

1. DYSPERSJA

1.1. Dyspersja materiałowa i falowodowa. Dyspersja chromatyczna.

1.2. Dyspersja modowa w światłowodach

a). o skokowej zmianie współczynnika załamania

b). gradientowych

c). dyspersje w światłowodach jednomodowych

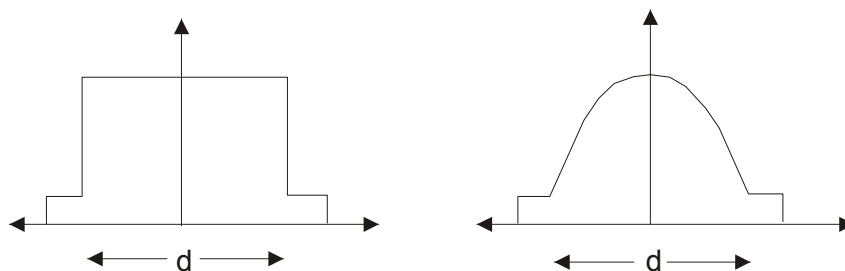
Światłowod to element prowadzący światło na zasadzie zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia, wykonany ze szkła, polimeru lub ich mieszaniny. **Całkowite wewnętrzne odbicie** tylko wtedy, gdy światło przechodzi z ośrodka o większym n do ośrodka o mniejszym n . Składa się więc z płaszczki i rdzenia. Płaszczka (n_2) stwarza stałe warunki całkowitego wewnętrznego odbicia. d - średnica rdzenia (n_1), NA - apertura światłowodu.

Dwa rodzaje światłowodów: o **skokowej** lub o **gradientowej** ($62.5/125 \mu m$) zmianie n . Pierwsze dzielą się na **jedno-** ($5-10 \mu m$) i **wielomodowe** ($50/125 \mu m$).

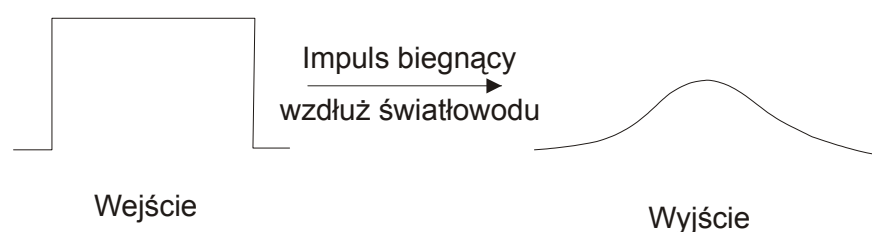
Jednomodowy – znormalizowana grubość warstwy $V < 2.405$:

$$V = \frac{\pi d n_1}{\lambda} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{\pi d}{\lambda} NA$$

Profile współczynnika załamania



Rozmycie impulsu spowodowane dyspersją



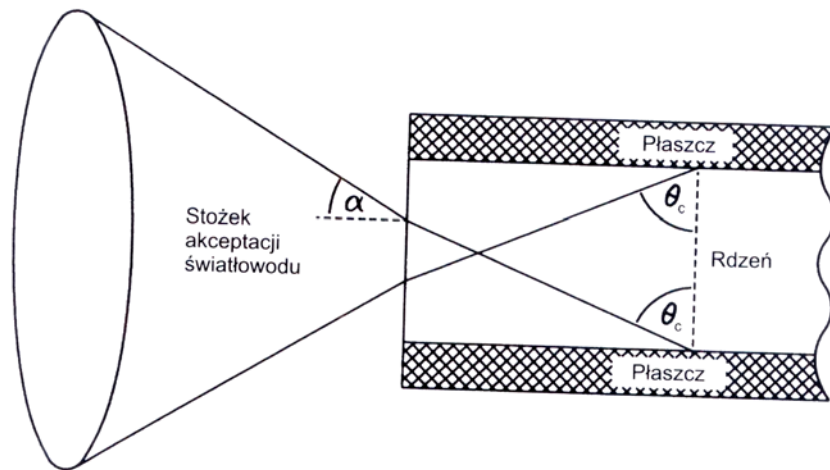
DYSPERSJA W ŚWIATŁOWODACH

Łączność światłowodowa stała się rzeczywistością dopiero wtedy, gdy tłumienność w światłowodzie optycznym zredukowano z 1000 dB/km w 1968 r. do poniżej 20 dB/km w 1970 r i gdy w firmie Corning opracowano proces wytwarzania światłowodów.

