



TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

11. Techniki multipleksacji

Spis treści:

11.1. Wprowadzenie.

11.2. Multipleksacja w dziedzinie czasu.

11.3. Multipleksacja w dziedzinie długości fali i częstotliwości.

11.4. Multipleksacja na częstotliwościach podnośnych.

11.5. Multipleksacja kodowa.

11.6. Podsumowanie

11.1. WPROWADZENIE – STRUKTURA SIECI TELEKOMUNIKACYJNEJ

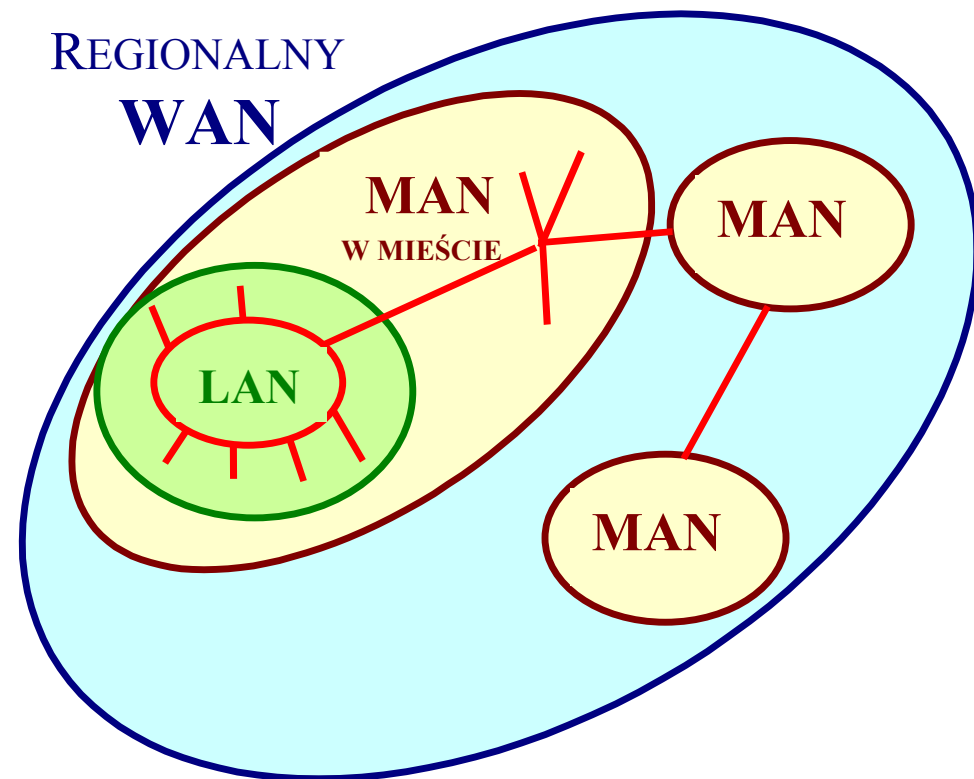
⇒ **LAN** - *Local-Area-Network*, łączy niewielkie liczby użytkowników, najmniejsze z sieci.

⇒ **MAN** - *Metropolitan-Area-Network*, większe struktury sieci telekomunikacyjnej.

⇒ **WAN** - *Wide-Area-Network*, największe struktury sieci, budowane w dużych rejonach geograficznych.

⇒ Łącza optyczne są jednym z elementów sieci, która poza tym może wykorzystywać:

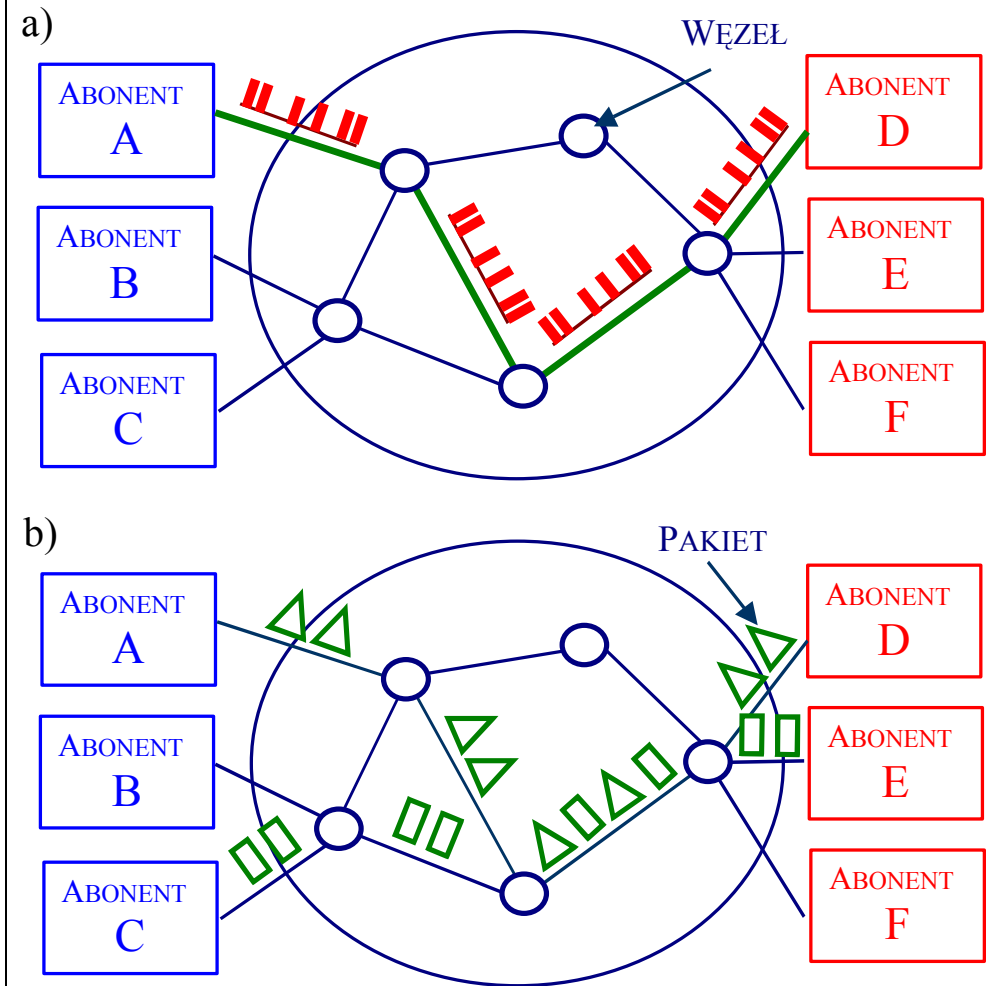
- radiolinie,
- sieci telekomunikacji komórkowej,
- sieci satelitarne,
- sieci telefonii tradycyjnej,
- sieci CATV, itp.



Rys.11.1. Struktura dużej sieci z różnorodnymi elementami

11.1. WPROWADZENIE – TRANSMISJA PAKIETÓW

- Abonent A chce połączyć się z abonentem E, wysyła do niego sygnał inicjujący.
- Jeśli E jest gotów do odbioru wysyła zwrotny sygnał i A rozpoczyna transmisję. Procedura zwana *handshaking*
- 2 metody transmisji informacji przez sieć:
 - a) ustalenie bezpośredniego połączenia między A i E i transmisja sygnału bit po bicie, z wykorzystaniem jedynie części pasma, jakim dysponuje linia,
 - b) przesyłanie pakietów informacji zawierających wiele bitów,
 - w systemie **SONET Synchronous Optical Network** długość pakietu 125 μ s,
 - w systemie **ATM Asynchronous Transfer Mode** długość pakietu 53 bajty, 500 ns dla transmisji 1 Gb/s,
 - każdy pakiet zawiera „nagłówek” z adresem.

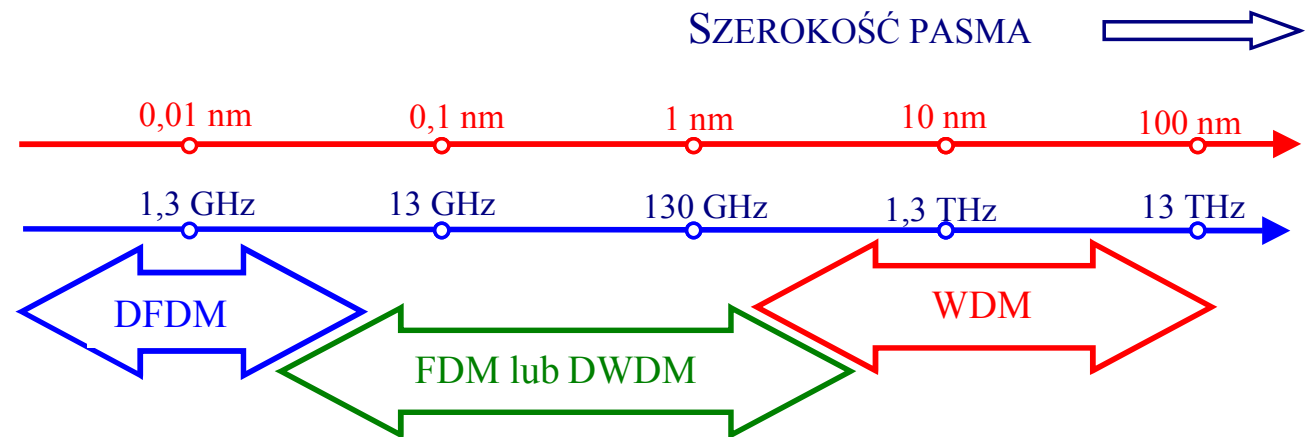


Rys.11.2. 2 sposoby transmisji informacji przez sieć.

11.1. WPROWADZENIE – KLASYFIKACJA TECHNIK MULTIPLEKSACJI (A)

- ⇒ Stosowane są rozmaite techniki zwielokrotniania - **multipleksacji** - *Multiplexing* transmisji przez łącza optyczne, aby wykorzystać ich ogromne możliwości.
- ⇒ Procedura odwrotna - **demultipleksacja** - *Demultiplexing*
- ⇒ W telekomunikacji elektronicznej przy transmisji sygnałów cyfrowych powszechnie stosuje się zwielokrotnianie z podziałem czasowym **TDM** - *Time-Division Multiplexing*.
- W łączach optycznych technika ta nazywana jest **OTDM** - *Optical Time-Division Multiplexing*.
- ⇒ Łączem można przesyłać jednocześnie kilka sygnałów o różnych częstotliwościach nośnych, każdy z nich może być zmodulowanym i nieść odrębną informację; jest to technika **FDM** *Frequency-Division Multiplexing*.

Rys.11.3. Klasyfikacja technik multipleksacji FDM w zależności od odstepu między nośnymi.

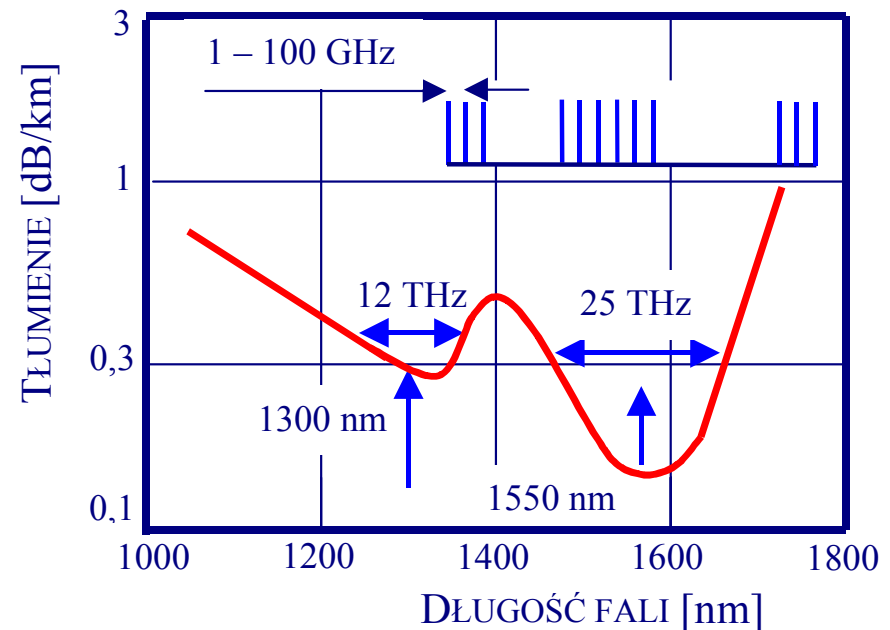


11.1. WPROWADZENIE – STRUKTURA SIECI TELEKOMUNIKACYJNEJ (B)

⇒ W łączach światłowodowych odstęp – w GHz – między nośnymi może być duży, wtedy technika zwielokrotniania nazywana jest **WDM *Wavelength-Division Multiplexing***.

- Gdy częstotliwości nośne zbliżają się do siebie, „zagęszczają” się stosujemy oznaczenie **DWDM - *Dense Wavelength-Division Multiplexing***.
- Zmniejszając odstęp dochodzimy do **DFDM - *Dense Frequency-Division Multiplexing***.

Rys.11.4. Ilustracja możliwości transmisji wielu nośnych w obu oknach małej tłumienności światłowodu kwarcowego 1300 nm i 1550 nm.

