

Światłowody.

Wstęp.

Obecnie najnowocześniejszym medium transmisyjnym jest światłowód (Fiber Optic Cable). Zasada jego działania opiera się na transmisji impulsów świetlnych między nadajnikiem (Optical Transmitter) przekształcającym sygnały elektryczne na świetlne, a odbiornikiem (Optical Receiver) przekształcającym sygnały świetlne odebrane ze światłowodu w sygnały elektryczne. Sieci oparte na światłowodach zwane są FDDI (Fiber Distributed Data Interface).

Struktura włókna światłowodu.

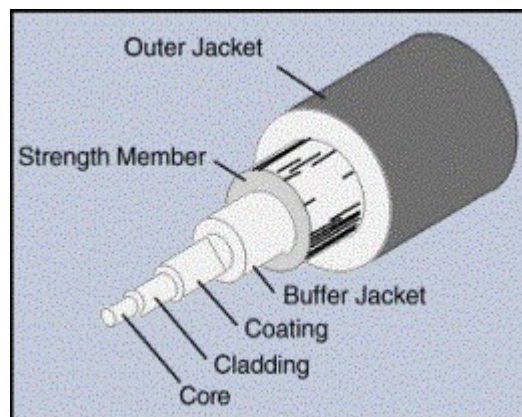
Światłowód to falowód służący do przesyłania promieniowania świetlnego. Jest w formie włókien dielektrycznych - najczęściej szklanych, z otuliną z tworzywa sztucznego, charakteryzującego się mniejszym współczynnikiem załamania światła niż wartość tego współczynnika dla szkła. Promień światła rozchodzi się w światłowodzie po drodze będącej łamaną tzn. ulegając kolejnym odbiciom (w przypadku światłowodu z włókien są, to odbicia całkowite wewnętrzne). Transmisja światłowodowa polega na przesyłaniu sygnału optycznego wewnątrz włókna szklanego. Podstawowym składnikiem do budowy światłowodu jest dwutlenek krzemu, ale nie w formie czystej - SiO₂

Budowa światłowodu.

Włókno optyczne, złożone z dwóch rodzajów szkła o różnych współczynnikach załamania (Refraction Index):

- część środkowa,
- rdzeń (Core), najczęściej o średnicy 62,5 um (rzadziej 50um) - część zewnętrzną,
- płaszcz zewnętrzny (Cladding), o średnicy 125 um;

Warstwa akrylowa Tuba - izolacja o średnicy 900 um. Oplot kewlarowy. Izolacja zewnętrzna.



Kabel światłowodowy składa się z następujących elementów: (od środka):

rdzeń (core), płaszcz (cladding), powłoka lakierowa (coating), wzmocnienie (strenght member), płaszcz zewnętrzny.

Rdzeń (core) znajduje się pośrodku kabla i jest medium propagacyjnym sygnału. Wykonany jest ze szkła kwarcowego lub plastiku (POF - Plastic Optic Fiber). Obecne rdzenie mają średnice rzędu 8 mikronów dla światłowodu jednomodowego do 1000 mikronów dla wielomodowych światłowodów plastikowych (POF).

Płaszcz (Cladding) wykonany jest z materiału o niższym współczynniku załamania światła niż rdzeń. Różnica ta powoduje, że zachowuje się niczym "lustro" otaczające rdzeń, kierując promień do wnętrza rdzenia, formując falę optyczną.

Powłoka lakierowa (zwana również buforem lub buffer coating) chroni warstwę płaszcza. Wykonany jest z materiałów termoplastycznych i specjalnego żelu chroniącego włókno przed uszkodzeniami mechanicznymi (np. skutek wibracji). Kabel światłowodowy pod wpływem różnych temperatur może zmieniać swoje właściwości mechaniczne i fizyczne (wydłużać się lub skracać).

Jako ochronę włókna podczas instalacji i przed zgubnym wpływem środowiska używa się powłoki zwanej "strenght members". Wykonana ona jest z różnych materiałów, poczynając od stali a kończąc na Kevlarze (materiał opracowany przez firmę DuPont, wykonuje się z niego min kamizelki kuloodporne). W pojedynczym i podwójnym kablu zabezpieczenie to wykonuje się jako otulinę coating. W kablach, gdzie jest kilka bądź kilkanaście włókien strenght member stosuje się centralnie wewnątrz przewodu.

