



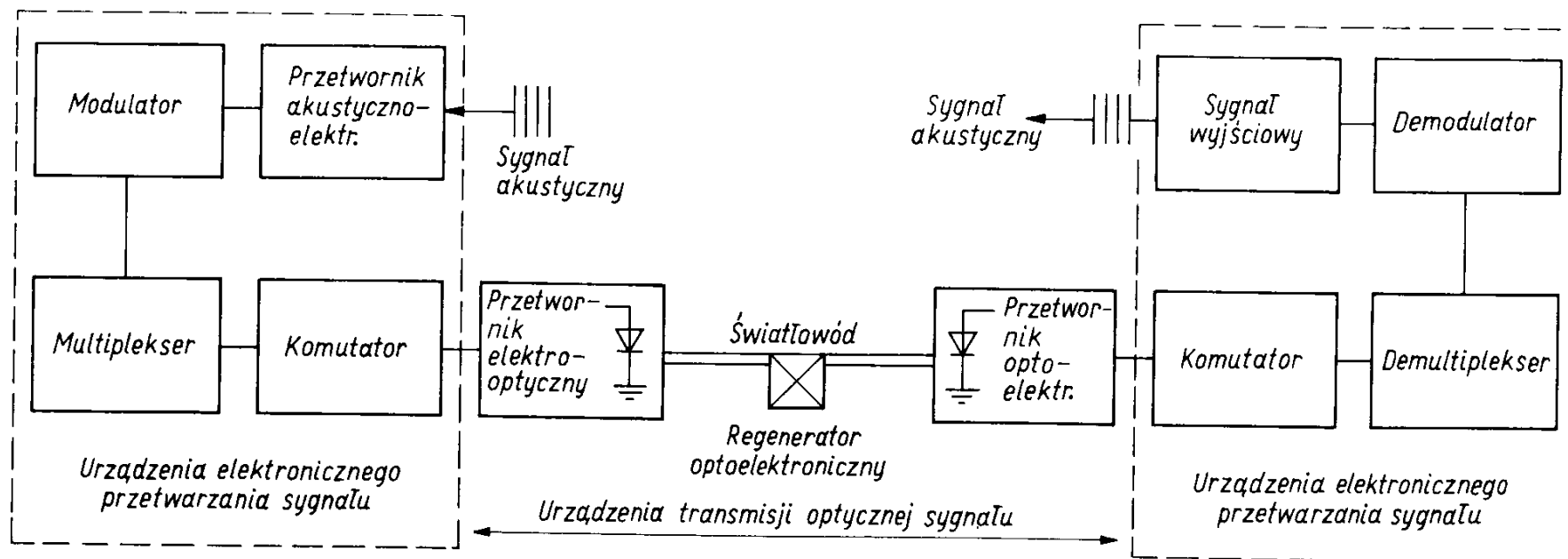
TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

3. Optyka planarna i elementy bierne toru optycznego

Spis treści:

- 3.1. Wprowadzenie.
- 3.2. Światłowody planarne i paskowe
- 3.3. Światłowodowe soczewki cylindryczne i planarne
- 3.4. Złącza w torze optycznym
 - ✓ Sprzężenie optyczne światłowodów
 - ✓ Sprzężenie optyczne źródło-światłowód, fotodetektor-światłowód
- 3.5. Sprzęgacze, przełączniki włókniste i planarne
- 3.6. Multipleksery / demultipleksery
- 3.7. Elementy polaryzacyjne, izolatory i filtry

3.1. Wprowadzenie

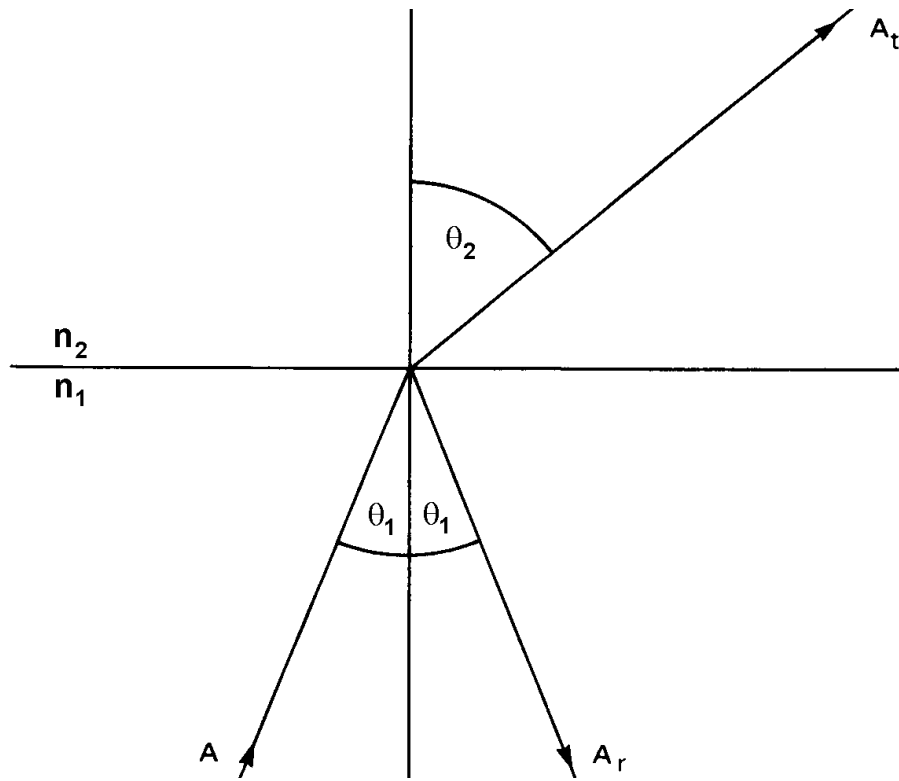


Schemat typowego systemu telekomunikacji światłowodowej

Elementy i podzespoły techniki światłowodowej:

- nadajniki i odbiorniki optoelektroniczne
- światłowody i kable światłowodowe
- bierne i aktywne elementy sieci i urządzeń światłowodowych

3.2. Światłowody planarne i paskowe



Prawo Snelliusa: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

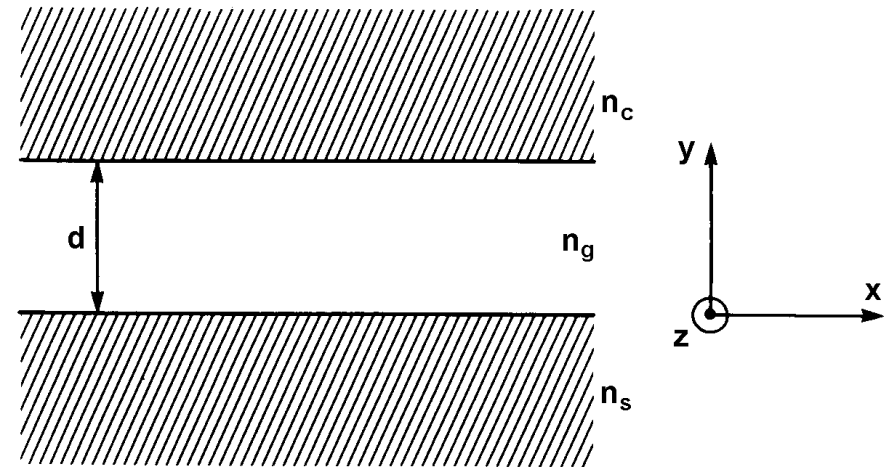
Kąt graniczny: $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

$A_r = \Gamma A$ gdzie $\Gamma = |\Gamma|e^{j2\Phi}$ - współczynnik odbicia

Współczynniki odbicia:

