

OPTOELEKTRONIKA

Seweryn Lipiński

A209 WNT

seweryn.lipinski@uwm.edu.pl

Światłowody

Dlaczego światłowody są dziś kluczowe?

Światłowody stanowią podstawę współczesnych systemów przesyłu informacji oraz czujników optycznych.

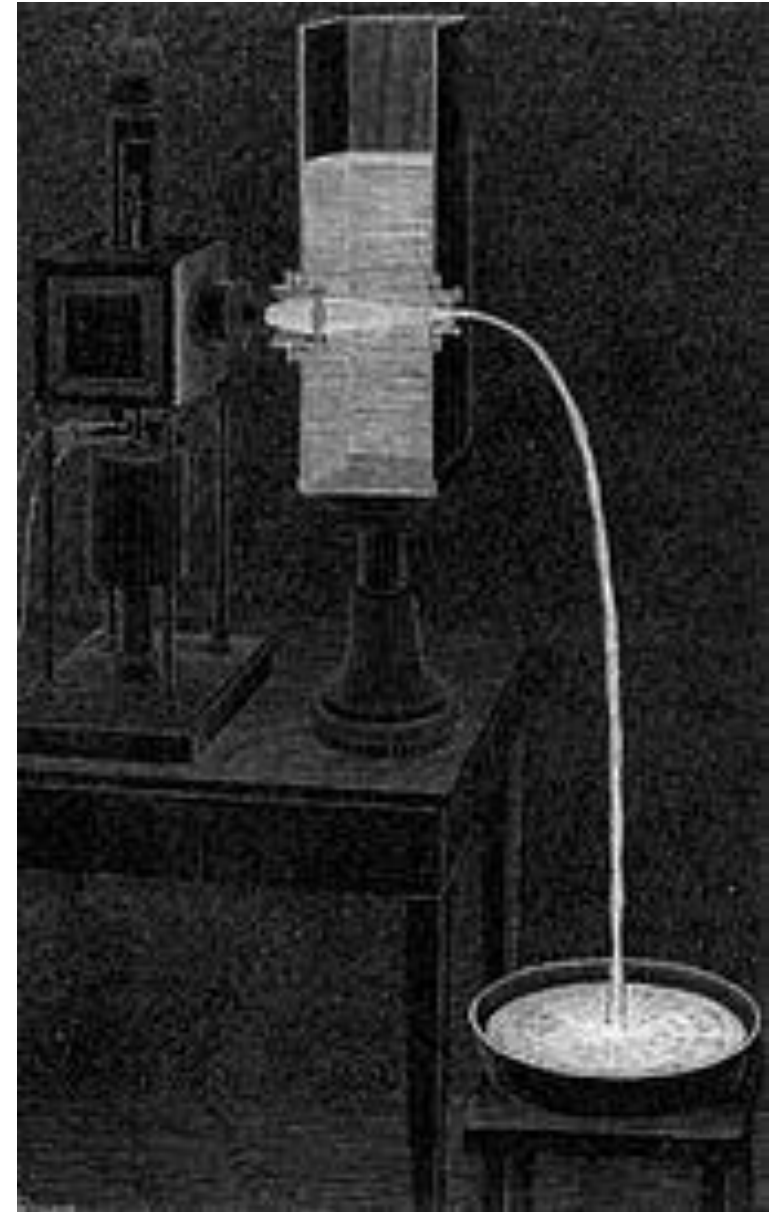
Ich właściwości determinują zasięg, przepustowość i niezawodność systemów telekomunikacyjnych.

- sieci szkieletowe Internetu,
- centra danych i sieci lokalne,
- czujniki światłowodowe (temperatura, naprężenia, drgania),
- odporność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Światłowodowy

- Historia:

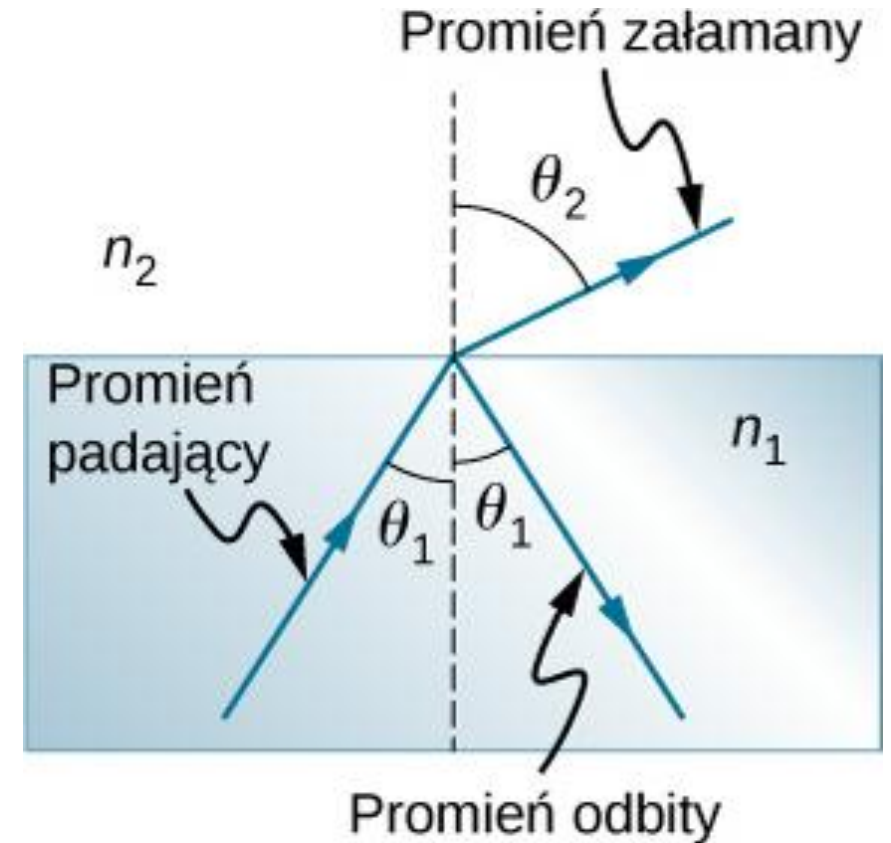
1854 – John Tyndall i eksperyment dowodzący możliwości przewodzenia światła na zasadzie zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia...



- Dygresja „optyczna” – **całkowite wewnętrzne odbicie**

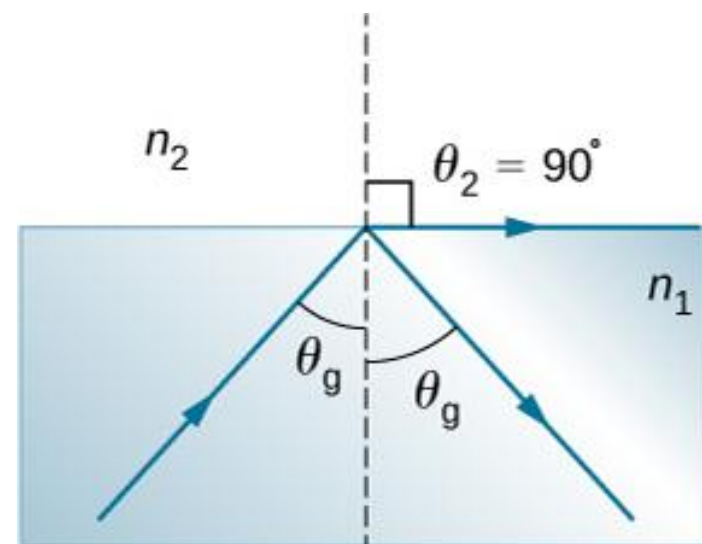
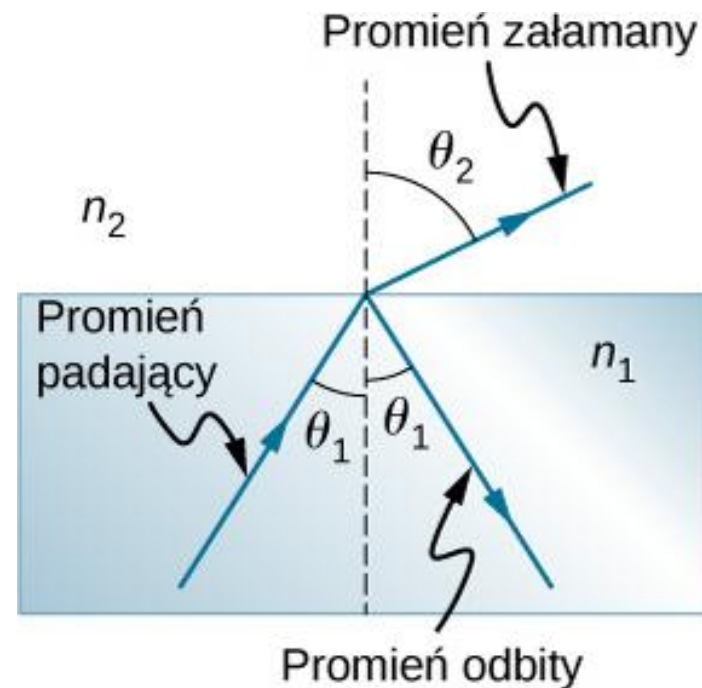
Rozważmy, co się dzieje, gdy promień światła pada na granicę pomiędzy dwoma ośrodkami - część światła przechodzącego przez granicę ośrodków zostaje załamana; reszta ulega odbiciu.