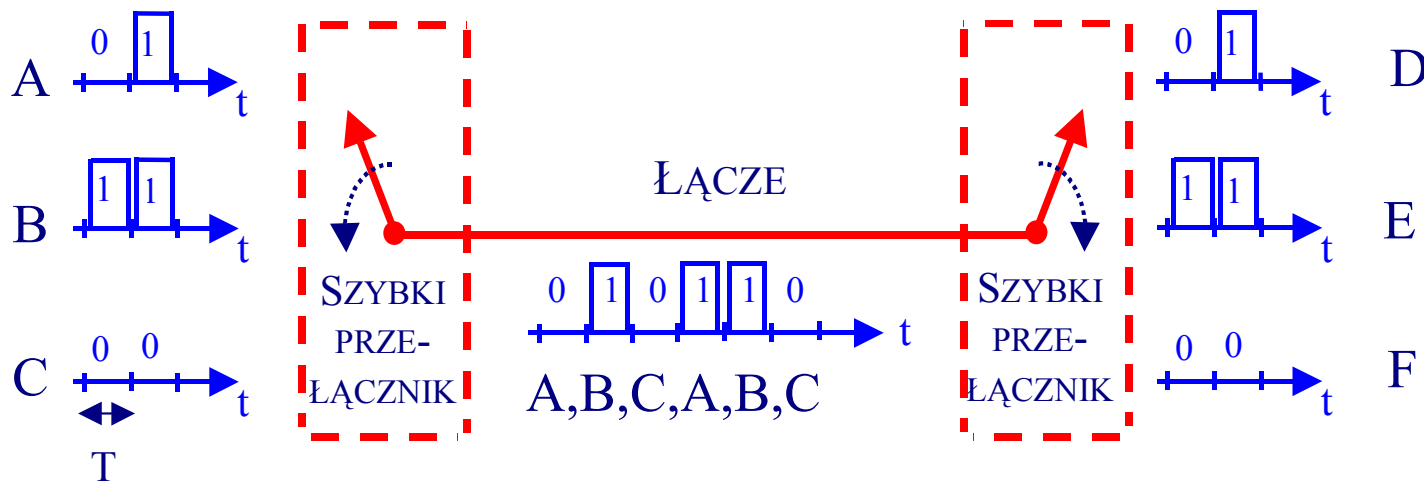


⇒ Analogowe sieci optyczne np. CATV wykorzystują jedną nośną częstotliwość optyczną, ale sygnały różnych kanałów zapisane są na różnych częstotliwościach mikrofalowych „podnośnych”, technika ta nazywana jest **SCM - *SubCarrier Multiplexing***.

⇒ Zastosowanie kodowania transmitowanych sygnałów prowadzi do multipleksacji **CDMA – *Code Division Multiple Access***.

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – ZASADA PRACY (A)

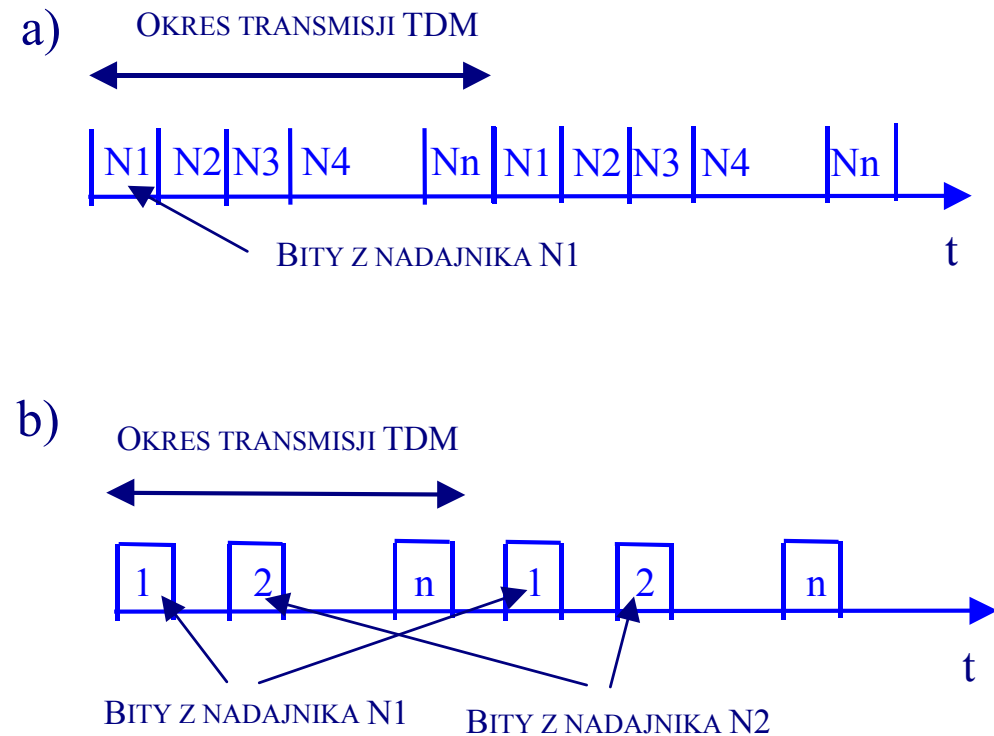
- Łącze optyczne może transmitować dane bardzo wielu kanałów. W telekomunikacji elektronicznej przy transmisji sygnałów cyfrowych powszechnie stosuje się zwielokrotnianie z podziałem czasowym **TDM - Time-Division Multiplexing**.
- Rozwinięciem systemu TDM jest **system TDMA - Time-Division Multiaccess**. Jest to rozwiązanie systemowe i nie zajmujemy się nim.
- Zasada systemów zwielokrotniania z podziałem czasowym: przyporządkowanie każdemu strumieniowi danych serii odcinków czasowych.



Rys.11.5. Koncepcja transmisji informacji między kilkoma parami (A z D, B z E, C z F) użytkowników z wykorzystaniem techniki TDM

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – ZASADA PRACY (B)

Rys.11.6. Dwa sposoby przydziału czasu użytkownikom sieci:
a) wszystkie nadajniki pracują równocześnie krótkimi impulsami przesuniętymi w czasie,
b) nadajniki pracują kolejno generując pakiety danych i pakiety te są kolejno transmitowane siecią.



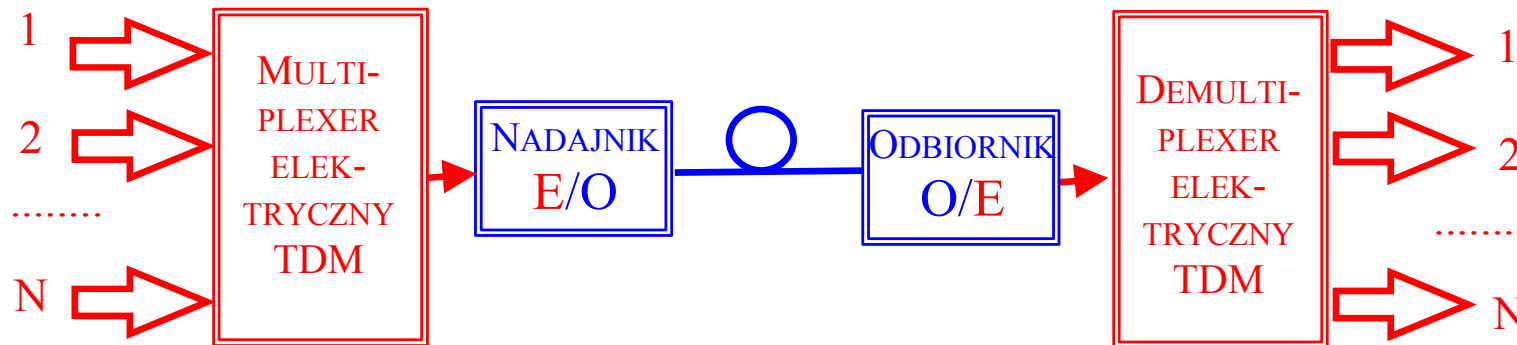
⇒ Każda para użytkowników otrzymuje swój przedział czasowy do transmisji danych.

⇒ W przedziale czasowym można przesłać jeden bit lub pakiet bitów.

⇒ Proces multipleksowania i demultipleksowania musi być prowadzony synchronicznie, z wielką precyzją.

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – PRZEŁĄCZANIE ELEKTRONICZNE

⇒ Funkcje (de) i multipleksowania są obecnie realizowane przez przełączające układy elektroniczne albo optyczne. Mamy wtedy do czynienia z **OTDM – *Optical Time-Division Multiplexing***



Rys.11.7. Idea pracy łącza optycznego point-to-point z multipleksacją i demultipleksacją TDM elektroniczną.

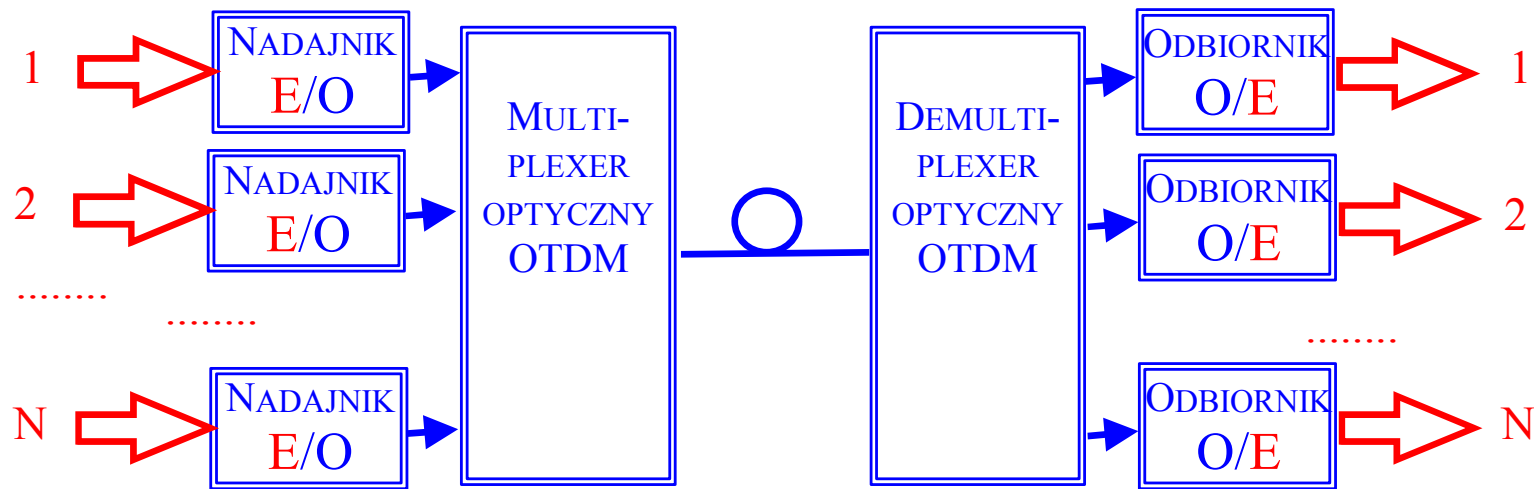
⇒ Sygnały cyfrowe wielu użytkowników szeregowane są przez układy przełączników elektronicznych i w postaci ciągu impulsów kierowane są do lasera.

⇒ Lasery mogą być modulowane bezpośrednio, przez zmianę prądu, lub z użyciem modulatora zewnętrznego, elektrooptycznego, bądź elektroabsorbcyjnego.

⇒ Technika multipleksacji elektronicznej jest opracowana od wielu lat na potrzeby tradycyjnej telekomunikacji. Szybkość przełączania jest ograniczona szybkością działania układów elektronicznych. Z tego powodu poszukiwane są rozwiązania szybsze, optyczne.

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – MULTIPLEKSACJA OPTYCZNA (A)

⇒ Każdy z użytkowników może modulować własny laser, których sygnały kierowane są przez układ przełączników optycznych kolejno do światłowodu.



Rys.11.8. Idea pracy łącza optycznego point-to-point z multipleksacją i demultipleksacją optyczną OTDM.

⇒ W układzie z rys.11.8 procesy multipleksowania i demultipleksowania wykonują układy optyczne, mogą to być:

- bierne sumatory lub dzielniki mocy,
- optyczne przełączniki.

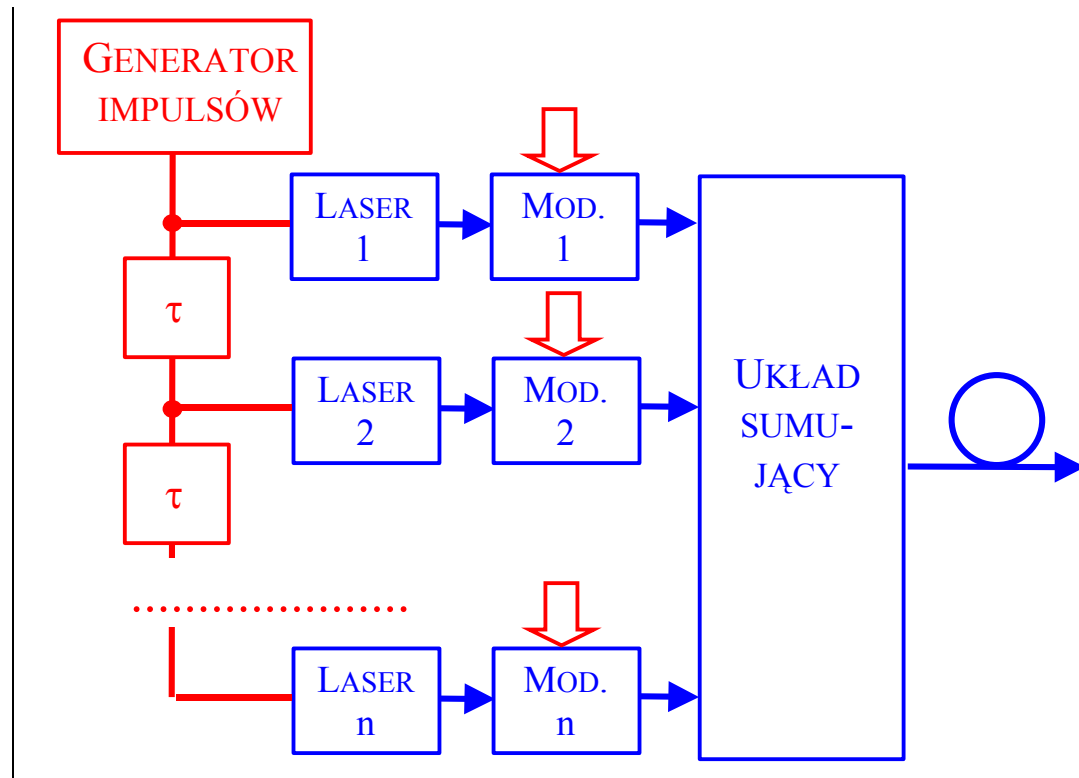
11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – MULTIPLEKSACJA OPTYCZNA (B)

⇒ Sposób na generację szeregu krótkich impulsów z jednego krótkiego impulsu pokazano na rys.11.9.

⇒ Na rysunku n laserów generuje ciągi impulsów sterowane przez wspólny zegar, ale przesunięte w czasie elektronicznie przez linie opóźniające D.

⇒ O tym który z impulsów jest przesyłany dalej decyduje zewnętrzny modulator, sterowany elektronicznie.

