



# TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

## 6. Modulatory optyczne

### *Spis treści:*

- 6.1. Wprowadzenie
- 6.2. Modulacja bezpośrednia lasera
  - ✓ Modulacja amplitudy
  - ✓ Modulacja częstotliwości
- 6.3. Modulatory elektrooptyczne
- 6.4. Modulatory elektroabsorpcyjne
- 6.5. Modulatory akustooptyczne
- 6.6. Podsumowanie

## 6.1. WPROWADZENIE - PODSTAWOWE DEFINICJE (A)

- × *Fala nośna* - sygnał poddawany modulacji,
  - × *Fala modulująca* - sygnał zawierający informację, użyty do kontroli fali nośnej,
  - × *Fala zmodulowana* - końcowy efekt procesu modulacji fali nośnej przez falę modulującą, przesyłana od nadajnika do odbiornika.
- ⇒ **Sposoby modulacji:**
- ✓ Modulacja bezpośrednia: poprzez zmianę warunków zasilania lasera - źródła promieniowania,
  - ✓ Modulacja zewnętrzna: odbywa się poza laserem, sygnał jest transmitowany przez modulator i zmienia swoje parametry.
- ⇒ **Co modulujemy?**
- ✓ Modulacja pola,
  - ✓ Modulacja mocy.
- ⇒ **Rodzaje modulacji:**
- ✓ Modulacja amplitudy: Dla sinusoidalnej modulacji amplitudy otrzymujemy:  
$$E(t) = E_0(1 + m \cos 2\pi ft) \sin(2\pi Ft + \phi);$$

## 6.1. WPROWADZENIE - PODSTAWOWE DEFINICJE (B)

- Po rozłożeniu wyrażenia otrzymujemy składniki odpowiadające fali nośnej i wstęgom górnej i dolnej

$$E(t) = E_0 \sin(2\pi Ft + \phi) + \frac{E_0 m}{2} \sin[2\pi(F + f)t + \phi] + \frac{E_0 m}{2} \sin[2\pi(F - f)t + \phi];$$

### ✓ Modulacja kąta,

- Modulacja częstotliwości i modulacja fazy należą do tzw. modulacji kąta:

$$E(t) = E_0 \sin[\theta(t)];$$

- tutaj  $E_0 = \text{const.}$ , modulowany jest kąt  $\theta(t)$

- Częstotliwość chwilowa

$$f_{\text{CHWILOWA}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt};$$

- Wyróżniamy:
  - **Modulację częstotliwości,**
  - **Modulację fazy,**

- W przypadku modulacji częstotliwości częstotliwość chwilowa

$$f_{\text{CHWILOWA}}(t) = f(t) = F + \Delta F \cos 2\pi ft$$

## 6.1. WPROWADZENIE - PODSTAWOWE DEFINICJE (C)

- Zapisując dokładniej dla sinusoidalnej modulacji częstotliwości:

$$E(t) = E_0 \sin\left(2\pi Ft + \frac{\Delta F}{f} \sin 2\pi ft + \phi_0\right);$$

-  $\Delta F \approx U_m$  - szczytowa dewiacja częstotliwości,

- W przypadku modulacji fazy:

$$E(t) = E_0 \sin[\theta(t)] = E_0 \sin[2\pi Ft + (\phi_0 + \Delta\phi \cos 2\pi ft)];$$

- tutaj  $\Delta\phi$  - dewiacja fazy.

- Faza  $\phi$ , która dla fali nośnej równa jest  $\phi_0$ , modulowana jest proporcjonalnie do amplitudy B sygnału modulującego:

$$\Delta\phi \approx U_m;$$

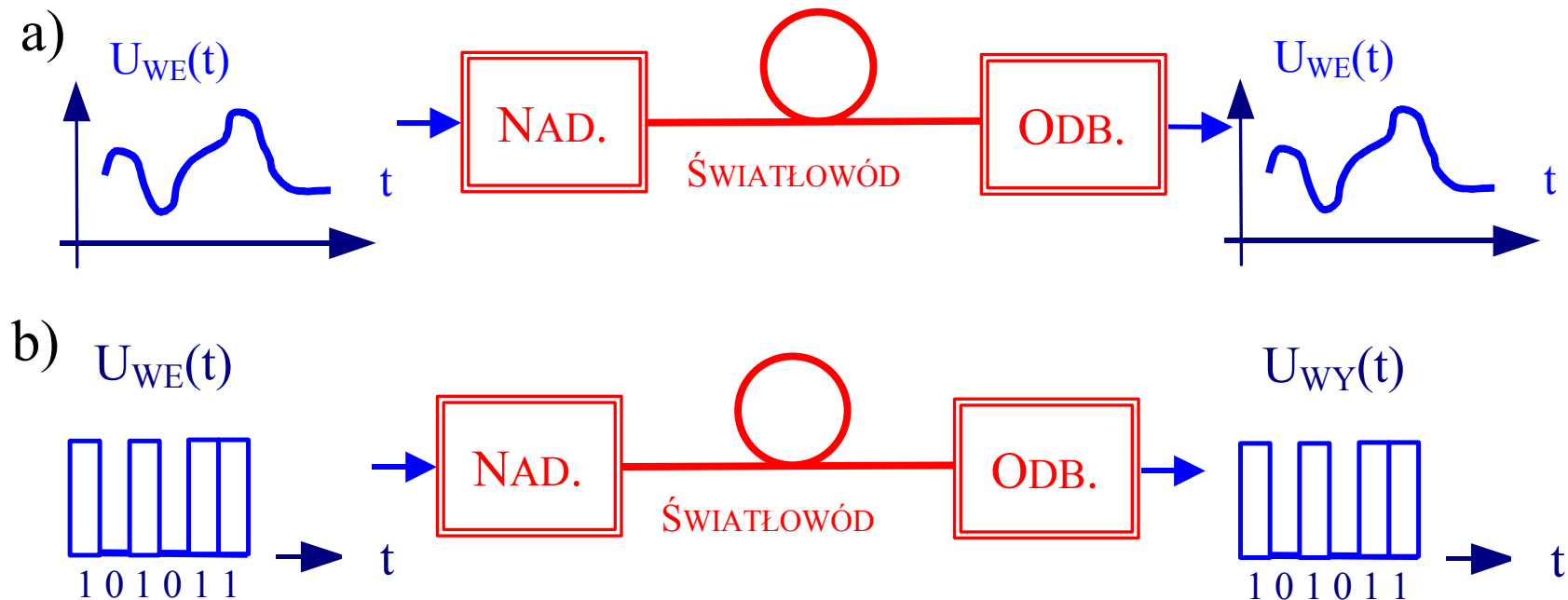
- Dla modulacji fazy:

$$f(t) = F + \Delta\phi f \sin 2\pi ft;$$

- Dla modulacji PM - dewiacja częstotliwości  $\approx f$ .
- Dla modulacji FM dewiacja niezależna od  $f$ .

## 6.1. WPROWADZENIE – MODULACJA ANALOGOWA I CYFROWA

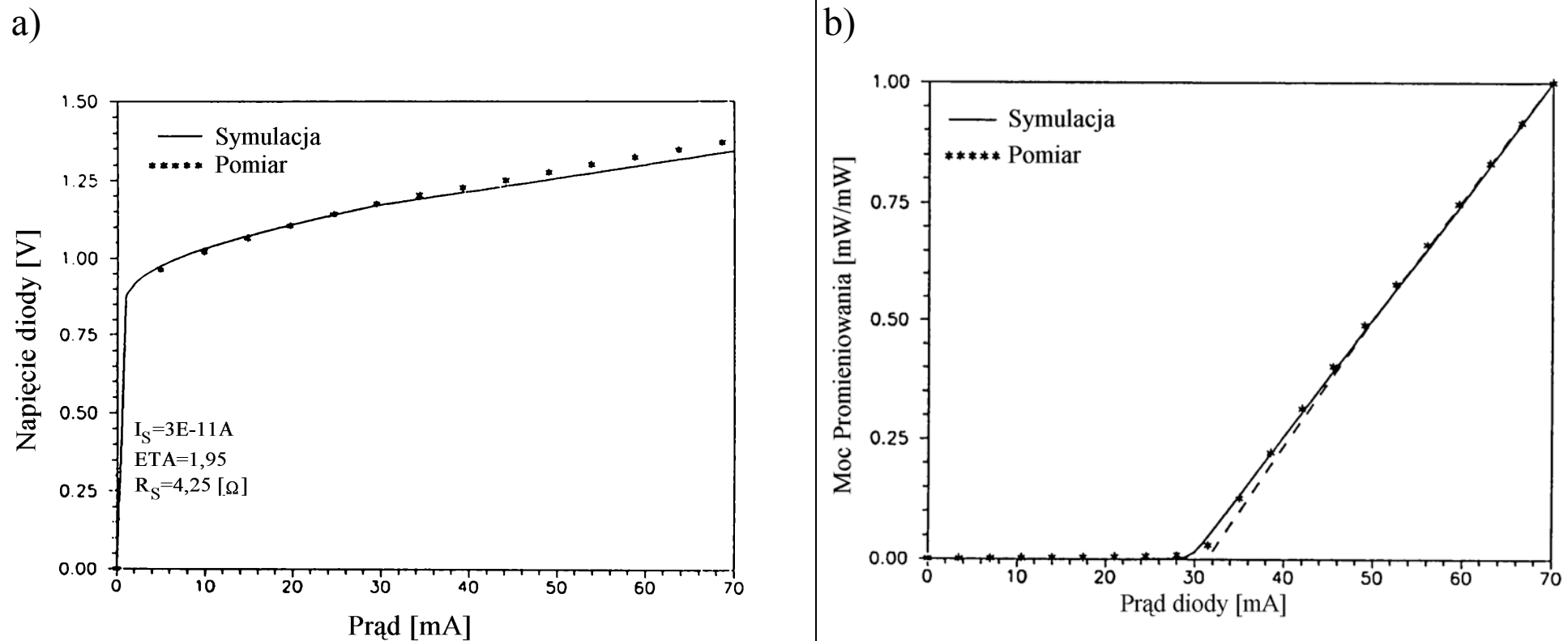
- ⇒ Modulacja i transmisja analogowa: Sieci CATV, sensory, transmisja odebranych sygnałów radiolokacyjnych
- ⇒ Modulacja i transmisja cyfrowa: Łączy telekomunikacyjne, transmisja między komputerami i sieciami komputerowymi



Rys.6.1. Ilustracja działania łączy optycznych z transmisją analogową i cyfrową.

## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA LASERA - MODULACJA AMPLITUDY

- ⇒ Kluczem współczesnych optycznych łączy telekomunikacyjnych jest laser półprzewodnikowy modulowany z wielką prędkością.
- ⇒ Moc sygnału optycznego jest w szerokim zakresie proporcjonalna do prądu diody.
- ⇒ Długość fali lasera zmienia się ze zmianą prądu w tempie 0,01...0,1 nm/K, „efekt ćwierkania”.

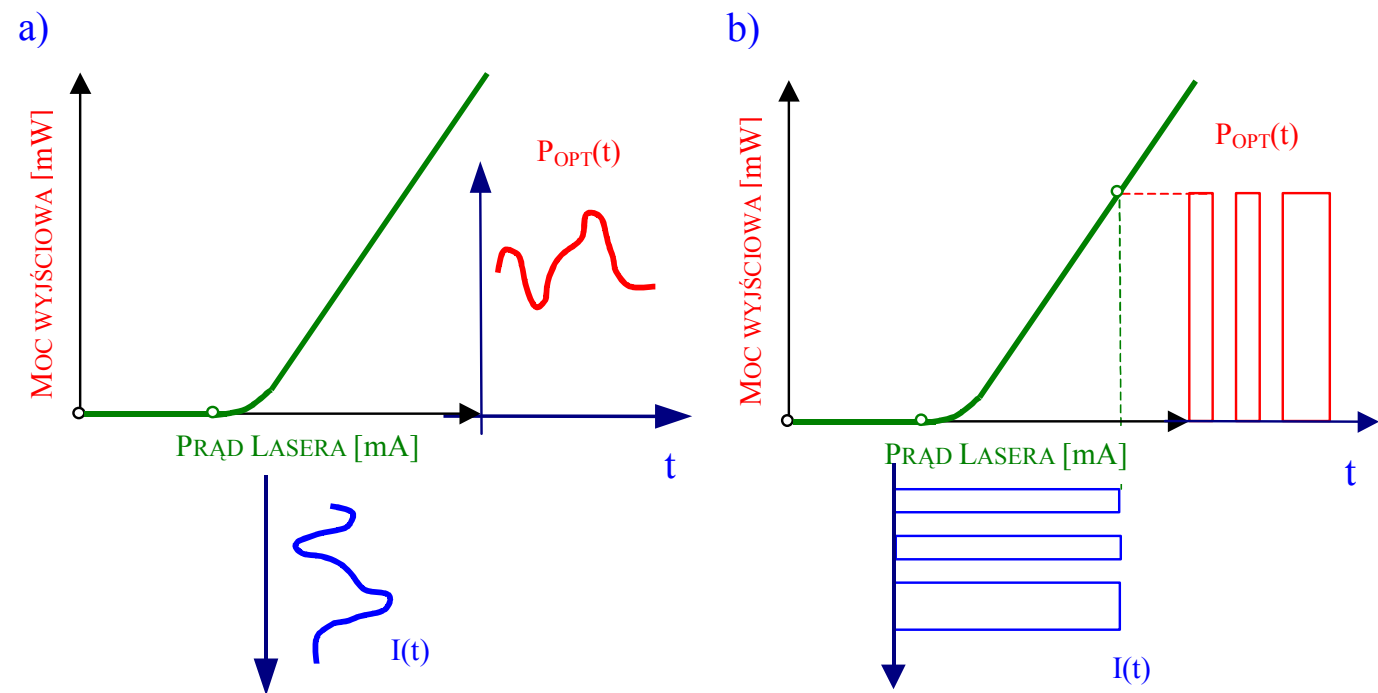


Rys.6.2. Charakterystyki diody laserowej. a)  $I(U)$ . b)  $P(I)$ .

## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA - MODULACJA ANALOGOWA I CYFROWA

- ⇒ Charakterystyki  $I(U)$  i  $P(U)$  wskazują na możliwość modulacji liniowej i impulsowej. Dioda wymaga wstępnej polaryzacji, albo w środku zakresu liniowego dla modulacji analogowej, albo poniżej wartości progowej dla modulacji cyfrowej.
- ⇒ Długość promieniowanej fali zmienia się wraz z temperaturą, w tempie  $0,1...1 \text{ nm/K}$ , konieczna jest stabilizacja temperatury (lepszą niż  $0,01 \text{ K}$ ), wykorzystywany jest element Peltier'a.
- ⇒ Stabilizacja temperatury stabilizuje średnią moc wyjściową lasera.

Rys.6.3. Ilustracja procesu modulacji mocy wyjściowej lasera.  
a) modulacja analogowa,  
b) modulacja cyfrowa.

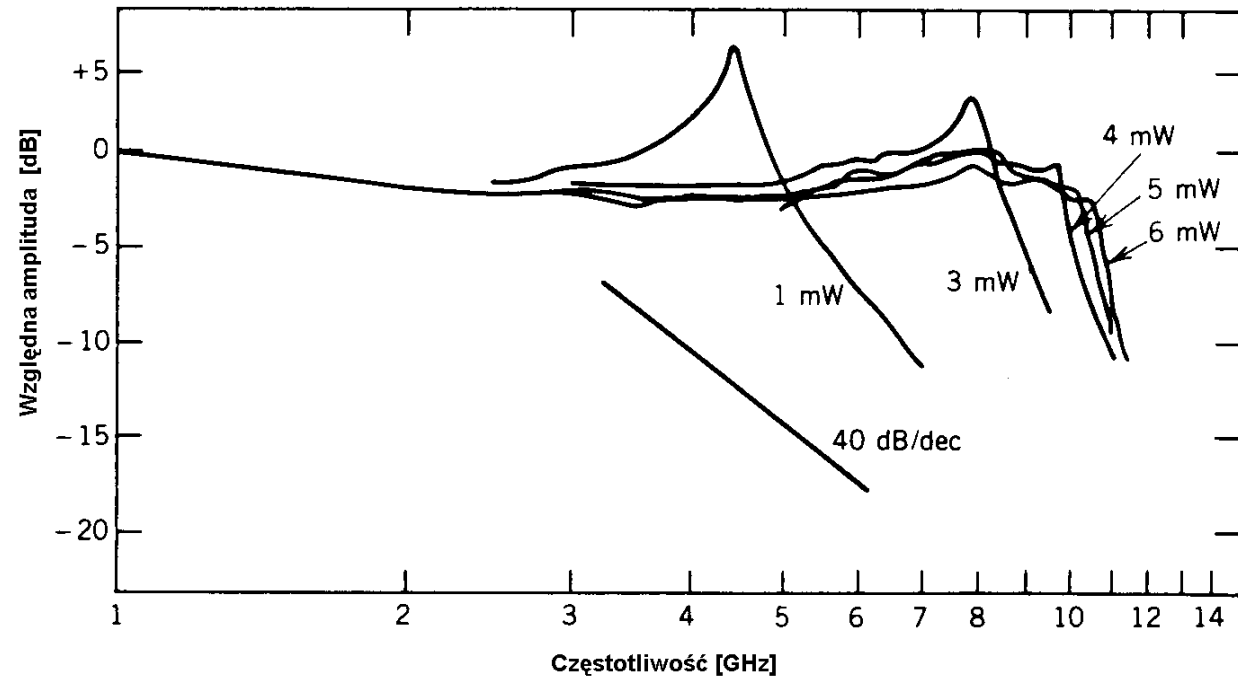


## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA – GRANICZNA CZĘSTOTLIWOŚĆ MODULACJI

- ◆ Częstotliwościowa charakterystyka modulacji jest płaska aż do  $f_{\max}$  opisanej drganiami relaksacyjnymi fotonów i nośników ładunku wewnątrz lasera.

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A \cdot P}{\tau_p}};$$

- A - współczynnik wzmocnienia optycznego,
- $P_0$  - średnia gęstość fotonów,
- $\tau_p$  - czas życia fotonu wewnątrz lasera



