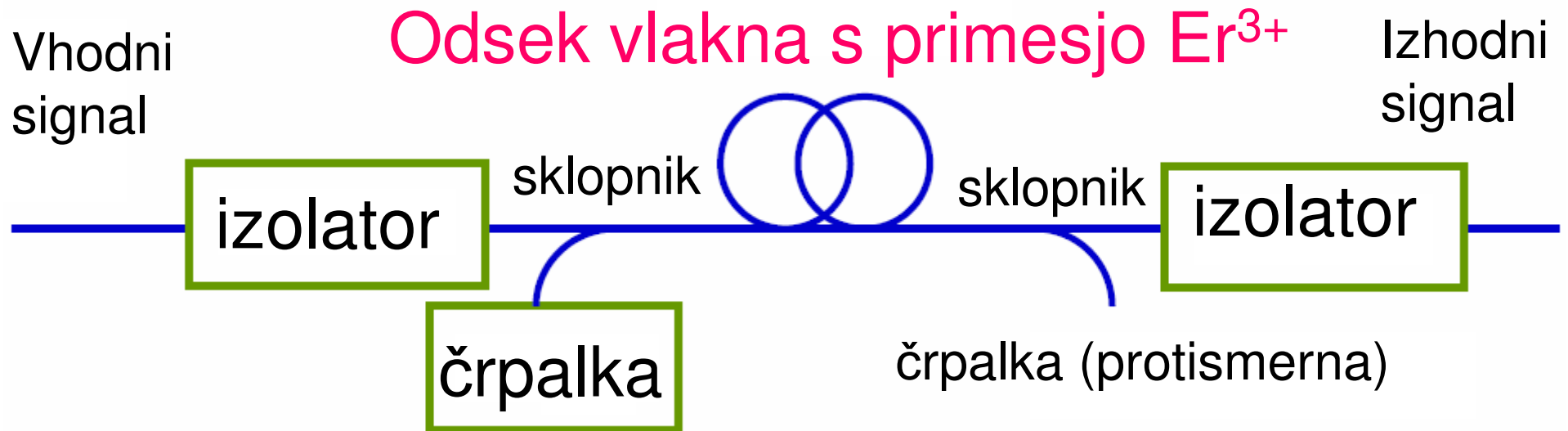


- **Ojačevalniki na podlagi stimuliranega Ramanovega sipanja v običajnem prenosnem vlaknu s primesjo GeO_2 .** Potrebna dolžina vlakna je 1 km (diskretni) oz. najmanj 20 - 30 km (porazdeljeni). Protismerno (prevladujoče), sosmerno in kombinirano črpanje. Nizek izkoristek črpalne moči, kratek odzivni čas, širok ojačevalni pas



EDFA

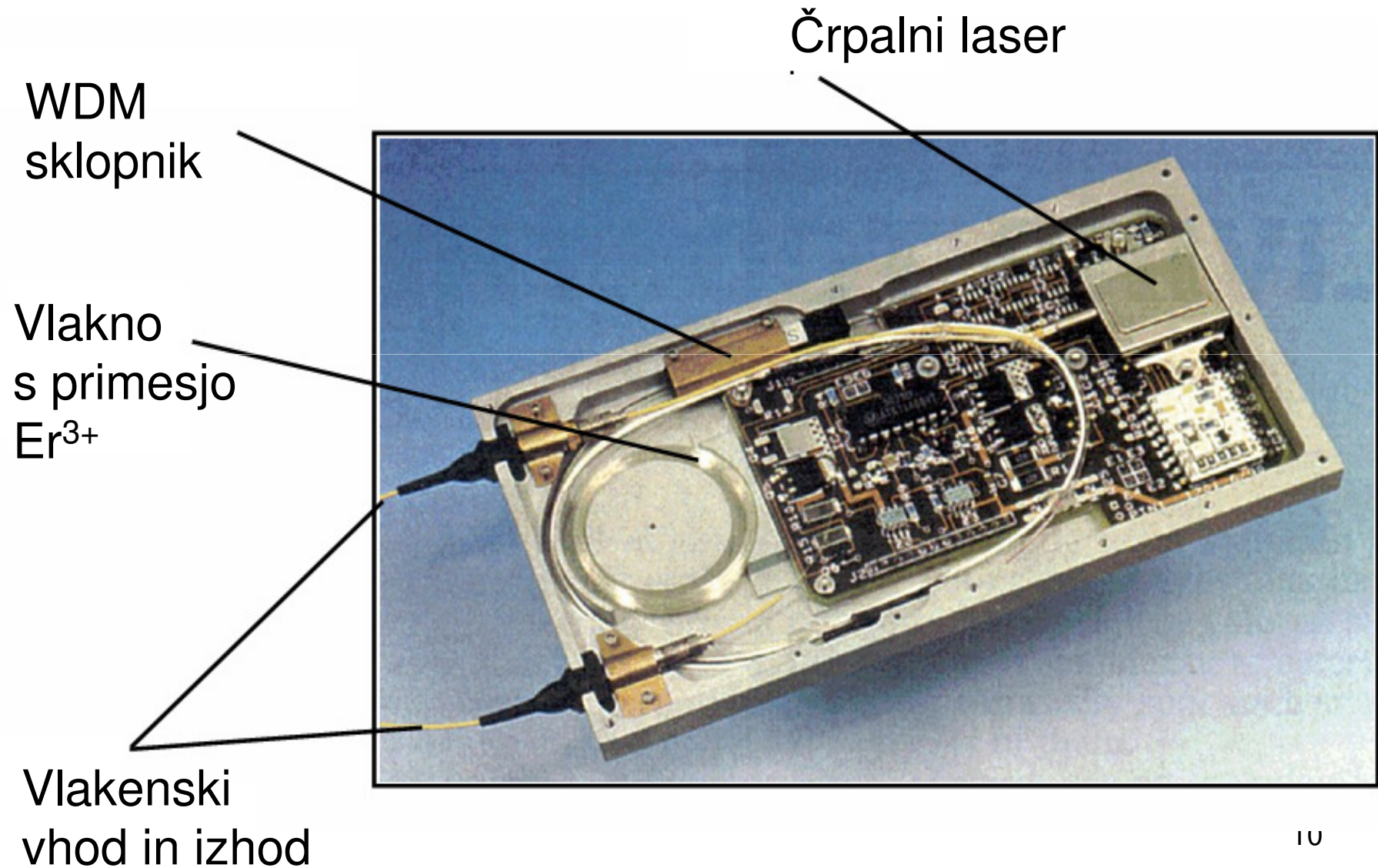
EDFA – sestavni deli in lastnosti



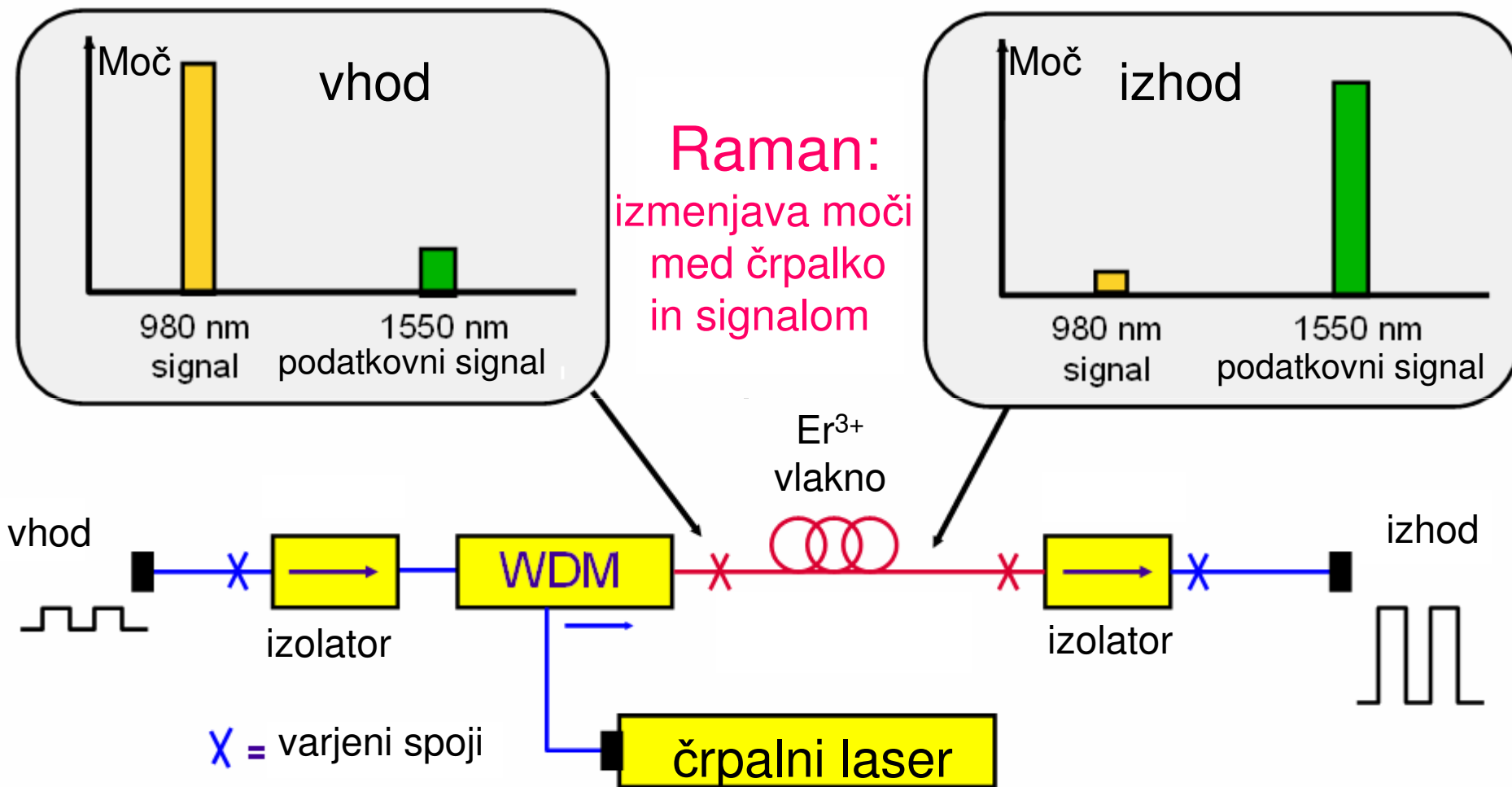
Optični vlakenski ojačevalnik (FOA, npr. EDFA):

- 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 $> 40 - 70 \text{ nm}$.

