



TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

2. Światłowody

Spis treści:

- 2.1. Wprowadzenie.
- 2.2. Światłowody wielo- i jednomodowe.
- 2.3. Tłumienie światłowodów.
- 2.4. Dyspersja światłowodów.
- 2.5. Pobudzanie i łączenie światłowodów.
- 2.6. Podsumowanie

2.1. WPROWADZENIE - CO TO JEST ŚWIATŁOWÓD ?

⇒ Światłowód - cylindryczny falowód dielektryczny, wykonany z niskostratnego materiału, zwykle ze szkła kwarcowego.

⇒ Rdzeń światłowodu ma współczynnik załamania większy, niż ośrodek, który go otacza – płaszcz..

⇒ Światło jest prowadzone wzdłuż osi rdzenia światłowodu, ulegając kolejnym całkowitym wewnętrznym odbiciom.

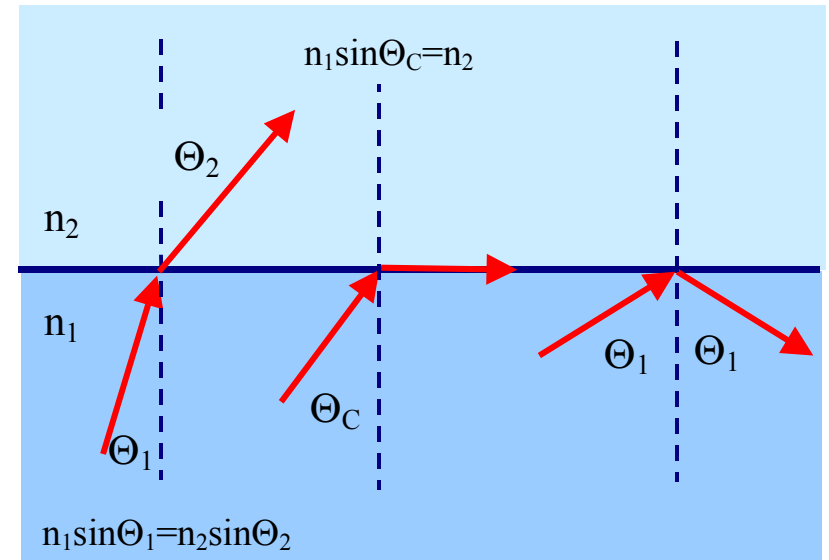
⇒ Prawo załamania:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2;$$

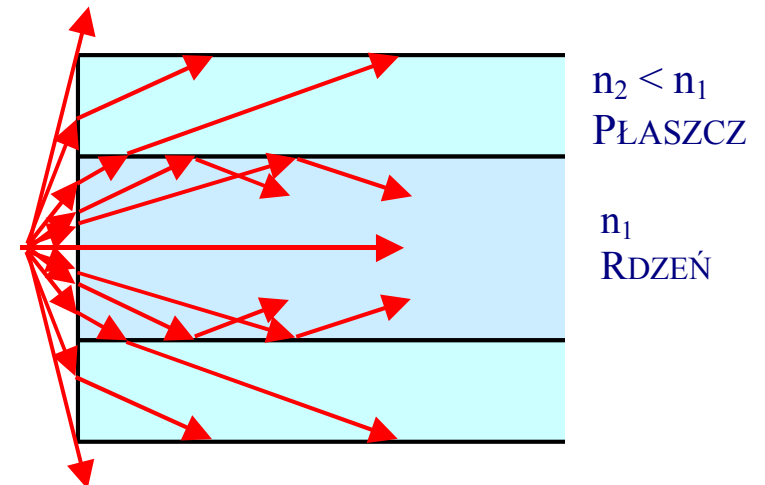
⇒ Kąt krytyczny θ_c zapewniający całkowite wewnętrzne odbicie:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1};$$

Rys.2.2. Propagacja promieniowania wzdłuż światłowodu włóknistego



Rys.2.1. Światło na granicy 2 ośrodków



2.1. WPROWADZENIE - PRĘDKOŚCI FAZOWA I GRUPOWA (A)

- Monochromatyczna fala EM o pulsacji ω , rozchodząca się w ośrodku bezstratnym (ogólniej: małostratnym) w kierunku osi z , np. określony mod w światłowodzie, opisuje się prosto jako:

$$E(t, z) = A_E \exp[j(\omega t - \beta z)];$$

- tutaj β [rad/metr] jest stałą fazową.
- Dla płaszczyzny stałej fazy spełniony jest warunek:

$$\omega t - \beta z = 2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda_{\text{mod}}} z = \text{const.}$$

- Prędkość poruszanie się płaszczyzny stałej fazy jest prędkością fazową v_f :

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = f\lambda_{\text{mod}};$$

- tutaj λ_{mod} jest długością fali danego modu w określonym ośrodku.
- W wolnej przestrzeni wypełnionej dielektrykiem fala rozchodzi się wolniej niż c (prędkość światła w próżni), a stopień spowolnienia fali pozwala określić współczynnik załamania ośrodka:

$$n = \frac{c}{v_f};$$

- Wartość prędkości fazowej v_f zależy od ośrodka, modu i częstotliwości.

2.1. WPROWADZENIE - PRĘDKOŚCI FAZOWA I GRUPOWA (B)

- Prędkość transmisji informacji/energii to prędkość grupowa. Obliczamy ją jako prędkość transmisji obwiedni modulacji amplitudy sygnału optycznego. Na początku drogi, dla $z = 0$, pole elektryczne monochromatycznego modu zapisze się następująco:

$$E(t, z = 0) = A_0 (1 + m \cos \omega_M t) \cos \omega_L t;$$

- Po prostych przekształceniach:

$$E(t, z = 0) = A_0 \operatorname{Re} \left\{ e^{j\omega_L t} + \frac{m}{2} e^{j(\omega_L - \omega_M)t} + \frac{m}{2} e^{j(\omega_L + \omega_M)t} \right\};$$

- Trzy składniki o pulsacjach poruszają się z różnymi prędkościami fazowymi.: i W ogólności:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial^2 \beta}{2 \partial \omega^2} (\Delta \omega)^2 + \frac{\partial^3 \beta}{6 \partial \omega^3} (\Delta \omega)^3 + \dots \cong \beta_0 + \dot{\beta} \Delta \omega;$$

- Można teraz napisać stałe fazowe dla nośnej i obu wstęp bocznych:

$\omega_L - \omega_M$	$\beta_0 - \Delta \beta = \beta_0 - \dot{\beta} \omega_M$
ω_L	β_0
$\omega_L + \omega_M$	$\beta_0 + \Delta \beta = \beta_0 + \dot{\beta} \omega_M$

- Obecność składników z $\partial^2 \beta / \partial \omega^2$ i $\partial^3 \beta / \partial \omega^3$ zniekształca obwiednię.

2.1. WPROWADZENIE - PRĘDKOŚCI FAZOWA I GRUPOWA (C)

- W wyniku propagacji fali na odległości z otrzymuje się;

$$E(t, z = 0) = A_0 [1 + m \cos(\omega_M t - \Delta\beta z)] \cos(\omega_L t - \beta_0 z);$$

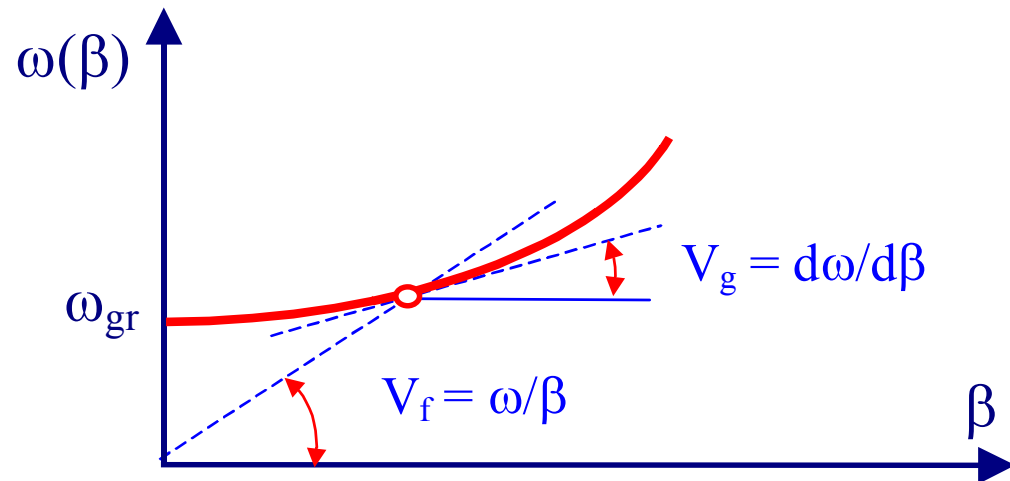
- Płaszczyzna stałej fazy obwiedni modulacji porusza się z prędkością grupową v_g :

$$v_g = \frac{1}{\dot{\beta}} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta};$$

- Zależność $\beta(\omega)$ określa prędkości v_f i v_g , różne dla różnych modów i przewodnic.

$$E(t, z = 0) = A_0 \left[1 + m \cos \omega_M \left(t - \frac{z}{v_g} \right) \right] \cos \omega_L \left(t - \frac{z}{v_f} \right);$$

Rys.2.3. Ilustracja określenia prędkości fazowej v_f i grupowej v_g z charakterystyki $\omega(\beta)$.



