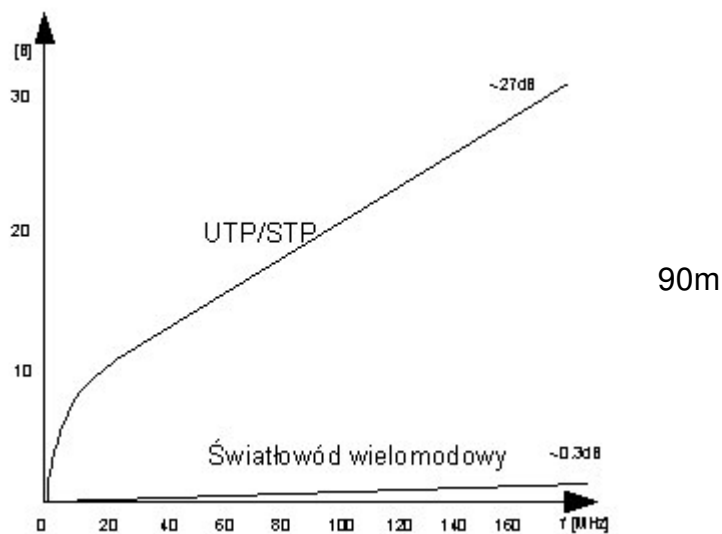


Światłowody

Zalety światłowodów

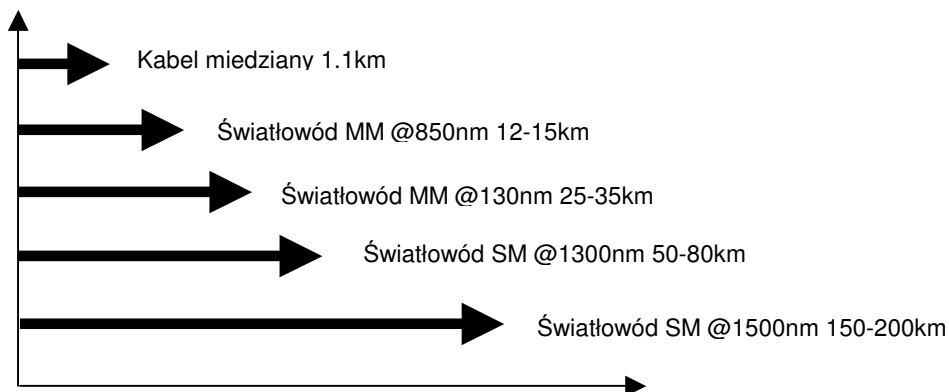
- Prawie nieograniczona przepustowość
- Odporność na interferencje i przesłuchy
- Niewielkie wymiary i masa
- Trwałość i elastyczność
- Niewielkie tłumienie sygnału
- Bezpieczeństwo sygnału
- Niski koszt w stosunku do możliwości



Tłumienie to spadek poziomu mocy w miarę jego rozchodzenia się w instalacji. Zjawisko to występuje w wyniku rozpraszania energii traconej na pokonanie rezystancji lub impedancji i zależy od częstotliwości.

Tłumienie mierzone jest w dB (tłumienie 3dB to zmniejszenie mocy sygnału o 50%). Wymagania dla kanału przesyłu danych pozwalają na dopuszczalne tłumienie 20dB.

Tłumienie [dB]	Spadek mocy sygnału [%]
3	50,00
6	75,00
9	87,50
10	90,00
20	99,00



Teoretycznie im krótsza długość fali świetlnej tym możliwe przesyłanie większych częstotliwości. Ze względu na własności materiału przewodzącego, w praktyce zastosowanie większych długości fal pozwala na przesyłanie większej ilości danych.

Współczynnik załamania

Współczynnik załamania n jest bezwymiarową wielkością wyrażoną przez stosunek prędkości rozchodzenia się światła w próżni c_0 do jego prędkości w danym ośrodku v

$$n = \frac{c_0}{v}$$

próżnia: $n=1.0$, $v=c_0$

materiał „x”: $n>1.0$, $v<c_0$

Typowe wartości współczynnika załamania n dla różnych ośrodków

Materiał	n
Próżnia	1,0000
Powietrze	1,003
Woda	1,33
Kwarc	1,46
Szkło	1,5,
Diamant	2,00
Silikon	3,40

Kąt krytyczny/odbicie

Kąt krytyczny α jest minimalnym kątem pomiędzy promieniem a prostą normalną do powierzchni ośrodka, przy którym nastąpi jeszcze odbicie światła od granicy ośrodków.

