

Optické komunikácie

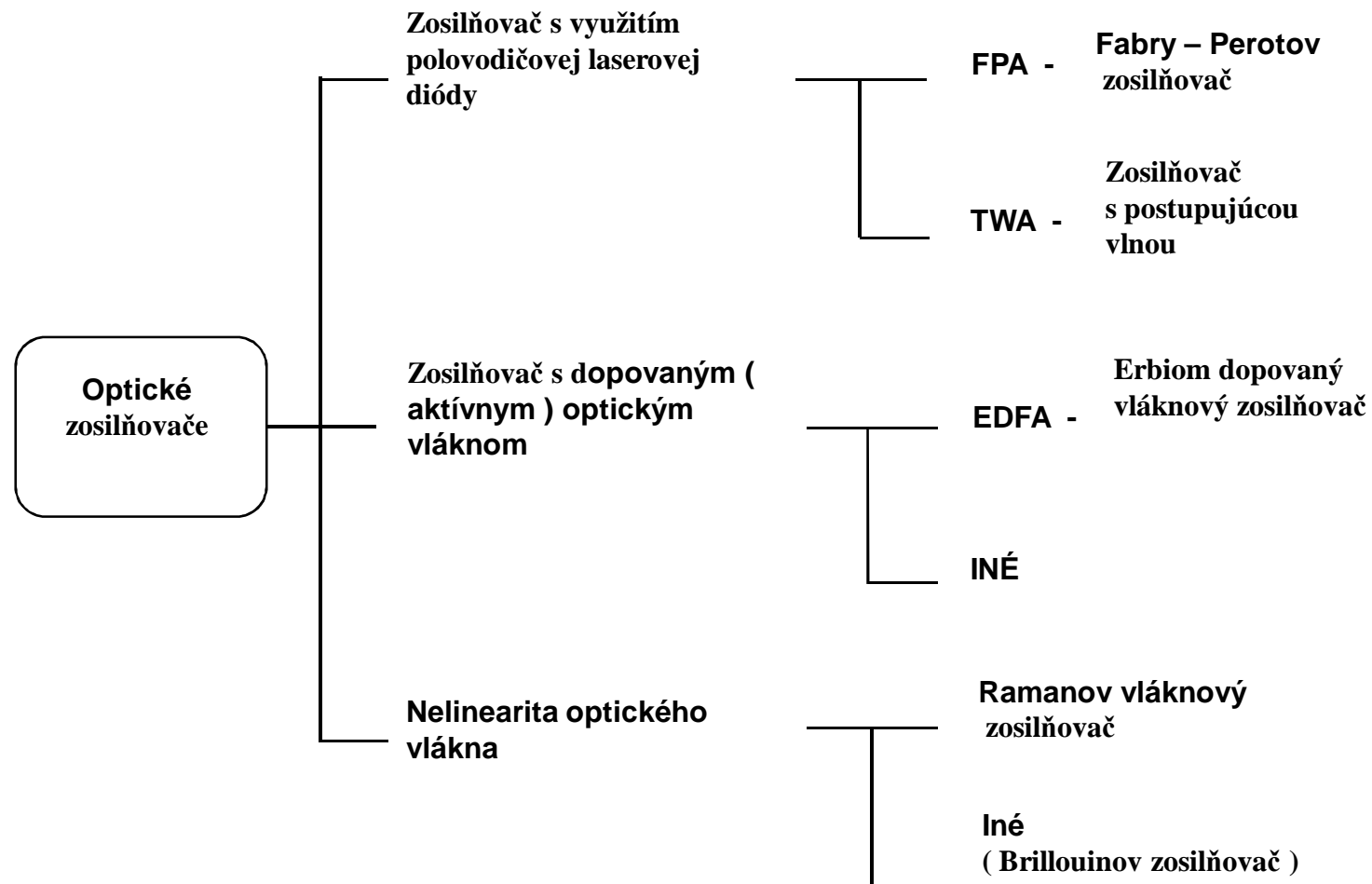
Optický zosilňovač

Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

- n **Optické zosilňovanie** je veľmi užitočné v **systeme IM/DD**:
pre zníženie pôsobenia tepelných šumov obvodov a
pri dosiahnutí vysokej citlivosti prijímača
- n **Používa sa**:
na preklopenie veľkých vzdialeností medzi optickým vysielačom a
prijímačom
vo video distribučných systémoch (CATV , interaktívne TV, ...),
pri kompenzácii distribučných strát rozvodu (**PON**)

10.1 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI OPTICKÉHO ZOSILŇOVAČA

- n **Typy laserov:** plynové, tuholátkové, polovodičové, vláknové, atď.
- n **Principiálne ktorýkoľvek laser** môže pracovať v sústave **optického zosilňovača**



Obr. 10.1 Klasifikácia optických zosilňovačov.

Rozdelenie optických zosilňovačov:

1.) Zosilňovače s využitím polovodičovej LD:

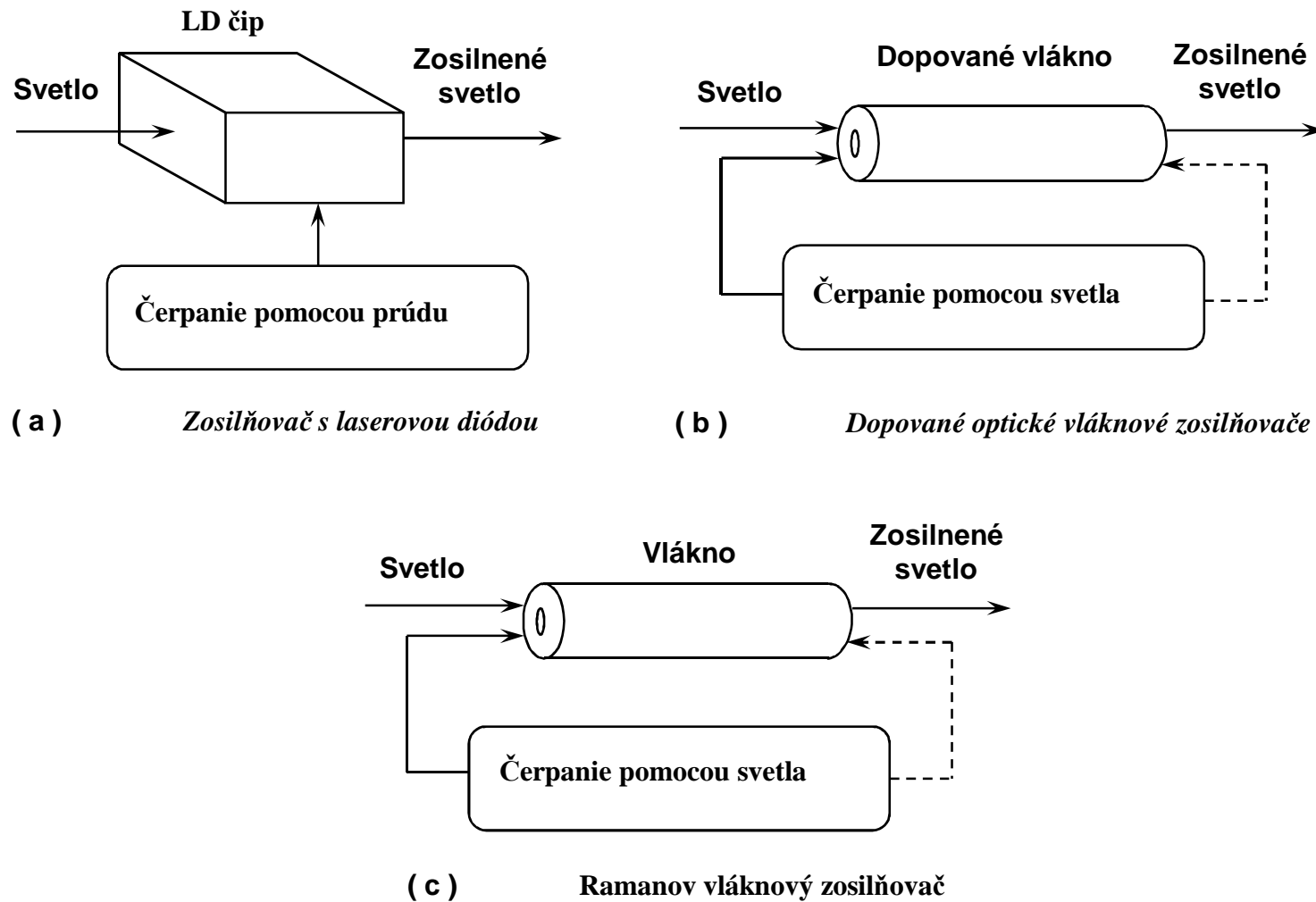
- Zosilňovač s postupujúcou vlnou
 - TWA (Traveling Wave Amplifier)
- Fabryho - Perotov zosilňovač
 - FPA (Fabry - Perot Amplifier)

2.) Zosilňovače s dopovaným aktívnym optickým vláknom:

- n Erbium dopovaný vláknový zosilňovač
 - EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

3.) Optický zosilňovač zrealizovaný pomocou nelinearity vlákna:

- n Ramanov vláknový zosilňovač
- n Brillouinov zosilňovač



Obr. 10.2 Konfigurácia typických optických zosilňovačov:

- (a) Zosilňovač s laserovou diódou,
- (b) Dopovaný optický vláknový zosilňovač,
- (c) Ramanov optický vláknový zosilňovač.