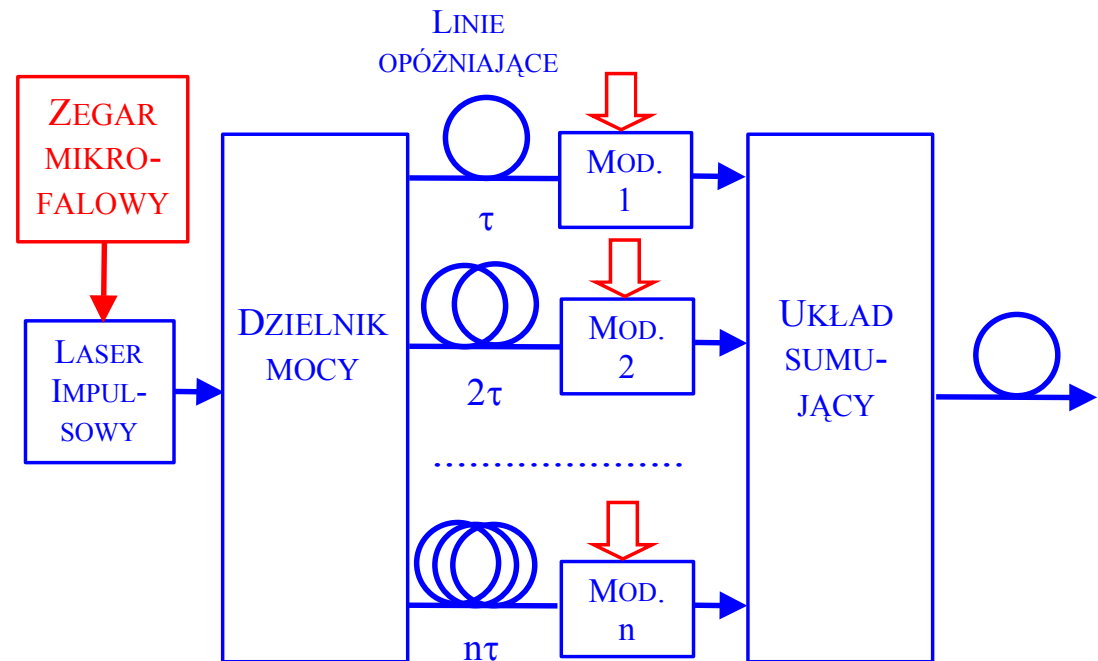
⇒ Sygnały sumowane są przez bierne sprzęgacze i sumatory.



Rys.11.9. Proces sumowania sygnałów w systemie OTDM z wieloma laserami.

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – MULTIPLEKSACJA OPTYCZNA (C)

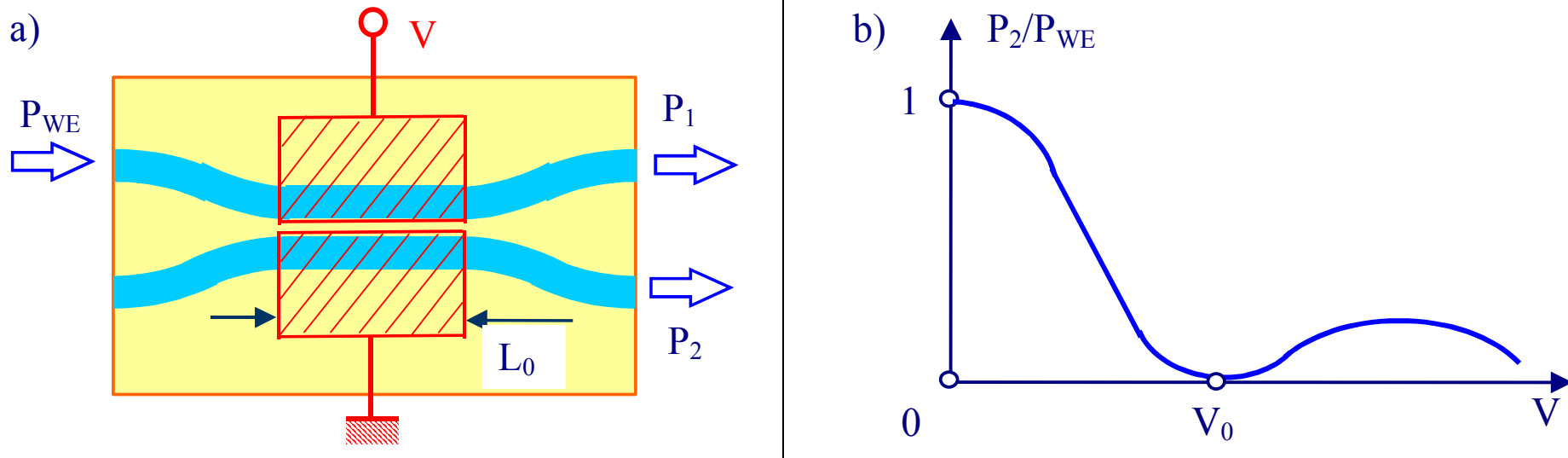
- ⇒ Lasery z rezonatorami Fabry-Perot generują jednocześnie kilka częstotliwości odpowiadających kolejnym rezonansom.
- ⇒ Specjalne układy sprzęgające umożliwiają fazowanie poszczególnych składowych-modów (*mode-locking*), co jest równoważne generacji bardzo krótkich impulsów, ps lub fs.
- ⇒ W układzie na rysunku wykorzystano jeden laser jako źródło ciągu bardzo krótkich impulsów optycznych.
- ⇒ Przebieg wyjściowy podzielono w biernym układzie na n kanałów.
- ⇒ W każdym z kanałów umieszczono optyczną linię opóźniającą przesuwającą impulsy względem siebie.
- ⇒ Każdy kanał zawiera modulator optyczny sterowany elektronicznie.



Rys.11.10. System OTDM z jednym laserem i liniami opóźniającymi.

11.2. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE CZASU – SPRZĘGACZ PRZEŁĄCZANY

- ⇒ Poważnym problemem jest konstrukcja demultiplekserów optycznych. Kluczowym elementem jest elektrooptyczny przełącznik wytwarzany na niobianie litu – rys.11.11.
- ⇒ Planarne światłowody są blisko siebie na długości L_0 , fala biegnąca w falowodzie 1 wzbudza falę w światłowodzie 2. Gdy stałe propagacji $\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = 0$ są takie same, przy pewnej długości L_0 moc ze światłowodu górnego przechodzi całkowicie do dolnego.
- ⇒ Przyłożenie napięcia zmienia współczynniki załamania dla obu torów, teraz $\Delta\beta(V) \neq 0$. Dla odpowiednio dużej wartości $\Delta\beta(V)L_0$ tor 2 może pozostać izolowany, moc optyczna pozostaje w torze 1, przez zmianę napięcia V przełączamy sygnał z 2 na 1.

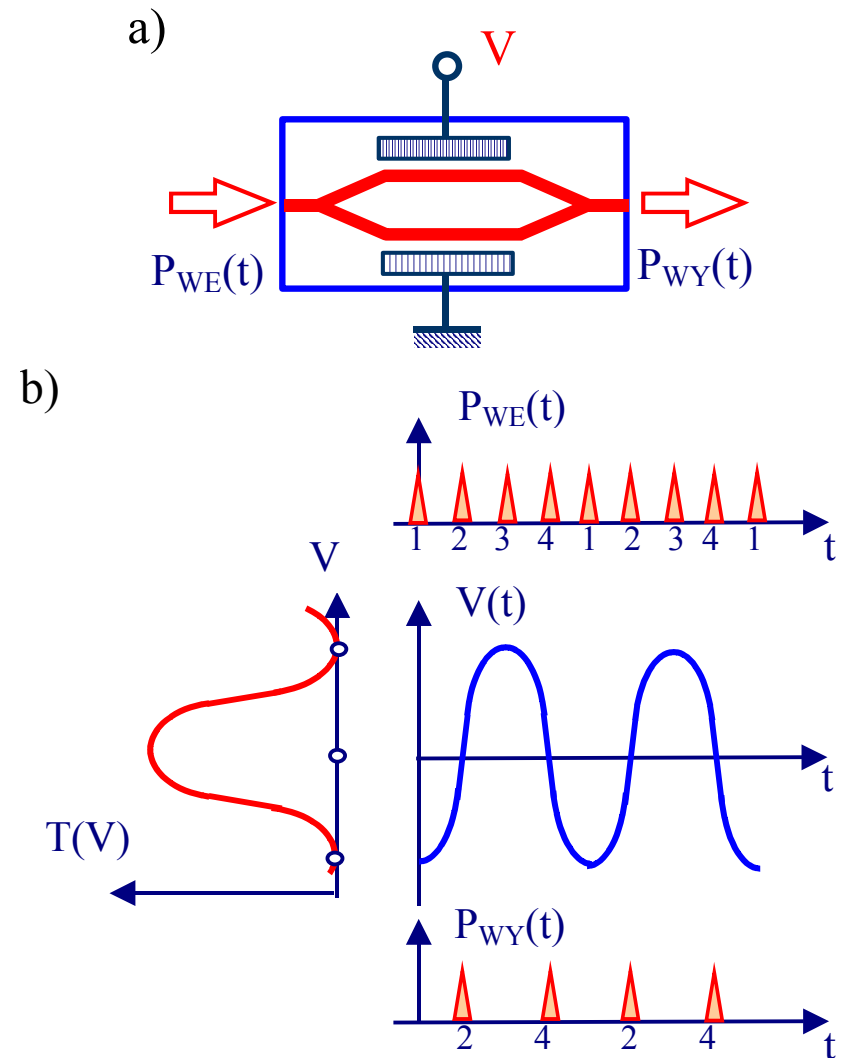


Rys.11.11. Zasada działania elektrooptycznego przełączanego sprzęgacza kierunkowego.
a) Struktura sprzęgacza. b) Charakterystyka przełączania.

11.2. MULTIPLEKSACJA W ... – MODULATOR EO JAKO DEMULTIPLEKSER

- ⇒ Modulator elektrooptyczny oparty na strukturze interferometru Mach-Zender'a może być z powodzeniem wykorzystany jako przełącznik w układach demultiplekserów – rys.11.12.
- ⇒ Napięcie o częstotliwości f i o amplitudzie $2V_\pi$ steruje tłumieniem modulatora.
- ⇒ Do wejścia modulatora przyłożono serię impulsów optycznych, przy czym na 1 okres napięcia sterującego przypadają 4 impulsy.
- ⇒ 2 razy na okres modulator ma tłumienie minimalne a 2 razy na okres tłumienie maksymalne.
- ⇒ Z serii wejściowych impulsów optycznych na wyjściu pojawią się co drugi.

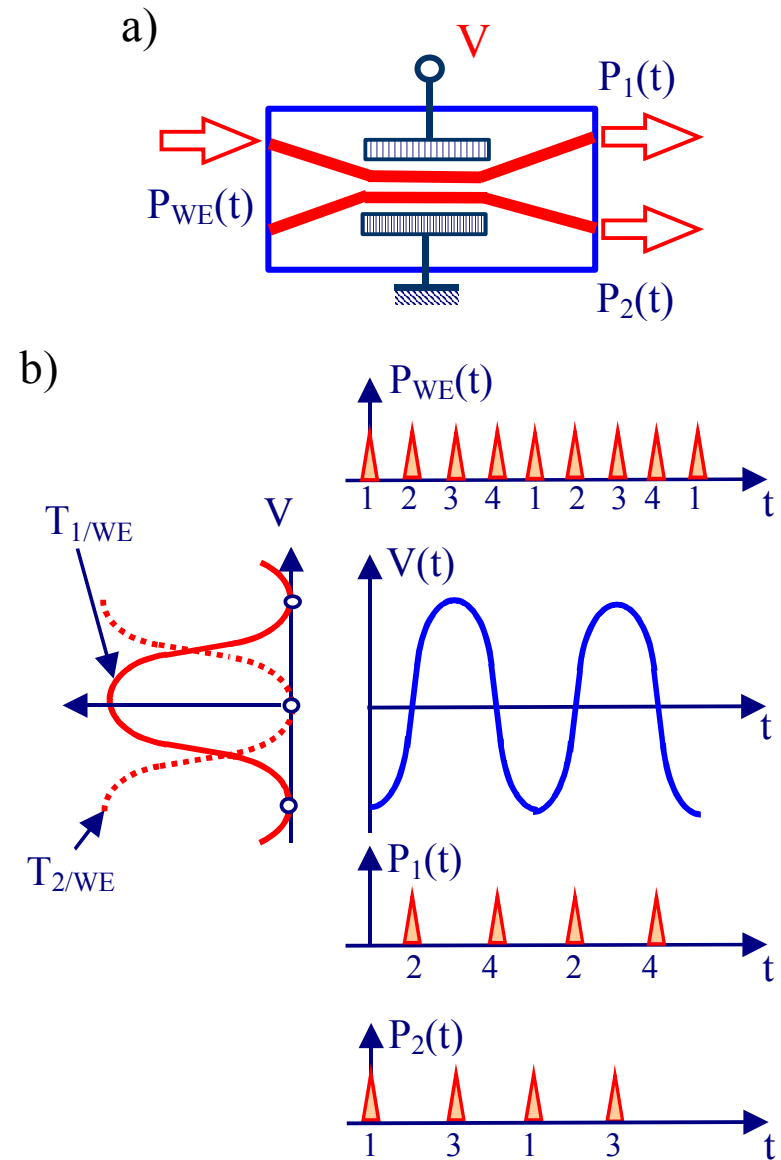
Rys.11.12. Modulator elektrooptyczny Mach-Zender'a selekcjonuje impulsy przepuszczając „co drugi”.



11.2. MULTIPLEKSACJA W ... – SPRZĘGACZ PRZEŁĄCZANY JAKO DEMULTIPLESER

- ⇒ Sprzęgacz przełączany może pracować w układzie demultipleksera – rys.11.13.
- ⇒ Napięcie o częstotliwości f i o amplitudzie $2V_0$ steruje tłumieniem transmisję przełącznika w ten sposób, że 2 razy w okresie optyczna moc wejściowa transmitowana jest do wrót 2, a 2 razy w okresie transmitowana do wrót 1.
- ⇒ Do wejścia modulatora przyłożono serię impulsów optycznych, przy czym na 1 okres napięcia sterującego przypadają 4 impulsy.
- ⇒ W rezultacie sygnał optyczny dzieli się w taki sposób, że we wrotach 1 pojawią się impulsy o numerach 2 i 4, a we wrotach 2 impulsy o numerach 1 i 3.