Jeżeli współczynnik załamania światła drugiego ośrodka jest mniejszy niż współczynnik załamania pierwszego ośrodka, promień odchyła się w kierunku od prostej prostopadłej (normalnej) – tak jak na rysunku:

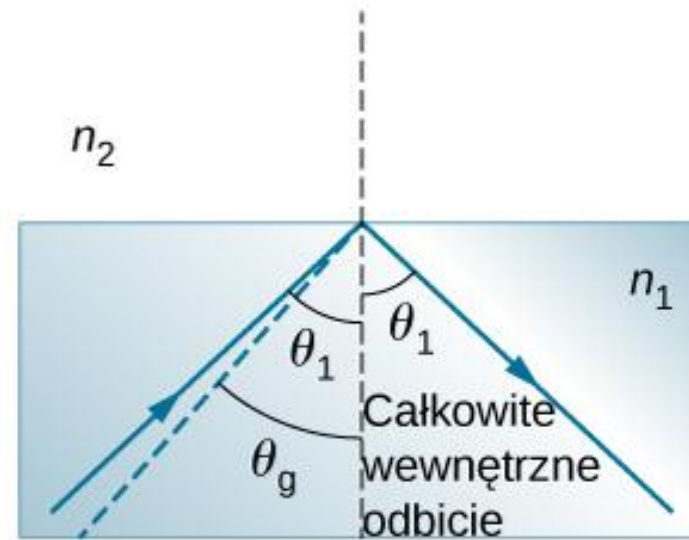
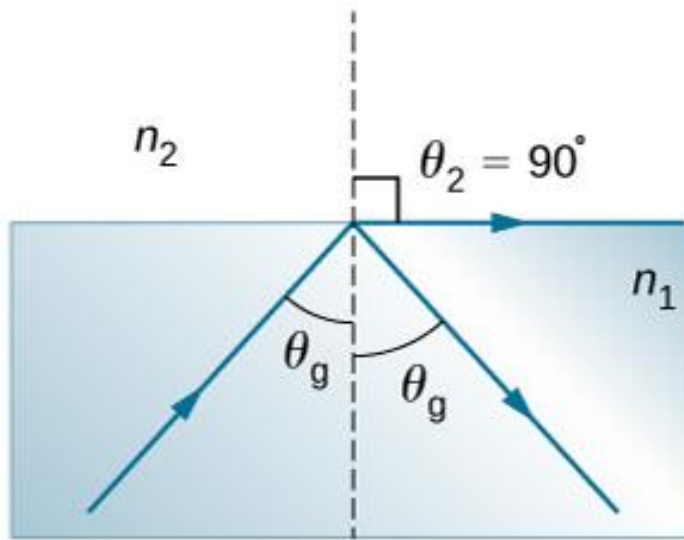
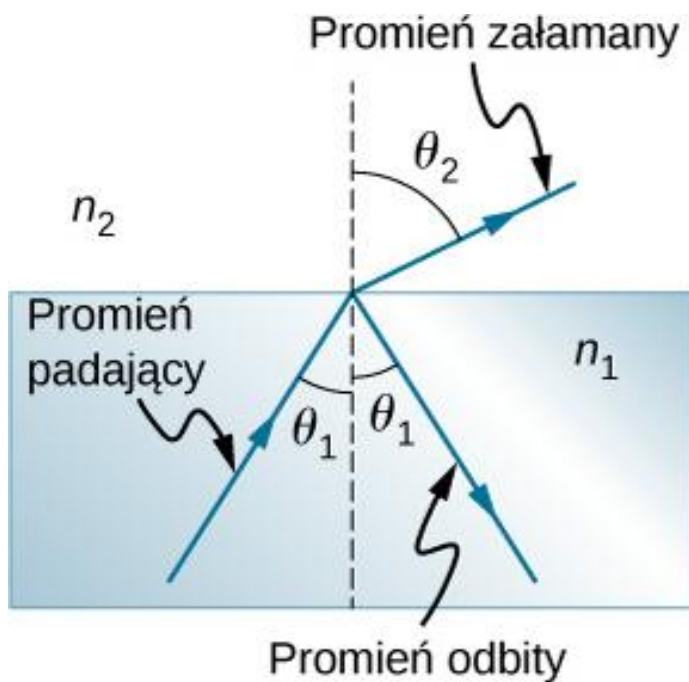


Teraz wyobraźmy sobie, co stanie się, jeżeli kąt padania θ_1 wzrośnie - spowoduje to oczywiście, że kąt załamania θ_2 również wzrośnie.

Największym możliwym kątem załamania θ_2 jest oczywiście kąt 90° . Kąt graniczny (ang. *critical angle*) θ_g dla układu materiałów jest definiowany właśnie jako kąt padania θ_1 , przy którym wartość kąta załamania θ_2 wynosi 90° .



Jeżeli kąt padania θ_1 jest większy od kąta granicznego, całe światło ulega odbiciu na granicy ośrodków - zjawisko to jest nazywane całkowitym wewnętrznym odbiciem (ang. *total internal reflection*).



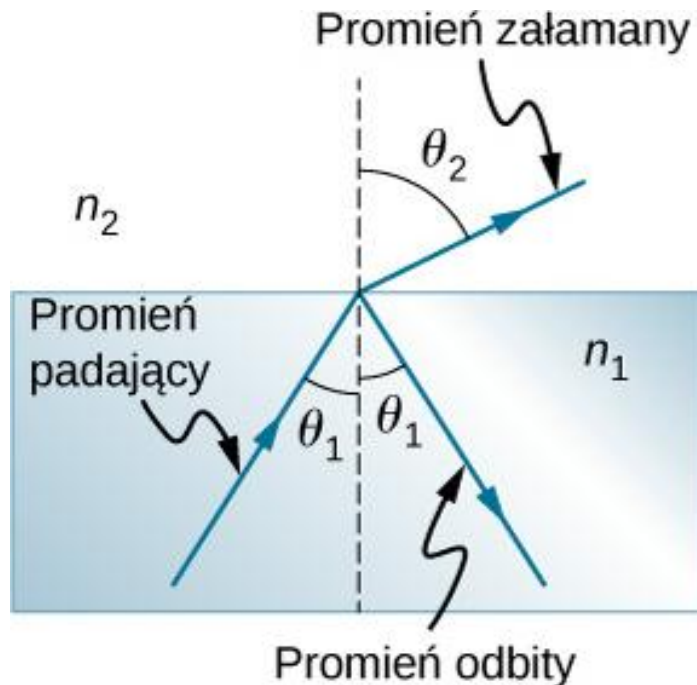
Minimalny kąt, dla którego zachodzi CWO, to kąt, dla którego $\theta_2 = 90^\circ$.

Zatem $\sin \theta_2 = 1$.

Stąd, kąt graniczny możemy wyznaczyć z wzoru:

$$\theta_g = \arcsin(n_2/n_1),$$

oczywiście przy spełnieniu warunku, że $n_1 > n_2$, tj. tylko wtedy, gdy drugi ośrodek ma mniejszy współczynnik załamania (n_2) niż pierwszy (n_1).



Przykład...

Określanie kąta granicznego

Jaki jest kąt graniczny dla światła przechodzącego przez polistyrenową rurę znajdującą się w powietrzu?

Współczynnik załamania dla polistyrenu wynosi 1,49, współczynnik załamania światła w powietrzu jest równy 1.

Warunek mówiący, że współczynnik załamania światła drugiego ośrodka musi być mniejszy niż pierwszego, jest spełniony, więc możemy skorzystać z równania:

$$\Theta_g = \arcsin(n_2/n_1),$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$\Theta_g = \arcsin(1/1,49) = \arcsin(0,671) = 42,2^\circ.$$

Otrzymany wynik oznacza, że każdy promień światła poruszający się wewnątrz polistyrenowej rury, który pada na wewnętrzną powierzchnię pod kątem większym niż $42,2^\circ$, jest całkowicie odbijany.

To sprawia, że wewnętrzna powierzchnia przezroczystego plastiku (polistyrenu) staje się idealną powierzchnią zwierciadlaną dla promieni światła, bez potrzeby pokrywania jej warstwą srebra, jak w przypadku zwykłych luster.

Różne układy materiałów mają różne kąty graniczne, ale każdy układ, dla którego $n_1 > n_2$, może spowodować efekt całkowitego wewnętrznego odbicia.

Wykonując takie same obliczenia dla innych materiałów przekonamy się, że kąt graniczny dla promienia przechodzącego z wody do powietrza wynosi $48,6^\circ$, z diamentu do powietrza $24,4^\circ$, natomiast ze szkła flint do szkła kronowego $66,3^\circ$.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia jest kluczowe w technologii światłowodowej.

W światłowodach do transmisji światła wykorzystywane są lekkie włókna polimerowe, szklane, lub mieszane.

Światłowody

- Historia:

1854 – John Tyndall i eksperyment dowodzący możliwości przewodzenia światła na zasadzie zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia...

1923 – AT&T Bell – dowód na możliwość prowadzenia światła w szkłe...