V optických prenosových systémoch sa využívajú:

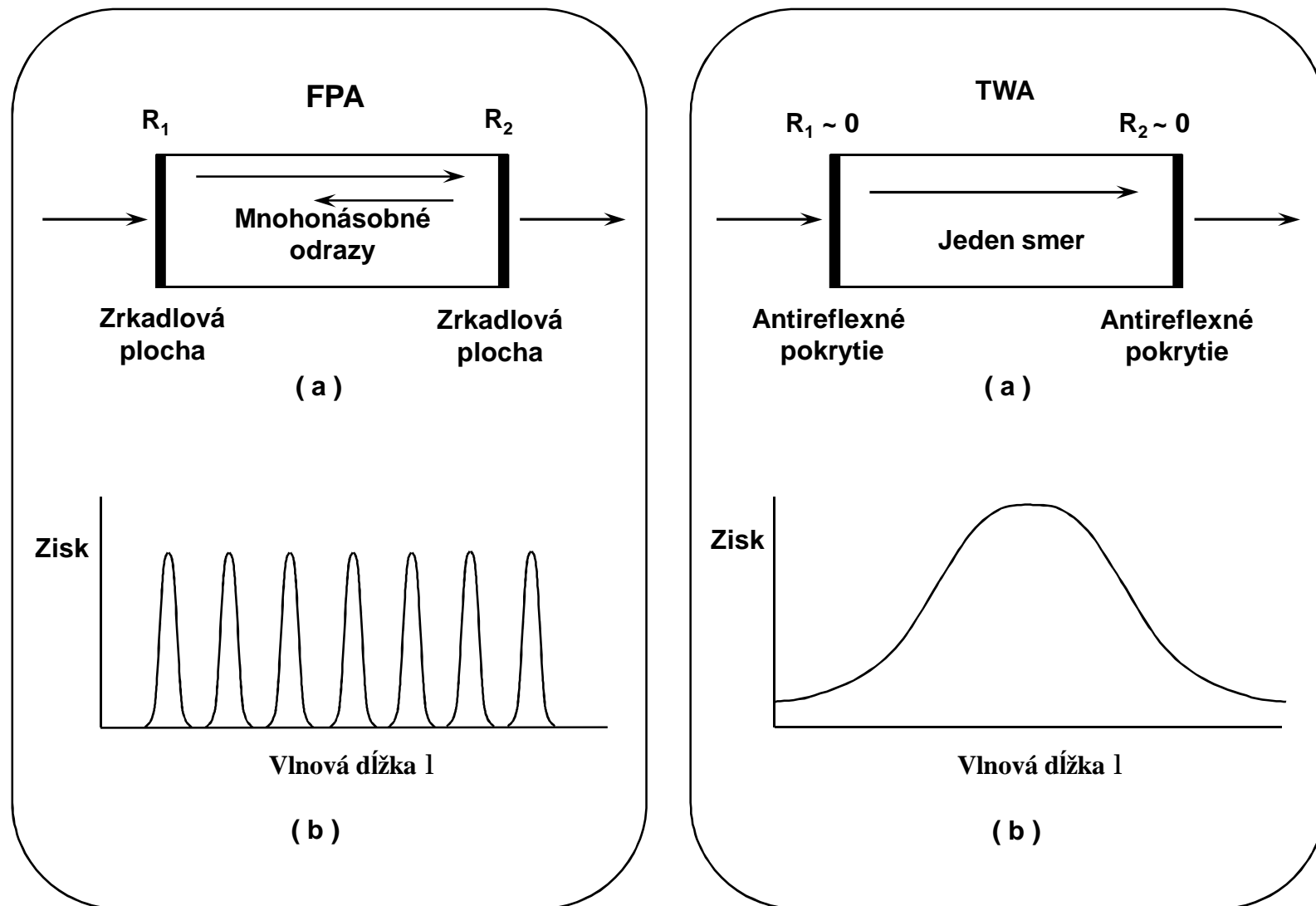
- n Zosilňovač s laserovou diódou
- n Zosilňovač s dopovaným vláknom - EDFA
- n Ramanov vláknový zosilňovač

Delenie podľa prechodu vlny zosilňovacím médiom (aktívnou látkou):

- n Zosilňovače s jedným smerom prechodu
- n Zosilňovače s niekoľkonásobnými odrazmi

Fabryho - Perotov zosilňovač (FPA):

- n Využíva LD - je čerpaný prúdom
- n Mnohonásobné odrazy sa dejú medzi čelnými plochami LD a tým sa vytvára rezonancia



Obr.10 .3 Fabryho – Perotov zosilňovač a zosilňovač s postupujúcou vlnou (TWA).

Zosilňovače s postupujúcou vlnou (TWA):

- n Mnohonásobné odrazy od čelných plôch LD nevznikajú - malá odrazivosť vlny sa dosahuje špeciálnou povrchovou úpravou čelných plôch LD
- n Výhoda: malé rozmery - fotonické integrované obvody
- n Nevýhoda: vstupná apertúra neprispôsobená OV

Erbiom dopovaný zosilňovač (EDFA):

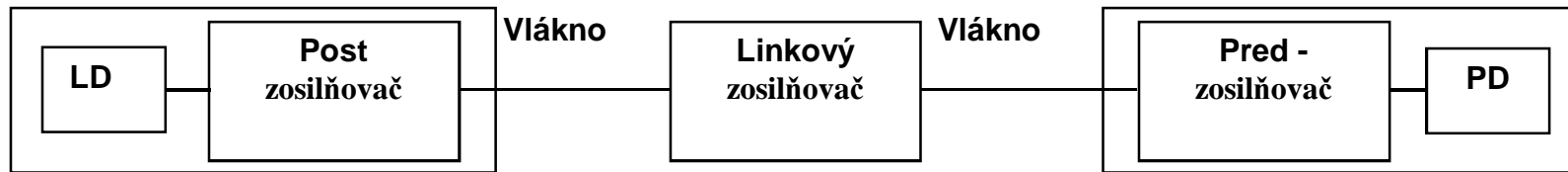
- n Zosilňuje svetlo v okolí $1,5 \mu\text{m}$
- n Pre $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ a v okolí $1,7 \mu\text{m}$ sa používajú dopanty (Nd^{3+} , Sm^{3+} , Tu^{3+} , Pr^{3+})
- n Čerpaný zdroj svetla
- n Perspektívny

Ramanov vláknový zosilňovač:

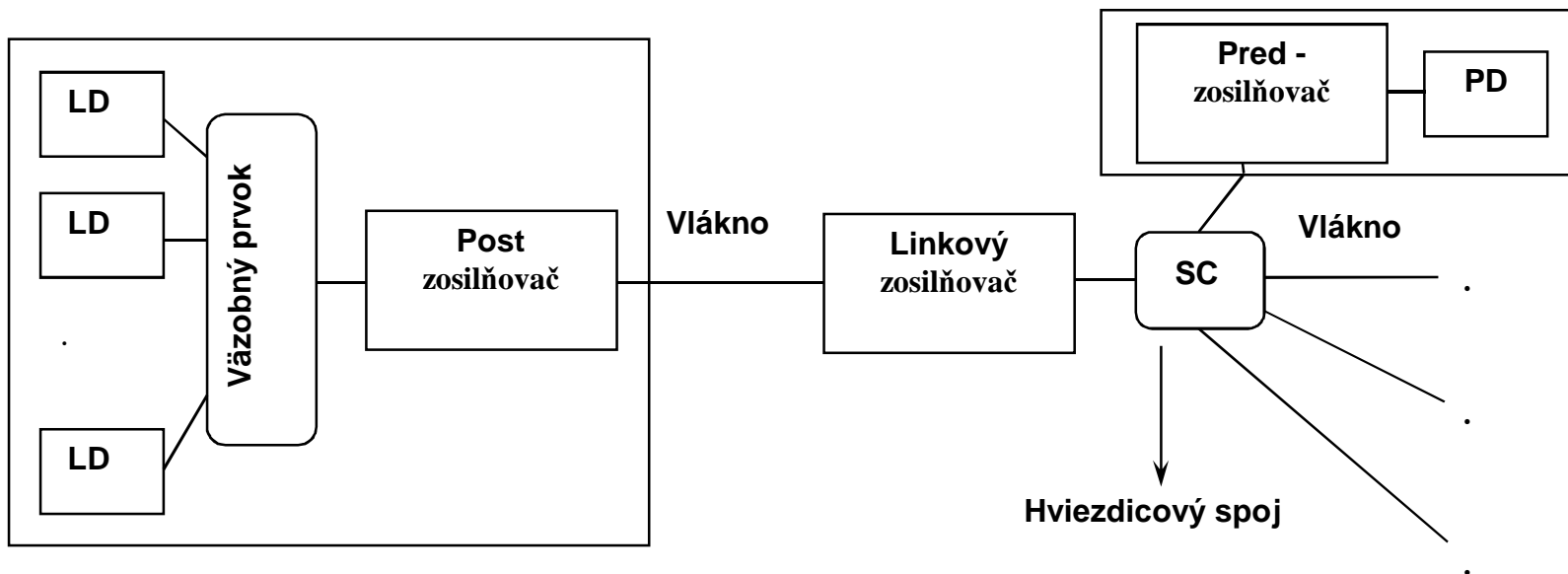
- n Nečerpá sa svetlom z LD, čo je nevýhoda pre aplikácie v optických prenosových systémoch

Optický zosilňovač aplikujeme:

- **Postzosilňovač** zvyšuje výkon vysielaného optického signálu v prípade nedostatočného výkonu zdroja svetla
- **Linkový zosilňovač** kompenzuje straty v optickom kábli a slúži ako analógový opakovač
- **Predzosilňovač** zvyšuje vstupný výkon prijatého optického signálu a potláča príspevky od tepelného šumu v obvode



(a)



(b)

Obr. 10.4 Použitie optických zosilňovačov:
 (a) ako postzosilňovač, linkový zosilňovač, predzosilňovač,
 (b) v sieti PON.