Płaszcz (jacket) jest ostatnią warstwą ochronną kabla i służy do ochrony przed uszkodzeniami powstałymi w wyniku oddziaływania niekorzystnych warunków środowiska w jakim znajduje się światłowód. Inny rodzaj płaszcza zostanie użyty dla kabli przeznaczonych do układania wewnątrz budynków, inny na zewnątrz, pod ziemią czy napowietrznych.

Światłowody można podzielić na dwa podstawowe typy:

Kabel zewnętrzny z włóknami w luźnych tubach, jest odporny na oddziaływanie warunków zewnętrznych. Wypełnione żelom luźne tuby zawierają jedno lub kilka włókien i oplatają centralny dielektryczny element wzmacniający. Rdzeń kabla otoczony jest specjalnym opłotem oraz odporną na wilgoć i promienie słoneczne polietylenową koszulką zewnętrzną.

Kable wewnętrzne przeznaczone są do układania wewnątrz budynku. Posiadają cieńszą warstwę ochronną i nie są tak odporne jak kable zewnętrzne.

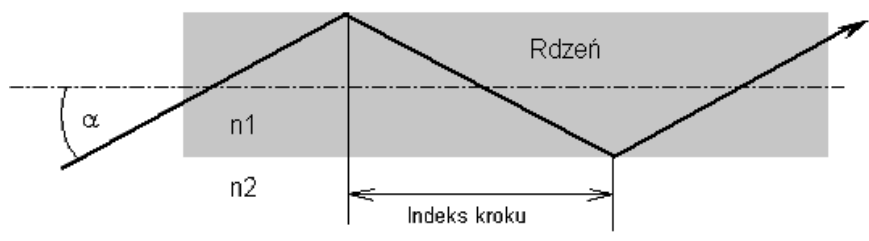
Zasada działania światłowodu.

Promień światła wędrując w rdzeniu światłowodu (o współczynniku załamania n_1), napotyka na środowisko o innym współczynniku załamania (n_2) - płaszcz. Gdy promień pada od strony rdzenia na płaszcz pod kątem α , to pewna część światła zostaje odbita i wraca do rdzenia. W zależności od kąta padania i współczynników załamania materiałów rdzenia i płaszcza, zmienia się ilość odbitego światła. Powyżej pewnego kąta zachodzi zjawisko całkowitego odbicia wewnętrznego i światło padające zostaje odbite bez strat.

Kąt akceptacji.

Aby promień pozostał w rdzeniu i podlegał całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na granicy rdzenia i płaszcza, kąt jego padania względem osi światłowodu w powietrzu nie powinien przekroczyć wartości krytycznej - wartość ta nosi nazwę kąta akceptacji światłowodu (α_{max}). Zgodnie z tym wszystkie promienie padające na powierzchnię czołową rdzenia światłowodu pod kątem mniejszym od (α_{max}) zostaną wprowadzone do rdzenia. W płaszczu współczynnik załamania światła jest mniejszy niż w rdzeniu, wiąże się to też ze współczynnikiem odbicia. Włókno światłowodowe zbudowane jest z 2 rodzajów szkła:

- Szkła kwarcowego (zbudowany jest z niego rdzeń),
- Szkła kwarcowego z dodatkami (zbudowany jest z niego płaszcz).



Płaszcz-Apertura numeryczna światłowodu, czyli kąt akceptacji

Oba pojęcia: kąt akceptacji i apertura numeryczna służą do określenia tego samego zjawiska - kąta wprowadzenia światła z diody lub lasera do światłowodu wielomodowego.

Elementy optyczne wykorzystywane do transmisji danych to nadajniki i odbiorniki. Najważniejszym elementem systemu optycznego jest źródło sygnału (nadajnik). W systemach światłowodowych fale nośne wytwarzane są przez generatory optyczne:

- diody laserowe (LD),
 - diody elektroluminescencyjne (LED),
- pośród kilku możliwych struktur diod elektroluminescencyjnych w telekomunikacji światłowodowej zastosowanie znalazły trzy:
- Dioda powierzchniowa,
 - Dioda krawędziowa,
 - Dioda superluminescencyjna.