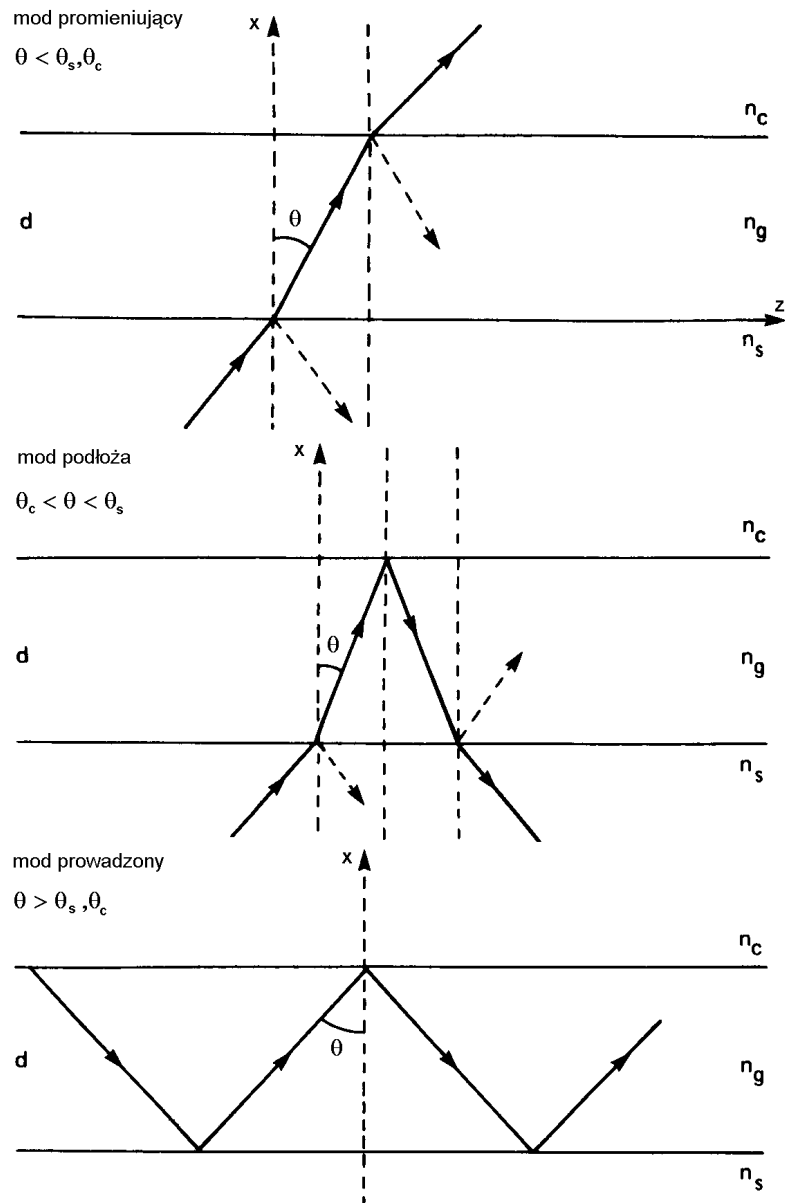
$$\Gamma_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad \text{dla polaryzacji TE}$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} - n_2^2 \cos \theta_1}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} + n_2^2 \cos \theta_1} \quad \text{dla polaryzacji TM}$$



Typowa relacja: $n_g > n_s > n_c$

Kąty graniczne: θ_s i θ_c oraz $\theta_s > \theta_c$



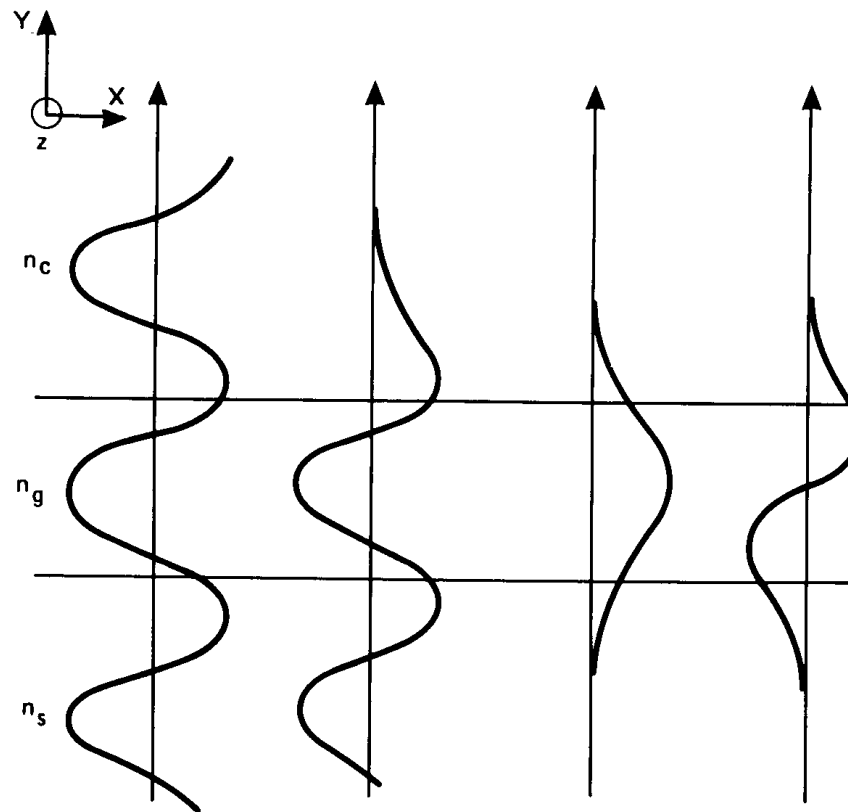
Warunek rezonansu poprzecznego dla „prowadzonego” modu:

$$2\beta_0 n_g d \cos\theta + 2\Phi_s + 2\Phi_c = 2\pi k \quad \text{dla } k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\theta > \theta_s, \theta_c \Leftrightarrow \beta_0 n_s \leq \beta \leq \beta_0 n_g$$

Skuteczny współczynnik załamania (modal guide index):

$$n_k = \frac{\beta}{\beta_0} = n_g \sin\theta$$



Znormalizowana częstotliwość:

$$V = \beta_0 d \sqrt{n_g^2 - n_s^2}$$

Znormalizowana stała propagacji:

$$b = \frac{n_k^2 - n_s^2}{n_g^2 - n_s^2}$$

Stała asymetrii dla dwóch polaryzacji:

$$a_{TE} = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_g^2 - n_s^2} \quad a_{TM} = \frac{n_g^4 n_s^2 - n_c^2}{n_c^4 n_g^2 - n_s^2}$$

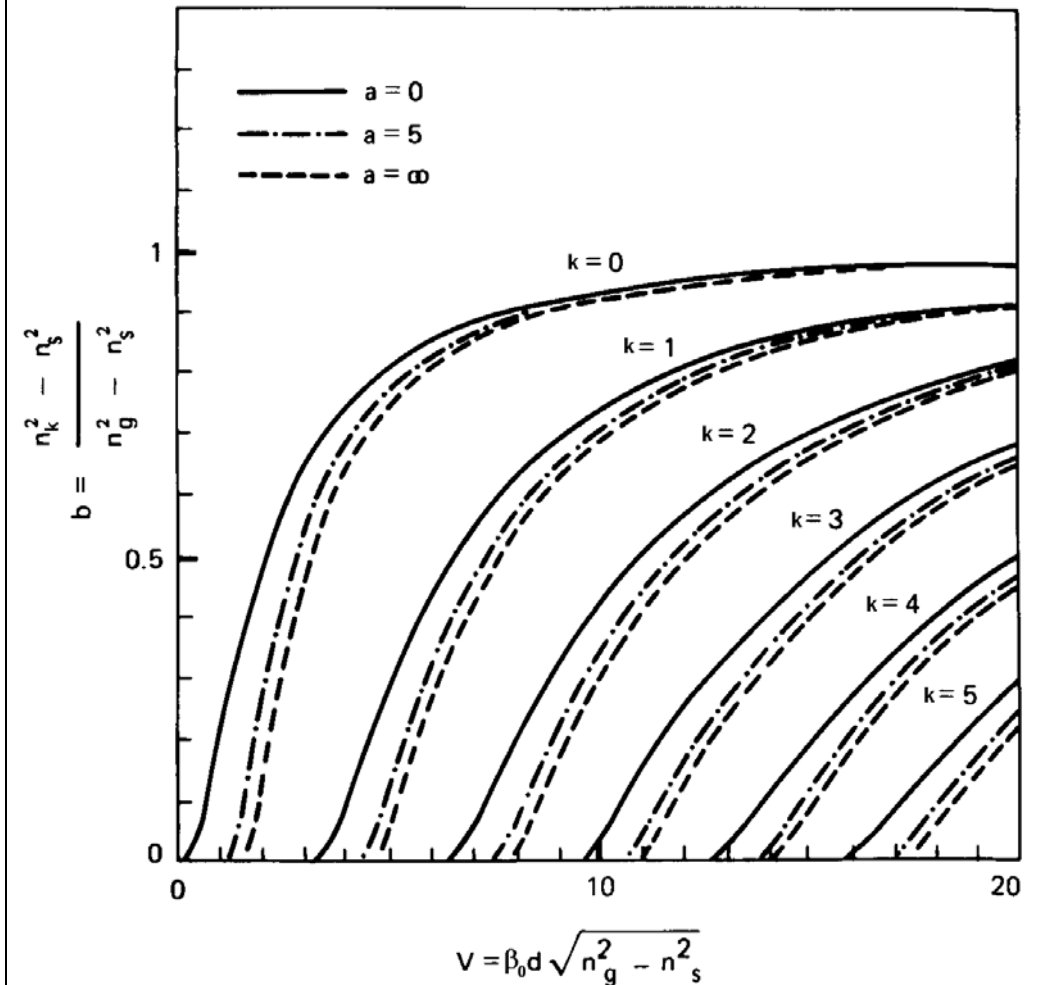
Równanie dyspersji:

$$-b = k\pi + \arctg \sqrt{b / (1 - b)} + \arctg \sqrt{(b + a)(1 - b)}$$

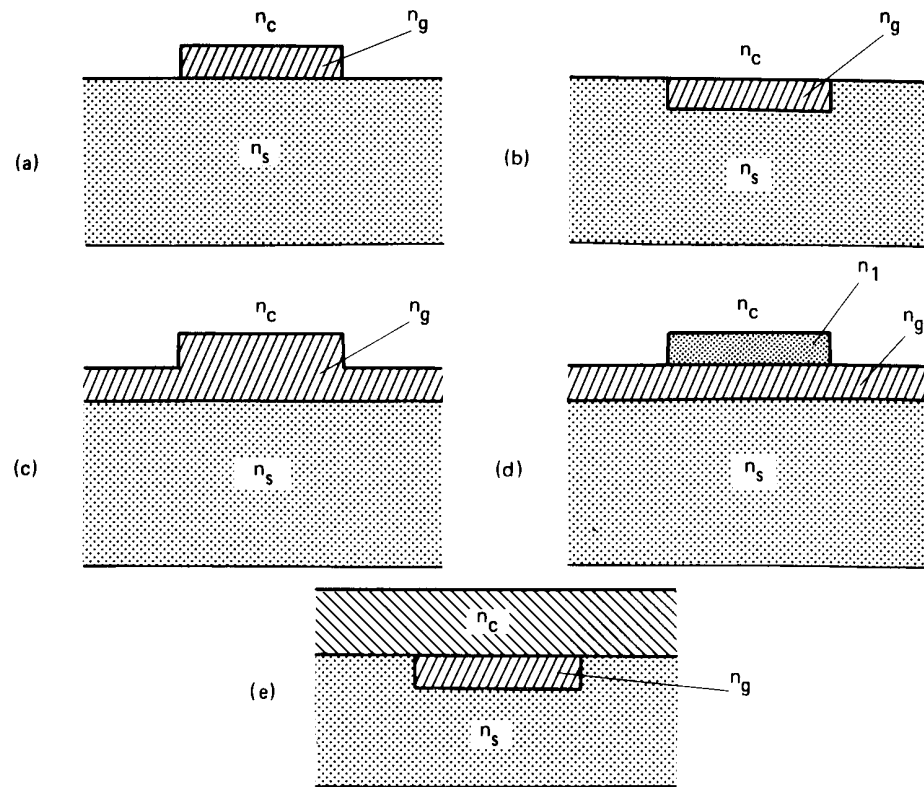
Dla $b=0$ równanie częstotliwości granicznych:

$$V_k = \arctg \sqrt{a} + k\pi$$

Znormalizowana charakterystyka dyspersji

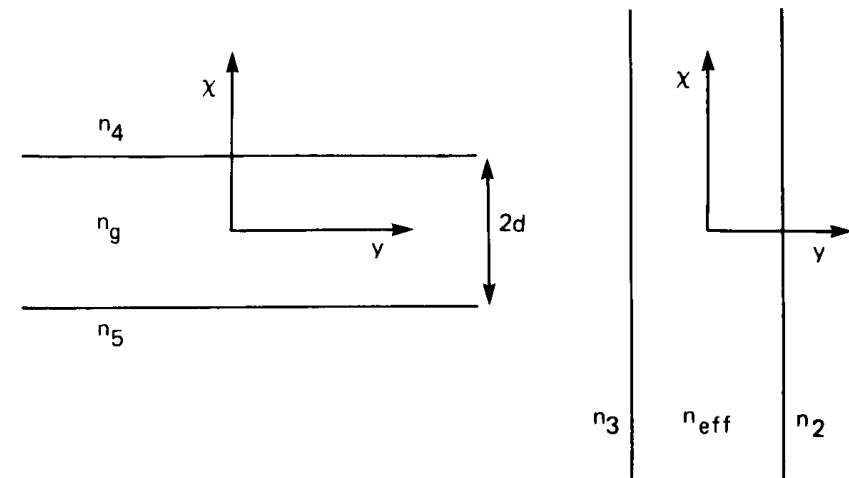
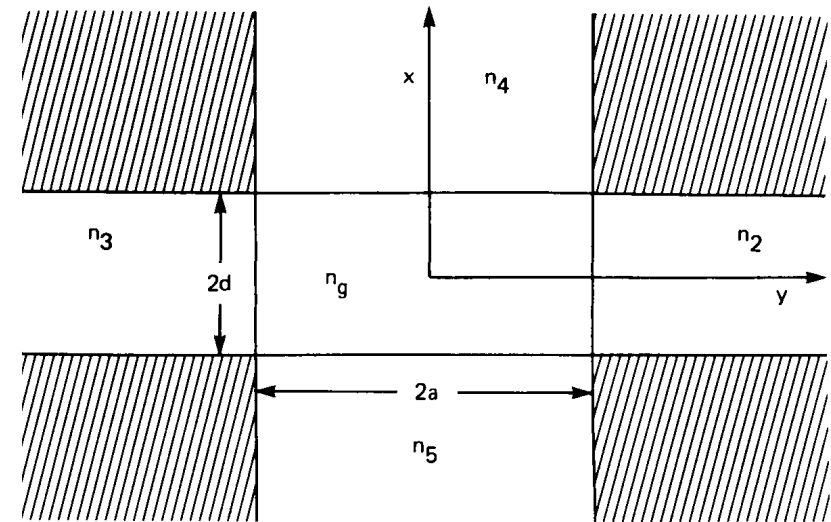


Struktury światłowodów paskowych



- (a) - „podniesiony” światłowod paskowy
- (b) - „wtopiony” światłowod paskowy
- (c) - światłowod grzbietowy
- (d) - światłowod paskowo-„obciążony”
- (e) - światłowod zagrzebany

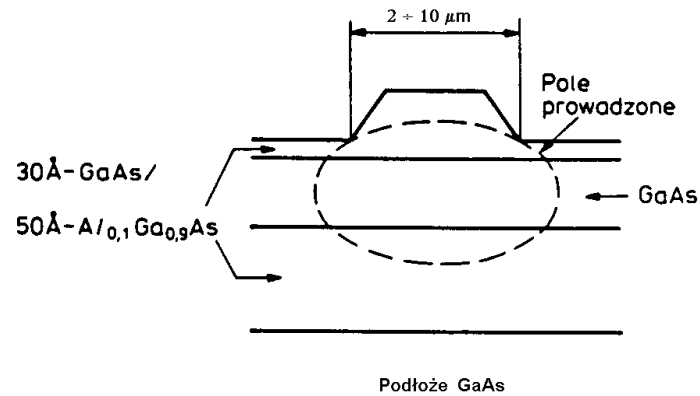
Metoda efektywnego współczynnika załamania



Światłowody paskowe:

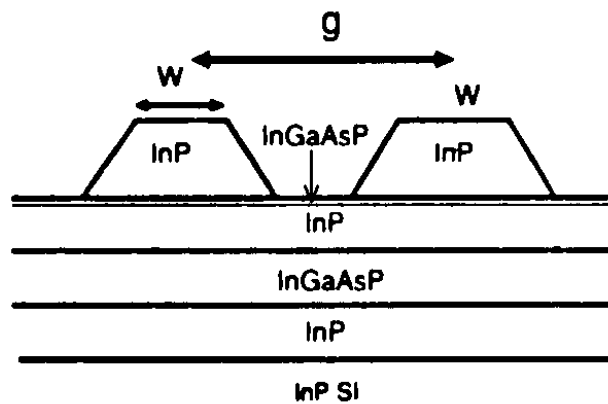
Zastosowanie \Rightarrow przyrządy optofalowe