Apertura numeryczna

Apertura numeryczna (ang. *NA-Numerical Aperture*) określa zdolność włókna do absorpcji światła i jest określana dla wymiaru rdzenia włókna. Im większa średnica rdzenia tym większa apertura numeryczna i tym łatwiej podłączyć źródło do światłowodu.

$$NA = \sin \alpha_0 \approx \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

gdzie NA – apertura numeryczna, α_0 – połowa kąta akceptacji, n_1 – współczynnika załamania rdzenia, n_2 – współczynnik załamania włókna

Kąt akceptacji (ang. *Acceptance Angle*) to podwójna wartość maksymalnego kąta padania promienia na czoło światłowodu, przy jakim dozna on jeszcze całkowitego wewnętrznego odbicia na granicy płaszcz-rdzeń. Dla światłowodów wielodomowych wynosi ok. 28°.

Mody - analogia 1

W uproszczeniu są to skupiska energii, które ze względu na dużą średnicę rdzenia docierają do odbiornika po różnych drogach i co za tym idzie w różnym czasie tj. dyspersja.

Definicja modu:

Rdzeń światłowodu ma wartość współczynnika załamania wyższą w stosunku do płaszczu. Z tego powodu prowadzona w światłowodzie wiązka światła ma tendencję do utrzymywania się wewnątrz rdzenia.

Definicja współczynnik a załamania $n = \frac{c}{v}$, gdzie $c=3 \cdot 10^8$ m/s jest prędkością światła

w próżni, v jest prędkością światła w ośrodku. Z tego wynika, że prędkość światła w płaszczu jest większa niż w rdzeniu co powoduje „zaginanie się” powierzchni stałej fazy w kierunku rdzenia i przepływ energii do niego (ogniskowanie). Optycy mówią, że światło „dąży do większego współczynnika załamania”. Z drugiej strony ograniczona wiązka prowadzona w rdzeniu ulega dyfrakcji czyli rozproszeniu (poszerzeniu). Obydwa te zjawiska: ogniskowanie i dyfrakcja zachodzą jednocześnie i mają działanie przeciwstawne. Jeżeli rozkład natężenia w prowadzonej wiązce światła jest taki, że oba te efekty się znoszą to taka wiązka nazywa się **modem światłowodowym**.

Mody - analogia 2

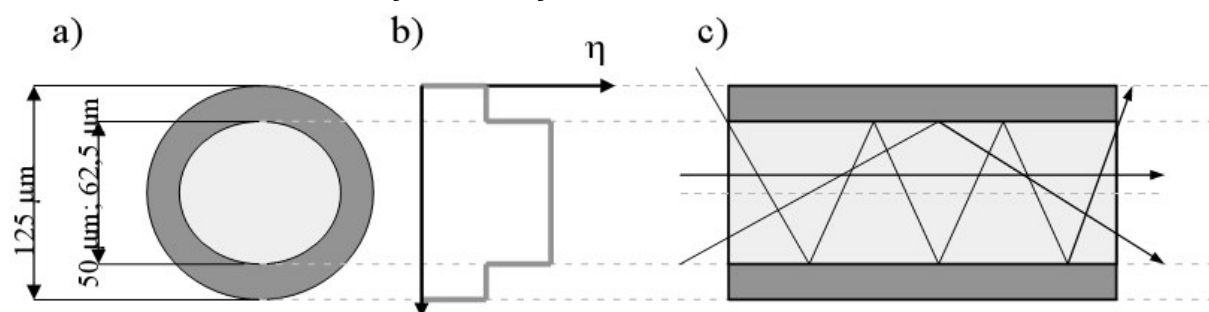
W światłowodach jednodomowych rdzeń ma kilkukrotnie mniejszą średnicę niż w wielodomowych. Pozwala to na przesyłanie światła w postaci pojedynczego modu, zmniejszając tym samym zjawisko dyspersji.

Mody - analogia 3

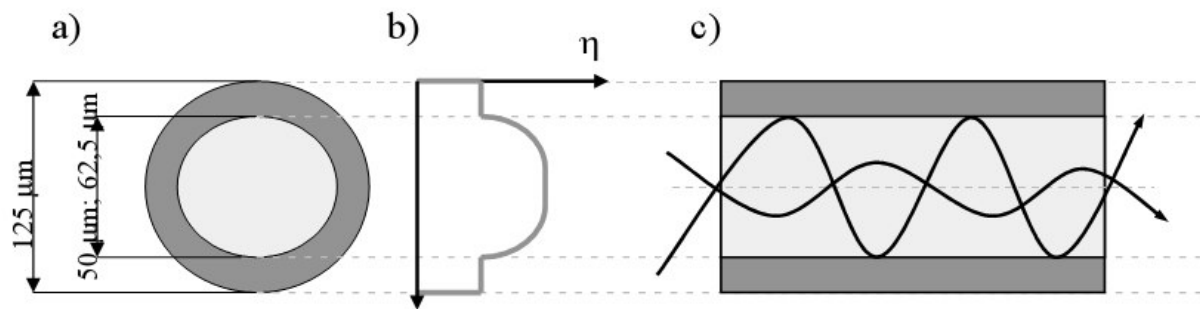
Mody - analogia 4

Dzięki temu, że światłowody jednodomowe mogą przesyłać tylko jeden mod, co eliminuje zjawisko dyspersji, można zagęścić ilość modów tak, że przepustowość kanału wzrośnie.

