



# TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

## 7. WZMACNIACZE OPTYCZNE

### *Spis treści:*

7.1. Wprowadzenie

7.2. Wzmacniacze półprzewodnikowe

- ❖ Wzmacniacze z rezonatorem Fabry-Perot i z falą bieżącą
- ❖ Szumy i zniekształcenia

7.3. Wzmacniacze światłowodowe

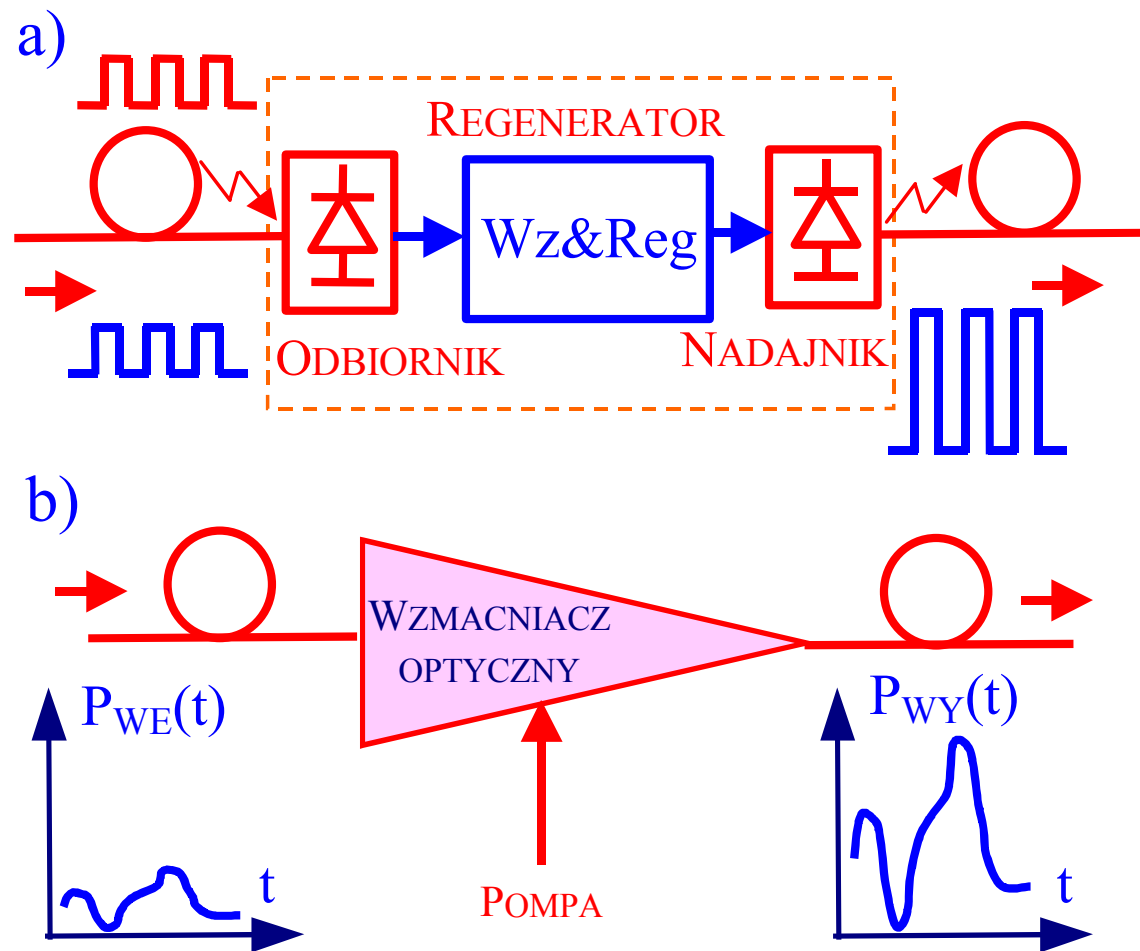
- ❖ Wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym Erbem
- ❖ Wzmacniacz światłowodowy na pasmo 1300 nm
- ❖ Parametry szumowe wzmacniaczy światłowodowych

7.4. Zastosowania

7.5. Podsumowanie

## 7.1. WPROWADZENIE – WZMACNIACZ A REGENERATOR

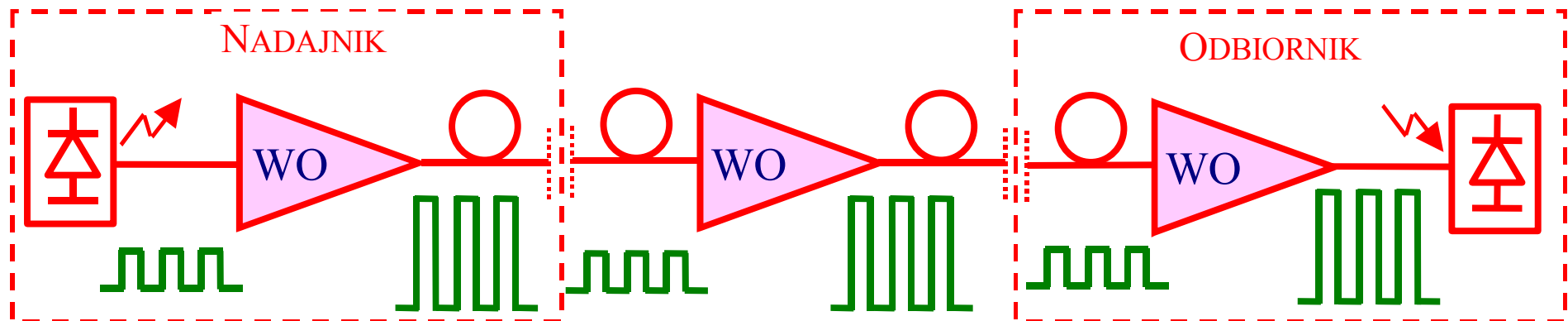
- × Sygnały transmitowane światłowodami są tłumione.
- × Przy transmisji sygnałów cyfrowych stosowane są układy regenerujące, z wykorzystaniem układów elektronicznych – rys.7.1.a.
- × Przy transmisji sygnałów analogowych ta droga jest praktycznie niemożliwa.
- × Wzmacniacz optyczny pozwala podnieść poziom transmisji sygnałów optycznych bez stosowania elektroniki – rys.7.1.b).



Rys.7.1. Ilustracja działania: a) optoelektronicznego regeneratora i b) wzmacniacza optycznego.

## 7.1. WPROWADZENIE – TRZY GŁÓWNE ZASTOSOWANIA WZMACNIACZY OPTYCZNYCH

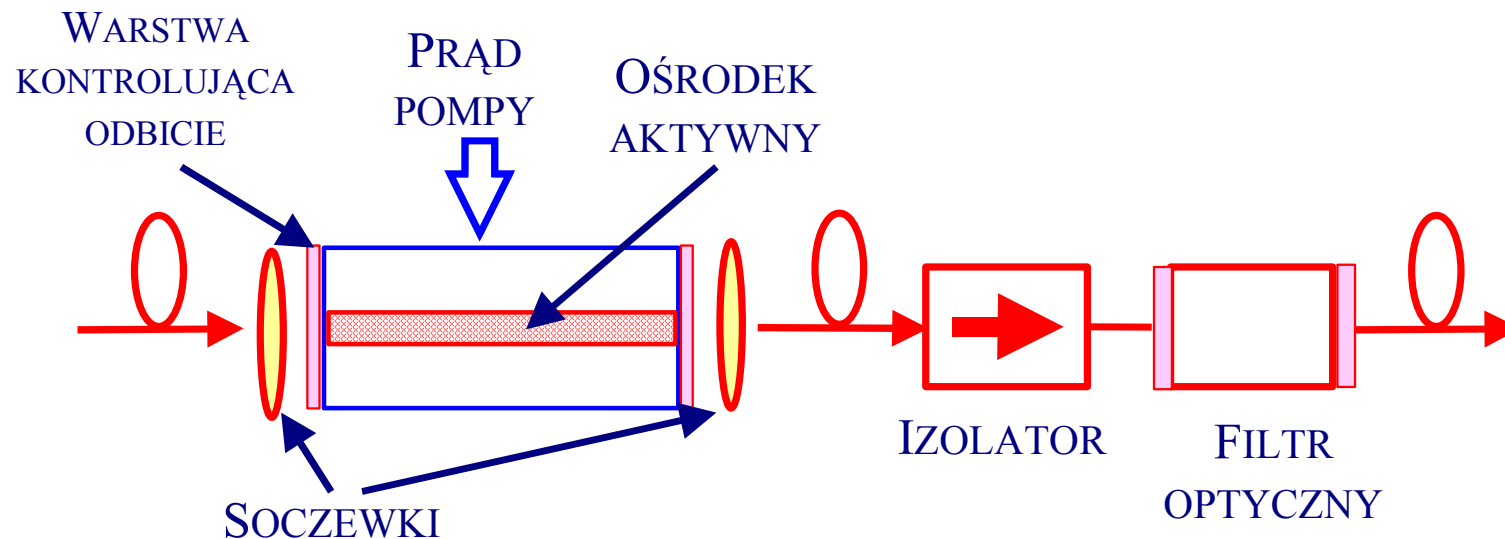
- **Zwiększenie mocy wyjściowej nadajnika**, umieszczony za laserem wzmacniacz optyczny zwiększa o 20...30 dB poziom mocy optycznej nadajnika, problem szumów jest mało istotny w tym miejscu, decydującym jest moc wyjściowa wzmacniacza optycznego.
- **Zwiększenie poziomu mocy sygnału osłabionego transmisją**, wzmacniacz umieszczony jest w torze optycznym, decydującym parametrem jest duże wzmocnienie wzmacniacza, na kolejnym miejscu należy umieścić niski poziom szumów, aby stosunek sygnał/szum nie uległ znacznej degradacji.
- **Zwiększenie czułość odbiornika**, przedwzmacniacz umieszczony przed odbiornikiem zwiększa czułość odbiornika, najważniejszym parametrem jest niski poziom szumów, potem wzmocnienie, poziom mocy wyjściowej jest mało istotny.