Materiał \Rightarrow półprzewodnik, niobian litu

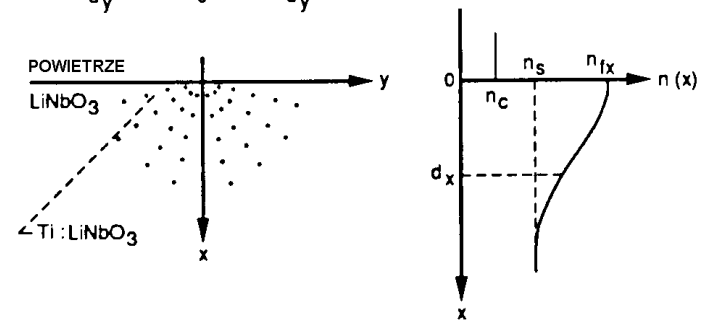
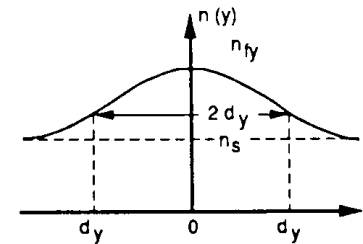
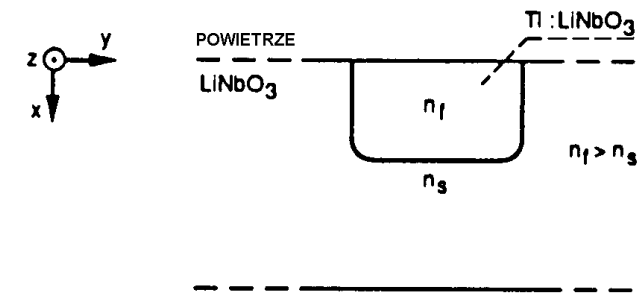


Stała tłumienia światłowodu półprzewodnikowego:
 $\approx 0,15 \text{ dB/cm}$

Sprężone światłowody paskowe

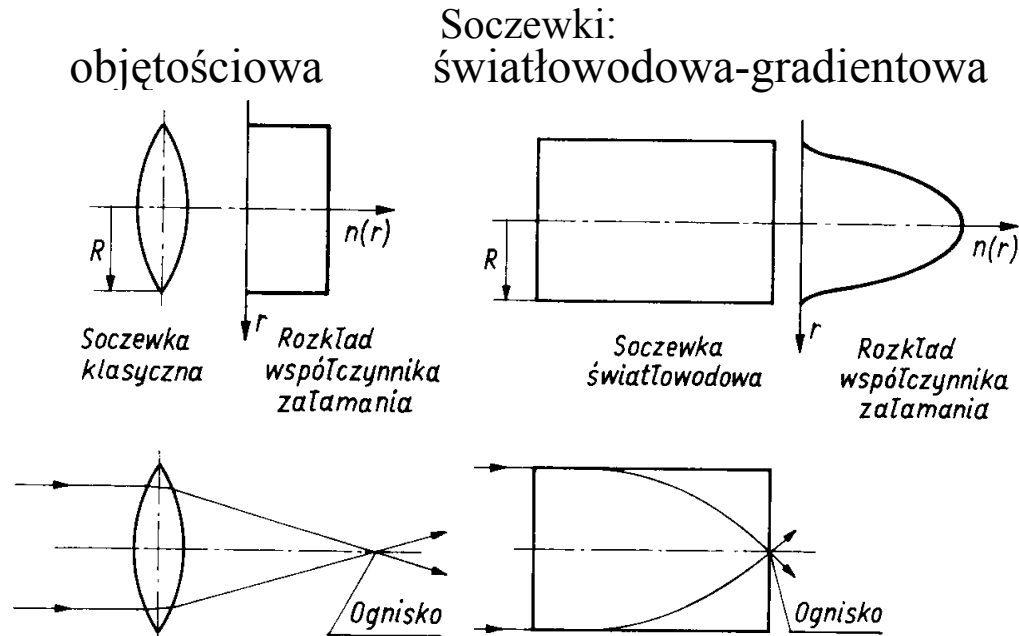


Paskowy światłowód Ti:LiNbO₃

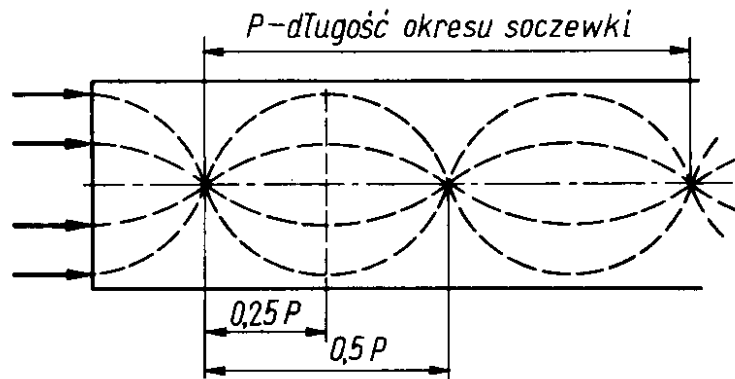


Stała tłumienia światłowodu: $< 0,1 \text{ dB/cm}$

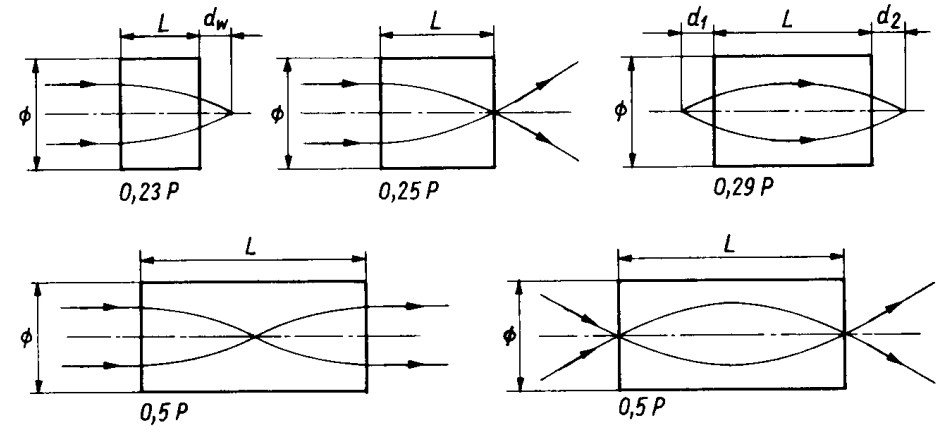
3.3. Światłowodowe soczewki cylindryczne i planarne



Trajektorie promieni w światłowodzie z parabolicznym rozkładem współczynnika załamania



Typowe rodzaje światłowodowych soczewek



P - długość okresu soczewki; L - długość soczewki
Typowe wymiary: $R=1-2$ mm; $L=3-30$ mm

Profil rozkładu współczynnika załamania:

$$n(r) = n(0) \cdot \left(1 - \frac{A}{2} r^2\right)$$

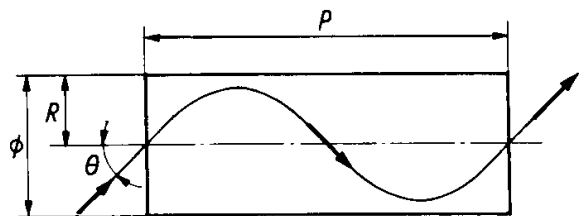
A - parametr rozkładu współczynnika załamania

Równanie promienia:

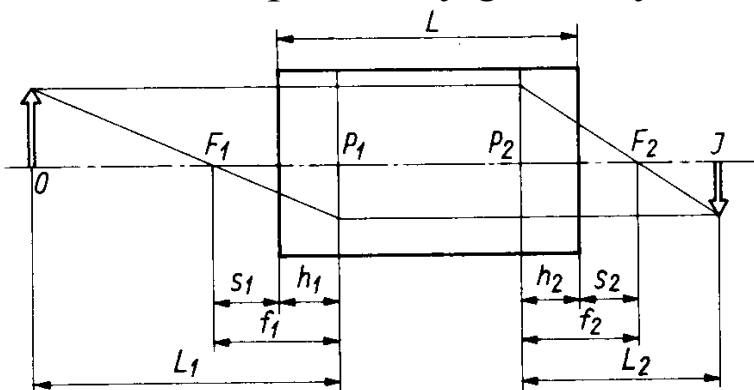
$$\frac{d^2 r}{dz^2} + Ar = 0 \text{ gdy } \begin{cases} r(0) = r_0 \\ \left. \frac{dr}{dz} \right|_{z=0} = 0 \end{cases} \Rightarrow r(L) = r_0 \cos(\sqrt{A} \cdot L)$$

Okres soczewki: $P = \frac{2\pi}{\sqrt{A}}$

Trajektoria promienia świetlnego



Podstawowe parametry geometryczne



P_1, P_2 - płaszczyzny główne; F_1, F_2 - ogniska;