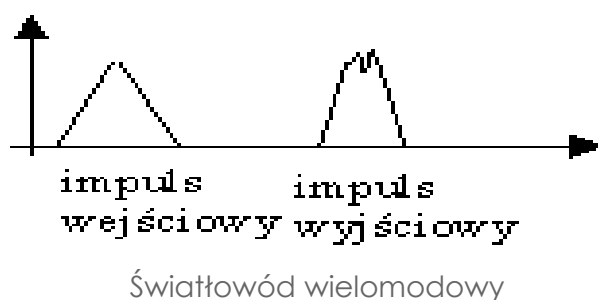
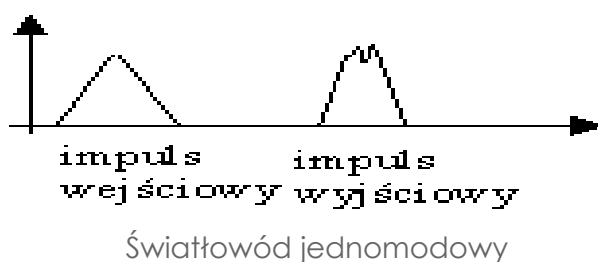
W idealnym przypadku źródło powinno dostarczać stabilnej fali o określonej częstotliwości i wystarczającej mocy. Istotne elementy nadajnika to: źródło światła i układ modulujący.

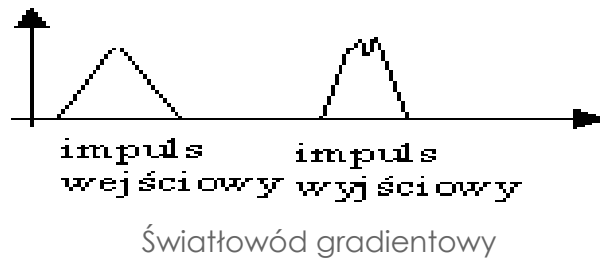
Transmisja sygnałów w światłowodzie.

U podstaw techniki światłowodowej leży zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia fali świetlnej na granicy dwóch ośrodków o różnych współczynnikach załamania.

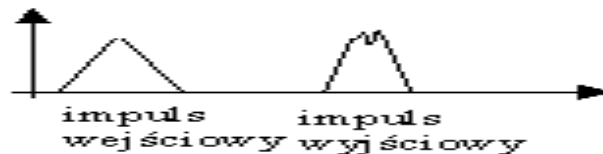
Rodzaje światłowodów:

- Wielomodowe, MMF Multi Mode Fiber,
 - gradientowe,
 - skokowe,
- Jednomodowe, SMF Single Mode Fiber

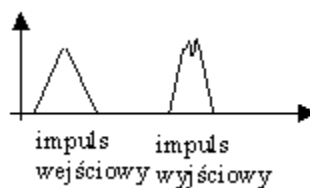




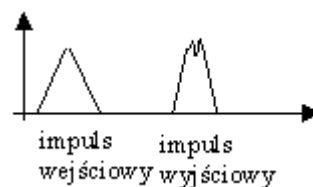
W falowodzie (np. światłowód) propagują pewne grupy fal - mody. Mody są to promienie światła laserowego lub diody, wprowadzone do rdzenia pod różnymi kątami.



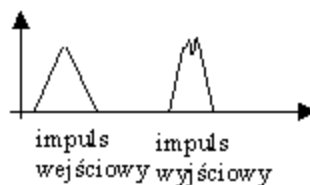
Różne mody w światłowodzie Wyższe mody (wchodzące pod większym kątem, czyli LP10, LP20) pokonują dłuższą drogę, następuje dyspersja modowa, czyli rozmycie sygnału. Rozmycie sygnału powoduje ograniczenia zasięgu transmisji, gdyż rośnie ono wraz z długością światłowodu. Walka z tym zjawiskiem doprowadziła do powstania światłowodów gradientowych i jednomodowych.



Światłowód wielomodowy skokowy



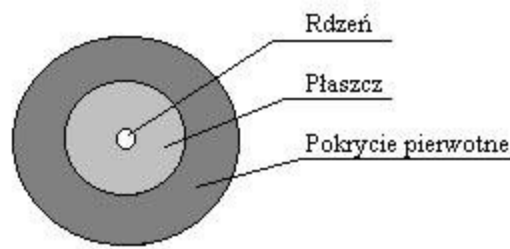
Światłowód wielomodowy gradientowy



Światłowód jednomodowy

Światłowody mają różną budowę. Zależy ona od ich zastosowania i wynikających stąd wymagań. Wszechobecna komputeryzacja i ciągły rozwój usług multimedialnych "wymusił" powstanie światłowodów telekomunikacyjnych. Dają one możliwość budowania łączy dalekosiężnych, bądź lokalnych sieci komputerowych o dużych przepływnościach. Rynek telekomunikacji został zdominowany przez światłowody jednomodowe (do budowy linii dalekosiężnych i sieci lokalnych) oraz światłowody wielomodowe (do budowy sieci lokalnych)

Światłowód jednomodowy.