Rys.7.2. Wzmacniacz optyczny włączony w różnych miejscach do toru łącza optycznego.

## 7.2. WZMACNIACZE PÓLPRZEWODNIKOWE – PODSTAWOWE ELEMENTY

- ⇒ **Optyczny wzmacniacz półprzewodnikowy SOA** (ang. - *semiconductor optical amplifier*) jest półprzewodnikowym laserem pracującym poniżej progu oscylacji.
- ⇒ Podstawowym elementem wzmacniacza jest półprzewodnikowy obszar aktywny, pobudzany - tak jak w laserze półprzewodnikowym – prądem. Izolator optyczny uniezależnia wzmocnienie od odbić, rezonansowy filtr optyczny obniża poziom szumów wywołanych emisją spontaniczną.



Rys.7.3. Podstawowe elementy półprzewodnikowego wzmacniacza optycznego.

- ⇒ Dwa podstawowe typy półprzewodnikowych wzmacniaczy optycznych:
- ✘ Wzmacniacz z rezonatorem Fabry-Perot FPA,
  - ✘ Wzmacniacz z falą bieżącą TWA.

## 7.2. WZMACNIACZE ... – WZMACNIACZE Z REZONATOREM FABRY-PEROT – CZ.1

- ⇒ Sygnał optyczny o natężeniu pola  $E_i$  kierowany jest do obszaru aktywnego przez półprzepuszczalne obszary o współczynniku transmisji  $t$  i współczynniku odbicia  $r$ .
- ⇒ Pojedynczemu przejściu sygnału optycznego przez obszar aktywny towarzyszy wzmocnienie mocy określone współczynnikiem  $G_s$ .

- ◆ Sygnał wejściowy  $E_1$ ,
- ◆ Po pierwszej warstwie odbijającej:

$$t_1 E_1$$

- ◆ Po transmisji przez obszar aktywny:

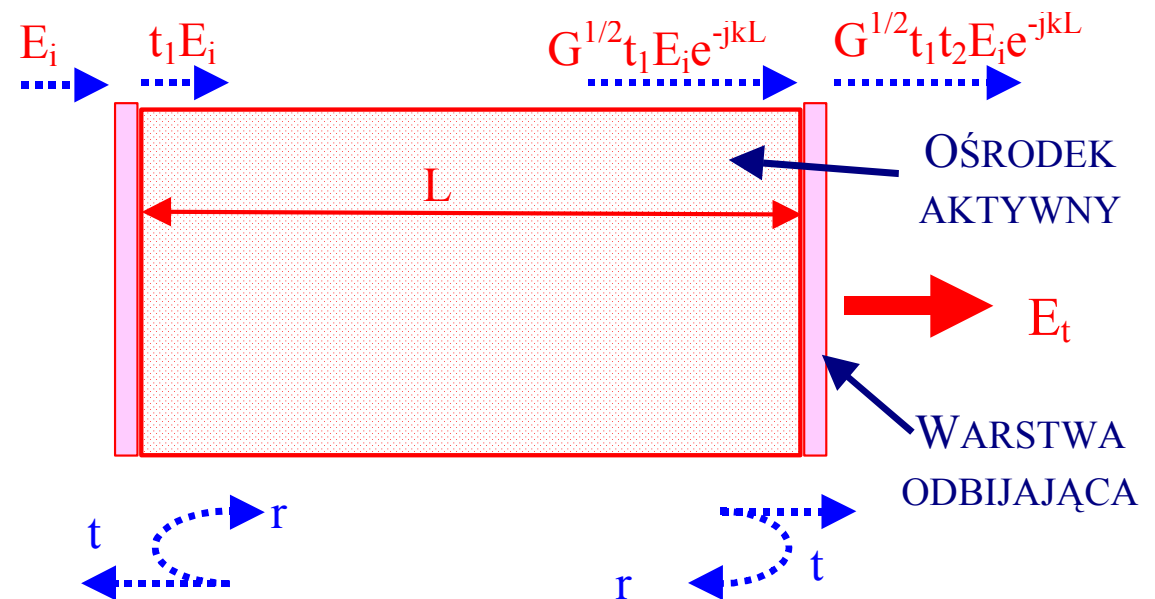
$$t_1 E_1 \sqrt{G} e^{-jkL}$$

gdzie  $k$  jest stałą fazową.

- ◆ Po transmisji przez drugą warstwę odbijającą:

$$t_1 t_2 E_1 \sqrt{G} e^{-jkL}$$

- ◆ Wielokrotne odbicia zmieniają charakter funkcji opisującej transmisję mocy.



Rys.7.4. Obszar aktywny półprzewodnika ograniczony półprzezroczystymi zwierciadłami tworzy rezonator Fabry-Perot.

## 7.2. WZMACNIACZE ... – WZMACNIACZE Z REZONATOREM FABRY-PEROT – CZ.2

⇒ W efekcie wielokrotnych odbić sygnał wyjściowy wzrasta dla wybranych warunków fazowych :

$$E_t = E_i \frac{t_1 t_2 \sqrt{G_s} e^{-jkL}}{1 - r_1 r_2 G_s e^{-j2kL}};$$

⇒ Tutaj  $t$  i  $r$  są współczynnikami amplitudowymi - współczynnikami macierzy rozproszenia. Można zastąpić je współczynnikami opisującymi transmisję i odbicie mocy.

$$T_1 = T_2 = t_1^2 = T;$$

$$R_1 = R_2 = r_1^2 = R;$$

$$R + T = 1;$$

⇒ Gdy półprzepuszczalne zwierciadła zachowują się identycznie otrzymuje się zależność na wzmocnienie mocy optycznej:

$$G(f) = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2;$$

$$G(f) = \frac{G_s (1 - R)^2}{(1 - R G_s)^2 + 4 R G_s \sin^2 \left[ \frac{2\pi(f - f_0)L}{c} \right]};$$

⇒ Pasma 3 dB FWHM (ang. - *full-width at half maximum*):

$$\Delta f_{3dB} = \frac{c}{\pi L} \sin^{-1} \left( \frac{1 - R G_s}{2\sqrt{R G_s}} \right);$$

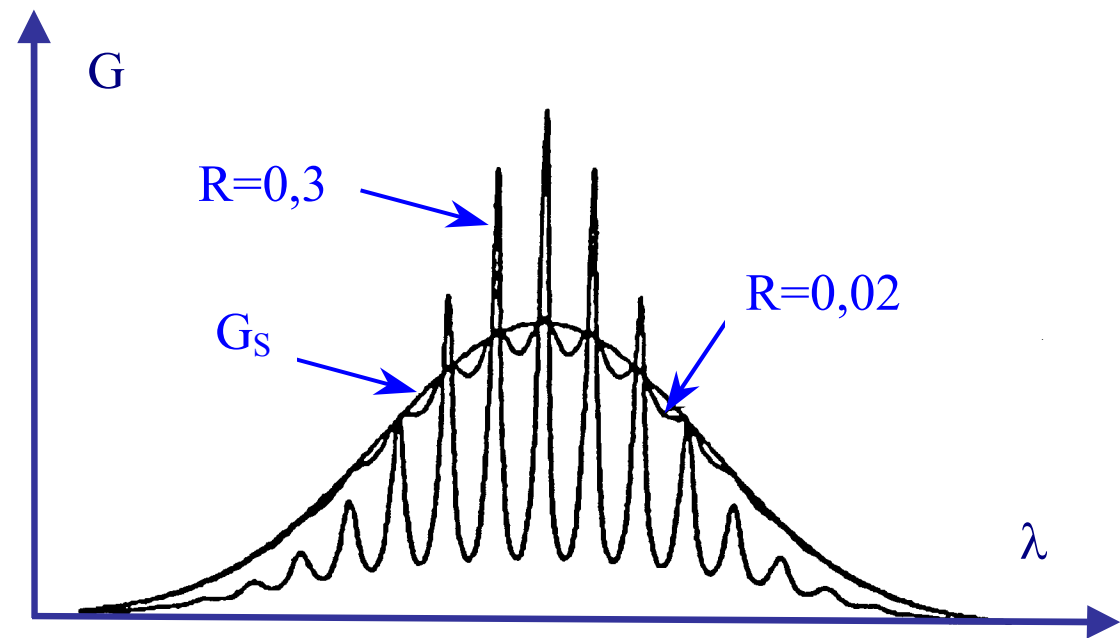
## 7.2. WZMACNIACZE ... – WZMACNIACZE Z REZONATOREM FABRY-PEROT – CZ.3

✗ Wzmocnienie jest maksymalne gdy:

$$RG_s \rightarrow 1;$$

✗ Wzmocnienie rośnie wykładniczo z długością  $L$  obszaru aktywnego  $L$ .