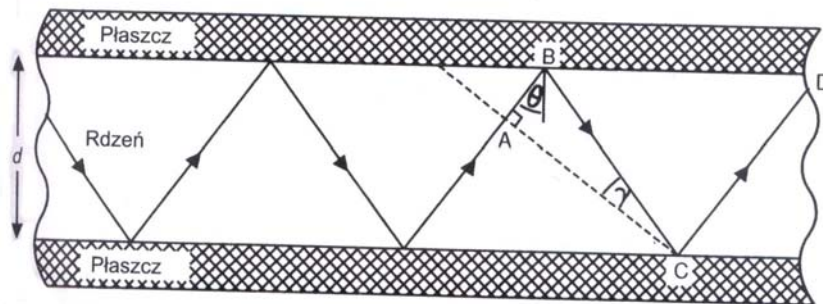
tłumienność: stała propagacji - $\gamma = \alpha + j\beta$, α - tłumienność jednostkowa, β - stała fazowa,

$$j = \sqrt{-1}$$

Obecnie typowe światłowody: $\alpha = 0.2$ dB/km



Rys. 1. ($NA = \sin\alpha = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$)



Rys. 2.

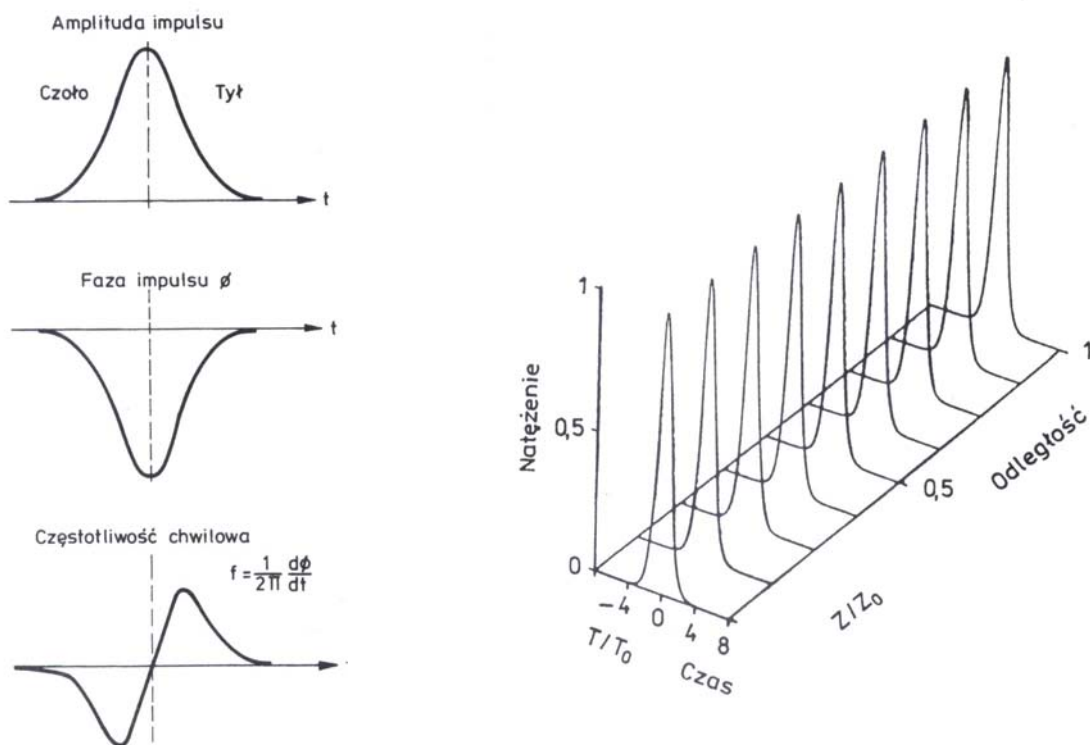
Dyspersja:

- normalna – fale o większej ω wolniejsze od fal o mniejszej ω
- anomalna – fale o większej ω szybsze od fal o mniejszej ω

Typowe jednomodowe falowody: $D=0$ (współczynnik dyspersji) dla $\lambda=1.31 \mu\text{m}$. Poniżej dyspersja normalna, powyżej dyspersja anomalna.

Krótkie impulsy – szerokie widmo. $D=0$ dla częstotliwości nośnej przyczyną różnicy prędkości rozchodzenia się składowych impulsu i jego deformacji. Poszerzenie impulsu rośnie z odległością transmisji – trudność rozróżnienia kolejnych impulsów od pewnej odległości.

Metoda zmniejszenia dyspersji – wykorzystanie nieliniowych zjawisk kompensujących. Nieliniowość światłowodu: w miejscu dużego natężenia impulsu współczynnik załamania rośnie, prędkość fali maleje. Środkowa część impulsu porusza się wolniej niż czoło i tył, a częstotliwość różnicuje się: czoło doznaje zmniejszenia ω , a tył zwiększenia ω . Dla kompensacji dyspersja powinna: zwolnić czoło impulsu – dyspersja anomalna.



