

# Rozdział 2

## 1. Budowa kabli i parametry światłowodów

### 2.1. Budowa kabli światłowodowych

### 2.2. Parametry światłowodów

#### 2.2.1. Tłumienie, tłumienność

#### 2.2.2. Apertura numeryczna NA

#### 2.2.3. Częstotliwość odcięcia

#### 2.2.4. Współczynnik dyspersji D

#### 2.2.5. Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej PMD, długość zdudnień

### 2.3. Bilans mocy optycznej systemu światłowodowego

### 2.4. Reflektometr światłowodowy

#### 2.4.1. Budowa i działanie reflektometru Brillouin'a

## 2.1. Budowa kabli światłowodowych

Światłowody mają różnorodne zastosowania:

- telekomunikacyjne
- sieci komputerowe
- czujniki
- zastosowania medyczne (endoskopy)

Pod względem zdolności aktywnej obróbki sygnału rozróżniamy światłowody

pasywne (transmisja sygnałów lub danych)

aktywne (wzmacniacze optyczne)

Włókno światłowodowe, które składa się z rdzenia i płaszczka szklanego musi być otoczone kilkoma warstwami zewnętrznymi w celu ochrony przed uszkodzeniami mechanicznymi, a także przed wpływami środowiska, takimi jak wilgoć czy temperatura. Poza tym, w większości zastosowań, przede wszystkim w telekomunikacji i w sieciach komputerowych światłowody łączone są w pęk włókien, otoczone wspólnym pokryciem tworząc kabel światłowodowy. Pierwsze kable optotelekomunikacyjne zawierały 4, 8, 24, i 48 włókien, współczesne kable zawierają 144 włókna (np. krajowy kabel XOTKtd 144J produkowany przez Elektrim Kable S.A., Fabrykę Kabli Ożarów) lub więcej, nawet 400 włókien w jednym

kablu, dostarczając przepływności rzędu petabitów, czyli  $10^{15}$  bitów informacji cyfrowej w ciągu sekundy. W tabeli 2.1 porównujemy charakterystyki kabli miedzianych i kabli światłowodowych.

Tabela.2.1 Charakterystyka kabli miedzianych i kabli światłowodowych

	Kabel miedziany	Włókno światłowodowe
średnica(cale)	2.8 x 22,5	0.5 x 22,5
ciężar (1000-stóp długości)	4800	80
pojemność (megabajt)	3.15	417

Rozróżniamy dwa sposoby ułożenia włókna światłowodowego w kablu:

- **ścista tuba** (ang. tight buffer)
- **luźna tuba** (ang. loose buffer)

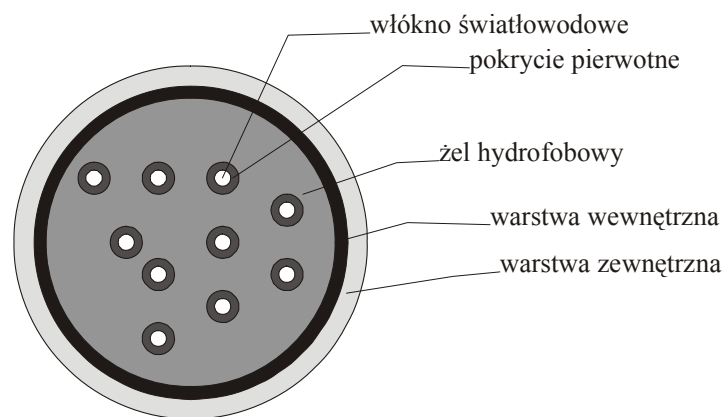
W ścisłej tubie promień zewnętrzny włókna światłowodowego z pokryciem pierwotnym jest równy promieniowi wewnętrznemu pokrycia wtórnego. Schemat ścisłej tuby przedstawiono na rysunku 2.1. Kable typu ścisła tuba wykorzystywane są w konstrukcjach przeznaczonych do krótkich połączeń wewnątrz obiektów.



Rys.2.1 Schemat ścisłej tuby

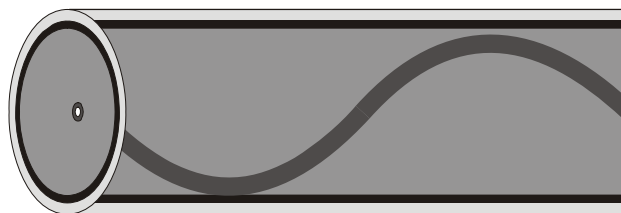
W luźnej tubie promień zewnętrzny włókna światłowodowego z pokryciem pierwotnym jest mniejszy niż promień wewnętrzny pokrycia wtórnego. Światłowód lub światłowody

umieszczone są swobodnie w luźnej tubie. Luźna tuba jest najczęściej wytwarzana w postaci dwuwarstwowej rurki. Wewnętrzna warstwa rurki wypełniona jest najczęściej tworzywem (np. przedzą aramidową) lub żelem o małym współczynniku tarcia, która zabezpiecza przed lokalnymi makro- i mikrozgięciami, zaś zewnętrzna rurka zabezpiecza przed czynnikami zewnętrznymi. Schemat luźnej tuby przedstawiono na rysunku 2.2. Kable typu luźna tuba wykorzystywane są w konstrukcjach przeznaczonych do dalekosiężnych połączeń wewnątrz obiektów



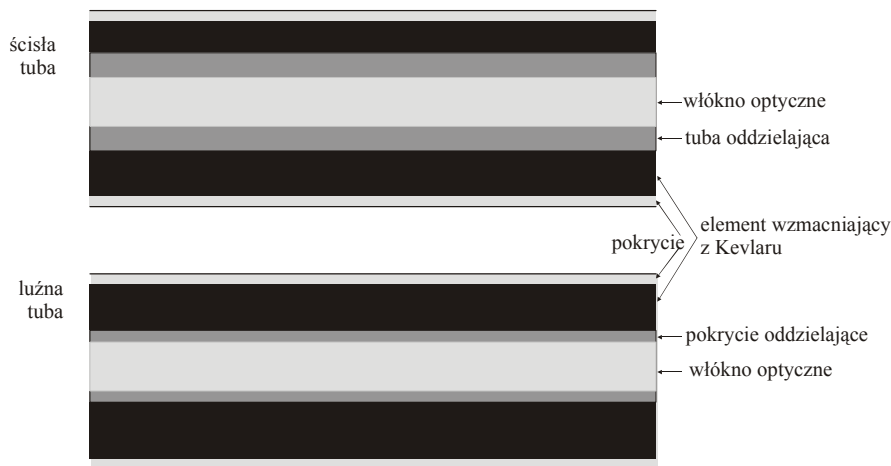
Rys.2.2 Schemat luźnej tuby

Ponieważ światłowód lub światłowody umieszczone są swobodnie wewnątrz tuby, długość światłowodu jest większa od długości tuby (Rys. 2.3)

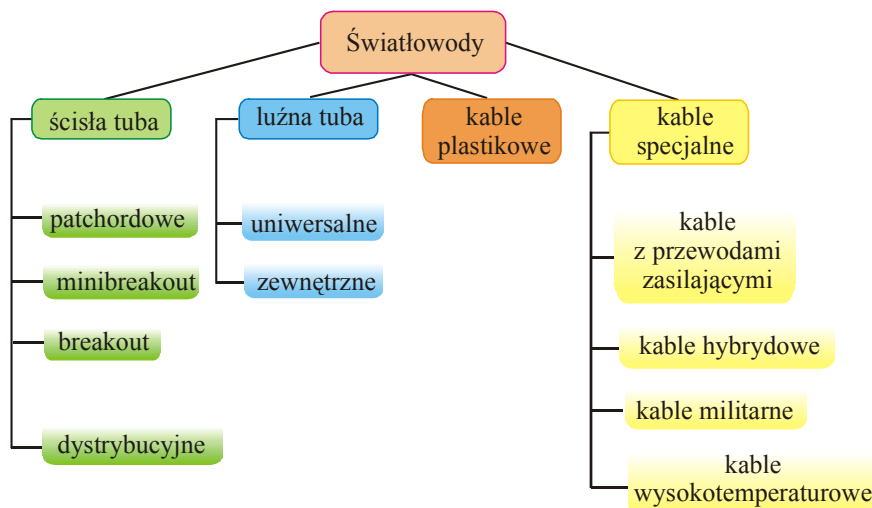


Rys.2.3 Ułożenie włókna światłowodowego w luźnej tubie.