Rys.11.13. Ilustracja procesu segregacji impulsów przez elektrooptyczny sprzęgacz przełączany.



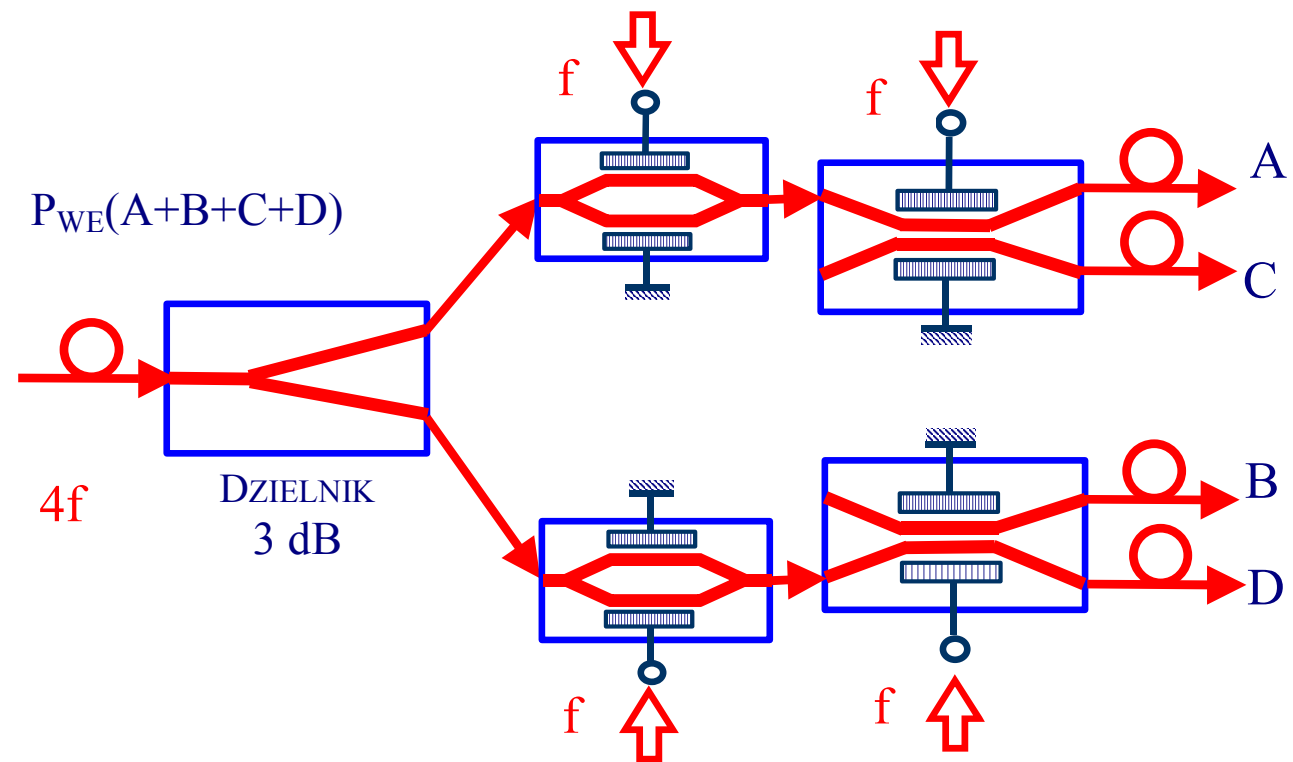
11.2. MULTIPLEKSACJA W ... – DEMULTIPLEKSER OPTYCZNY

⇒ Schemat ideowy demultipleksera optycznego z modulatorami i przełączanymi sprzęgaczami elektrooptycznymi pokazuje rys.11.14.

⇒ Dzielnik wejściowy dzieli moc impulsów optycznych do symetrycznie do obu torów.

⇒ Napięcia sterujące modulatorami M-Z przesunięte są w fazie o $\pi/2$, selekcjonują impulsy wybierając te o numerach A i C oraz B i D.

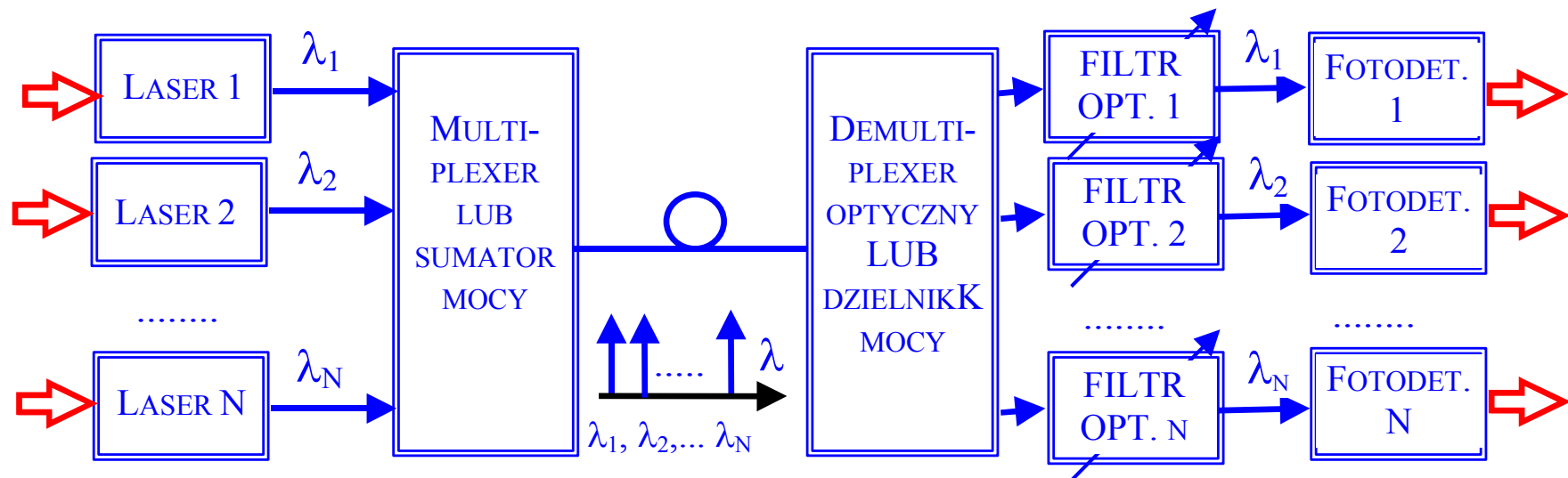
⇒ Sprzęgacze dzielą impulsy do wrót wyjściowych, co drugi. Kończy to proces demultipleksacji.



Rys.11.14. Przykładowa struktura demultipleksera optycznego rozdzielającego impulsy wejściowe do 4 wrót wyjściowych.

11.3. MULTIPLEKSACJA W DZIEDZINIE DŁUGOŚCI FALI I CZĘSTOTLIWOŚCI - IDEA

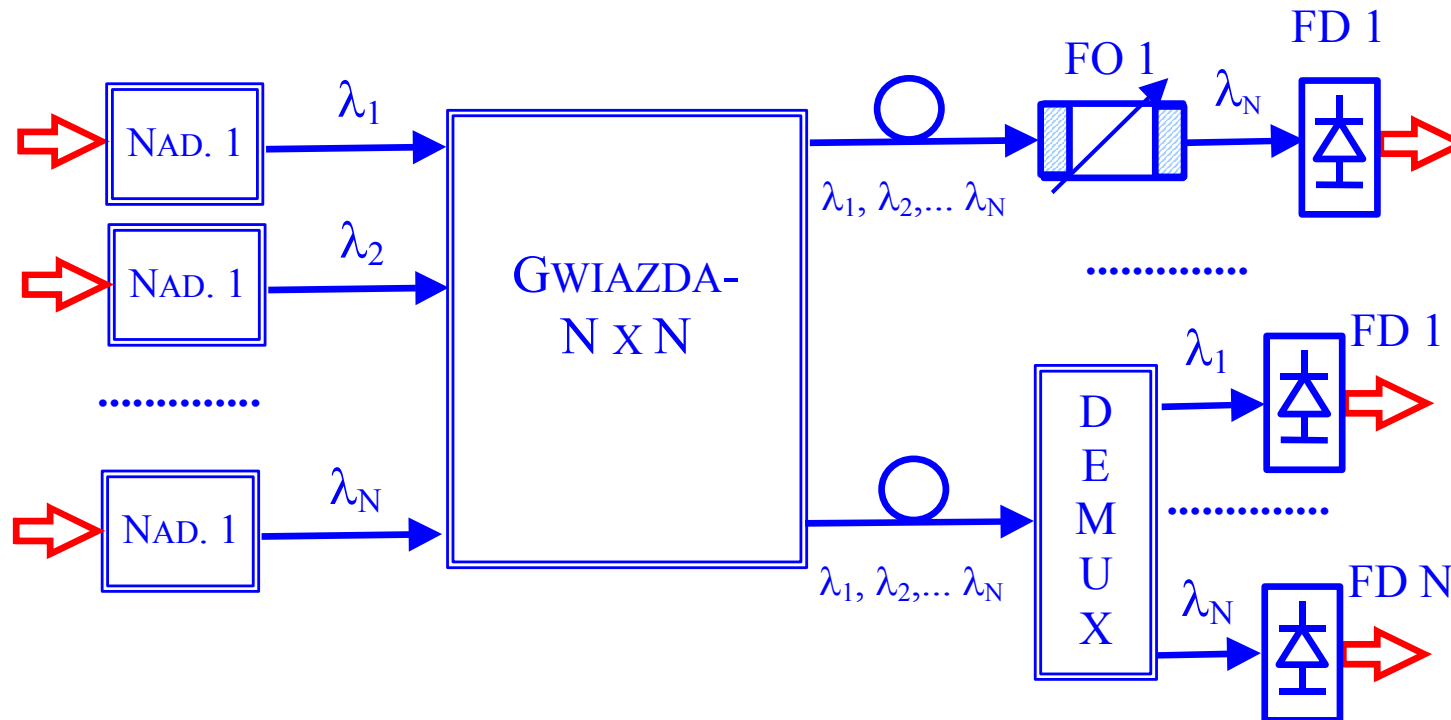
- ⇒ Każdy laser emituje inną długość fali, sygnały po połączeniu transmitowane są światłowodem.
- ⇒ Każdy z laserów modulowany jest oddzielnie, zwykle z wykorzystaniem techniki OTDM
- ⇒ Po stronie odbiorczej sygnały są kierowane do fotodetektorów.
- ⇒ Przed detekcją sygnały są filtrowane przez optyczne filtry.
- ⇒ Dla WDM - $\Delta\lambda \approx 10$ nm, dla DWDM - $\Delta\lambda \approx 1$ nm, dla FDM - $\Delta\lambda \approx 0,1$ nm.
- ⇒ Sieć optyczna WDM może zawierać wzmacniacze optyczne, wzmacniające wszystkie lub tylko niektóre długości fali.



Rys.11.15. Podstawowa struktura układu z multipleksacją WDM, z transmisją „z punktu do punktu”, point-to-point.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – SIEĆ FT-TR

- Sieć z rys.11.16 pozwala docierać z sygnałami z wielu nadajników do wielu odbiorców.
- W punkcie odbioru może pracować jeden odbiornik wykorzystujący informację z jednego tylko kanału, bądź po demultipleksacji pracuje wiele odbiorników dostrojonych do różnych kanałów.



Rys.11.16. Złożona struktura sieci z wieloma punktami nadawania i odbioru. Zwykle nadajniki dostrojone są na stałe, a odbiorniki dostrajane, **FT-TR** fixed-tuned transmitters, tunable receivers.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – LASERY

⇒ Lasery nadajników systemów WDM winny być przestrajane.

⇒ Stosuje się

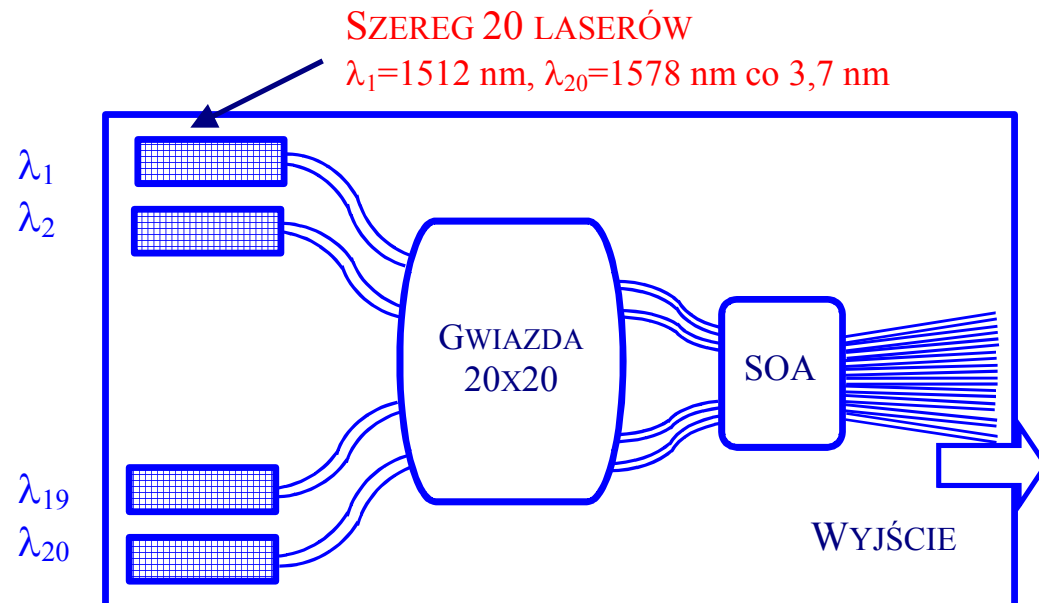
- 3-sekcyjne lasery DBR - *Distributed Bragg Reflector* o pasmie strojenia 5 - 10 nm,
- 2-sekcyjne lasery DFB - *Distributed FeedBack* o pasmie strojenia 2 nm.

⇒ Najlepsze rozwiązanie - wykonany w jednej technologii i na jednym podłożu szereg laserów DFB o parametrach lekko zmieniających się od lasera do lasera i indywidualnie dostrajanych.

⇒ Na jednym podłożu może być wykonany układ sprzęgacza - multipleksera oraz SOA - wzmacniacz półprzewodnikowy.