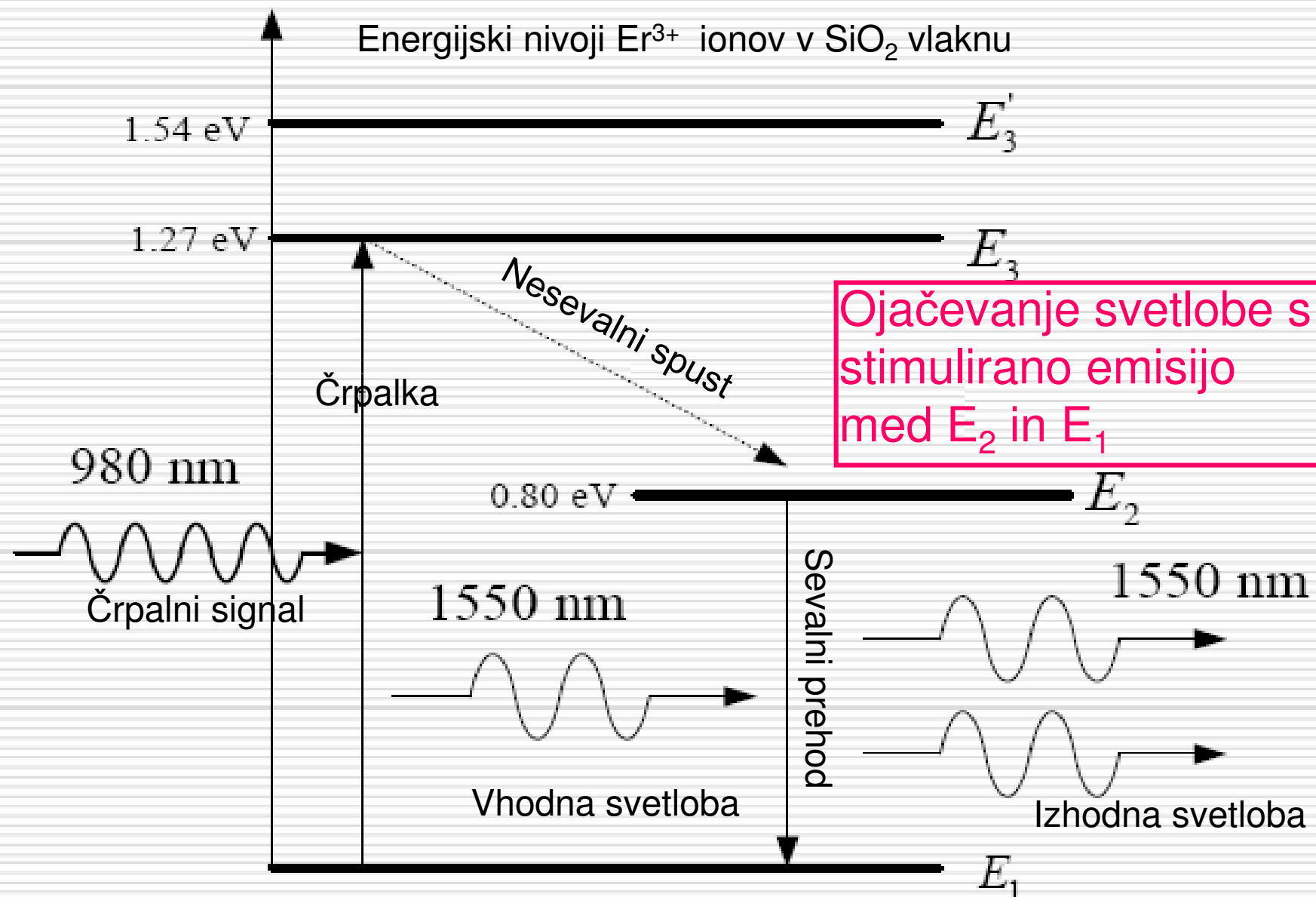
EDFA



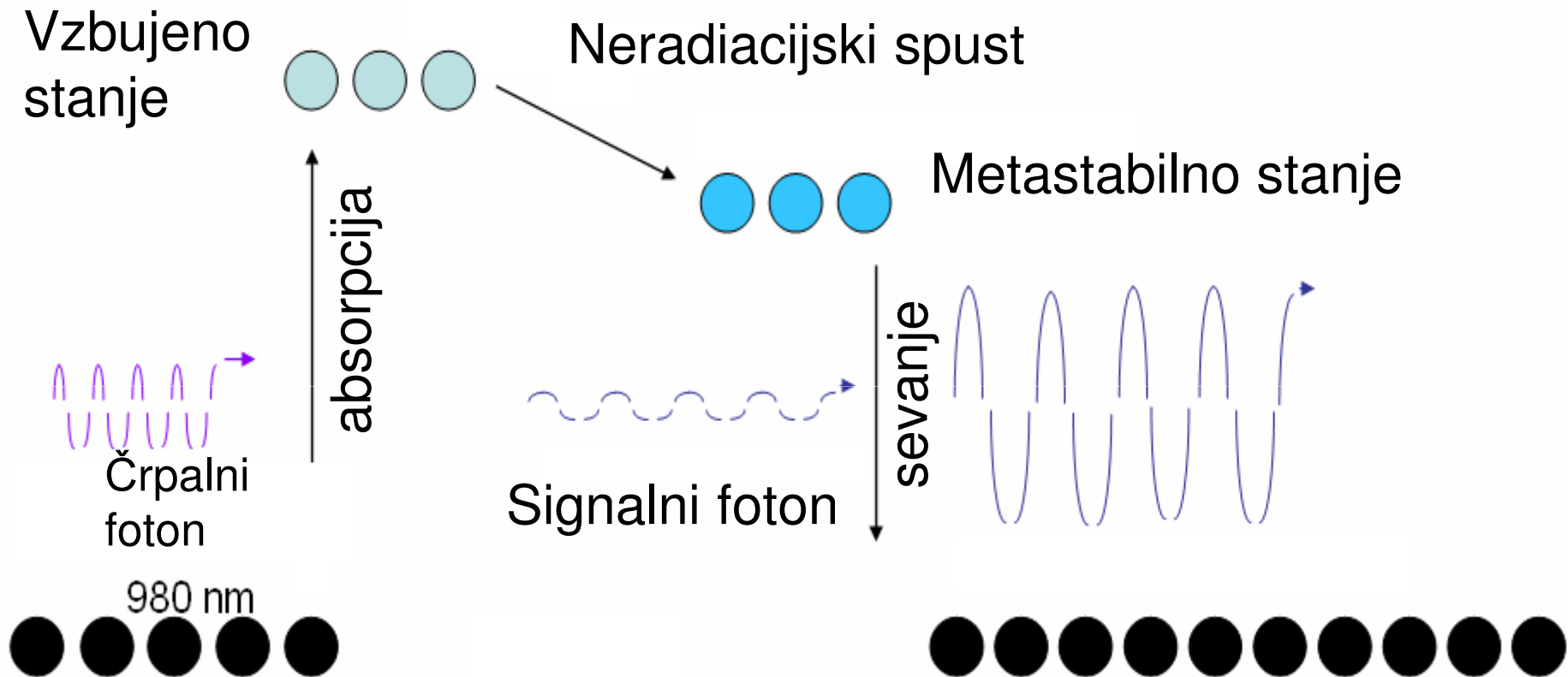
Delovanje EDFA



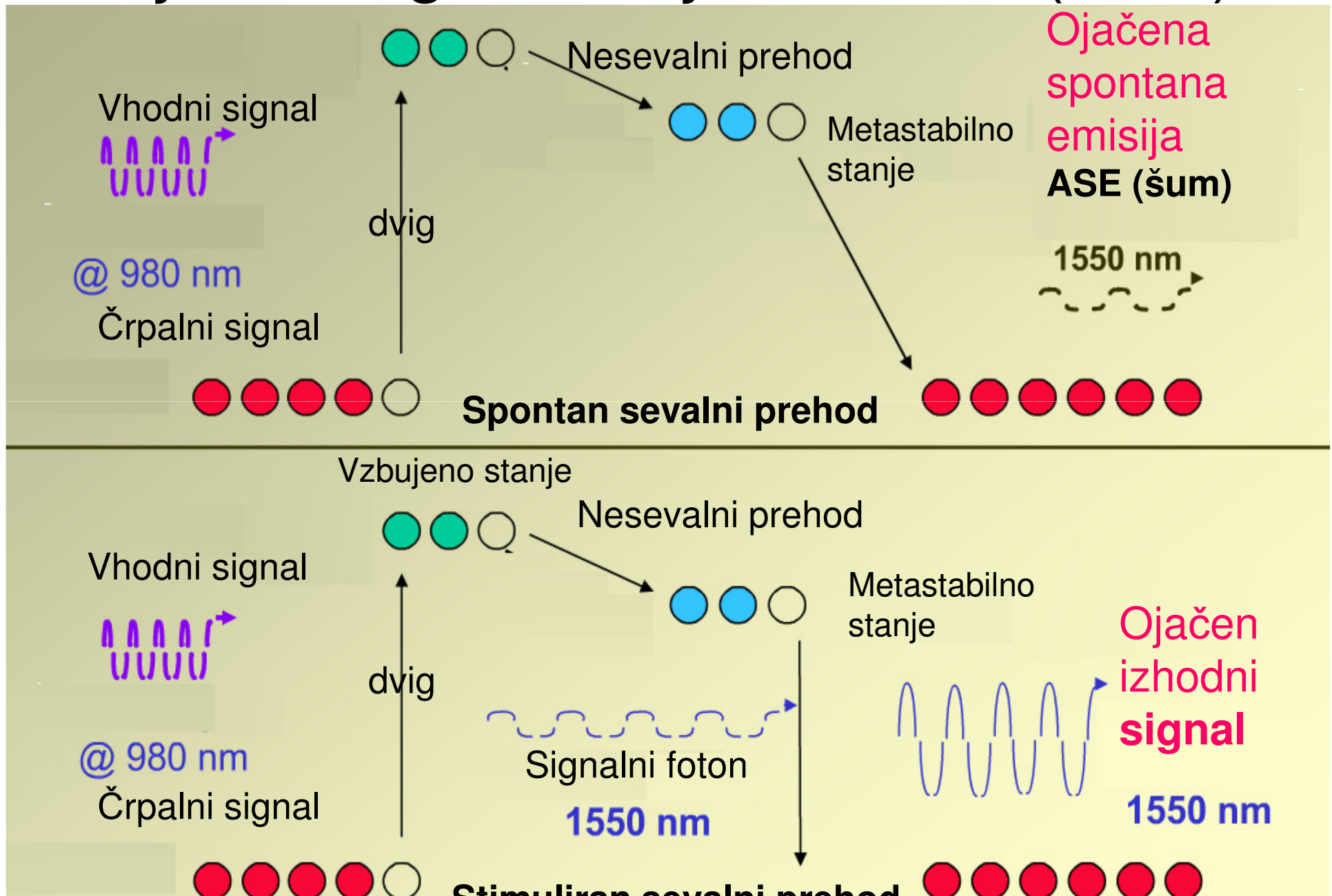
EDFA – Energijski pasovi



Stimulirana emisija

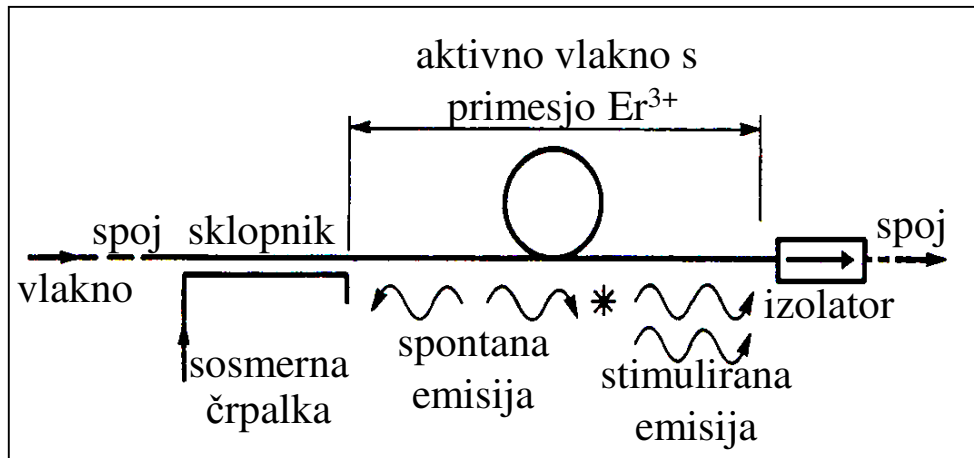


Ojačen signal in ojačen šum (ASE)



Vlakenski ojačevalnik s primesmi redkih zemelj

• Vlakenski ojačevalnik obogaten z Erbijem Er^{3+}



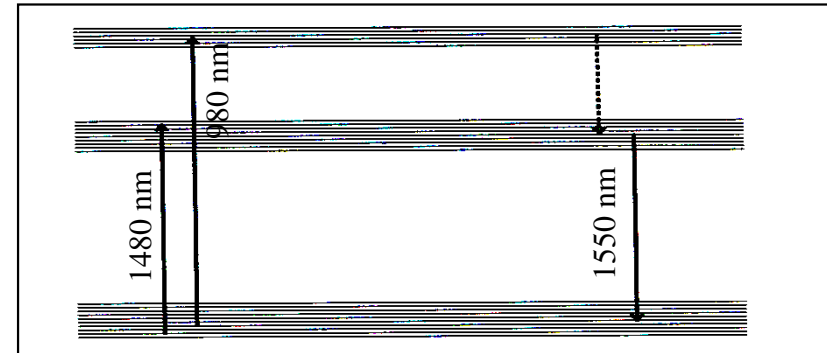
• Karakteristike erbijevega vlakenskega ojačevalnika

- ojačenje G (10 - 40 dB)
- šumno število F (4 - 7 dB)
- ojačevalni valovni pas $\Delta\lambda$ (30 - 40 nm)
- visok izkoristek črpalne moči

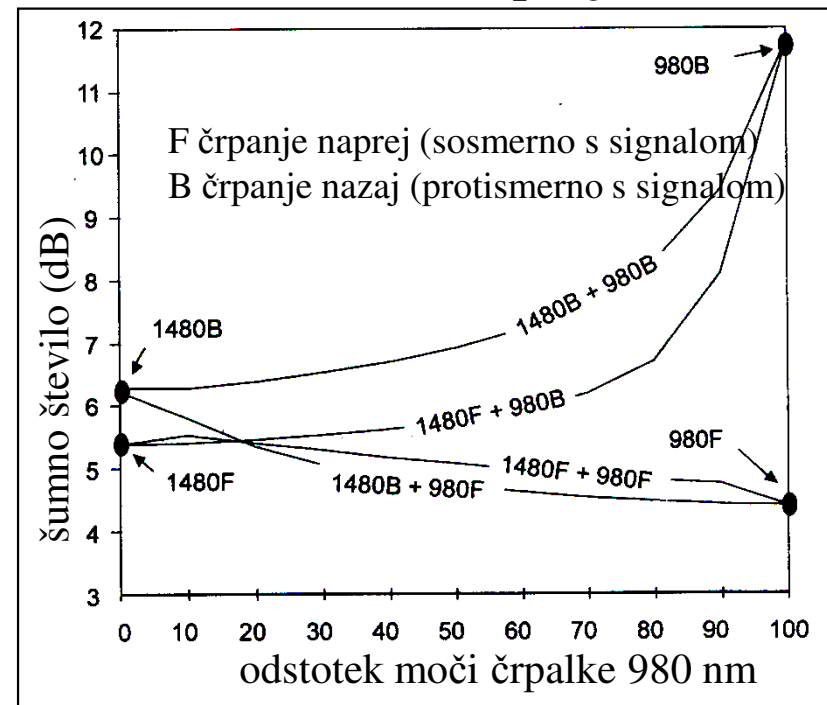
• Črpalka

- $\lambda_{\text{č}} = 980 \text{ nm}$
- $\lambda_{\text{č}} = 1480 \text{ nm}$

• Energijski nivoji in načini črpanja

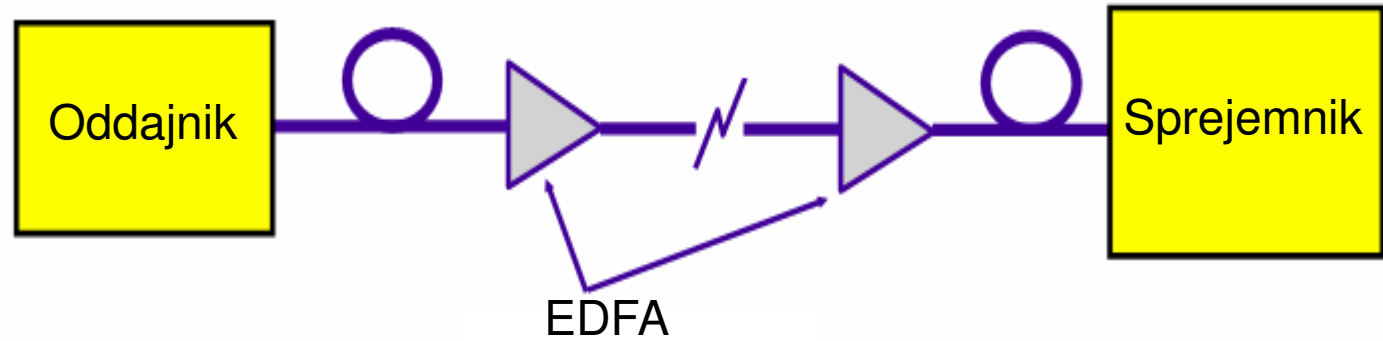


• Odvisnost šumnega števila od načina in valovne dolžine črpanja



Vrste ojačevalnikov

Linijski ojačevalnik



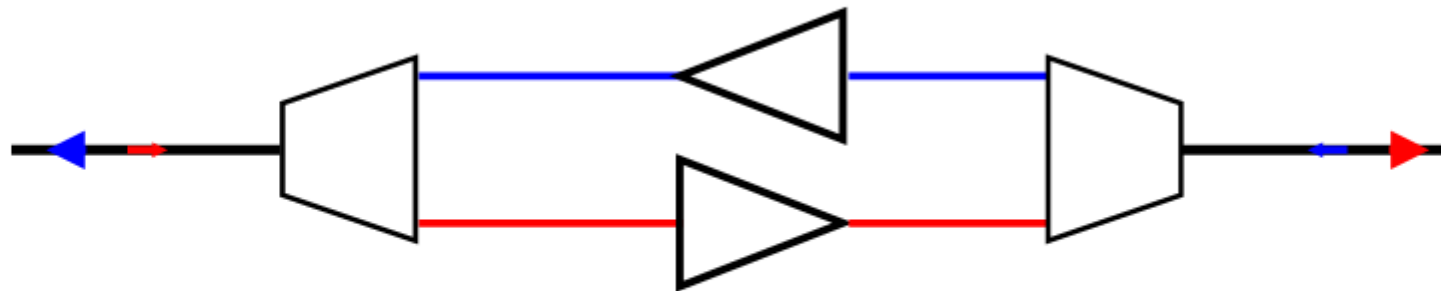
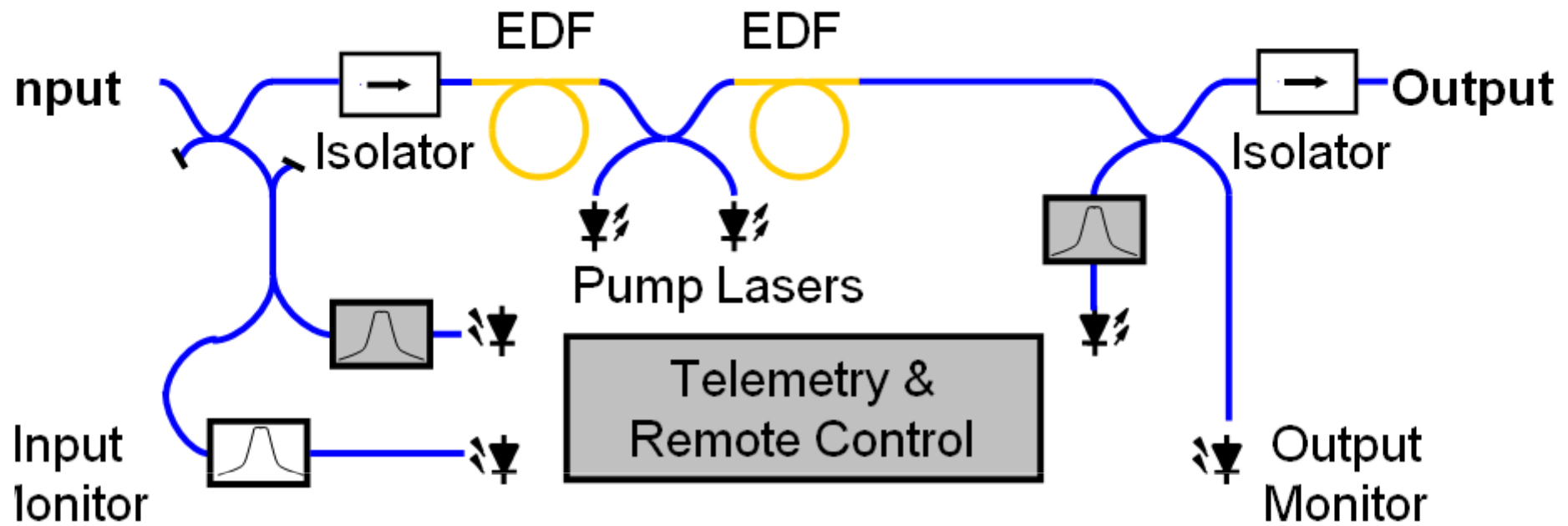
Poojačevalnik