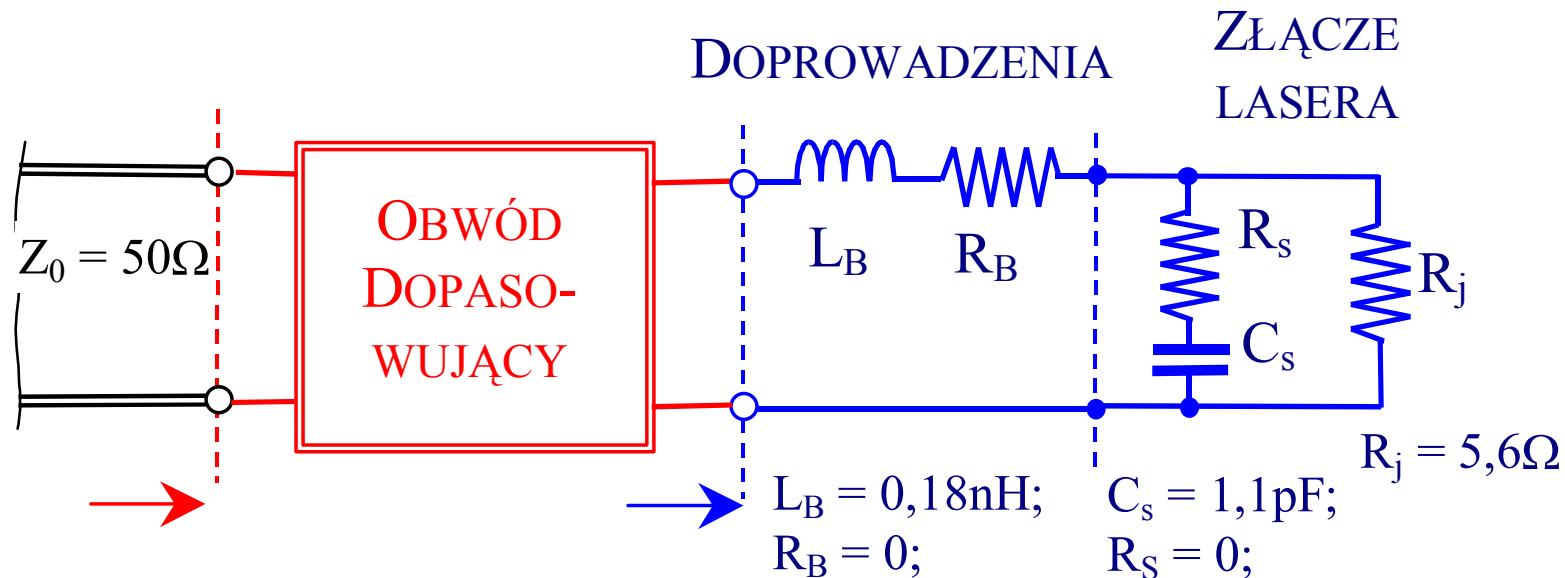
*Rys.6.4. Częstotliwościowa charakterystyka modulacji lasera BH FP ilustrująca ograniczenia pasma pracy drganiami relaksacyjnymi.*

- ◆ Powszechnie osiągalna jest  $f_{\max} > 10$  GHz, laboratoryjnie do 40 GHz.
- ◆ Oddzielne ograniczenia maksymalnej częstotliwości modulacji tworzą obwody mikrofalowe sterujące prądem diody laserowej.



## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA – OBWÓD ZASTĘPCZY LASERA

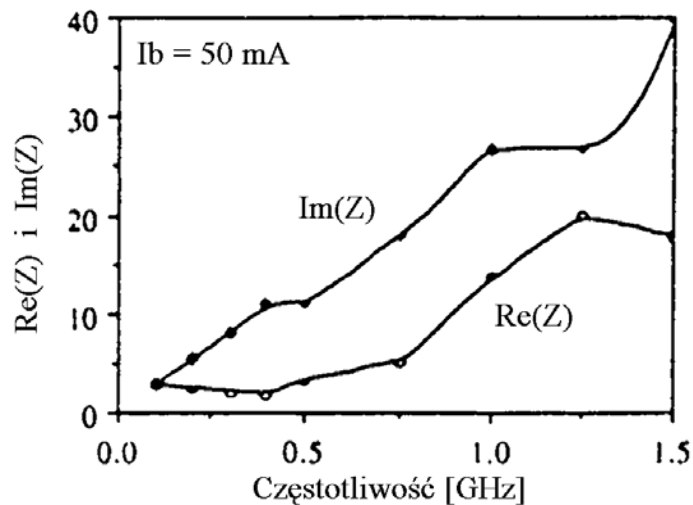
- Drgania relaksacyjne ograniczają  $f_{\max}$  lasera.
- Poza tym trzeba sygnał mikrofalowy doprowadzić do lasera, co jest oddzielnym problemem.
- Trudności:  $R_j$  - kilka  $\Omega$ , linia mikrofalowa  $50 \Omega$ , potrzebny szerokopasmowy obwód dopasowania (*transimpedance amplifier*).
- Jeśli impulsy modulujące mają kształt prostokątny, to pasmo dopasowania musi być odpowiednio szersze, np. dla transmisji 2,5 Gb/s pasmo co najmniej 5 GHz



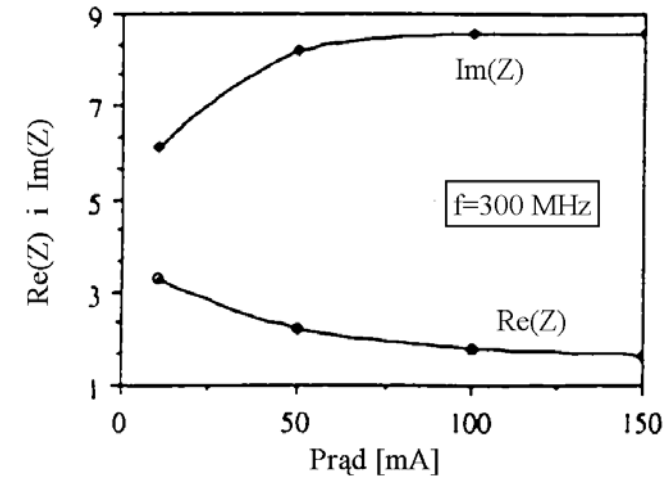
Rys.6.5. Obwód zastępczy diody laserowej dla wybranego typu diody.

## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA – MODELOWANIE OBWÓDU ZASTĘPCZEGO LASERA

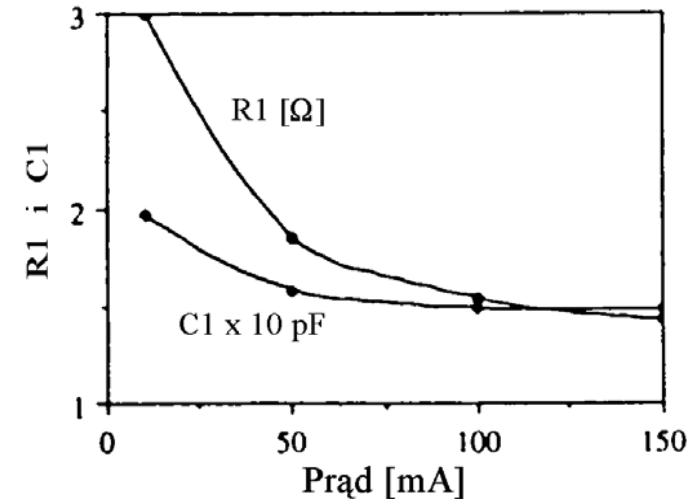
- ✘ Mierzy się wartości impedancji lasera.
- ✘ Dobiera się obwód zastępczy diody laserowej, często wieloelementowy.
- ✘ Wartości elementów obwodu zastępczego są dobierane, aby odtwarzały przebiegi rzeczywiste.
- ✘ Teraz projektuje się obwód dopasowujący.



a)



b)



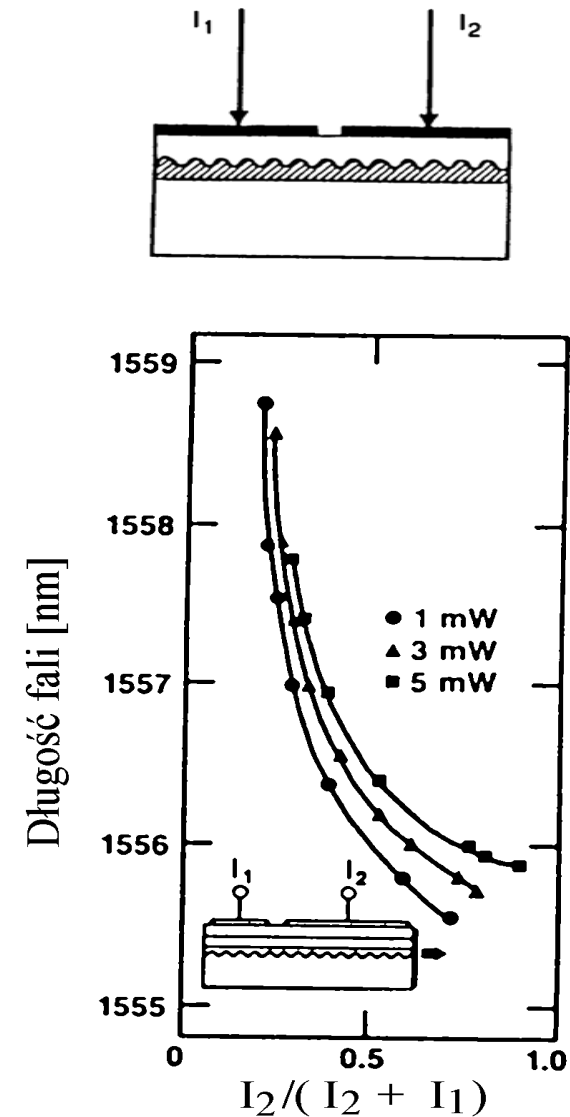
c)

Rys.6.6. Przykłady zmierzonych przebiegów impedancji diody laserowej

## 6.2. MODULACJA BEZPOŚREDNIA LASERA - MODULACJA CZĘSTOTLIWOŚCI

- × Częstotliwość oscylacji lasera zależy od mocy oscylacji, tzw. efekt ćwierkania (ang. *frequency chirping*).
- × Efekt ten wywołany jest zmianą współczynnika załamania półprzewodnika przy zmianie koncentracji nośników.
- × Efekt szkodliwy, powoduje „rozmywanie” prostokątnego kształtu impulsów przy propagacji przez światłowód.
- × Efekt przestrajania uzyskuje się w laserach dwusekcyjnych i trójsekcyjnych, przez zmianę prądu jednej sekcji.
- × Względne pasmo przestrajania jest małe  $3 \text{ nm} : 1550 \text{ nm} = 2 \times 10^{-3}$ , pasmo wyrażone w Hz jest bardzo duże,
- × Lasery przestrajane stosowane są w systemach przesyłania sygnału na różnych długościach fali.