1968 – Corning – pierwsze włókna o „sensownych” parametrach:

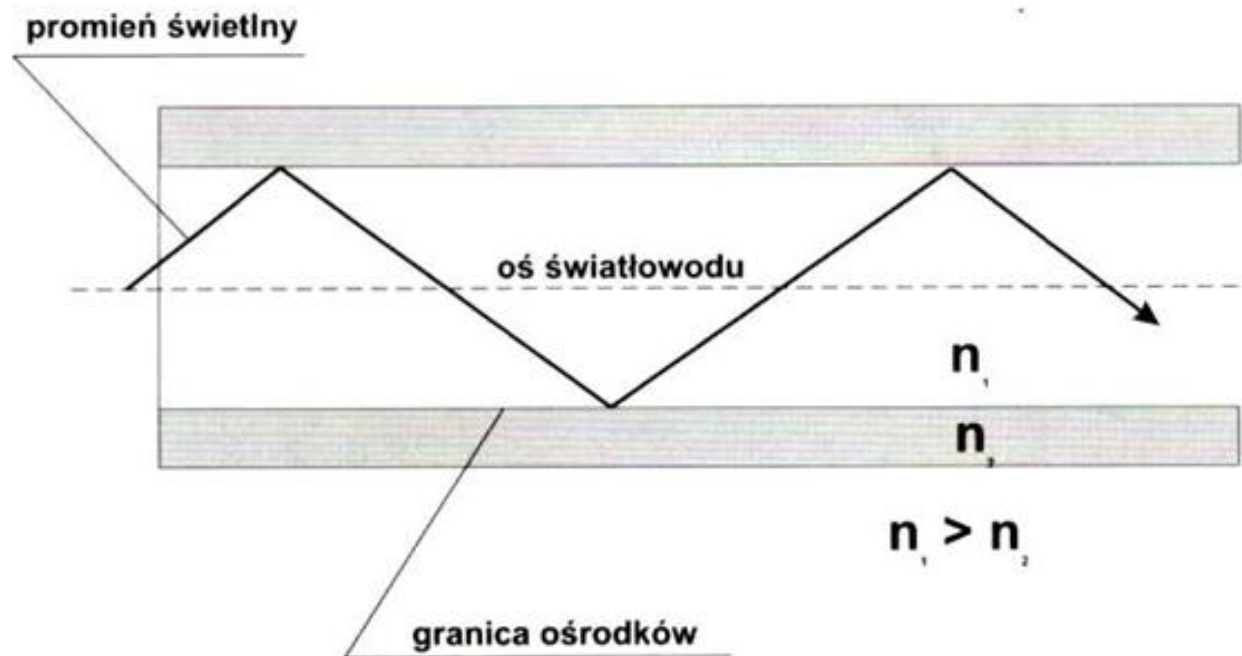
- od 1000 dB/km (1968) do 20 dB/km (1970) – obecnie np. 0,2 dB/km

Światłowody

- Zasada działania

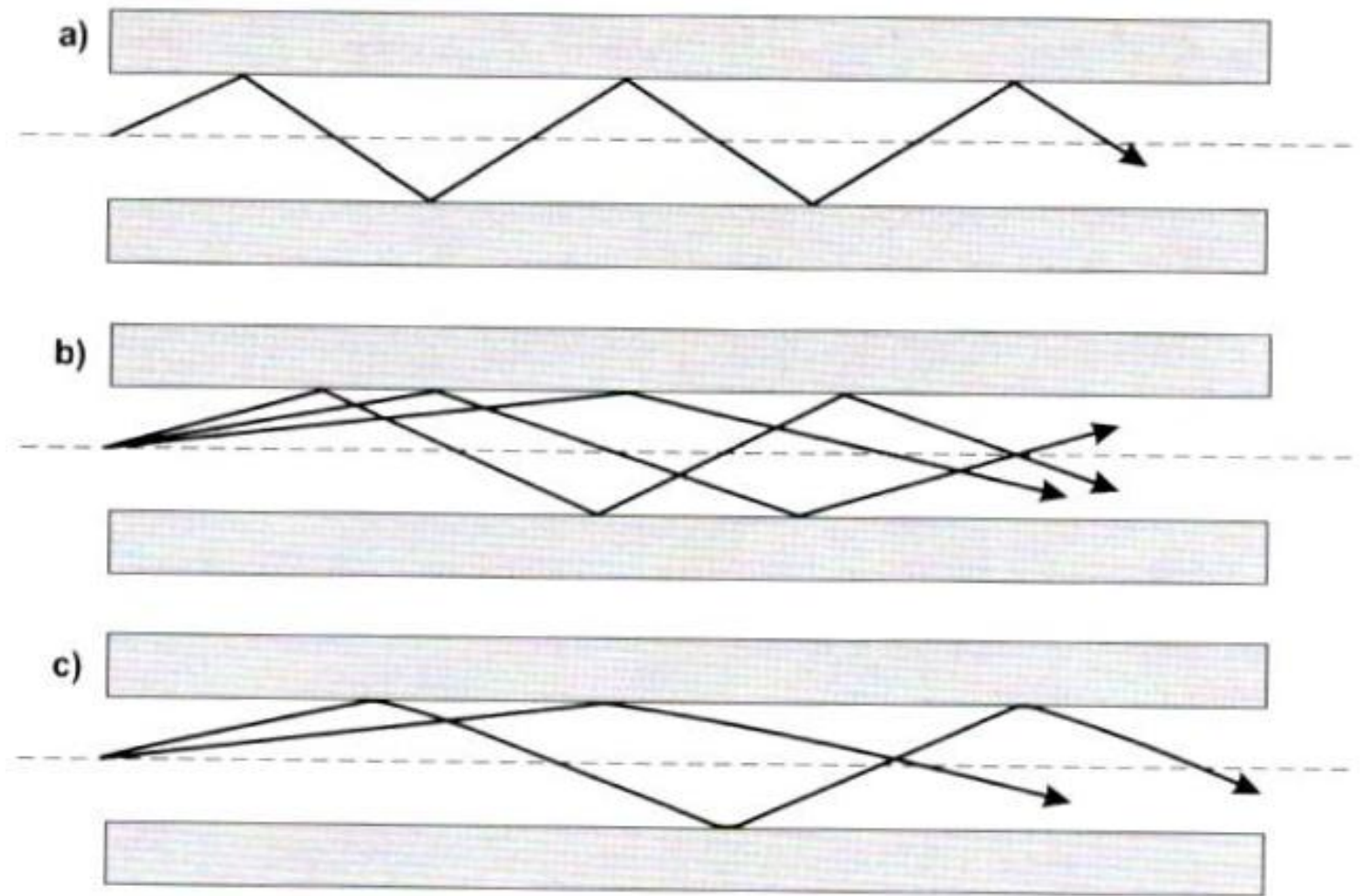
Rozważmy strukturę planarną w której ośrodki spełniają warunek $n_2 < n_1$.

Światło padające pod kątem większym od θ_g będzie prowadzone w warstwie wewnętrznej w wyniku kolejnych odbić od granic tej warstwy.

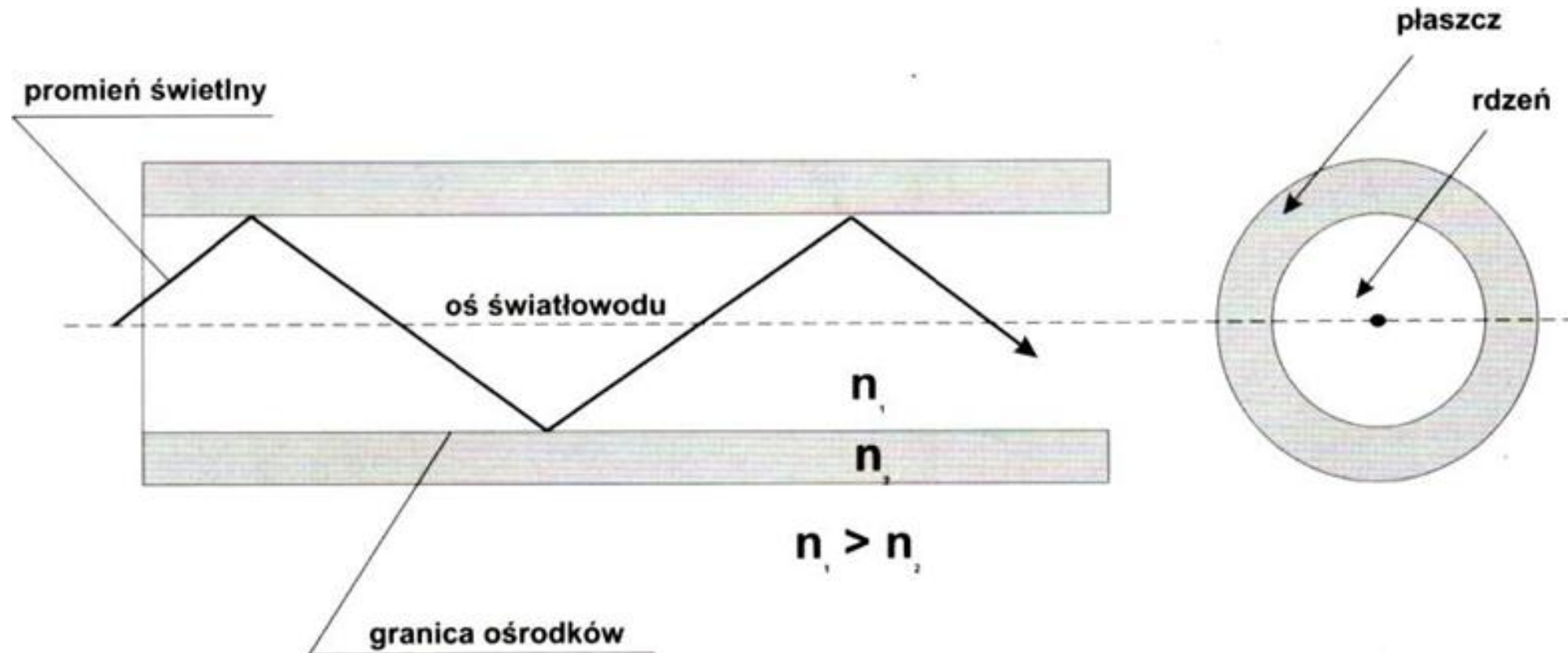


Liczba odbić na danej długości w sposób oczywisty zależy od kąta padania.