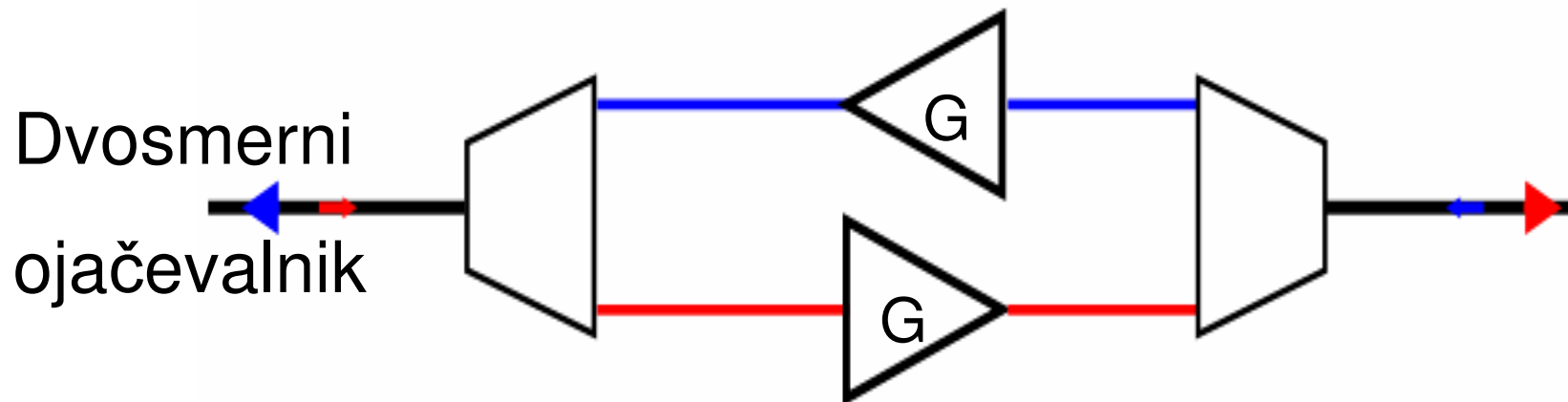
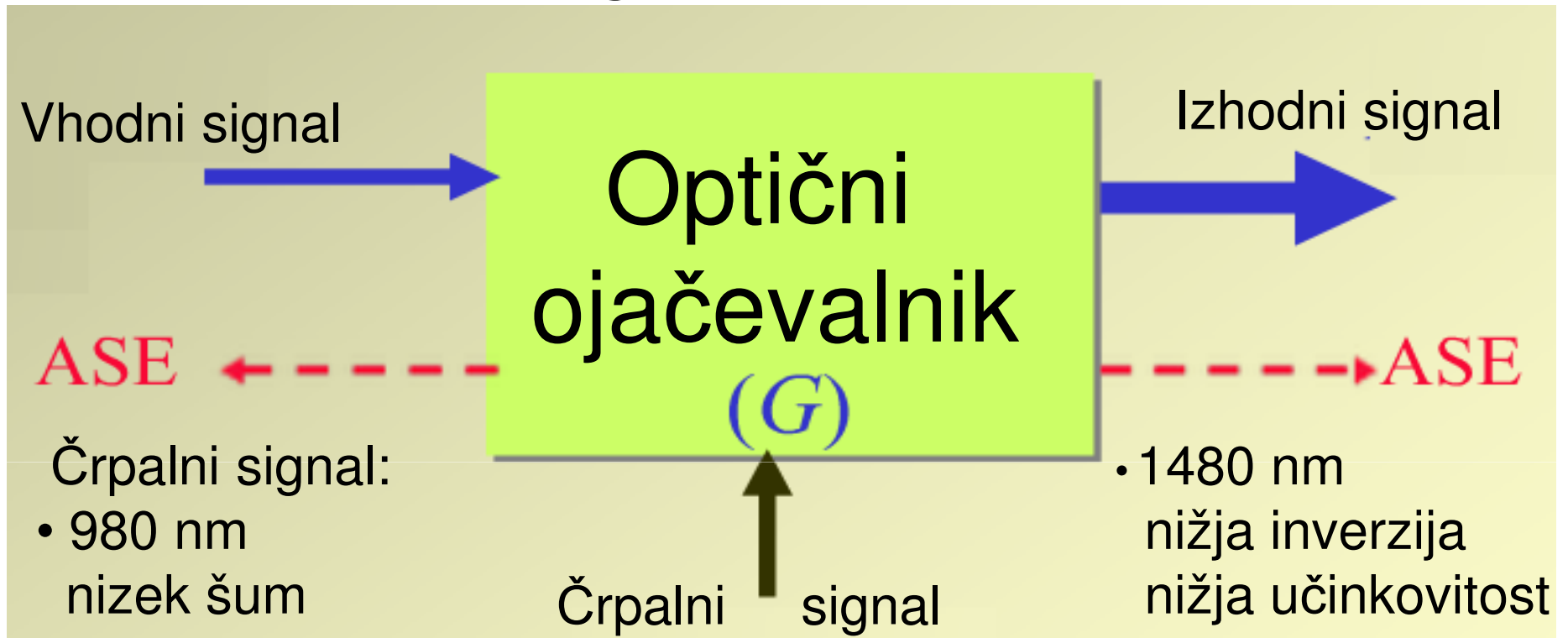
Predojačevalnik



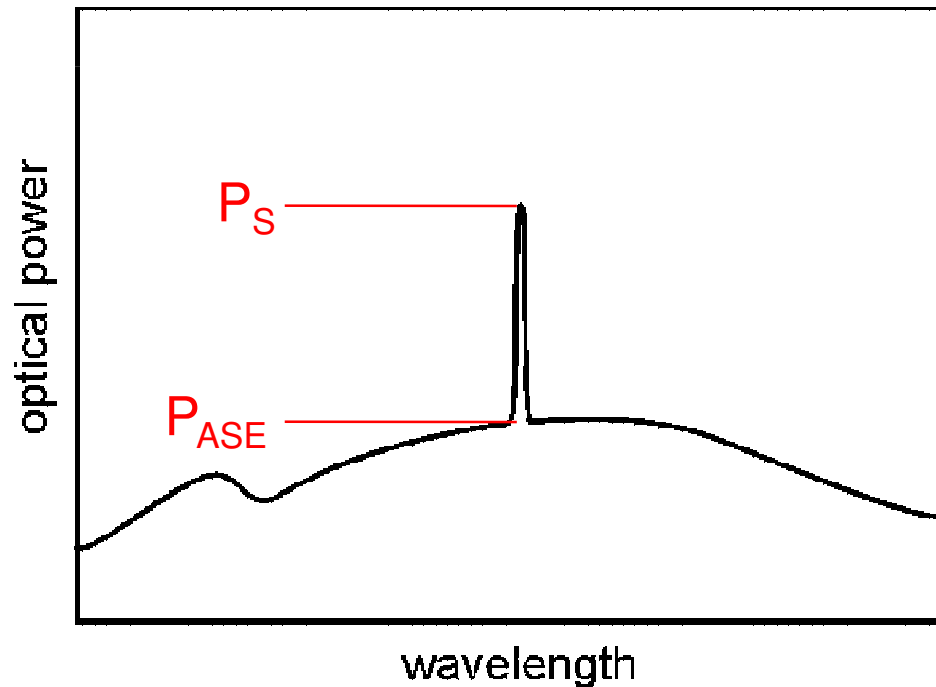
Commercial Designs



Signal in šum



Optično razmerje signal/šum



$$OSNR = \frac{P_S}{P_{ASE}}$$

P_S moč optičnega signala

P_{ASE} moč šuma ojačene spontane emisije v frekvenčnem pasu (0,1 nm, pas filtra, pas kanala)

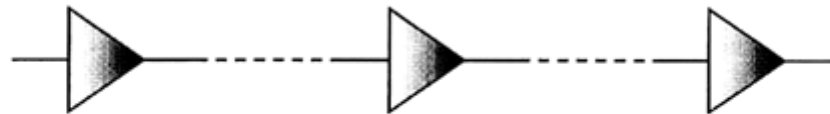
Namestitev ojačevalnika in ključni parametri

Ključni parameter

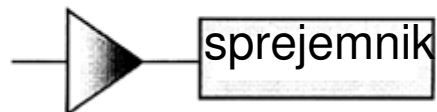
- Poojačevalnik (ni polarizacijsko neodvisen) : P_{sat}



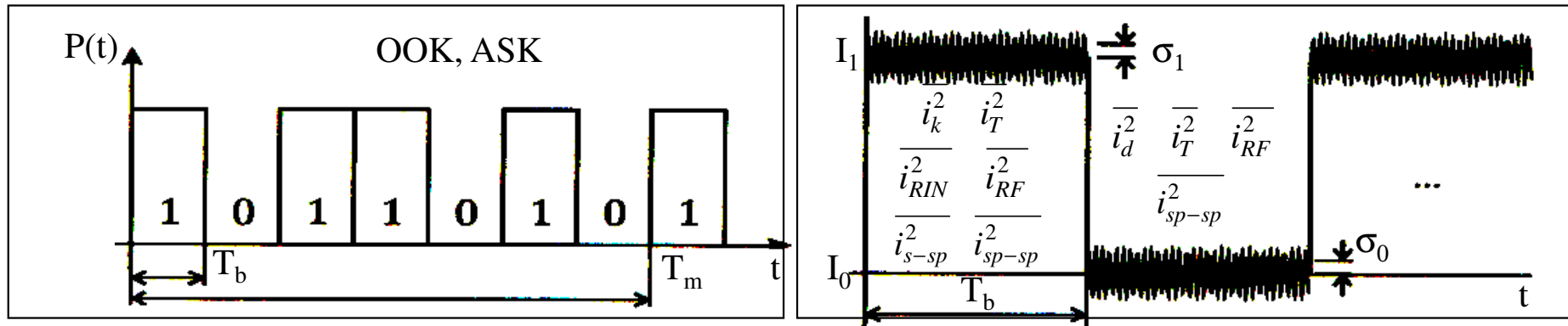
- Linijski ojačevalnik (polarizacijsko neodvisen) : NF, P_{sat}



- Predojačevalnik (polarizacijsko neodvisen) : $Gain, NF$



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

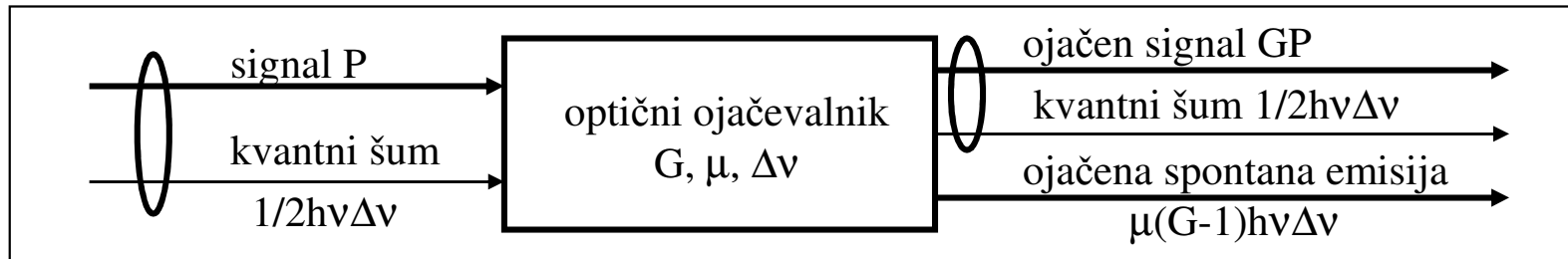
- kvantni šum (vakuumsko polje) P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}

• 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

Šumni faktor optičnega ojačevalnika

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

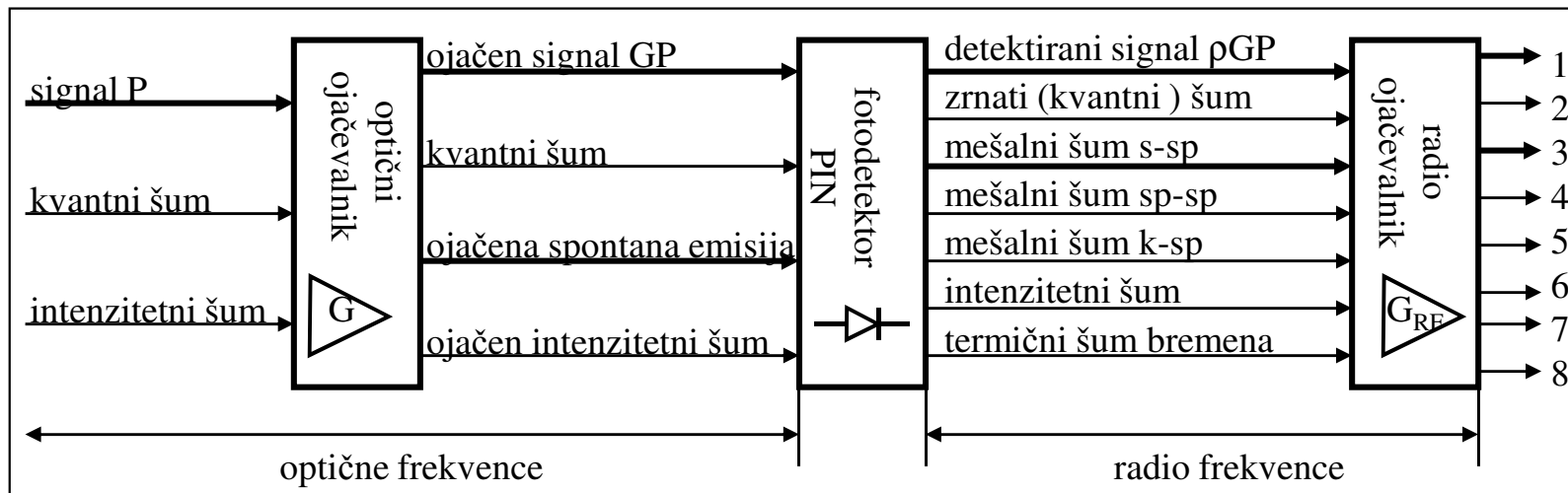


$(S/N)_{vh}$
razmerje
na vходу

$(S/N)_{izh}$
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

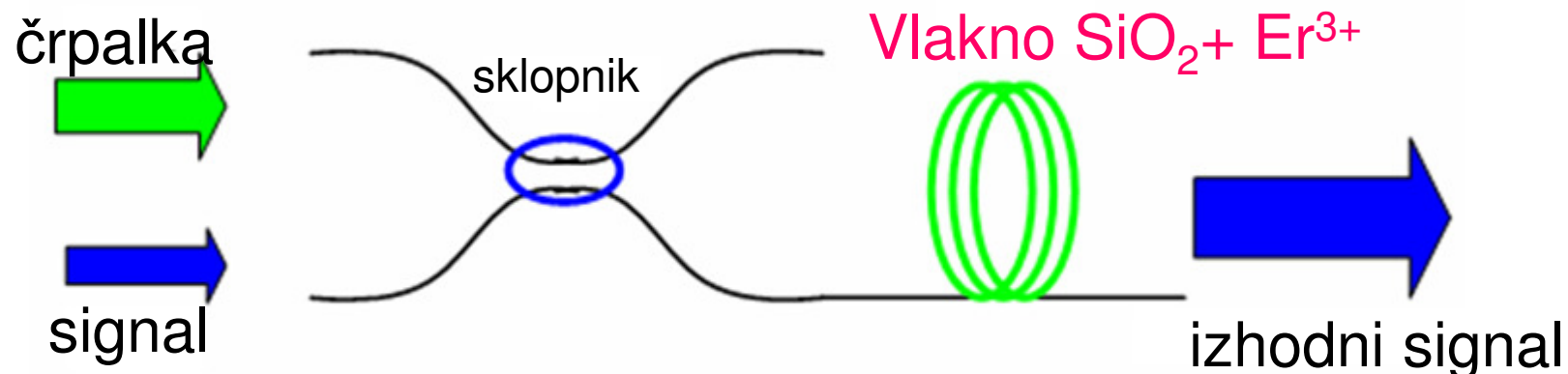
$(S/N)_2$
izhodno
razmerje
z optičnem
ojačevalnikom

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

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

Ramanski ojačevalnik

Ramanski porazdeljen ojačevalnik



- Uporablja isto vlakno kot signal
- Povzroča nizek šum (5 – 8 dB manj v primerjavi z EDFA in SOA)
- Porazdeljeno ojačenje zmanjšuje nelinearne pojave. Omogoča visoko moč signala
- Izravnava ojačenja v širokem frekvenčnem pasu z mnogočrpalnim vzbujanjem.