2.2. ŚWIATŁOWODY WIELO- I JEDNOMODOWE (A)

⇒ Właściwości transmisyjne światłowodu określa jego profil współczynnika odbicia.

⇒ W **światłowodzie o profilu skokowym** (ang. *Step-index fiber*) wartość współczynnika odbicia rdzenia n_1 maleje skokowo do wartości n_2 w płaszczu.

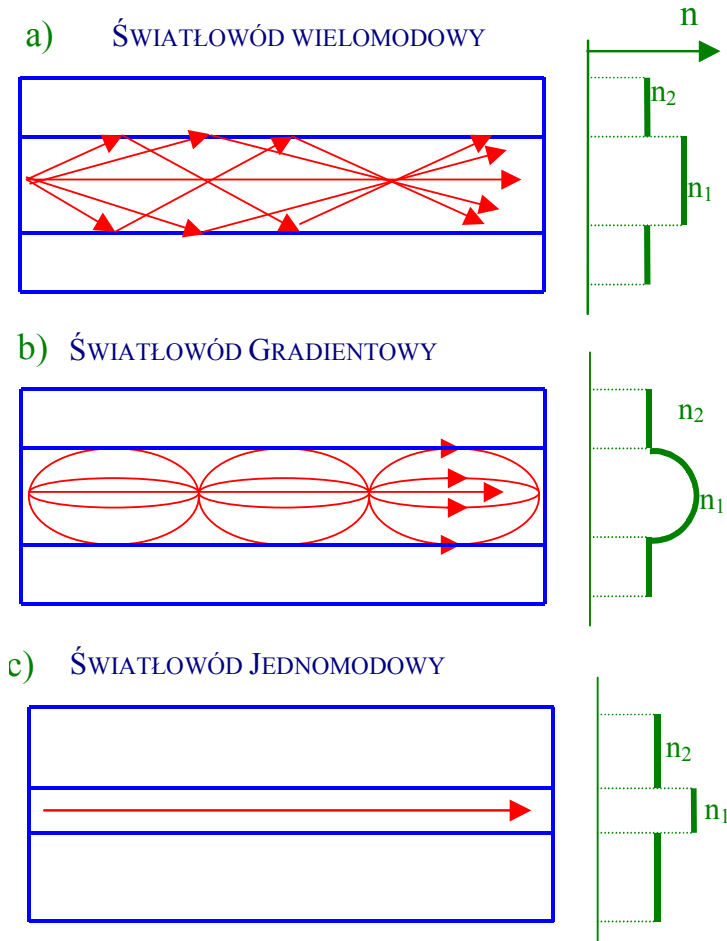
⇒ Przykładowe wartości stosunku $2a/2b$ w μm :

$$\frac{8}{125}, \frac{50}{125}, \frac{62,5}{125}, \frac{85}{125}, \frac{100}{140};$$

⇒ Promieniowanie propagowane jest wzdłuż światłowodu w formie modów.

⇒ Każdy mod charakteryzuje się innym przestrzennym rozkładem pola EM, innymi wartościami:

- stałej propagacji,
- prędkości grupowej i fazowej,
- polaryzacji i tłumienia.



Rys.2.4. Profile współczynników załamania światłowodów. a) Profil skokowy. B). Profil gradientowy. c). Jednomodowy

2.2. ŚWIATŁOWODY WIELO- I JEDNOMODOWE (B)

⇒ Rdzeń i płaszcz wykonane są z SiO_2 , różnice w wartości n przez domieszkowanie tytanem, germanem, borem...

$$n = 1,44 \dots 1,46;$$

⇒ Różnica wartości współczynników załamania jest niewielka:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,001 \dots 0,02;$$

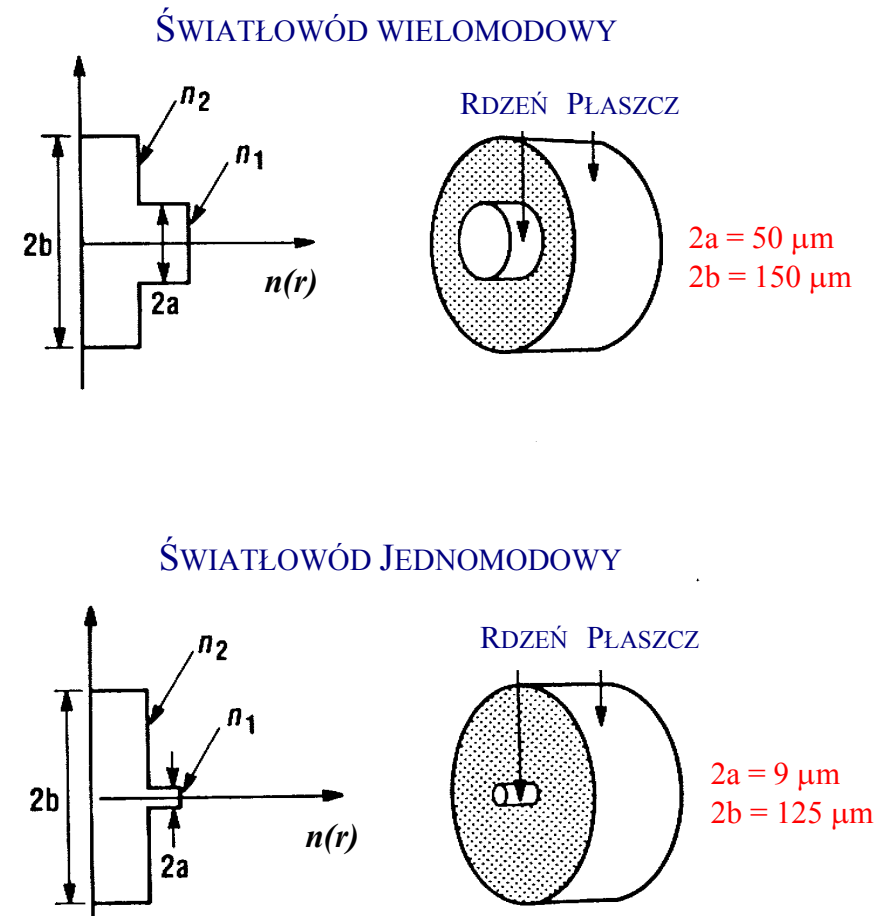
⇒ W światłowodzie propagowane są mody TM, TE, HE i EH (hybrydowe).

⇒ Ogólna postać pola E:

$$E(r, \phi, z, t) = f(r) \cos(\omega t - \beta z - \theta) \cos(q\phi);$$

⇒ $f(r)$, β i q znajduje się dla poszczególnych modów rozwiązując równanie falowe.

⇒ Liczba M propagowanych modów zależy od wartości stosunku a/λ_0 promienia rdzenia do długości fali.



Rys.2.5. Profile współczynników załamania i rozmiary światłowodów.