*Rys.6.7. Uproszczona struktura dwusekcyjnego lasera i jego charakterystyki przestrajania*



### 6.3. MODULATORY ELEKTROOPTYCZNE - EFEKT ELEKTROOPTYCZNY

- ◆ W ośrodku elektrooptycznym współczynnik załamania jest funkcją E:

$$n(E) = n + a_1 E + \frac{a_2}{2} E^2 + \dots;$$

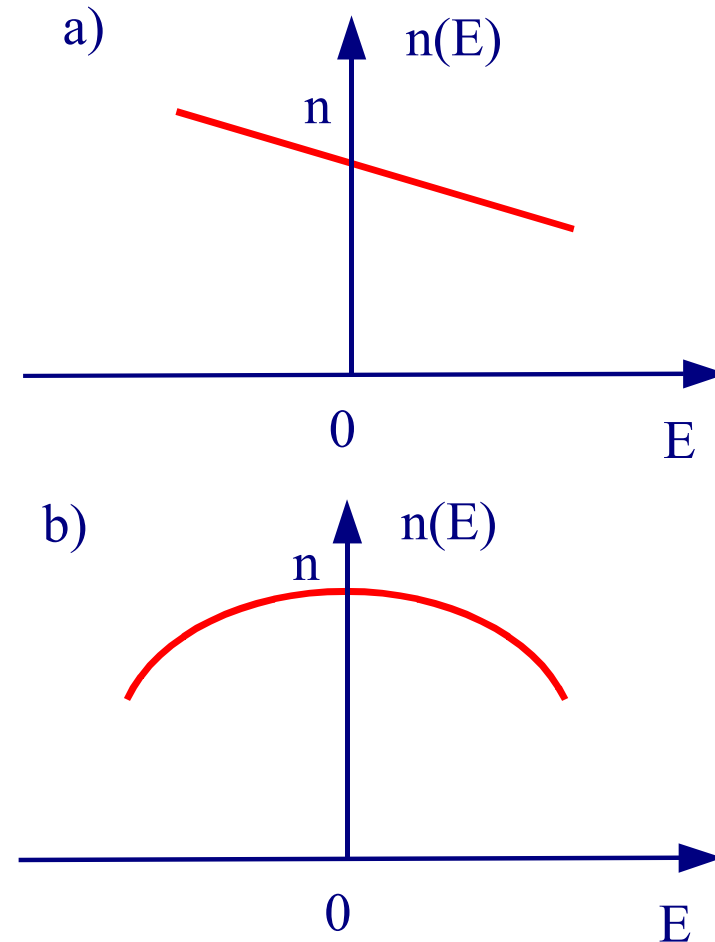
- ◆ Efekt Pokels'a:

$$n(E) \cong n - \frac{1}{2} r n^3 E;$$

- r - współczynnik Pokels'a  
=  $10^{-10} \dots 10^{-12}$  m/v,
- materiały elektrooptyczne: LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, CdTe, GaAs,....
- dla E = 10<sup>6</sup> V/m.  $\Delta n = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ .

- ◆ Efekt Kerr'a:

$$n(E) \cong n - \frac{1}{2} s n^3 E^2;$$



Rys.6.8. Zależność  $n(E)$ . a) Efekt Pokels'a.  
b) Efekt Kerr'a

### 6.3. MODULATORY ELEKTROOPTYCZNE – MODULATOR FAZY (A)

- ◆ Wiązka światła o  $\lambda_0$  przechodzi przez komórkę Pockels'a o długości  $L$  i współczynnika załamania  $n(E)$ , zmieniając fazę o  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{2\pi n(E)L}{\lambda_0} \cong \varphi_0 - \frac{\pi n^3 r}{\lambda_0} EL;$$

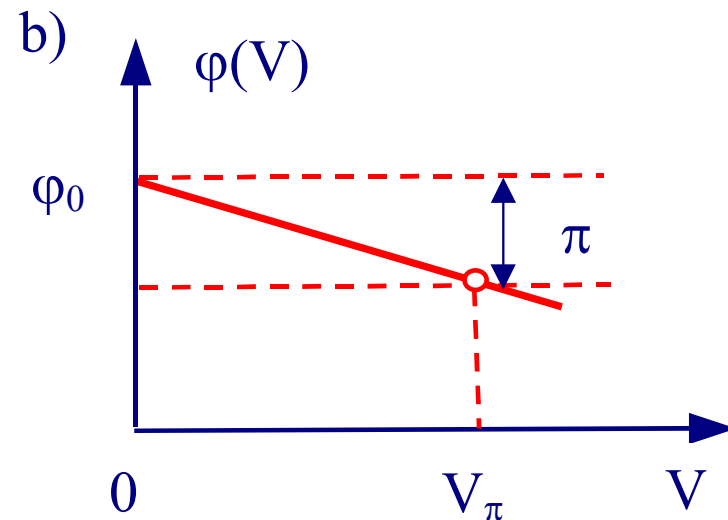
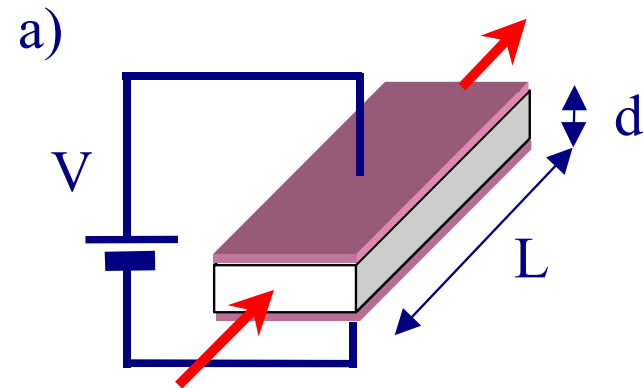
- ◆ Wprowadza się napięcie  $V_\pi$ , tzw. napięcie półfalowe, dla którego faza  $\varphi$  zmienia się o  $\pi$ , Wtedy:

$$\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi};$$

- ◆ Wykorzystanie efektu elektrooptycznego pozwala zbudować modulator fazy

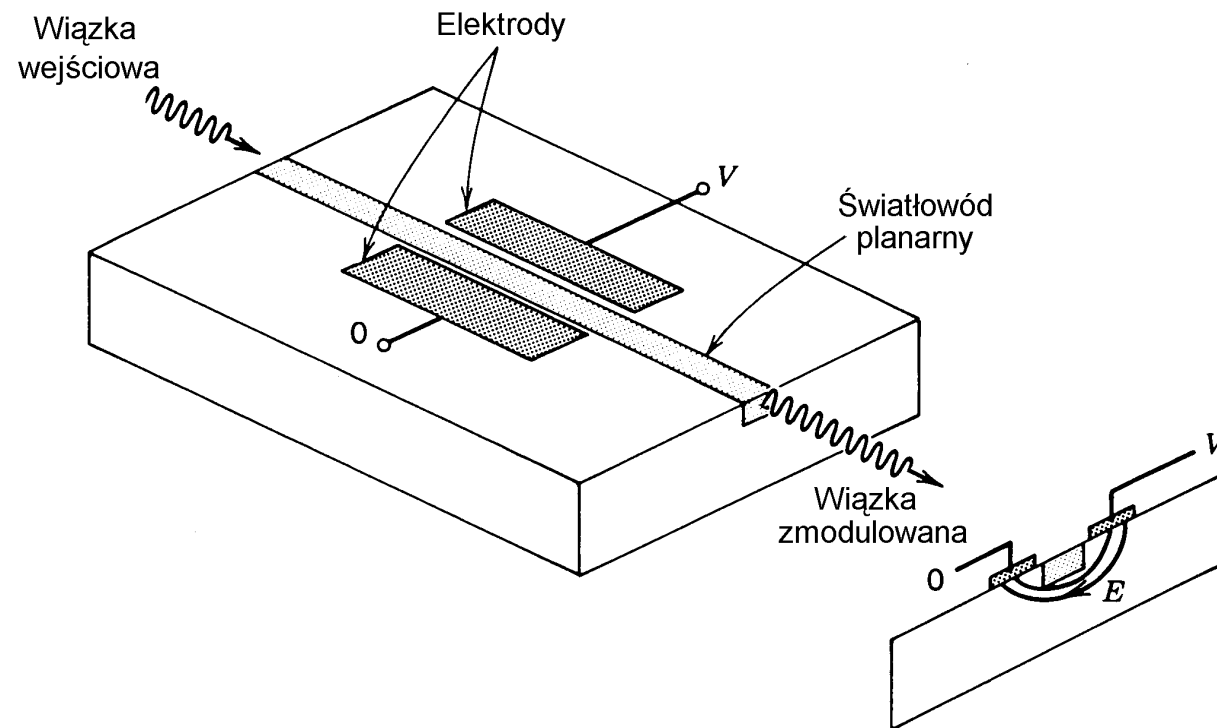
*Rys.6.9 a) Modulator fazy z polem poprzecznym.*

*b) Zależność  $\varphi(V)$*



### 6.3. MODULATORY ELEKTROOPTYCZNE – MODULATOR FAZY (B)

- ◆ Wykorzystując efekt Pockels'a można zbudować modulator fazy sygnału optycznego.
- ◆ W materiale wykazującym efekt elektrooptyczny np.  $\text{LiNbO}_3$ , wykonuje się światłowód planarny.
- ◆ Światłowód umieszczony jest w polu elektrycznym wytworzonym przez elektrody. Ich kształt decyduje o pasmie pracy modulatora
- ◆ Największe pasmo wykazują modulatory z falą bieżącą, ich działanie omówione zostanie później