Przekrój włókna światłowodowego jednomodowego.

Rdzeń włókna światłowodowego jednomodowego wykonany jest ze szkła kwarcowego (SiO_2) domieszkowanego kilkuprocentową domieszką dwutlenku germanu (GeO_2).

Płaszcz wykonany jest z czystego szkła kwarcowego (SiO_2). Domieszkowanie rdzenia powoduje, że jego współczynnik załamania światła jest około 1% większy niż współczynnik załamania płaszcza.

Pokrycie pierwotne (warstwa ochronna) jest wykonane zazwyczaj z dwóch warstw gumy silnikowej utwardzonej termicznie i ultrafioletem, już w fazie produkcji (ciągnięcia) włókna. Warstwa wewnętrzna jest miękka, warstwa zewnętrzna jest twarda. Taki układ warstw pokrycia pierwotnego daje optymalną ochronę mechaniczną szkła kwarcowemu podczas zginania włókna.

Ośrodkiem transmisji sygnału optycznego jest rdzeń. Jego średnica wynosi ok. 8-10 mm. Część strumienia światła, padająca na czoło włókna pod kątem większym od kąta pełnego odbicia, zostaje "uwięziona" w rdzeniu włókna i ulega przemieszczaniu po jego torze. Strumień świetlny ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na granicy rdzeń - płaszcz. W światłowodzie jednomodowym tak jest dobrana średnica rdzenia i długość fali strumienia świetlnego, że możliwe jest jedynie rozprzestrzenianie się modu podstawowego wzdłuż osi włókna. Światłowody jednomodowe, których rdzenie są dodatkowo domieszkowane erbem, są obecnie najlepszym medium transmisji sygnałów na odległość.

Światłowody jednomodowe są efektywniejsze i pozwalają, transmitować dane na odległość 100 [km] bez wzmacniacza.

Włókna jednomodowych kabli światłowodowych mają zwykle od 5 do 10 mikronów średnicy i otoczone są ochronnym wypełnieniem o średnicy 125 mikronów. Ponieważ instalacja oparta na światłowodach jednomodowych jest bardzo droga i cechuje się dużą szerokością udostępnianego pasma, dlatego stosuje się ją przy budowie wysokiej jakości infrastruktury informatycznych i w sieciach telekomunikacyjnych. Wadą światłowodów jednomodowych jest to, że w związku z bardzo małym rdzeniem, trudniej jest je zakończyć, wszelkie elementy wymagają większej dokładności, znacznie droższe są też obecne urządzenia (karty sieciowe, koncentratory itp.) współpracujące z takimi światłowodami. Generalnie wydajność systemu wzrasta ze wzrostem długości fali świetlnej, wzrastają także koszty. Systemy wielomodowe dla zastosowań LAN pracują albo na 850 nm lub 1300 nm używając źródeł LED, podczas gdy systemy jednomodowe stosuje 1300 nm ze źródłami laserowymi. Im większa długość fali tym mniejsze tłumienie i szersze pasmo. Zauważamy także znaczący wzrost wydajności systemu przy przejściu z 850 do 1300 nm. Im mniejszy jest rdzeń światłowodu tym mniejsze tłumienie sygnału i szersze pasmo.

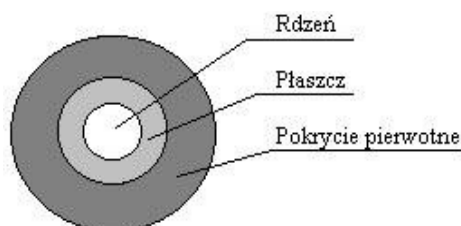
Włókno jednomodowe tłumienie ok. 0.4 dB/km.

Włókno wielomodowe tłumienie ok. 4.0 dB/km.