Światłowod wielodomowy skokowy



Światłowód wielodomowy gradientowy



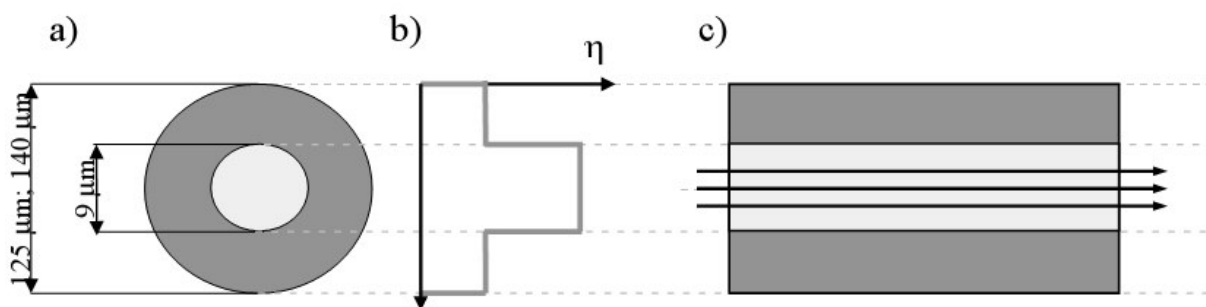
$$n_{\text{płaszczka}}=1,46 \quad n_{\text{max rdzenia}}=1,4776$$

$$\text{NA dla średnicy rdzenia } 50\mu\text{m} = 0,2\pm 0,015$$
$$62,5\mu\text{m} = 0,275\pm 0,015$$

Światłowody gradientowe są najpopularniejszą konstrukcją włókien. Przy pomocy specjalnych domieszek tak ukształtowano profil współczynnika załamania aby osiągnąć optymalne warunki transmisji światła. Jeżeli mówimy o światłowodach wielodomowych to najczęściej mamy na myśli światłowody gradientowe.

Włókna gradientowe występują w kilku rozmiarach, każda przystosowana do innych sieci. Średnica włókna podawana jest w μm i określa jego rodzaj. Produkowane obecnie włókna mają rdzenie o średnicach: $50\mu\text{m}$, $62,5\mu\text{m}$ i $100\mu\text{m}$. Najczęściej używana (zalecana w ANSI X3T9.5 dla sieci FDDI (ang. *Fiber Distributed Data Interface*)) jest średnica $62,5\mu\text{m}$. Średnica płaszczki wynosi $125\mu\text{m}$ i jest standardem przemysłowym. Włókno jest określane jako 62.5/125.

Światłowód jednodomowy



Włókno jednodomowe zostało zaprojektowane z myślą o przesyłaniu pojedynczego modu (promienia) światła. Współpracuje z laserem bardzo wąskiej wiązce światła. Ma bardzo dużą przepustowość i zasięg. Średnica rdzenia to $8,5\text{--}9,5\mu\text{m}$. Płaszczka ma standardową średnicę $125\mu\text{m}$. Włókna jednodomowe są wybierane ze względu na nieomal nieograniczone pasmo przenoszenia i niską tłumienność. Pozwala to na wydłużenie odległości między wzmacniaczami do ponad 150km .

Włókna jednodomowe zapewniają dużo lepsze parametry transmisyjne ale są bardzo wrażliwe na decentrację i inne wady powstające przy łączeniu

62.5 MM – decentracja $6\mu\text{m}$ lub 10% powierzchni

SM – decentracja $1\mu\text{m}$ lub 10% powierzchni

Porównanie włókien MM i SM

	62.5MM	SM
Tłumienie	~1.0dB/km	<0.5dB/km
Pasma przenoszenia	~500MHz*km	>GHz*km
NA – apertura numeryczna	duża	Bardzo mała