*Rys.6.10. Modulator fazy z o strukturze planarnej.*

### 6.3. MODULATORY ELEKTROOPTYCZNE – INTERFEROMETR MACH-ZEHNDER'A

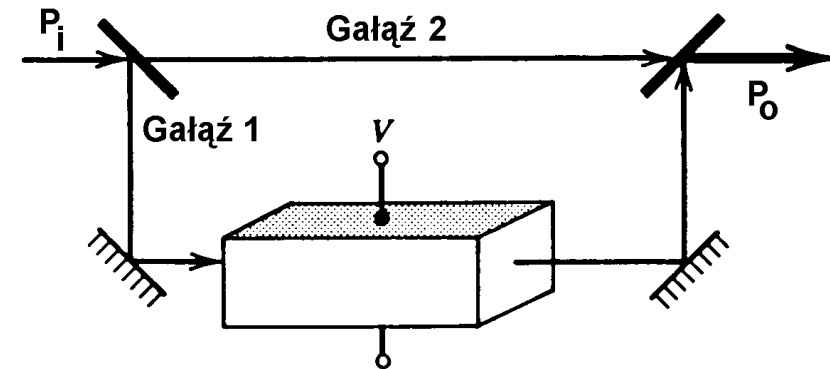
- ◆ Użycie interferometru umożliwia powstanie modulatora amplitudy.
- ◆ Wiązka światła o mocy  $P_0$  dzielona jest na dwie równe części i kierowana do 2 ramion.
- ◆ W jednym z ramion umieszczono elektrooptyczny modulator fazy.
- ◆ Kolejny sprzęgacz sumuje obie wiązki.

$$P_o = \frac{P_i}{2} + \frac{P_i}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = P_i \cos^2 \frac{\varphi}{2};$$

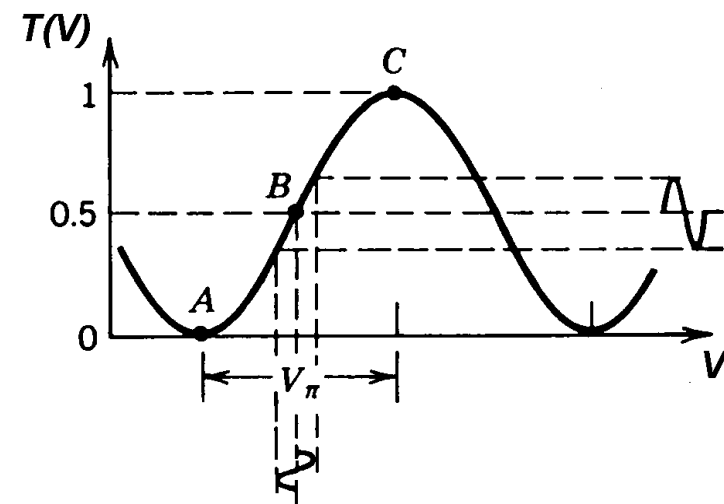
- ◆ Transmitancja modulatora  $T(V) = P_i/P_o$ :

$$T(V) = \cos^2 \left( \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\pi V}{2V_\pi} \right);$$

- ◆ Polaryzacja wstępna w p.B umożliwia pracę jako modulatora amplitudy.
- ◆ Praca w stanach A i C to przełącznik.



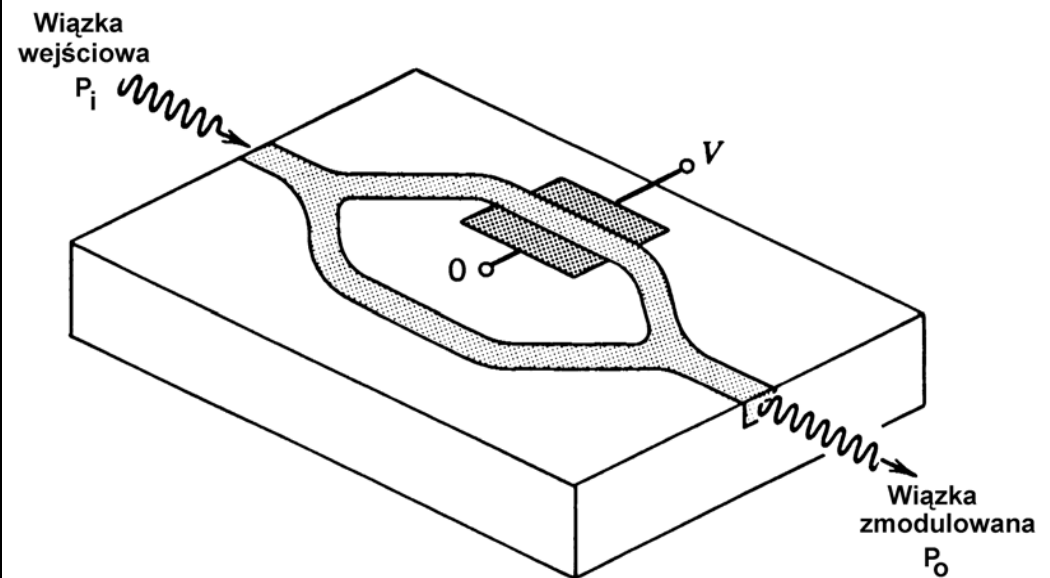
Rys.6.11. Idea struktury interferometru



Rys.6.12. Transmitancja interferometru

### 6.3. MODULATORY ... – MODULATOR MACH-ZEHNDER’A O STRUKTURZE PLANARNEJ.

- Praktyczne znaczenie mają modulatory MH o strukturze planarnej.
- Podłożem jest niobian litu  $\text{LiNbO}_3$  z falowodami  $\text{Ti:LiNbO}_3$ .
- Struktura falowodów planarnych z 2 rozgałęzieniami Y tworzy mostek.
  - 1-szy to dzielnik mocy,
  - 2-gi sumuje moce z obu ramion
- Do rozgałęzienia sumującego docierają fale o tych samych amplitudach i różnych fazach, następuje interferencja.
- W obu ramionach mostka mogą pracować modulatory fazy przeciwsobnie.
- Przy zachowaniu symetrii podziału i sumowania stosunek  $P_{\max}/P_{\min} = 1000:1$ .



*Rys.6.13. Struktura planarna elektrooptycznego modulatora Mach-Zehnder'a*

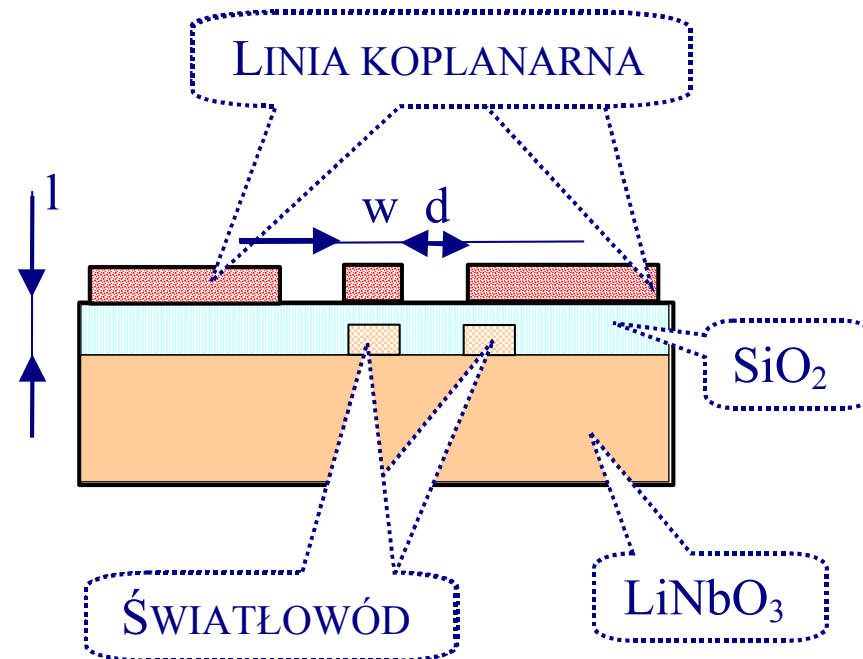
- Transmisja mocy optycznej jest mniejsza od 1, modulator ma własne straty wynikłe ze stratności światłowodów planarnych.



### 6.3. MODULATORY ... – MODULATOR MACH-ZEHNDER’A Z FALĄ BIEŻĄCĄ (A)

- ◆ Ze wzrostem  $f_{\text{mod}}$  sygnału w.cz. czas przepływu sygnału optycznego staje się porównywalny z okresem  $T = 1/f_{\text{mod}}$ .
- ◆ Gdy czas przepływu sygnału staje się równy okresowi  $T$ , to efekty modulacji uzyskane w półokresie znoszą się w następnym.
- ◆ Rozwiązaniem jest modulator z falą bieżącą:
  - sygnał optyczny transmitowany jest falowodem optycznym,
  - sygnał mikrofalowy transmitowany jest specjalnie skonstruowaną prowadnicą,
  - prędkości fazowe obu fal równe.
- ◆ Dla sygnału mikrofalowego wykonuje się linię opóźniającą o specjalnej strukturze.