*Rys.7.5. Typowa charakterystyka wzmocnienia  $G(\lambda)$  dla wzmacniacza z rezonatorem Fabry-Perot, dla różnych wartości  $R$ .*



⇒ Analiza wykazuje, że niewielkie odbicia na końcach obszaru aktywnego prowadzą do silnych zafalowań charakterystyki wzmocnienia wzmacniacza. Aby uzyskać równomierną szerokopasmową charakterystykę wzmocnienia należy usunąć efekty rezonansowe, nazwa wzmacniacz z rezonatorem Fabry-Perot'a ma charakter historyczny.

⇒ Wzmocnienie  $G(f)$  jest funkcją mocy wyjściowej, obserwuje się efekty nasycania.

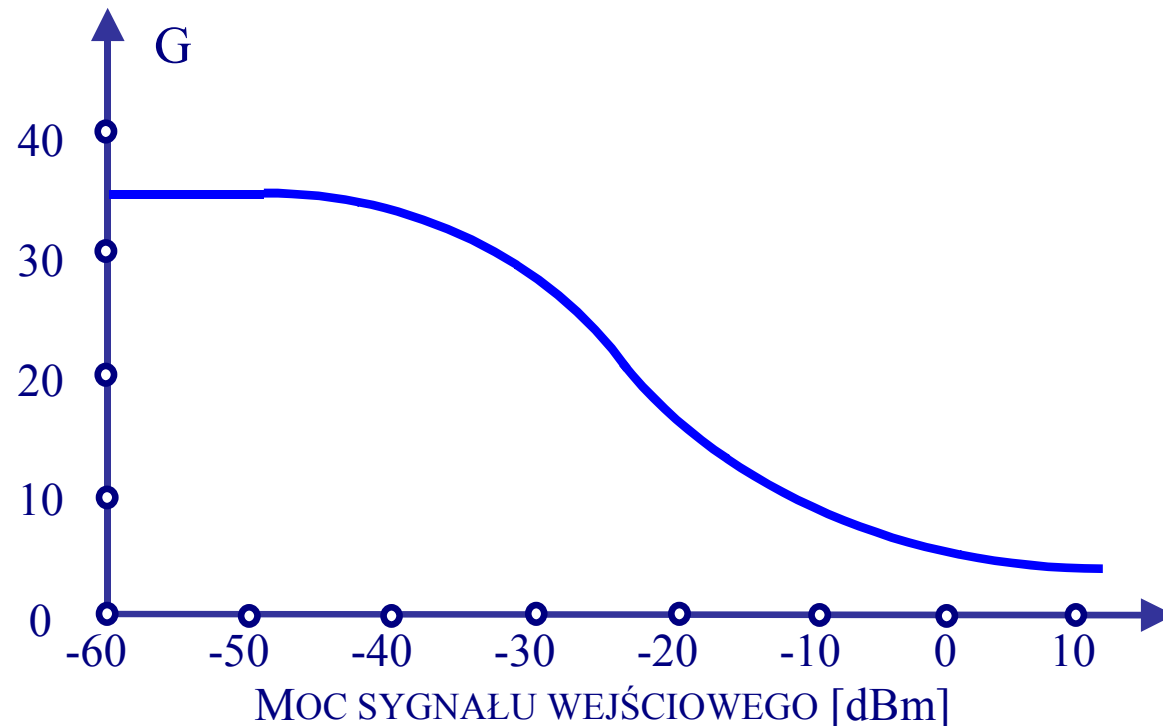
$$G(f) = \frac{G_0(f)}{1 + (P_{\text{wyj}} / P_{\text{nas}})};$$

## 7.2. WZMACNIACZE PÓLPRZEWODNIKOWE – WZMACNIACZE Z FALĄ BIEŻĄCĄ

⇒ Zmniejszając odbicia zwierciadeł do zera wzmacniacz z rezonatorem Fabry-Perot staje się wzmacniaczem z falą bieżącą.

- ◆ Wzmocnienie zmniejsza się i wynosi  $G_s$ .
- ◆ Znacznie poszerza się pasmo wzmacniacza.
- ◆  $\Delta f_{3dB} = 40 \dots 200 \text{ nm}$ ;
- ◆ Wzmocnienia wzmacniacza przekraczają 25 dB.

*Rys. 7.6. Efekt nasycenia we wzmacniaczu TWOA,  $P_{NAS} = -6 \text{ dBm}$ ,  $G_0 = 35 \text{ dB}$ .*



⇒ Wzmacniacz półprzewodnikowy nie powinien być czuły na polaryzację sygnału optycznego, w najlepszych układach wzmocnienie zmienia się w granicach 1 dB przy zmianach polaryzacji.

⇒ Istotną rolę zaczynają odgrywać straty połączenia ze światłowodami, mogą przekraczać 10 dB



## 7.2. WZMACNIACZE ... – SZUMY I ZNIEKSZTAŁCENIA - EMISJA SPONTANICZNA

⇒ Równanie opisujące moc optyczną wzmacniacza, gdzie  $N_2$  i  $N_1$  liczna nośników w pasmie przewodzenia i walencyjnym.

$$\frac{dP}{dz} = gP + \left( \frac{N_2}{N_2 - N_1} \right) ghf\Delta_f;$$

⇒ Rozwiązanie równania:  $P(z) = P_s e^{gz} + n_{sp} hfB_0 (e^{gz} - 1)$ ,  
oznaczono dalej przez  $G = e^{gz}$ :

$$P(z) = P_s G + n_{sp} hfB_0 (G - 1);$$

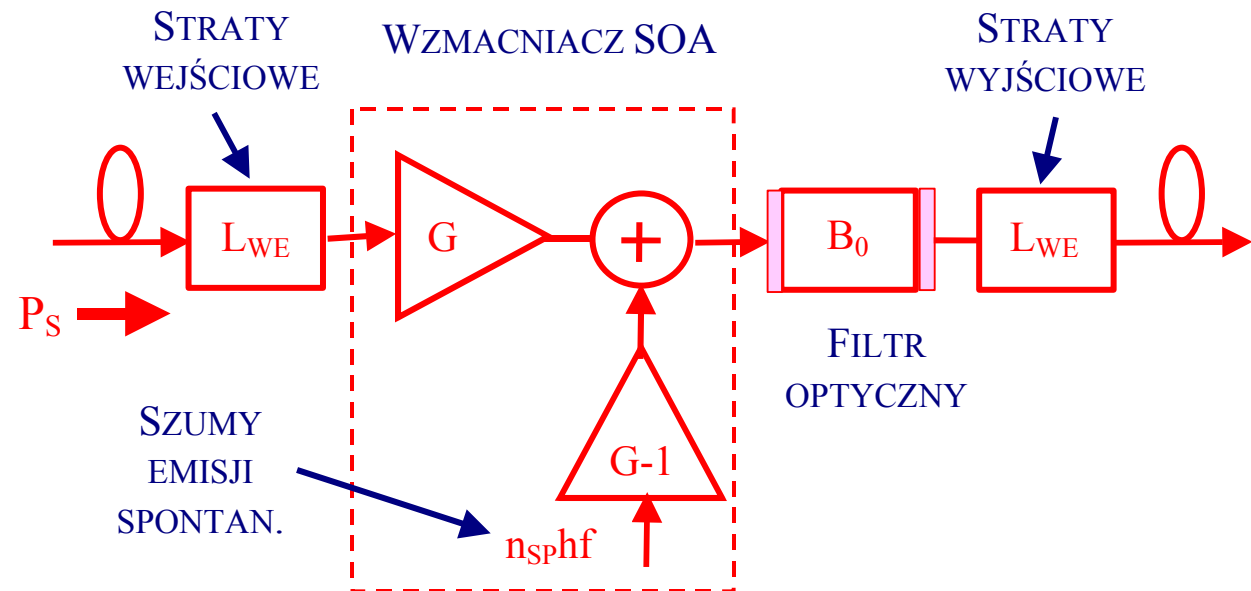
⇒ Składnik 2 rozwiązania to obecność emisji spontanicznej.

$$P_{sp} = n_{sp} (G - 1) hf\Delta_f; \quad n_{sp} = \left( \frac{N_2}{N_2 - N_1} \right);$$

⇒ Emisja spontaniczna istotnie zwiększa poziom szumów.

$$SNR = \frac{P_s G}{n_{sp} hfB_0 (G - 1)};$$

*Rys.7.7. Wzmacniacz optyczny ze źródłem szumów emisji spontanicznej.*



## 7.2. WZMACNIACZE ... – SZUMY I ZNIEKSZTAŁCENIA - INTERMODULACJA

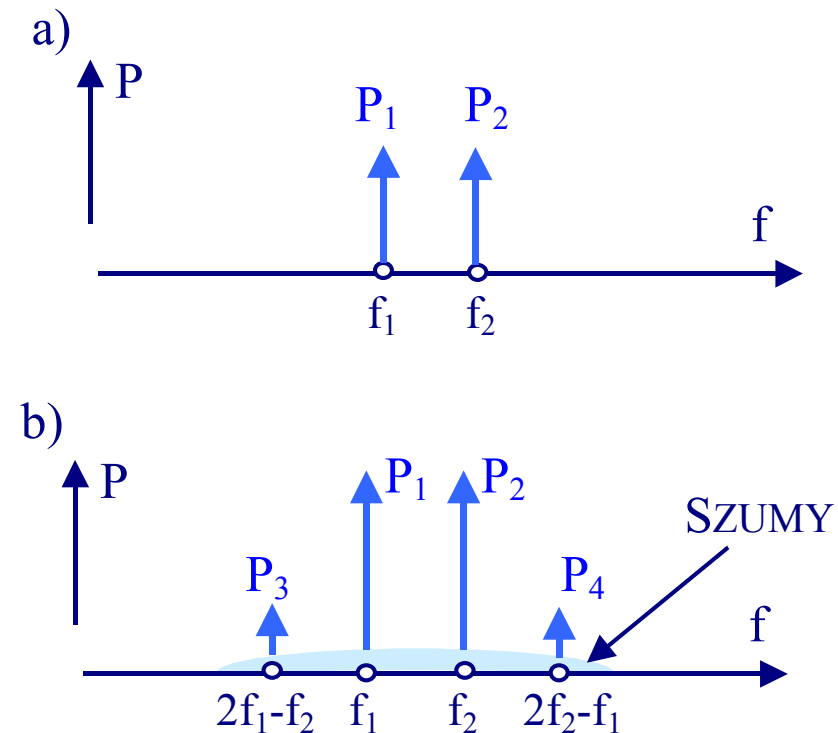
⇒ Wzmacniacze optyczne pracują przy transmisji sygnałów na kilku częstotliwościach - WDM *Wavelength-Division-Multiplexing*.