Jeśli warstwa byłaby idealnie płaska, nie byłoby odbijane wcale.



Światłowody nie są oczywiście strukturami planarnymi, lecz mają kształt walca z rdzeniem z materiału o większym współczynniku załamania otoczonym płaszczem z materiału o mniejszym współczynniku.

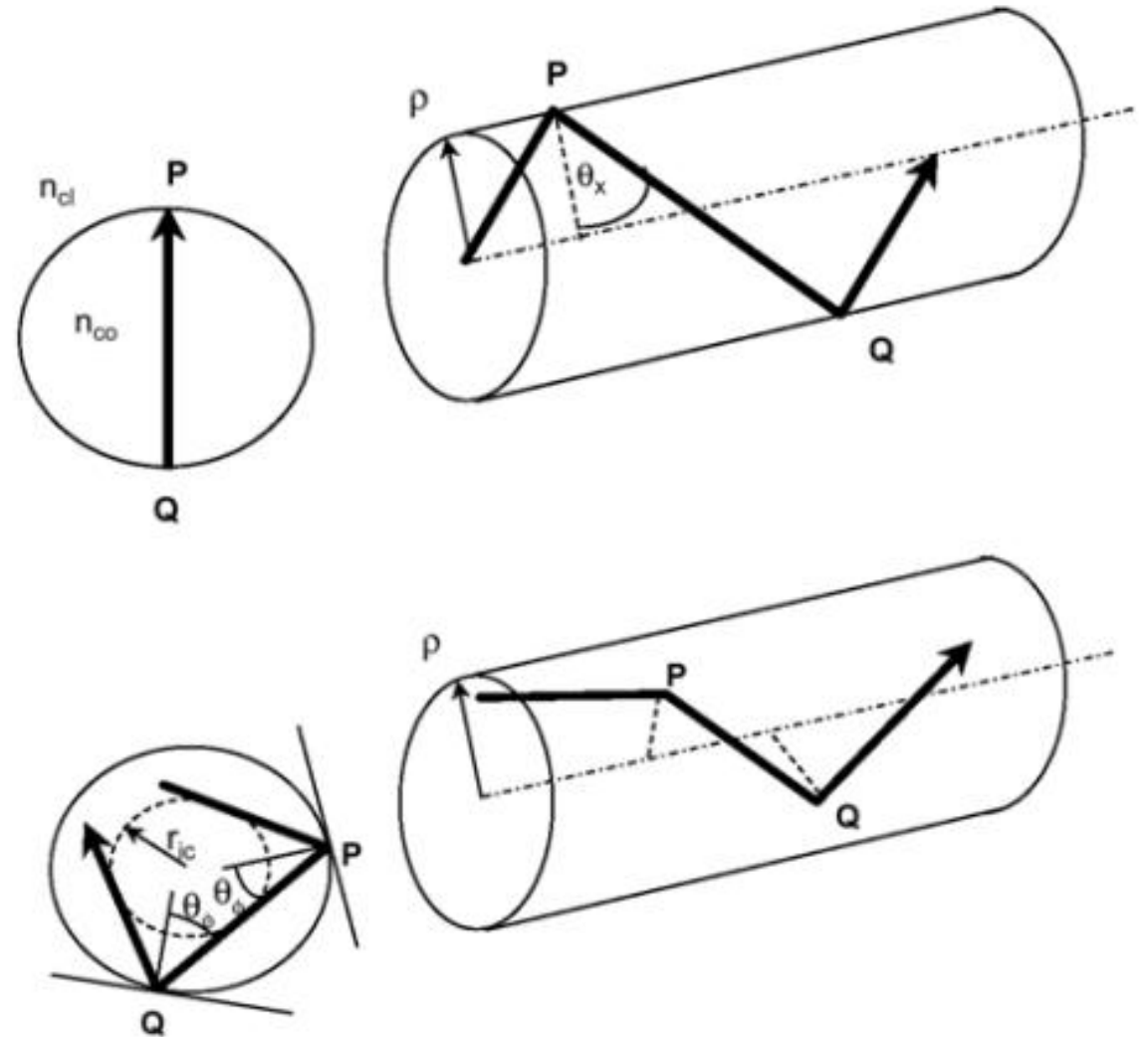


Płaszcz stwarza stałe warunki CWO i wzmacnia światłowód mechanicznie.

W przekroju wzdłużnym światłowód wygląda jak struktura planarna, ale fakt, że w istocie jest to struktura cylindryczna sprawia, że występują dwa rodzaje promieni:

- Promienie o kierunku południkowym, których drogi przecinają oś światłowodu;
- Promienie ukośne, odbijane wokół krańców rdzenia, tworzące drogę spiralną, nigdy nie przecinającą osi.

Modelowanie promieni spiralnych jest oczywiście trudniejsze...

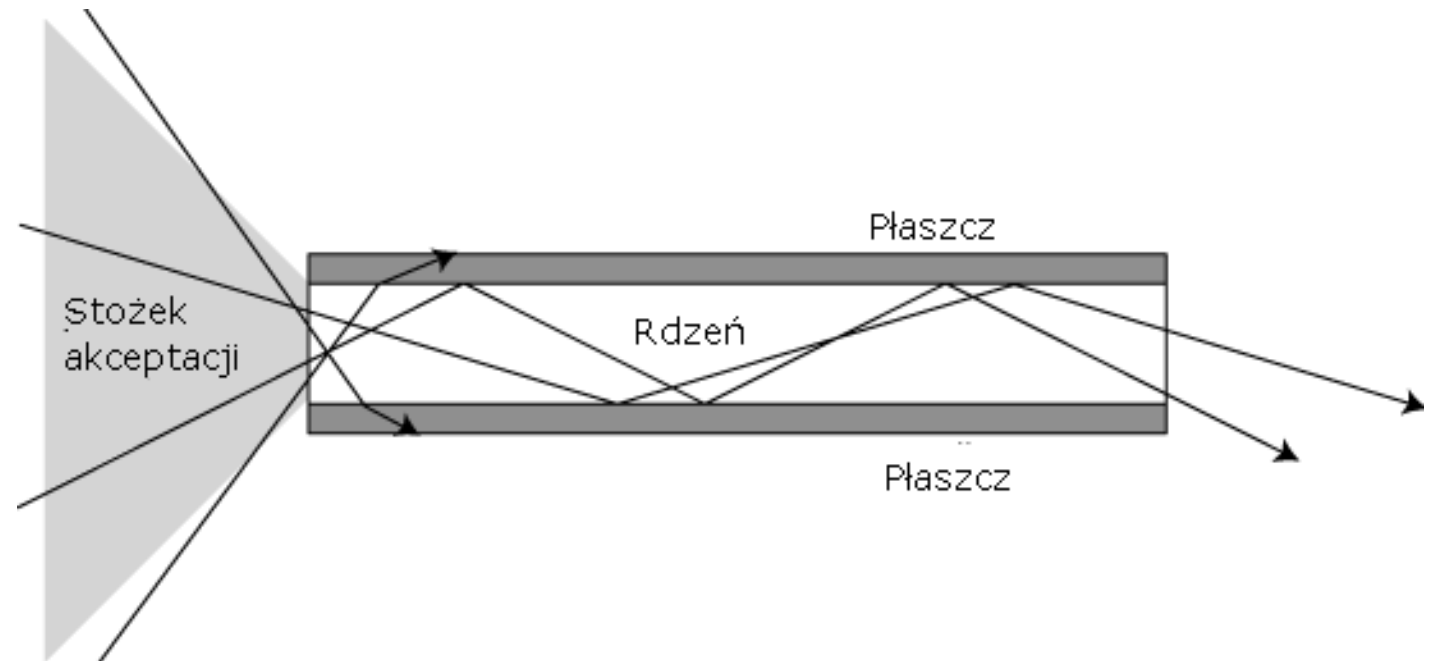


Apertura numeryczna

Wiemy, że CWO ulega tylko światło padające na granicę rdzeń/płaszcz pod kątem większym od granicznego.