POROVNANIE ZÁKLADNÝCH VLASTNOSTÍ TYPICKÝCH OPTICKÝCH ZOSILŇOVAČOV

	LD ZOSILŇOVAČE			
	Zosilňovač s postup. vlnou (TWA)	Fabryho - Perotov zosilňovač (FPA)	Dopované vláknové zosilňovače (EDFA)	Vlákná s nelinearitou (Ramanov vlákn. zosilň.)
Typický zisk	~ 30 dB (R = 0,01 %)	20 ~ 30 dB	30 ~ 45 dB	20 ~ 45 dB
Šírka pásma pre 20dB zisk	~ 1,000 GHz	1 ~ 10 GHz	~ 500 GHz	~ 3,000 GHz
Saturačný výst. výkon	~ +10 dBm	-10 ~ - 5 dBm	+5 ~ + 10 dBm	~ 30 dBm
Závislosť od polarizácie	áno (nie)	áno	nie	nie
Typ čerpania	prúd 100 ~ 200 mA	prúd 20 mA	svetlo LD 20~100 mW	svetlo lasera 1 ~ 5 W

10.2 ZOSILŇOVAČ S LASEROVOU DIÓDOU

10.2.1 PROFIL ZISKU ZOSILŇOVAČA S LASEROVOU DIÓDOU

n **Závisí od odrazov** (jednosmerné, mnohonásobné dráhy)
v rezonátore laserov

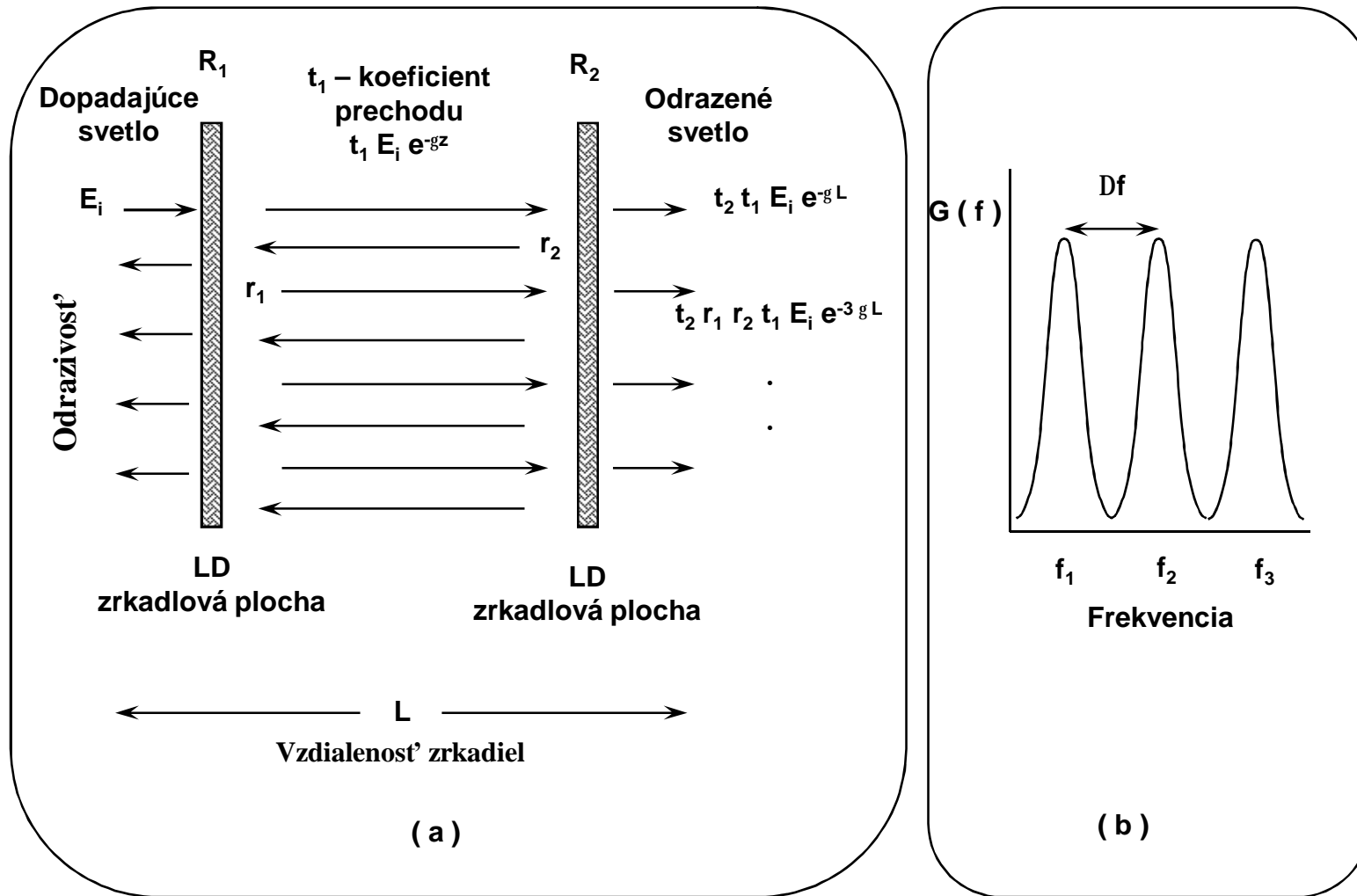
Analýzu vykonáme pre **Fabryho - Perotov rezonátor**

Mnohonásobné odrazy si vyjadríme ako:

Svetlo prechádzané prvýkrát: $E_i t_1 t_2 e^{-\gamma L}$

Svetlo po druhom odraze: $E_i t_1 t_2 r_1 r_2 e^{-3\gamma L}$

- kde
- E_i je elektrická intenzita vstupného optického signálu
 - r_1, r_2 sú koeficienty odrazov čelných plôch LD
 - t_1, t_2 sú koeficienty prechodu cez čelné plochy LD
 - $e^{-\gamma L}$ je fázový posun



Obr.10.5 *Fabryho – Perotov rezonančný model:*

(a) *FP rezonátor,*
(b) *profil zisku.*

Výsledný zosilnený výstupný optický signál je sumou odrazených optických signálov:

$$E_t = E_i t_1 t_2 e^{-\gamma L} [1 + r_1 r_2 e^{-2\gamma L} + (r_1 r_2 e^{-2\gamma L})^2 + \dots] = \frac{(t_1 t_2 e^{-\gamma L}) E_i}{1 - r_1 r_2 e^{-2\gamma L}}$$

Prenos výkonu:

$$G_T = \frac{E_T^2}{E_i^2} = \frac{(t_1 t_2 e^{-\gamma L})^2}{(1 - r_1 r_2 e^{-2\gamma L})^2}$$

Konštanta šírenia:
$$\gamma = -\frac{\Gamma g - \alpha}{2 + j\beta}$$

- kde
- G je faktor vyplnenia rezonančnej dutiny
 - g je optický zisk v aktívnej vrstve LD
 - a je koeficient optických strát v aktívnej vrstve
 - b je fázová konštanta

Fázová konštanta $b = \frac{2\pi n}{l}$ kde : • n je index lomu aktívnej vrstvy
 • l je vlnová dĺžka svetla

G_T možno zapísať v tvare:

$$G_T = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_S}{\left(1 - \sqrt{R_1 R_2 G_S}\right)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2 G_S} \sin^2(\beta L)}$$

kde sú použité vzťahy medzi koeficientami odrazu pre amplitúdu a koeficientmi odrazu pre výkon:

$$R_1 = r_1^2 \quad R_2 = r_2^2$$

Nesaturovaný zisk pre jeden prechod rezonančnou dutinou LD:

$$G_S = \exp[(\Gamma g - a)L]$$

Vzt'ah prepísaný pre optickú frekvenciu f :

$$G(f) = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_S}{\left\{ \left(1 - \sqrt{R_1 R_2 G_S}\right)^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2 G_S} \sin^2 \left[2\pi(f - f_1) \frac{L}{v_g} \right] \right\}}$$

kde : • v_g je grupová rýchlosť v dutine rezonátora

n Fázová referencia , $\varphi = 0$ je pre $f = f_1$, pre túto frekvenciu je zisk maximálny

n Existujú aj max. hodnoty zisku pre iné f , lebo **profil zisku má periodický charakter**

Frekvenčný interval Δf medzi maximálnymi hodnotami:

$$\Delta f = \frac{v_g}{2L}$$

n Najbližšia min. hodnota zisku od f_1 je pri: $f = f_1 + \frac{\Delta f}{2}$

Maximálny a minimálny zisk:

$$G_{\text{MAX}} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2) G_S}{(1 - \sqrt{R_1 R_2 G_S})^2}$$

$$G_{\text{MIN}} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2) G_S}{(1 + \sqrt{R_1 R_2 G_S})^2}$$

Pomer G_{MAX} / G_{MIN} sa blíži k 1 , ak:

$$\sqrt{R_1 R_2 R_3} \ll 1$$

- n Zosilňovač s LD spĺňajúci tento vzťah je **zosilňovač s postupujúcou vlnou (TWA)**
- n G_S má veľkú hodnotu, preto R_1 , R_2 majú hodnotu veľmi malú - v ideálnom prípade nulovú
- n **Šírka pásma zisku pre TWA je veľká** - výhodné pre systémy WDM a OFDM

10.2.2 SATURAČNÝ VÝSTUPNÝ VÝKON

Rýchlostné rovnice pre LD:

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{I}{eV} \right) - \left(\frac{N}{\tau_c} \right) - A_g V_g [(N - N_0) S]$$

$$\frac{dS}{dt} = A_g V_g \Gamma [(N - N_0) S] - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta \Gamma N}{\tau_c} + S_{in}$$