Rys. 3. Solitony

Możliwy jest taki dobór kształtu impulsu, amplitudy i czasu trwania, że nieliniowość i dyspersja wzajemnie się znoszą – solitony.

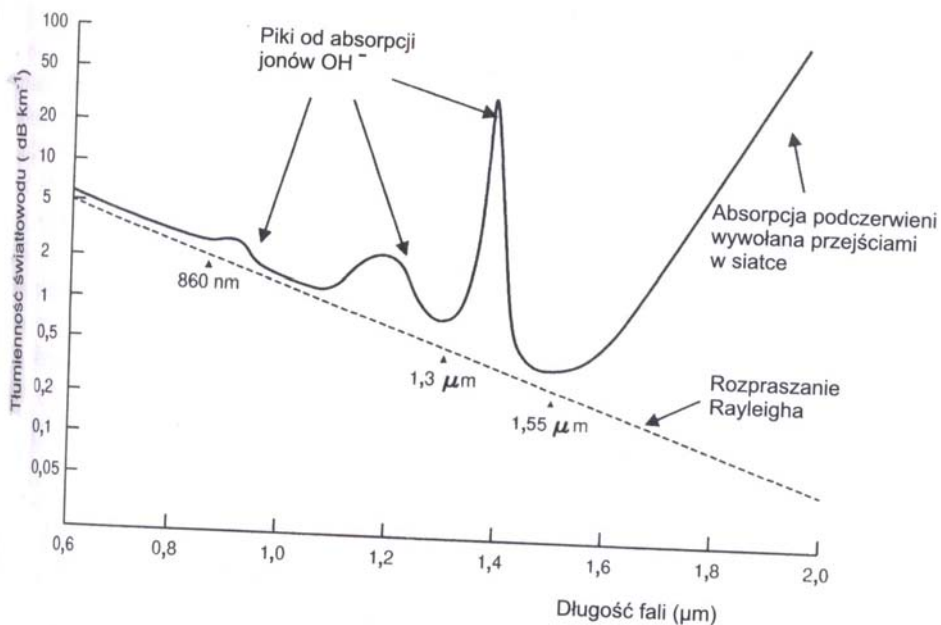
1. Tłumienność

- Szkło SiO_2 – przechłodzona ciecz – fluktuacja gęstości materiału o rozmiarach charakterystycznych $< \lambda$ – rozpraszanie Rayleigha.

Foton pochłaniany na niejednorodnościach i natychmiast wypromieniowany w przypadkowym kierunku bez straty energii ($P_r \sim 1/\lambda^4$).

Domieszkowanie zwiększa rozpraszanie Rayleigha. Na dłuższych falach rozpraszanie Rayleigha mniejsze, ale:

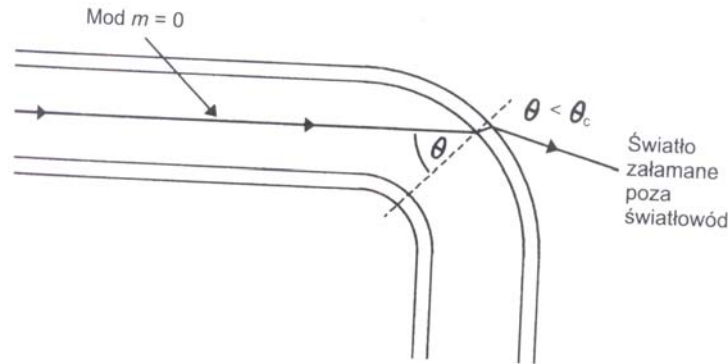
- silna absorpcja w podczerwieni – drgania atomów Si oraz O względem siebie ($9 \mu\text{m}$)
- absorpcja w nadfiolecie (200 nm) – wybijanie przez fotony elektronów do pasma przewodnictwa. Efekt do pominięcia w zakresie $0.8\text{-}1.6 \mu\text{m}$.
- zanieczyszczenia materiału światłowodu – H_2O (OH^-). II i III harmoniczna drgań jonu OH^- - $1.38 \mu\text{m}$ i $0.95 \mu\text{m}$. Dodatkowe pasmo na $1.23 \mu\text{m}$ – nakładanie się drgań jonów OH^- oraz wiązań Si-O ; Cu^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{2+} oraz H_2 .



Rys. 4. Przykładowa zależność tłumienności jednostkowej od λ

Tłumienie związane z obecnością domieszek rośnie w miarę wzrostu ich koncentracji.

- nieregularności samego światłowodu: mikrozgięcia, wahanie średnicy rdzenia, jego eliptyczność, zgięcie poniżej dopuszczalnego promienia itp.