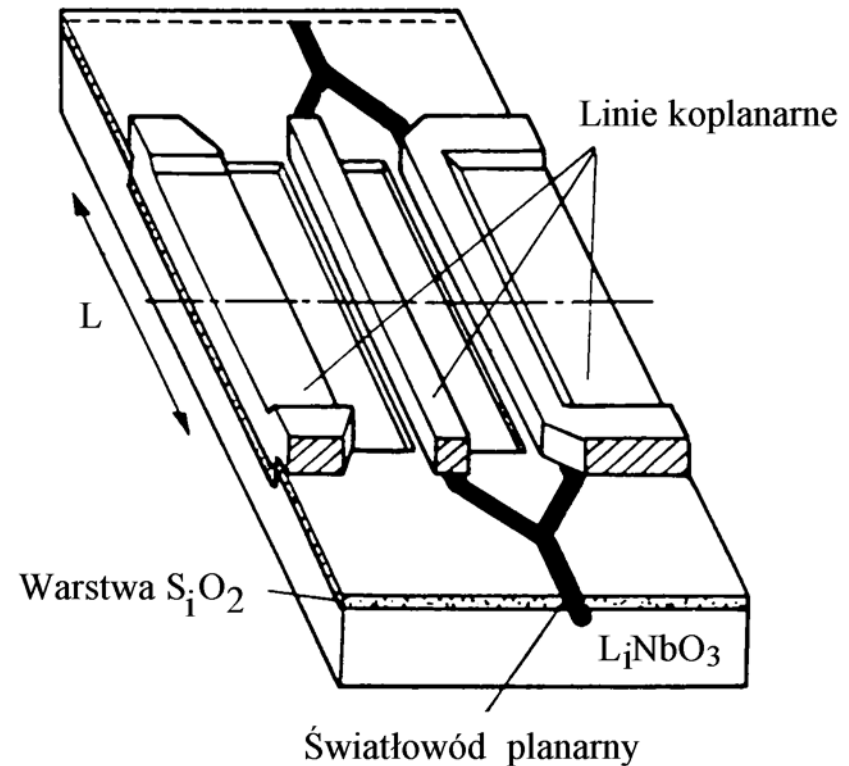
- ◆ Sygnał optyczny po podzieleniu transmitowany jest dwoma światłowodami planarnymi - grzbietowymi



Rys.6.14. Przekrój poprzeczny modulatora MZ z linią koplanarną

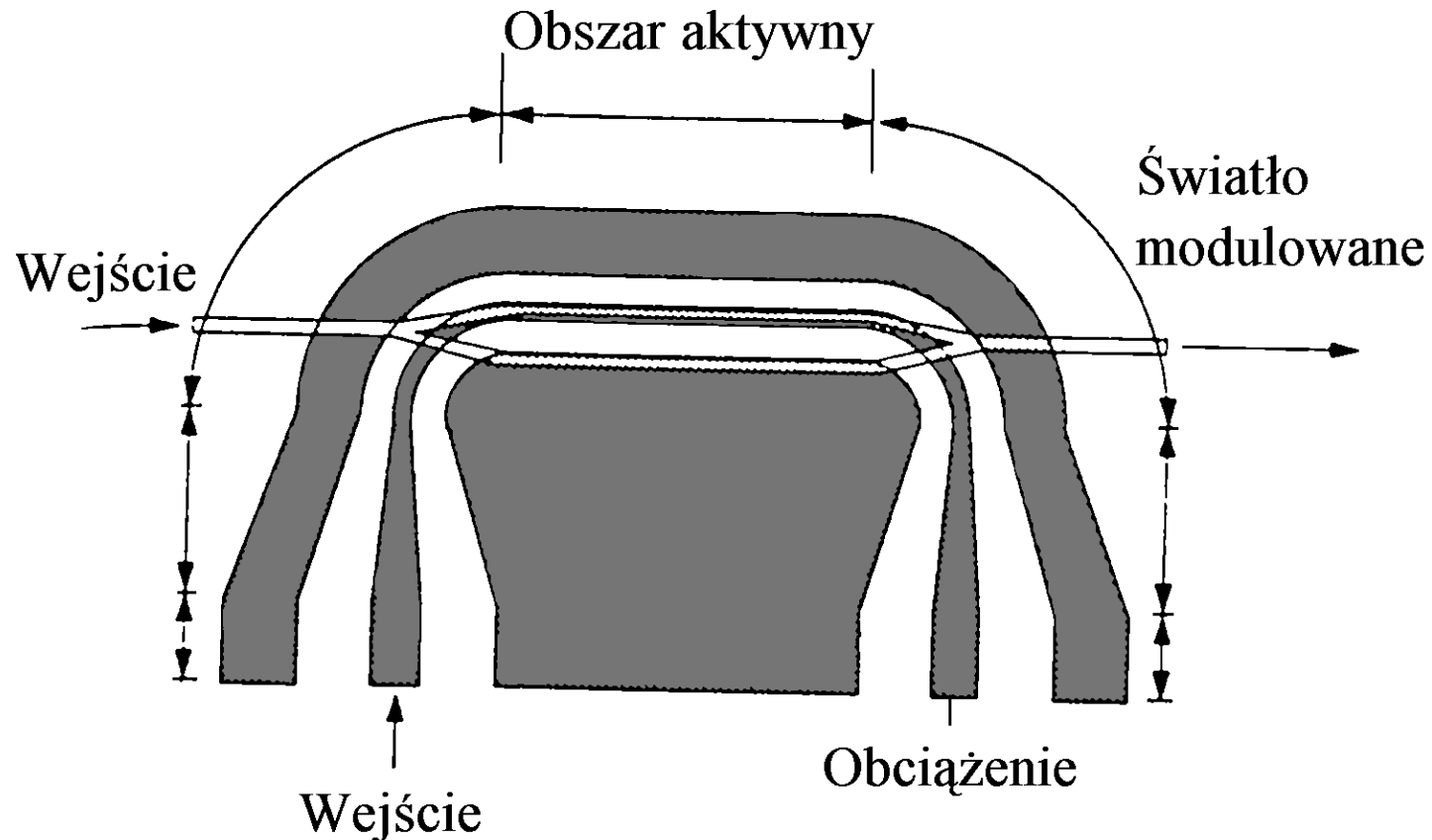
### 6.3. MODULATORY ... – MODULATOR MACH-ZEHNDER’A Z FALĄ BIEŻĄCĄ (B)

- ◆ Dla przewodnicy mikrofalowej wybiera się zwykle strukturę koplanarną.
- ◆ Wymiary  $w$  i  $d$  ustalają impedancję charakterystyczną linii  $Z_0$ .
- ◆ Linia koplanarna otoczona jest wielowarstwowym dielektrykiem:
  - powietrze,
  - $\text{LiNbO}_3$ ,
  - warstwa  $\text{SiO}_2$ .
- ◆ Można w linii koplanarnej spowolnić sygnał mikrofalowy dobierając odpowiednio efektywną przenikalność elektryczną tej struktury, przez dobór grubości  $\text{SiO}_2$ .



Rys.6.15. Uproszczony widok struktury modulatora MZ

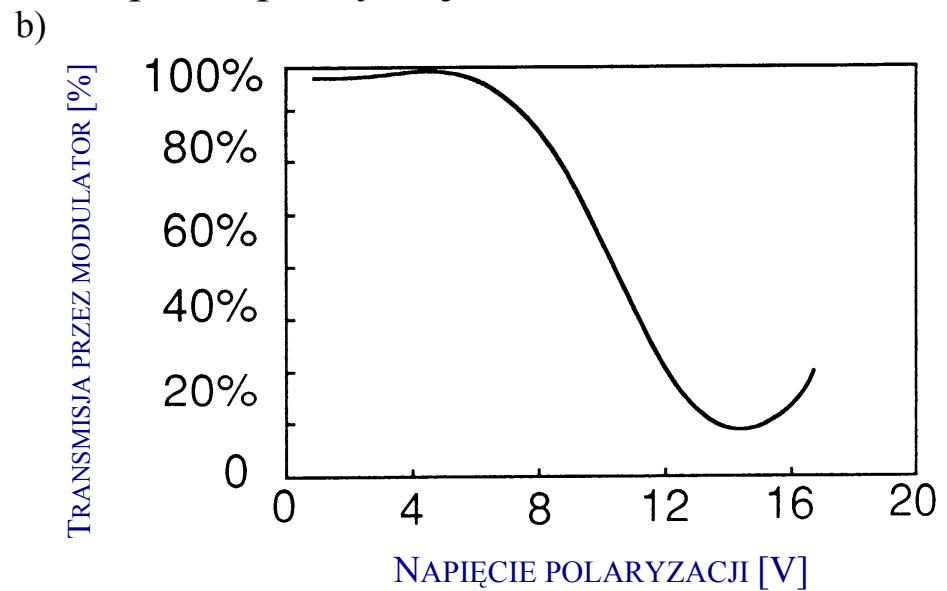
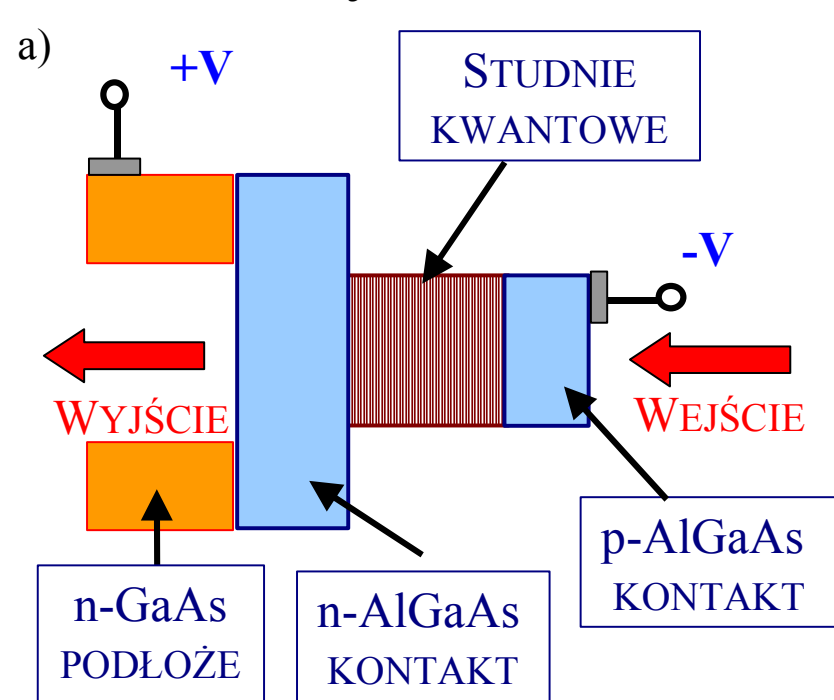
### 6.3. MODULATORY ... – MODULATOR MACH-ZEHNDER’A Z FALĄ BIEŻĄCĄ (C)



*Rys.6.16. Widok modulatora z koplanarną linią opóźniającą dopasowaną szerokopasmowo aż do pasma fal milimetrowych*

## 6.4. MODULATORY ELEKTROABSORPCYJNE – PODSTAWOWA STRUKTURA

- Efekt absorpcji fotonów zaobserwowano w strukturach ze studniami kwantowymi.
- Studnia kwantowa to heterostruktura – kompozycja cienkiej warstwy GaAs – około 30 warstw atomowych umieszczonej między dwiema warstwami AlGaAs.
- Modulator MQW (*Multiple-Quantum-Well*) jest rodzajem diody p-i-n, między p i n kilkadziesiąt warstw QW. Na rys.6.17 strumień fotonów przepływa prostopadle do struktury. Pochłanianie fotonów ma miejsce w obszarze GaAs i zależy od napięcia polaryzacji.