W strukturze planarnej rozważenie wszystkich promieni dla których $\Theta \geq \Theta_g$, z uwzględnieniem zarówno górnej, jak i dolnej powierzchni płaszcza dałoby klin światła wewnątrz odbitego.

W strukturze cylindrycznej, klin staje się stożkiem.



Stożek ten nazywa się stożkiem akceptacji światłowodu.

Jego względne wymiary są ważnym parametrem każdego światłowodu – krótki stożek o długiej podstawie ułatwia wprowadzenie wiązki światła do włókna.

Wymiary te wyraża się poprzez bezwymiarowy parametr zwany aperturą numeryczną (NA):

$$NA = n \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

Często przyjmuje się założenie, że ośrodkiem wokół światłowodu jest powietrze o współczynniku załamania n równym 1, wówczas wyrażenie nie zawiera współczynnika n :

$$NA = \sin \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Możliwość wyznaczenia NA światłowodu jest niezwykle ważna, ponieważ NA można też obliczać np. dla źródeł światła, soczewek, czy detektorów.

To z kolei umożliwia określenie wydajności sprzęgania poszczególnych elementów.

Straty powodowane sprzęganiem są często głównym źródłem strat transmisji.

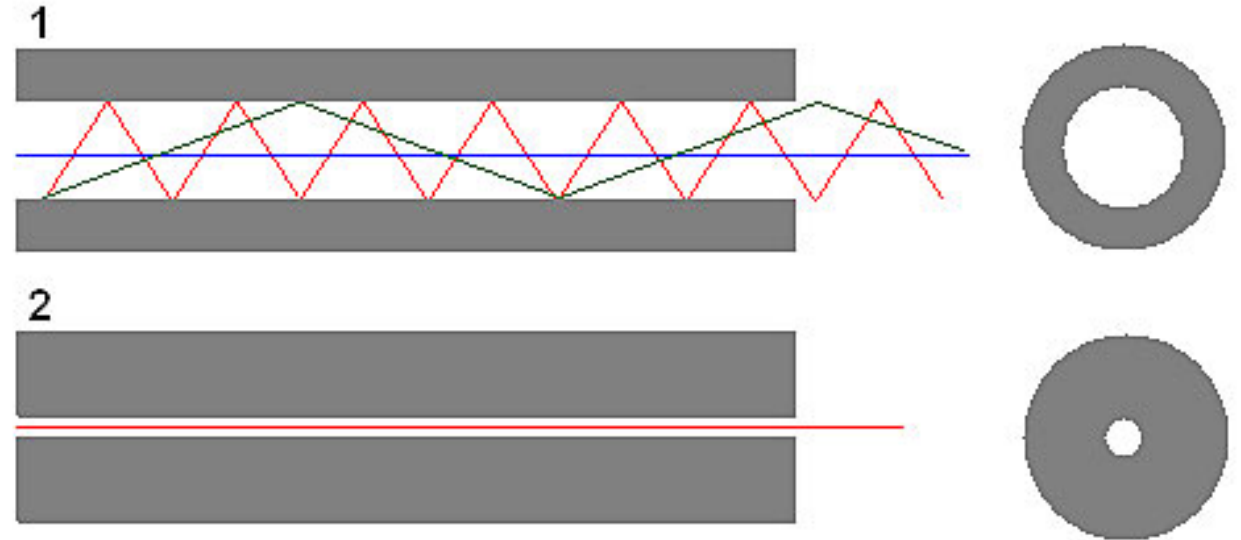
Przykładowe wartości apertury numerycznej i kąta akceptacji światłowodu:

	NA:	kąt akceptacji:
<i>powietrze</i>	1,000	90°
światłowód kwarcowy wielomodowy skokowy	0,242	14°
światłowód kwarcowy gradientowy	0,208	12°
światłowód jednomodowy	0,110	6,5°

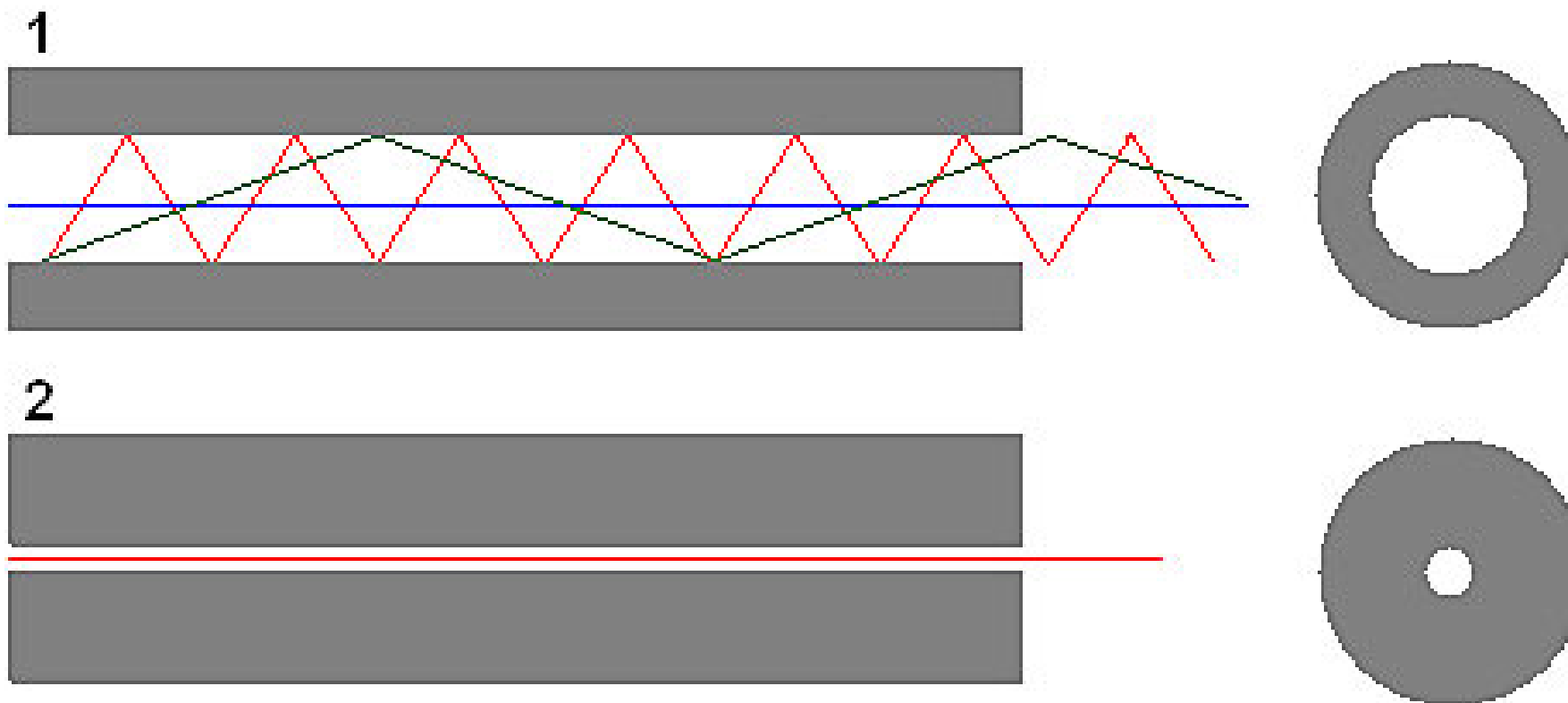
Mody - Światłowody dzieli się na jedno i wielomodowe.

W światłowodach jednomodowych prowadzona jest dokładnie jedna monochromatyczna wiązka świetlna o stałej szybkości propagacji impulsu (jeden mod).

W światłowodzie wielomodowym istnieją warunki optyczne do powstania i przesyłania wzdłuż osi włókna optycznego wielu dyskretnych modów (promieni świetlnych), każdy o tej samej długości fali świetlnej i różnej szybkości propagacji, wynikającej z różnych kątów odbicia wiązki.



To, że w światłowodach jednomodowych prowadzona jest dokładnie jedna wiązka świetlna o stałej szybkości propagacji impulsu, oznacza, że wszystkie promienie odbijane są pod tym samym kątem do powierzchni płaszcza (w ideale – odbić nie ma wcale).



W konsekwencji wszystkie promienie mają więc jednakową drogę do przebycia i zajmuje to taki sam czas, co minimalizuje dyspersję (poszerzenie) transmitowanego sygnału świetlnego i zwiększa efektywną długość toru światłowodowego bez potrzeby regeneracji sygnału.

Światłowody jednomodowe są zatem generalnie lepsze w aspekcie właściwości. Umożliwiają transmisję danych bez ich wzmacniania na odległości rzędu 100-200 km.

Główną ich wadą, hamującą ich powszechne stosowanie, jest wysoki koszt interfejsów przyłączeniowych (cienki rdzeń utrudnia łączenie światłowodów ze sobą).

To, że w wielomodowym światłowodzie istnieje możliwość występowania różnych kątów odbicia skutkuje rozmyciem przesyłanego sygnału, czyli dyspersją, co w konsekwencji zmniejsza prędkości i odległości transmisji.