Okna transmisyjne

- Okno transmisyjne o długości fali 850 nm – jest najstarsze historycznie. Charakteryzuje go umiarkowana pojemność transmisyjna, oraz wysoka tłumienność (4dB/km). Jest ono wykorzystywane do transmisji opartej o kabel gradientowy. Stosuje się tutaj sygnał modulowany, typowe odległości to ponad 2km. Wadą jest bardzo niska graniczna szybkość transmisji – 1Gb/s. Wykorzystywane jest światło o kolorze czerwonym (bardzo jaskrawym), emitowane przez zwykłą diodę półprzewodnikową. Z tego powodu koszt takiego połączenia jest stosunkowo niski.
- Okno transmisyjne o długości fali 1300 nm – zostało wprowadzone w roku 1987. Przeznaczone do współpracy z kablami jednomodowymi i wielomodowymi gradientowymi. Tłumienność – około 0,4 dB/km. Przy transmisji wielomodowej transfer bez regeneracji może odbywać się na odległości do kilkudziesięciu kilometrów. Jako źródło światła wykorzystuje się najczęściej laser półprzewodnikowy. Maksymalna prędkość transmisji danych to 80 – 100 Gb/s
- Okno transmisyjne o długości fali 1550 nm – wprowadzone w roku 1989. Nie znajdują tutaj zastosowania zwykłe światłowody SMF, muszą być wykorzystywane specjalne kable. Tłumienność – około 0,16 dB/km. Okno to jest preferowane przy transmisjach na duże odległości.

Zakres pomiędzy oknami 1300 i 1550 nie jest wykorzystywany, ze względu na dużą tłumienność spowodowaną absorpcją jonów OH⁻.

Tłumienie

Tłumienność optyczna określa ilość traconego światła w rdzeniu włókna przy założeniu, że natężenie impulsu świetlnego I w funkcji odległości z opisuje funkcja

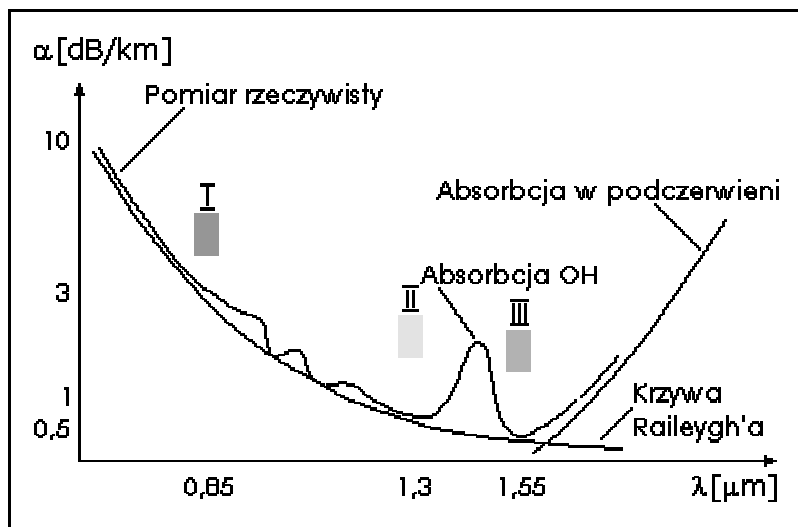
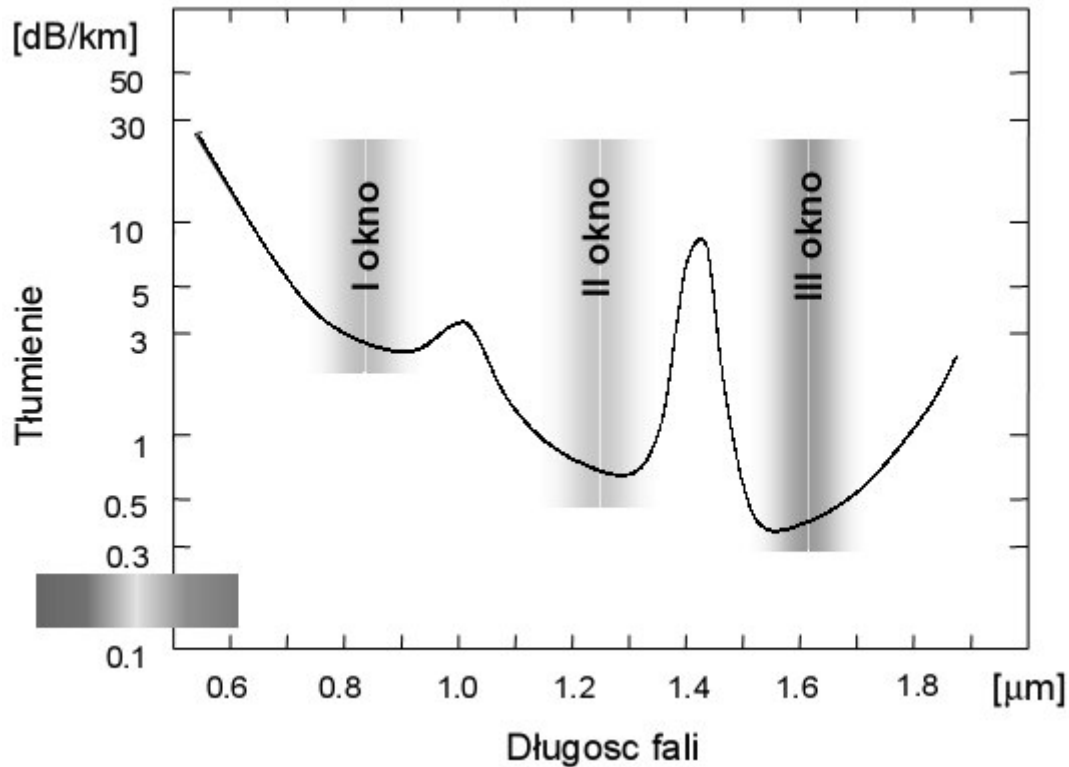
$$I(z) = I_0 \exp(\alpha * z)$$