Żel wypełniający tubę ma własności hydrofobowe aby blokować dostęp wody do jej wnętrza



Rys.2.4 Przekrój poprzeczny ścisłej i luźnej tuby



Rys.2.5 Typy kabli światłowodowych.

Istnieje wiele wariantów kabli z włóknami w ścisłej tubie:

- **Kable patchcordowe** – służące do krosowania torów światłowodowych w łącznicach telekomunikacyjnych i węzłach komutacji, są to krótkie odcinki światłowodowe zakończone odpowiednimi złączami. Najprostsza konstrukcja to jedno lub dwa włókna w ścisłym pokryciu, otoczone włóknami aramidowymi lub szklanymi i następnie pokryte powłoką zewnętrzną,
- **Kable typu breakout** – kable zawierające od 2 do 24 włókien w pokryciu jak w kablach patchcordowych, a następnie wspólnie osłonięte powłoką zewnętrzną (Rys.2.1),
- **Kable minibreakout** - włókna światłowodowe zebrane razem, zabezpieczone są osłoną z włókien aramidowych lub szklanych i pokryte powłoką zewnętrzną.

- **Pigtail** – przeznaczony jest do zakończenia włókien kabla światłowodowego, za pomocą spawania lub przy użyciu złączek mechanicznych. Jest to krótki odcinek, około 2 m w ścisłej tubie jednostronnie zakończony złączką światłowodową (Rys.2.6). Na rysunku 2.6 przedstawiono zakończenie złączką typu SC



Rys.2.6 Pigtail jednomodowy zakończony złączką typu SC (Molex Premise Network)

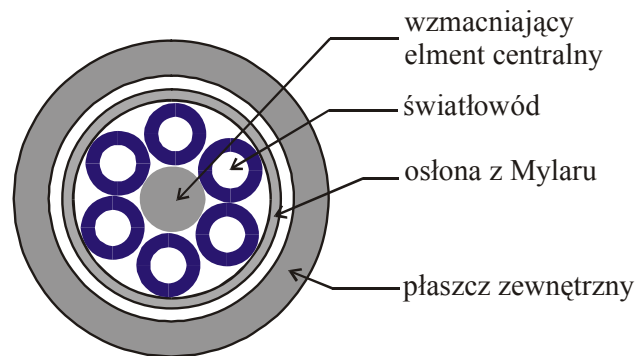
Ponadto, istnieje kilka wariantów kabli z włóknami w luźnej tubie:

- **Konstrukcja jednotubowa** – typowo 4 do 12 włókien umieszczonych jest wewnątrz centralnej tuby,
- **Konstrukcja wielotubowa** – typowo 4 do 14 tub skręconych wokół dielektrycznego elementu centralnego (Rys.2.8).



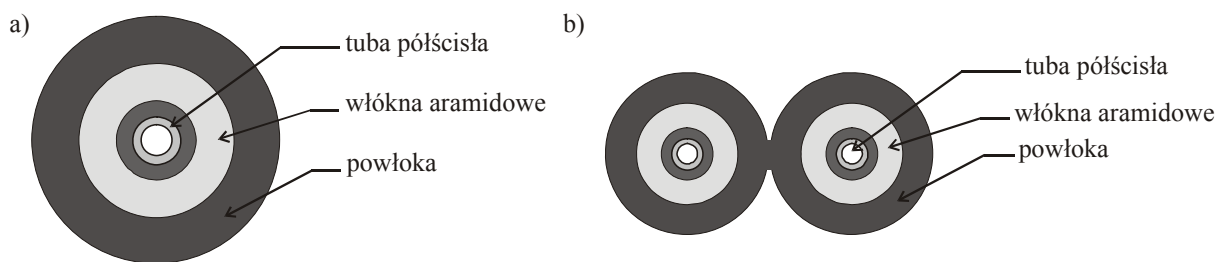
Rys.2.7 Kabel typu breakout

Rysunek 2.8 przedstawia przekrój poprzeczny przez tubę z elementem centralnym. Konstrukcje wielotubowe – 4 do 14 tub skręconych wokół dielektrycznego centralnego elementu wzmacniającego. Każda tuba zawiera od 4 do 14 włókien.



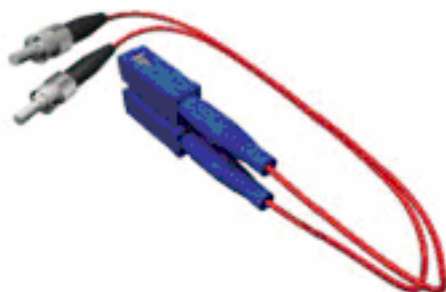
Rys. 2.8 Przekrój poprzeczny przez tubę z centralnym elementem wzmacniającym.

Oprócz tub ścisłych i luźnych istnieje wersja pośrednia- tuba półściśła (ang. semitight buffer). Rysunek 2.9 przedstawia przekrój poprzeczny przez kabel światłowodowy typu *simplex* i *duplex* w wersji półściślej.



Rys.2.9 Przekrój poprzeczny przez kabel światłowodowy typu (a) *simplex*, (b) *duplex*.

Rysunek 2.10 przedstawia kabel krosowy typu duplex; wielomodowy MMF, z końcówkami SC-ST zaś rysunek 2.11 przedstawia kabel krosowy jednomodowy SMF z końcówkami SC-SC.



Rys 2.10 Kabel krosowy typu duplex; wielomodowy MMF, z końcówkami SC-ST



Rys 2.11 Kabel krosowy typu duplex; jednomodowy SMF z końcówkami SC-S.C.

## 2. 2. Parametry światłowodów

Aby sieć optyczna właściwie wykonywała zadanie transmisji sygnałów należy przede wszystkim wybrać właściwe włókna światłowodowe, zastosować właściwy nadajnik światła i właściwy odbiornik-detektor. Nadajniki omówimy w rozdziale 5, odbiorniki omówimy w rozdziale 6. W tym rozdziale zajmiemy się określeniem najważniejszych parametrów światłowodu, jakie należy brać pod uwagę przy budowie sieci optycznej.

Rozróżniamy różnorodne parametry włókien światłowodowych:

### 1. Optyczne

- **operacyjna długość fali** (ang. operating wavelength (nm))
- **tłumienie** (ang. attenuation , dB)
- **tłumienność** (ang. attenuation per km, dB/km)
- **dyspersja** (ang. dispersion)
- **współczynniki załamania** (wartość i profil ) (ang. refraction index)
- **apertura numeryczna** (ang. numerical aperture)
- **częstotliwość odcięcia** oraz  **długość fali odcięcia** (ang. cut-off frequency, cut-off wavelength )
- **właściwości modowe** (typ modu, promień rdzenia),( ang. mode field diameter)
- **własności polaryzacyjne** (dyspersja polaryzacyjna PMD), (ang. polarization mode dispersion,) długość zdudnień,( ang. beat length)
- stabilność temperaturowa parametrów

### 2. Geometryczne

- Wymiary poprzeczne, geometria

### 3. Mechaniczne

- Wytrzymałość na zerwania, promień gięcia
4. Dodatkowe parametry (dla włókien specjalnych)
- Rodzaj domieszki aktywnej
  - Rodzaj środowiska w którym kabel jest zainstalowany

W rozdziale tym skoncentrujemy się na parametrach optycznych. Niektóre z nich takie jak: własności modowe, własności polaryzacyjne, wpływ współczynnika załamania, częstotliwość odcięcia  $\nu$  omówiliśmy w rozdziale 1. Inne, takie jak dyspersja szczegółowo omówimy w rozdziale 3 i 4.