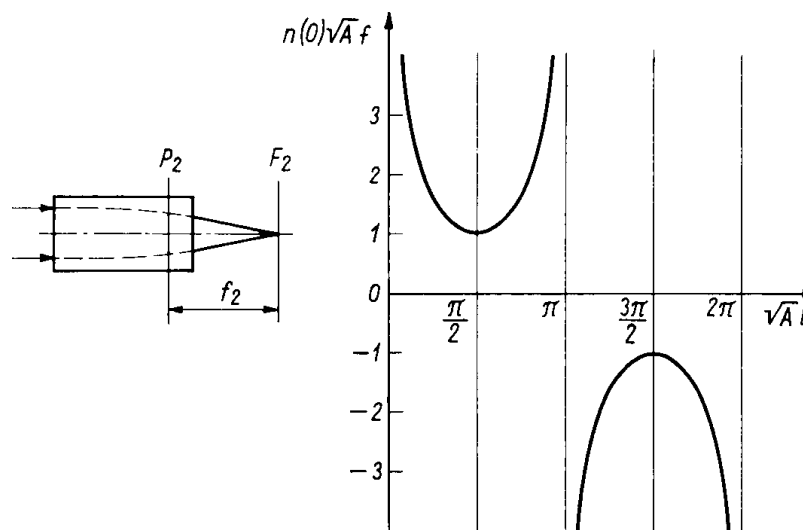
O, J - przedmiot i obraz; S_1, S_2 - odl;

h_1, h_2 - odległość od czoła soczewki do P_1, P_2 ;

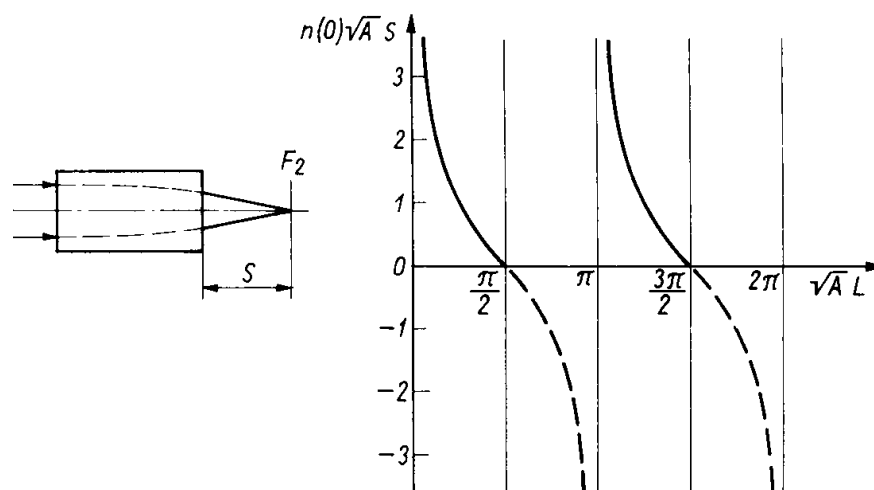
Ogniskowe: $f_1 = f_2 = \left[n(0)\sqrt{A} \sin(\sqrt{A}L) \right]^{-1}$

Odległości pracy: $S_1 = S_2 = \frac{\text{ctg}(\sqrt{A}L)}{n(0)\sqrt{A}}$

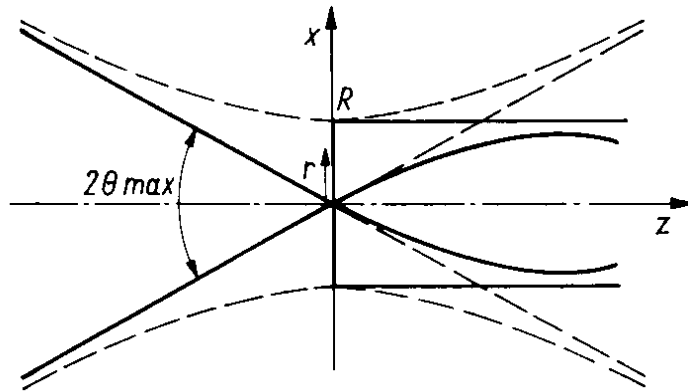
Zależność ogniskowej od długości soczewki



Zależność odległości pracy od długości soczewki



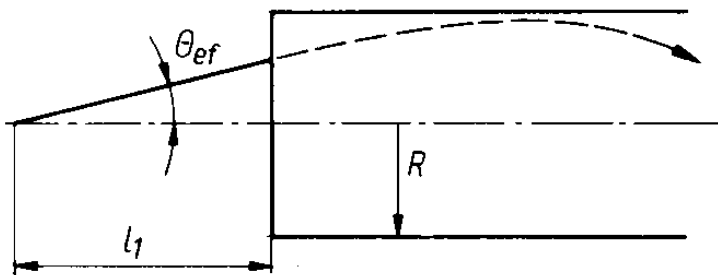
Stożek akceptowanych promieni



Apertura numeryczna:

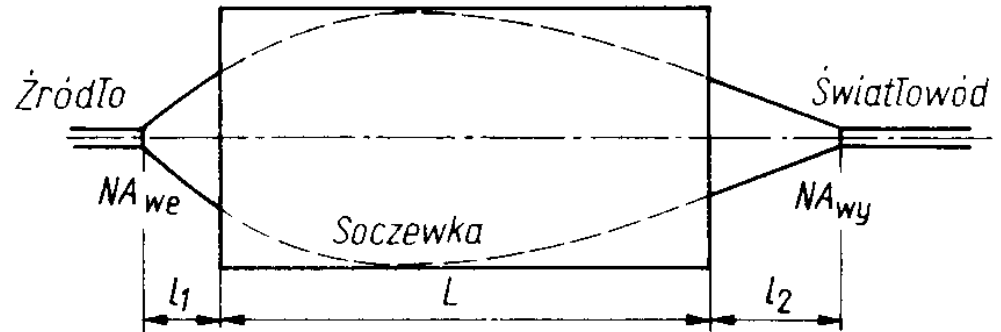
$$NA = \sin \theta_{\max} = n(0)R \sqrt{A \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]}$$

Efektywna apertura numeryczna

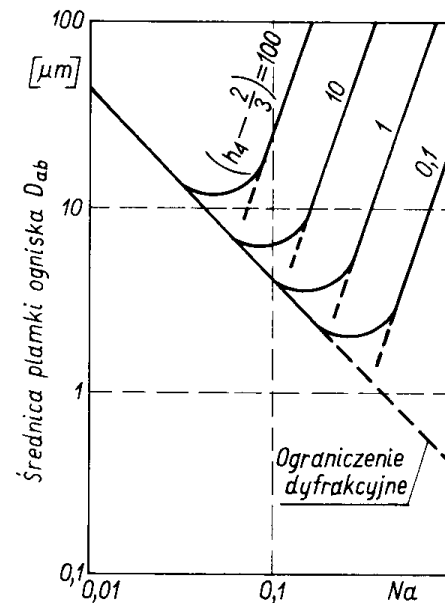


Funkcje światłowodowych soczewek

✓ Transformacja apertury numerycznej



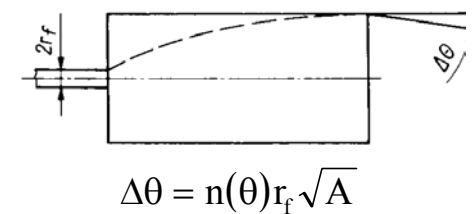
✓ Ogniskowanie i kolimacja



$$D_{\text{dyf}} = \frac{1.22\lambda}{NA}$$

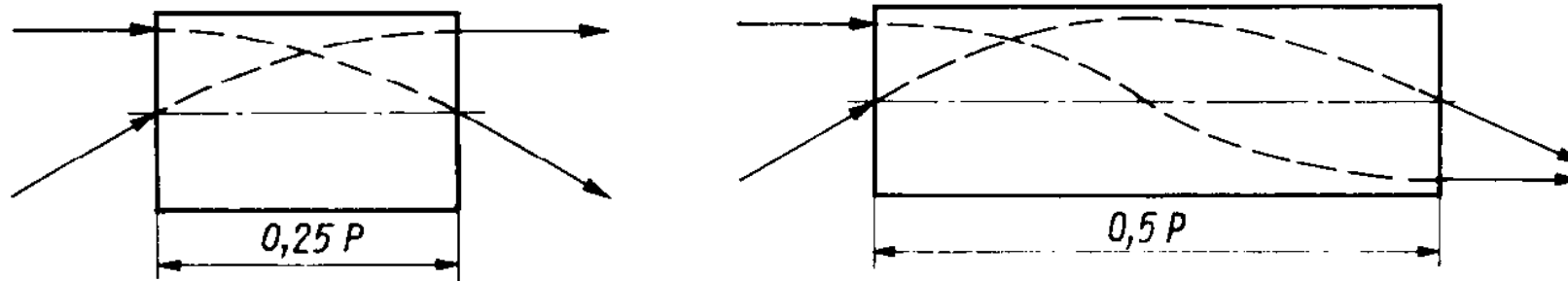
$$D_{\text{ab}} = 0.084 \left(h_4 - \frac{2}{3} \right) L (\sqrt{AR})$$