Ramanovo ojačevanje - lastnosti črpalnih načinov

1. Protismerno črpanje:

- preprečitev presluha med črpalke in signalom - neobčutljivost na šum črpalke
- ojačevanje oslabiljenega signala na končnem delu vlakna - \rightarrow majhna nelinearnost
- ojačevanje oslabiljenega signala na končnem delu vlakna - nižje razmerje signal/šum

2. Sosmerno črpanje:

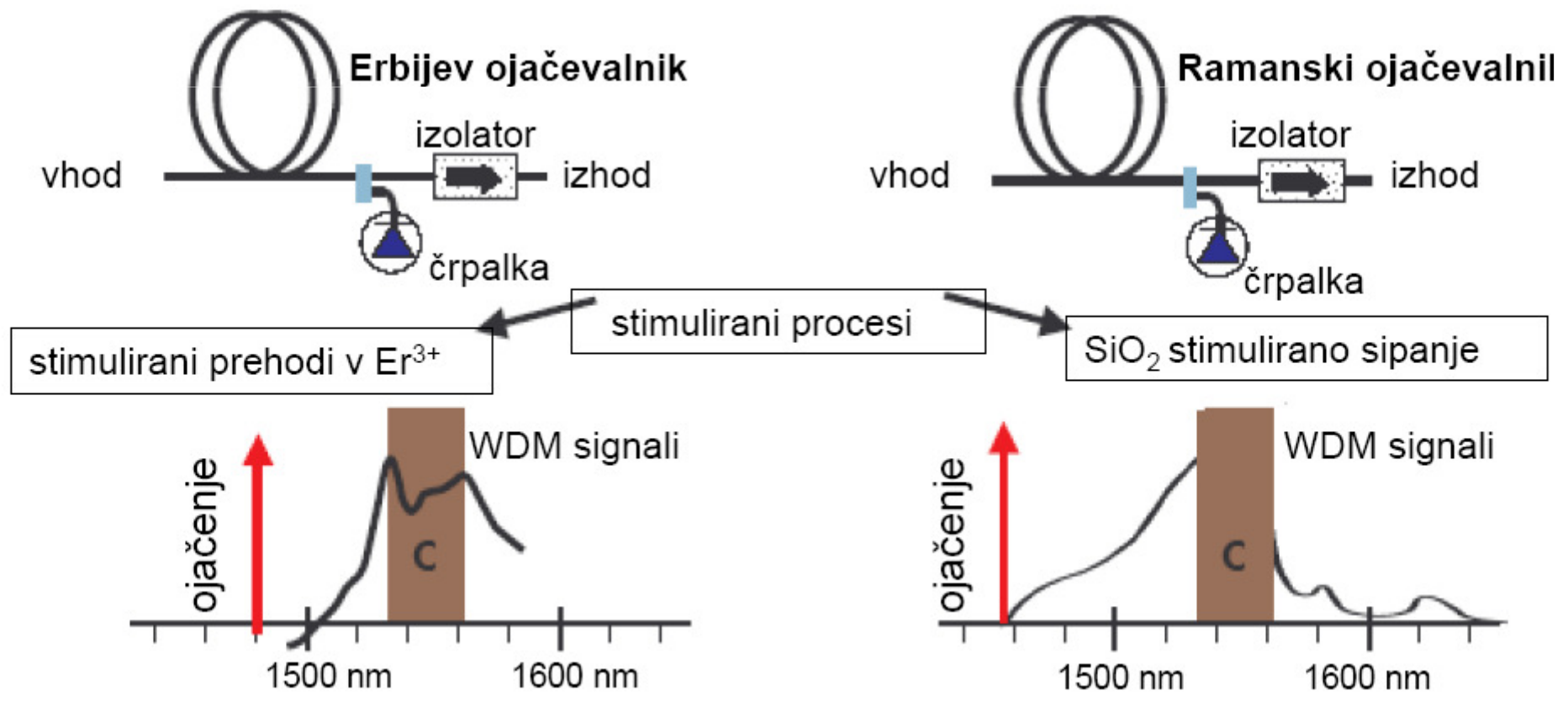
- presluh med črpalke in signalom - prenos fluktuacije moči črpalke na signal
- ojačevanje neoslabiljenega signala v začetnem delu vlakna - ugodno za razmerje signal/šum
- ojačevanje močnega signala v začetnem delu vlakna - neugodno za nelinearne pojave

3. Dvosmerno črpanje:

- doseganje kompromisnih karakteristik
- izravnava jakosti signala po celotni dolžini vlakenskega odseka

Optično vlakensko ojačevanje

- Fizikalni izvori ojačevanja v optičnem vlaknu:**
 - ojačevanje na aktivnih primeseh vlakna Er^{3+} , Tm^{3+} in Pr^{3+} ,
 - stimulirano Ramanovo sipanje.
- Tehnična izvedba ojačevalnika:**
 - diskretni vlakenski ojačevalnik (dolžina aktivnega vlakna reda 10 m),
 - porazdeljeni vlakenski ojačevalnik (dolžina aktivnega vlakna > 10 km).

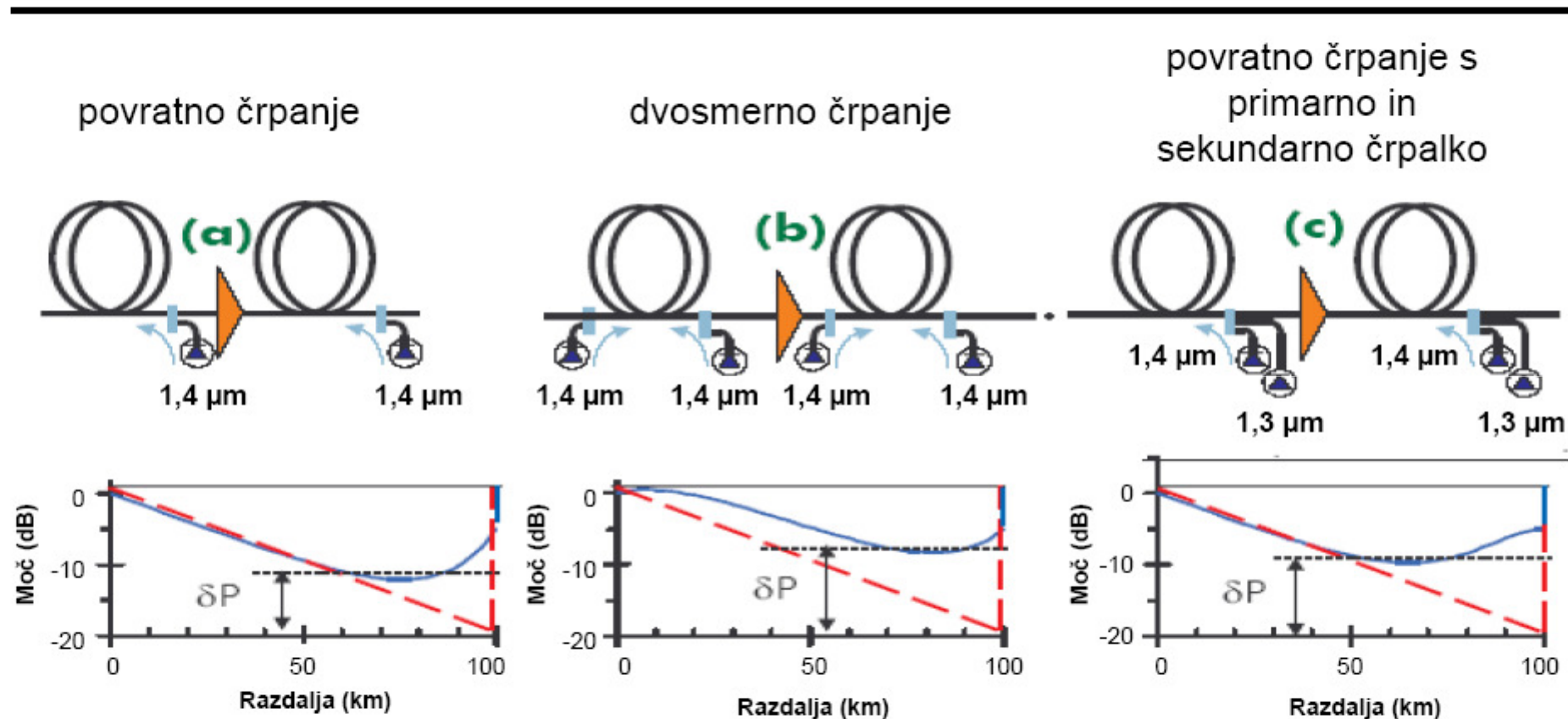


Načini črpanja vlakna:

enosmerno črpanje vlakna s primarno črpalko v povratni smeri (običajno)

dvosmerno črpanje vlakna s primarnima črpalkama

enosmerno črpanje vlakna v povratni smeri s primarno in sekundarno črpalko

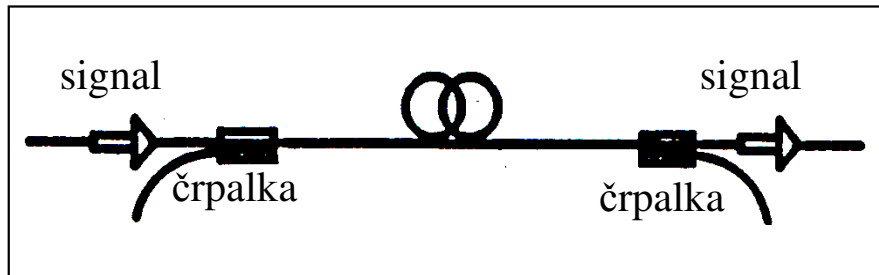


Primer različnih načinov porazdeljenega Ramanovega ojačevanja (ojačenje $G=15$ dB, znižanje šuma dP)

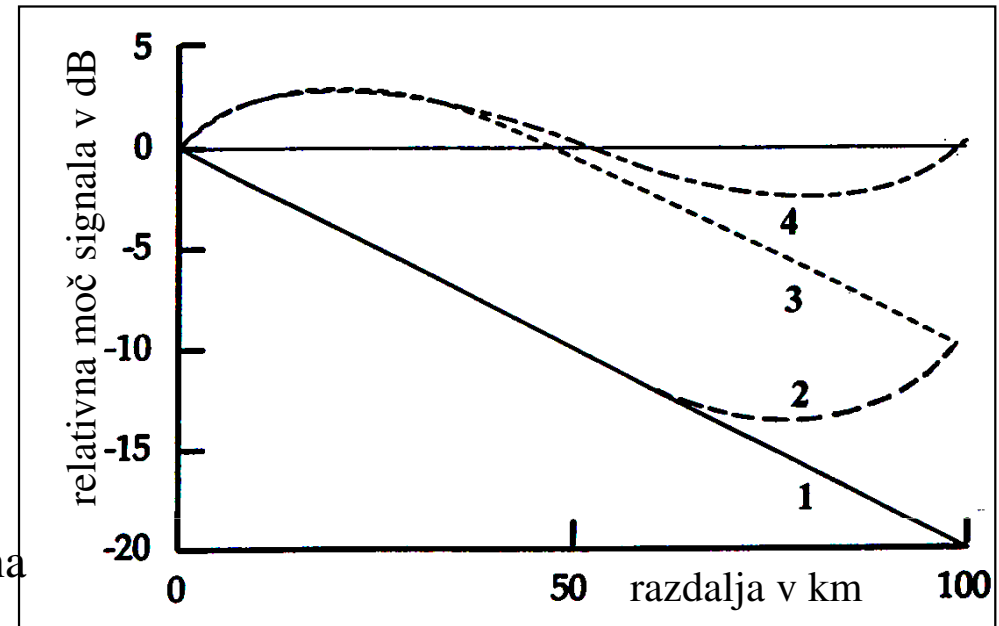
Sébastien Bigo, Alcatel, ECOC 05

Ramanovo ojačevanje - črpalni načini

• Sosmerna in protismerna črpalna



• Potek ojačenega signala v vlaknu



• Načini črpanja vlakna

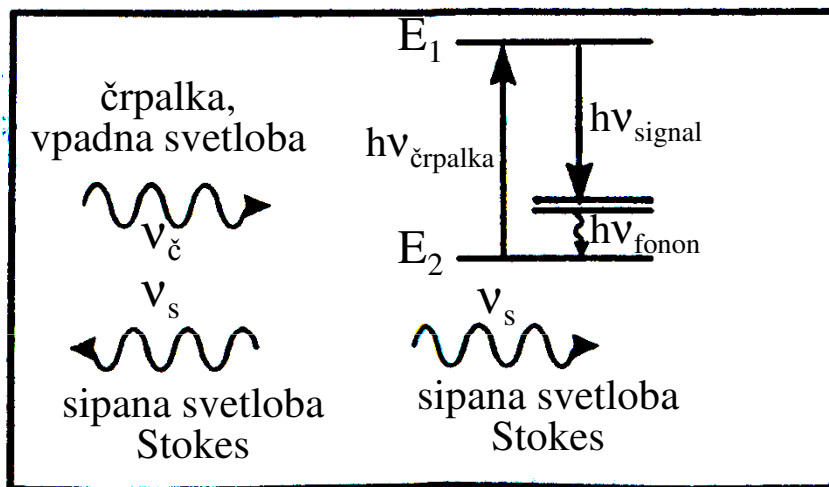
1. nečrpano vlakno
2. črpalna 200 mW na koncu vlakna
3. črpalna 200 mW na začetku vlakna
4. črpalni po 200 mW na vsakem koncu vlakna

• 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.

Stimulirano Ramanovo sipanje

Neresonančni pojav zaradi velike razpršenosti stanj vibracijske energije molekul v amorfni snovi stekla. Frekvenca svetlobe se premakne navzdol (Stokes), generirajo se optični fononi. Sipanje se pojavlja pri visoki moči svetlobe v vlaknu reda 0,5 W.



Sklopni enačbi:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{A_{ef\check{c}}} P_{\check{c}} P_s - \alpha_s P_s$$

$$\frac{dP_{\check{c}}}{dz} = -\frac{g_R}{A_{efs}} \frac{\nu_{\check{c}}}{\nu_s} P_{\check{c}} P_s - \alpha_{\check{c}} P_{\check{c}}$$

α koeficient slabljenja

g_R Ramanov koeficient

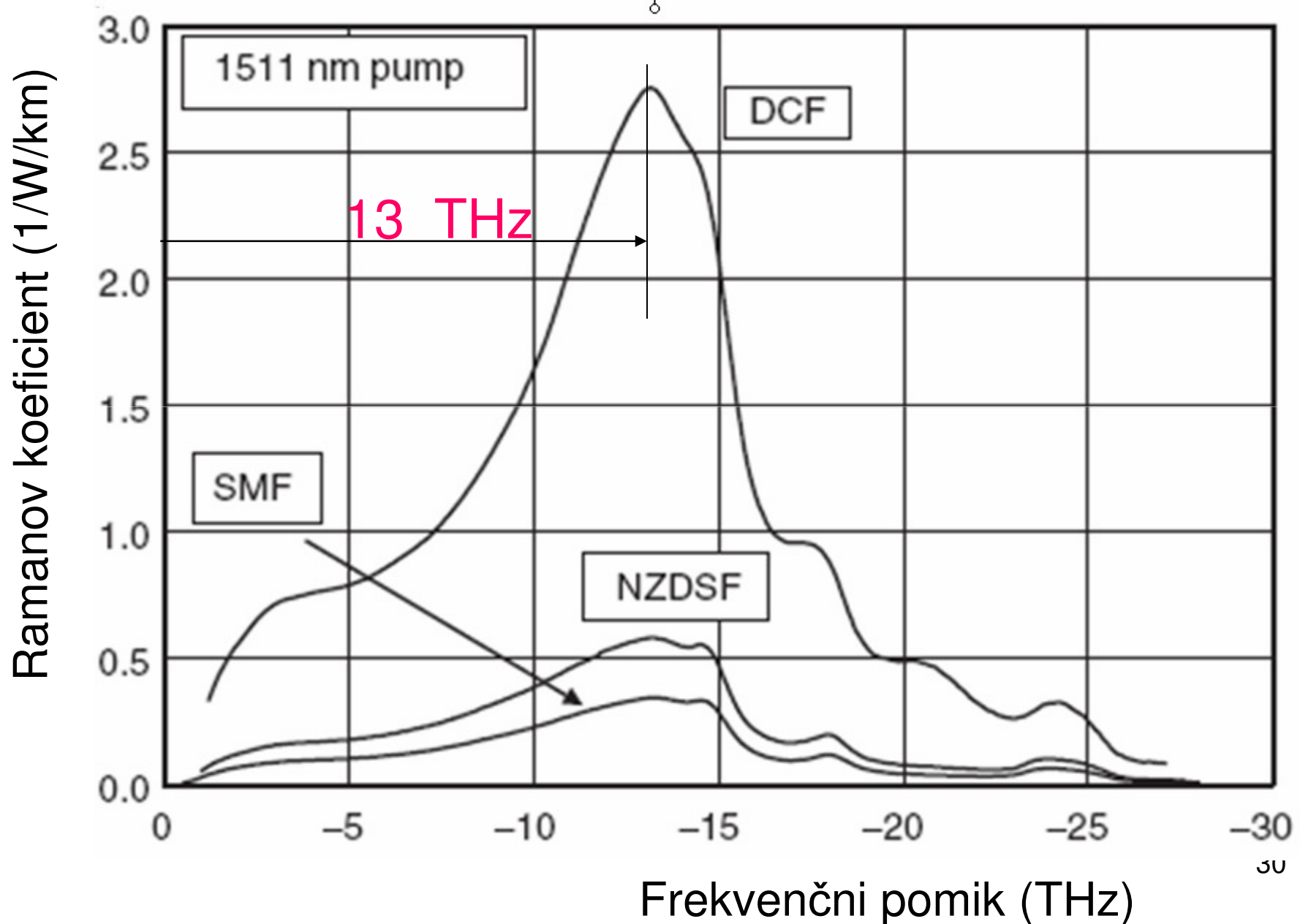
- **Značilnosti:**

- sosmerno in protismerno sipanje, $g_R = 10^{-13}$ m/W
- Stokesov premik do 20 THz
- širina spektra sipanja 6 THz
- šibko sipanje