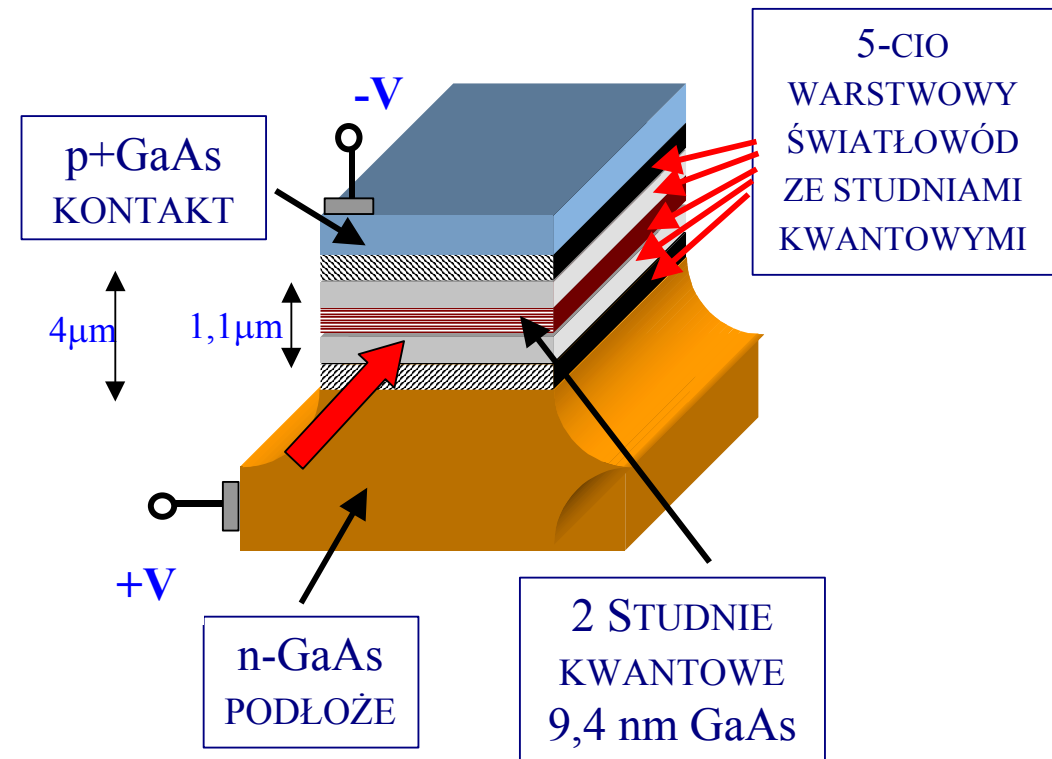


Rys.6.17. a) Uproszczona struktura modulatora ze studniami kwantowymi. b) Charakterystyka pochłaniania promieniowania.

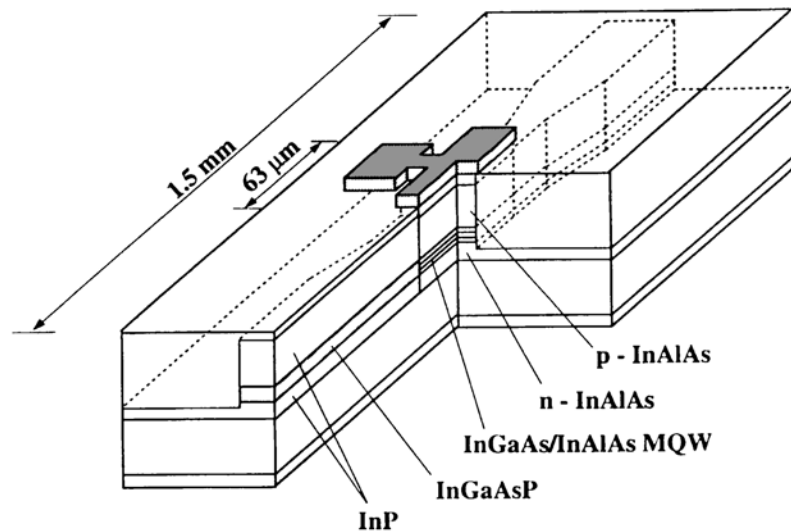
## 6.4. MODULATORY ELEKTROABSORPCYJNE – MODULATOR FALOWODOWY

- Propagacja światła może mieć miejsce w płaszczyźnie w płaszczyźnie warstw MQW
- Dodatkowe warstwy GaAs wokół QWs formują światłowód planarny.
- Światłowód planarny zmienia swoje tłumienie w zależności od napięcia polaryzacji i poziomu gęstości wprowadzonych nośników.
- Stosunek minimalnego do maksymalnego tłumienia 15...20 dB.
- Zalety:
  - szerokie pasmo modulacji > 10 GHz,
  - małe odbicia i łatwość dopasowania,
  - możliwość integracji z laserem.

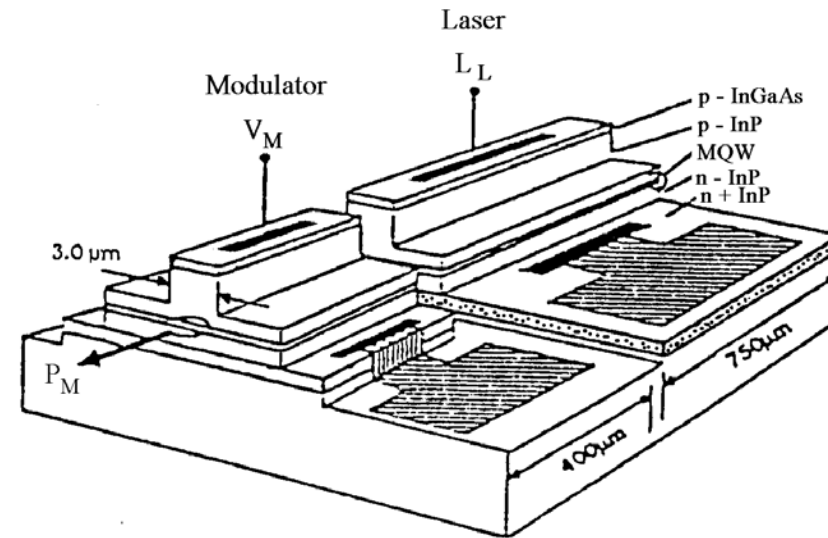
*Rys.6.18. Uproszczona struktura elektroabsorcyjnego modulatora ze światłowodem planarnym.*



## 6.4. MODULATORY ELEKTROABSORPCYJNE – PRZYKŁADY (A)



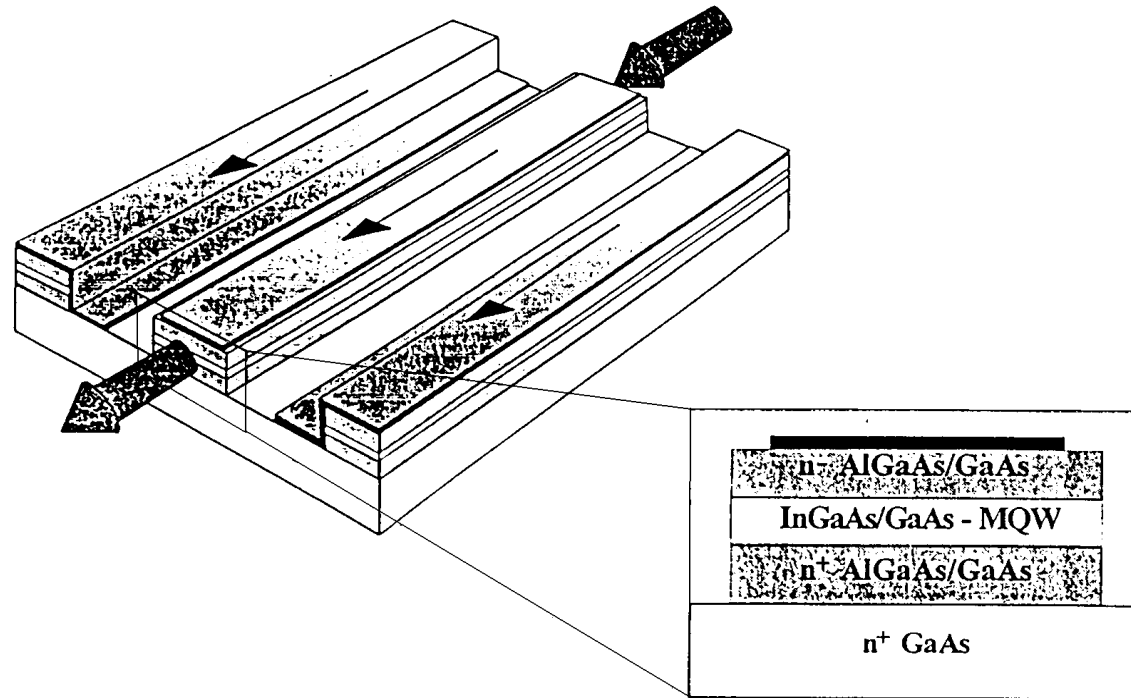
Rys.6.19. Tłumik elektroabsorpcyjny ze światłowodem planarnym z GaAs i strukturą studni kwantowych o tłumieniu zależnym od napięcia polaryzacji.



Rys.6.20. Zintegrowana struktura nadajnika optycznego: laser półprzewodnikowy razem z modulatorem elektroabsorpcyjnym.