Rys. 5. Straty w światłowodzie

Minima widoczne na rys. 4: 1.31 μm i 1.55 μm noszą nazwę drugiego i trzeciego okna transmisyjnego (pierwsze okno transmisyjne – 0.85 μm). Transmisja sygnałów w światłowodach odbywa się w tych oknach. Typowe wartości tłumienia światłowodu w oknach transmisyjnych: 3 dB/km (0.85 μm); 0.4 dB/km (1.31 μm) i 0.2 dB/km (1.55 μm).

2. **Dyspersja** – zależność parametrów ośrodka od częstotliwości. Powoduje rozmycie czasowe krótkich impulsów – ogranicza maksymalną szybkość transmisji. O dyspersji decyduje wartość drugiego ze składników stałej propagacji γ ($\gamma = \alpha + j\beta$) $\rightarrow \beta$.

Stała fazowa, β , określa:

- prędkość fazową $v_f = \omega/\beta$ – prędkość powierzchni stałej fazy
- prędkość grupową $v_g = 1/(d\omega/d\beta)$ – prędkość obwiedni sygnału – przekazu energii w światłowodzie lub opóźnienie grupowe – $\tau_g = d\beta/d\omega = 1/v_g$ – opóźnienie jakiego doznaje obwiednia fali na odcinku światłowodu o jednostkowej długości. Opóźnienie obwiedni fali po propagacji fali na dystansie z jest równe: $t_g = \tau_g * z$.

Jak policzyć stałą fazową – z równania propagacji fal w światłowodzie:

$$(\Delta E + k^2 E) = 0; \quad E_z = R(r) * \Phi(\phi) * Z(z); \quad Z(z) = C_1 \exp(-\gamma z) + C_2 \exp(\gamma z);$$

$$\Phi(\phi) = C_3 \cos m\phi + C_4 \sin m\phi; \quad d^2 R/dR^2 + 1/r dR/dr + (h^2 - m^2/r^2) R = 0;$$

$h^2 = \gamma^2 + k^2$; $k = \omega * n / c$ – liczba falowa; ω – pulsacja fali, a – promień rdzenia światłowodu, n – współczynnik załamania, c – prędkość światła.

$h = h_1$ dla $r < a$; $h = j * h_2$ dla $r > a$; h_1, h_2 – liczby rzeczywiste

Przyjmując $\gamma = j\beta$; $u = h_1 * a$; $w = h_2 * a$ i $v^2 = u^2 + w^2$ – znormalizowana częstotliwość, otrzymujemy:

$$\beta = \sqrt{k_o^2 n_1^2 - \frac{u^2}{a^2}} \quad \beta = \sqrt{k_o^2 n_2^2 + \frac{w^2}{a^2}}$$

lub wprowadzając parametr $B = 1 - u^2 / v^2$:

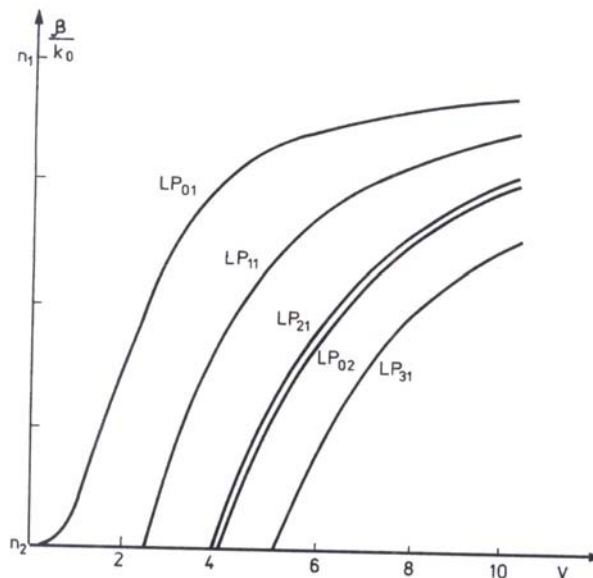
$$\beta = k_o \sqrt{B n_1^2 + (1 - B) n_2^2}$$

Można pokazać, że **parametr B** ($1 > B > 0$) określa jaka część pola danego modu zawiera się w rdzeniu (opisuje **dyspersję falowodową**).

Jakie są wartości graniczne stałej fazowej β ?

Dla częstości odcięcia (mod H_{op} może rozchodzić się w światłowodzie dopiero wtedy, gdy znormalizowana częstotliwość v jest większa od pewnej wartości v_{op} zwanej częstotliwością odcięcia) – $\beta = k_o * n_2$ (płaszcz).

Dla dużych wartości $v \rightarrow \infty$, $\beta = k_o * n_1$ (rdzeń).



Rys. 6. Przebieg znormalizowanej stałej fazowej w funkcji znormalizowanej częstości dla kilku modów LP najniższego rzędu.