Tabela.2.2 Zestaw typowych parametrów włókien światłowodowych

Typ światłowodu					
Operacyjna długość fali (nm)	400	633	800	1300	1550
Tłumienność (dB/km)	350	<12	<5	<2	<2
Długość odcięcia (nm)	<380	<600	<800	<1250	<1400
promień ( $\mu m$ )	3	3.5	5	9	10
Długość dudnień	<2	<3	<5	<7	<8
Apertura numeryczna (N.A)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

### 2.2.1. Tłumienie (dB) i tłumienność [dB/km]

Do opisu strat mocy w światłowodzie używamy wielkości zwanej tłumieniem  $A$ , która wyraża się w decybelach (dB)

$$A = 10 \log \left[ \frac{P(l_2)}{P_0(l_1)} \right] \quad (2.1)$$

Używa się również jednostki zwanej tłumiennością  $\alpha$  wyrażoną w [dB/km]

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left[ \frac{P(l_2)}{P_0(l_1)} \right] \quad (2.2)$$

gdzie  $P(l_2)$  oraz  $P_0(l_1)$  oznaczają moce optyczne na końcu i na początku światłowodu zmierzone w punktach  $l_2$  oraz  $l_1$  odległych od siebie o  $L$ . Znak minus pomijamy. Tak więc



10 decybeli odpowiada zmniejszeniu sygnału 10 razy, 20 dB - 100 razy itd. Jeżeli więc na odcinku 1 km przechodzi tylko:

50 % mocy sygnału wejściowego to tłumienność wynosi 3dB/km,  
 1% - 20dB/km  
 0.1% -30dB/km  
 0.01% -40 dB/km

Aby uniknąć ujemnego znaku, który po prostu pomijamy we wzorach (2.1) i (2.2) można obliczać  $\log \frac{P_0}{P}$  zamiast  $\log \frac{P}{P_0}$ , choć z dydaktycznego punktu widzenia definicje (2.1) i (2.2) są bardziej użyteczne.

Przykład: Straty światłowodu	
Dane:	Sygnał 10 mW jest wprowadzony do światłowodu o długości 5 km. Do odbiornika dociera sygnał 1 μW
znaleźć:	Straty światłowodu
Rozwiązanie:	<p>Straty w <i>dB</i>, są dane przez wzór:</p> $10 \log_{10} (P_0/P) = 10 \log_{10} (10 \text{ mW}/10^{-3} \text{ mW})$ $P_0/P = 10 \log_{10} 10^4 = 40 \text{ dB}$ <p>Więc, tłumienność czyli straty na 1 km światłowodu wynosi</p> $40 \text{ dB}/5 \text{ km} = 8 \text{ dB/km}.$

Porównajmy tłumienności dla włókien jednomodowych i wielomodowych

Tabela 2.3 Tłumienności dla włókien jednomodowych i wielomodowych

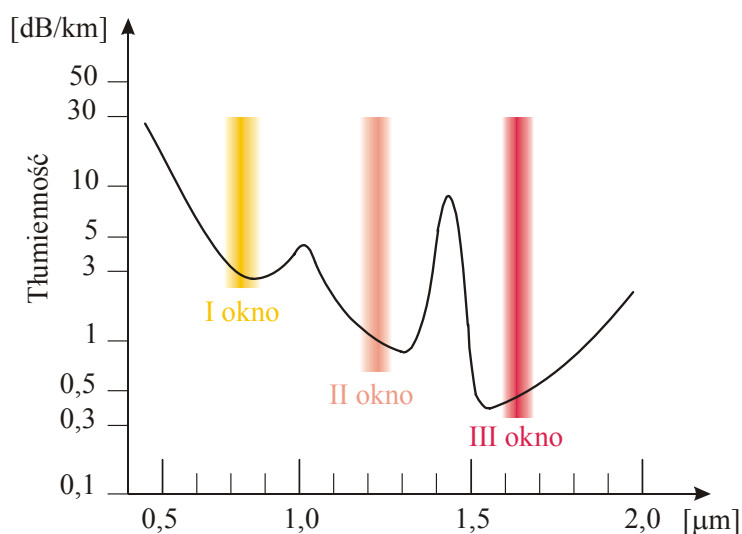
Włókna jednomodowe	
1310 nm	0.33-0.42 dB/km
1550 nm	0.18-0.25 dB/km
Włókna wielomodowe (gradientowe)	

850 nm	2.4-2.7(50/125)	2.7-3.2(62.5/125)	dB/km
1300 nm	0.5-0.8	0.6-0.9	dB/km

Tłumienie i tłumienność mierzymy za pomocą przyrządów zwanych reflektometrami. Omówimy je w rozdziale 2.4. Rys.2.12 przedstawia miernik tłumienia optycznego.



Rys.2.12 Miernik tłumienia optycznego FLT4 [products.molexpn.com.pl](http://products.molexpn.com.pl)

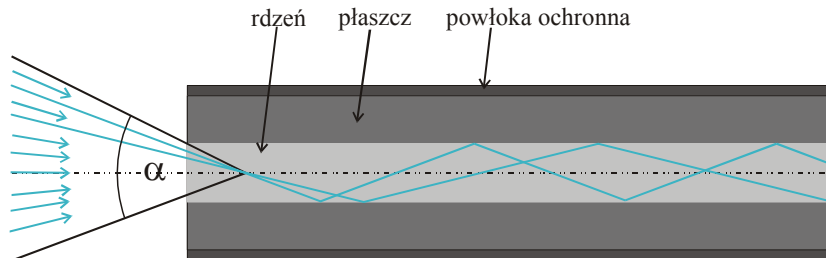


Rys.2.13 Tłumienności w trzech oknach optycznych

### 2.2.2. Apertura numeryczna

Apertura numeryczna NA (ang. numerical aperture) jest miarą maksymalnego dopuszczalnego kąta (Rys.2.14) między wchodzącym promieniem i osią światłowodu, powyżej którego nie zachodzi już zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia i promień nie może być propagowany w światłowodzie. Maksymalny dopuszczalny kąt nosi nazwę kąta

akceptacji. Apertura numeryczna NA definiowana jest jako sinus połowy kąta akceptacji. Typowe wartości tylko światło wynoszą 0.1-0.4, które odpowiadają katowi akceptacji  $11^{\circ}$ - $46^{\circ}$ . Światłowód transmituje, które wchodzi do światłowodu pod kątami równymi lub mniejszymi niż kąt akceptacji

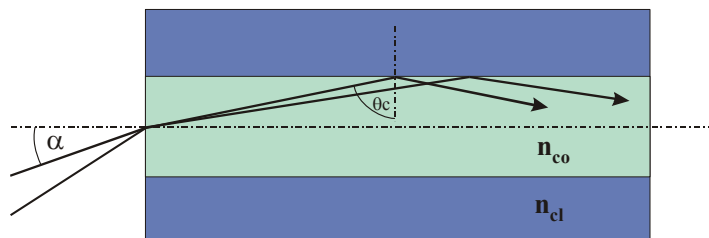


Rys.2.14 Ilustracja kąta akceptacji charakteryzującego aperturę numeryczną NA

Pokażemy, że apertura numeryczna NA zależy od współczynników załamania rdzenia i płaszczu i wyraża się wzorem

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.3)$$

Wyprowadźmy wzór na aperturę numeryczną NA



Rys.2.15 Rysunek pomocniczy do wyprowadzenia wzoru na aperturę numeryczną NA

Z prawa Snelliusa wynika, że

$$n_{co} \sin \theta_c = n_{cl} \sin 90^{\circ} = n_{cl} \quad (2.4)$$

Z zależności na sumę kątów w trójkącie otrzymujemy

$$n_{co} \sin(90^{\circ} - \theta_m) = n_{cl} \quad (2.5)$$

a stąd

$$n_{co} \cos \theta_m = n_{cl} \quad (2.6)$$

Z wzorów redukcyjnych otrzymujemy

$$n_{co} \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_m} = n_{cl} \quad (2.7)$$

Po podniesieniu obu stron do kwadratu otrzymujemy

$$n_{co}^2 (1 - \sin^2 \Theta_m) = n_{cl}^2 \quad (2.8)$$

a stąd

$$n_{co}^2 - n_{co}^2 \sin^2 \Theta_m = n_{cl}^2 \quad (2.9)$$

Korzystając z prawa załamania na granicy rdzeń – powietrze przy wprowadzaniu światła do światłowodu

$$n_{co}^2 \sin^2 \Theta_m = 1 \sin^2 \alpha \quad (2.10)$$

i podstawiając do (2.9)) otrzymujemy

$$n_{co}^2 - \sin^2 \alpha = n_{cl}^2 \quad (2.11)$$

Ostatecznie

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.12)$$

Tabela 2.4 przedstawia apertury numeryczne NA dla różnych typów włókien światłowodowych oraz inne parametry, takie jak promień rdzenia, tłumienność oraz iloczyn odległości i szerokości pasma