- Kde
- N je hustota nosičov náboja vo vnútri rezonátora
 - S je hustota fotónov vo vnútri rezonátora
 - I je injektovaný prúd
 - e je náboj elektrónu
 - V je objem aktívnej vrstvy
 - A_g je pričná plocha
 - N_0 je počiatočná hustota nosičov
 - V_g je grupová rýchlosť
 - b je spontánny emisný faktor
 - G je faktor obmedzenia energie vo vnútri aktívnej vrstvy
 - τ_c, τ_p sú časy života nosičov a fotónov
 - S_{in} je hustota injektovaných fotónov, závislá od vstupného optického signálu

Pre stacionárny stav:

$$\frac{1}{eV} = \frac{N}{T_c} + A_g V_g (N - N_0) S$$

Hustota nosičov náboja:

$$N = \frac{\left[\left(\frac{I}{eV} \right) + A_g V_g N_0 S \right]}{\left[\left(\frac{1}{T_c} \right) + A_g V_g S \right]}$$

Koeficient zisku na jednotku dĺžky g :

$$g = A_g (N - N_0)$$

g možno písať v tvare:

$$g = \frac{\left[A_g \left(\frac{I}{eV} \right) \tau_c - N_0 \right]}{[1 + A_g V_g \tau_c S]} = \frac{g_0}{[1 + B V_0 S]}$$

kde : g_0 a B sú:

$$g_0 = A_g \left[\left(\frac{I \tau_c}{eV} \right) - N_0 \right]$$

$$B = \frac{A_g V_g \tau_c}{V_0}$$

a V_0 vyjadruje optický objem a určí sa ako pomer $\frac{V}{\Gamma}$

Intenzita optického signálu je $I_{op}(z) = hfV_g S(z)$, potom g v závislosti od vzdialenosti z je:

$$g(z) = \frac{g_0}{\left[1 + \frac{I_{op}(z)}{I_s}\right]} \quad I_s = \frac{hf}{A_g} T_c = \frac{hfV_g}{V_0 B}$$

kde :

Ak $I_{op}(z) = I_s$, potom zisk g poklesne na polovicu hodnoty g_0

Pri saturácii je saturačný zisk je: $G_s = \exp\left[\int_0^L \{\Gamma g(z) - \alpha\} dz\right]$

- n **Saturačný výstupný výkon TWA zosilňovača** je väčší ako F-P zosilňovača
- n Hustota nosičov v TWA je väčšia ako pre F-P zosilňovač
- n Čas života nosičov τ_c v TWA je kratší ako pre F-P zosilňovač
- n I_s má väčšiu hodnotu pre TWA, ako pre F-P zosilňovač

10.2.3 POLARIZAČNÁ ZÁVISLOSŤ ZISKU

- n **Bola experimentálne dokázaná**, v dôsledku rozdielnych odrazov TE a TM vidov od zrkadlových čelných plôch LD, ktoré majú rozdielne koeficienty odrazivosti R a spôsob šírenia, čo je príčinou ich rozdielnej hodnoty zisku pre F - P a TWA zosilňovače
- n V laboratóriách sa skúšal TWA zosilňovač s nepatrnou, až žiadnou polarizačnou závislosťou

Pre takéto TWA zosilňovače sa používa:

1. Zmenšenie odrazivosti zrkadiel LD
2. Vyrovnanie koeficientov šírenia G pre TE a TM vidy
3. Podstatné zvýšenie zisku TM vidu
4. Zmena konfigurácie zosilňovača

- n **Nízka odrazivosť zrkadiel** - malý rozdiel medzi koef. R pre TE a TM vidy - na zníženie sa pri výrobe TWA nanáša na čelné plochy lasera antireflexná vrstva

- n **Rozdielne koeficienty šírenia G** - vznikajú asymetrickou štruktúrou aktívnej vrstvy - na potlačenie javu sa vyvinula hrubšia aktívna vrstva

- n **Zisk TM vidu** sa zvýšil zavedením tzv. **mnohonásobných kvantových jám - MQW (Multiple Quantum Well)**

- n **Zmena konfigurácie** sa využíva v obyčajných TWA zosilňov
 - zapojenie 2 zosilňovačov paralelne (pre každú polarizáciu jeden)
 - 1 zosilňovač so zdvojením optickej dráhy, kde sa do jednej dráhy umiestňuje Faradayov rotátor – nevýhoda: zložitosť

10.3 DOPOVANÉ VLÁKNOVÉ ZOSILŇOVAČE

n Najviac pozornosti sa sústredilo na **erbiom dopovaný vláknový zosilňovač (EDFA)**

10.3.1 ZAPOJENIE EDFA

v **Čerpací zdroj** - argónový iónový laser, farbivový laser,
- pre praktické aplikácie LD s veľkým výkonom

Čerpané vlnové dĺžky LD: 0,82 μm , 0,98 μm , 1,48 μm

v Koeficienty zisku pre čerpaný výkon:

0,3 ~ 0,4 dB/mW	pre 0,82 mm
4 ~ 5 dB/mW	pre 0,98 mm
2 ~ 4 dB/mW	pre 1,48 mm

v Intervaly vlnových dĺžok čerpaceho svetla:

0,8 mm ~ 0.825 mm (25 nm)

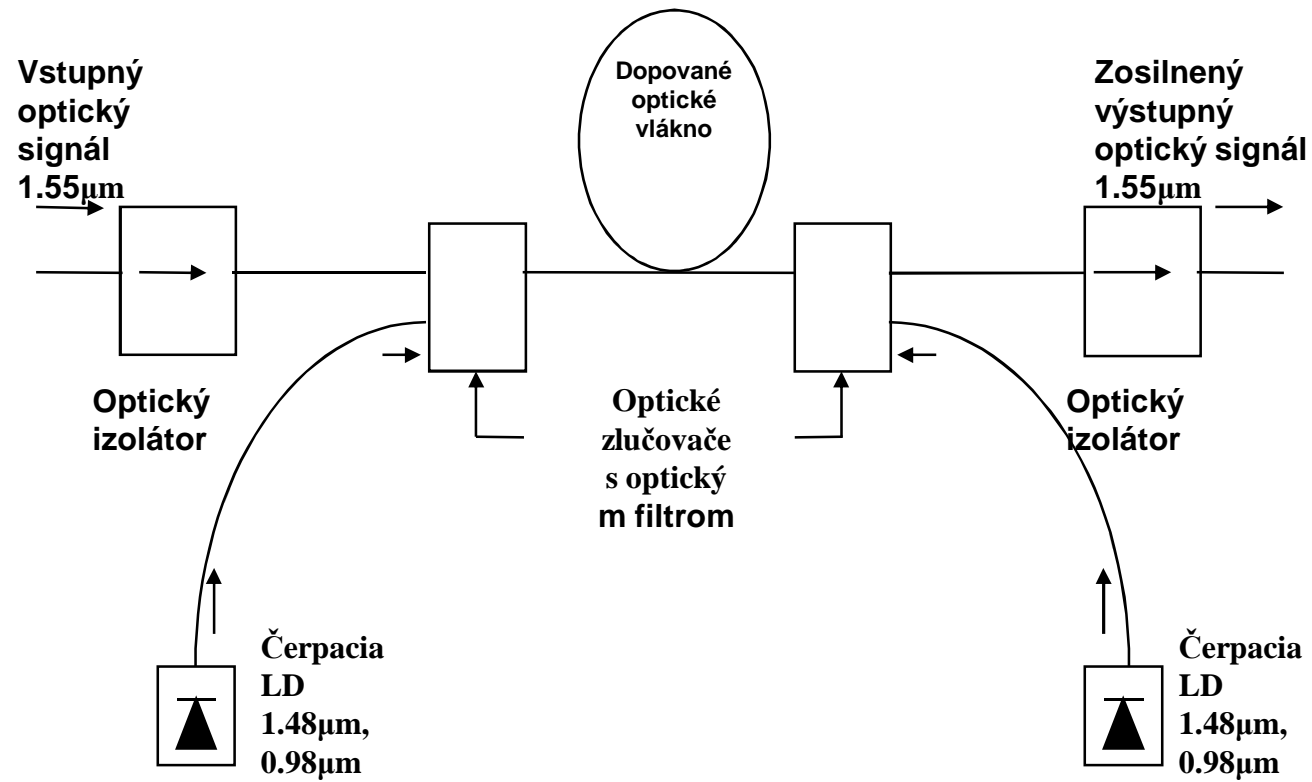
0,975 mm ~ 0,985 mm (10 nm)

1,45 mm ~ 1,485 mm (35 nm)

n **Optický izolátor** potláča oscilácie lasera a zabraňuje vzniku spätnej väzby:

v **Zosilnenej spontánnej emisie**
-ASE (Amplified Spontaneous Emission)