⇒ Wykonywane są także układy przestrzenne dwuwymiarowe, z większą liczbą laserów.

Rys.11.17. Nadajnik zintegrowany, 20 laserów i 20 wyjść światłowodowych, dodatkowo wzmacniacz SOA.



11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – SPRZĘGACZE (A)

- Sprzęgacze 2 x 2 są ważnymi biernymi elementami optycznymi układów o złożonych funkcjach.
- Sprzęgacze 2 x 2 opisuje się macierzą [C]. Amplitudy a i b związane są natężeniami pola elektrycznego modu podstawowego rozchodzącego się w światłowodach doprowadzających sygnał optyczny do struktury. Moce są proporcjonalne do kwadratów modułów.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \text{ lub } [b] = [C][a]$$

- Gdy sprzęgacz jest bezstratny, to parametry S są ze sobą związane. Np.:

$$C_{12} = C_{21};$$

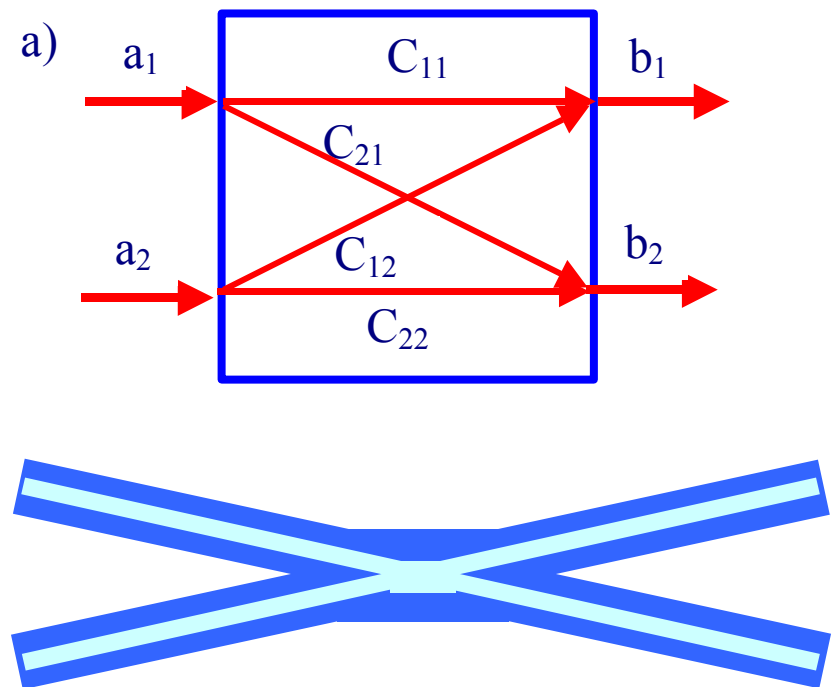
$$|C_{11}|^2 + |C_{12}|^2 = 1;$$

- Przyjmując $C_{11} = \sqrt{1 - \alpha}$ otrzymujemy:

$$[C] = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - \alpha} & j\sqrt{\alpha} \\ j\sqrt{\alpha} & \sqrt{1 - \alpha} \end{bmatrix};$$

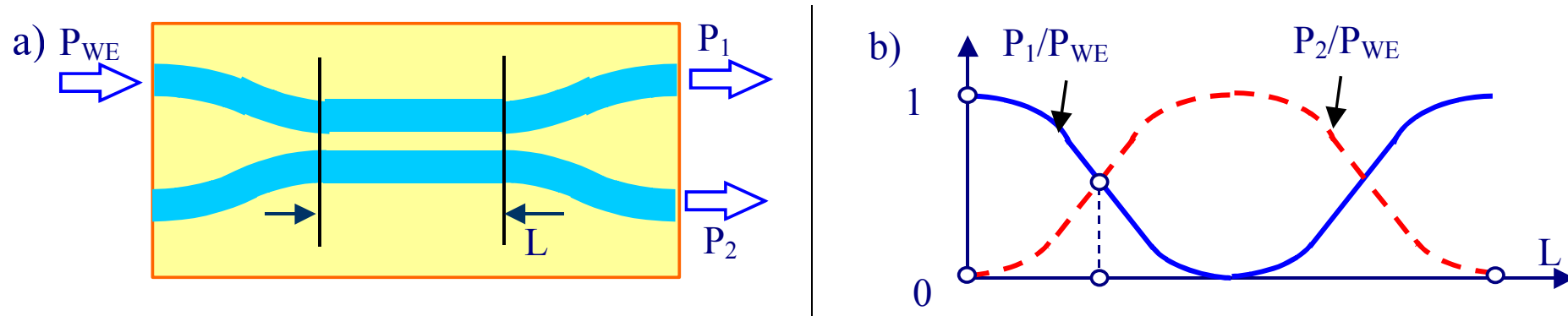
Rys. 11.18. a) Oznaczenia wrót sprzęgacza.

b) Sprzęgacz powstały ze stopienia 2 światłowodów na pewnej długości.



11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – SPRZĘGACZE (B)

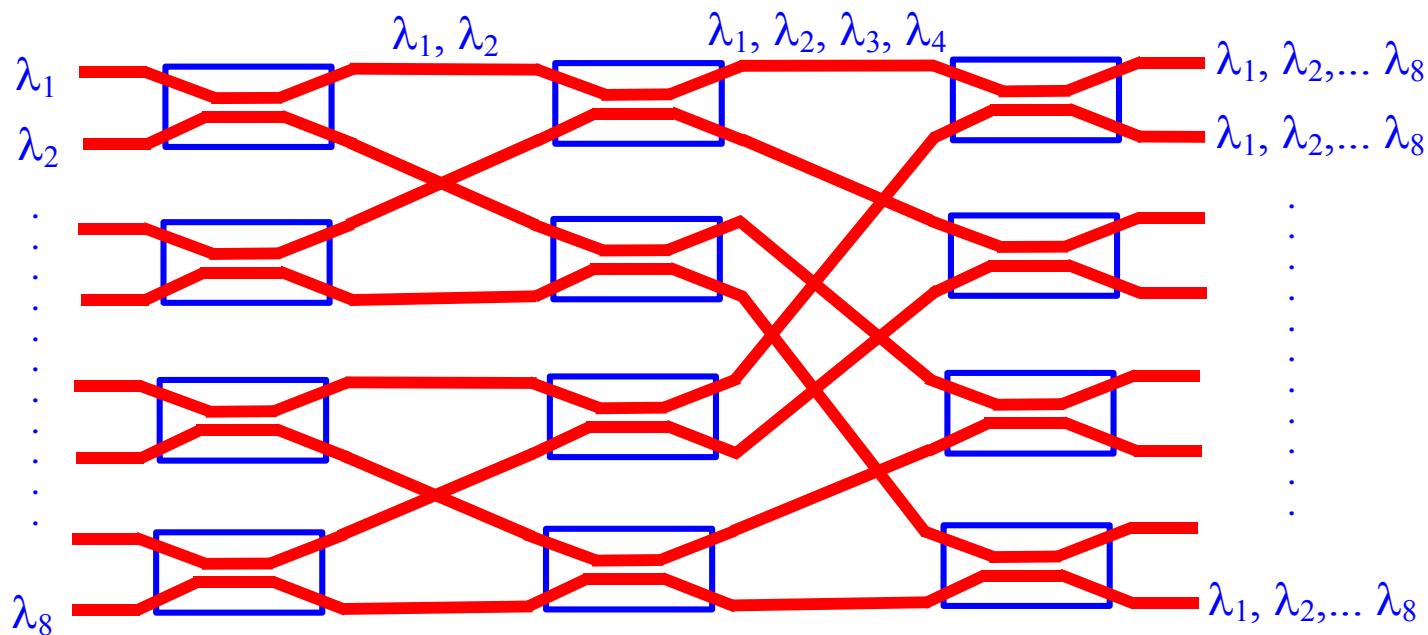
- Gdy $\alpha = 0,5$ otrzymujemy sprzęgacz 3 dB, który spisuje się dobrze jako dzielnik i sumator mocy w rozmaitych układach multiplekserów i demultiplekserów.
- Sprzęgacze planarne z rys.11.19 mają 2 blisko siebie położone światłowody, wzajemnie się pobudzające. Sprzężenie zależy od długości L , na której światłowody przebiegają zbliżone.
- Przy pewnej długości L moc przechodzi całkowicie z toru górnego do dolnego. Efekt ten już opisano i wykorzystano w przełącznikach.
- Przy pewnej długości L moc dzieli się po równo, otrzymujemy sprzęgacz 3 dB.
- *Sprzęgacze w zależności od technologii i użytych typów światłowodów wnoszą straty mocy optycznej do toru, wynoszą one od 0,3 dB do 3 dB.*



Rys.11.19. Sprzęgacz planarny; a) struktura sprzęgacza z dwoma światłowodami planarnymi, b) sprzężenia między światłowodami są funkcją długości L , na której światłowody pobudzają się wzajemnie.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – MULTIPLEKSER – GWIAZDA 8 x 8

- System transmisyjny z rys.11.16 wymaga użycia gwiazdy N x N.
- W oparciu o elementarny sprzęgacz 3 dB 2 x 2 można budować bardziej złożone struktury, takie jak 4 x 4, potrzeba na to 4 sprzęgacze, lub 8 x 8 z wykorzystaniem 12 elementarnych sprzęgaczy – co pokazuje rys.11.20.
- Istnieje możliwość budowy innych struktur, takich jak sprzęgacze 1 x N, lub N x M.



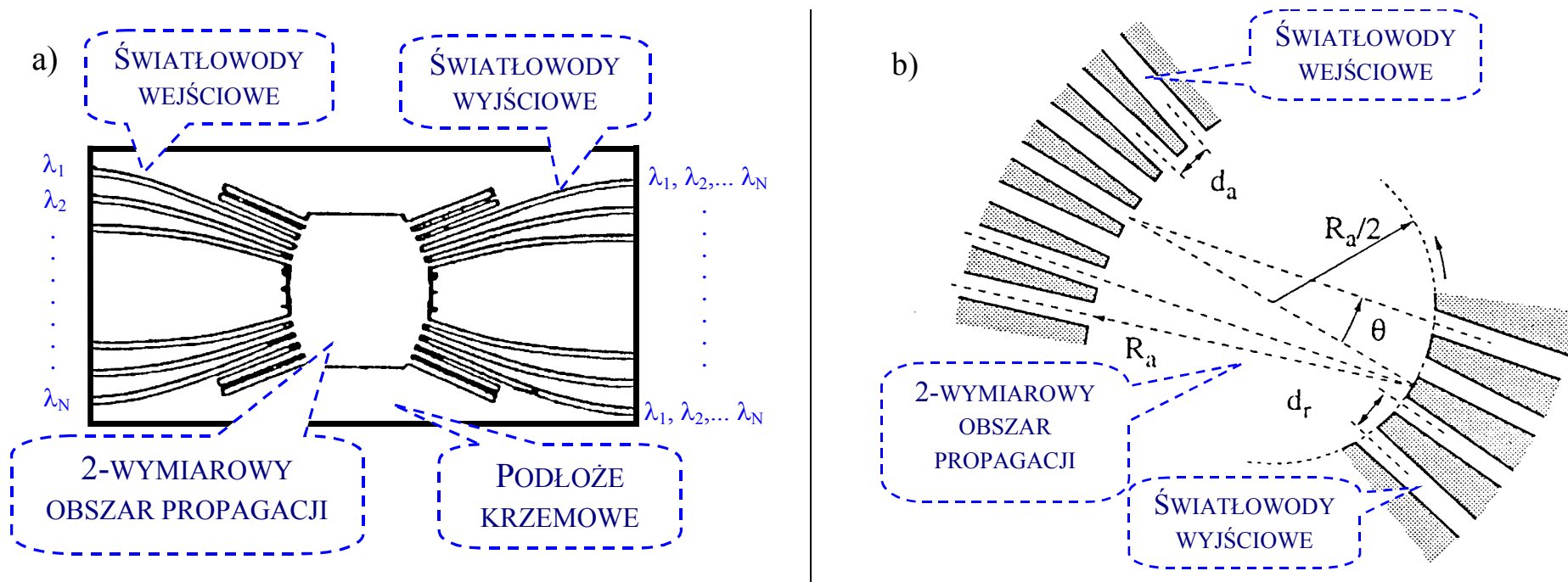
Rys.11.20. Struktura gwiazdy 8 x 8 złożona ze sprzęgaczy 3 dB 2 x 2.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – ZINTEGROWANY MULTIPLEKSER PLANARNY

⇒ W systemach o strukturze gwiazdy ważną rolę spełniają planarne sprzęgacze zintegrowane.

⇒ N planarnych światłowodów doprowadza sygnały do obszaru wolnej przestrzeni, z którym sprzężono kolejnych N planarnych światłowodów. Układ taki może być traktowany jako 2N-wrotnik odwracalny.

⇒ Dobrze funkcjonujące rozwiązanie ma 20 x 20 wrót wejściowych światłowodów.



Rys.11.21. Zintegrowany planarny sprzęgacz o strukturze gwiazdy; a) struktura planarnego sprzęgacza zintegrowanego, b) struktura dwuwymiarowego falowodu planarnego.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – FILTRY OPTYCZNE

- ⇒ Zasada działania systemów WDM wymaga stosowania filtrów optycznych strojonych w układach selektywnych odbiorników i demultiplekserów.
- ⇒ Poza selekcją wybranej długości fali filtry usuwają szumy spontanicznej emisji wzmacniaczy.
- ⇒ Wymagania stawiane filtrom optycznym są wysokie i związane są z następującymi parametrami:
- Zakres przestrajania $\Delta\lambda$, powinien być możliwie szeroki.
 - Maksymalna liczba detekowalnych kanałów w pasmie przestrajania filtru. Parametr ten związany jest z szerokością krzywej transmisji, ma zapewnić minimalny poziom przesłuchów między kanałami.
 - Prędkość przestrajania z kanału na kanał.
 - Tłumienie filtru, powinno być jak najmniejsze w kanale transmisji.
 - Stabilność parametrów filtru, wrażliwość na zmiany temperatury, procesu stażenia.
- ⇒ Popularnym rozwiązaniem są filtry z rezonatorami Fabry-Perot z 2 zwierciadłami – rys.11.22.
- ⇒ Ośrodkiem propagacji może być półprzewodnik, ciekły kryształ, światłowód.
- ⇒ Rezonatory Fabry-Perot analizowane były dla potrzeb laserów i wzmacniaczy optycznych.
- ⇒ Sygnał optyczny o natężeniu pola E_i kierowany jest do obszaru aktywnego przez półprzepuszczalne obszary o współczynniku transmisji t i współczynniku odbicia r .