Tłumienie nie powoduje zmiany kształtu sygnału, zmniejsza jedynie jego moc. Tłumienie światłowodów kwarcowych zależy od długości fali światła, rodzaju i

czystości szkła kwarcowego, z którego zbudowany jest rdzeń [1]. Tłumienie rośnie wraz ze wzrostem długości łącza - ma więc bezpośredni wpływ na zasięg łącza. Tłumienie wywołane jest absorpcją światła (rdzeń przepuszcza promieniowanie o ograniczonej długości fali), rozpraszaniem: chemiczne zanieczyszczenia włókna, niejednorodność światłowodu wywołana w procesie technologicznym - różna gęstość rdzenia powodująca zmiany w własnościach fizycznych, straty wynikające z niekontrolowanych zmian współczynnika załamania wiązki światła - możliwość wyjścia poza rdzeń i płaszcz, zanieczyszczenie szkła jonami metali i OH. Do skompensowania tłumienia wykorzystuje się wzmacniacze optyczne: półprzewodnikowe lub światłowodowych.

Do transmisji sygnałów na małe odległości (sieci lokalne) służą włókna światłowodowe wielomodowe.



Przekrój włókna światłowodu wielomodowego

Rdzeń telekomunikacyjnego światłowodu wielomodowego składa się z setek (a nawet kilku tysięcy) warstw szkła kwarcowego (SiO_2) domieszkowanego dwutlenkiem germanu (GeO_2), przy czym najwięcej domieszki jest w osi rdzenia. Warstwowe domieszkowanie rdzenia powoduje powstanie gradientowego profilu współczynnika załamania.

Światłowód wielomodowy z indeksem kroku (Step Index Multimode Fiber).

Światłowód wielomodowy charakteryzuje się tym, że promień światła może być wprowadzony do niego pod różnymi kątami - modami.

Indeks kroku jest długością światłowodu, jaką przebywa promień bez odbić wewnętrznych. Najważniejszym problemem w przypadku tego rodzaju światłowodów jest zjawisko dyspersji, polegające na "poszerzaniu" się promienia świetlnego wraz z drogą przebytą wewnątrz światłowodu. Ponieważ dyspersja powiększa się wraz z drogą promienia świetlnego, więc kable wielomodowe stosowane są maksymalnie na długościach do 5 km. Występują dwa rodzaje dyspersji:

- Dyspersja modalna - wynikające z różnic w kątach (modach) wprowadzenia światła do rdzenia. W zależności od kąta, światło przebywa różną drogę wewnątrz rdzenia, co zmienia czas przejścia światła przez światłowód i powoduje poszerzenie sygnału,
- Dyspersja chromatyczna - wynika z tego, że promień świetlny nie jest monochromatyczny (źródłem światła są diody LED), a światło o różnej długości fali przebiega światłowód z różnymi szybkościami.

Transmisja wielomodowa jest sterowana za pomocą diody LED. Diody LED są źródłem światła nieskoncentrowanego. Ponieważ dioda nie jest zdolna do wysyłania skoncentrowanego światła, zatem wiązka ulega rozproszeniu. Nakłada to ograniczenia na długość okablowania światłowodowego sterowanego za pomocą diody LED.

Rozpraszanie przesyłanej wiązki świetlnej powoduje, że niektóre z jej promieni odbijają się od szklanej ściany nośnika. Kąt odbicia jest niewielki, w związku z czym światło nie ucieka do warstwy ochronnej, lecz odbijane jest pod kątem padania. Odbity promień porusza się pod tym samym kątem w kierunku środka przewodnika,

napotykać po drodze promienie centralnej części wiązki światła.

Odbijana część promienia niesie ten sam sygnał, który niesiony jest przez jego centralną część, tyle że ze względu na częste odbicia, promienie odbijane muszą pokonać dłuższą drogę niż promienie centralnej części wiązki. Wobec tego promienie centralnej części wiązki przybywają przed promieniami, które uległy wielokrotnemu odbiciu (modami). Ciągłe odbijanie się promieni niesie ze sobą, możliwość przekroczenia w końcu centralnej osi przewodnika i wejście w konflikt z innymi sygnałami transmisji. Oznacza to, że przesyłanie wielomodowe jest podatne na tłumienie.

Wady światłowodów wielomodowych są równoważone przez ich zalety, takie jak: o wiele niższe koszty w porównaniu ze światłowodami jednomodowymi. Łatwiejsze prace montażowe i konserwacyjne ze względu na większe wymiary od światłowodów jednomodowych.