- **Posledice:**

- možnost nizkošumnega sosmerne in protismernega ojačevanja
- sklop (presluh) med kanali WDM

Ramanov koeficient optičnih vlaken



Ramanov koeficient vlaknen

Type of Fiber	Raman Gain Efficiency (1/Wkm)	Effective Area (um ²)
Allwave	0.35	84.95
Corning NZ-DSF	0.72	80
LEAF (NZ-DSF)	0.45	72
SMF-28 (NDSF)	0.38	84.95
Truewave RS (NDSF)	0.58	60
Truewave Reach Fiber	0.6	55
OFS Raman Fiber	2.5	18.7

Ramanovo stimulirano sipanje

Približek
diferencialnih enačb

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_p P_s - \alpha_s P_s$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_p P_s - \alpha_p P_p$$

Črpalni signal

$$P_{p-c}(z) = P_{p0} \exp(-\alpha_p(L-z))$$

$$P_p(z) = P_{p0} \exp(-\alpha_p z)$$

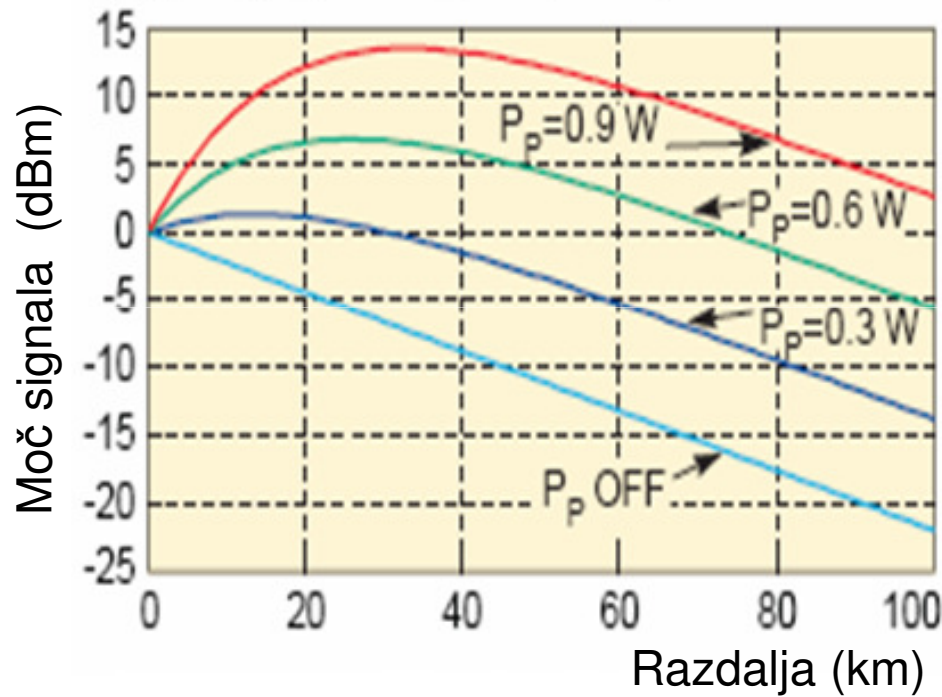
Ojačevani signal

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[-\alpha_s z + \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(0) \left(\frac{1 - e^{-\alpha_p z}}{\alpha_p} \right) \right]$$

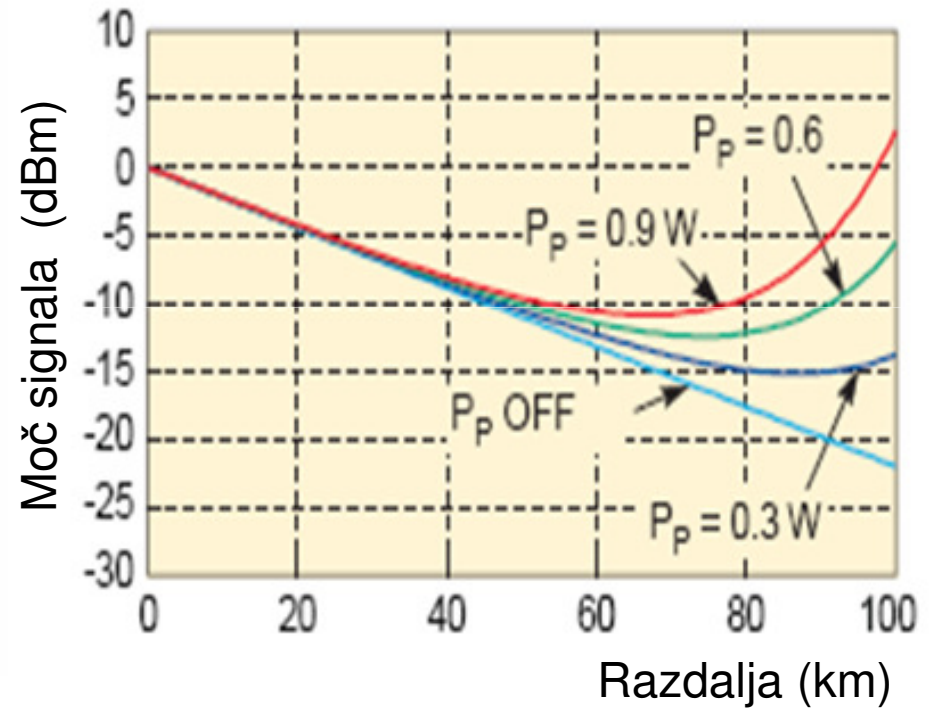
$$P_{s-c}(z) = P_s(0) \exp \left[-\alpha_s z + \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(0) \left(\frac{e^{-\alpha_p L} [e^{\alpha_p z} - 1]}{\alpha_p} \right) \right]$$

Sosmerno in protismerno črpanje

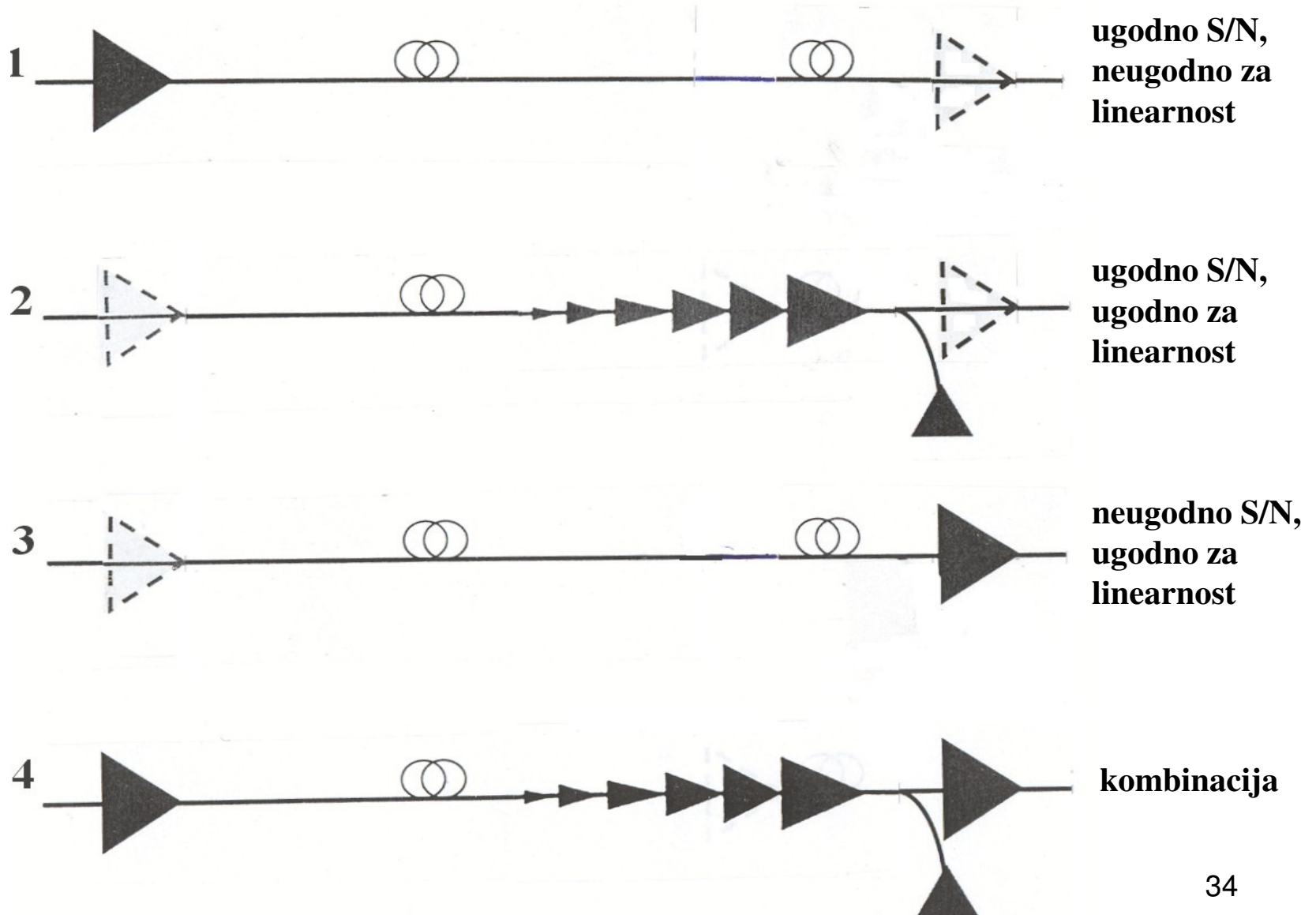
Ojačevani signal in črpalni signal se širita sosmerno od oddajnika proti sprejemniku



Črpalni signal se širi od sprejemnika proti oddajniku v nasprotni smeri širjenja ojačevanega signala