Przebieg parametru B jest bardzo podobny.

Interpretacja fizyczna: dla częstotliwości ν niewiele przekraczających częstość odcięcia danego modu, pole elektromagnetyczne tego modu jest szeroko rozpostarte głównie w płaszczu ($\beta/k_o=n_2$). W miarę wzrostu ν polu danego modu częściowo zawarte jest w rdzeniu, a częściowo w płaszczu. Stąd $n_2 < \beta/k_o < n_1$. Dla dużych ν , pole danego modu zawarte jest prawie całkowicie w rdzeniu ($\beta/k_o=n_1$).

Dyspersja falowodowa jest to zależność od częstotliwości efektywnego współczynnika załamania oddziaływującego z danym modem, spowodowana zmianami podziału mocy tego modu pomiędzy rdzeń i płaszcz.

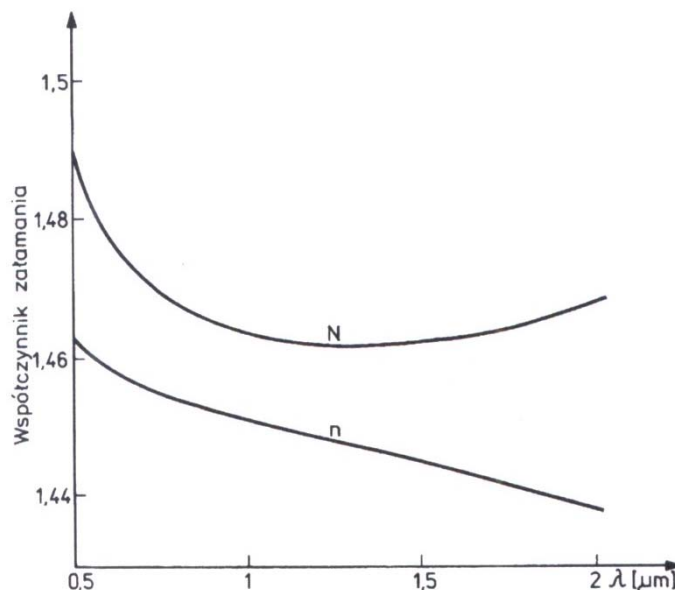
Dyspersja materiałowa polega na tym, że materiał, z którego zrobiony jest światłowód jest materiałem dyspersyjnym, czyli materiałem, którego właściwości optyczne zależą od częstotliwości: $n_1(\omega)$ i $n_2(\omega)$. Dla fali płaskiej:

prędkość fazowa – $v_f = c/n$; n – współczynnik załamania ośrodka

prędkość grupowa – $v_g = c/N$; N – grupowy współczynnik załamania;

$$N = n + \omega * dn/d\omega = n - \lambda * dn/d\lambda$$

Dyspersja materiałowa – zależność od częstotliwości (długości fali) grupowych współczynników załamania materiałów, z jakich wykonany jest światłowód

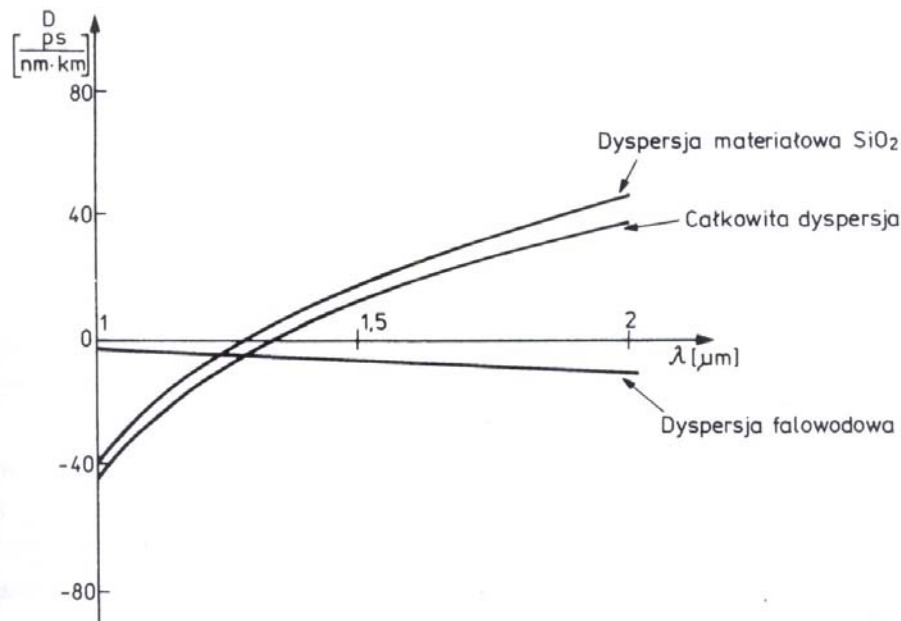


Rys. 7. Współczynniki załamania n i N czystego SiO_2 w funkcji długości fali

Dyspersja chromatyczna – dyspersja związana z niezerową szerokością widmową źródła światła (dyspersja falowodowa + materiałowa). Do opisu dyspersji chromatycznej wykorzystuje się współczynnik dyspersji:

$$D = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \left[\frac{ps}{nm \cdot km} \right]$$