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – FILTRY Z REZONATOREM FABRY-PEROT (A)

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

⇒ Oznaczając dla transmisji: $t^2 = T$; dalej dla odbicia $r^2 = R$; otrzymujemy:

$$R + T = 1;$$

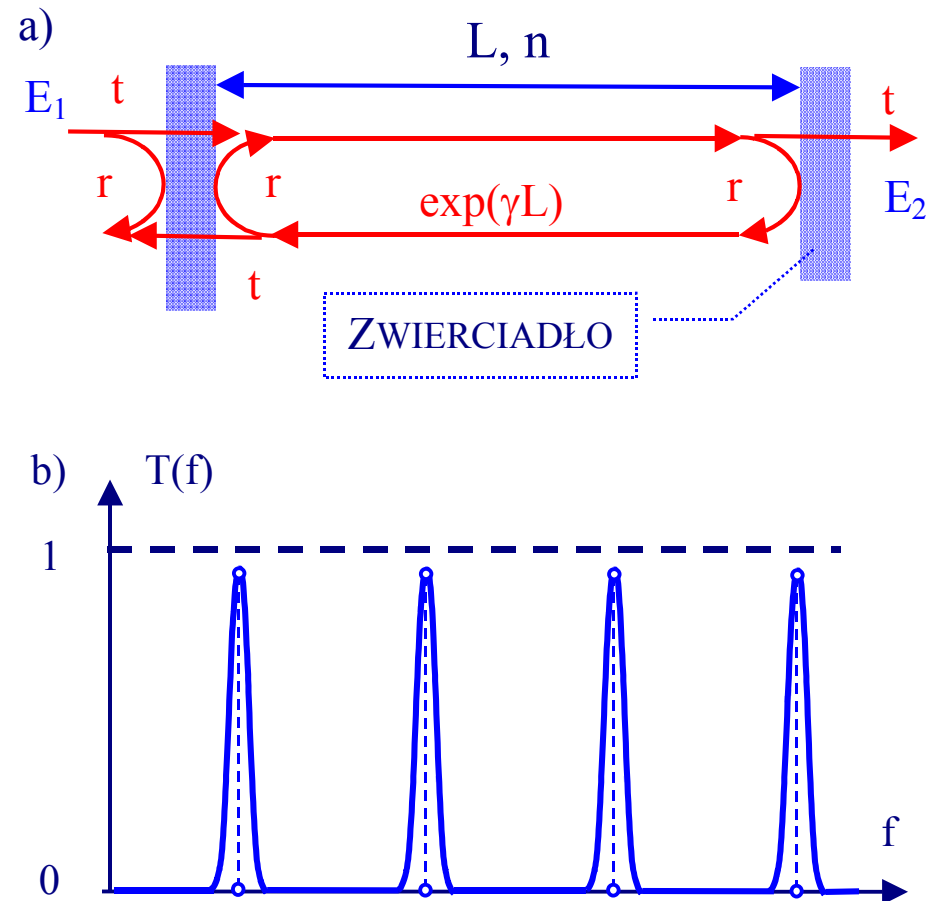
⇒ Warunek rezonansu jest oczywisty:

$$L = \frac{m\lambda_f}{2n}; \quad m = 1, 2, 3 \dots 101 \dots$$

⇒ Transmisja w rezonansie (A – tłumienie, c – prędkość światła, f_0 – częstotliwość rezonansu):

$$T_{\text{RFP}}(f) = \frac{A(1-R)^2}{(1-AR)^2 + 4AR \sin^2 \left[\frac{2\pi(f-f_0)L}{c} \right]}$$

Rys.11.22. Rezonator Fabry-Perot jako filtr;
a) oznaczenia i wymiary,
b) charakterystyki transmisji filtru



11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – FILTRY Z REZONATOREM FABRY-PEROT (B)

⇒ Zakres przestrajania między rezonansami
FSR – free spectral range:

$$\text{FSR} = \frac{c}{2nL};$$

⇒ Pasma 3 dB **FWHM - full-width at half maximum:**

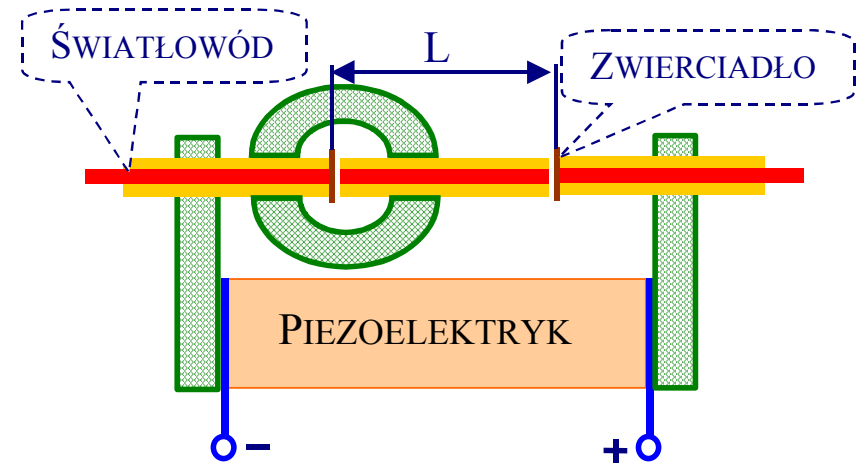
$$\Delta f_{3\text{dB}} = \frac{c(1-R)}{2\pi n\sqrt{R}};$$

⇒ Ilość kanałów, które mogą być dostrojone określa parametr **F - finesse:**

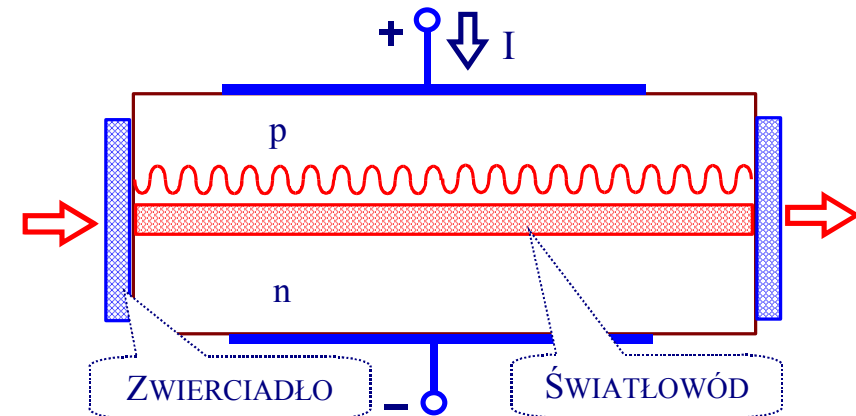
$$F = \frac{\text{FSR}}{\Delta f_{3\text{dB}}} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = 20\dots 100;$$

⇒ Działanie filtrów z rys.11.23 i rys.11.24 jest czytelne.

⇒ Czas przestrajania dla filtru piezoelektrycznego jest rzędu milisekund, dla półprzewodnikowego bardzo krótki, rzędu nanosekund.



Rys.11.23. Filtr F-P ze światłowodem, przestrajany elektrycznie.



Rys.11.24. Filtr półprzewodnikowy z siatką Bragg'a, przestrajany prądem.

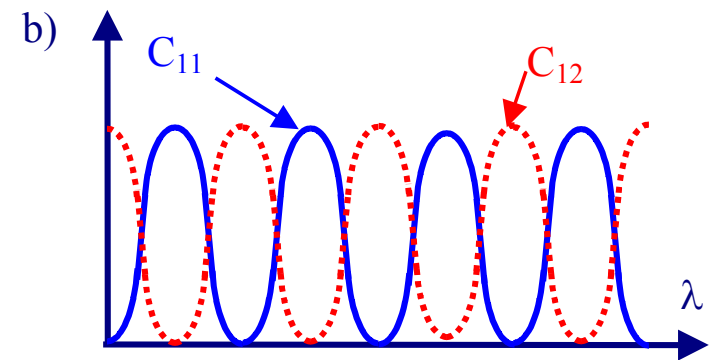
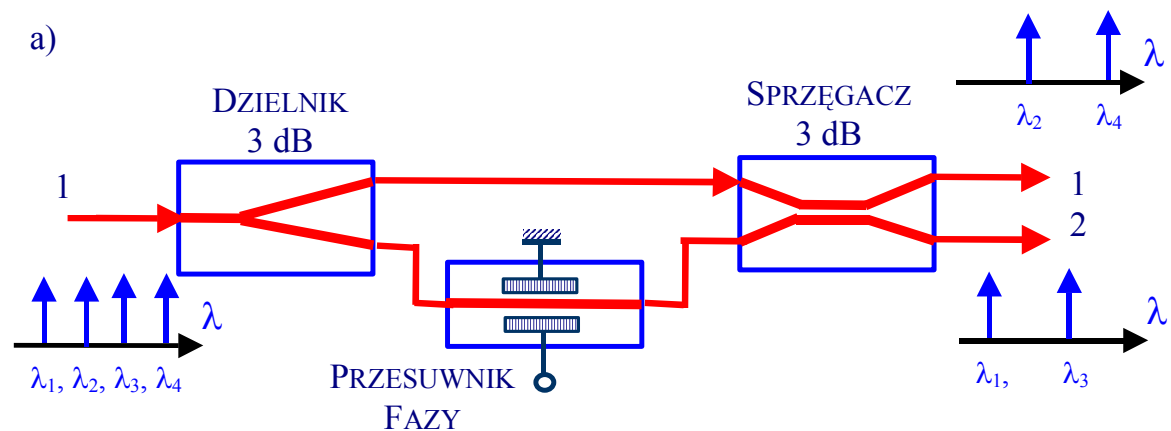
11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – FILTRY Z INTERFEROMETREM MACH-ZEHNDER’A

⇒ Filtr optyczny z interferometrem Mach-Zehnder’a zawiera dzielnik mocy i układ 2 torów o różnych długościach i przesunięciach fazy. Do ramion wyjściowego sprzęgacza 3 dB dochodzą sygnały optyczne o różnicy faz zależnej od częstotliwości. W ramionach wyjściowych 1 i 2 znikają sygnały o pewnych długościach fali.

⇒ Aby rozdzielić sygnały λ_1 od λ_3 można użyć kolejny filtr M-Z. Tak powstaje demultiplekser.

⇒ W jednym z ramion można umieścić elektrooptyczny przesuwnik fazy, albo odcinek światłowodu na podgrzewanym podłożu.

⇒ Selektywność filtrów z interferometrem M-Z nie jest duża, można ją poprawić łącząc filtry łańcuchowo.



Rys.11.25. Filtr optyczny z interferometrem Mach-Zehnder’a. a) Podstawowe elementy filtru i struktura układu; b) Transmisje C_{11} i C_{12} między wrotami wejściowymi a wyjściowymi

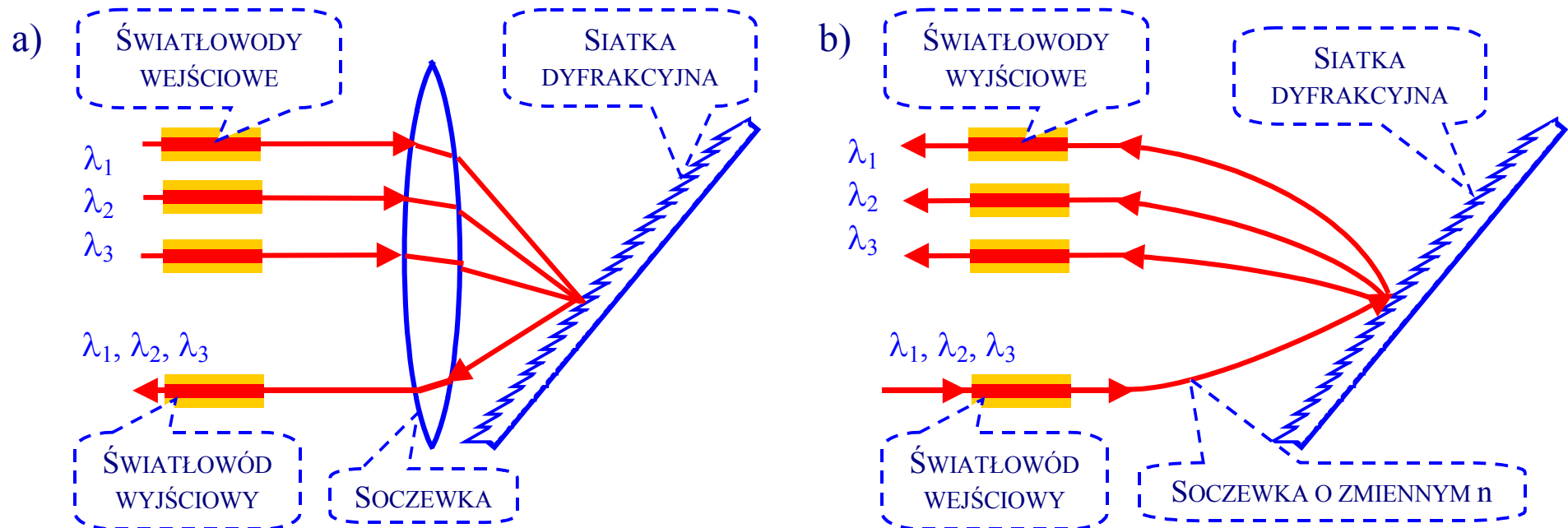
11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – UKŁADY Z SIATKĄ DYFRAKCYJNĄ

⇒ Multiplexery i demultiplexery mogą być konstruowane w oparciu o siatki dyfrakcyjne.

⇒ Na rys.11.26a N planarnych światłowodów prowadzących sygnały o różnej długości fali oświetla siatkę dyfrakcyjną. Kąt odbicia zależy od długości fali padającego promieniowania. Struktura jest tak dobrana, aby wszystkie sygnały po odbiciu trafiły do wspólnego wyjściowego światłowodu.

⇒ Układ jest odwracalny. Jego działanie jako demultiplexera pokazano na rys.11.26b.

⇒ Zastosowano tutaj specjalny typ soczewki ze stopniowaniem współczynnika załamania.