Tabela 2.4 Typy światłowodów

Typ	Promień rdzenia/ płaszczka ( $\mu\text{m}$ )	NA	tłumienność (dB/km)	Iloczyn Odległość*szerokość pasma (MHz-km)
Wielomodowy, niewielkie odległości	100/200	0.3	5 - 10	20 - 200
jednomodowy	6/125	0.03	0.1	1000
Wielomodowy, gradientowy, duże dległości	50/125	0.2	1 - 5	500 - 1500

### 2.2.3. Częstotliwość odcięcia

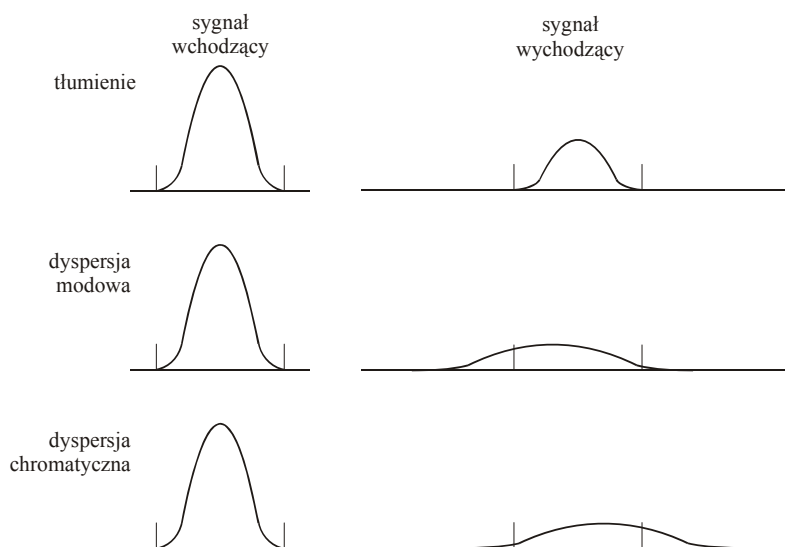
Parametrem, od którego zależy liczba modów wyraża się wzorem

$$g = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.13)$$

gdzie  $n_1, n_2$  – współczynnik załamania rdzenia i płaszczka,  $a$  - promień rdzenia,  $\lambda_0$  – długość fali światła. Wielkość wyrażona wzorem (2.13) pozwala określić częstotliwość odcięcia. I została wyprowadzona w rozdziale 1 wzór (1.56). Przypomnijmy, że liczba modów propagowanych w światłowodzie zależy od średnicy rdzenia  $a$ , różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszczka  $n_1 - n_2$  oraz długości fali propagowanej przez światłowód  $\lambda_0$ . Dany mod może rozchodzić się w światłowodzie dopiero wtedy, gdy wartość znormalizowanej częstotliwości  $v$  przekroczy określoną, charakterystyczną dla każdego modu wielkość, zwaną **częstotliwością odcięcia**. Gdy  $v < 2.405$  to równania charakterystyczne opisane w rozdziale 1 nie mają rozwiązania, czyli nie istnieje żaden mod typu  $TE_{op}$  oraz  $TM_{op}$ . Jedynym modem propagowanym bez ograniczeń jest mod hybrydowy  $HE_{11}$ , dla którego częstotliwość odcięcia wynosi zero.

### 2.2.4. Współczynnik dyspersji D

Rysunek 2.16 ilustruje przyczyny degradacji sygnału. Pierwsza przyczyna degradacji to tłumienie. Należy zauważyć, że tłumienie zmniejsza intensywność sygnału, ale nie zmienia czasu trwania impulsu. Mieści się on w swoim interwale czasowym.



Rys.2.16 Główne przyczyny degradacji sygnału

Następne przyczyny to dyspersja modowa, dyspersja chromtyczna oraz dyspersja polaryzacyjna. Omówimy je szczegółowo w rozdziale 3. Wszystkie rodzaje dyspersji powodują poszerzenie sygnału i w skrajnych przypadkach mogą nie mieścić się w swojej szczelinie czasowej. Dyspersja modowa wynika z faktu, że światło w światłowodzie może wędrować po różnych drogach optycznych, a więc początkowy impuls zaczyna ulegać poszerzeniu. Dyspersja chromatyczna wynika z faktu, że współczynnik załamania zależy od długości fali. Dla impulsów niemonochromatycznych różne składowe wędrują z różnymi prędkościami. Do opisu dyspersji używamy wielkości zwanej **współczynnikiem dyspersji D** zdefiniowanym jako

$$D = \frac{dt_g}{d\lambda} \left[ \frac{ps}{nm \bullet km} \right], \text{ gdzie } t_g = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} \quad (2.14)$$

Współczynnik dyspersji wyznacza poszerzenie czasowe impulsu w ps (pikosekundach) po przejściu 1 km odcinka światłowodu, jeżeli szerokość linii widmowej źródła światła wynosi 1 nm. Wielkość  $v_g$  jest prędkością grupową, którą omówimy w rozdziale 3.

### 2.2.5. Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej (PMD) (ang. polarization mode dispersion), długość zdudnień (ang. beat length)

W światłowodach może występować zjawisko dwójłomności. Miarą dwójłomności jest parametr zwany dwójłomnością modową  $B_m$  (nie mylić tego oznaczenia ze znormalizowaną stałą propagacji zdefiniowaną równaniem (1.81)

$$B_m = \frac{|\beta_y - \beta_x|}{k_0} = n_{ef}^x - n_{ef}^y, \quad (2.15)$$

gdzie  $\beta_y$  oraz  $\beta_x$  są stałymi propagacji ortogonalnych modów, zaś  $n_{ef}^x$  i  $n_{ef}^y$  są efektywnymi współczynnikami załamania w kierunku  $x$  i  $y$ ,  $k_0$  jest wektorem falowym.

Innym parametrem definiującą dwójłomność światłowodu jest **długość zdudnień** (ang. beat length)

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_y - \beta_x|} = \frac{\lambda}{B_m}, \quad (2.16)$$

gdzie  $L_B$  jest drogą, na której różnica faz modów ortogonalnych zwiększa się o  $\frac{\pi}{2}$ , czyli drogą na której wymieniana jest moc między modami. Zjawisko to powtarza się periodycznie.

Parametrem, który charakteryzuje **zjawisko dyspersji spowodowanej stanem polaryzacji** (ang. polarization-mode dispersion, PMD) jest opóźnienie czasowe  $\Delta T$  między dwiema ortogonalnymi składowymi. Parametr ten jest miarą deformacji (wydłużenia impulsu czasowego) na drodze  $L$  dla światłowodu charakteryzowanego przez dwójłomność modową  $B_m$  i opóźnienie czasowe  $\Delta T$  spowodowane dyspersją PMD wyraża się wzorem.

$$\Delta T = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| = L |\beta_{1x} - \beta_{1y}| = L \delta\beta_1 \quad (2.17)$$

gdzie

$$\delta\beta_1 = k_0 (dB_m / d\omega) \quad (2.18)$$

Teraz rozumiemy już wszystkie parametry wymieniane w katalogach handlowych włókien światłowodowych (Tabela 2.5). W rozdziale 3 pogłębimy naszą wiedzę o zjawiskach dyspersji.