gdzie α jest współczynnikiem pochłaniania, I_0 natężeniem początkowym

Powyższy wykładniczy charakter strat pozwala opisywać je w postaci logarytmicznej w dB i zazwyczaj podawana jest dla odcinka o długości 1km.

3dB odpowiada 50% utracie mocy sygnału

Zmiana długości fali wpływa na parametry propagacji światła w rdzeniu. Tłumienność optyczna jest określana dla dwóch długości fal 850 i 1300 nm dla światłowodów wielomodowych lub 1310 i 1550nm dla jednomodowych.



Pasmo przenoszenia

Pasmo przenoszenia jest wartością określającą bezpośrednio przepustowość kabla. Wyrażane jest w $\text{MHz} \cdot \text{km}$ i jest jednym z najważniejszych parametrów określających światłowody.

Zależy od:

- rodzaju włókna
- zastosowanego nadajnika
- długości użytkowej fali

Szerokość widma (okna) jest mierzona w nm i określa długość fali emitowanej przez nadajnik będący w otoczeniu środka widma. Zależy od źródła światła i waha się w granicach od kilku nm (wąska) do dziesiątek a nawet setek nm (szeroka). Wąskie widmo mają lasery a szerokie diody LED.

Im pasmo węższe tym mniejsze straty (dyspersja chromatyczna)

Dyspersja

Zasadniczym zjawiskiem ograniczającym pasmo przenoszenia jest (w uproszczeniu) dyspersja czyli rozszerzenie (zniekształcenie) impulsu świetlnego na linii nadajnik-odbiornik.

Rodzaje dyspersji:

- Modalna
- Chromatyczna

Obydwa rodzaje wpływają na ograniczenie pasma włókien wielodomowych.

Światłowody jednodomowe zasilane laserem o bardzo wąskim paśmie wykazują minimalną dyspersję (ps/nm*km) co pozwala bez żadnego kłopotu osiągnąć pasmo mierzone w GHz.

Straty w światłowodzie

Światłowody, nawet te jednodomowe, nie są idealnym medium transmisyjnym.

- **Tłumienie.** Jedną z podstawowych wad światłowodu jest tłumienie sygnału optycznego. Spowodowane jest przez straty mocy optycznej wynikające z niedoskonałości falowodu. W rzeczywistym światłowodzie występuje: absorpcja (pochłanianie energii przez materiał światłowodu), rozpraszanie energii spowodowane przez fluktuacje gęstości i współczynnika załamania szkła (tzw. rozpraszanie Rayleigha). W czasie instalacji i użytkowania światłowodów mogą pojawić się dodatkowe składniki tłumienia takie jak zgięcia lub mikrozgięcia.

Źródła tłumienia:

- **Straty materiałowe.** Większość światłowodów wykonana jest ze szkła kwarcowego SiO_2 . Światło ulega rozproszeniu z powodu fluktuacji gęstości materiału rdzenia, a ta spowodowana jest niedoskonałością struktury szkła. Dla czystego szkła kwarcowego stała materiałowa $k=0,8$, a tłumienność spowodowana rozproszeniem Rayleigha wynosi dla długości fali widzianej przez światłowód $\lambda=850$ nm 1,53 dB/km, dla $\lambda=1300$ nm 0,28 dB/km, a dla $\lambda=1550$ nm 0,138 dB/km. Oprócz rozpraszania Rayleigha istnieje silna absorpcja zarówno w podczerwieni, jak i nadfiolecie związana bezpośrednio z samymi własnościami szkła krzemowego SiO_2 . Nie pozwala ona na wykorzystanie jeszcze dłuższych fal do transmisji.
- **Straty falowodowe** wynikają z niejednorodności światłowodu powodowanymi fluktuacjami średnicy rdzenia, zgięciami włókna, nierównomiernością rozkładu współczynnika załamania w rdzeniu i w płaszczu, oraz wszelkimi innymi odstępstwami od geometrii idealnego światłowodu cylindrycznego. Deformacje włókna mające duży wpływ na tłumienie światłowodu to mikrozgięcia i makrozgięcia.
- **Mikrozgięcia** powstają w procesie wytwarzania włókien i są to nieregularności kształtu rdzenia i płaszczu rozłożone wzdłuż włókna losowo lub okresowo. Wywołują w światłowodzie wielodomowym

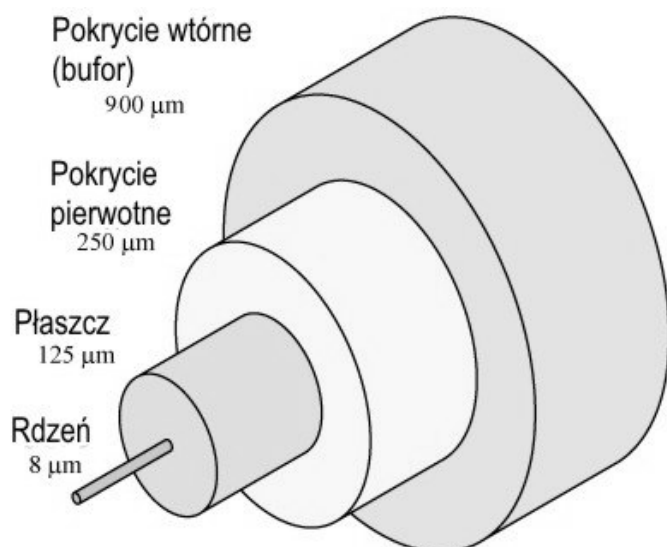
mieszanie się modów i ich konwersję w mody wyciekające do płaszcza. W światłowodzie jednomodowym mikrozgięcia powodują natomiast rozmycie modu.

- Tłumienie wywołane **makrozgięciami**, czyli wywołane fizycznym zakrzywieniem włókna światłowodowego, jest pomijalnie małe dla promieni zakrzywień większych od kilku centymetrów. Mniejsze powodują zmianę współczynnika załamania w obszarze zgięcia, co także prowadzi do tworzenia się modów wyciekających i uwidacznia się efektem świecenia włókna na powierzchni. Straty mocy sygnału powodowane są również przez przesunięcia, rozsunienia oraz wzajemny obrót światłowodów.
- **Absorpcja** w zakresie pasm użytecznych (0,8-1,5 μm) jest niewielka, wzrasta natomiast przy niewielkiej nawet koncentracji zanieczyszczeń metali Fe, Cu, Cr, a zwłaszcza jonów OH. Jest to proces nieodwracalny, wynikowa tłumienność zależy od rodzaju domieszek oraz od sposobu ich koncentracji. Ponadto powyższe zanieczyszczenia powodują selektywny wzrost tłumienia, wybór okien transmisyjnych wynika z konieczności pominięcia tych pasm absorpcyjnych.
- **Dyspersja**. Impuls biegnący w falowodzie ulega wydłużeniu (rozmyciu), co ogranicza maksymalną częstotliwość sygnału przesyłanego przez falowód. Zjawisko to jest wynikiem dyspersji, fale świetlne biegnące w falowodzie nie mają dokładnie jednakowej długości fali, ale różnią się nieznacznie. W wyniku różnic w prędkości poruszania się fal o różnych długościach, fale wysłane jednocześnie nie docierają do odbiornika w tym samym czasie. W rezultacie na wyjściu pojawia się szerszy impuls, który rośnie wraz ze wzrostem długości światłowodu. Przepływność transmisyjna włókna jest więc określona przez to, jak blisko siebie można transmitować kolejne impulsy bez ich wzajemnego nakładania się na siebie (przy zbyt bliskich impulsach zleją się one w światłowodzie w jedną ciągłą falę). Dyspersja ogranicza długość światłowodu, przez który może być transmitowany sygnał. Rozróżnia się dwa typy dyspersji - dyspersję **międzymodową** występującą w światłowodach wielomodowych oraz dyspersję **chromatyczną** występującą w włóknach jednomodowych. Wykorzystanie w systemach światłowodowych większych długości fali przede wszystkim ok. 1300 nm, zamiast 830÷900 nm wykorzystywanych w pierwszych systemach przynosi poważne korzyści jeśli chodzi o dyspersję, gdyż dyspersja materiałowa w tym obszarze długości fali jest praktycznie równa zero. Co więcej, w miarę doskonalenia procesu produkcji włókna, zaczęło się okazywać, że dla bardzo suchych (o małej zawartości jonów OH) rodzajów szkła, można uzyskać dla fali 1300 nm wartości tłumienności znacznie poniżej 3÷5 dB/km, jakie uzyskiwano dla 850 nm i z wielu źródeł pojawiły się doniesienia o uzyskaniu dla fali 1300 nm wartości tłumienności rzędu od 1 do 0,5 dB/km. Uzyskano też dla fali 1550 nm tłumienność rzędu 0,2 dB/km.
 - **Dyspersja modowa**. występuje w światłowodach wielomodowych. Impuls światła wiedziony przez światłowód jest superpozycją wielu modów, z których prawie każdy, na skutek różnych kątów odbicia od granicy rdzenia, ma do przebycia inną długość drogi między odbiornikiem a nadajnikiem. Dyspersja modowa światłowodów skokowych przekracza znacznie wszystkie pozostałe dyspersje. Dodatkowo z powodu dużego tłumienia jednostkowego tych włókien docierający sygnał ma wyraźnie inny kształt i mniejszą amplitudę.