Światłowod gradientowy, posiada płynnie zmieniający się współczynnik załamania. W praktyce, ze względów technologicznych, ma kilka tysięcy warstw, co udaje płynną zmianę współczynnika załamania. Jego zastosowanie, w pewnym stopniu, niweluje rozmycie sygnału. Dzięki temu osiągnięto zwiększenie szerokości pasma o rząd wielkości w porównaniu ze światłowodem skokowym. Światłowod skokowy są praktycznie nie stosowane. Światłowod jednomodowy cechuje prawie zupełny brak dyspersji modowej, gdyż realnie propaguje w nim tylko jeden promień świetlny.

W światłowodzie gradientowym strumień wielu modów światła przebiega przez rdzeń po torach wielokrotnie załamanych, przybliżonych do sinusoidy. Podczas transmisji pewna część energii świetlnej wnika do przyrdzeniowej warstwy płaszcza na głębokość paru mm. Stąd o własnościach transmisyjnych włókna decyduje w znacznej mierze jakość szkła rdzenia i jego styku z powierzchnią, płaszcza. Średnica rdzenia włókien wielomodowych wynosi 50 lub 62,5 mm.

Obecnie stosowane są w telekomunikacji następujące rodzaje włókien:

- włókna jednomodowe (J),
- włókna jednomodowe z przesuniętą dyspersją, (Jp),
- włókna jednomodowe o niezerowej dyspersji (Jn),
- włókna wielomodowe - gradientowe (G 50/125),
- włókna wielomodowe - gradientowe (G 62,5/125),

Przy wyborze włókna należy zwrócić uwagę na wielkość straty sygnału w światłowodzie, szerokość pasma oraz łatwość uzyskania sprzężenia źródeł i odbiorników światła.

Straty sygnału w światłowodzie zależą bezpośrednio od tłumienności włókna. Łatwość uzyskania sprzężenia i łączenia ze sobą odcinków włókien zależy od średnicy rdzenia i jego apertury numerycznej. Szerokość pasma zależy od dyspersji światłowodu. Zdolność do przenoszenia informacji (pasmo przepustowe) światłowodu jest odwrotnie proporcjonalna do jego całkowitej dyspersji.

Dyspersja zmienia kształt sygnału i powoduje jego "rozmycie" rosnące wraz z odległością. Zniekształcenia te mają ogromne znaczenie przy szybkiej transmisji (sygnały są "krótkie"). Dyspersja całkowita składa się z dyspersji modowej, materiałowej i falowodowej.

Dyspersja modowa - występująca w światłowodach gradientowych, jest mała, gdyż poszczególne mody (fali długości 850 lub 1300 nm) pokonują, w przybliżeniu jednakową drogę. Praktyczna szerokość pasma przenoszenia impulsów przez włókna G 50/125 wynosi ok. 1 GHz i jest nieznacznie większa niż włókien G 62,5/125. We

włóknach jednomodowych dyspersja modowa nie występuje i możliwe jest uzyskanie bardzo szerokiego pasma. Jednak szerokość tego pasma ogranicza dyspersja materiałowa i falowodowa.

Dyspersja materiałowa - nazywana chromatyczną spektralną, lub widmową. - spowodowana jest tym, że przesyłane impulsy składają się w rzeczywistości z wielu fal monochromatycznych. Fale o różnych długościach poruszają się w rdzeniu z różnymi prędkościami. Zjawisko to powoduje poszerzanie przesyłanych włóknem impulsów.

Dyspersja falowodowa - spowodowana jest tym, że ok. 20% światła wędruje również przez płaszcz otaczający rdzeń. Efektywna prędkość fal jest zależna jednocześnie od własności materiału rdzenia i płaszcza (czyli od profilu refrakcyjnego włókna). Dyspersje materiałowa i falowodowa mogą mieć przeciwne znaki. Ich suma może wynieść zero. Włókna jednomodowe Jp i Jn są zoptymalizowane dla fali 1550 nm. Dyspersja włókien Jp wynosi zero dla fali 1550 nm. Bardzo małą, (nie zerową) wartość bezwzględną dyspersji, w przedziale długości fal 1530-1570 nm, mają, włókna Jn.