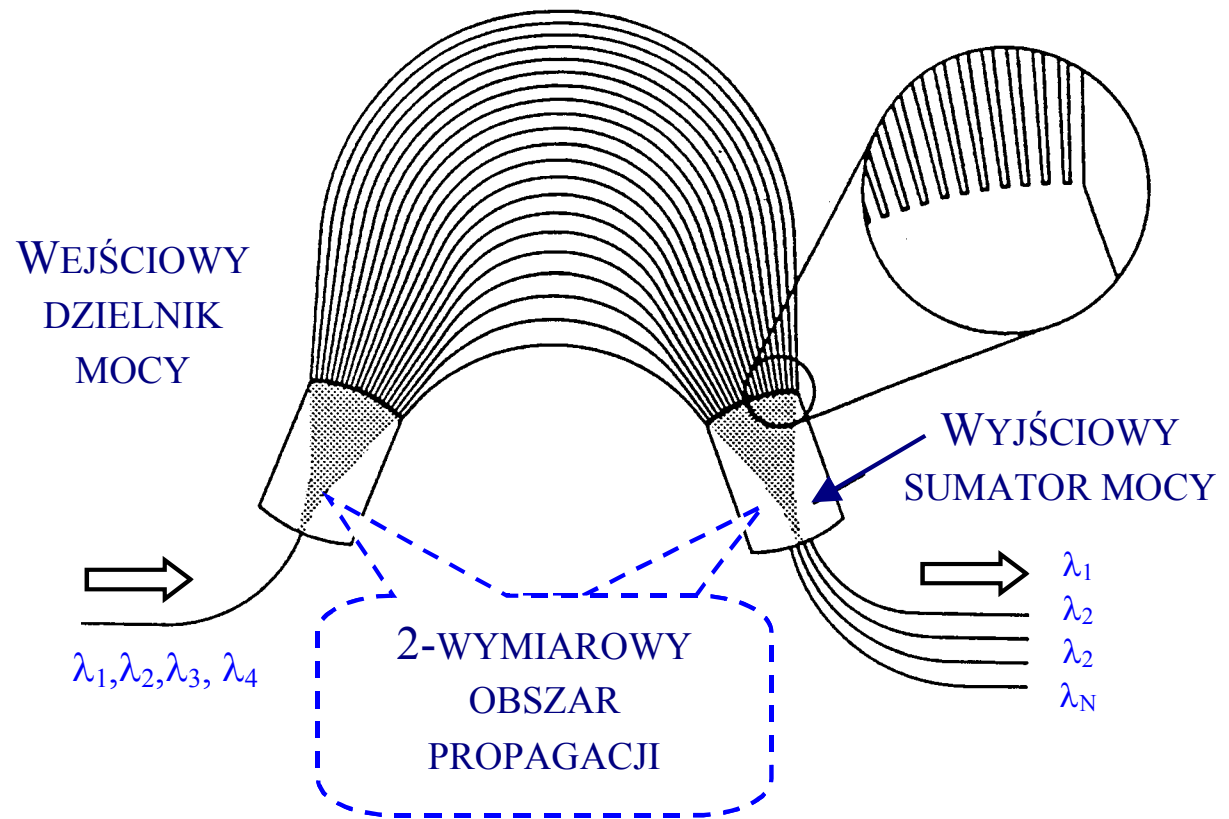


Rys.11.26. Zasada działania multiplexera a) i demultiplexera b) z siatką dyfrakcyjną.

11.3. MULTIPLEKSACJA WDM – ZINTEGROWANY DEMULTIPLEKSER PLANARNY

- ⇒ Układ 2 sprzęgaczy planarnych w formie gwiazdy odpowiednio połączonych tworzy nowy typ sprzęgacza, który pracuje jako demultiplekser, PHASAR.
- ⇒ Między sprzęgaczami układ planarnych ścieżek-prowadnic o różnych długościach.
- ⇒ Sprzęgacz "1" jest dzielnikiem mocy..
- ⇒ Układ ścieżek o różnych długościach różnicuje fazy docierających do sprzęgacza "2" sygnałów. Pozwala to na selektywne pobudzania wrót wyjściowych.
- ⇒ Układ zwany jest „*frequency router*”, - dyspozytor częstotliwości (?).

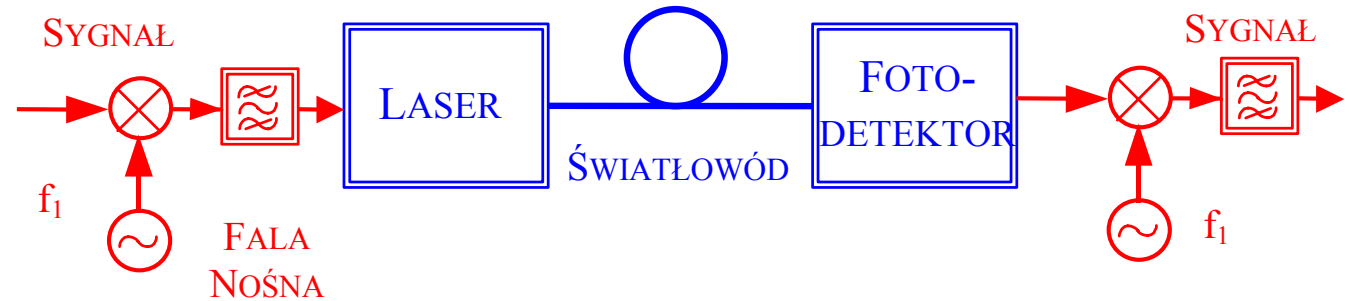
Rys.11.27. Układ demultipleksera z dzielnikiem mocy, światłowodami i sumatorem mocy.



11.4. MULTIPLEKSACJA NA MIKROFALOWYCH CZĘSTOTLIWOŚCIACH PODNOŚNYCH

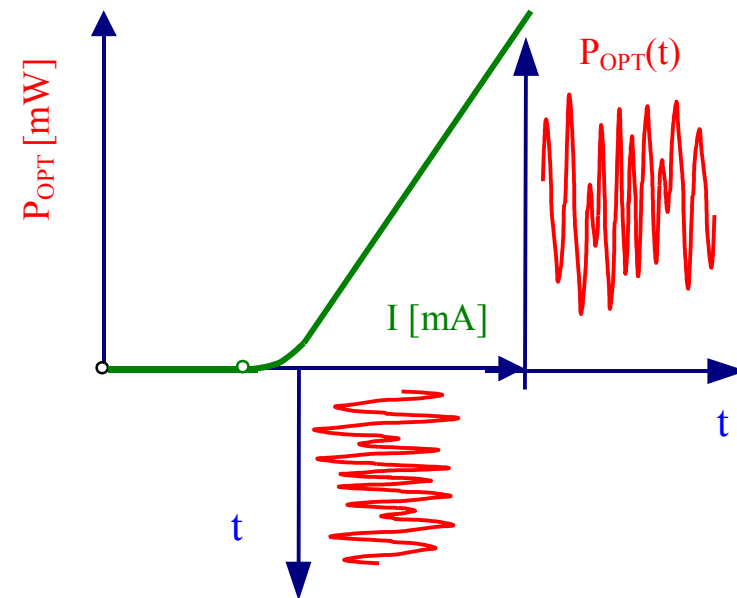
- Modulacja na mikrofalowych częstotliwościach podnośnych **SCM- SubCarrier Multiplexing** jest modulacją analogową.

Rys.11.28. Transmisja sygnału łączem optycznym z modulacją fali nośnej o częstotliwości mikrofalowej



- Sygnałem takim można zmodulować bezpośrednio laser, lub też wprowadzić do modulatora zewnętrznego.
- Wykorzystywana do transmisji analogowych sygnałów czujników i w sieciach CATV

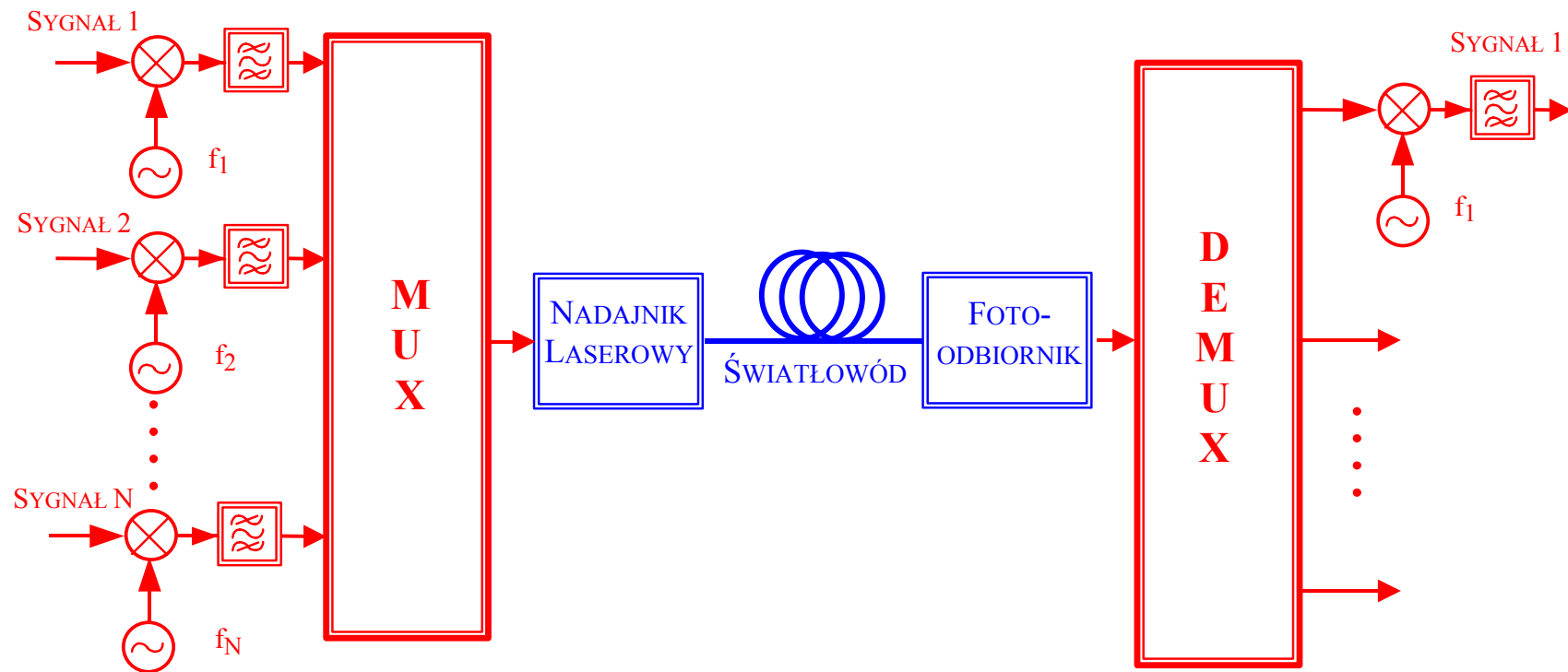
Rys.11.29. Bezpośrednia modulacja mocy wyjściowej lasera sygnałem elektrycznym



11.4. MULTIPLEKSACJA SCM – PODSTAWOWY SCHEMAT UKŁADU

- W sieciach CATV wykorzystuje się kilkadziesiąt częstotliwości nośnych modulowanych sygnałem wizji i fonii.
- Moc optyczna nadajnika:

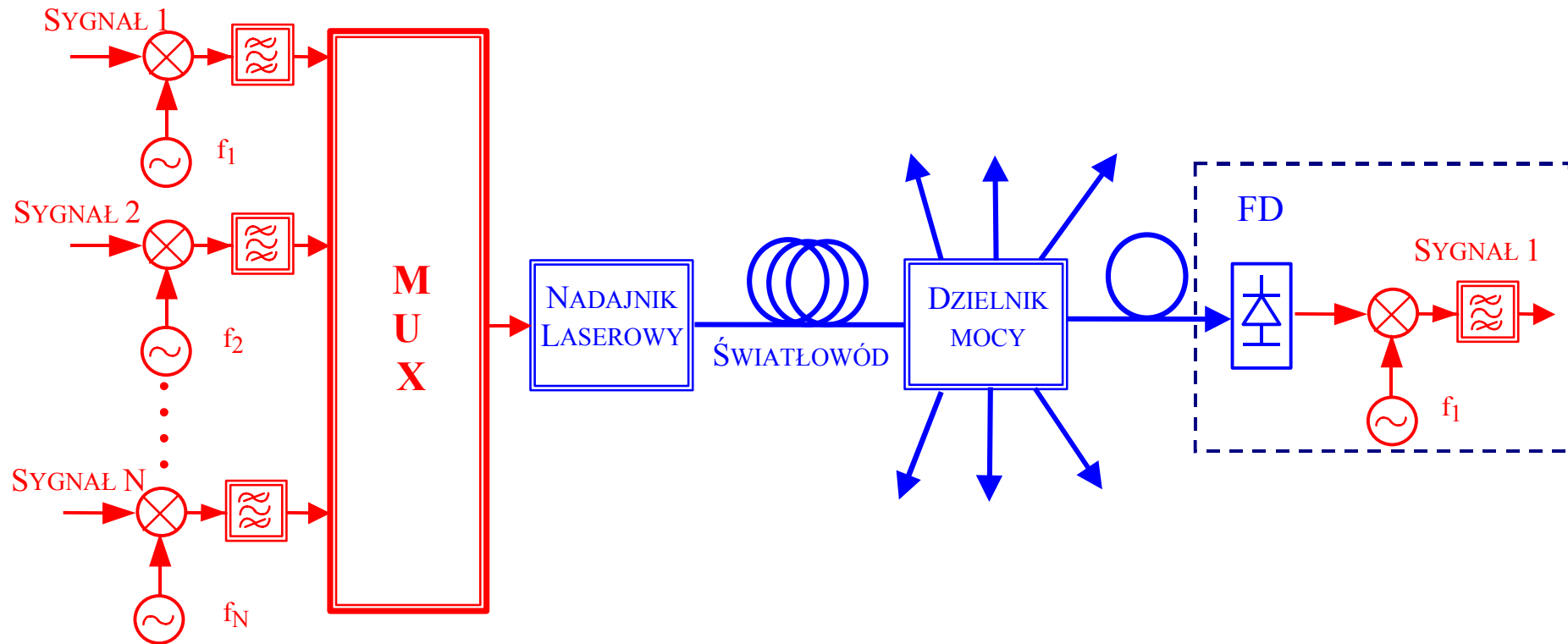
$$P_{\text{OPT}}(t) = P_0 \left[1 + \sum_{j=1}^N m_j a_j \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \right];$$



Rys.11.30. Schemat ideowy układu z multipleksacją SCM, w systemie IM-DD Intensity-Modulation Direct-Detection.