Tabela 2.5 Przykładowe parametry włókien światłowodowych [ ]

WŁÓKNA JEDNOMODOWE	Długość fali [nm]	
Tłumienność jednostkowa [dB/km]	1310	≤ 0.38
	1285-1330	≤ 0.40
	1385	-
	1460	-
	1550	≤ 0.23
	1525-1575	-
	1625	-
Średnica pola modu [μm]	1310	9.1 ± 0.3
	1550	10.2 ± 0.4
Dyspersja chromatyczna [ps/nm·km]	1285-1330	≤ 3
	1550	≤ 18
	1525-1575	-
	1460-1625	-

	1530-1565	-
	1565-1625	-
Długość fali dla zerowej dyspersji [nm]		$\geq 1302 \leq 1322$
Długość fali odcięcia [nm]		$\leq 1260$
PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	1550	$< 0.5$

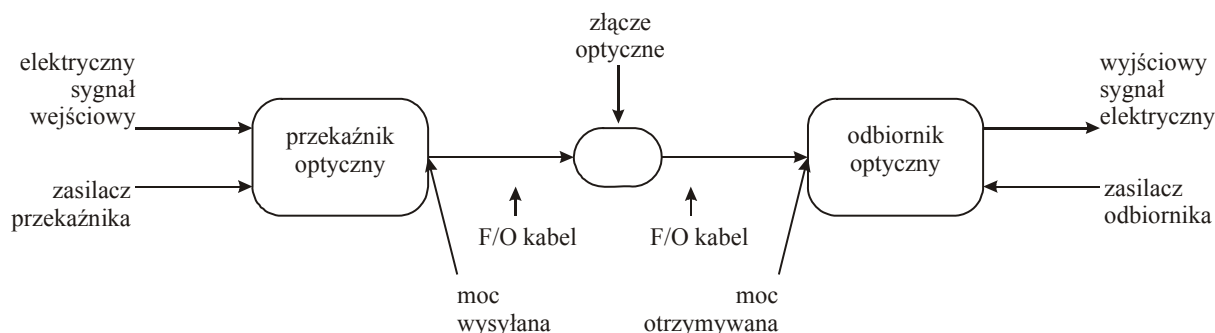
Podstawowe parametry		włókien				światłowodowych			
WŁÓKNA WIELOMODOWE 50/125 [ ]									
WŁÓKNA WIELOMODOWE 50/125		Długość fali [nm]							
Tłumienność [dB/km]	jednostkowa	850	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$	--
		1300	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	--
		1240-1550	--	--	--	--	--	--	$\leq 0.7$
Szerokość przenoszenia [MHz·km]	pasma	850	$\geq 200$	$\geq 500$	$\geq 700$	$\geq 1500$	$\geq 3500$	$\geq 600$	--
		1300	$\geq 500$	$\geq 500$	$\geq 500$	$\geq 500$	$\geq 500$	$\geq 1200$	--
		1240-1550	--	--	--	--	--	--	$\geq 500$
Gigabitowy odległość [m]	Ethernet	850	--	--	$\leq 150$ (10 Gb/s)	$\leq 300$ (10 Gb/s)	$\leq 550$ (10 Gb/s)	$\leq 750$ (1 Gb/s)	--
		1300	--	--	--	--	--	$\leq 2000$ (1 Gb/s)	--



	1240-1550	--	--	--	--	--	--	≤ 550 (1 Gb/s)
Aparatura numeryczna		0.200 ± 0.015						
Grupowy współczynnik załamania	850	1.482						--
	1300	1.477						

### 2.3. Bilans mocy optycznej systemu światłowodowego

Kiedy projektujemy optyczny system światłowodowy, należy rozważyć wiele czynników, aby system pracował prawidłowo. Rysunek 2.17 definiuje niektóre z nich.



Rys.2.17 Parametry, które należy uwzględnić przy budowie sieci optycznej

Wyczerpująca lista czynników, które należy rozważyć przedstawiona jest w Tabeli.2.6

Tabela.2.6

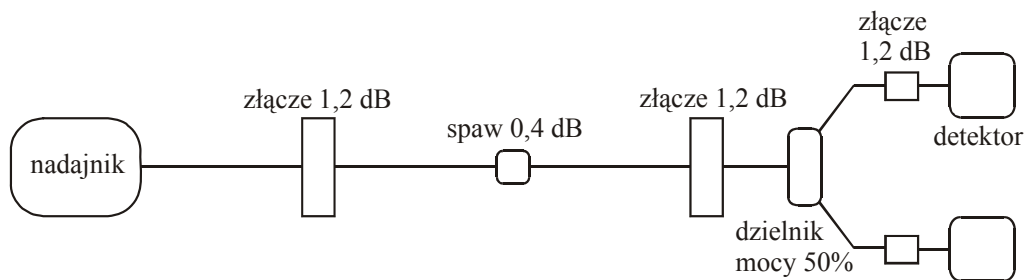
Parametr	Czynniki do rozważenia
Odległość transmisji	Złożoność układu rośnie wraz z odległością
Długość fali	780, 850, 1310, 1550, and 1625 nm
Rodzaj światłowodu	Jednomodowy, wielomodowy, z przesuniętą dyspersją, i.t.d., szerokość pasma
Dyspersja	Jak dużą dyspersję system toleruje, czy konieczna jest kompensacja dyspersji
Nieliniowość światłowodu	Czy degradacja sygnału spowodowana

	wymuszonym rozpraszaniem Ramana, Brillouina, automodulacją fazy i.t.d. wpływa na jakość sygnału
Transmitowana moc optyczna	Wiązane z poprzednimi rozważaniami ,moc optyczna jest wyrażona w dBm
Źródło światła	Dioda LED czy laser, jeżeli laser to jaki typ:FP, DFB, DBR
Czułość detektora	wyrażona w dBm
Typ detektora	Fotodioda PIN, lawinowa APD, uwzględniając czułość i czas odpowiedzi
Typ wzmacniania	Elektroniczne, optyczne, typ wzmacniacza
Kod modulacji	AM, FM, PCM, lub Cyfrowy
Elementowa stopa błędu (dla systemów cyfrowych) (ang. Bit Error Rate )	Typowo $10^{-9}$ , $10^{-12}$
Stosunek sygnału do szumu	wyrażone w dB
Typ łączenia	Typy i liczba złączy
Wpływ środowiska	Wilgotność, temperatura, ekspozycja słoneczna
Parametry mechaniczne i zabezpieczenie pożarowe	Zastosowanie wewnętrzne, zewnętrzne, palność

Niżej przedstawiona procedura pozwala krok po kroku określić kolejność analizy czynników:

- Odległość i tłumienność z nią związana jest czynnikiem najważniejszym. Należy wybrać właściwy rodzaj światłowodu uwzględniając wyżej wymienione parametry oraz wybrać rodzaj złączy,
- Wybrać odpowiednią kombinację nadajnika i odbiornika, w zależności od tego, jaki typ sygnału jest transmitowany (analogowy, cyfrowy, audio, video, RS-232 itd.),
- Wybrać właściwy rodzaj światłowodu uwzględniając wyżej wymienione parametry oraz wybrać rodzaj złączy,

- Obliczyć całkowite straty mocy optycznej, uwzględniając tłumienność światłowodów, straty na spawach, złączkach itd. Parametry te podane są przez producenta,
- Należy porównać straty z czułością detektora. Należy zastanowić się czy detektor jest w stanie mierzyć poziom mocy optycznych docierających do odbiornika.
- Należy zastosować margines błędu, przynajmniej 3dB dla całego systemu
- Należy sprawdzić czy szerokość pasma światłowodu jest adekwatna do sygnału, który chcemy przesyłać. Jeżeli nie należy wybrać inną kombinację nadajnik/odbiornik (długość fali) albo rozważyć światłowód o mniejszych stratach.



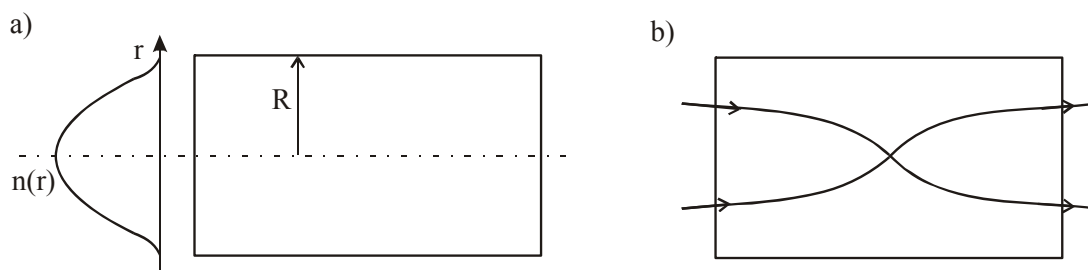
Rys.2.18 Ilustracja łącza, dla którego policzono bilans mocy.