⇒ Gdy suma mocy wyjściowej dla obu kanałów zaczyna zbliżać się do mocy nasycenia powstają zniekształcenia nieliniowe.

⇒ Jednym z rodzajów nieliniowych zniekształceń są zniekształcenia intermodulacyjne, zwane czasami *four-wave-mixing*.

⇒ Gdy wzmacniane sygnały optyczne mają częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ , to powstałe produkty intermodulacji mają częstotliwości:

$$(2f_1 - f_2) \text{ i } (2f_2 - f_1).$$

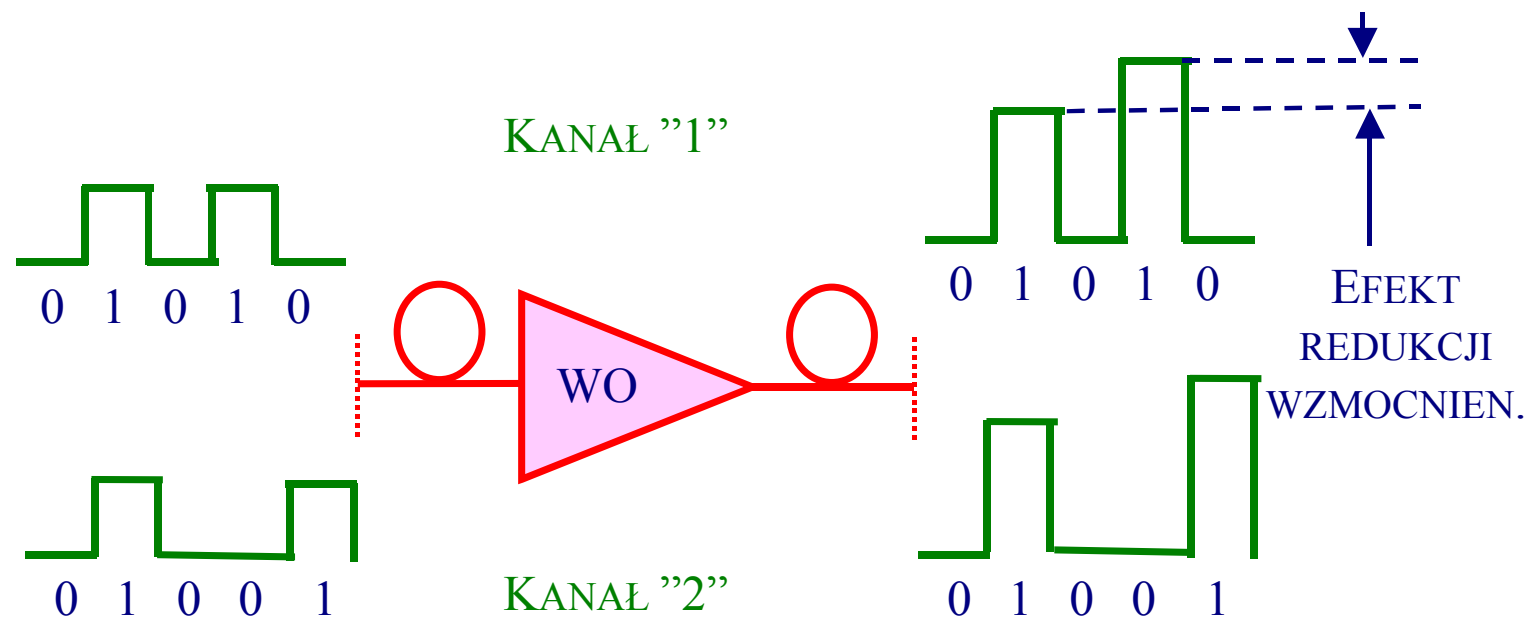


Rys. 7.8. Powstawanie zniekształceń intermodulacyjnych przy pracy dwutonowej. a) sygnały wejściowe, b) sygnały wyjściowe na tle szumów emisji spontanicznej.

## 7.2. WZMACNIACZE ... – SZUMY I ZNIEKSZTAŁCENIA - PRZESŁUCHY (*crosstalk - effects*).

⇒ Przy transmisji cyfrowej - dwukanałowej, na dwóch częstotliwościach nośnych, gdy suma mocy wyjściowej dla obu kanałów zaczyna zbliżać się do mocy nasycenia powstają także zniekształcenia nieliniowe, nazywane przesłuchami międzykanałowymi, co ilustruje rys.7.9.

⇒ Jednoczesne wzmacnianie obu impulsów odbywa się z mniejszym wzmocnieniem, samodzielne impulsy mają większe moce wyjściowe, następuje zróżnicowanie wysokości impulsów „jedynek”. Rośnie prawdopodobieństwo popełnienia błędu.

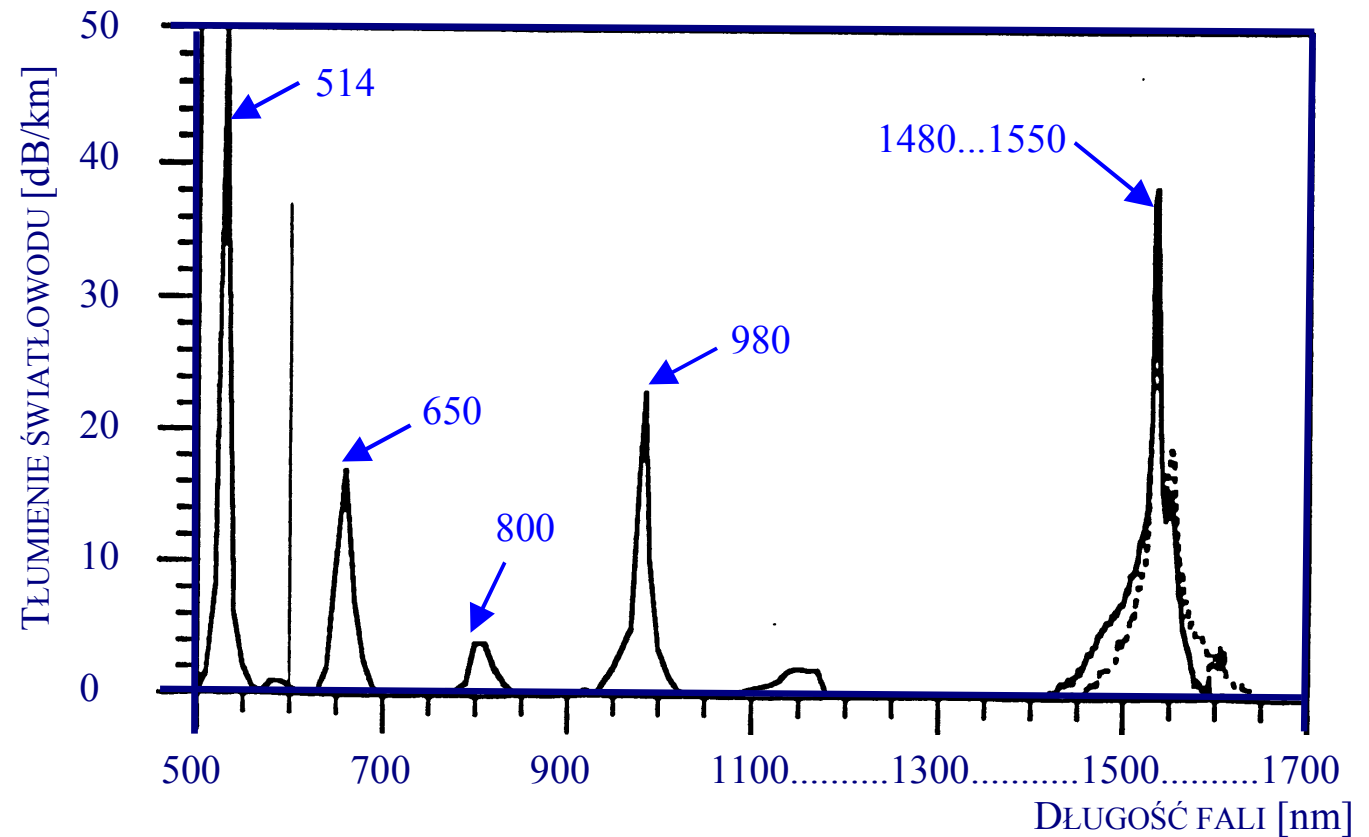


Rys.7.9. Ilustracja powstania efektów przesłuchu przy transmisji dwukanałowej

### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – ŚWIATŁOWÓD DOMIESZKOWANY ERBEM cz.1

- ⇒ **Wzmacniacz ze światłowodem domieszkowanym Erbem EDFA** (ang. - - *erbium doped fiber amplifier*) odgrywa wielką rolę w telekomunikacji optycznej.
- ⇒ Gdy optyczny światłowód jest domieszkowany erbem Er, neodymem Nd, praseodymem Pr, charakterystyki tłumienia zmieniają się drastycznie.