Straty mocy: Na przewężeniach i łączeniach fale (promienie) mogą wyjść z światłowodu. Dodatkowo straty występują na łączeniach odcinków światłowodów na skutek:

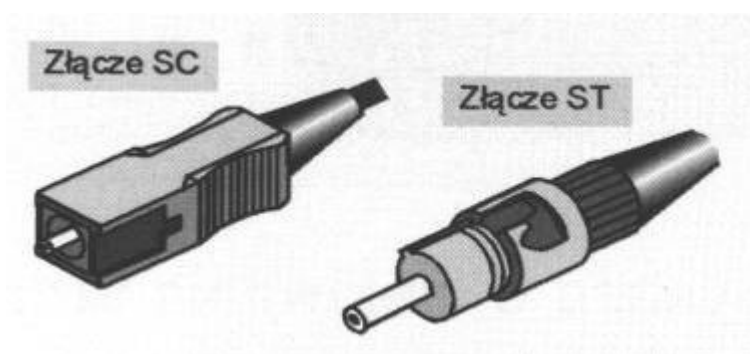
- odchyłki osi światłowodów,
- przesunięcia osi światłowodów,
- przesunięcia (odstępu) płaszczyzn dwóch światłowodów.

Rodzaje połączeń:

- mechaniczne stałe, $A = 0,1$ dB,
- mechaniczne rozłączne, $A = 0,2-0,7$ dB,
- zgrzewane (spawane), $A = 0,05$ dB.

Złącza światłowodowe.

Zasady stosowania kabli światłowodowych zawarte są w normach: ISO/IEC 11801 i EN 50173 oraz TIA/EIA 568A. Według ISO/IEC 11801 i EN 50173 preferowane są kable wielomodowe 62,5/125nm, a w nowych instalacjach należy stosować złącza duplex-SC. Starsze złącza ST nie zapewniają tak dobrych parametrów połączenia jak SC (poprawna polaryzacja, stabilność mechaniczna łącza), jednak w sieciach Ethernet są nadal stosowane.



Złącza światłowodowe ST i SC

Standardy transmisji światłowodowych.

Najważniejszymi dla technologii światłowodowej, z naszego punktu widzenia, są:

- 10Base-FL - transmisja 10Mb/s,
- 100Base-FX - transmisja 100Mb/s,
- 1000Base-LX - transmisja 1000Mb/s, laser długofalowy - ok. 1300nm,
- 1000Base-SX - transmisja 1000Mb/s, laser krótkofalowy - ok. 850nm.

Transmisja za pomocą światłowodu wymaga najczęściej, przynajmniej dwóch kabli. Jeden do transmisji a drugi do odbierania danych. Standard 10Base-FL jest idealny do połączeń pomiędzy oddalonymi od siebie budynkami danej firmy. Połączenia takie są zupełnie odporne na zakłócenia elektromagnetyczne.

Do czynników wpływających negatywnie na poprawną pracę włókien należy zaliczyć:

- wilgoć (powoduje rozpad sieci krystalicznej płaszcza i rdzenia włókna);
- obecność wodoru (powoduje powstawanie jonów OH(-), które zwiększają tłumienie w II i w III oknie transmisyjnym);
- wystąpienie naprężeń mechanicznych od rozciągania, zginania, zgniatania, skręcania, uderzania i wpływu wysokich temperatur (powoduje mikropęknięcia zwiększające tłumienie i skracające okres życia włókien);
- wystąpienie naprężeń ściskających od wpływu ujemnych temperatur (powstające mikrozgięcia i makrozgięcia włókna zwiększają, tłumienie i również skracają okres życia włókien).

Zastosowanie.

Warto wiedzieć, że światłowody stosuje się też: Jako transmisję obrazu i mocy w zastosowaniach medycznych; Jako kabel studyjny do pracy w telewizji "na żywo" W pomiarach obciążeń, naprężeń, odkształceń, przemieszczeń; Jako mierniki pH; Jako czujniki drgań, odległości, przezroczystości (wody, atmosfery); Do monitorowania temperatury, ciśnienia, naprężeń pola elektrycznego; W diagnostyce i badaniach silników spalinowych; Do monitorowania składu mieszanki paliwowo-powietrznej; W optycznych skaningowych mikroskopach tunelowych; W kontroli procesów transportu cieczy i gazów.

Zalety światłowodów:

- odporność na zakłócenia elektromagnetyczne,
- brak generacji zakłóceń elektromagnetycznych,
- brak prądów błądzących,
- brak różnic potencjałów,
- mała tłumienność,
- duża trwałość, rzędu 25 lat,
- duża prędkość transmisji.