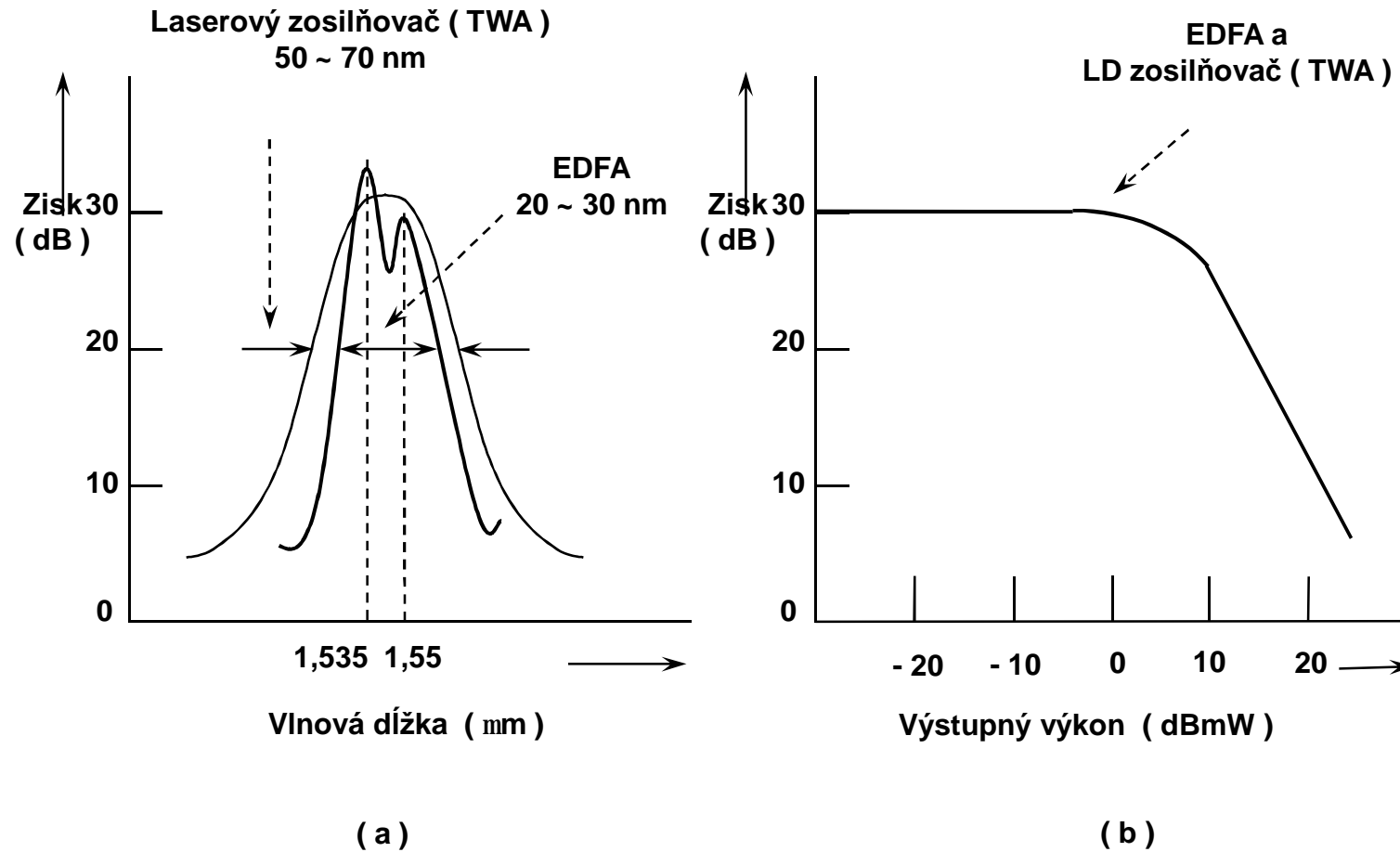
n Pri spájaní sa používajú **zvárané spojky**



Obr.10.6 Konfigurácia EDFA.

10.3.2 ZISK EDFA

- n **Šírka pásma zisku EDFA** je v rozsahu 20 - 30 nm
- n Pre OFDM, resp. WDM sa požaduje plochá charakteristika zisku
- n Veľké hodnoty koeficientu zisku možno dosiahnuť optimalizáciou profilu dotácie s E_r a priestorovej závislosti výkonu čerpaceho svetla



Obr.10.7 Charakteristiky zisku EDFA : (a) typický profil zisku,
(b) typický saturačný výstupný výkon.

10.3.3 SATURÁCIA VÝSTUPNÉHO VÝKONU

Zisk EDFA je rovnaký ako pre TWA zosilňovač:

$$G_s = \exp \left[\int_0^L \{ \Gamma g(z) - \alpha \} dz \right] \quad \text{kde:} \quad g(z) = \frac{g_0}{\left(1 + \frac{I_{op}(z)}{I_s} \right)}$$

- kde
- g_0 je zisk pre malý signál
 - $I_{op}(z)$ je intenzita svetla
 - I_s je intenzita svetla v saturácii

Ak $I_{op}(z) = I_s$, zisk nadobudne polovičnú hodnotu zisku pre malý optický signál

10.3.4 POLARIZAČNÁ ZÁVISLOSŤ ZISKU

- n Zisk EDFA zosilňovača **nevykazuje polarizačnú závislosť**, čo robí EDFA veľmi perspektívnym pre mnohé aplikácie
- n **Kruhovú apertúru**
 - nízke straty spojok medzi EDFA a jednojádrovým optickým vláknom

10.4 ŠUMOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÉHO ZOSILŇOVAČA

10.4.1 ZÁKLADNÉ ROVNICE PRE VYJADRENIE ŠUMU

Základnou rovnicou pre výpočet šumu optického zosilňovača je tzv. riadiaca rovnica:

$$\frac{dP_n}{dt} = -[a(n+1) + b_n]P_n + a(n)P_{n-1} + b(n+1)P_{n+1}$$

- kde
- P_n je pravdepodobnosť stavu s n fotónmi
 - a je pravdepodobnosť spontánnej emisie
 - b je pravdepodobnosť stimulovanej absorpcie na 1 fotón

Využitím riadiacej rovnice získame priemernú a strednú kvadratickú hodnotu počtu fotónov:

$$\langle n \rangle = \sum_n n P_n$$

$$\langle n^2 \rangle = \sum_n n^2 P_n$$

Násobením n a n^2 v týchto vzťahoch a súčtom s ohľadom na n , dostaneme:

$$\frac{d\langle n \rangle}{dt} = (a - b) \langle n \rangle + a$$

$$\frac{d\langle n^2 \rangle}{dt} = 2(a - b) \langle n^2 \rangle + (3a + b) \langle n \rangle + a$$

Riešením riadiacej rovnice s počiatočnými podmienkami:

$$\langle n \rangle = \langle n_0 \rangle$$

$$\langle n^2 \rangle = \langle n_0^2 \rangle$$

pre $t=0$ dostaneme:

$$\langle n \rangle = \langle n_0 \rangle \exp[(a-b)t] + \left(\frac{a}{a-b} \right) \{ \exp[(a-b)t] - 1 \}$$

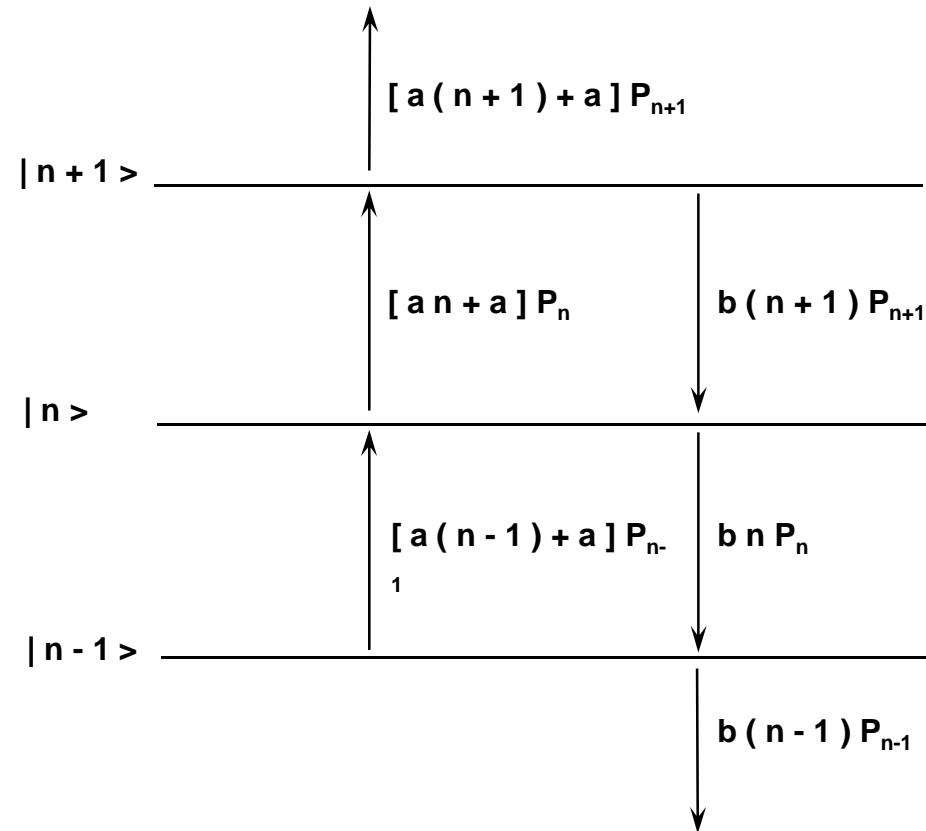
$$\sigma^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2$$

$$\sigma^2 = \exp[(a-b)t] \langle n_0 \rangle + \left[\frac{a}{(a-b)} \right] \{ \exp[(a-b)t] - 1 \} +$$

$$+ \left[\frac{2a}{(a-b)} \right] \{ \exp[(a-b)t] - 1 \} \exp[(a-b)t] \langle n_0 \rangle +$$

$$+ \left[\frac{a}{(a-b)} \right]^2 \{ \exp[(a-b)t] - 1 \}^2 +$$

$$+ \exp[2(a-b)t] \left[\langle n_0^2 \rangle - \langle n_0 \rangle^2 - \langle n_0 \rangle \right]$$



Obr. 10.8 Prechodové stavy.