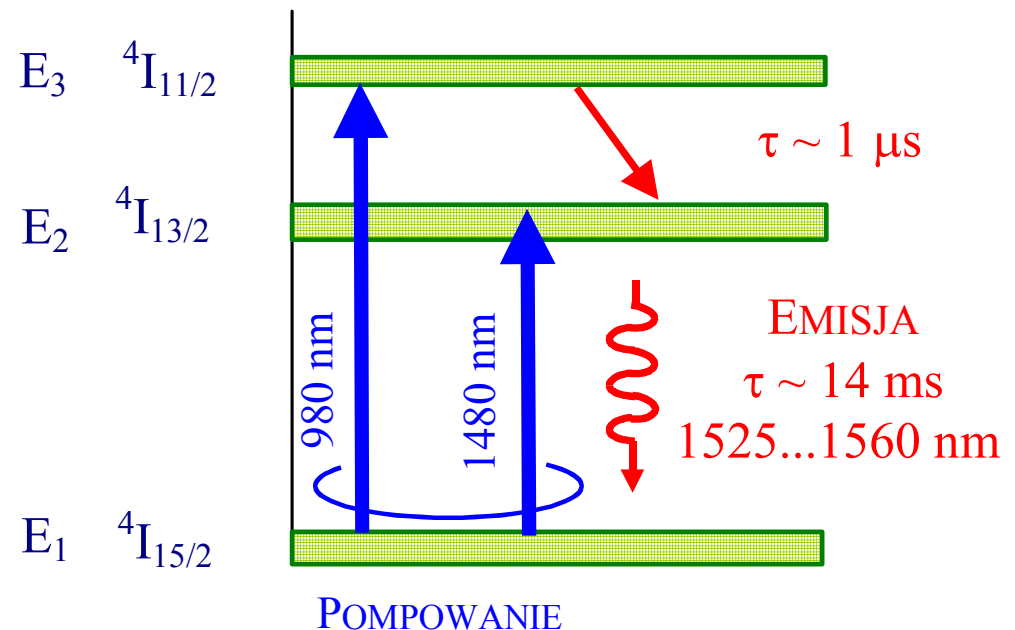
⇒ Domieszka  $\text{Er}^{3+}$  -  
tłumienie światłowodu  
rośnie z 0,2 dB/km do  
1500 dB/km dla  
1480 nm



Rys.7.10. Absorpcja światłowodu domieszkowanego erbem w funkcji długości fali

### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – ŚWIATŁOWÓD DOMIESZKOWANY ERBEM cz.2

- ⇒ Światłowodowy wzmacniacz optyczny wykorzystuje jednomodowy światłowód kwarcowy domieszkowany jonami erbu.
- ⇒ Każdy z „pików” krzywej absorpcji rys.7.10 odpowiada jednemu przejściu energetycznemu, jednak dla uzyskania akcji wzmacniania wykorzystuje się system trzypoziomowy.
- ⇒ Użytecznym z punktu widzenia wzmacniania jest przejście między poziomami  ${}^4I_{13/2}$  i  ${}^4I_{15/2}$  przy długości fali 1536 nm.
- ⇒ Inwersje obsadzeń uzyskuje się przy pompowaniu sygnałem o długości 980 nm lub 1480 nm.
- ⇒ Przy pompowaniu sygnałem 980 nm poziom  ${}^4I_{13/2}$  osiągany jest w 2 krokach.
- ⇒ Przy pompowaniu sygnałem 1480 nm poziom  ${}^4I_{13/2}$  osiągany jest w 1 kroku - rozwiązanie praktyczne.
- ⇒ Przejście 1536 nm jest bardzo wąskie, poszerzenie po dodaniu tlenku  $Al_2O_3$ .



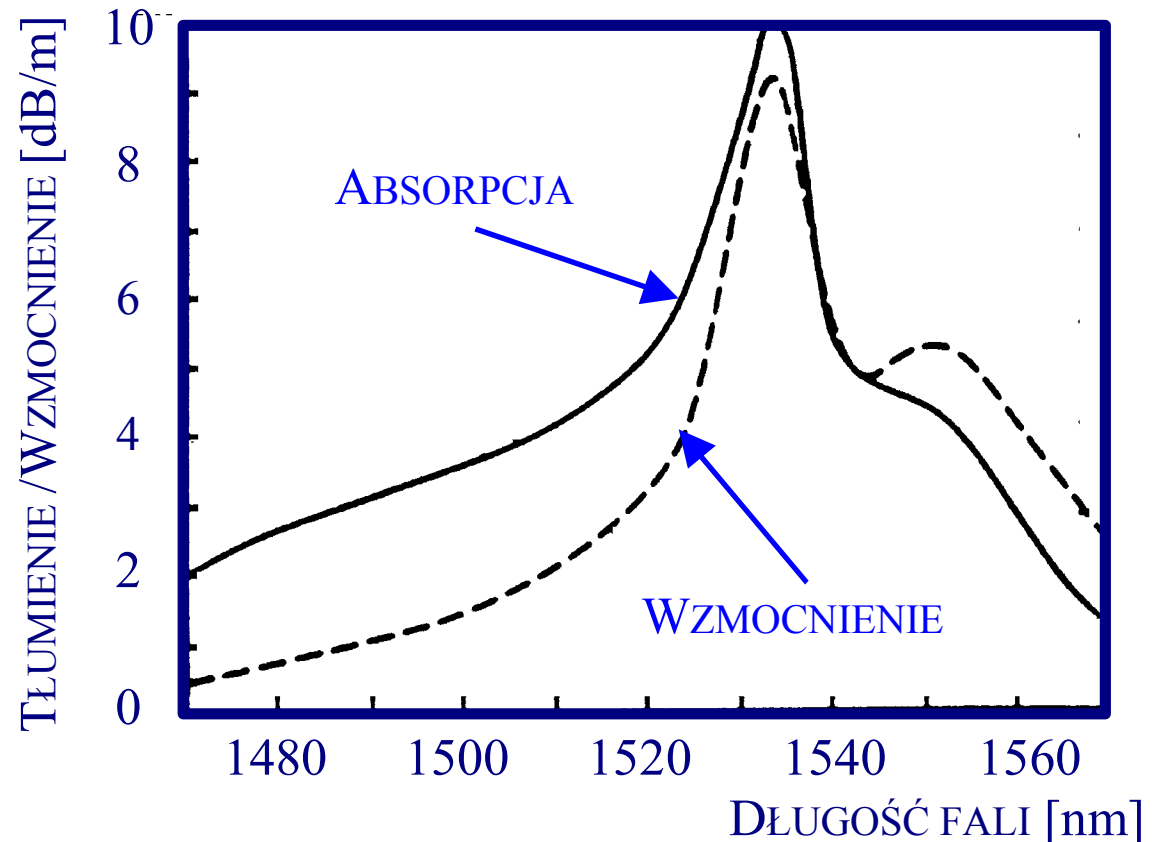
Rys.7.11. Poziomy energetyczne światłowodu kwarcowego domieszkowanego Erbem, biorące udział w akcji wzmacniania sygnału optycznego.

### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – ŚWIATŁOWÓD DOMIESZKOWANY ERBEM cz.3

⇒ Charakterystyki absorpcji promieniowania przez rdzeń domieszkowanego erbem światłowodu, a charakterystyki wzmocnienia  $G(\lambda)$  nieco różnią się, co umożliwia zastosowanie „pompy” na długości fali 1480 nm.