Efekt kolimacji

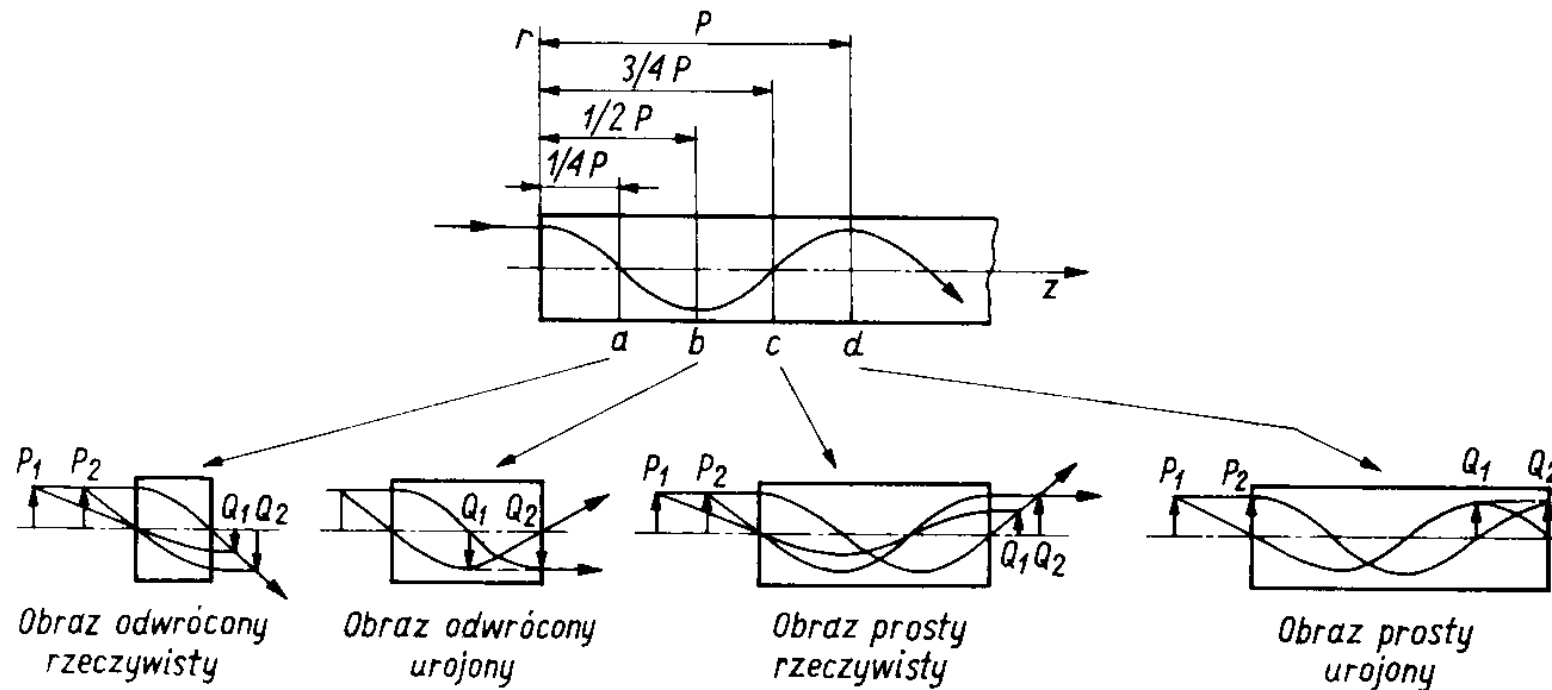


$$\Delta\theta = n(\theta)_r \sqrt{A}$$

✓ Transformacja położenia i kąta padania

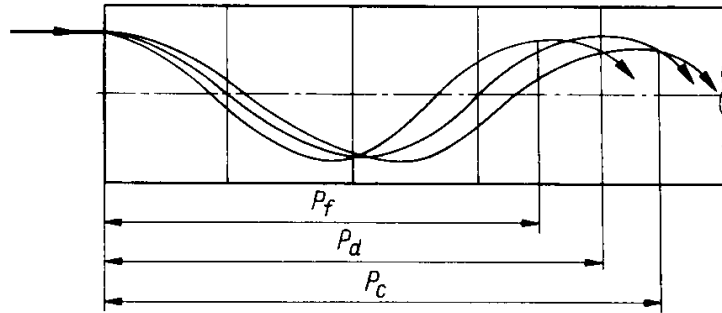


✓ Przenoszenie obrazu



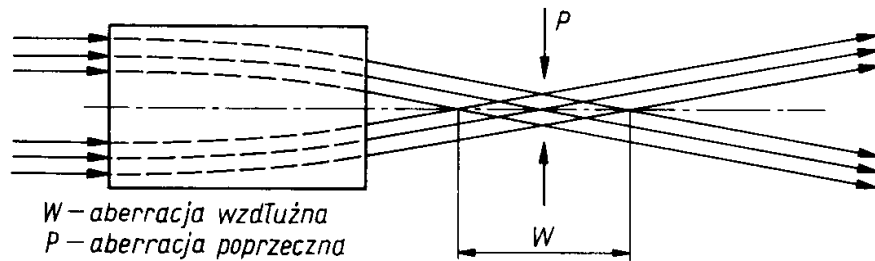
Aberracje światłowodowych soczewek

✓ Aberracja chromatyczna



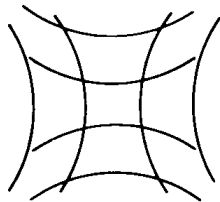
P_c - dla $\lambda=1550$ nm; P_d - dla $\lambda=1300$ nm; P_c - dla $\lambda=850$ nm.

✓ Aberracja sferyczna

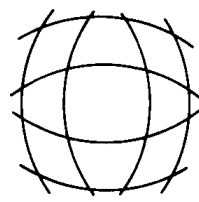


Zniekształcenia obrazu typu:

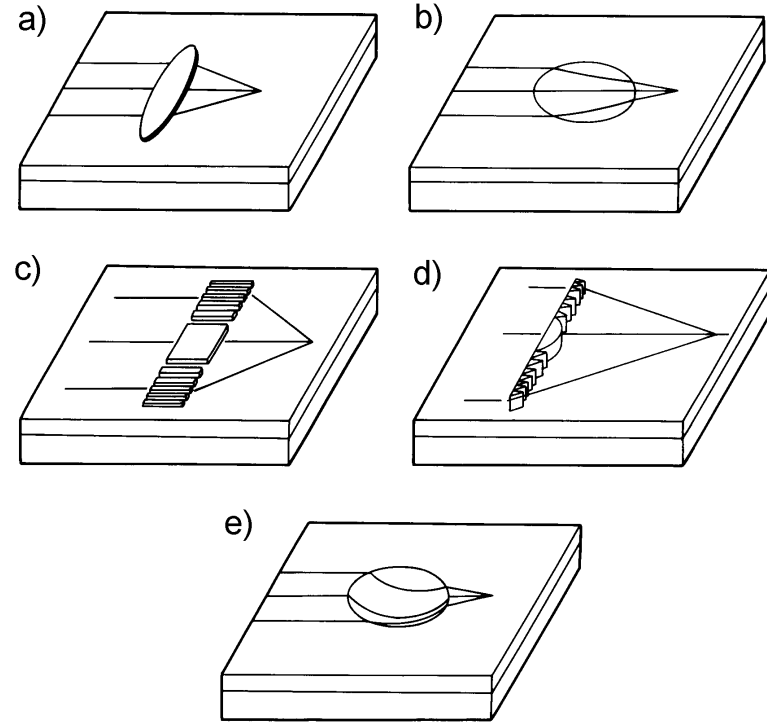
poduszka



beczka



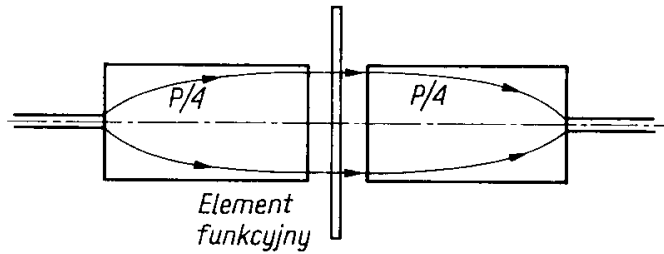
Soczewki planarne



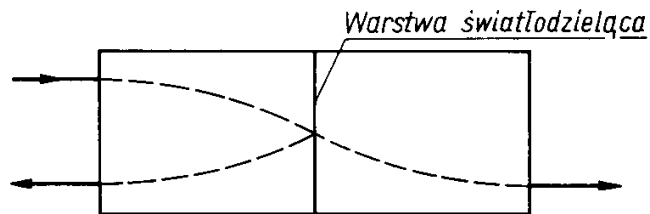
- a) planarna, odbiciowa soczewka równoważna soczewce objętościowej;
- b) soczewka gradientowa (Luneburg'a);
- c) dyskretna soczewka Fresnel'a;
- d) ciągła (analogowa) soczewka Fresnel'a;
- e) soczewka geodezyjna.