10.4.2 ŠUM ZOSILŇOVAČA S POSTUPUJÚCOU VLNOU - TWA LD ZOSILŇOVAČ

Zisk zosilnenia bez odrazov získame pomocou vzťahu:

kde:
$$G_s = \frac{\langle n_s \rangle}{\langle n_o \rangle}$$

$\langle n_s \rangle$ je priemerný počet fotónov na výstupe

$\langle n_o \rangle$ je počiatočná hodnota

Výsledkom je:
$$G_s = \exp \left[(a - b) \left(\frac{L}{V_g} \right) \right]$$

kde: L je dĺžka zosilňovača

V_g je skupinová rýchlosť svetla

Využijúc zisk G_S , výsledky prepíšeme:

$$\langle n_{\text{out}} \rangle = G_S \langle n_{\text{in}} \rangle + (G_S - 1)n_{\text{sp}} m_t \Delta f$$

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \langle n_{\text{out}}^2 \rangle - \langle n_{\text{out}} \rangle^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{out}}^2 = & G_S \langle n_{\text{in}} \rangle + (G_S - 1)n_{\text{sp}} m_t \Delta f + \\ & + 2G_S (G_S - 1)n_{\text{sp}} \langle n_{\text{in}} \rangle + (G_S - 1)^2 n_{\text{sp}}^2 m_t \Delta f + \\ & + G_S^2 \left(\langle n_{\text{in}}^2 \rangle - \langle n_{\text{in}} \rangle^2 - \langle n_{\text{in}} \rangle \right) \end{aligned}$$

$$n_{\text{sp}} = \frac{a}{(a - b)}$$

- kde
- n_{sp} je parameter inverzie aktívnej látky
 - $\langle n_{in} \rangle$ je priemerný počet vstupných fotónov
 - $\langle n_{out} \rangle$ je priemerný počet fotónov na výstupe
 - m_t je číslo transverzálneho módu spontánnej emisie svetla
 - Df je optická šírka pásma

Pre jednosmerný transverzálny mód je $m_t = 1$

Tento výrazy vyjadrujú:

- n Zosilnený optický signál a zosilnenú spontánnu emisiu svetla
- n Určujú výstrelový šum zosilňovaného optického signálu
- n Rázové šumy signál - spontánnu emisia a spontánnu emisia - spontánnu emisia
- n Pridaný šum

Pre koherentný optický signál:

$$\langle n_{in}^2 \rangle - \langle n_{in} \rangle^2 - \langle n_{in} \rangle = 0$$

Pre nekoherentný optický signál:

$$\langle n_{in}^2 \rangle - \langle n_{in} \rangle^2 - \langle n_{in} \rangle = \langle n_{in} \rangle^2$$

Pre koherentný optický je výstupný pomer S/N:

$$(S/N)_{\text{out}} = \frac{e^2 (G_S \langle n_{\text{in}} \rangle)^2}{\left\{ 2e^2 \left[G_S \langle n_{\text{in}} \rangle + (G_S - 1) n_{\text{sp}} m_t \Delta f + \right. \right. \\ \left. \left. + 2G_S (G_S - 1) n_{\text{sp}} \langle n_{\text{in}} \rangle + (G_S - 1)^2 n_{\text{sp}}^2 m_t \Delta f \right] B \right\}}$$

kde: • **B** je šírka pásma prijímača

Vstupný pomer $(S/N)_{\text{in}}$:

$$(S/N)_{\text{in}} = \frac{e^2 \langle n_{\text{in}} \rangle^2}{2e^2 \langle n_{\text{in}} \rangle B}$$

Šumové číslo:

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

$$F = \frac{1}{G_S} + \left[\frac{(G_S - 1)}{G_S^2 \langle n_{in} \rangle} \right] n_{sp} m_t \Delta f + 2 \frac{(G_S - 1)}{G_S n_{sp}} + \frac{(G_S - 1)^2 n_{sp}^2 m_t \Delta f}{G_S^2 \langle n_{in} \rangle}$$

Ak ($G_S \gg 1$) a $m_t = 1$, F aproximujeme ako:

$$F \approx \frac{2n_{sp} + n_{sp}^2 \Delta f}{\langle n_{in} \rangle}$$

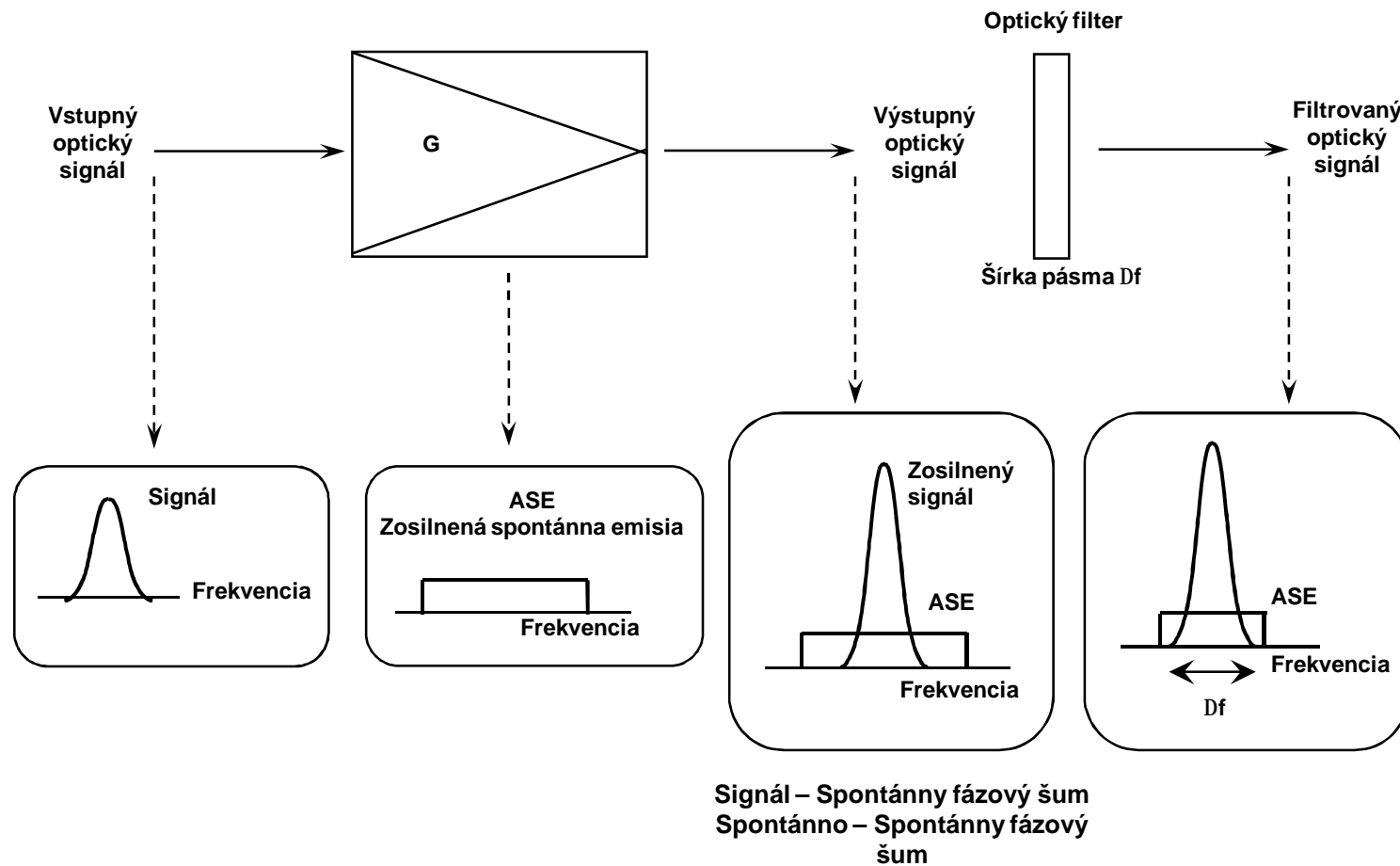
Pre veľký vstupný signál $\langle n_{in} \rangle$ a malú šírku pásma Df je:

$$F \approx 2n_{sp}$$

Ideál : $n_{sp} = 1$, potom $F = 2$ (3 dB)

F ideálneho optického zosilňovača sa rovná 3 dB

- n Optický zosilňovač so ziskom G zosilňuje vstupný optický signál a pridáva do zosilňovaného signálu zosilnenú spontánnu emisiu
- n Úzkopásmový optický filter - z väčšej časti odfiltruje rázový šum spontánna emisia - spontánna emisia



Obr. 10.9 Šum optického zosilňovača.