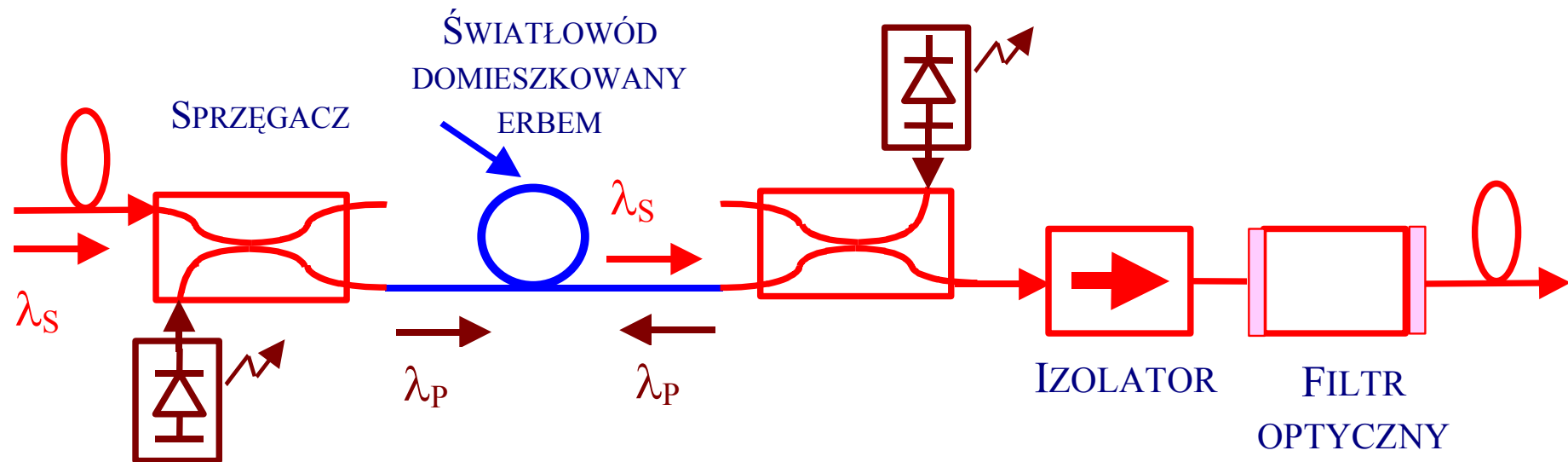
⇒ Domieszkowanie rdzenia światłowodu dodatkowymi jonami, jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ge}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  powoduje niewielkie przesunięcia charakterystyki wzmocnienia.

*Rys.7.12. Charakterystyki absorpcji i wzmocnienia (emisji) wzmacniacza światłowodowego domieszkowanego erbem.*



### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – UKŁAD WZMACNIACZA EDFA

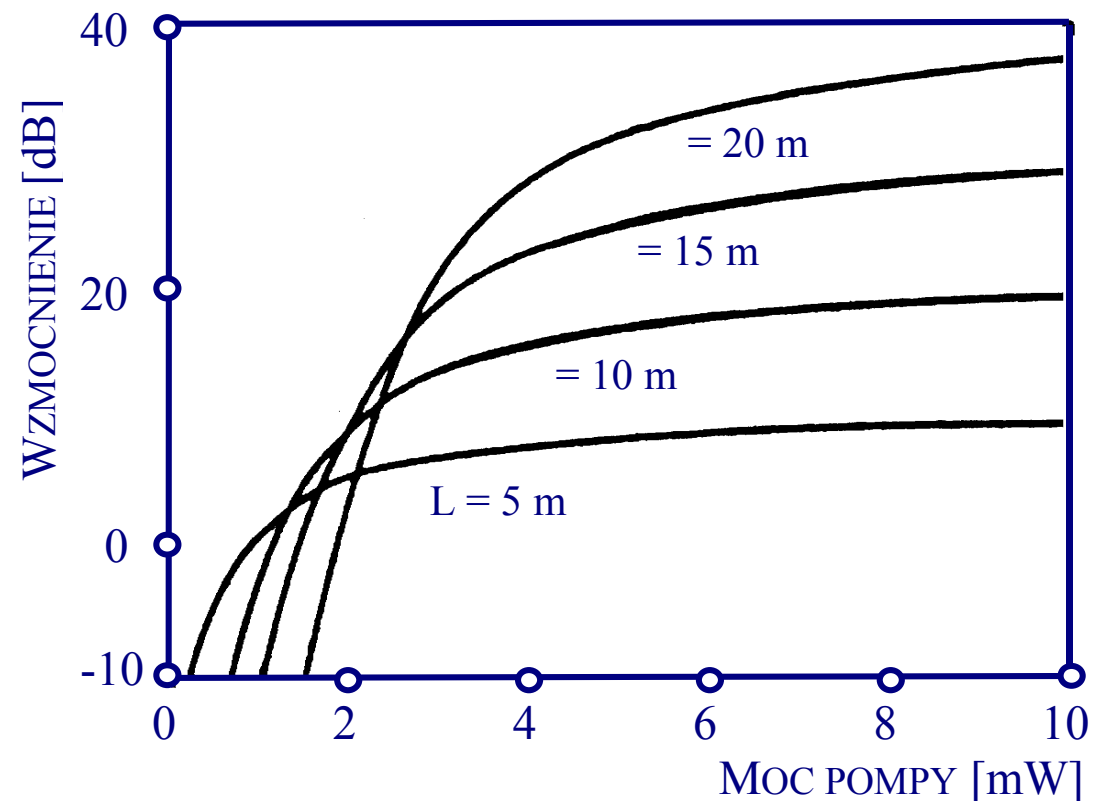
- ⇒ Światłowód domieszkowany erbem (zwykle kilkanaście metrów) wprowadzony jest do toru transmisyjnego.
- ⇒ Sygnały pomp (pompami są półprzewodnikowe lasery na 1480 nm) doprowadzone są selektywnymi sprzęgaczami, zwykle jedna pompa, w niektórych rozwiązaniach dwie.
- ⇒ Optyczny izolator usuwa wpływ odbić.
- ⇒ Filtr optyczny wyjściowy usuwa szczytkowy sygnał pompy, zmniejsza poziom szumów emisji spontanicznej.



Rys.7.13. Schemat układu wzmacniacza ze światłowodem domieszkowanym erbem. W niektórych rozwiązaniach stosowane są dwie pompy.

### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – CHARAKTERYSTYKI WZMACNIACZA EDFA - 1

- ⇒ Wzmocnienie wzmacniacza EDFA zależy od długości aktywnego światłowodu oraz od mocy pompy optycznej.
- ⇒ W zależności od przeznaczenia – wzmacniacz mocy lub wzmacniacz niskoszumny – optymalizuje się moc pompy i długość światłowodu
- ⇒ Wzmocnienie wzmacniacza rośnie z długością światłowodu, ale od pewnej długości rosną szybko szumy.
- ⇒ Mniejsze szumy uzyskuje się gdy kierunki propagacji sygnałów wzmacnianego i pompy są takie same.



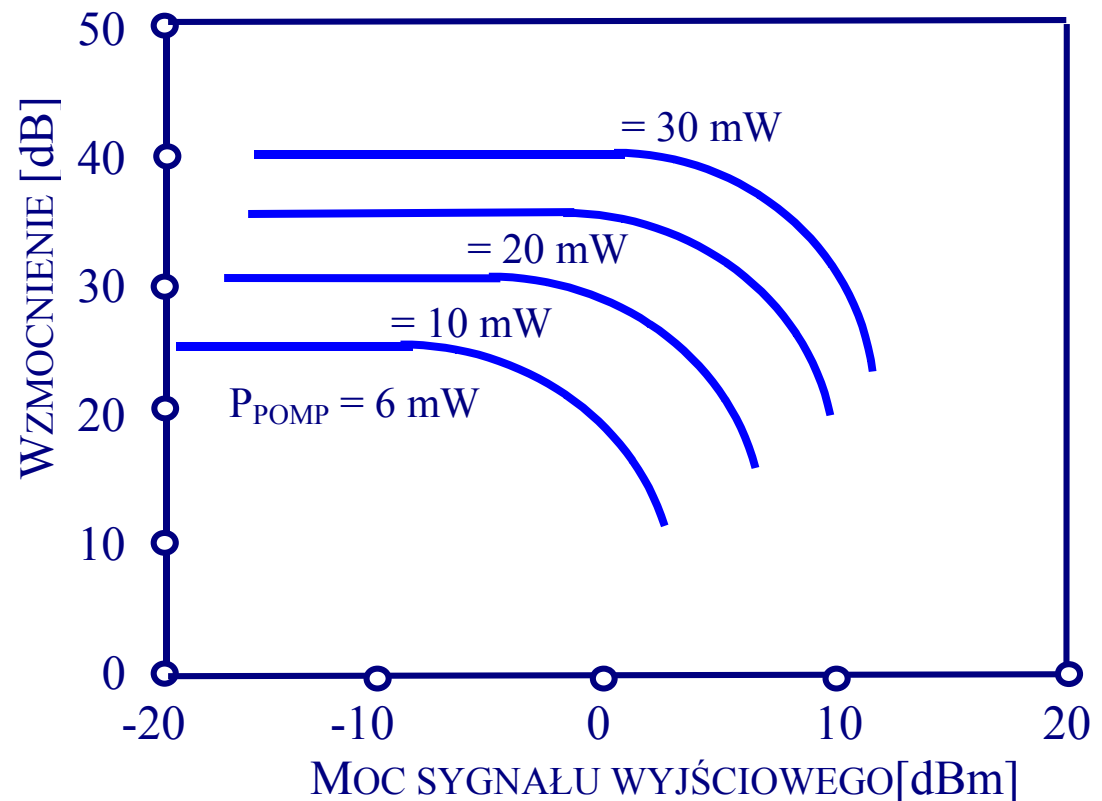
*Rys.7.14. Charakterystyki małosygnałowego wzmocnienia wzmacniacza EDFA w zależności od poziomu mocy pompy dla różnych długości światłowodu.*



### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – CHARAKTERYSTYKI WZMACNIACZA EDFA - 2

- ⇒ Moc nasycenia i wzmacnienie rosną z mocą pompy. W praktycznych rozwiązaniach moc pompy wynosi kilkadziesiąt mW. Opisano eksperyment z mocą pompy powyżej 1 W i mocą nasycenia powyżej 200 mW.
- ⇒ Jednoczesna transmisja różnych długości fali (multipleksacja WDM) nakazuje ostrożne dobieranie poziomów mocy kanałów, aby uniknąć przesłuchów.
- ⇒ Aby zmniejszyć moc pompy średnicę rdzenia zmniejsza się do 2,5 mikrometra. Powoduje to jednakże wzrost strat odbicia przy połączeniu z normalnym jednomodowym światłowodem.