D wyznacza rozszerzenie czasowe impulsu (w pikosekundach) po przejściu 1 km odcinka światłowodu, jeśli szerokość linii widmowej źródła światła wynosi 1 nm. Dla innych długości światłowodu L i szerokości linii widmowych $\Delta\lambda$, rozszerzenie czasowe impulsu $\Delta t = D \cdot \Delta\lambda \cdot L$.



Rys. 8. Typowe wartości współczynnika dyspersji dla standardowego światłowodu

Jeżeli opóźnienie grupowe jest stałe w zakresie częstotliwości zajmowanym przez transmitowany przez światłowód impuls, przechodzi on przez światłowód bez zakłóceń. Stąd długości fal, gdzie grupowy współczynnik załamania N ma minimum, są najlepsze do transmisji o dużych szybkościach. Ponieważ:

$D = d\tau_g/d\lambda = c \cdot dN/d\lambda$, odpowiada to $D=0$. Z rys. 8 wynika, że miałyby to miejsce dla $\lambda=1.27 \mu m$ (tylko dla dyspersji materiałowej).

Dyspersja falowodowa przesuwą tą wartość w stronę fal dłuższych (o $0.4 \mu m$).

Ale dla wartości $D \sim 0$ istotną rolę zaczyna odgrywać tzw. **nachylenie dyspersji, B_d** :

$$B_d = \frac{dD}{d\lambda} = \frac{d^2\tau_g}{d\lambda^2} \left[\frac{ps}{nm^2 km} \right]$$

Jeżeli rozłożymy zależność opóźnienia grupowego $\tau_g(\lambda)$ w szereg Taylora wokół λ_0 :

$$\Delta t = \tau_g L = [D\Delta\lambda + \frac{1}{2}B_d(\Delta\lambda)^2] \cdot L$$

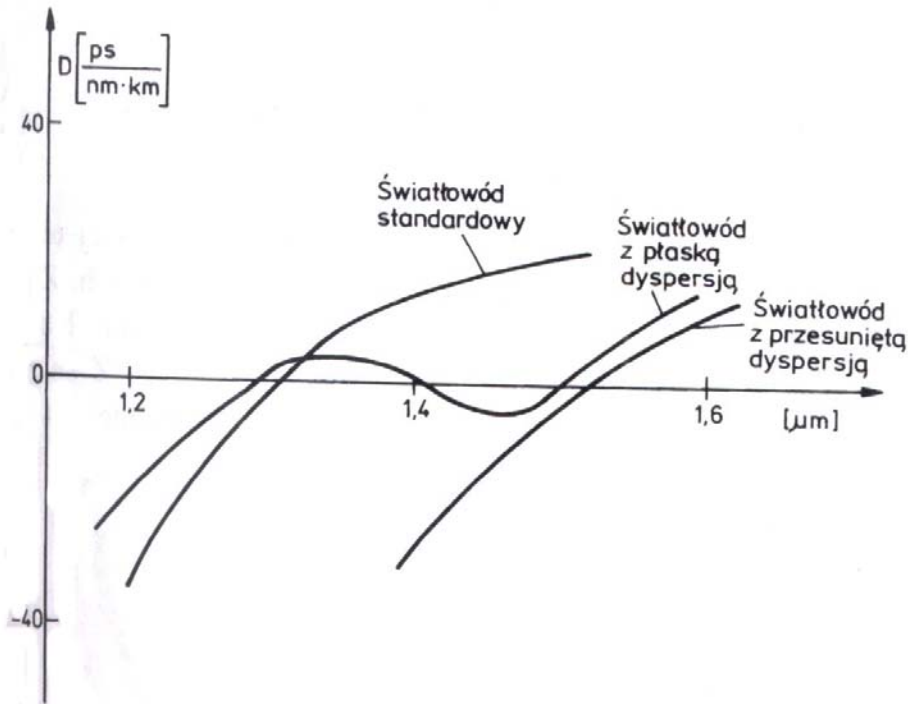
Δt – czasowe rozszerzenie impulsu spowodowane dyspersją chromatyczną po propagacji w światłowodzie o długości L , jeśli szerokość widmowa impulsu wynosi $\Delta\lambda$.