Przykładowe zastosowania

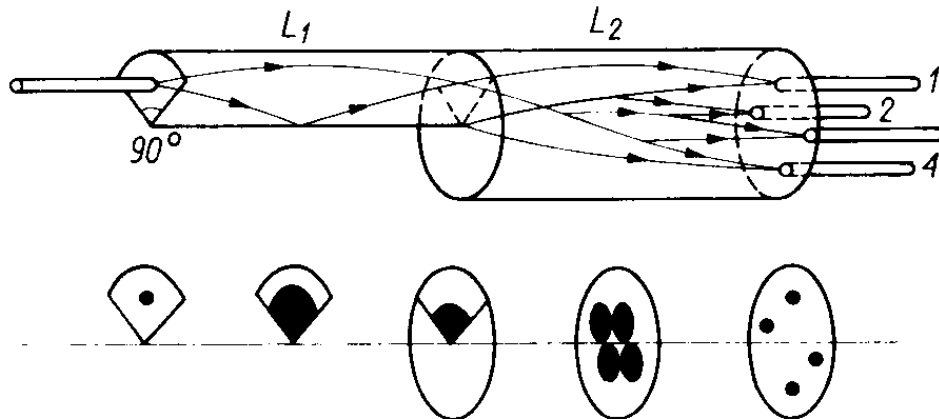
✓ Łączenie światłowodów



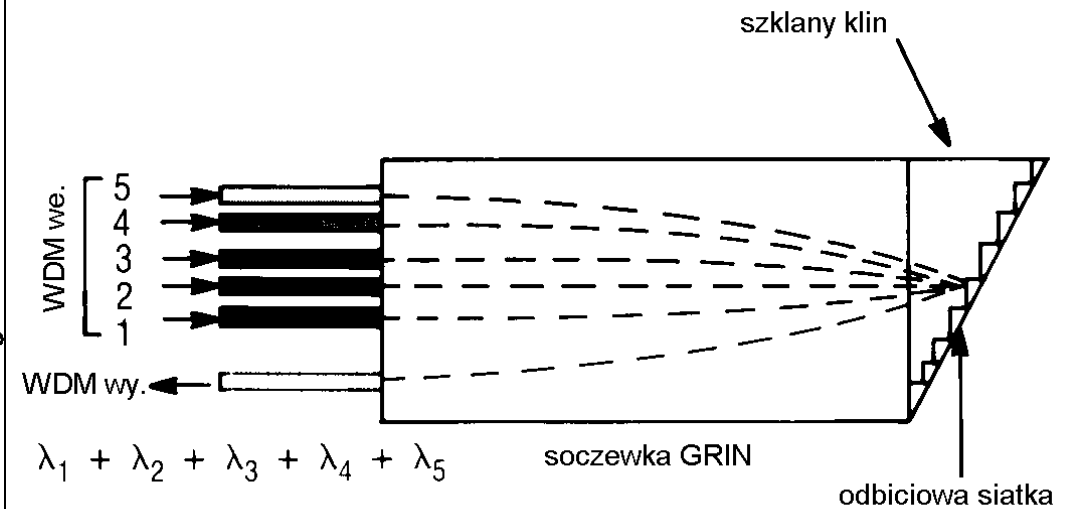
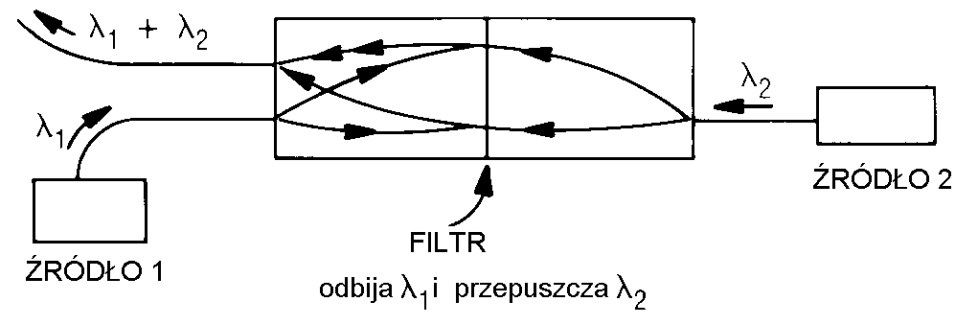
✓ Sprzęgacz kierunkowy



✓ Powielanie obrazu



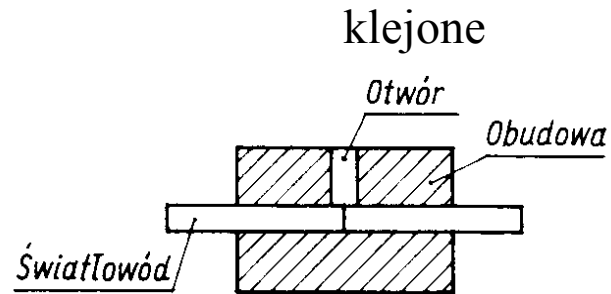
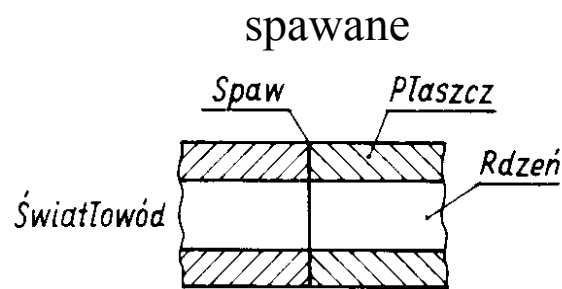
✓ Multiplexer