## 6.4. MODULATORY ELEKTROABSORPCYJNE – MODULATOR MQW Z FALĄ BIEŻĄCĄ.

Rys.6.21. Struktura elektroabsorpcyjnego modulatora MQW o fali bieżącej.

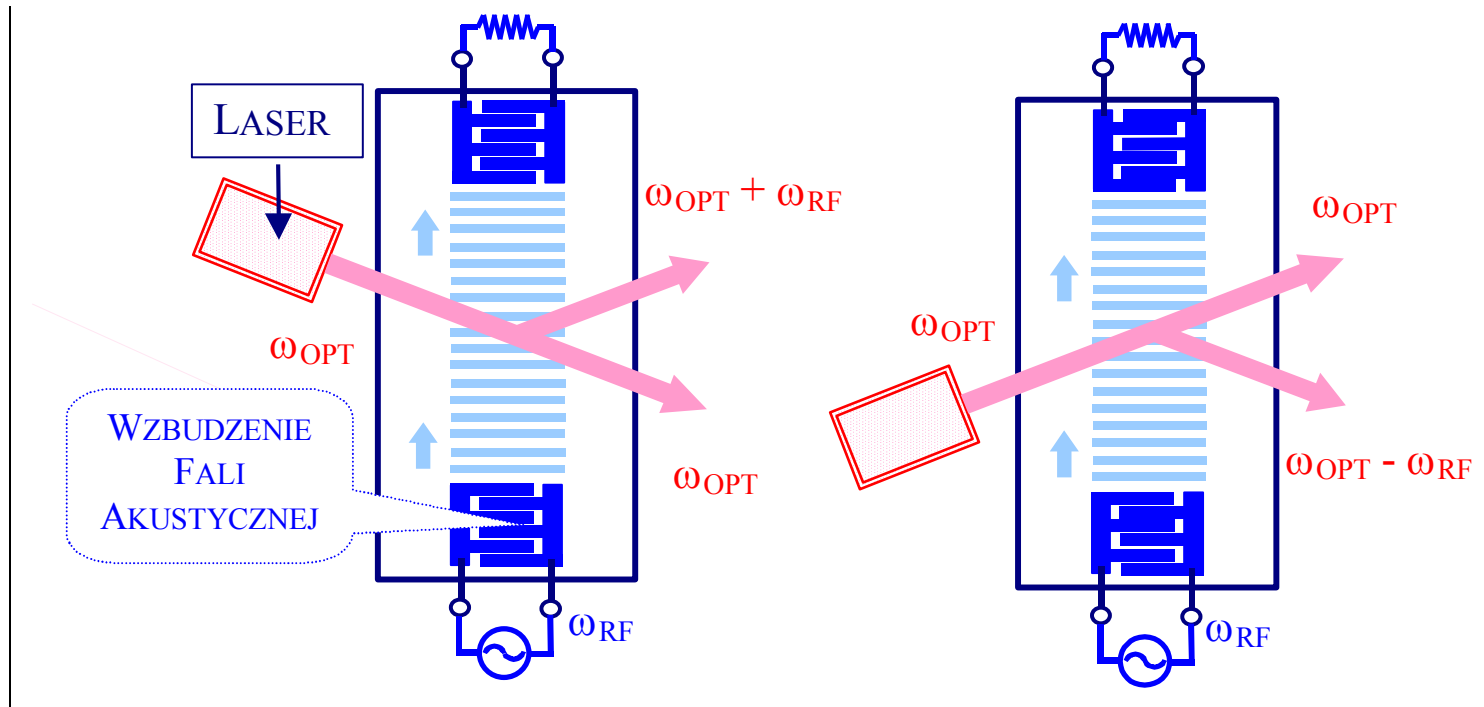


- ◆ Planarny światłowód uformowano w warstwie o grubości  $0.61 \mu\text{m}$  zawierającej dziesięć studni kwantowych  $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ , każda o grubości  $10 \text{ nm}$ , które rozdzielały bariery z  $\text{GaAs}$  o grubości  $10 \text{ nm}$ .
- ◆ Dolną i górną warstwę ograniczającą o grubości  $0,2 \mu\text{m}$ . wykonano z  $\text{GaAs}$ .
- ◆ Światłowód wraz sąsiednimi elementami tworzy linię koplanarną.
- ◆ Struktura pozwala zwiększyć dynamikę tłumienia i uzyskać szerokopasmową pracę.

## 6.4. MODULATORY AKUSTOOPTYCZNE – ZASADA DZIAŁANIA

- ◆ W ośrodkach piezoelektrycznych (np. kwarc) można wzbudzić falę akustyczną: objętościową albo powierzchniową.
- ◆ Rozchodzące się drgania mechaniczne powodują lokalne zwiększenia i zmniejszenia współczynnika załamania ośrodka, tym większe, im większa moc fali akustycznej.
- ◆ Propagowany w ośrodku sygnał optyczny ulega dyfrakcji, różnej dla fali objętościowej (dyfrakcja Raman'a-Nath'a) i fali powierzchniowej (dyfrakcja Bragg'a).

Rys.6.22. Zasada działania akustooptycznego przesuwnika częstotliwości.

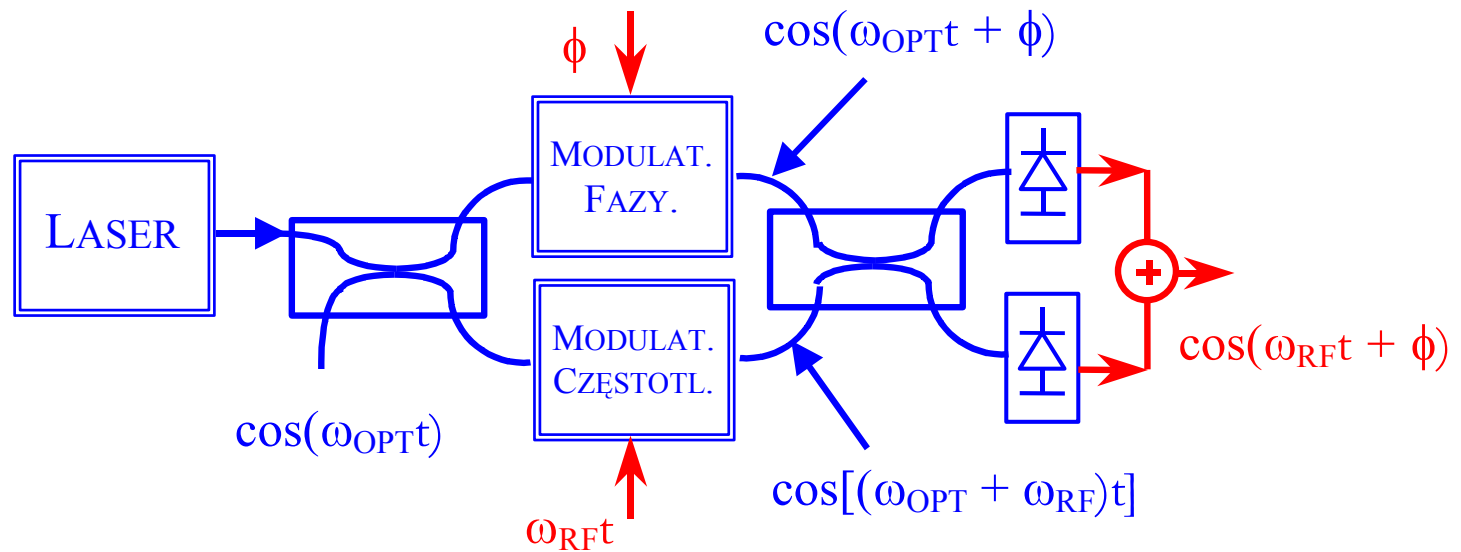




## 6.4. MODULATORY AKUSTOOPTYCZNE – UKŁAD REGULACJI FAZY I CZĘSTOTLIWOŚCI

- ◆ Przechodząca pod odpowiednim kątem wiązka światła zostaje ugięta, przy czym częstotliwość wzrasta lub maleje o wartość częstotliwości wzbudzonej w przetworniku fali akustycznej, w zależności od kierunku propagacji. Otrzymuje się w ten sposób przesuwnik częstotliwości.
- ◆ Na rys.6.22 sygnał optyczny  $\omega_{OPT}$  zostaje skierowany do 2 torów:
  - Przetwornik akustooptyczny zmienia pulsację transmitowanego sygnału do wartości  $\omega_0 + \omega_{RF}$ .
  - Przesuwnik fazy reguluje fazę  $\phi$  transmitowanego sygnału.
  - W procesie mieszania fotodetektora uzyskuje się na jego wyjściu sygnał mikrofalowy o częstotliwości  $\omega_{RF}$  i fazie  $\phi$ , kontrolowanych przez oba przetworniki.

Rys.6.23. Zasada działania optycznego układu do kontroli fazy i częstotliwości sygnału mikrofalowego.



## 6.6. PODSUMOWANIE

- Zapis informacji na sygnale optycznym może być dokonany dwojako:
  - ✓ Przez bezpośrednią modulację prądu diody laserowej i zmiany mocy wyjściowej (modulacja amplitudy), lub częstotliwości (modulacja częstotliwości)
  - ✓ Przez wprowadzenie zewnętrznego modulatora (modulacja amplitudy lub fazy)
- Szerokopasmowa modulacja lub modulacja bardzo krótkimi impulsami wymaga stosowania specjalnych szerokopasmowych obwodów dopasowujących.
- Modulatory półprzewodnikowe MQW otwierają możliwości integracji ze źródłami światła – laserami i ze wzmacniaczami półprzewodnikowymi na jednym podłożu GaAs.
- Opanowane techniki modulacji pozwalają przesyłać sygnały mikrofalowe w paśmie do 60 GHz. W niedługim czasie oczekuje się dojścia do granicy 100 GHz.
- Opanowano zarówno techniki modulacji cyfrowej jak i modulacji analogowej z minimalizacją zniekształceń.