Zastosujmy powyższe wskazówki do wykonania bilansu mocy dla układu przedstawionego na rysunku 2.18. Wykonanie bilansu mocy polega na zestawieniu wartości mocy na wejściu łącza światłowodowego i wszystkich strat występujących po drodze. Bilans mocy służy do doboru właściwej mocy optycznej źródła, aby zapewnić wystarczająco dużą ilość światła na wyjściu traktu, która musi być wyższa od czułości detektora. Niech. margines projektowy (–5dB) uwzględnia straty trudne do oszacowania, np. straty na zgięciach. Obliczenia wykonuje się w decybelach (dB), zaś dla światła używamy jednostki dBm. Stosunek mocy optycznej w  $dB_m$  wyraża się wzorem

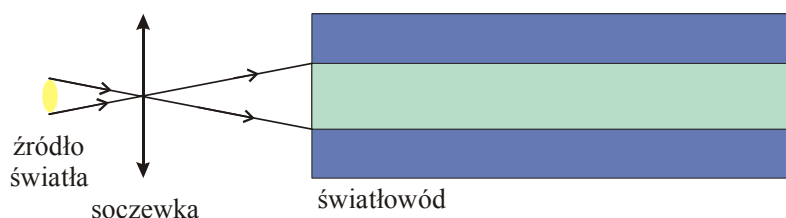
$$X [dB_m] = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (2.19)$$

Przy sporządzaniu bilansu mocy wygodnie jest przedstawiać wartości bezwzględne mocy źródła i czułość detektora w decybelach (które dla odróżnienia od jednostki tłumienia oznaczymy jako dBm). W tym celu musimy ustalić odnośnik. Jeżeli ustalimy arbitralnie, że 1mW odpowiada wartości 0 dBm, to sygnał o mocy +10 dBm oznacza moc optyczną 10 mW, zaś sygnał o mocy –10 dBm oznacza 0.1 mW. Stosowanie jednostek dBm ułatwia obliczenia. Załóżmy przykładowo sumaryczne straty w światłowodzie wynoszą 20 dB, co oznacza że do detektora dociera moc –20dBm, co odpowiada mocy optycznej 0.01 mW.

Aby właściwie wykonać projekt, musimy powiedzieć jeszcze o tłumieniu podczas sprzężenia toru światłowodu ze źródłami światła i odbiornikami. Sprzężenia źródła światła ze światłowodem dokonujemy za pomocą soczewek, zwykle soczewek typu GRIN (ang. gradient index) albo SELFOC (ang. self-focusing) (Rys. 2.19)



Rys.2.19 Soczewki typu GRIN (ang. gradient index) albo SELFOC (ang. self-focusing)



Rys.2.20 Ilustracja sprzężenia źródła światła ze światłowodem

Sprawność sprzężenia  $\eta$  źródła światła ze światłowodem wyraża się wzorem

$$\eta = \left( \frac{NA_f}{NA_s} \right)^2 F \min \left( 1, \left( \frac{a}{r_s} \right)^2 \right) \quad (2.20)$$

gdzie

$NA_f$  - apertura numeryczna włókna światłowodowego

$NA_s$  - apertura numeryczna źródła

$a$  - promień rdzenia

$r_s$  - promień powierzchni emisyjnej źródła

$F$  - współczynnik opisujący straty spowodowane odbiciem Fresnela przy wchodzeniu światła do światłowodu, spowodowane różnymi współczynnikami załamania rdzenia i powietrza, zwyczaj  $t=0.95$

Wzór ten wyraża proste spostrzeżenie, które wynika z rysunku 2.20, że sprzężenie jest maksymalne gdy plamka powierzchni emisyjnej źródła jest mniejsza lub równa powierzchni światłowodu. Gdy jest odwrotnie, to część światła tracimy. Ta stracona część jest równa

$$1 - \left( \frac{a}{r_s} \right)^2 \quad (2.21)$$

Poznawszy zasadę oszacowania sprawności sprzężenia  $\eta$  źródła światła ze światłowodem możemy przystąpić do policzenia bilansu mocy dla systemu przedstawionego na rysunku 2.18

Przykład: Należy zaprojektować łącze światłowodowe z użyciem diody LED o  $\lambda=820\text{nm}$ . Powierzchnia emisyjna diody wynosi średnicę  $40\mu\text{m}$ . Dioda o aperturze numerycznej  $NA_s=1$  jest sprzężona ze światłowodem o aperturze numerycznej  $NA_f=0,45$  i średnicy rdzenia  $50\mu\text{m}$ . Łącze jest wykonane światłowodem o tłumienności  $5\text{dB/km}$  dla długości fali  $820\text{nm}$ . Długość światłowodu wynosi  $5\text{km}$ . Obliczyć minimalną moc optyczną światła wysyłanego z diody LED, jeśli jako detektor zastosowano fotodiodę PIN o czułości  $-20\text{dBm}$  ( $10\mu\text{W}$ ). Konfigurację łącza przedstawia rysunek 2.18.

Rozwiązanie:

$$\text{Straty sprzężenia ze źródłem} = (NA_f / NA_s)^2 F = (0,45/1)^2 \cdot 0,95 = 0,192 = 7,2 \text{ dB}$$

$$(\text{bo } \eta = (NA_f/NA_s)^2 F \min [1, (a/r_s)^2]; \min [1, (50/40)^2]=1)$$

Straty na złączkach	$=3 \cdot 1,2\text{dB} = 3,6\text{dB}$	3,6 dB
Straty na spawie	$=0,4\text{dB}$	0,4 dB
Straty w światłowodzie	$=5\text{km} \cdot 5\text{dB/km} = 25\text{dB}$	25,0 dB
Straty na dzielniku mocy	$=50\%$	3,0 dB
Margines projektowy	$=5\text{dB}$	5,0 dB
	<b>RAZEM STRATY</b>	<b>46,2 dB</b>

Wymaganą moc optyczną źródła liczymy z bilansu:

$$P_0 = P_{RX} + P_L \quad (2.22)$$

gdzie  $P_0$  – wymagana moc optyczna,  $P_{RX}$  – czułość detektora,  $P_L$  – całkowite straty linii  
 stąd:  $P_0 = -20 \text{ dBm} + 46,2 \text{ dBm} = 26,2 \text{ dBm}$  ( $417 \text{ mW}$ ), bowiem  $0 \text{ dBm}$  odpowiada mocy  $1 \text{ mW}$ .

## 2.4. Reflektometr światłowodowy

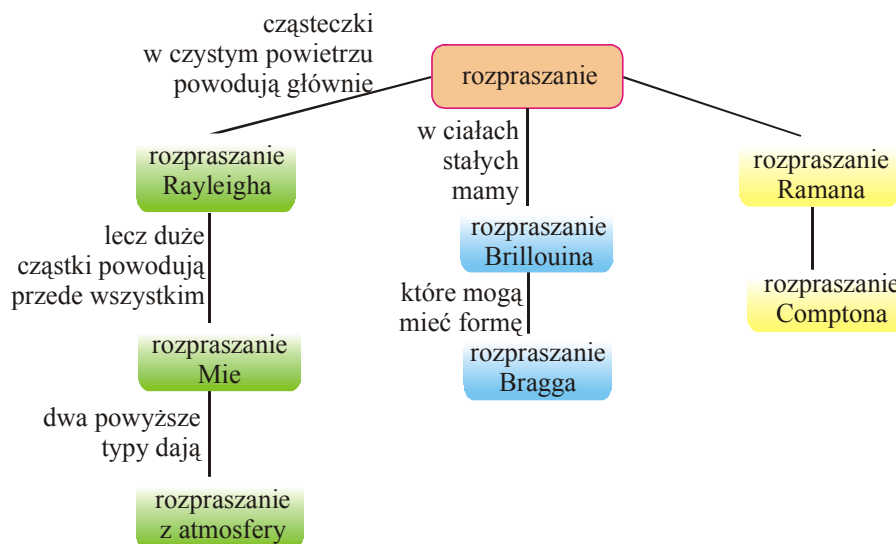
Reflektometr OTDR (ang. optical time domain reflectometer) jest podstawowym przyrządem pomiarowym do badania linii optokomunikacyjnych, zarówno przed oddaniem do eksploatacji jak i w trakcie eksploatacji w czasie badań okresowych. Za pomocą reflektometru można zmierzyć tłumienność oraz dyspersję linii. Przypomnijmy, że do opisu strat mocy w światłowodzie używamy wielkości zwanej tłumieniem  $A$ , które wyraża się w decybelach (dB),

$$A = 10 \log \left[ \frac{P(l_2)}{P(l_1)} \right] \quad (2.23)$$

Używamy również jednostki zwanej tłumiennością  $\alpha$  wyrażoną w [dB/km]