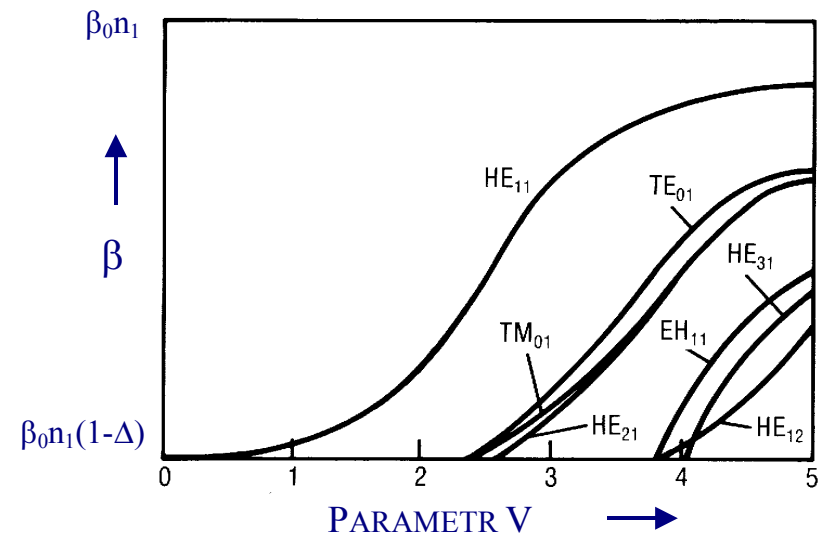
2.2. ŚWIATŁOWODY WIELO- I JEDNOMODOWE – MODY (A)

⇒ Można wprowadzić parametr V , zwany też znormalizowaną częstotliwością:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta};$$

⇒ Dla $V \gg 1$ liczba modów jest duża, $M \cong \frac{V^2}{2}$;

Rys.2.5. Kolejne mody wzbudzone w światłowodzie. Mod podstawowy HE_{11} ma częstotliwość graniczną równą 0.

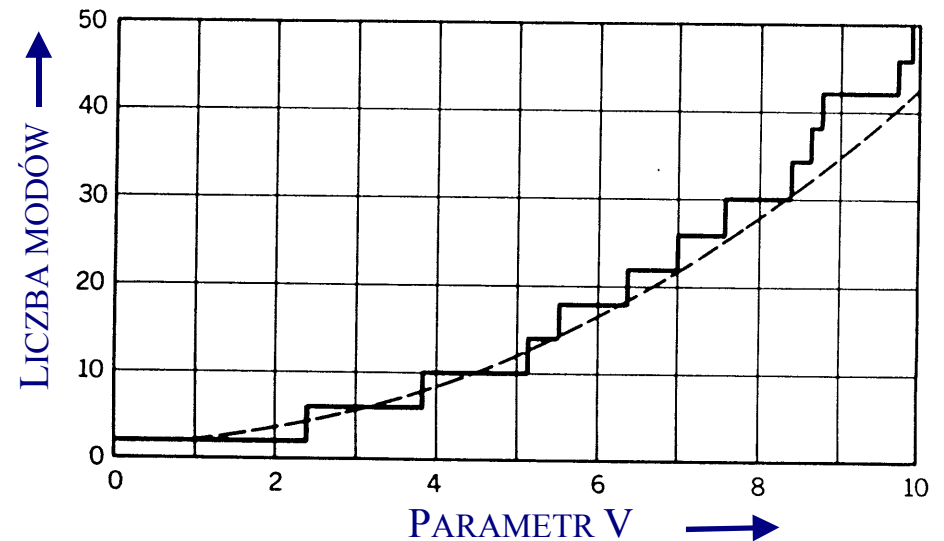


Przykład:

$$n_1 = 1,46; n_2 = 1,45; 2a = 50 \mu\text{m};$$

$$V = 20; \lambda = 1,27; M = 200;$$

Rys.2.6. Liczba M modów światłowodu w zależności od wartości parametru V . Dla $V < 2,405$ w światłowodzie wzbudza się tylko 1 mod podstawowy



2.2. ŚWIATŁOWODY WIELO- I JEDNOMODOWE – MODY (B)

→ W światłowodzie może rozchodzić się tylko jeden mod podstawowy, jeżeli spełniony jest warunek:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405;$$

→ Można wprowadzić pojęcie krytycznej długości fali λ_c , albo granicznej długości fali:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405} = \frac{V}{V_c} \lambda;$$

→ Gdy $\lambda > \lambda_c$ tylko jeden mod będzie propagowany.

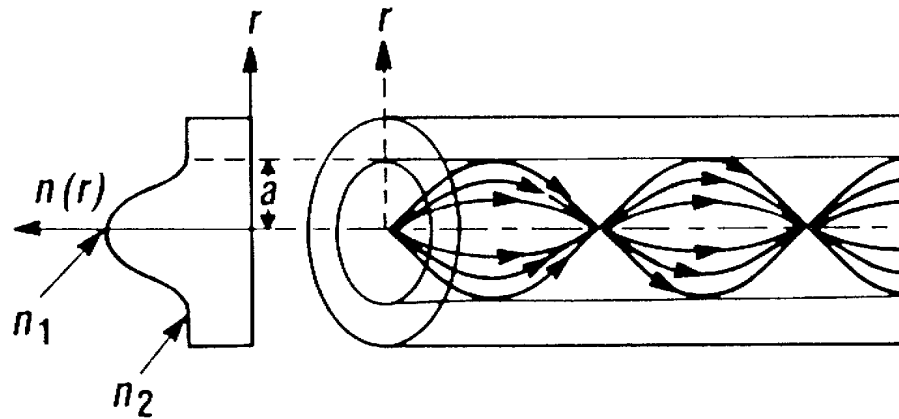
Przykład: $2a = 10 \mu\text{m}$; $n_1 - n_2 = 0,003$; $\lambda_c = 1,22 \mu\text{m}$;

	Św. jednomodowy	Św. wielomodowy
$2a$	$10 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m}$
Δn	0,003	0,01
V dla 1300 nm	$< 2,4$	20
Liczba modów	1	200

2.2. ŚWIATŁOWODY- ŚWIATŁOWÓD O PROFILU GRADIENTOWYM

- ⇒ W światłowodzie o **profilu gradientowym** (ang. *Graded-index fiber*) współczynnik n zmienia się stopniowo od wartości n_1 maksymalnej na osi do wartości n_2 na granicy płaszczka
- ⇒ Współczynnik Δ jest zwykle mały: $\Delta \ll 1$
- ⇒ Najlepsze rezultaty w przypadku gdy profil zmian współczynnika załamania jest w przybliżeniu paraboliczny.
- ⇒ Liczba modów jest wtedy dwukrotnie mniejsza $M. \cong V^2/4$,
- ⇒ Różnica między najmniejszą i największą wartością prędkości grupowej jest także mniejsza, w granicach od c_1 do $c_1(1 - \Delta^2/2)$.

Rys.2.7. Jeszcze raz światłowod gradientowy i drogi promieni w rdzeniu



2.3. TŁUMIENIE ŚWIATŁOWODÓW (A)

× Stała tłumienia

α [dB/km] określa szybkość malenia mocy propagowanej fali:

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z};$$

$$A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{P(0)}{P(L)};$$

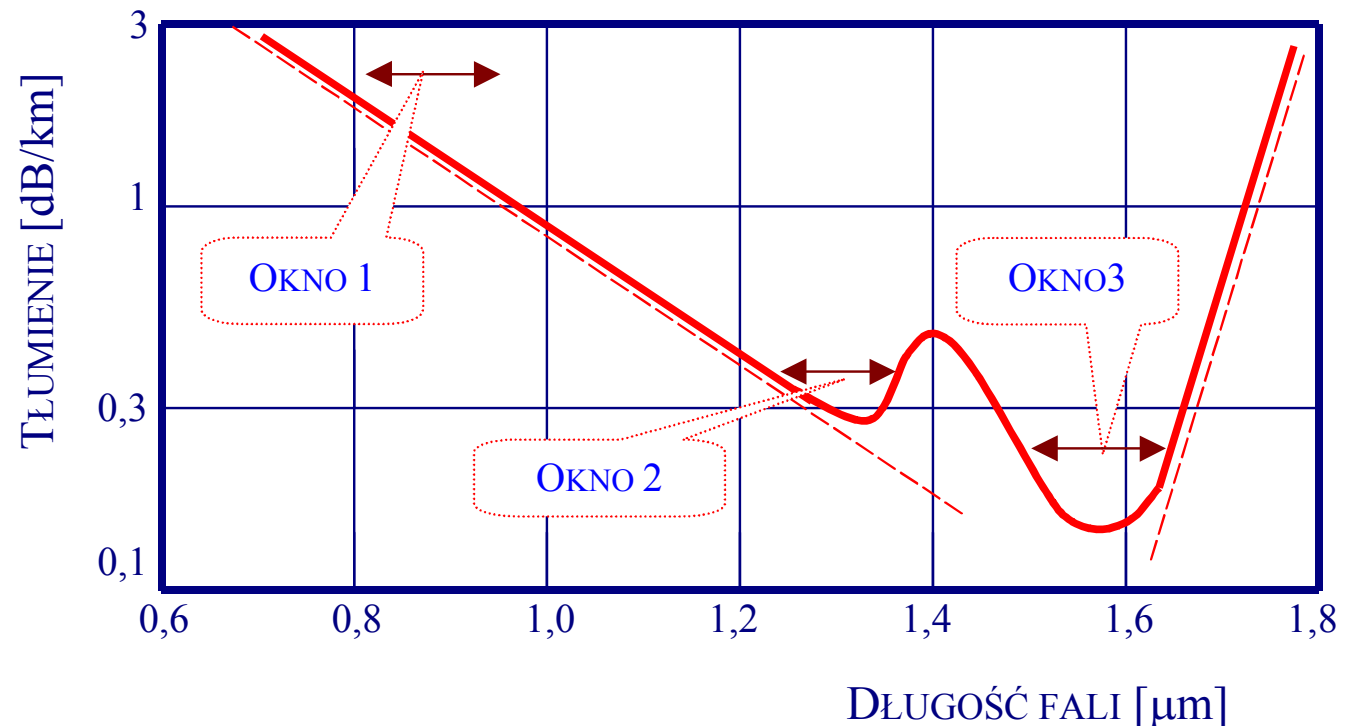
$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{A_{\text{dB}}}{L};$$