10.4.3 ŠUM ZOSILŇOVAČA S FABRYHO - PEROTOVÝM REZONÁTOROM

n Pri určení šumu je potrebné brať do úvahy **aj efekt rezonancie dutiny**

Výsledkom je:

$$\langle n_{\text{out}} \rangle = G \langle n_{\text{in}} \rangle + (G - 1) n_{\text{sp}} m_t \Delta f$$

$$\sigma_{\text{out}}^2 = \langle n_{\text{out}}^2 \rangle - \langle n_{\text{out}} \rangle^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{out}}^2 = & G \langle n_{\text{in}} \rangle + (G - 1) n_{\text{sp}} m_t \Delta f_1 + 2G(G - 1) n_{\text{sp}} X \langle n_{\text{in}} \rangle + \\ & + (G - 1)^2 n_{\text{sp}}^2 m_t \Delta f_2 + G^2 \left(\langle n_{\text{in}}^2 \rangle - \langle n_{\text{in}} \rangle^2 - \langle n_{\text{in}} \rangle \right) \end{aligned}$$

$$X = \frac{(1 + R_1 G_S)(1 - R_2)(G_S - 1)}{\left[(1 - R_1)(1 - R_2)G_S - \left(1 - \sqrt{R_1 R_2 G_S}\right)^2 \right]}$$

kde • G je zisk

n C je šumový faktor, ktorý vzniká pôsobením odrazov v dutine FP rezonátora

n Δf_1 , Δf_2 sú ekvivalentné šírky pásma šumu spontánnej emisie výstrelového a rázového šumu

Šumové číslo:

$$F = \frac{1}{G + \left[\frac{(G-1)}{G^2 \langle n_{in} \rangle} \right] n_{sp} m_t \Delta f_1 + 2 \left[\frac{(G-1)}{G} \right] n_{sp} X + \frac{(G-1)^2 n_{sp}^2 m_t \Delta f_2}{G^2 \langle n_{in} \rangle}}$$

Pre ($G \gg 1$), **vstupný signál** $\langle n_{in} \rangle$ je **veľký** a šírka pásma Δf_2 je dostatočne malá, **potom F:**

$$F \approx 2n_{sp} X$$

10.4.4 ŠUM EDFA

- n **Výpočet šumu EDFA je analogický ako pre TWA zosilňovač**

Vplyvom spätnoväzobnej spontánnej emisie zosilňovača uvažujeme o dvoch módoch polarizácie, preto dosadzujeme:

$$m_t = 2$$

$$\langle n_{\text{out}} \rangle = G_S \langle n_{\text{in}} \rangle + 2(G_S - 1)n_{\text{sp}}\Delta f$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{out}}^2 = & G_S \langle n_{\text{in}} \rangle + 2(G_S - 1)n_{\text{sp}}\Delta f + 2G_S(G_S - 1)n_{\text{sp}}\langle n_{\text{in}} \rangle + \\ & + 2(G_S - 1)^2 n_{\text{sp}}^2 \Delta f + G_S^2 (\langle n_{\text{in}}^2 \rangle - \langle n_{\text{in}} \rangle^2 - \langle n_{\text{in}} \rangle) \end{aligned}$$

Šumové číslo:

$$F = \frac{1}{G_S} + \left[2 \frac{(G_S - 1)}{G_S^2 \langle n_{in} \rangle} \right] n_{sp} \Delta f + 2 \left[\frac{(G_S - 1)}{G_S} \right] n_{sp} + \frac{2(G_S - 1)^2 n_{sp}^2 \Delta f}{G_S^2 \langle n_{in} \rangle}$$

Pre ($G_S \gg 1$), možno F aproximovať ako:

$$F \approx 2n_{sp} + \frac{2n_{sp}^2 \Delta f}{\langle n_{in} \rangle}$$

10.4.5 POROVNANIE OPTICKÝCH ZOSILŇOVAČOV

Optické zosilňovače TWA, FP-LD a EDFA porovnáваме z hľadiska:

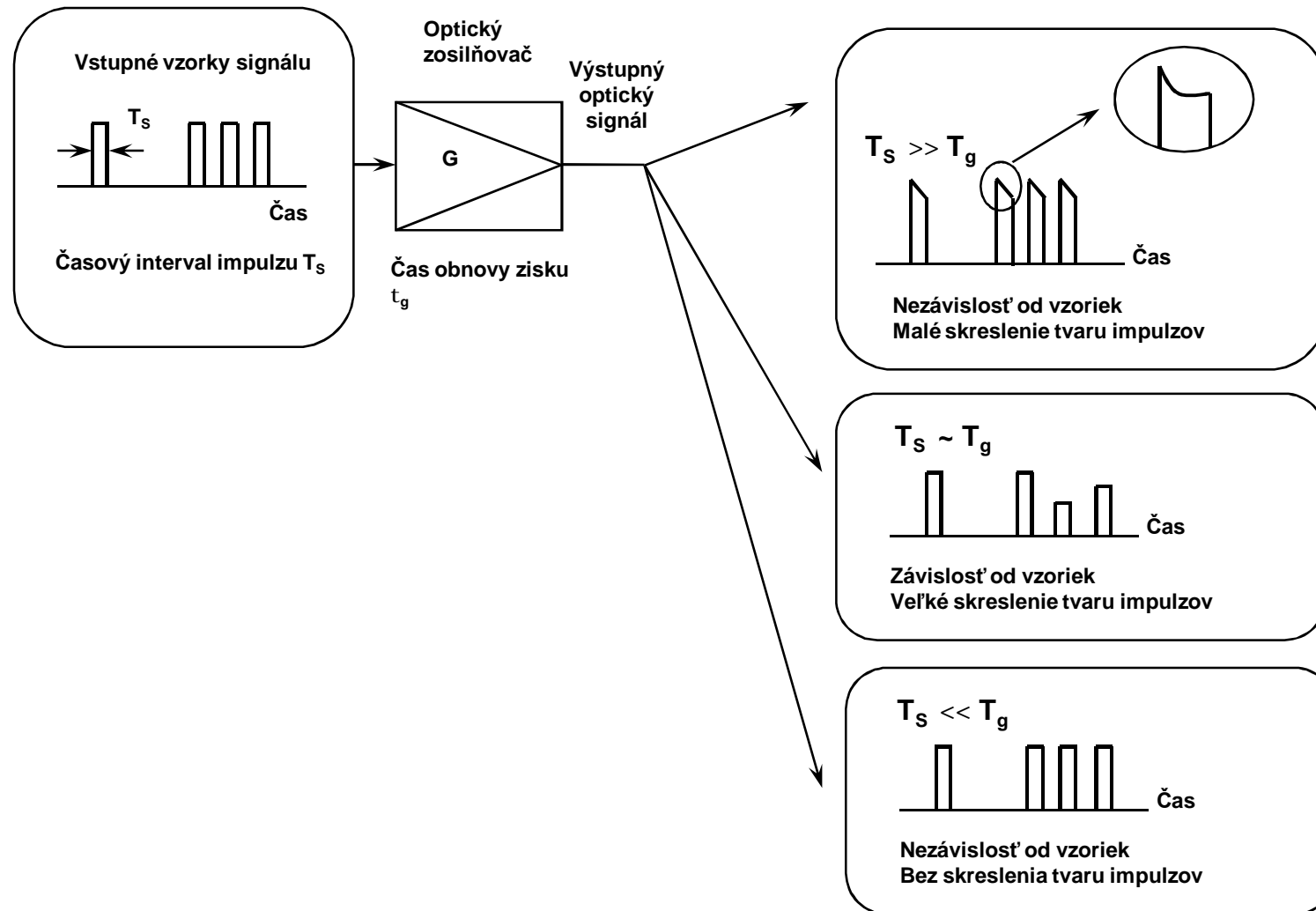
- n Konfigurácie
- n Saturačného výstupného výkonu
- n Šírky pásma
- n Polarizačnej závislosti
- n Koeficientu zisku
- n Strát naviazania do optického vlákna

ŠUMOVÉ ČÍSLA OPTICKÝCH ZOSILŇOVAČOV

	LD ZOSILŇOVAČE		
	Zosilňovač s postup. vlnou (TWA)	Fabryho - Perotov zosilňovač (FPA)	Dopované vláknové zosilňovače (EDFA)
Šumové číslo F	5,2 dB	~ 10 dB	~ 4 dB ($\lambda = 0,82 \mu\text{m}$ čerpania) ~ 3 dB ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$ čerpania) ~ 4 dB ($\lambda = 1,48 \mu\text{m}$ čerpania)

10.5 ODOZVA OPTICKÉHO ZOSILŇOVAČA

- n Odozvy modulovaných signálov optického zosilňovača sú dôležité pre optické prenosové aplikácie
- n Prenos dát s vysokou prenosovou rýchlosťou (niekoľko Gb/s) - pri LD zosilňovačoch sa vyskytuje kompresia zisku a zosilnený signál je závislý od vzoriek vstupného signálu
- n **Čas obnovy zisku t_g** je dôležitý v závislosti od prenosovej rýchlosti a skreslenia tvaru impulzov
- n Ak dĺžka impulzu $T_s \gg t_g$ - rýchla obnova zisku v danom časovom intervale dĺžky impulzu - malé skreslenie tvaru impulzu - **nevzniká závislosť zisku od prenášaných dát**
- n Ak $T_s \sim t_g$ - vzniká veľké skreslenie tvaru impulzov a **odozva zosilňovača závisí od prenášaných dát**
- n Ak $T_s \ll t_g$ - nedochádza ku skresleniu tvaru impulzov a ani **obnova zisku nezávisí od prenášaných vzoriek signálu**
- n Pre EDFA je t_g okolo 1 ms - 10 ms a **nezávislosť obnovy zisku od vzoriek vstupného signálu je pre 2 - 100 Gb/s**



Obr.10.10 Čas obnovy zisku a závislosť odozvy od prenášaných vzoriek signálu.