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left[ \frac{P(l_2)}{P(l_1)} \right] \quad (2.24)$$

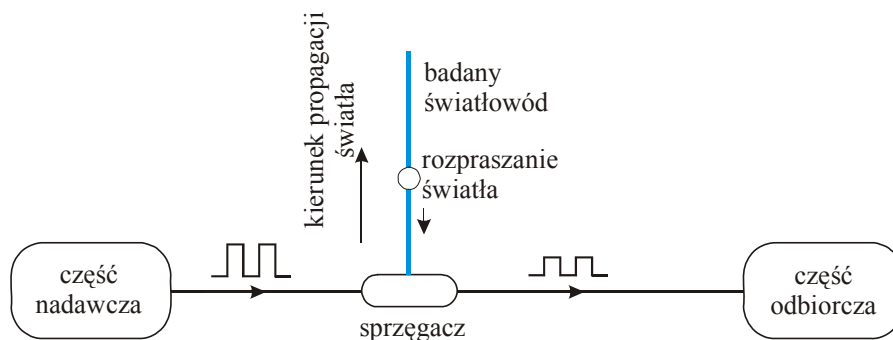
gdzie  $P(l_1)$  oraz  $P(l_2)$  oznaczają moce optyczne zmierzone w światłowodzie w punkcie początkowym  $l_1$  oraz  $l_2$  punkcie końcowym, odległych od siebie o  $L$ . Reflektometr wykorzystuje zjawisko rozpraszania światła zwane rozpraszaniem Rayleigha. Rysunek 2.21 pokazuje typy rozpraszania i ilustruje mechanizm rozpraszania Rayleigha



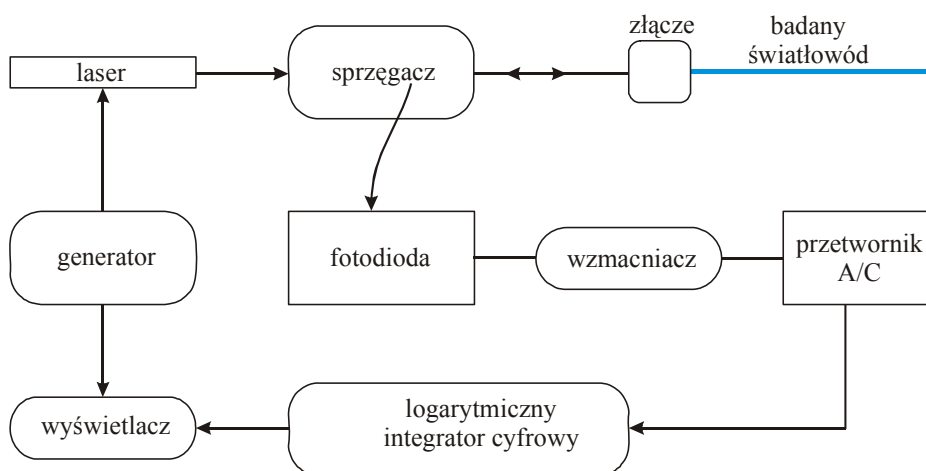
Rys.2.21 Typy rozpraszania

Zasada działania reflektometru przedstawiono na rysunku 2.22. Impulsy światła wysłane są przez laser półprzewodnikowy w części nadawczej do światłowodu przez sprzęgacz

optyczny. Impulsy światła rozchodząc się w światłowodzie ulegają rozproszeniu. Rozproszenie Rayleigha zachodzi we wszystkich kierunkach, ale do pomiaru wykorzystujemy tylko niewielką część rozproszonego światła w kierunku powrotnym. Rozproszony sygnał optyczny odbierany jest przez urządzenie odbiorcze (fotodioda, najczęściej dioda lądwinowa APD). Wartość odebranego sygnału zależy strat mocy optycznej, czyli tłumienia wzdłuż włókna światłowodowego.



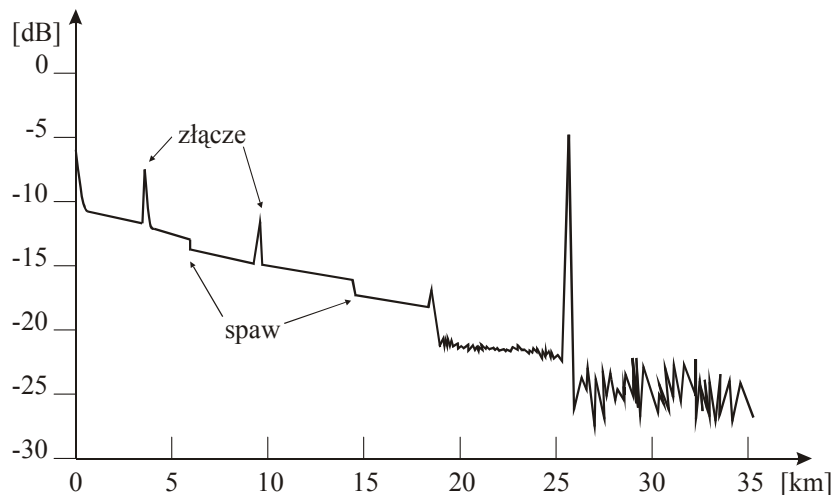
Rys.2.22 Zasada działania reflektometru



Rys.2.23 Schemat blokowy reflektometru [1]

Reflektometr składa się z części nadawczej w skład której wchodzi laser półprzewodnikowy, układ modulujący impuls (generator impulsowy). Impuls optyczny kierowany jest na sprzęgacz i wędruje po złączu światłowodowym. Światło rozproszone w kierunku przeciwnym wraca i przez ten sam sprzęgacz jest kierowane do układu odbiorczego składającego się z fotodiody, która zamienia sygnał optyczny na sygnał elektryczny.

Ponieważ odbierany sygnał jest bardzo słaby, zostaje wzmocniony we wzmacniaczu, następnie zamieniony na sygnał cyfrowy w przetworniku A/C skąd trafia do integratora cyfrowego, który zwiększa stosunek sygnału do szumów. Integrator cyfrowy jest to układ szybkiego sumatora, w którym dodawane są kolejne impulsy a następnie uśredniane. W reflektometrze można dokonać pomiaru upływu czasu między impulsem wysłanym i impulsem rozproszonym, który powrócił. Dzieląc ten czas przez dwa (bo światło przechodzi do danego punktu światłowodu i z powrotem) i mnożąc przez prędkość światła w światłowodzie ( $v = \frac{c}{n}$ ), otrzymujemy informację o odległości między początkiem światłowodu i miejscem z którego nastąpiło rozproszenie. Pomiar z zastosowaniem reflektometru światłowodowego ze może dostarczyć wielu ważnych informacji dotyczących linii światłowodowej: straty mocy optycznej, czyli tłumienia (dB), tłumieniu na jednostkę długości (dB/km) spowodowane przez połączenia spawane, złącza, uszkodzenia, zerwania. Na echogramie poniżej widać wyraźnie pewne zdarzenia , takie jak złącze, spaw, zgięcie, naderwanie. Piki reprezentują złącza, uskoki oznaczają spawy.