× Silna absorbcja promieniowania w:

- podczerwieni,
- ultrafiolecie.

× Użyteczne pasma światłowodu:

- Okno 1, historyczne w bliskiej podczerwieni, wokół 850 nm $\alpha_{\text{dB}} = 2-3$ dB/km.
- Okno 2, bardzo popularne, wokół 1300 nm $\alpha_{\text{dB}} = 0,5$ dB/km
- Okno 3, wokół 1550 nm, o najmniejszym tłumieniu $\alpha_{\text{dB}} = 0,2$ dB/km.



Rys.2.8. Zależność tłumienia od długości fali dla światłowodu kwarcowego.

2.3. TŁUMIENIE ŚWIATŁOWODÓW (B)

→ Przyczyny pochłaniania promieniowania:

- w zakresie podczerwieni pochłanianie powoduje drgania molekuł,
- w zakresie krótkofalowym pochłanianie związane jest z pobudzaniem molekuł i atomów,
- obecność zanieczyszczeń (w szczególności OH) powoduje zwiększenie stałej tłumienia.

→ Rozproszenie Rayleigh'a wywołane lokalnymi niejednorodnościami, które rozpraszają część mocy, powodując odbicia i rozproszenie poza światłowód.

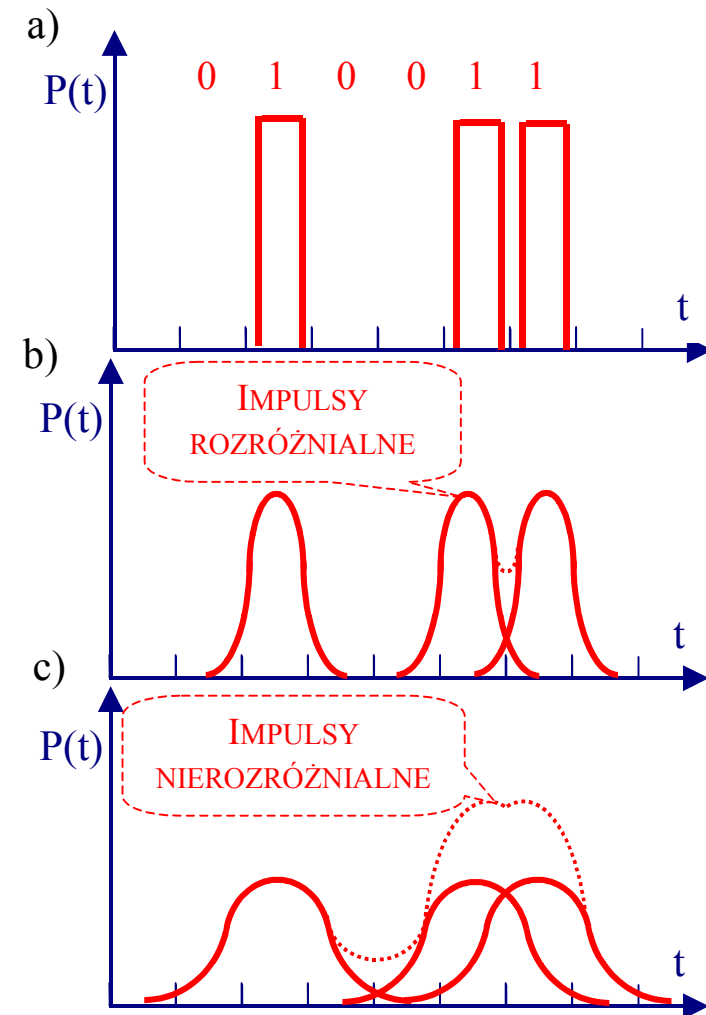
→ Moc rozproszona rośnie proporcjonalnie do $f^4 \sim 1/\lambda^4$, znaczenie rozproszenia Rayleigh'a w pasmie ultrafioletu.

→ Dwa zalecane zakresy długości fal to okno 2 i okno 3, dla porównania najmniejsze wartości tłumienia wraz z dyspersją.

λ [nm]	870	1312	1550
α [dB/km]	1,5	0,3	0,16
D_λ [ps/km.nm]	-80	0	+17

2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA MODALNA (A)

- Efekt dyspersji polega na tym, że różne mody lub sygnały o różnych częstotliwościach propagują się światłowodem z różnymi częstotliwościami. Gdy sygnał jest kompozycją modów/częstotliwości, to dyspersja powoduje powstanie zniekształceń.
- Efekt dyspersji pokazuje rys.2.9. W miarę transmisji – poza oczekiwanymi efektami tłumienia - impulsy poszerzają się, „rozmywają”.
- Impulsy stają się nierozróżnialne, ponieważ łączą się w miarę poszerzania.
- Ponadto w miejscu „0” pojawia się sygnał, który może być odczytany jako „1”.
- W światłowodzie wielomodowym pobudzone jest wiele modów, każdy wędruje samodzielnie z różną prędkością. Impuls wejściowy rozszczepia się.
- Efekt ten, to **dyspersja modalna**.
- Gdy światłowodem propaguje się wiele modów, to mechanizm **dyspersji modalnej** dominuje.



Rys.2.9. Poszerzanie impulsu jako efekt dyspersji.

2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA MODALNA (B)

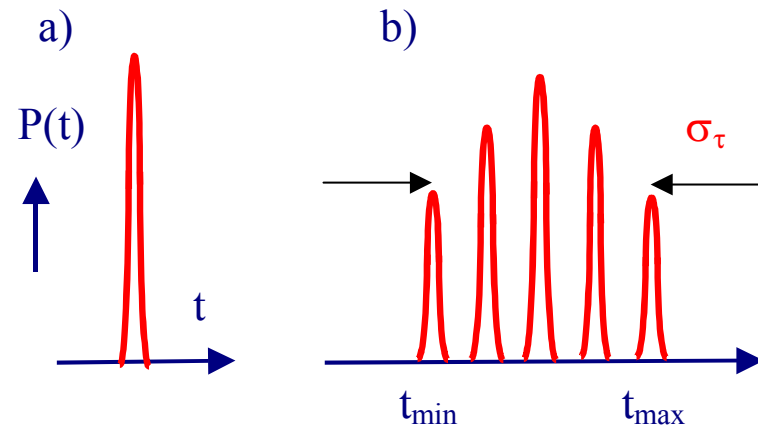
- Prędkości grupowe modów w światłowodzie wielomodowym mieszczą się w granicach od c_1 do $c_1(1 - \Delta)$.
- Impuls światła wzbudzony w światłowodzie ma kształt krzywej Gaussa. W miarę propagacji na długości L impuls rozszczepia się zachowując „Gaussowski” kształt, a jego szerokość może być obliczona z zależności:

$$\sigma_\tau \approx \frac{L}{c_1} \Delta;$$

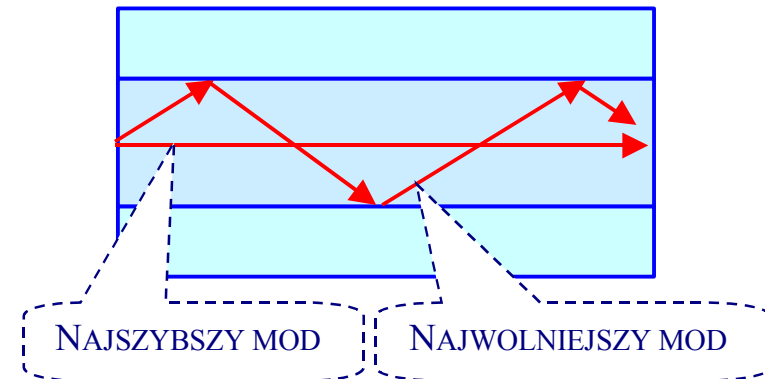
- W światłowodzie o profilu gradientowym różnicowanie prędkości propagacji modów jest mniejsze, w granicach od c_1 do $c_1(1 - \Delta^2/2)$, dyspersja modalna jest mniejsza:

$$\sigma_\tau \approx \frac{L}{2c_1} \Delta^2;$$

- Dyspersja modalna nie występuje w światłowodzie jednomodowym.



Rys.2.10. Efekty dyspersji modalnej



Rys.2.11. Najszybszy i najwolniejszy mod

2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA CHROMATYCZNA

- Krótki impuls promieniowania zajmuje pewną szerokość spektralną.
- Jeżeli prędkość grupowa zależy od częstotliwości (czas propagacji $\tau(\lambda)$ zależy od długości fali), to mamy do czynienia z **dyspersją chromatyczną**.
- Współczynnik dyspersji chromatycznej D_C [ps/nm/km] związany jest z $\tau(\lambda)$ następująco:

$$D_C = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda};$$

- Dwa identyczne impulsy o długościach fali λ i $\lambda + \delta\lambda$ po propagacji na długości L są względem siebie opóźnione o $\delta\tau$:

$$\delta\tau = |D_C|L\delta\lambda;$$

- Impuls światła o szerokości spektralnej σ_λ poszerza się - w miarę propagacji - do szerokości σ_τ :

$$\sigma_\tau = |D_C|\sigma_\lambda L;$$

- Można wyróżnić dwa składniki dyspersji chromatycznej:
 - ✓ **dyspersję materiałową**, związaną z zależnością $n(\lambda)$, opisana parametrem D_λ ,
 - ✓ **dyspersję falowodową**, związaną z zależnością $v_g(\lambda)$, opisana parametrem D_w .

2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA MATERIAŁOWA

- Współczynnik dyspersji materiałowej D_λ liczony jest z opóźnienia $d\tau(\omega)$ fali płaskiej dla impulsu o częstotliwości ω_0 i $\omega_0 + d\omega$.

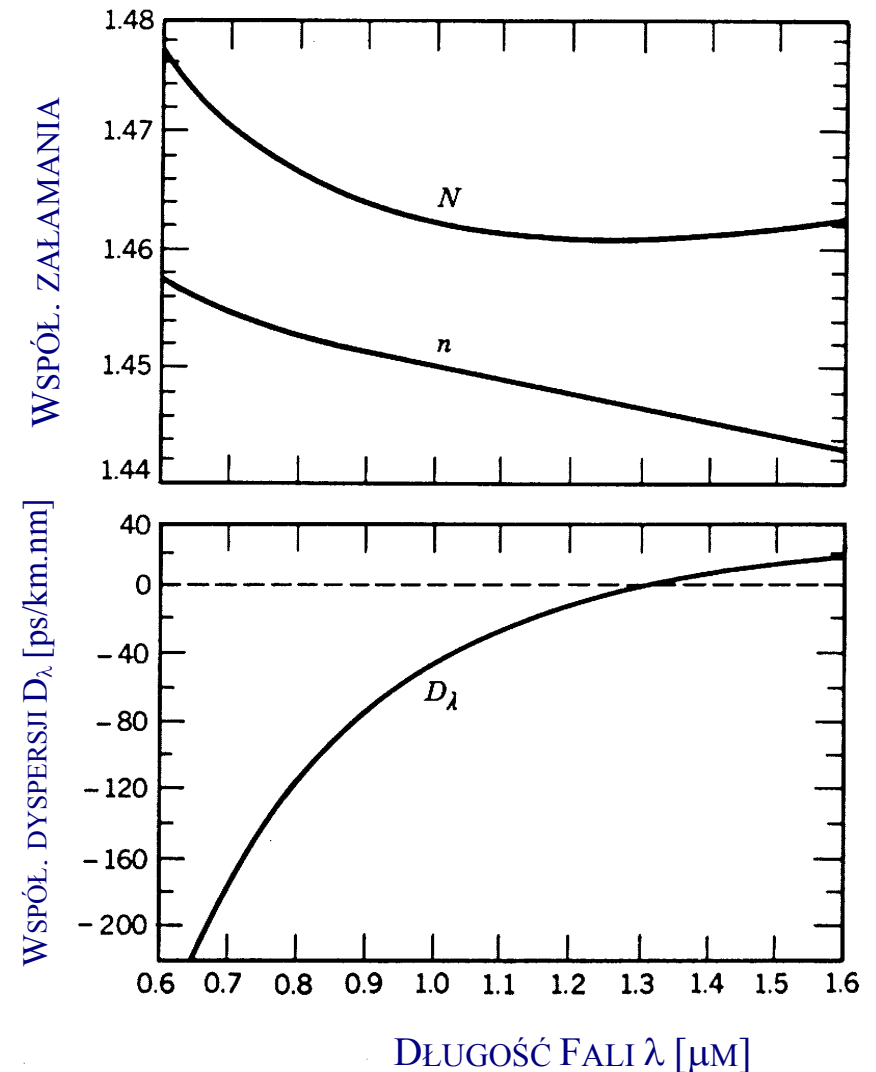
$$d\tau(\omega) = L \left[\frac{1}{v_g(\omega_0)} - \frac{1}{v_g(\omega_0 + d\omega)} \right];$$

- Po przekształceniach:

$$D_\lambda = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2};$$

- Dyspersja materiałowa dla światłowodu SiO_2 przechodzi przez 0 dla 1300 nm.
- Dyspersja materiałowa jest zwykle większa, niż falowodowa.

Rys.2.12. W funkcji długości fali λ_0 w wolnej przestrzeni przedstawiono zależności $n(\lambda_0)$, $N(\lambda_0) = c_0/v_g$ oraz $D_\lambda(\lambda_0)$ dla kwarcu.



2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA FALOWODOWA

- Dyspersja falowodowa liczona jest dla modu podstawowego, którego prędkość grupowa $v_g(\lambda)$:

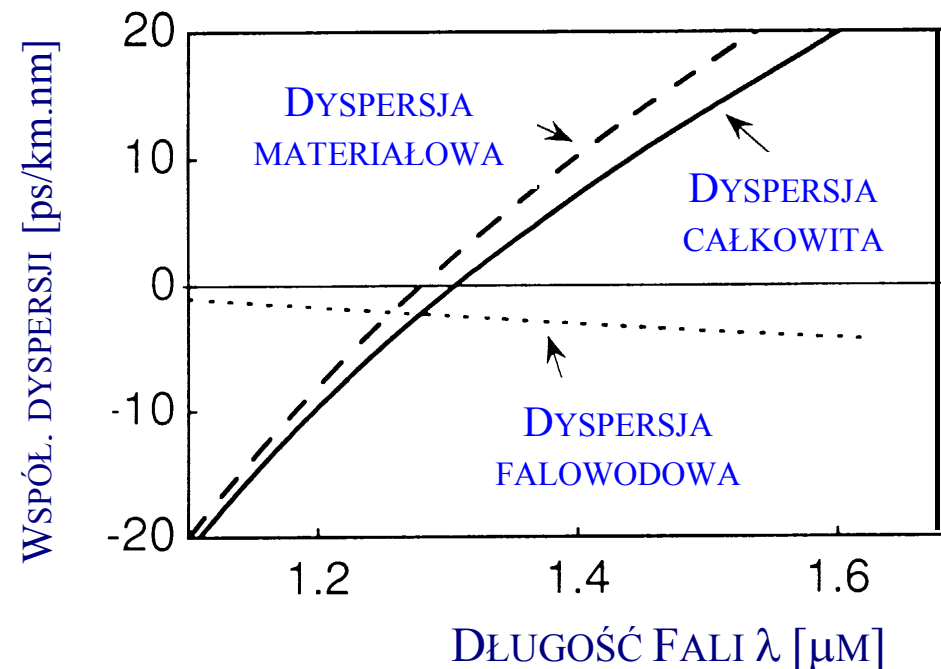
$$D_w = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = \frac{V^2}{2\pi c} \frac{d^2\beta}{dV^2};$$