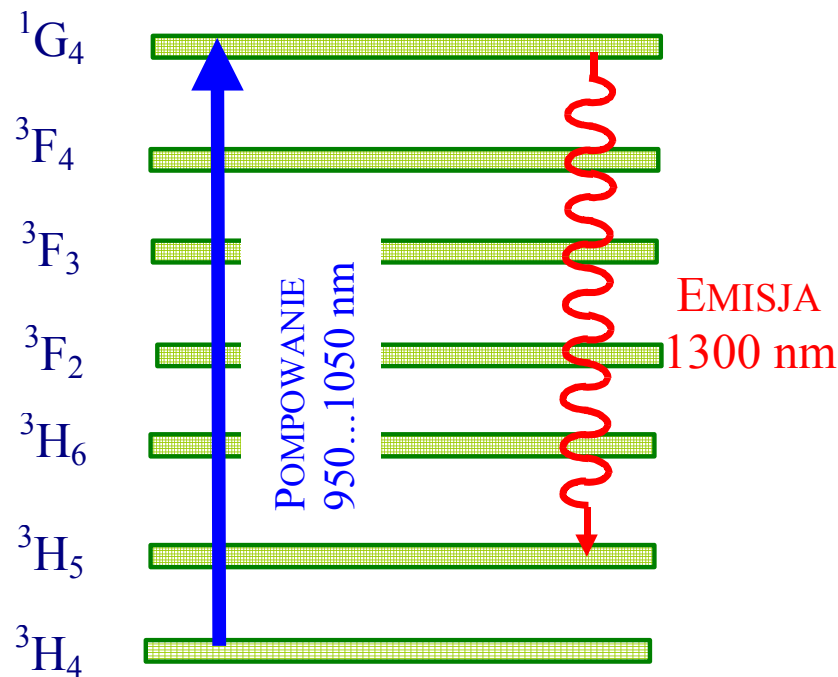
*Rys.7.15. Wzmacnienie i moc wyjściowa wzmacniacza EDFA dla różnych poziomów mocy pompy. Symulację przeprowadzono dla  $\lambda_P = 1480 \text{ nm}$ ,  $\lambda_S = 1540 \text{ nm}$  oraz długości aktywnego światłowodu  $L = 20 \text{ m}$ .*



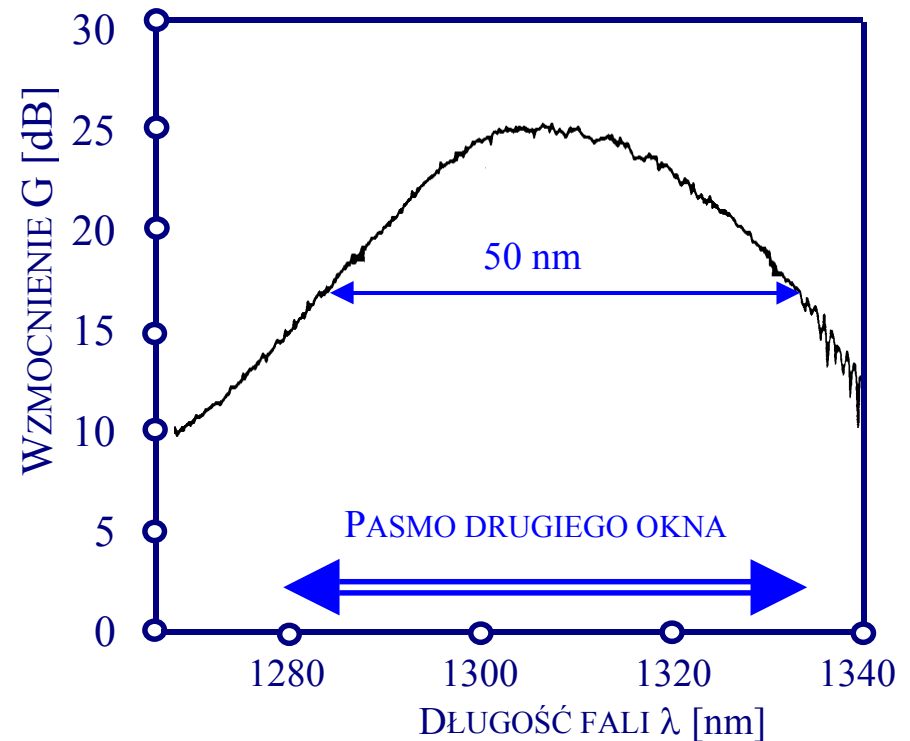
### 7.3. WZMACNIACZE ŚWIATŁOWODOWE – WZMACNIACZ NA PASMO 1300 nm

⇒ Wzmacniacze światłowodowe na pasmo 1300 nm są intensywnie badane i doskonalone.

⇒ Specjalny światłowod z szkła fluorowo-cyrkonowego domieszkuje się preodymem  $\text{Pr}^{3+}$ , otrzymuje się wzmacniacz **PDFA** (ang. – *praseodymium-doped fluoride fiber amplifier*).



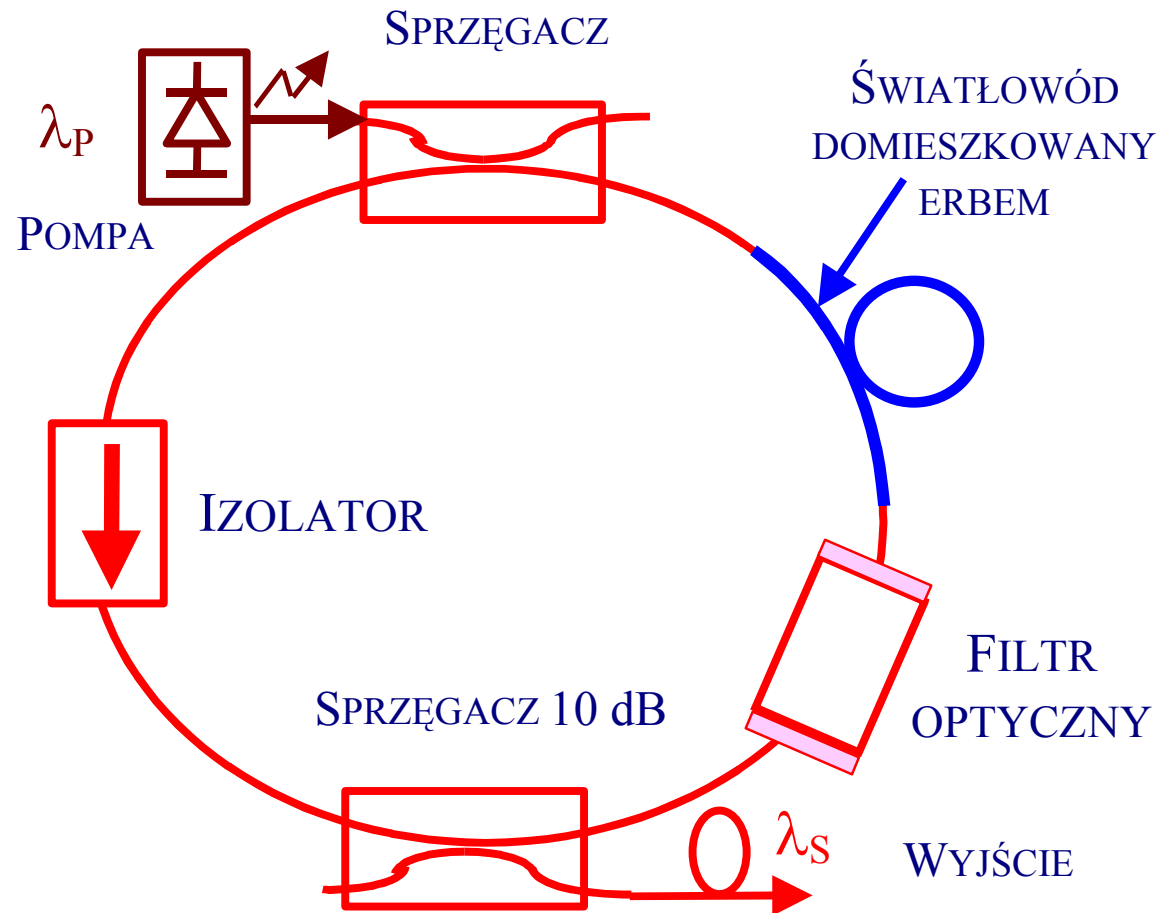
Rys. 7.16. Struktura poziomów energetycznych praseodymu  $\text{Pr}^{3+}$ .



Rys. 7.17. Wzmocnienie małosygnalowe wzmacniacza PDFA. Moc pompy ok. 500 mW, długość światłowodu 23 metry.

## 7.4. ZASTOSOWANIA - – WZMACNIACZ EDFA JAKO LASER

- ⇒ Sprzęgając wejście z wyjściem wzmacniacza EDFA umożliwiamy powstanie oscylacji. Sprzężenie nie przez dodanie zwierciadeł, ale w strukturze umożliwiającej cyrkulację.
- ⇒ Powstaje laser o dużej czystości sygnału, szerokość linii widmowej jest oceniana na ok. 100 kHz.
- ⇒ Jeżeli filtr optyczny jest przestrajany, to laser także jest przestrajany w całym pasmie wzmocnienia.
- ⇒ Istnieje też możliwość generacji krótkich impulsów.