Zniekształcenie to rośnie wraz z długością światłowodu. Ograniczenie dyspersji modowej i zwiększenie pasma światłowodów wielomodowych do 1200 MHz×km uzyskano wprowadzając włókna gradientowe.

- **Dyspersja chromatyczna.** Z racji tego, że światłowody jednomodowe propagują tylko jeden mod, nie występuje tutaj zjawisko dyspersji międzymodowej. Uwidacznia się natomiast inny, dotychczas niewidoczny rodzaj dyspersji, dyspersja chromatyczna. Składają się na nią dwa zjawiska: dyspersja materiałowa i falowa.
- **Dyspersja materiałowa** powodowana jest zmianą współczynnika załamania szkła kwarcowego w funkcji długości fali. Ponieważ nie istnieje źródło światła ściśle monochromatyczne, gdyż każdy impuls światła składa się z grupy rozproszonych częstotliwości optycznych rozchodzących się z różną prędkością, docierający po przebyciu fragmentu włókna mod charakteryzuje się rozmyciem w czasie.
- **Dyspersja falowa** częściowo powodowana jest wędrowaniem wiązki przez płaszcz światłowodu. Szybkość rozchodzenia się zależy od właściwości materiałowych płaszczka.

Konstrukcja włókien optycznych



Elementy składowe:

- **Rdzeń** jest ośrodkiem, w którym biegnie światło. Wykonany jest z domieszkowanego szkła np. $\text{GeO}_2 + \text{SiO}_2$ zapewniającego dobre właściwości przewodzące.
- **Płaszcz** światłowodu wykonany jest z czystego szkła SiO_2 mającego niższy współczynnik załamania niż rdzeń. Różnica współczynników załamania pozwala światłu poruszać się w rdzeniu. Granica rdzeń-płaszcz działa jak lustro nie pozwala wydostać się światłu poza rdzeń (całkowite wewnętrzne odbicie).
- **Bufor** wykonany z tworzywa sztucznego np. akrylanu. Nie ma wpływu na działanie światłowodu. Chroni włókno przed uszkodzeniem w trakcie umieszczania w kablu, podczas instalacji i w wykonywaniu złączy. Poprawia również elastyczność