- Wprowadzono znaną już częstotliwość znormalizowaną: $V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta}$;

- Impuls światła o szerokości spektralnej σ_λ poszerza się - w miarę propagacji - do szerokości σ_τ :

$$\sigma_\tau = |D_C| \sigma_\lambda L = |D_\lambda + D_w| \sigma_\lambda L;$$

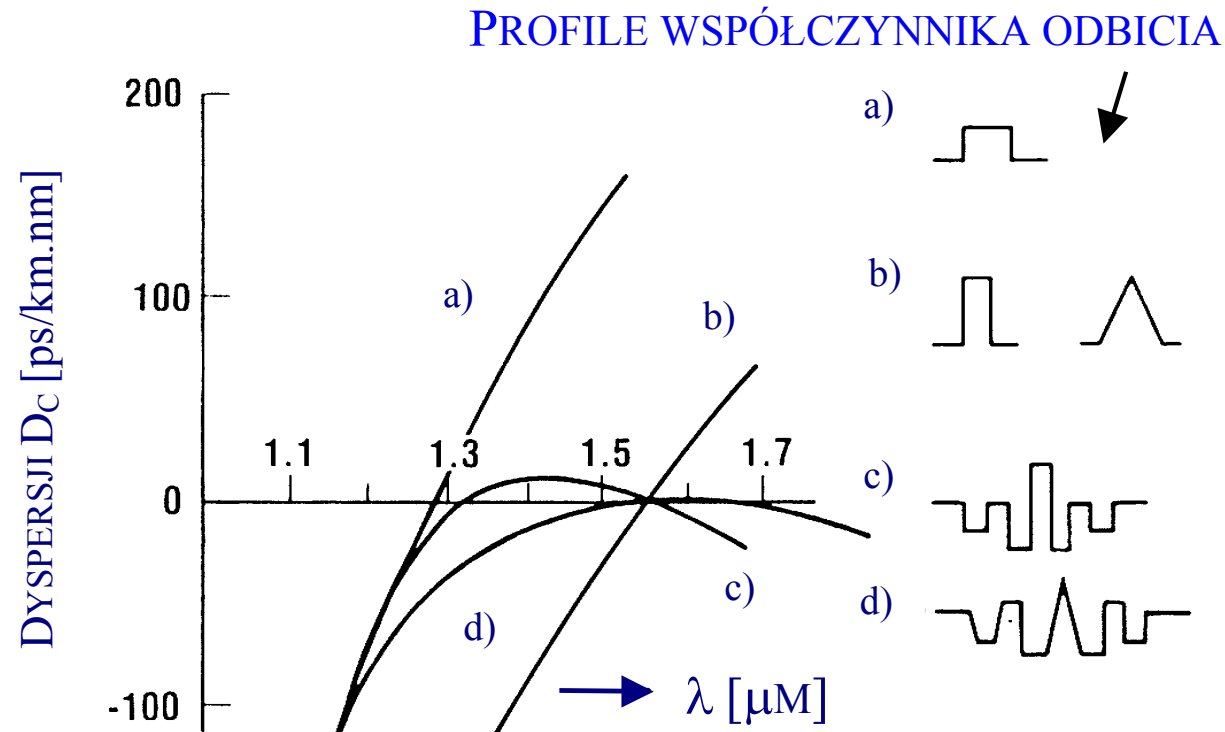
- Dyspersja falowodowa ma przeciwny znak i częściowo kompensuje materiałową.
- Problem: czy istnieje możliwość skompensowania dyspersji dla 1550 nm ?.



Rys.2.13. Całkowita dyspersja chromatyczna w światłowodzie jednomodowym.

2.4. DYSPERSJA ŚWIATŁOWODÓW - DYSPERSJA KONTROLOWANA

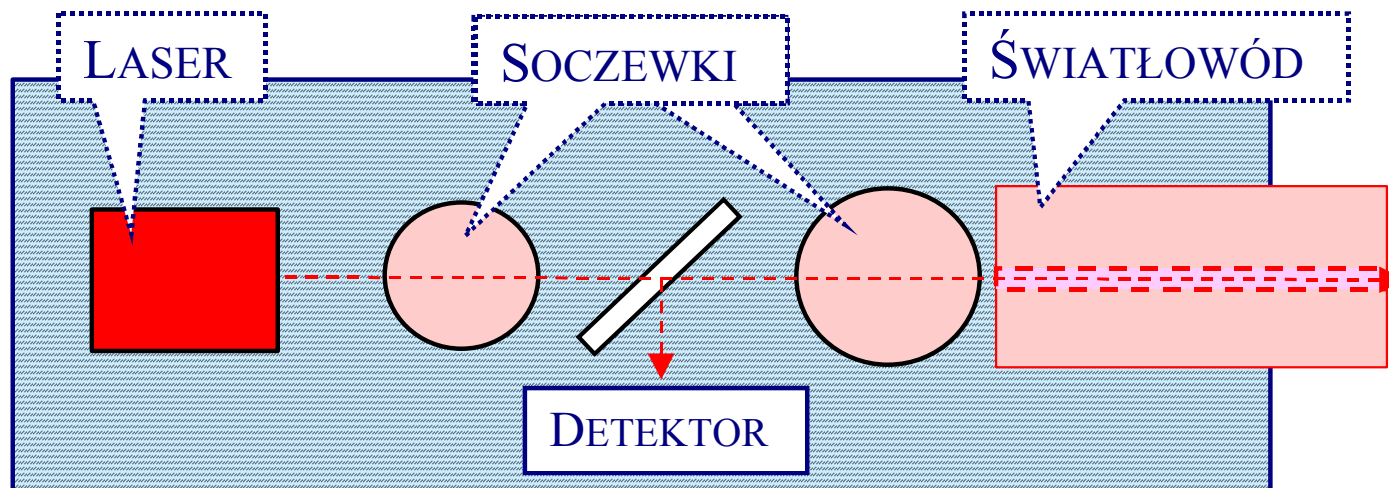
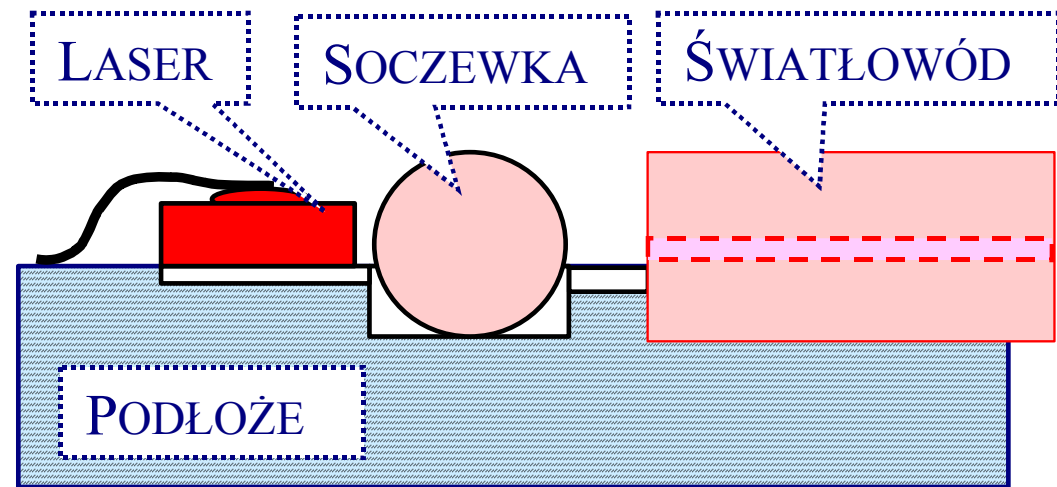
- Przez odpowiednie uprofilowanie współczynnika załamania w rdzeniu można przesunąć położenie 0 do pasma 1550 nm, albo uczynić płaskim przebieg $D_c(\lambda)$.