Aby stworzyć światłowod, dla którego zero współczynnika dyspersji pokrywa się z minimum tłumienia, trzeba zwiększyć udział dyspersji falowodowej:

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \sqrt{B(n_1^2 - n_2^2) + n_2^2} \left(1 + \omega \frac{dB}{d\omega} \right)$$

Widać stąd, że najprościej jest zwiększyć różnicę między współczynnikami załamania rdzenia i płaszczu. Inna możliwość – taki dobór parametrów światłowodu i długości fali, aby zmaksymalizować $dB/d\omega$. Taka optymalizacja prowadzi często do ograniczenia średnicy rdzenia. **Światłowody o przesuniętej dyspersji** mają mniejszy rdzeń ($5 \mu m$ wobec $8 \mu m$) – większe rozpraszanie Rayleigha, naprężenia mechaniczne (Δn), większe tłumienie.

Przez dobór odpowiednich materiałów i odpowiedniego profilu współczynnika załamania można zrealizować światłowod mający minima opóźnienia grupowego (zerową dyspersję) zarówno dla długości fali $1.31 \mu m$ jak i $1.55 \mu m$ – **światłowod z płaską charakterystyką dyspersji**.



Rys. 9. Zależność współczynnika dyspersji od długości fali dla trzech typów światłowodów

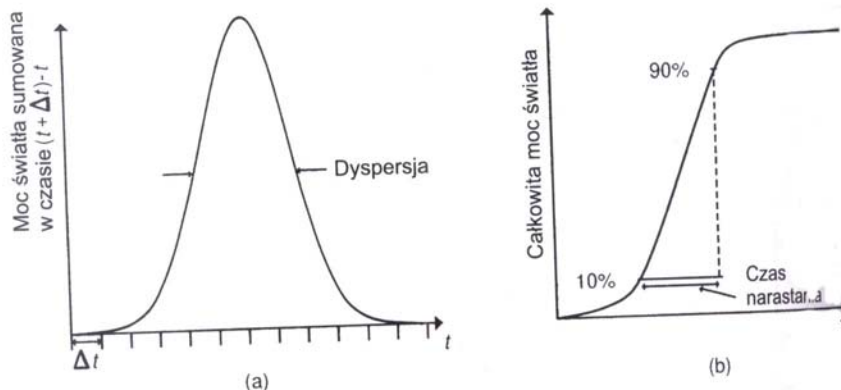
Dyspersja modowa (międzymodowa) – spowodowana tym, że prędkość grupowa jest różna dla różnych modów – różne mody przychodzą na koniec światłowodu w różnym czasie. Impuls światła rozmywa się. Dyspersja modowa nie zależy od dyspersji chromatycznej (światło ma wąską linię widmową). Dyspersja modowa, czyli różnica czasów pomiędzy modami pierwszym I ostatnim:

$$m=0: t_1=Ln_1/c; m. : \Theta_c, t_2=Ln_1/(c \sin\Theta_c); \Delta t_{mod}=L\Delta/c; \Delta=n_1-n_2$$

Dyspersja wskazuje o ile poszerzony jest impuls po przejściu przez światłowod. Dodatkowy parametr – czas narastania impulsu po dyspersji.

Mieszanie modów: w dłuższym światłowodzie światło, które zaczęło drogę w jednym modzie, występuje potem przez pewien czas także w każdym z innych modów – wypadkowa dyspersja jest mniejsza, ponieważ średnio w modach niższego rzędu światło przebywało krócej. Całkowite mieszanie modów po przejściu 1 km.

$\Delta t \sim L^q$, $1/2 < q < 1$; łącza długie – $q = 0.5$, łącza lokalne – $q = 0.7$, łącza krótkie – $q = 1$.



Czas narastania = 0.44 * dyspersja.

Dyspersja modowa jest istotnym ograniczeniem we wszystkich systemach, w których mogą być przesyłane dane cyfrowe (impulsy światła) z dużą częstotliwością na dużą odległość. Można ją ominąć:

- ograniczenie ilości modów do jednego (światłowody o skok. n)
- kształtowanie profilu współczynnika załamania rdzenia tak, aby światło rozchodziło się tym szybciej im dalej od osi się znajduje (światłowody gradientowe)

Dyspersja w światłowodach gradientowych (GRIN). Profil współczynnika załamania:

$$n(r) = n_1 \left[1 - \frac{2\Delta}{n_1} \left(\frac{r}{a} \right)^\gamma \right]^{1/2}$$

r – odległość od osi światłowodu, n_1 – współczynnik załamania na osi, γ – szybkość zmiany $n(r)$

Światłowody gradientowe przenoszą około połowy liczby modów światłowodu o skokowej zmianie współczynnika załamania o takiej samej średnicy rdzenia i n_1 . Dyspersja modowa występuje jeśli parabola jest niewłaściwie ukształtowana. Minimum osiąga ona dla:

$$\gamma \cong (1 - 1.2 \cdot \Delta / n_1)$$

Dyspersja modowa silnie zależy od wartości γ .