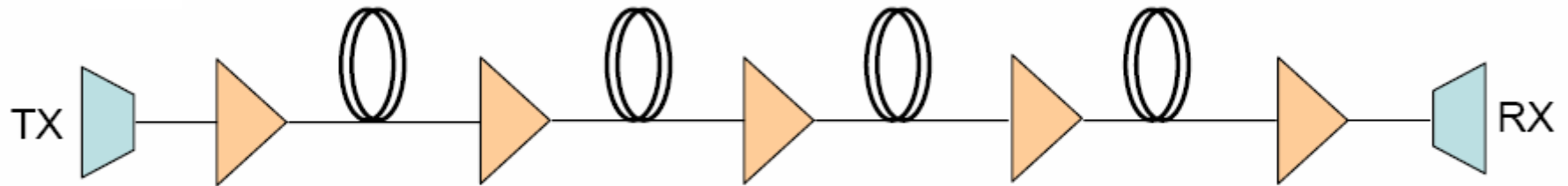


Hibridno ojačevanje - Raman in diskretni ojačevalniki

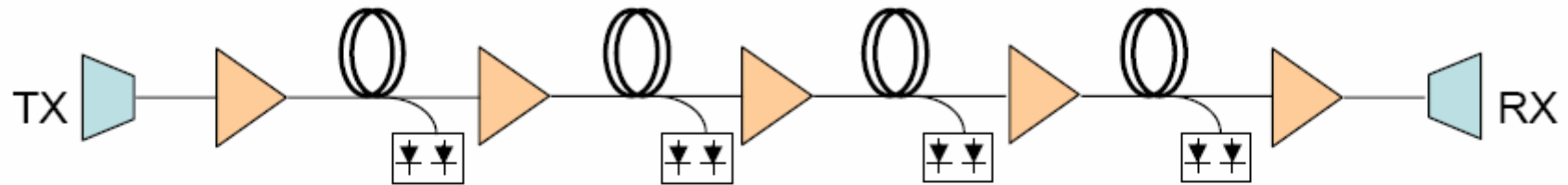


EDFA, EDFA + DRA, DRA

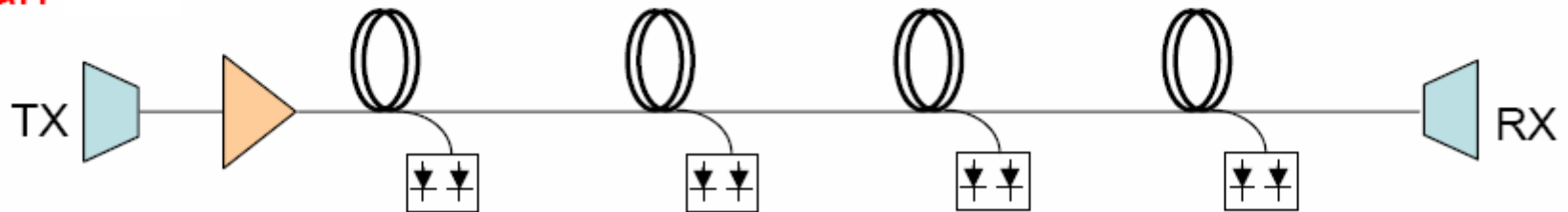
EDFA



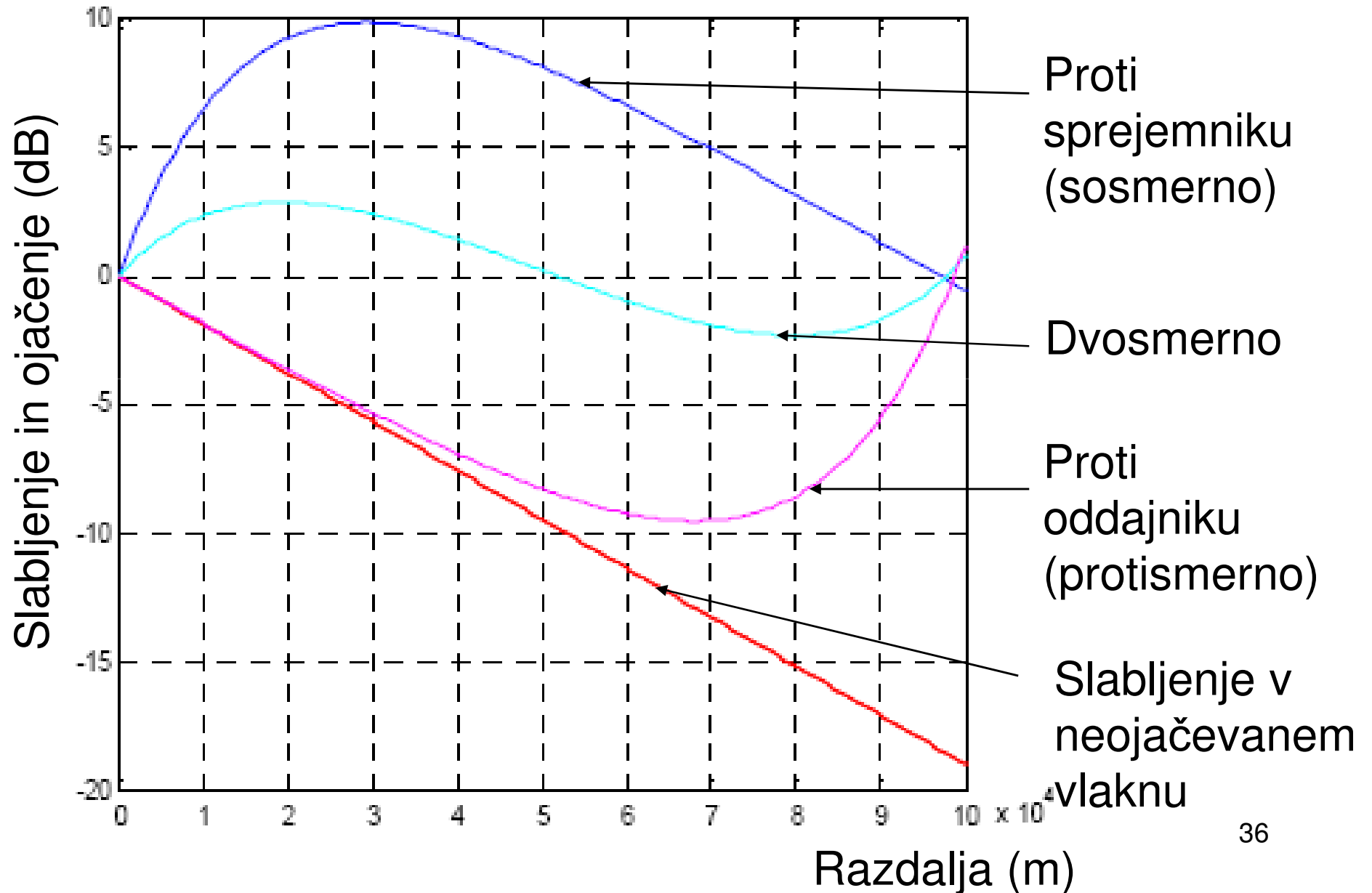
EDFA + Raman

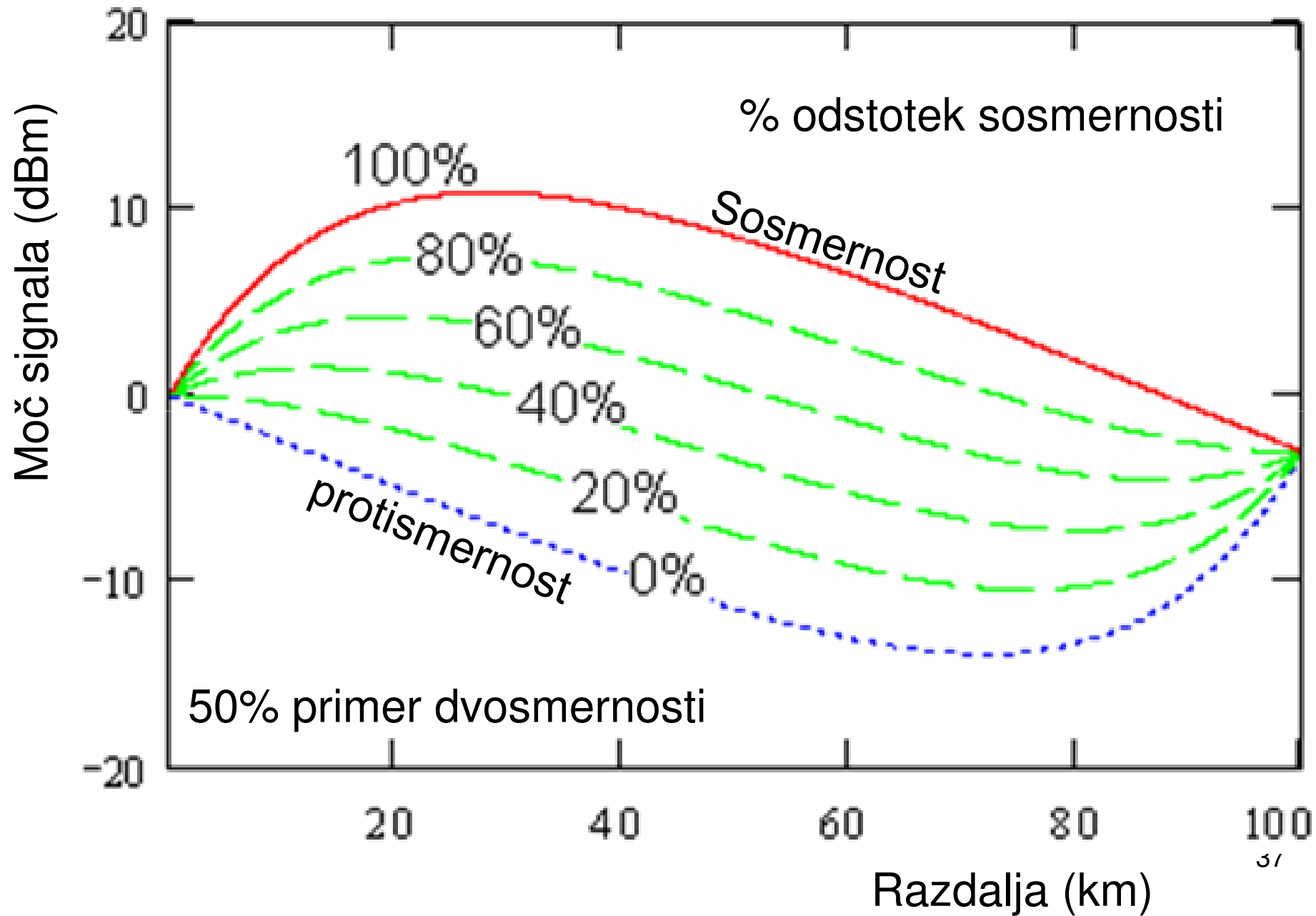


Raman

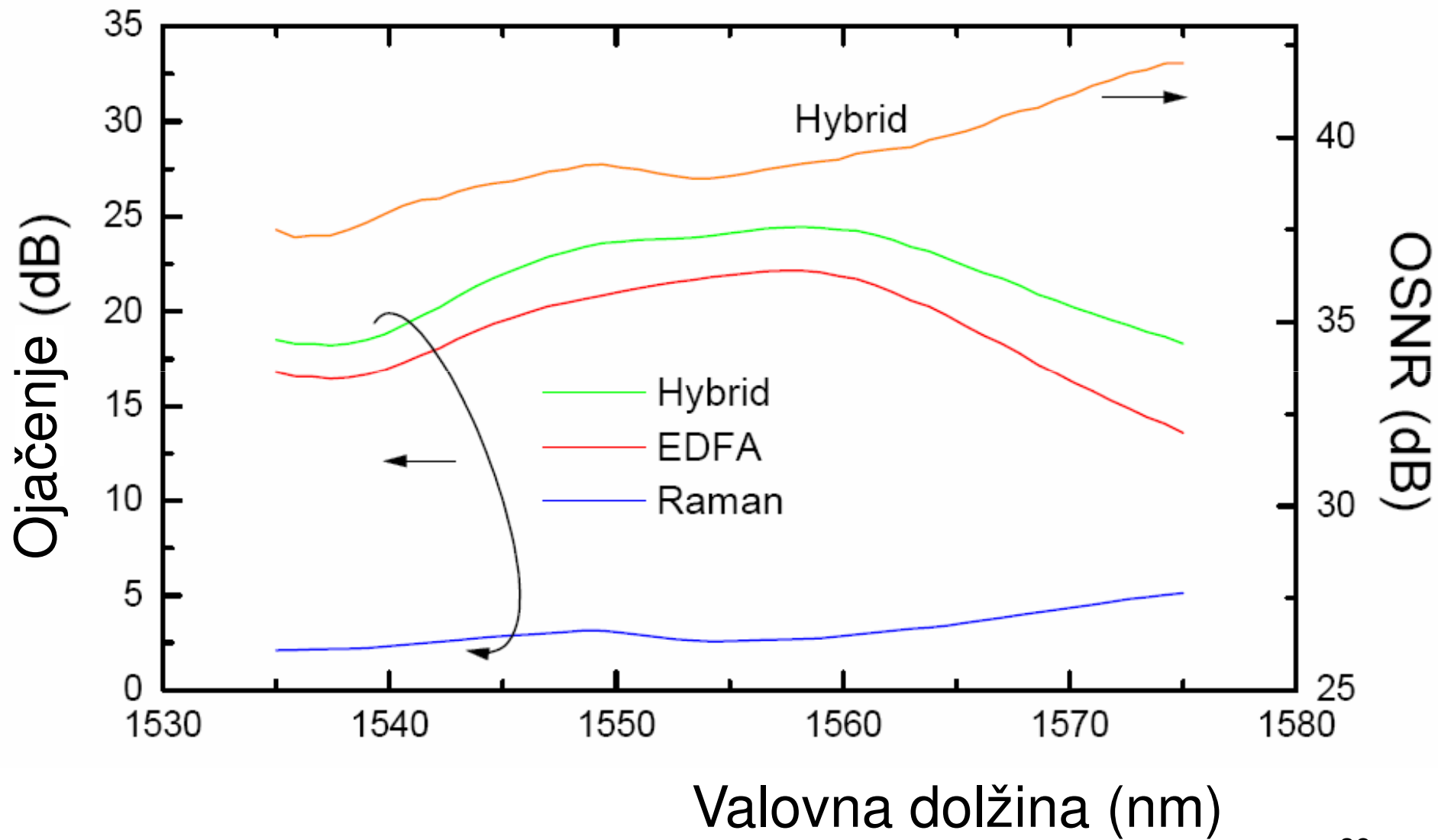


Ramanovo porazdeljeno ojačenje

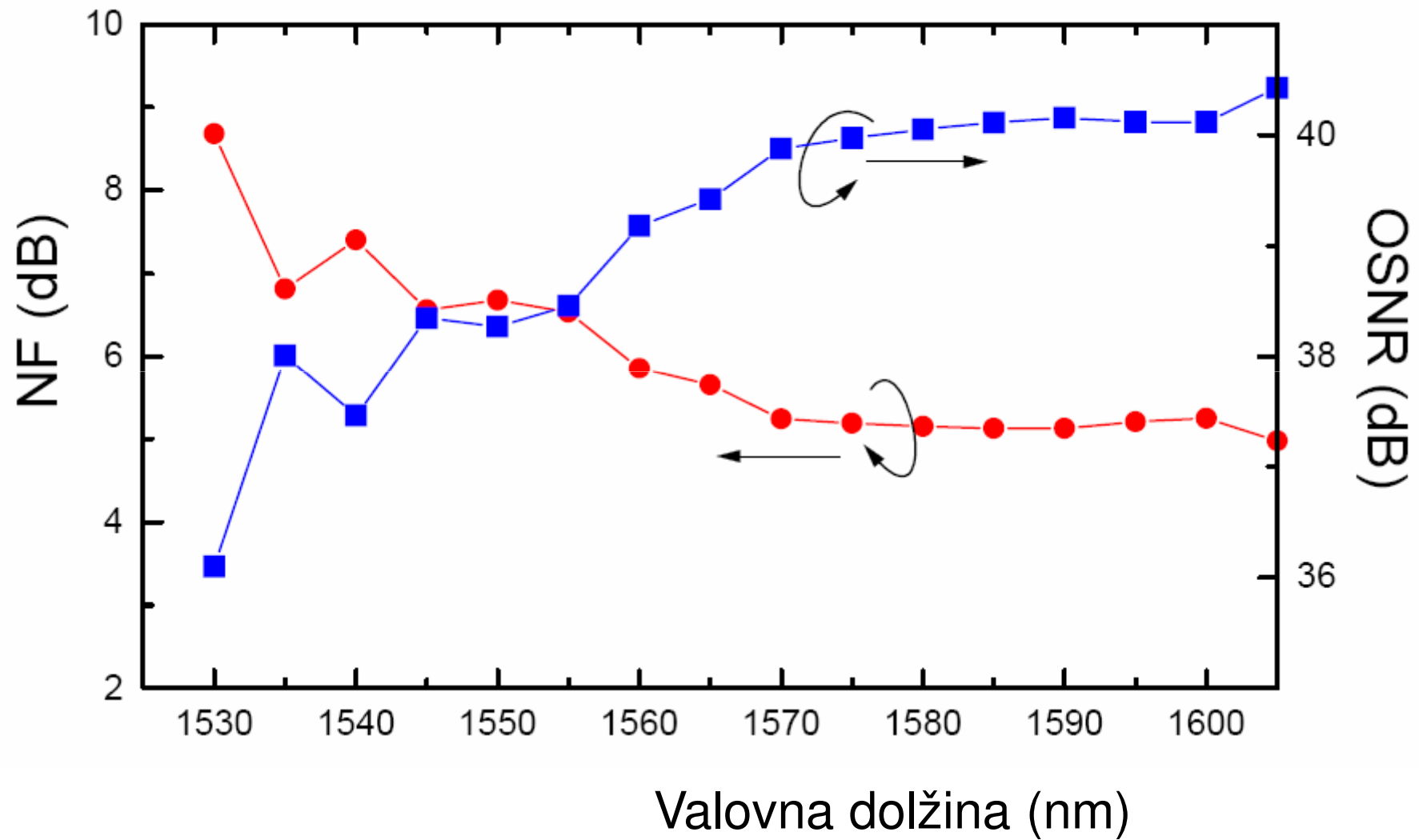




Ojačenje in šum

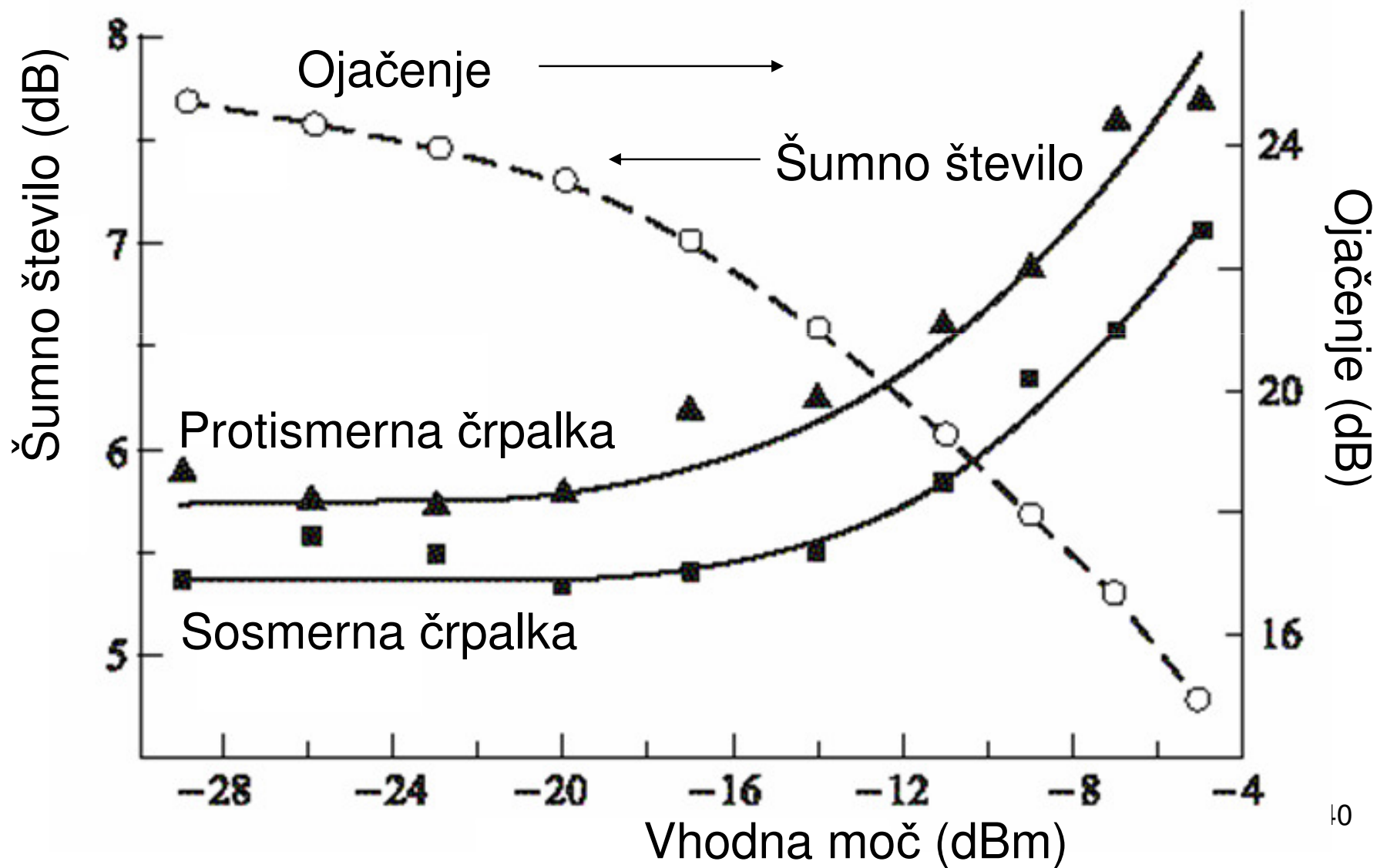


Šumno število in optični S/N

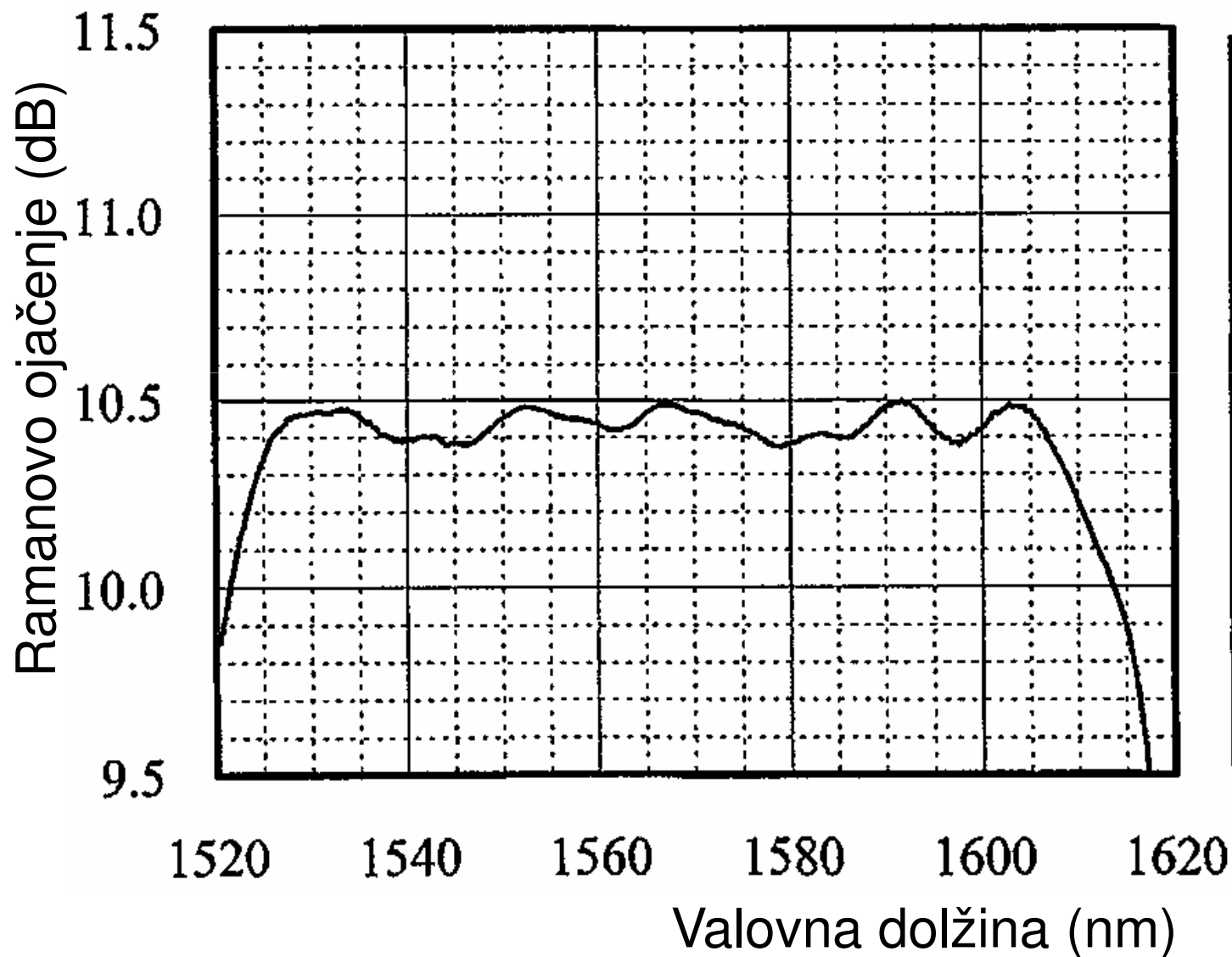


Raman - šumno število in ojačenje

- Sosmerna in protismerna črpalka



Mogočrpalno ojačevanje



Frekvenca [THz]	Moč [mW]
212.2	91
211.1	98
210.2	95
209.2	52
208.2	52
207.3	39
206.2	38
205.3	29
204.2	35
203.3	33
200.1	51
199.3	32

Prednost porazdeljenega ojačevanja

- Razmerje signala in šuma pri ojačevanju na različnih mestih vlakenskega odseka:

$$\text{en ojačevalni odsek: } \frac{P_{s0}}{\rho_{ASE} \Delta \nu} > OSNR > \frac{10^{-L_{dB}} P_{s0}}{\rho_{ASE} \Delta \nu}$$

poojačevanje Raman predojačevanje