Rys.2.14. Profile współczynnika załamania w rdzeniu powodujące przesunięcie charakterystyki dyspersji albo jej spłaszczenie w pożądanym pasmie.

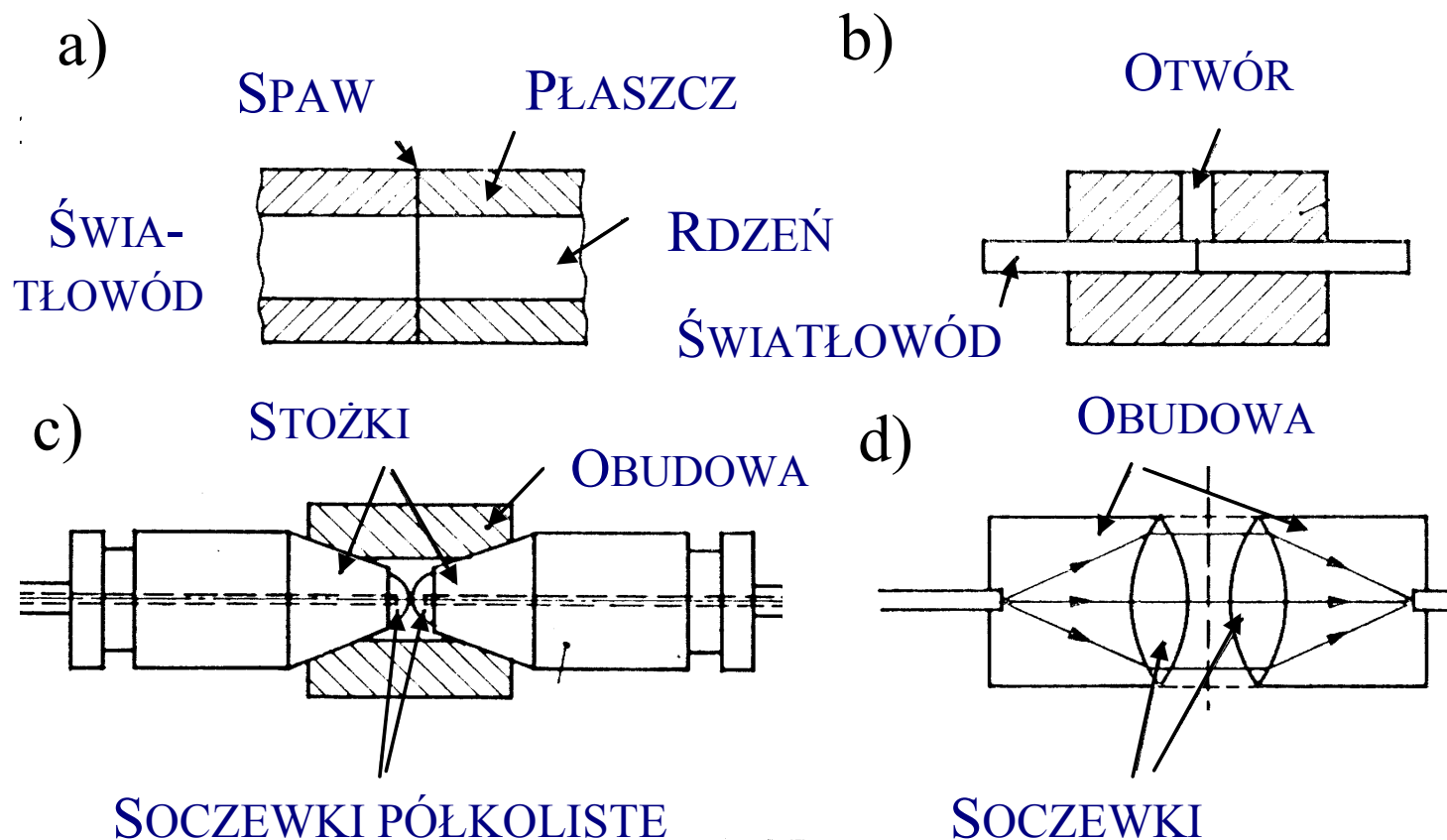
2.5. POBUDZANIE I ŁĄCZENIE ŚWIATŁOWODÓW – SPRZEŻENIE Z LASEREM

Rys.2.15. Pobudzenie światłowodu promieniowaniem lasera z wykorzystaniem soczewki kulistej



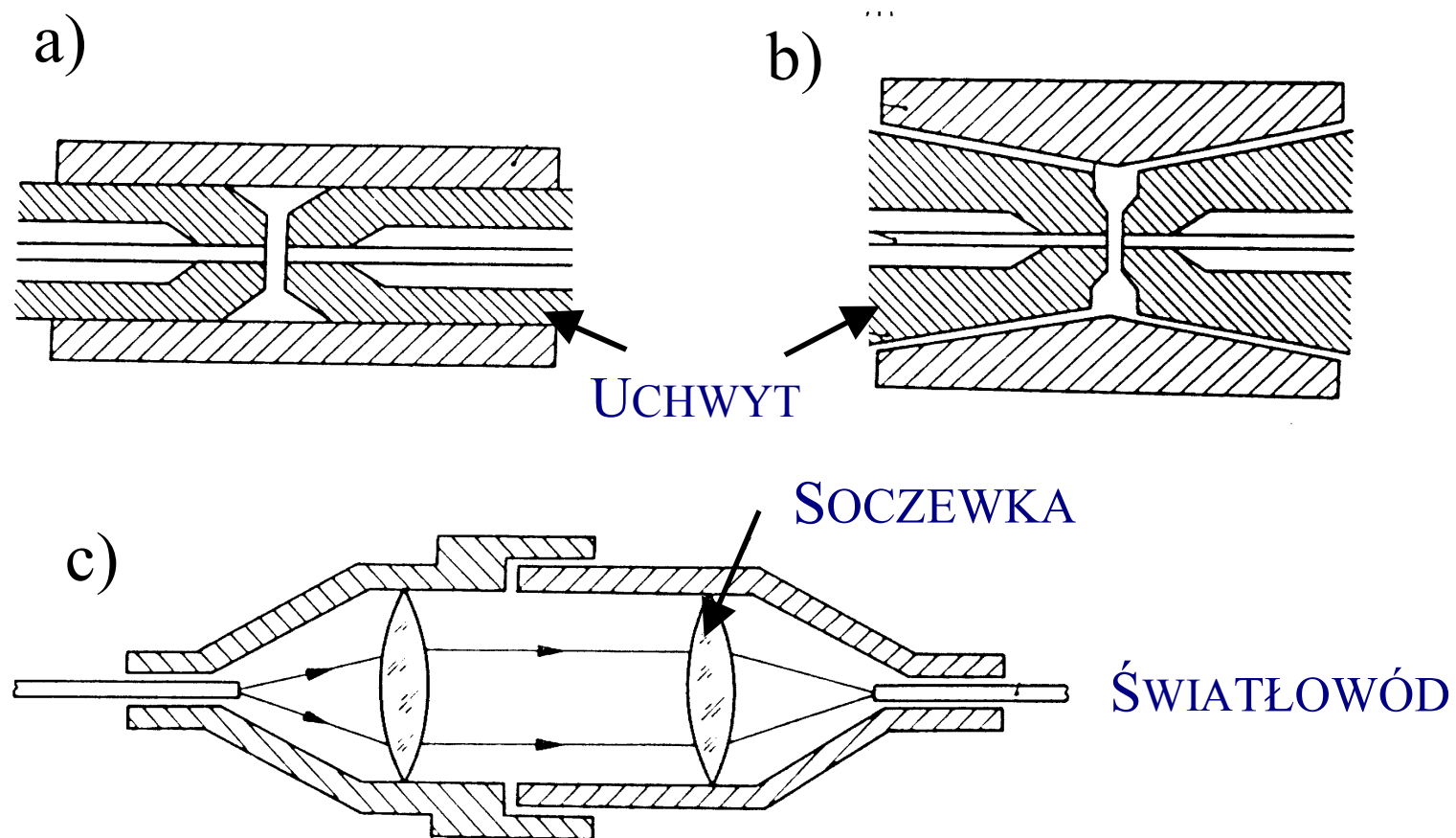
Rys.2.16. Jak na rys.2.15 ale z detektorem

2.5. POBUDZANIE I ŁĄCZENIE ŚWIATŁOWODÓW – ŁĄCZENIE (A)



Rys.2.17. Sprzężenie optyczne rdzeni światłowodów: a) złącze trwałe - spawane, b) złącze trwałe - klejone, c) złącze rozłączalne z centrowaniem stożkowym, d) złącze rozłączalne z kolimacją soczewkową.