3.4. Złącza w torze optycznym

Sprzężenie optyczne światłowodów

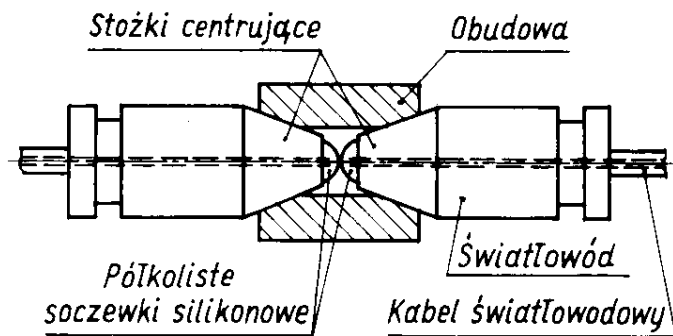
✓ Złącza trwałe



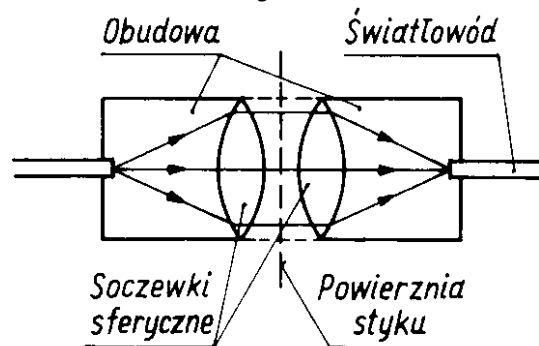
Typowe straty: 0.01 dB - 0.1 dB

✓ Złącza rozłączalne

z centrującym stożkiem



z kolimacją soczewkową



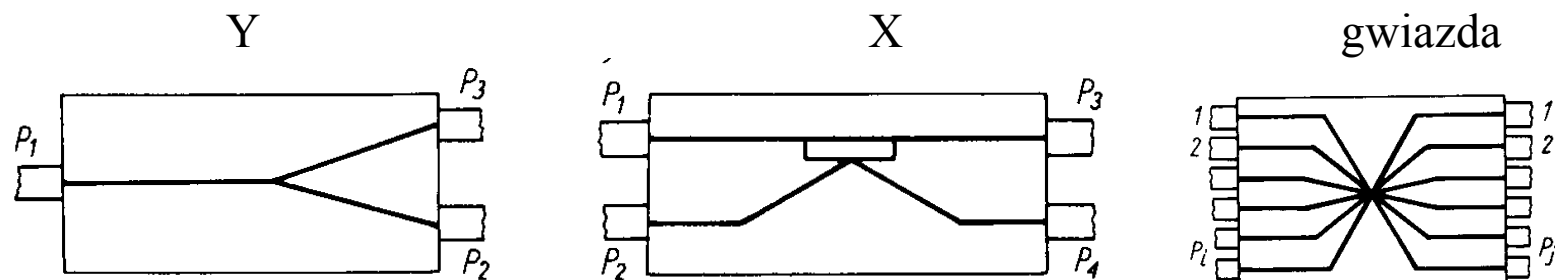
Typowe straty: 0.3 dB - 1.5 dB

Przyczyny strat mocy w złączach:

- rozproszenia i odbicia
 - * niejednorodności złączy stałych
 - * odbicia frenalowskie na nieciągłościach złączy rozłączalnych
- niedopasowanie własności optycznych i struktury włókien
 - * rozkładów współ. załamania
 - * apertur numerycznych
 - * średnic rdzeni i płaszczy
 - * położenia rdzenia w płaszczu
 - * eliptyczność rdzenia
- niedokładności geometryczne położenia łączonych włókien
 - * przesunięcia radialne i wzdłużne
 - * odchylenia kątowe osi i czół
 - * niedokładna obróbka płaszczyzn czół (prostopadłość do osi, płaskość, gładkość)

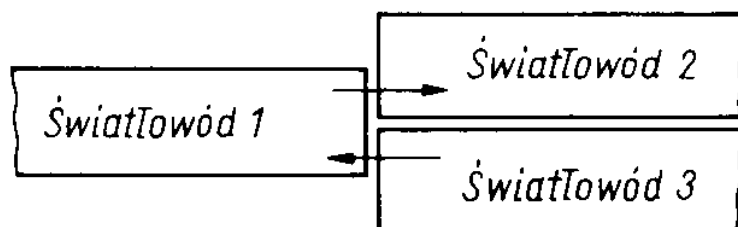
3.5. Sprzęgacze, przełączniki włókniste i planarne

Typy sprzęgaczy ze względu na funkcję w torze optycznym: 1x2; 2x2; 1xN; MxN; NxN

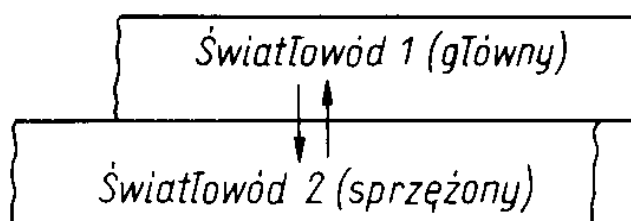


Techniki wykonania sprzężenia:

czołowe



boczne



Parametry sprzęgacza typu X:

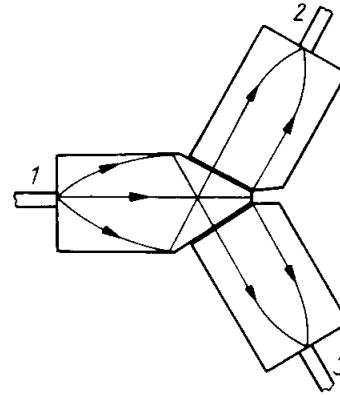
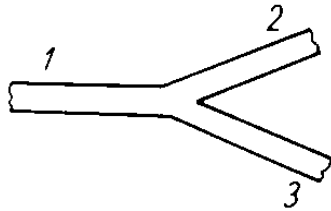
- sprzężenie $\Leftrightarrow C \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_1}{P_4}$
- izolacja $\Leftrightarrow I \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}$
- kierunkowość $\Leftrightarrow D \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_4}{P_2} = I - C$

Spotyka się również następujące definicje:

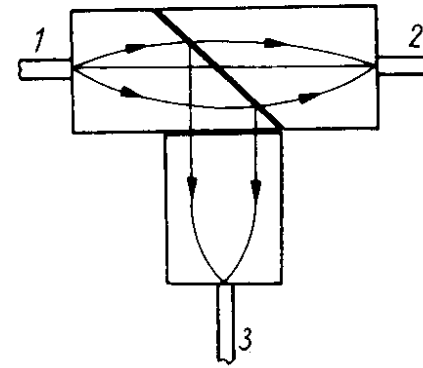
- ◆ straty wewnętrzne toru głównego $\Leftrightarrow I_m \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_3}{P_1}$
- ◆ kierunkowość sprzężenia $\Leftrightarrow S_{ms} \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$
- ◆ efektywność sprzężenia $\Leftrightarrow E_m \text{ [dB]} = 10 \lg \frac{P_3 + P_4}{P_1}$

Sprzężanie czołowe włókien

Technologia: spawanie

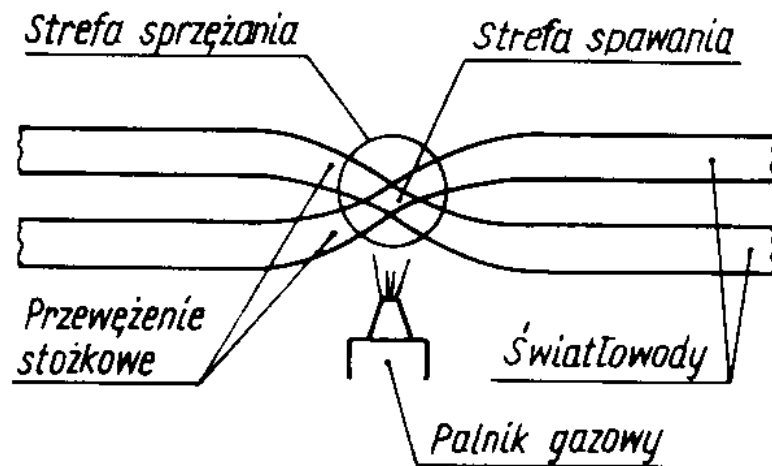


mikrooptyka

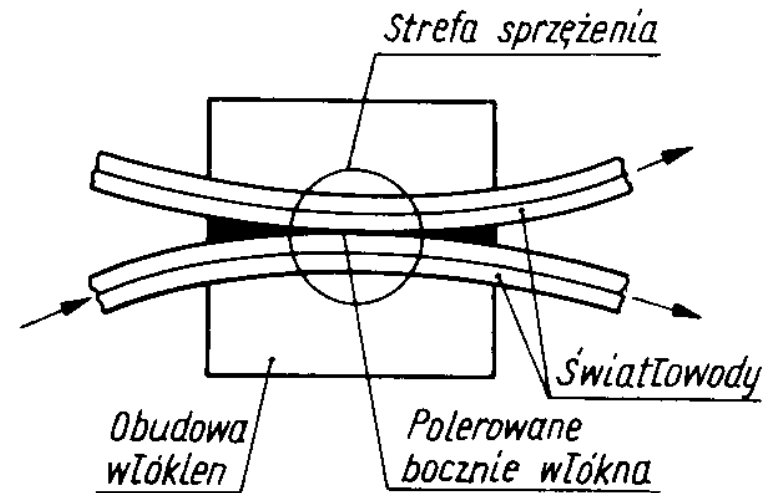


Sprzężanie boczne włókien

Technologia: spawanie z rozciąganiem



klejenie z polerowaniem



Stosowane techniki wykonywania sprzęgaczy światłowodowych

Techniki sprzęgania	Stosowane technologie mechanicznego łączenia włókien	Stosowane elementy wspomagające sprzężenie
Sprzężanie czołowe	technologia mikrooptyczna (klejenie elementów)	mikrooptyczne (pryzmaty, siatki, stożki światłowodowe, soczewki objętościowe i gradientowe)
	technologia spawania (stapianie włókien)	przewężenie stożkowe, trawienie chemiczne
Sprzężanie boczne	technologia spawania (stapianie włókien)	przewężenie stożkowe, skręcanie, trawienie chemiczne
	technologia klejenia (klejenie włókien)	zginanie włókien, boczne ścinanie włókien