10.6 PARALELNÉ ZOSILŇOVANIE PRE WDM A OFDM SYSTÉMY

- n **Zosilňovače TWA, EDFA** majú relatívne veľkú šírku pásma (500 - 1000 GHz), čo je vhodné pre paralelné WDM, resp. OFDM prenosové systémy
- n Niekedy prebieha optické zosilnenie aj v saturačnej oblasti

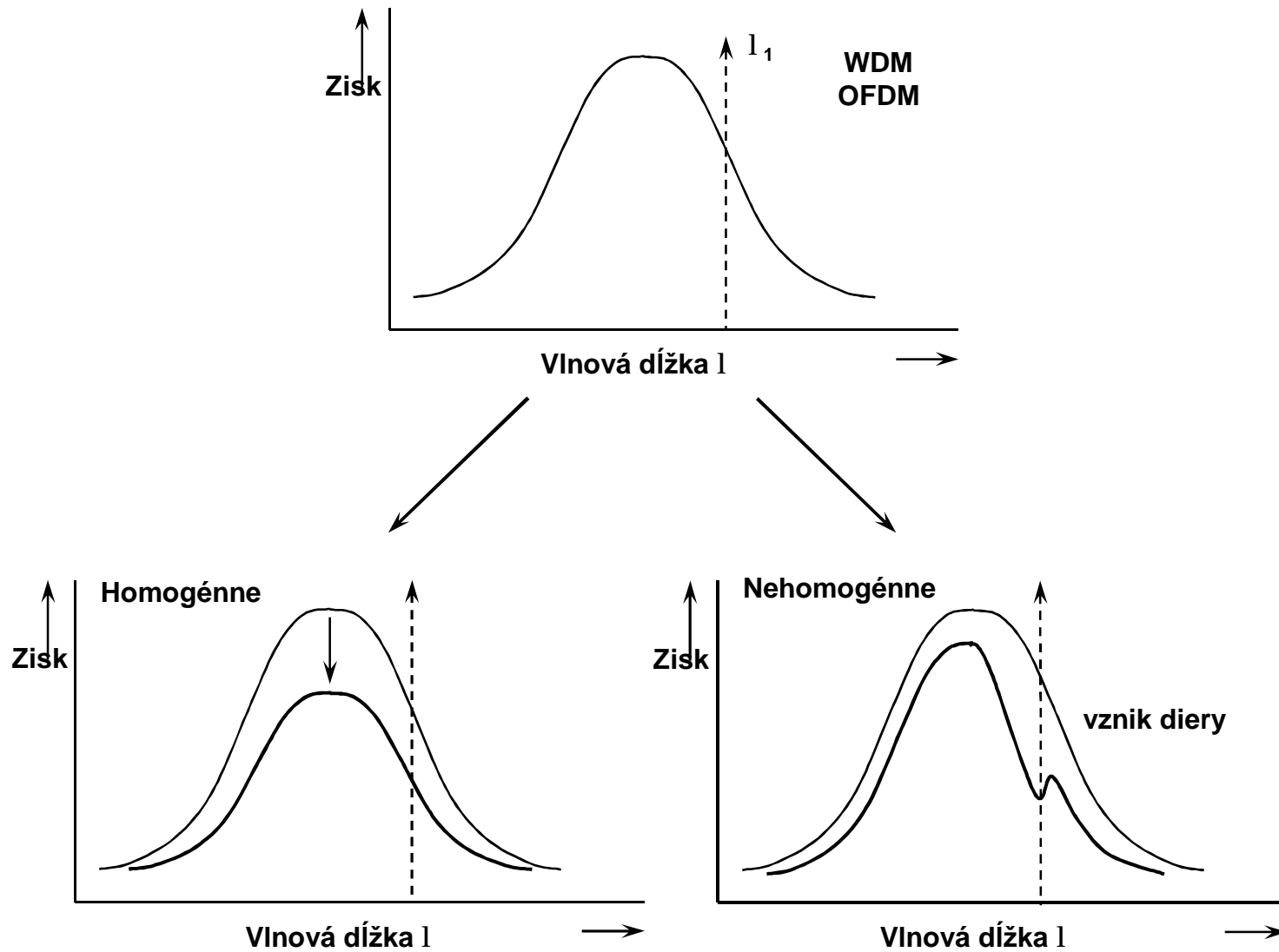
Typy zosilnenia v saturácii:

- n **Homogénne**- tvar krivky zisku sa nemení a zmenšenie zisku ovplyvňuje všetky prenosové kanály rovnako
- n **Nehomogénne rozšírenie spektrálnej čiary**- na krivke zisku sa nachádza diera pre určitú λ optického vstupného signálu
- n TWA aj EDFA zosilňovače majú **homogénne zosilnenie**

Výstupný výkon na kanál je limitovaný :

$$\frac{P_{SAT}}{N}$$

- kde
- P_{sat} je výstupný saturačný výkon
 - N je počet kanálov v mnohokanálovom WDM, resp. OFDM systéme



Obr. 10.11 Súčasné optické zosilňovanie viacerých optických signálov.

Javy pôsobiace v FP - LD zosilňovačoch:

- n Posunutie rezonančnej frekvencie (frekvenčný posun maxim zisku)
- spôsobuje presluch
- n Odstránenie presluchu - paralelné zosilnenie sa uskutoční pod úrovníou saturácie LD zosilňovača

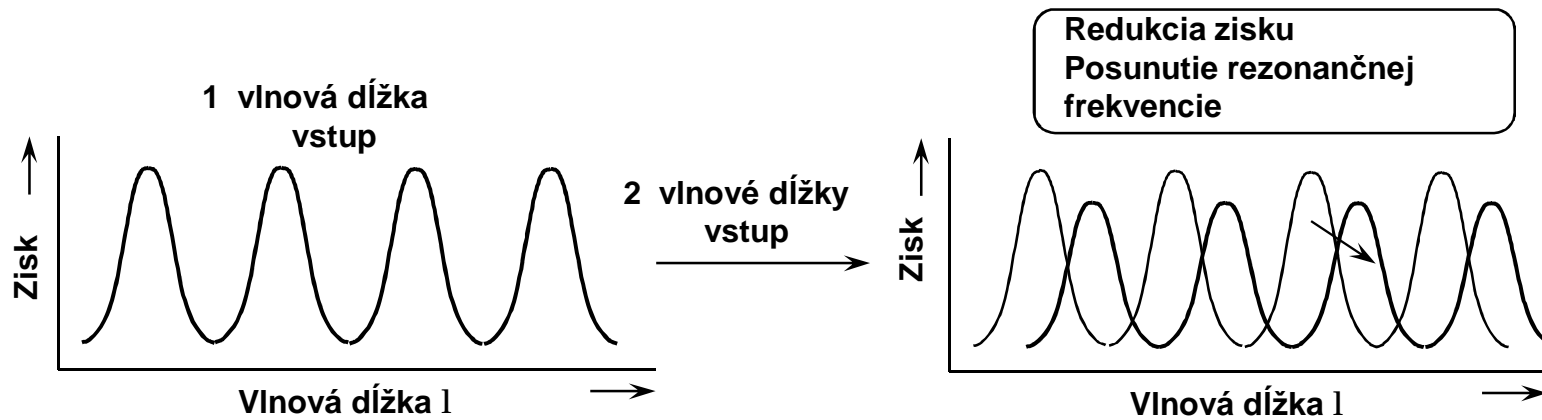
Presluchy v EDFA závisia:

- n Od frekvencie modulácie, nad 100 kHz sa ich význam zanedbáva

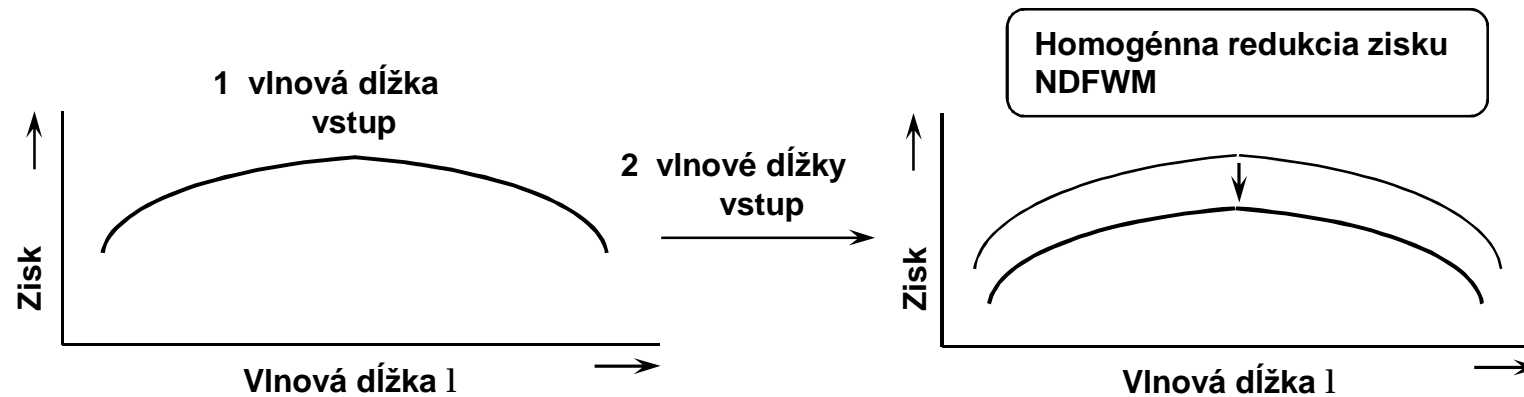
Presluch v LD zosilňovači pre OFDM systémy:

- n Vzniká , ak je frekvenčný interval Δf v kanáloch systému príliš úzky ($\Delta f < \text{GHz}$)
- n Na potlačenie presluchov sa požaduje: $\Delta f > 2 - 3 \text{ GHz}$

FP – LD zosilňovač



TWA – LD zosilňovač



Obr. 10.12 Súčasné aplikácie LD zosilňovačov.

CHARAKTERISTIKY PARALELNÉHO ZOSILŇOVANIA

	LD ZOSILŇOVAČE		Dopované vláknové zosilňovače (EDFA)
	Zosilňovač s postup. vlnou (TWA)	Fabryho - Perotov zosilňovač (FPA)	
Saturačné charakteristiky	Homogénna		Skoro homogénna
Saturačný výkon na kanál v N -kanálovom systéme	1 / N (Porovnanie s výkonom jednokanálového systému)		1 / N (Porovnanie s výkonom jednoka. systému)
Medzikanálový presluch v OFDM	Presluch v FWM (silný, ak $\Delta f < \text{niekoľko GHz}$)		Bez presluchu ($\Delta f > 10 \text{ kHz}$)
Presluch v stave saturácie zisku	Presluch		Bez presluchu ($\Delta f > 100 \text{ kHz}$)