Šum se zmanjša pri premiku mesta ojačevanja proti začetku vlakna

- V kombinaciji z Erbijevim vlakenskim ojačevalnikom razbremenjuje Ramanov porazdeljeni ojačevalnik potrebno ojačenje G erbijevega vlakenskega ojačevalnika in s tem zmanjšuje njegovo ojačeno spontano emisijo. Zmanjšajo se tudi nelinearnosti.

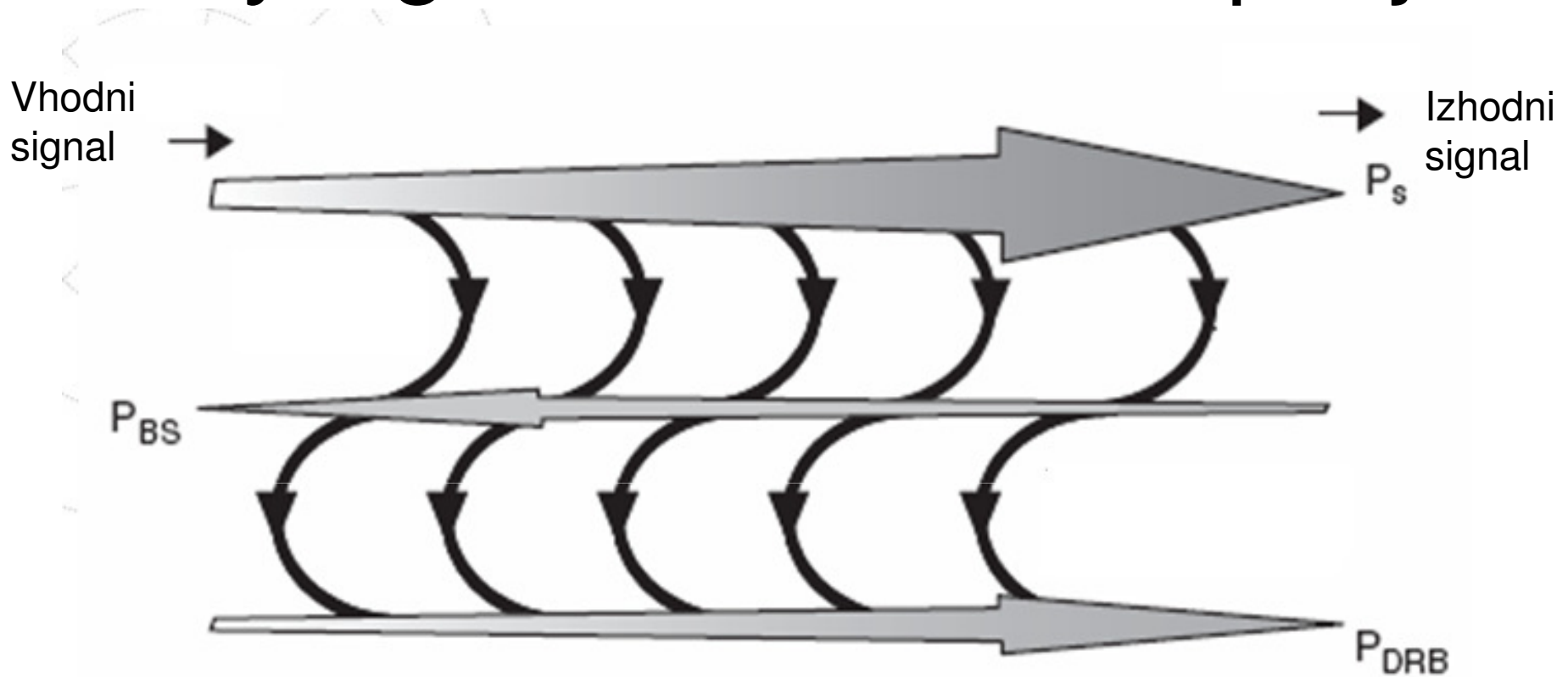
- Razmerje signala in šuma pri prehodu na porazdeljeno ojačevanje (več kratkih ojačevanih odsekov):

$$G = e^{\alpha L} > 2e^{\frac{\alpha L}{2}} > \dots > Ne^{\frac{\alpha L}{N}} = N^{\sqrt[N]{G}}$$

en odsek L 2 odseka $L/2$ N odsekov L/N

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{s0}}{G h \nu F \Delta f} < \frac{P_{s0}}{2\sqrt{G} h \nu F \Delta f} < \dots < \frac{P_{s0}}{N^{\sqrt[N]{G}} h \nu F \Delta f}$$

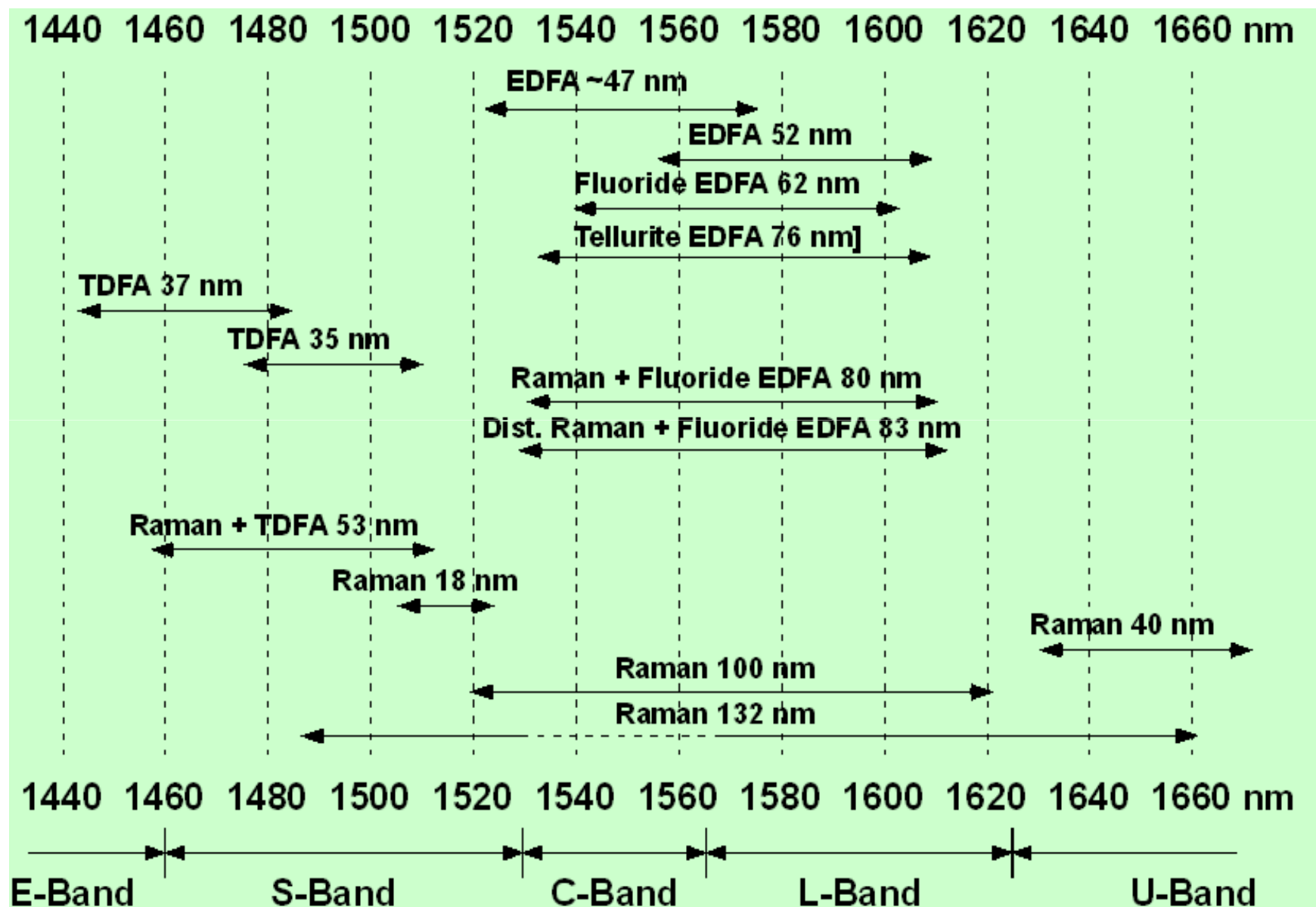
Rayleighovo dvokratno sipanje



$$-\frac{dP_{BS}}{dz} = \frac{\omega_p}{\omega_s} g_p P_p P_{BS} - \alpha_s P_{BS} + \alpha_R S (P_s - P_{DRB})$$

$$\frac{dP_{DRB}}{dz} = \frac{\omega_p}{\omega_s} g_p P_p P_{DRB} - \alpha_s P_{DRB} + \alpha_R S P_{BS},$$