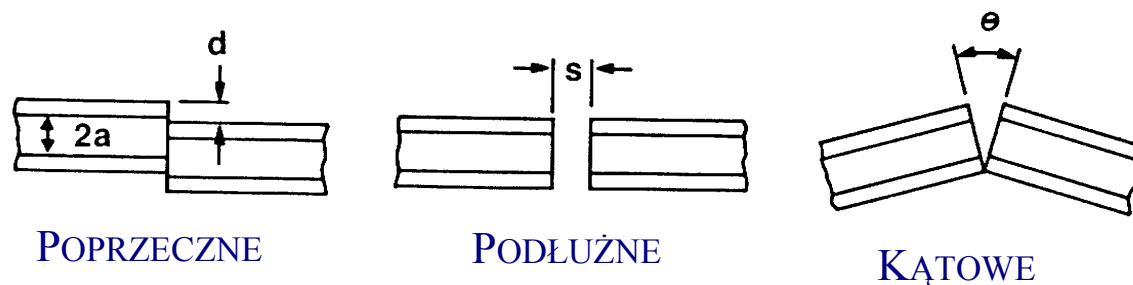
2.5. POBUDZANIE I ŁĄCZENIE ŚWIATŁOWODÓW – ŁĄCZENIE (B)



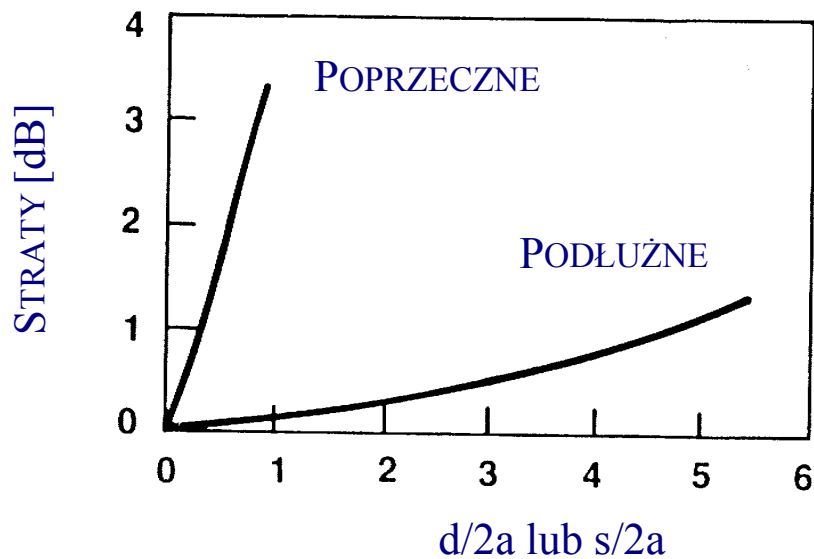
Rys.2.18. Złącza światłowodowe rozłączalne: a) pozycjonowanie tulejowe, b) pozycjonowanie stożkowe, c) pozycjonowanie soczewkowe.

2.5. POBUDZANIE I ŁĄCZENIE ŚWIATŁOWODÓW – ŁĄCZENIE (C)

a) NIEDOPASOWANIE OSIOWE



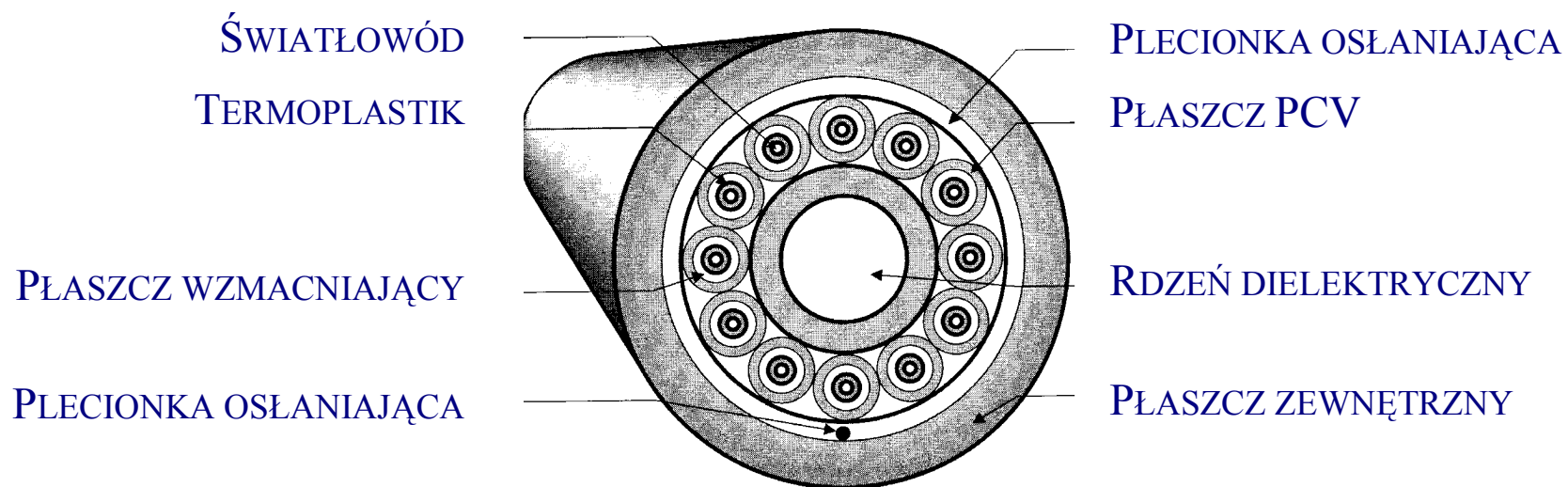
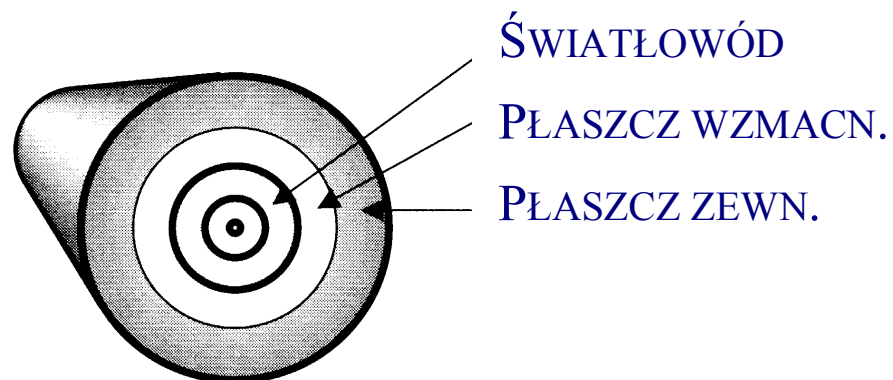
b)



Rys.2.19. Niekonieczne połączenia światłowodu i ich wpływ na tłumienność sygnału w torze.

2.5. POBUDZANIE I ŁĄCZENIE ŚWIATŁOWODÓW – ŁĄCZENIE (C)

*Rys.2.20. Pojedynczy
kabel światłowodowy*



Rys.2.21. Struktura kabla z wieloma światłowodami

2.6. PODSUMOWANIE

- Światłowody kwarcowe są doskonałymi liniami transmisyjnymi:
 - ze względu na małe tłumienie,
 - ze względu na ogromne pasmo pracy,
 - trudności zewnętrznego zakłócenia transmisji,
 - małe koszty, lekkość.
- Przy transmisji na duże odległości pojawiają się problemy dyspersji. Znaleziono rozwiązania:
 - światłowody jednomodowe,
 - światłowody o kształtowanej charakterystyce dyspersji.
- Łączenie światłowodów, spawanie sprawiają – w porównaniu do przewodnic mikrofalowych – wiele trudności i wymagają wielkiej precyzji.
- Przy transmisji na odległości metrów i dziesiątek metrów (w warunkach przemysłowych) wystarczająco dobre rezultaty uzyskuje się stosując światłowody plastikowe.