Parametry włókien wielodomowych

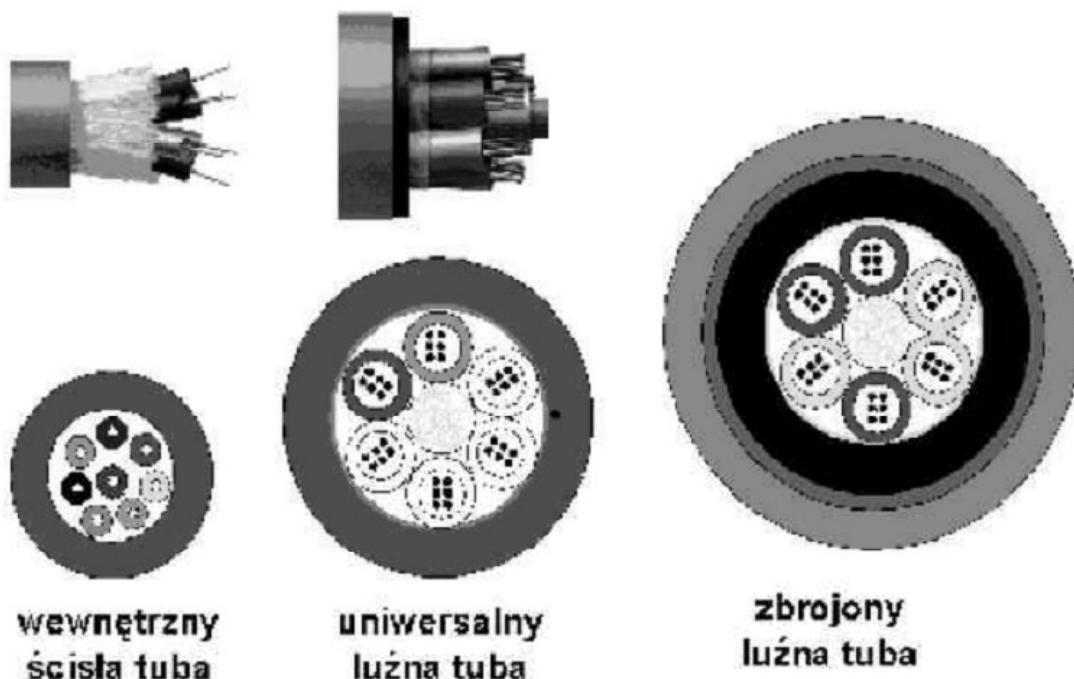
Maksymalne tłumienie	850nm 1300nm	3,2 – 3,75 dB/km 1,0 – 1,5 dB/km
Pasmo przenoszenia	850nm 1300nm	160 MHz/km 500 Mhz/km
Apertura numeryczna	$0,275 \pm 0,015$	
Średnica rdzenia	$62,5 \pm 3\mu\text{m}$	
Średnica płaszczu	$125 \pm 3\mu$	
Średnica bufora (ściśła tuba)	900μ	

Konstrukcja kabli optycznych

Cel: *Ochrona włókien optycznych przed wpływem czynników mechanicznych i środowiskowych przez 20-40 lat.*

Czynniki

Środowiskowe	Mechaniczne
Wilgotność	Zagięcie
Chemia	Naprężenia
Temperatura	Uderzenia
Woda	Skręcenia
Gryzonie	



Wewnętrzny ściśnięty tuba	Stosuje się wewnątrz budynków Włókna światłowodowe umieszczone są w buforze/izolacji o średnicy zewn. 0,9mm Na takich włóknach można bezpośrednio zakładać złącza ST,SC lub inne
Uniwersalny luźna tuba	Stosuje się zazwyczaj na zewnątrz Włókna światłowodowe umieszczone są w żelowanych tybach zapewniających ochronę włókien przed naprężeniami i działaniem warunków atmosferycznych
Kabel uniwersalny	Do kładzenia w kanalizacji wtórnej na zewnątrz budynków lub do podwieszania Posiada niepalną izolację i spełnia normy ppoż.
Zbrojony luźna tuba	Do zakopywania bezpośrednio w ziemi. Posiada metalowe zbrojenie zabezpieczające przed gryzoniami

Kable optyczne – materiały

- Elementy wzmacniające
 - Stal
 - Włókna kevlarowe powlekane żywicą epoksydową

- Żel zabezpieczający prze wilgocią
- Izolacja
 - Polietylen (PE) – kable zewnętrzne
 - Polichlorek winylu (PCV) - kable wewnętrzne
 - Poliuretan (PUR) - kable wewnętrzne
 - Fluoropolimery (Teflon) – niepalne
- Karbowana stal - zabezpieczenie przed gryzioniami

Kable optyczne - luźna tuba

Zapewniają najlepszą ochronę przed działaniem ekstremalnych temperatur, wilgoci i naprężeń. Wypełnia się je żel. Stosowane głównie na zewnątrz. Konstrukcja umożliwia wydłużenie lub skrócenie do 3% bez wpływu na włókna.

Kable optyczne - ścisła tuba

Zapewniają bardzo dobrą ochronę włókien, ale stają się sztywne przy większej ich liczbie. Łatwość wykonywania złącz. Zazwyczaj stosowane wewnątrz budynków. Dobór materiałów podyktowany jest w dużym stopniu wymogami przeciwpożarowymi dotyczącymi niepalności izolacji oraz emisji dymu.

Kable w ścisłej tubie używane są do produkcji kabli krosowych

- Simplex – pojedynczy
- Duplex – podwójny (zip cord)

Oraz pochodzących od nich tzw. *pigtail* czyli zakończonych z jednej strony złączami

Złącza

- ST
- S.C.
- S.C. duplex