Ojačevalni pas vlakenskih ojačevalnikov

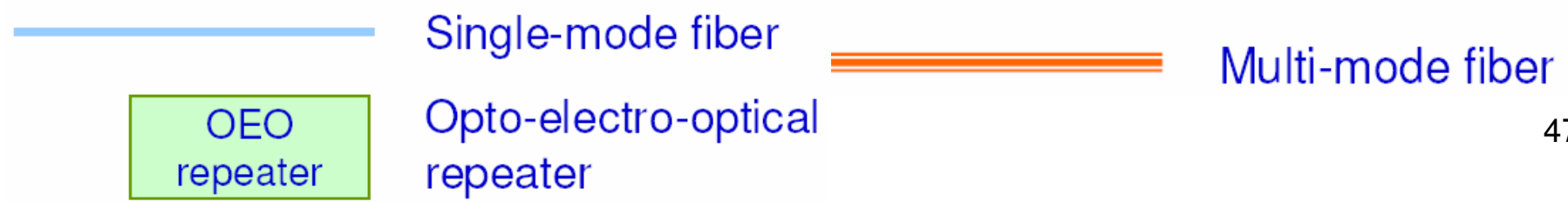
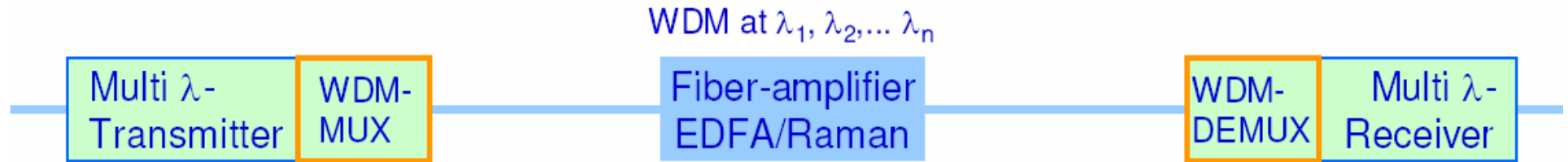
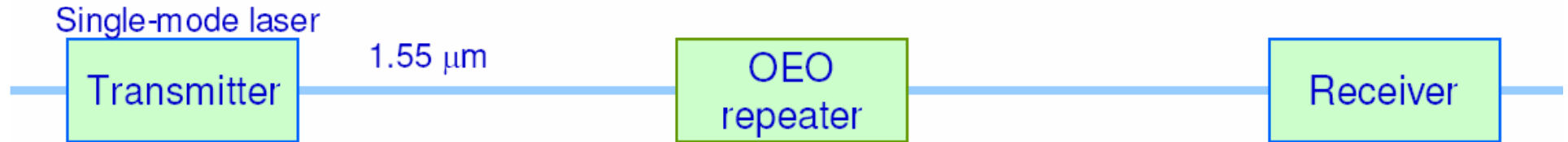
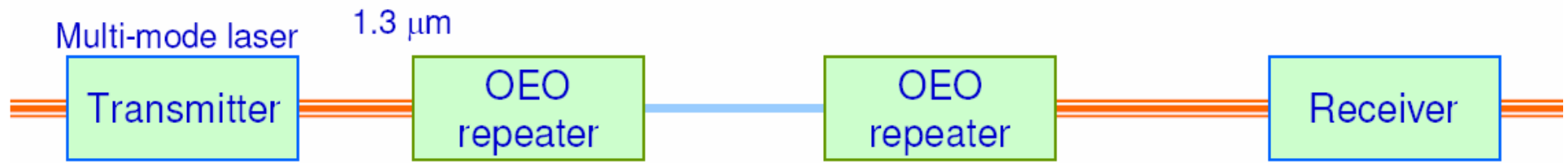
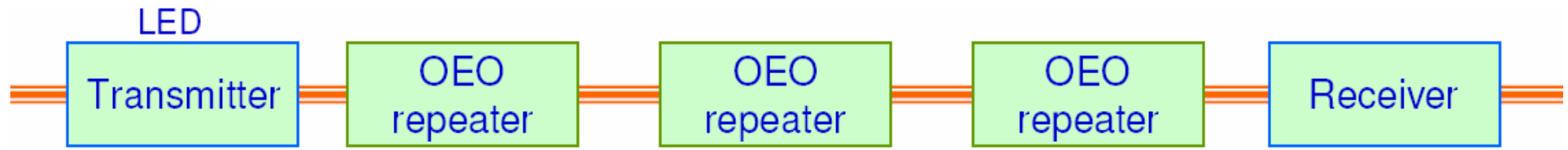


Primerjalni podatki

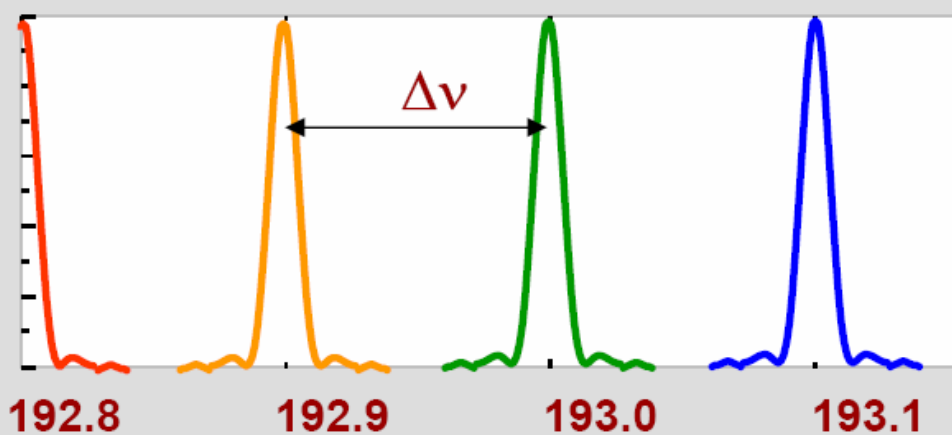
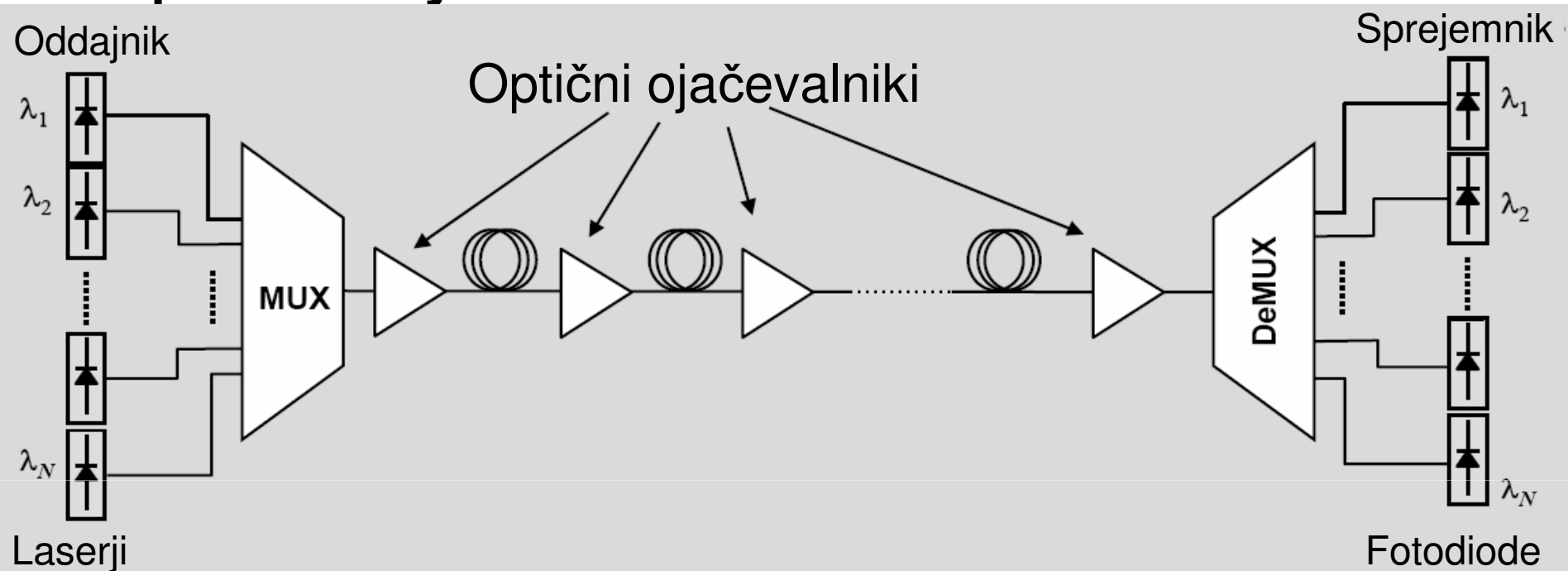
	SOA	EDFA	RAMAN	
Dobitek	>30	>40	>25	dB
Val. dolžina	1280-1650	1530-1560+	1280-1650	nm
Δf (3dB)	60	30-60	<i>pump dependent</i>	nm
P nasičena	15	20	$0.5 * Pump$	dBm
P nasič.,max	18	22	$0.75 * Pump$	dBm
Polarizacija	<0.5	0	0	dB
Šumno število	8	5	5	dB
Črpalka	<400 mA	25 dBm	>30 dBm	
Časovna konst.	0.2 ns	10 ms	fs	
Velikost	<i>compact</i>	<i>rack module</i>	<i>bulk module</i>	
Cena	<i>competitive</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	

Ojačevalniki in ponavljalniki

Ponavljalniki in vlakenski ojačevalniki



Optični ojačevalniki v WDM sistemih



$\Delta\nu = 100 \text{ GHz}, 50 \text{ GHz},$
(up to 40 Gb/s) DWDM

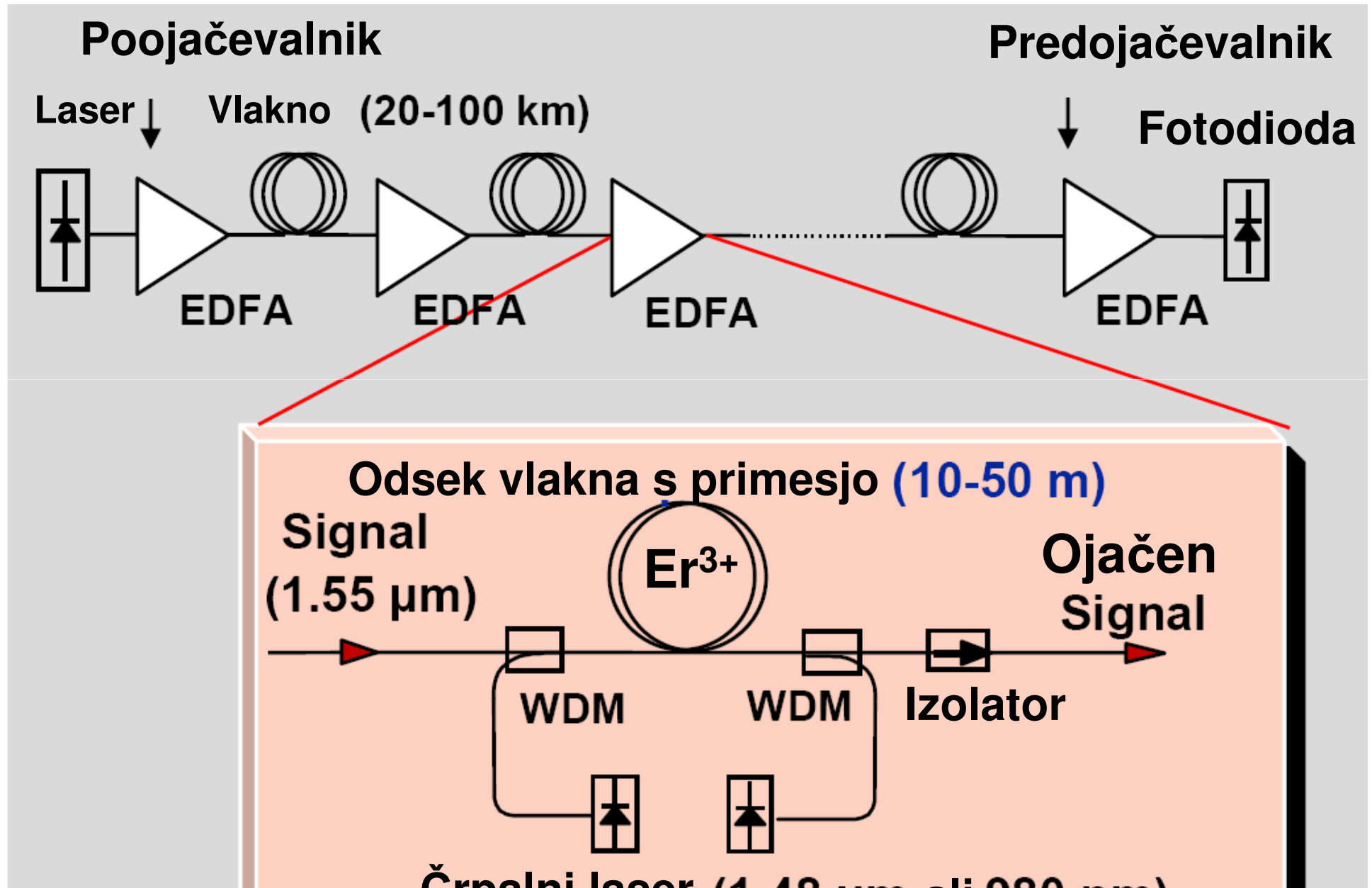
25 GHz, or 12.5 GHz
(up to 10 Gb/s)
UDWDM (Ultra Dense)

ITU mreža

$f_0 = 193,1 \text{ THz}$

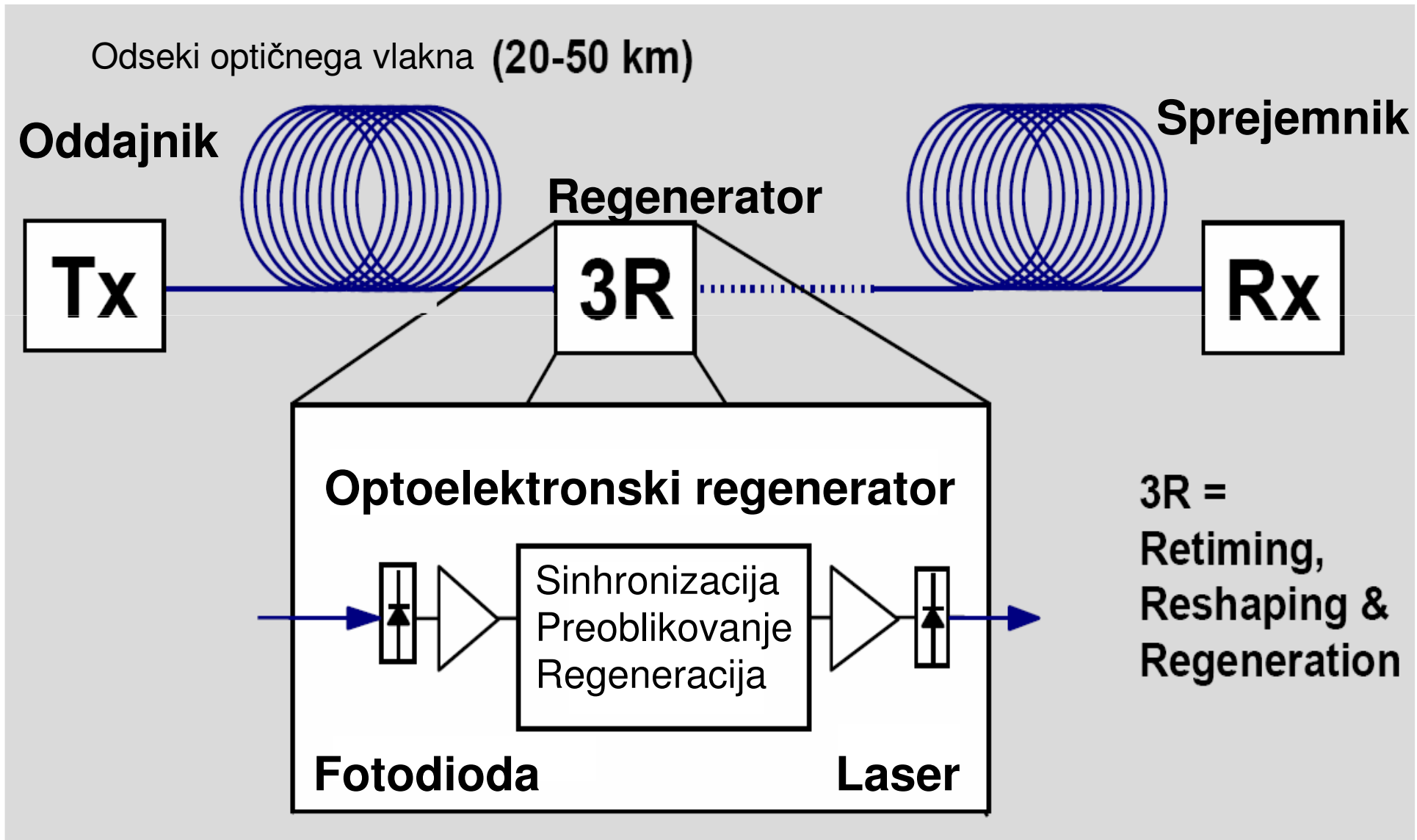
$\lambda_0 = 1552,52 \text{ nm}$

EDFA pojačevalnik in predojačevalnik



Optoelektronski ponavljalnik

Po določenem številu ojačevalnih odsekov je potrebno signal obnoviti in ga očistiti šuma in motenj ter učinkov disperzije in nelinearnosti in drugih vplivov:



Sklep

1. Optični vlakenski ojačevalniki so ena izmed dveh tehnologij (druga je WDM), ki sta z večanjem dosega in bitne hitrosti spodbudili izjemen razvoj optičnih komunikacij.
2. SOA in FOA ostaneta še naprej temeljni tehnologiji optičnega ojačevanja (SOA kot gradnik, FOA v prenosu).

Konec