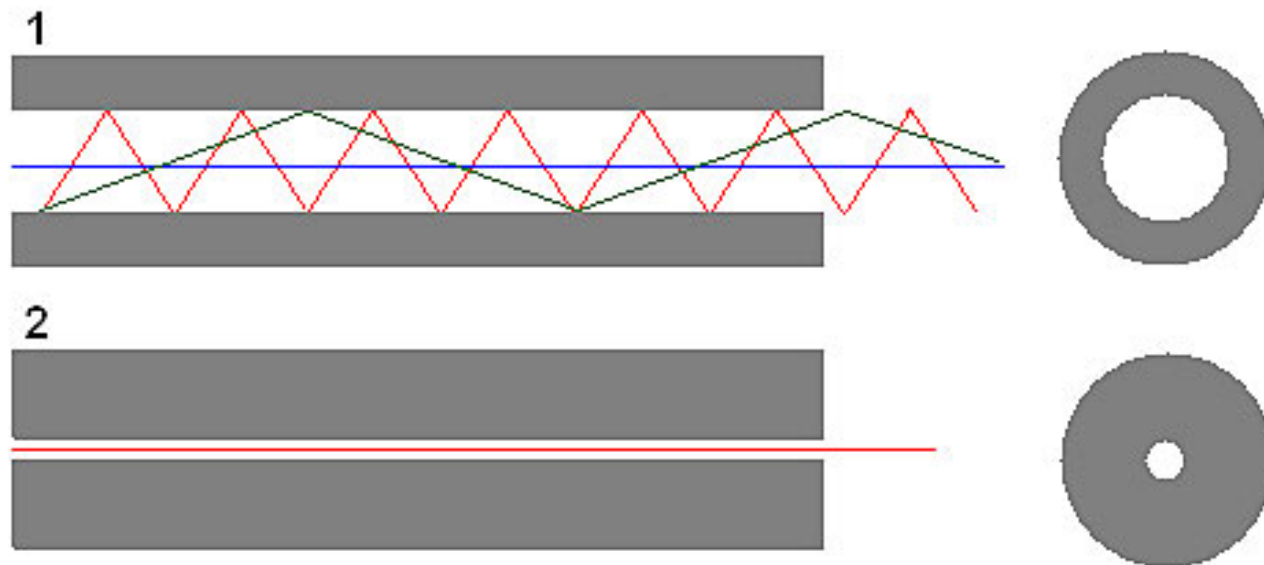
W przypadku światłowodów wielomodowych, maksymalny zasięg transmisji wynosi zazwyczaj 2 kilometry, przy większych prędkościach – kilkaset metrów.

Przykładowe typowe wartości tłumienia światłowodów:

- tłumienie w światłowodzie jednomodowym:
 - dla długości fali 1310 nm to 0,36 dB/km;
 - dla długości fali 1550 nm to 0,22 dB/km.
- tłumienie w światłowodzie wielomodowym
 - dla długości fali 850 nm to 3,0 dB/km;
 - dla długości fali 1300 nm to 1,0 dB/km.

Światłowód jednomodowy i wielomodowy różnią się średnicą rdzenia.
Średnica rdzenia włókna jednomodowego szklanego wynosi zwykle od 5 do 10 mikrometrów (standardowo $9\text{ }\mu\text{m}$), natomiast dla włókna wielomodowego rdzeń ma standardową średnicę 62,5 bądź 50 mikrometrów.

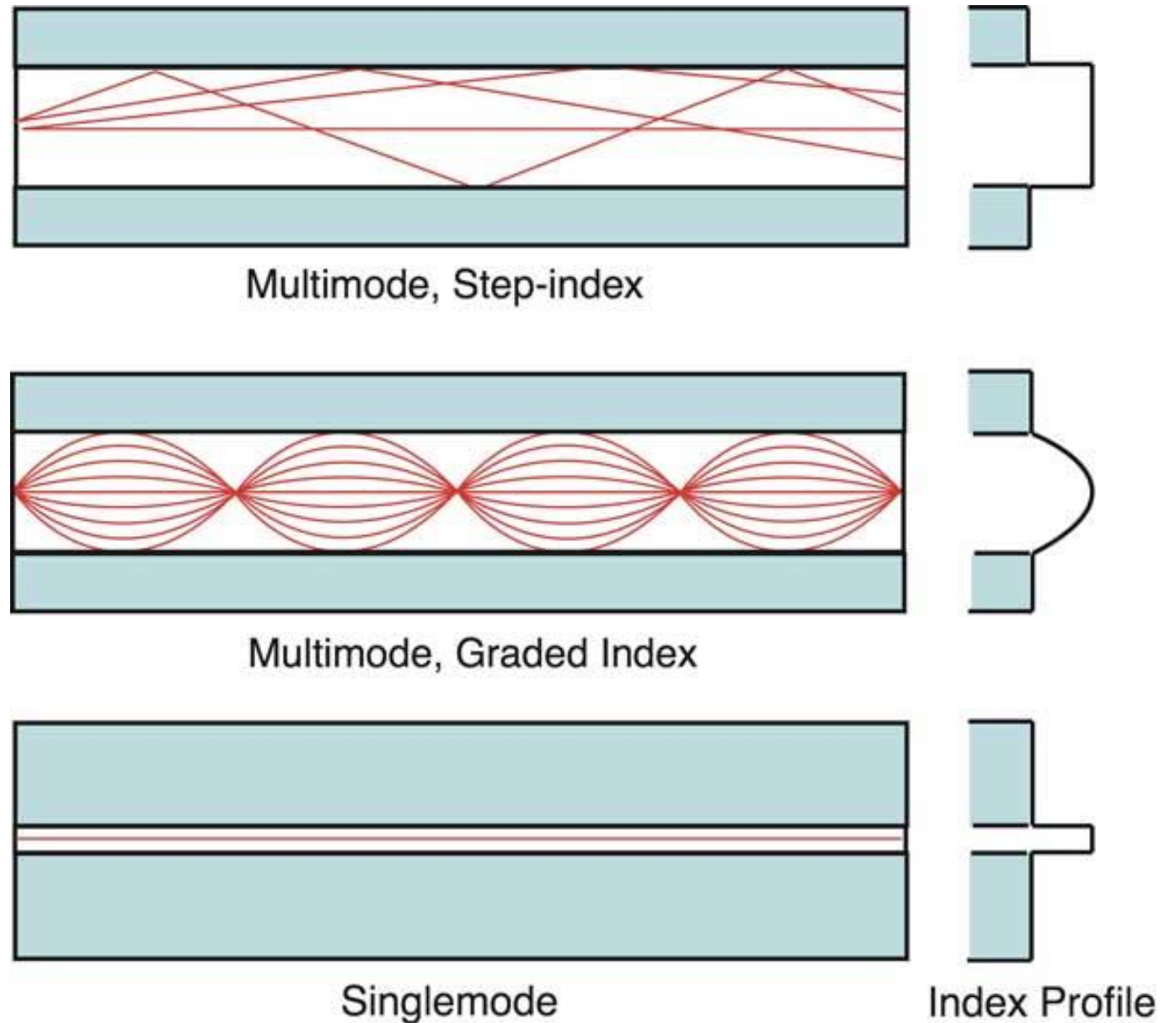
Najczęściej spotykana znormalizowana średnica płaszczka wynosi 125 mikrometrów.



- Rodzaje światłowodów

Istnieją dwa podstawowe rodzaje światłowodów - o skokowej i o gradientowej zmianie współczynnika załamania.

Jak widać na rysunku, światłowody jednomodowe mają co do zasady skokową zmianę współczynnika załamania.



- Znormalizowana grubość warstwy

Aby określić, czy światłowód jest jednomodowy, posługujemy się parametrem V – znormalizowaną grubością warstwy:

$$V = \frac{\pi}{\lambda} d \text{NA} = \frac{\pi}{\lambda} d \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2}$$

Warunkiem na jednomodowość światłowodu jest $V \leq 2,405$.

- Znormalizowana grubość warstwy

Przykład...

Jaka będzie maksymalna średnica rdzenia, jeśli światłowód ma współczynniki $n_{core}=1,51$, $n_{clad}=1,48$?

Przekształcając wzór z poprzedniego slajdu, otrzymamy:

$$d \leq \frac{2,405\lambda}{\pi n_{core} \sqrt{1 - \left(\frac{n_{clad}}{n_{core}}\right)^2}} = \frac{2,405 \cdot 870nm}{\pi \cdot 1,51 \sqrt{1 - \left(\frac{1,48}{1,51}\right)^2}} = 2,2\mu m$$

Zwracam uwagę na fakt, że maksymalna średnica rdzenia zależy od długości fali.

Model promieniowy

W podstawowej analizie światłowodów najczęściej stosuje się model promieniowy, który umożliwia intuicyjny opis propagacji światła.

Model ten ma jednak ograniczony zakres stosowalności:

- nie uwzględnia interferencji fal,
- nie opisuje rozkładów pola elektromagnetycznego.

Pełny opis propagacji wymaga modelu falowego i równań Maxwella!

- Budowa kabla światłowodowego

Kable światłowodowe mają budowę warstwową.