Rys.2.24 Echogram otrzymany w reflektometrze [1]

Parametry reflektometru światłowodowego:

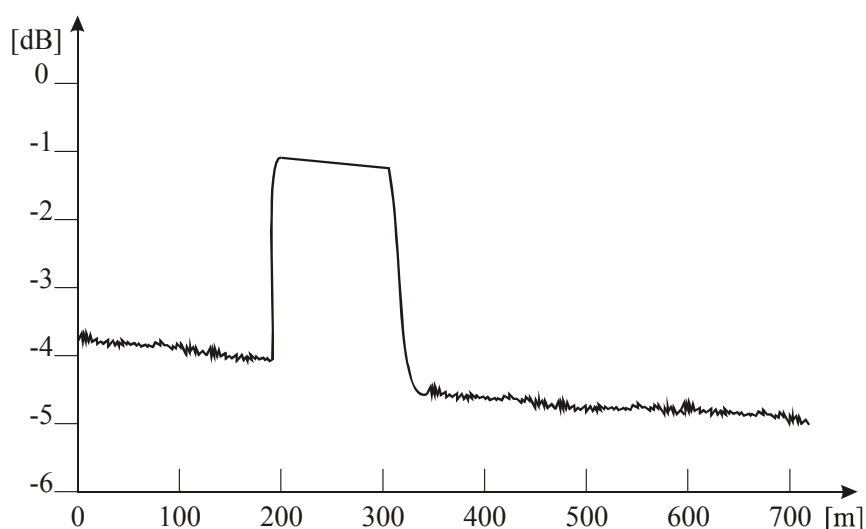
- długość fali na której pracuje reflektometr (850nm, 1310 nm, 1550 nm)
- długość wysyłanych impulsów (od 10 ns do 20000 ns) – gdy rośnie długość rośnie dynamika pomiaru, ale maleje rozdzielczość, czyli jakość pomiaru i utrata szczegółów na echogramie



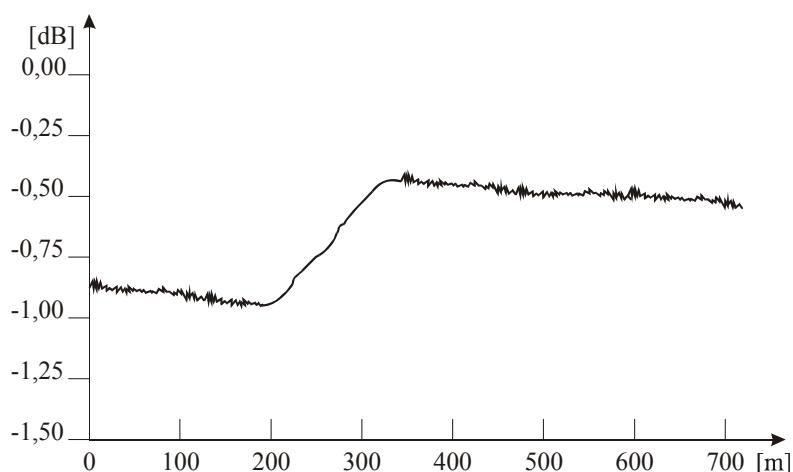
- długość mierzonej linii światłowodowej. Dobry reflektometr powinien mierzyć odległości przekraczające 200 km
- rozdzielczość (rozróżnialne wartości tłumienia lub odległości)
- dynamika pomiaru (różnica między największą i najmniejszą wartością impulsu jaki można zmierzyć za pomocą reflektometru), zazwyczaj dynamika reflektometrów wynosi 20-45dB

Liniowość przyrządu, np. gdy liniowość wynosi +/- 0.05 dB, to mierząc tłumienie o wartości 10 dB, błąd wynikający z nieliniowości wynosi od -0.5dB do +0.5dB

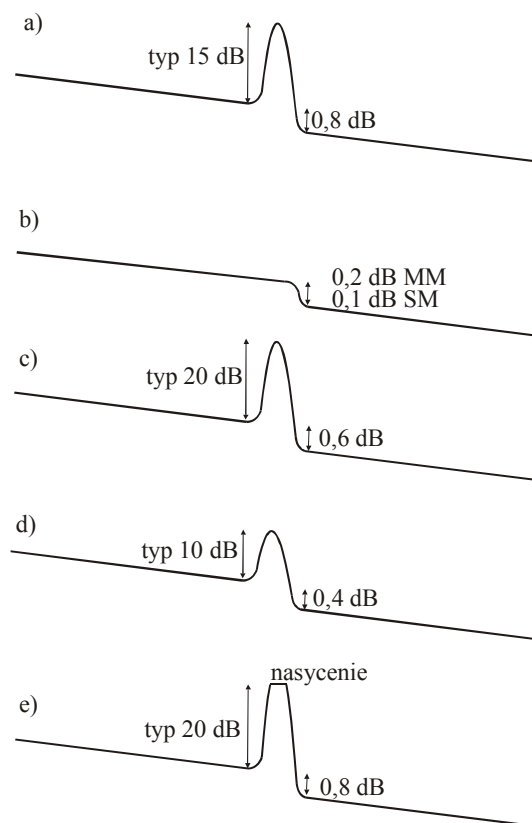
Rysunki 2.25, 2.26 i 2.27 przedstawiają charakterystyczne echogramy otrzymane w reflektometrze.



Rys.2.25 Echogram otrzymany w reflektometrze, pik oznacza połączenie rozłączne dwóch osobnych odcinków światłowodu [1]



Rys.2.26 Echogram otrzymany w reflektometrze, uskok – z „podbiciem” lub „obniżeniem”, spowodowany jest tym, że połączone odcinki światłowodu mają różne własności związane z rozpraszaniem światła. Straty na połączeniu spawanym[1].



Rys.2.27 Różne typy echogramów otrzymanych w reflektometrze

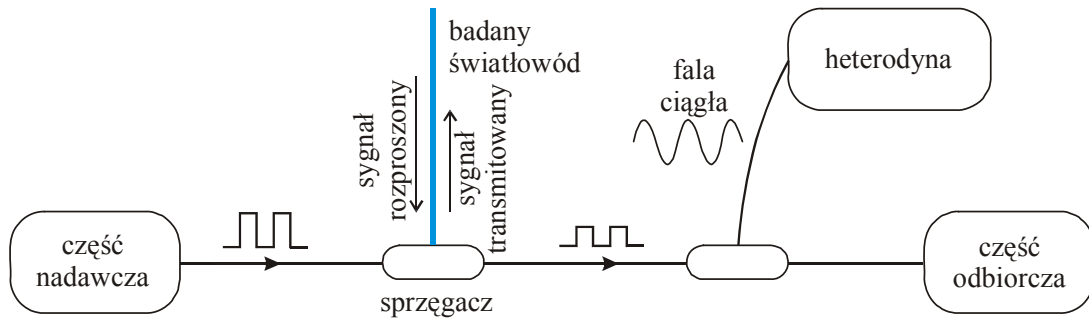
- a- złącze mechaniczne
- b- połączenie spawane
- c- złącze typu PC
- d- złącze super typu PC
- e- złącze z przerwą powietrzną ; MM-światłowód wielomodowy  
SM- światłowód jednomodowy

### 2.4.1. Budowa i działanie reflektometru Brillouina

BOTDR (Brillouin optical time domain reflectometer)

W poprzednim rozdziale omówiliśmy reflektometr wykorzystujący zjawisko rozpraszania Rayleigha. Inną odmianą reflektometrów jest optyczny reflektometr Brillouina. W reflektometrze BOTDR wykorzystuje się nieelastyczne zjawisko rozpraszania Brillouina, związane z generacją fali akustycznej o częstotliwości  $f_B$ . Powstały w wyniku rozproszenia sygnał,

o częstotliwości przesuniętej w stronę niższych częstotliwości o wielkość równą częstotliwości fali akustycznej  $f_B$ , propaguje w kierunku początku badanego światłowodu. Wartość częstotliwości zależy od właściwości światłowodu, naprężeń we włóknie, temperatury, typowa wartość jest rzędu 13 GHz dla fali 13310 nm i 11 GHz dla 1550 nm.



Rys.2.28 Schemat reflektometru Brillouina

Podobnie jak dla OTDR światło rozproszone w kierunku przeciwnym do kierunku sygnału transmitowanego dociera do tyłu do odbiornika poprzez sprzęgacz. Odbiornik w BOTDR jest odbiornikiem koherentnym, w którym zachodzi detekcja heterodynowa. Rolę heterodyny spełnia laser ciągły. Światło heterodyny miesza się ze światłem rozproszonym. Jej częstotliwość jest mniejsza od częstotliwości nadajnika o wartość mniejszą od częstotliwości  $f_B$ . Uzyskany sygnał modulacji jest rzędu około 100 MHz.

Zaletą BOTDR w porównaniu z OTDR jest:

- Większa dynamika pomiaru
- Większa czułość pomiaru zmian tłumienia co umożliwia wykrycie istniejących w światłowodzie naprężeń mechanicznych, które mogą być przyczyną zerwania włókna.

[1]. K. Perlicki, Pomiar w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WKŁ, 2002