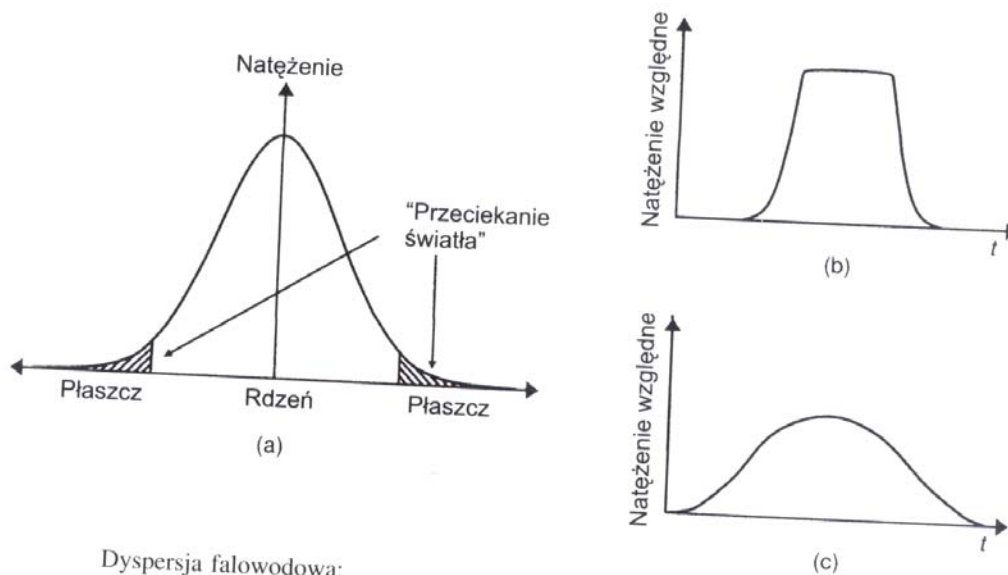
Dyspersja profilowa – γ zależy od λ i od Δ .

Dyspersja w światłowodach jednomodowych – materiałowa i falowodowa. Materiałowa spowodowana jest zależnością współczynnika załamania szkła od długości fali:

$$\Delta t_{mat} = D \cdot \Delta \cdot \lambda L$$

Dyspersja falowodowa, związana z wyciekaniem światła do płaszczka:

$$\Delta t_{fal} = \left(\frac{n_2 \cdot L \cdot \Delta \cdot \Delta \lambda}{n_1 \cdot c \cdot \lambda} \right) \cdot z$$



Dyspersja falowodowa:

Obliczanie całkowitej dyspersji światłowodu:

$$\Delta t = [\Delta t_{mod}^2 + (\Delta t_{mat} + \Delta t_{fal})^2]^{1/2}$$

W światłowodach jednomodowych: $\Delta t_{mod} = 0$

W światłowodach wielomodowych: $\Delta t_{fal} = 0$

2. Źródła światła

- diody luminescencyjne
- diody elektroluminescencyjne
- zasada działania lasera
- diody laserowe

3. Złącza stałe i rozłączne

- zasady łączenia światłowodów
- połączenia stałe
- łącza rozłączne
- sprzężenie światłowodu ze źródłem promieniowania

4. Modulacja

- analogowa
- cyfrowa
- diody elektroluminescencyjne
- lasera półprzewodnikowego
- układy modulacji

5. Detektory światła

- zasady fotodetekcji
- fotopowielacz
- fotodiody półprzewodnikowa
- fotodiody p-i-n
- fotodiody lawinowa

6. Urządzenia i układy

- modulator elektrooptyczny
- akustooptyczny
- deflektor
- przełączniki
- sprzęgacze

7. Urządzenia wyświetlające

- ciekłokrystaliczne
- mozaikowe
- ferroelektryczne
- luminescencyjne

- elektroluminescencyjne
8. Analizujące przetworniki obrazu
- matryce CCD
 - wzmacniacze obrazu
9. Zastosowania optoelektroniki
- czujnik kodu kreskowego
 - odtwarzacz płyt CD.
 - drukarka laserowa
 - transmisja danych
10. Transmisyjna sieć światłowodowa
- schemat blokowy
 - elementy
 - rodzaje sieci
 - sygnał informacji

Litaratura:

Kathryn Booth, Steven Hill, „Optoelektronika”, WKŁ Warszawa 2001
Jerzy Siuzdak, „Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej”, WKŁ Warszawa 1999, wyd. 2.