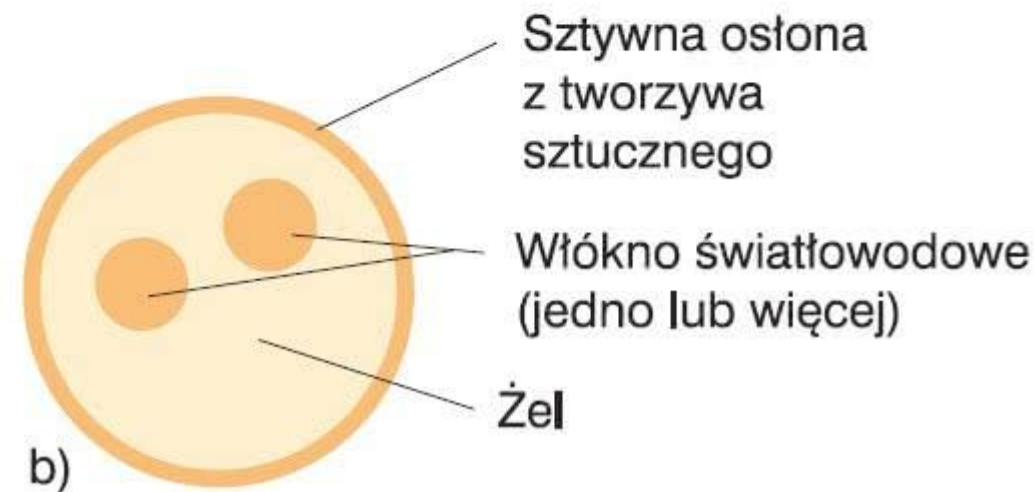
Rdzeń i płaszcz otaczane są powłokami ochronnymi, których liczba i rodzaj zależą od przeznaczenia okablowania (do wykorzystania wewnątrz budynku, na zewnątrz lub w nietypowych warunkach) oraz sposobu jego prowadzenia (pod ziemią, w kanale, jako kable samonośne lub podwieszane).



Pierwszą warstwą jest standardowo tuba z tworzywa sztucznego.

Chroni ona włókno przed wpływem zewnętrznych czynników oraz wzmacnia konstrukcję kabla, zapobiegając powstawaniu mikropęknięć z czasem prowadzących do złamania światłowodu.

Tubę wykonuje się jako ściłą, tzn. szczelnie przylegającą do włókna światłowodu oraz luźną, którą wypełnia się żelem o specjalnych właściwościach. W tubie luźnej umieszcza się przeważnie kilka włókien.



Kolejną warstwę stanowi taśma wchłaniająca wilgoć.

Pokrywa się ją powłoką wzmacniającą, na przykład z kevlaru, która zwiększa wytrzymałość kabla na rozciąganie. W przypadku konstrukcji wzmocnionych następną jest wewnętrzna powłoka z tworzywa sztucznego, na którą nakłada się stalową siatkę zabezpieczającą m.in. przed pogryzieniem przez gryzonie.

Ostatnią warstwą ochronną jest zewnętrzna koszulka wykonywana z tworzyw sztucznych o odpowiednich właściwościach (na przykład odpornych na ścieranie, wpływ promieni UV lub spełniających wymagania norm przeciwpożarowych w zakresie nierozprzestrzeniania płomieni).

W systemie światłowodowym mogą wystąpić znaczne straty mocy.

Występuje oczywiście tłumienie wynikające z właściwości samego włókna, ale ponadto występują też inne straty, najbardziej oczywistymi są:

- straty na zgięciach,
- straty na złączach.

Tłumienie sygnału optycznego powodowane jest przez straty mocy optycznej wynikające z niedoskonałości falowodu.

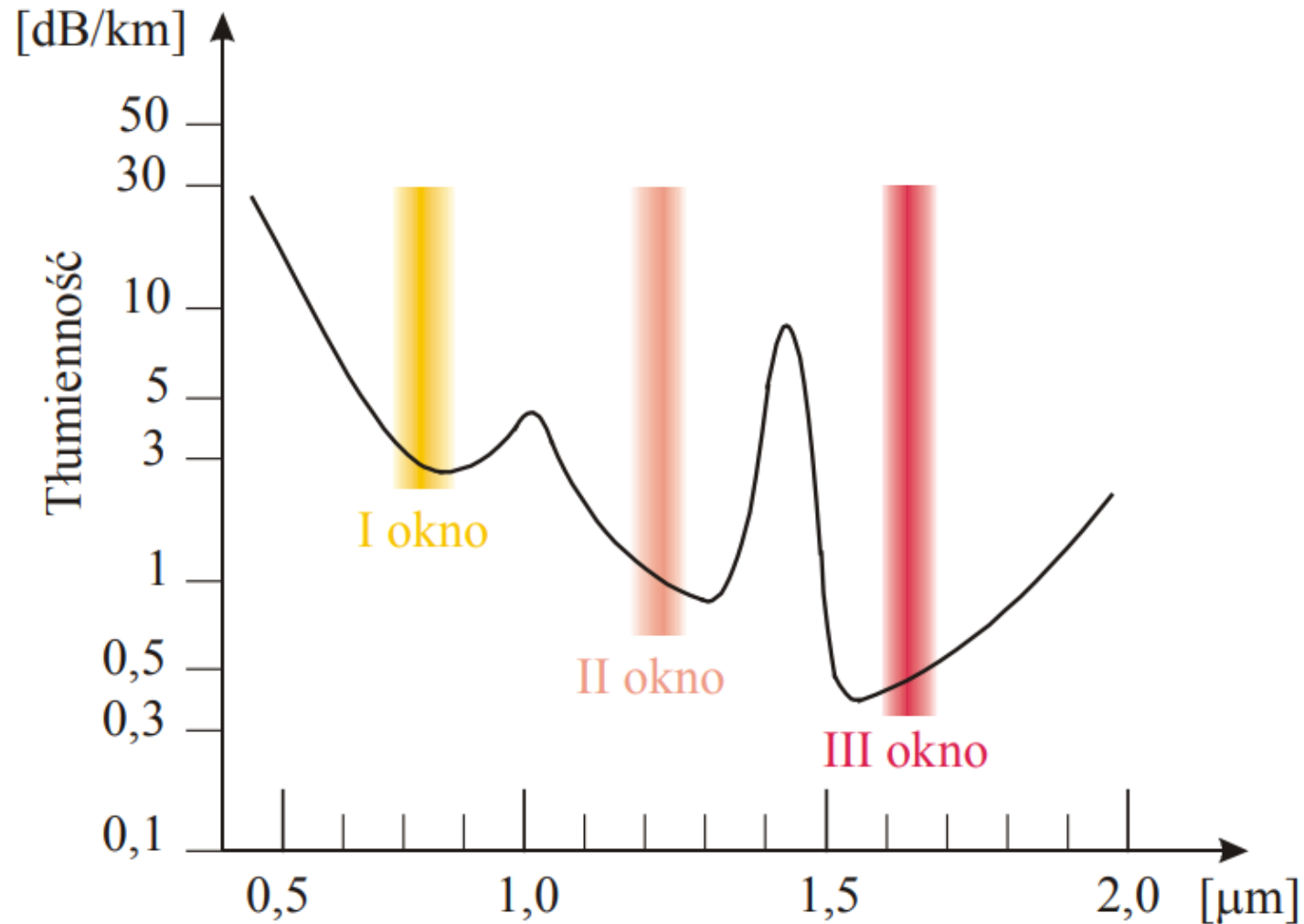
W rzeczywistym światłowodzie występuje:

- 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 np. mikropęknięcia.