11.4. MULTIPLEKSACJA SCM – SIEĆ Z SYSTEMEM SCM

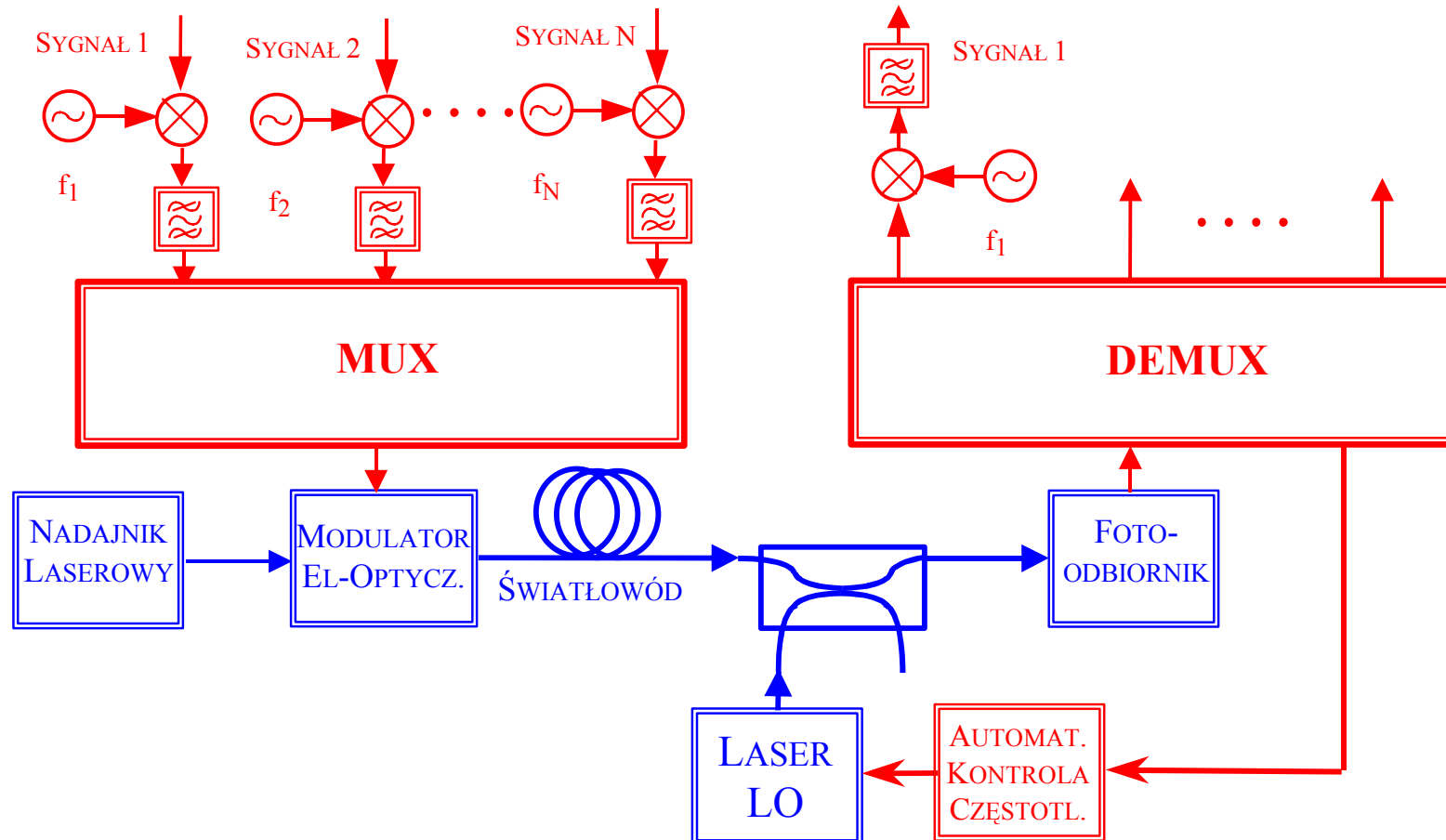
- Systemy z multipleksacją SCM nadają się dobrze do wykorzystania w sieciach dostępowych z wieloma użytkownikami. Układ z gwiazdą jest tutaj wyjątkowo skuteczny.



Rys.11.31. Struktura sieci dostępowej z gwiazdą przekazującą sygnały optyczne do wielu użytkowników.

11.4. MULTIPLEKSACJA SCM – ODBIÓR KOHERENTNY

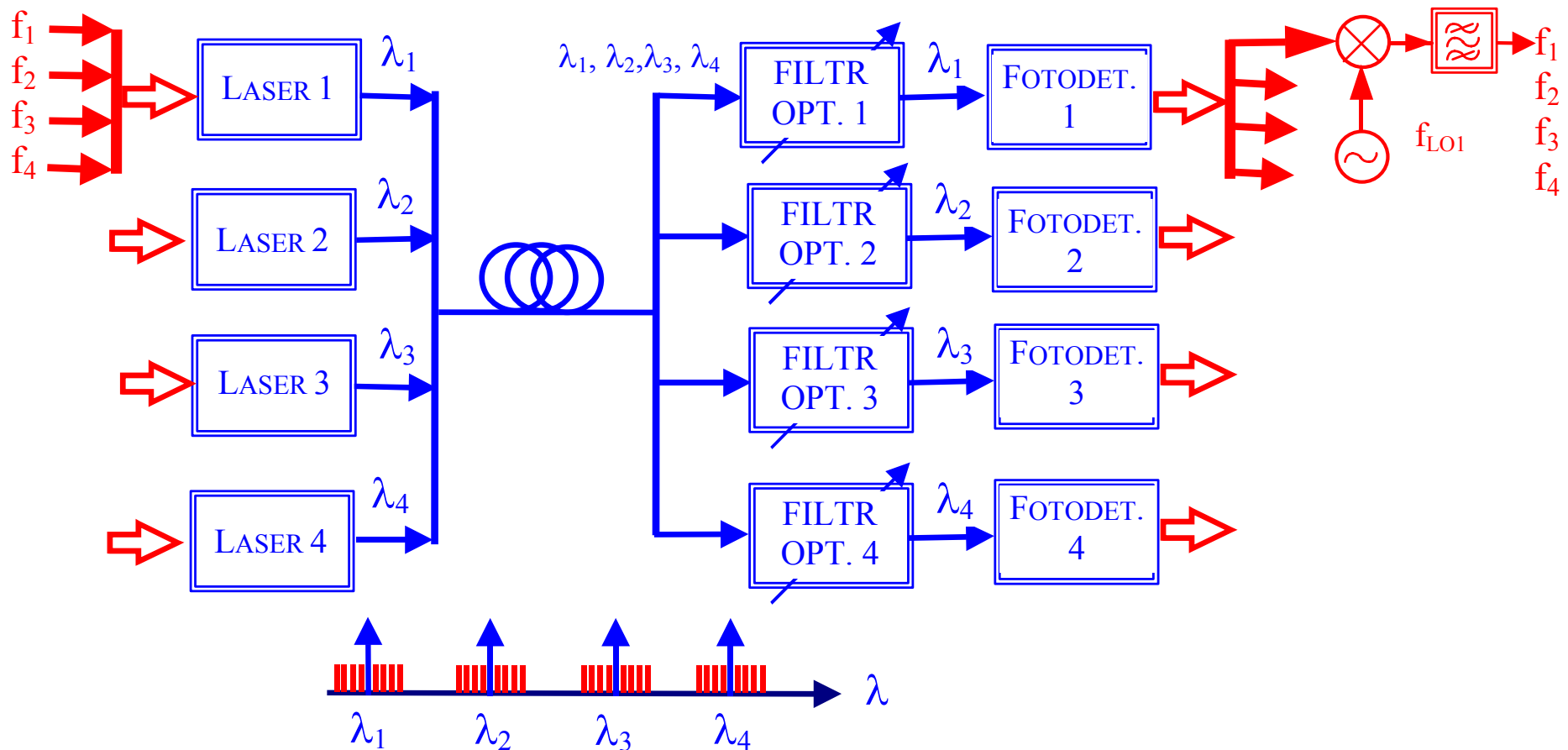
- Zasięg transmisji rośnie, gdy zastosuje się odbiór koherentny, rośnie wtedy czułość odbiornika.
- Aby ustabilizować częstotliwość nadajnika stosuje się zwykle modulację zewnętrzną.



Rys.11.32. Schemat ideowy łącza z multipleksacją SCM i odbiorem koherentnym.

11.4. MULTIPLEKSACJA SCM – W POŁĄCZENIU Z WDM

- Możliwym jest połączenie multipleksacji typu SCM i WDM w jednym systemie. System taki stwarza duże możliwości transmisji rozmaitych informacji.



Rys.11.33. Ideowy schemat blokowy łącza optycznego wykorzystującego multipleksację na podnośnych SCM i jednoczesną transmisję 4 długości fali (WDM),

11.4. MULTIPLEKSACJA SCM – WADY I ZALETY

- **Zalety:**

- Obróbka sygnałów odbywa się na drodze elektrycznej, zarówno po stronie nadawczej, jak i odbiorczej; techniki te są dobrze rozwinięte i znane, a elementy tanie.
- Wiele kanałów transmisji, co w połączeniu z małą tłumiennością światłowodów umożliwia wykorzystanie w sieciach CATV.
- W rozmaitych kanałach można stosować rozmaite techniki modulacji podnośnych: analogowe i cyfrowe, binarne i wielostanowe.

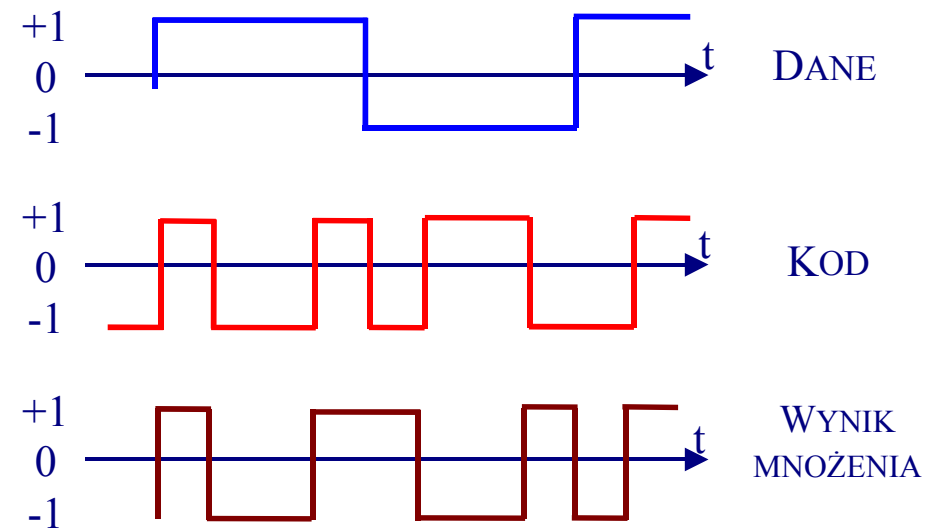
- **Wady:**

- Ograniczone pasmo kanału ogranicza szybkość transmisji w kanale.
- Stałe problemy z przesłuchami między kanałami i zniekształceniami intermodulacyjnymi.
- Konieczność ograniczenia efektów intermodulacji zmusza do:
 - ✓ zmniejszenia indeksu modulacji,
 - ✓ zmniejszenia mocy wyjściowej nadajników laserowych.

11.5. MULTIPLEKSACJA KODOWA – ZASADA DZIAŁANIE CDM

- Sygnał niosący informację splotany jest w nadajniku z sygnałem kodu, pseudoprzypadkowym. Widmo transmitowanego sygnału ulega przez to znacznemu poszerzeniu (*spread spectrum*).
- Sygnał transmitowany nie zawiera informacji o adresacie, dociera do każdego odbiornika.
- Nadajnik i odbiornik każdego kanału mają swój własny kod, koder i dekodek są do siebie dopasowane. Odbiornik rozpoznaje transmitowany do niego sygnał w trakcie synchronicznego dekodowania. W przypadku niezgodności kodów do odbiornika dochodzi ciąg pseudoprzypadkowych sygnałów o małej mocy poniżej wartości progowej.
- Zwielokrotnianie kodowe **CDM – code division multiplexing** może być dokonywana na drodze elektrycznej, lub optycznej **OCDM – optical code division multiplexing**.
- Multipleksacja CDM „nie oszczędza pasma i mocy”.
- Odmianą kodowania jest system ze **skaczącą nośną HF – frequency hopping**, częstotliwość nośna zmieniana jest w sposób pseudoprzypadkowy.

*Rys.11.34. Mnożenie danych przez kod;
wynik mnożenia jest transmitowany.*



11.5. PODSUMOWANIE

- Ogromne pasmo transmisji światłowodem i stałe dążenie do poszerzenia jego wykorzystywanej części uwarunkowane jest rozwojem technik multipleksacji informacji.
- Stosowanie multipleksacji w dziedzinie czasu TDM, jest oczywistą koniecznością. Wydaje się, że sieci z transmisją typu ATM, gdzie transmitowane są pakiety adresowanych bitów, będą stosowane coraz powszechniej.
- Multipleksacja w dziedzinie czasu wykorzystująca techniki optyczne jest bardzo pociągająca z punktu widzenia parametrów, jednakże jest bardzo trudna w realizacji.
- Multipleksacja w dziedzinie długości fali WDM i DWM będą powszechnie stosowane. Droga postępu, to opanowanie technologii laserów o coraz lepszych widmach, łatwo przestrajalnych i przez to umożliwiających prostą stabilizację częstotliwości nośnych.
- Wielką zaletą transmisji koherentnej jest łatwość filtracji sygnału optycznego z multipleksacją DWDM lub FDM. Technika przestrajania, kontroli i stabilizacji częstotliwości nie jest jednakże opanowana na tyle, aby wyjść poza sferę eksperymentów.
- Większe prędkości transmisji skłaniają do transmisji coraz bardziej złożonych sygnałów, stała tendencja do „oszczędzania pasma” zaczyna zanikać.