Rys. 7.18. Wzmacniacz EDFA pracujący w układzie lasera.

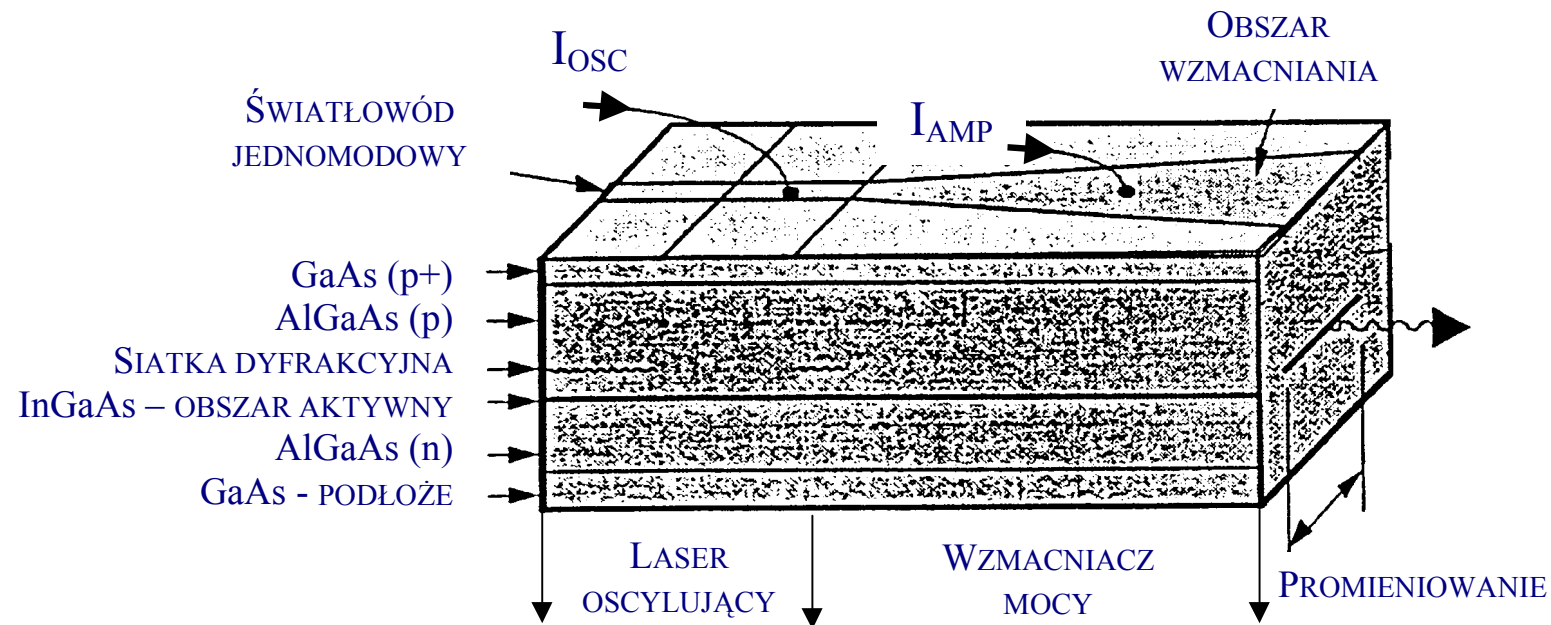
## 7.4. ZASTOSOWANIA - – ZINTEGROWANY NADAJNIK MOPA

⇒ Opracowano zintegrowany nadajnik zawierający:

- laser półprzewodnikowy,
- wzmacniacz półprzewodnikowy, z warstwą aktywną wzmacniającą sygnał lasera.

⇒ Powstał MOPA (ang. - *Master Oscillator/Power Amplifier*). Szerokie zastosowania w nadajnikach telekomunikacyjnych.

⇒ Parametry MOPA: Długość fali 960 nm. Moc wyjściowa do 3 Watów.  $f_{\text{MODULACJI}}$  do 5 GHz.

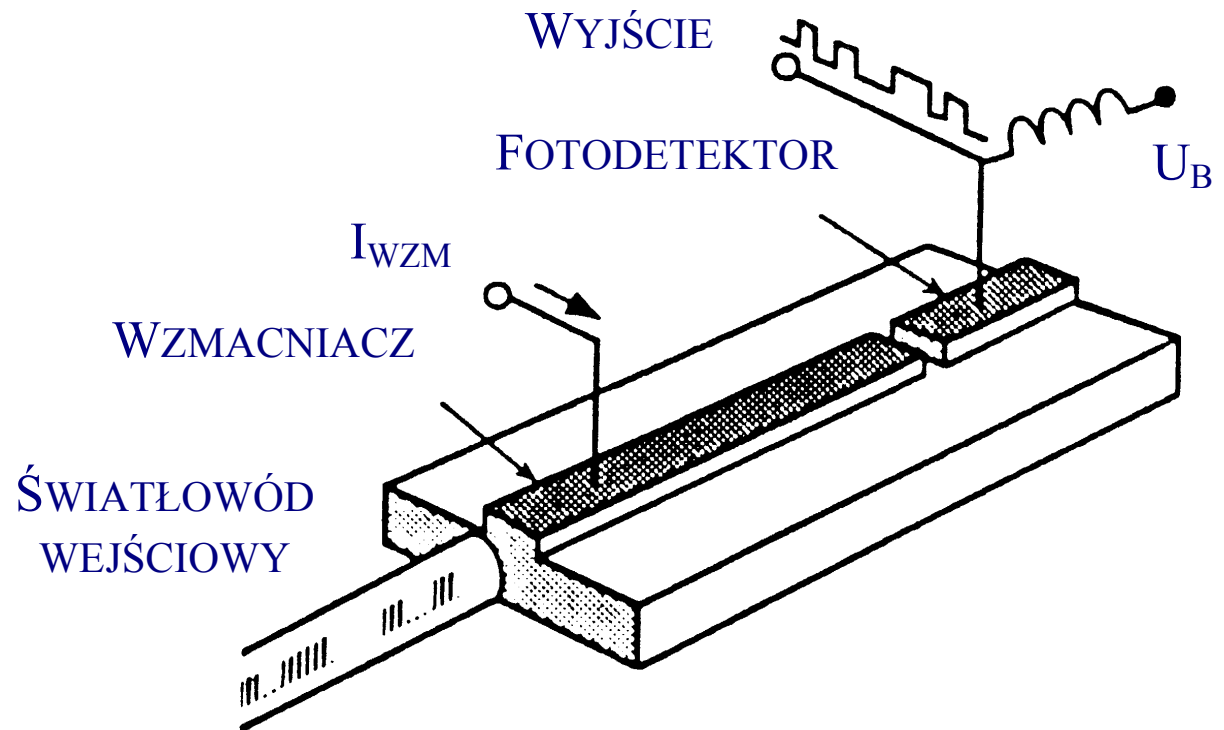


Rys.7.19. *Monolithically Integrated High-Speed, High-Power, Diffraction Limited Semiconductor Sources for Space Telecommunications –1996, Kalifornia.*

## 7.4. ZASTOSOWANIA - – ZINTEGROWANY ODBIORNIK

- ⇒ Opracowano zintegrowany odbiornik na pasmo 1300 nm, jako połączenie wzmacniacza półprzewodnikowego i fotodetektora.
- ⇒ Wykonano model na podłożu z fosorku indu InP. Fotodetektor p-i-n pracuje przy polaryzacji  $-1,5V$ , wzmocnienie wzmacniacza SOA ok.20 dB. Pasma pracy odbiornika optycznego do 7 GHz.

*Rys.7.20. Ideowa struktura zintegrowanego odbiornika z półprzewodnikowym optycznym przedwzmacniaczem. Długość odbiornika  $1000 \mu m$ , długość detektora  $30 \mu m$ .*



## 7.5. PODSUMOWANIE

⇒ Wzmacniacze optyczne odgrywają wielką rolę w strukturach łącz światłowodowych. Zasadniczo pełnią 3 funkcje:

- Jako wzmacniacze mocy w strukturach nadajników.
- Jako wzmacniacze liniowe kompensujące tłumienie światłowodu.
- Jako małosygnałowe wzmacniacze zwiększające czułość odbiorników optycznych.

⇒ Prowadzone prace i badania idą w 2 kierunkach:

- Rozwój wzmacniaczy półprzewodnikowych SOA, wykonywanych na tych samych podłożach co lasery i fotodetektory. Wzmacniacze tego typu umożliwiają integrację odbiorników i nadajników.
- Wzmacniacze światłowodowe EDFA i PDFA, wykorzystujące jednomodowe światłowody, których rdzenie domieszkowane są erbem – dla pasma 1550 nm, bądź praseodymem – dla pasma 1300 nm. Wzmacniacze światłowodowe najlepiej pełnią rolę wzmacniaczy liniowych.

⇒ Rola wzmacniaczy optycznych jest ogromna:

- pracując jako wzmacniacze liniowe umożliwiają transmisję solitonów,
- ich zastosowanie jest ważnym krokiem na drodze do całkowitego zastąpienia układów elektronicznych optycznymi.