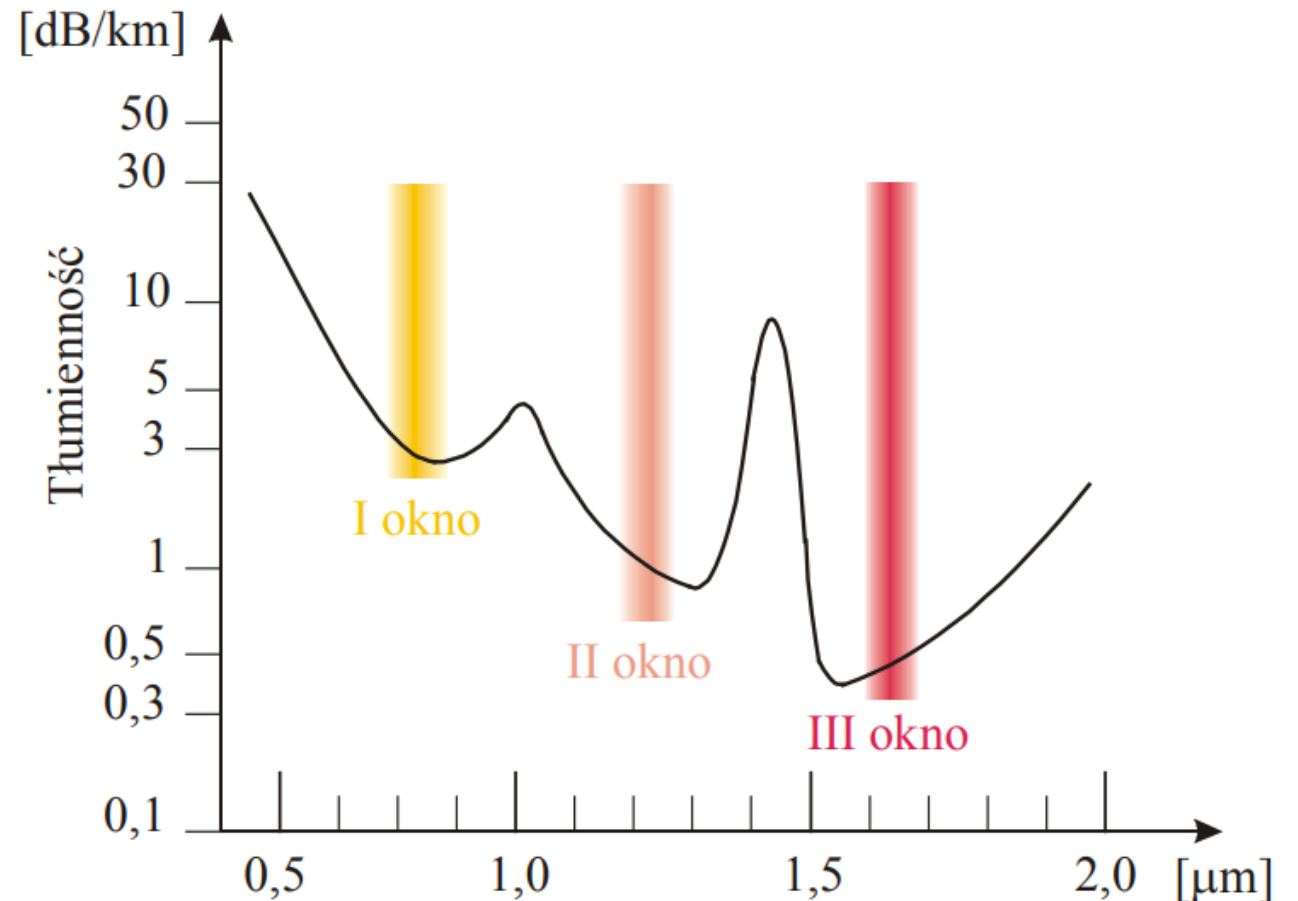
- Straty wynikające z tłumienia

Wykres tłumienności w funkcji długości fali:



Generalnie wydawałoby się, że idealnie byłoby pracować w III oknie optycznym...

Jednak właściwości źródeł i detektorów sprawiły, że historycznie wykorzystywano głównie I okno, obecnie odeszliśmy od II okna, na rzecz okna III.



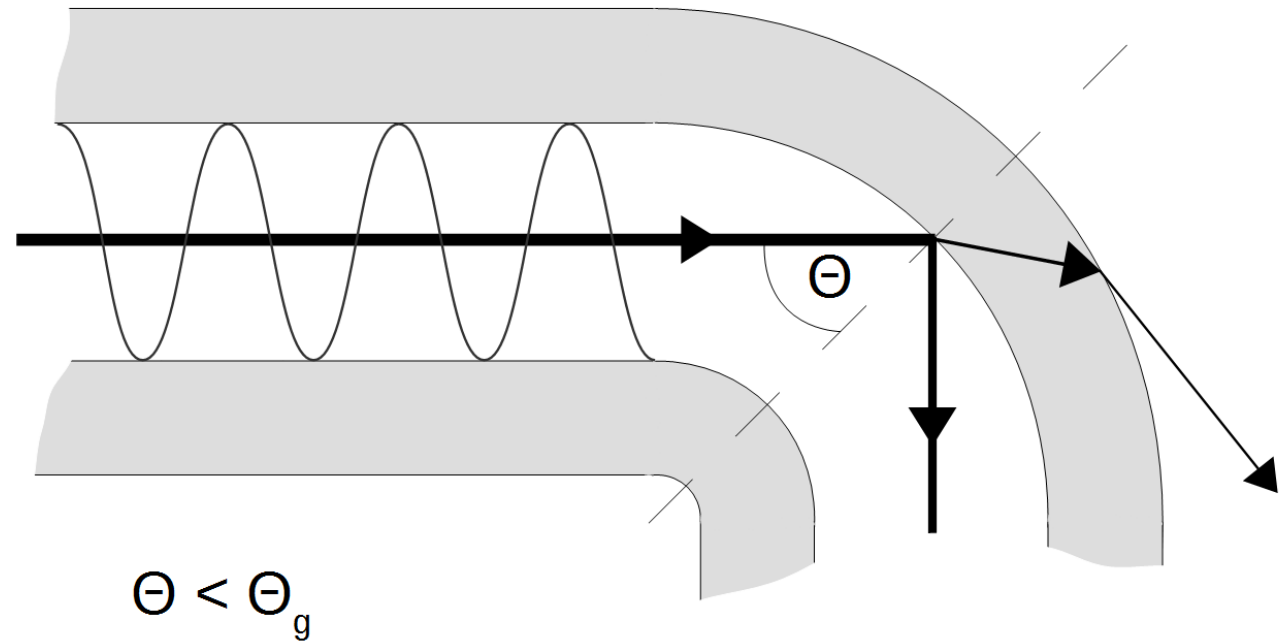
- Okna transmisyjne, mody i zastosowania...

Wybór rodzaju światłowodu jest zawsze kompromisem pomiędzy kosztami, zasięgiem i wymaganiami transmisyjnymi.

Okna transmisyjne	Długość fali	Wymiary włókna rdzeń/płaszcz	Maksymalna pojemność transmisyjna BL	Mody transmisji	Typowa tłumienność jednostkowa	Maksymalna odległość między regeneracyjną L [km]				Typowe zastosowanie
	[nm]	[μm]	[Gb/s × km]		[dB/km]	0,1	1	10	100	
1	850	100/140	0,2	wielomodowe	0,7					medycyna, przemysł, wojsko sieci lokalne telewizja telekomunikacja, sieci rozległe
		85/125								
		62,5/125	1							
		50/125								
2	1300	50/125	80	jednomodowe	0,4					
		9/125								
3	1550	9/125	200		0,2					

- Straty na zgięciach

Rozważmy sytuację z rysunku:



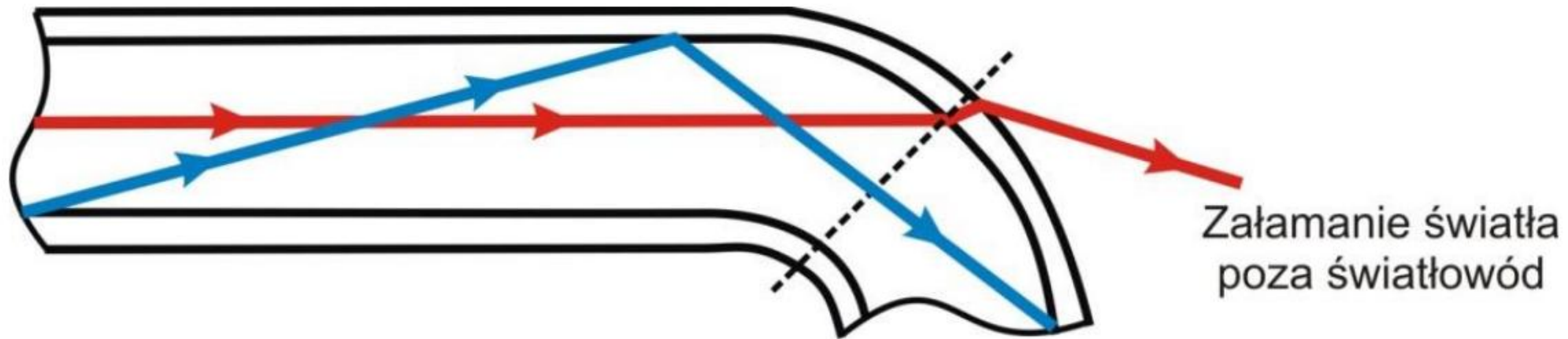
Promień rozchodzący się jako osiowy napotyka zgięcie światłowodu i pada na granice ośrodków pod kątem mniejszym niż graniczny.

Promień ulega więc załamaniu poza światłowód – energia jest tracona.

Straty na zgięciach redukujemy ograniczając liczbę zgięć i – jeśli zgięcie jest nieuniknione – zwiększając promień zakrzywienia.

- Straty na zgięciach

Światłowód wielomodowy – tzw. mody wyciekające:



- Bilans mocy

Jednym ze sposobów na upewnienie się, że moc na wyjściu światłowodu będzie wystarczająca, jest przeprowadzenie **bilansu mocy**.

Minimalna wymagana ilość światła zależy oczywiście od czułości detektora.

Wykonanie bilansu mocy polega więc na zestawieniu wartości mocy na wejściu łącza światłowodowego i wszystkich strat występujących po drodze.

Bilans taki obejmuje też zazwyczaj „margines projektowy”, uwzględniający straty trudno obliczalne i nieprzewidywalne. W ramach tego marginesu uwzględnia się np. straty na zgięciach a także gorsze od przewidywanego działanie złącza.

- Bilans mocy

Równanie budżetu mocy mówi, że budżet mocy w systemie przesyłowym musi być równy sumie wszystkich strat mocy zwiększonej o margines bezpieczeństwa – jedna strona równania bilansu. Sam budżet mocy – druga strona bilansu - to różnica między mocą wyjściową nadajnika, a czułością odbiornika:

$$P_T - S_R = A \cdot L_F + L_C + L_A + M,$$

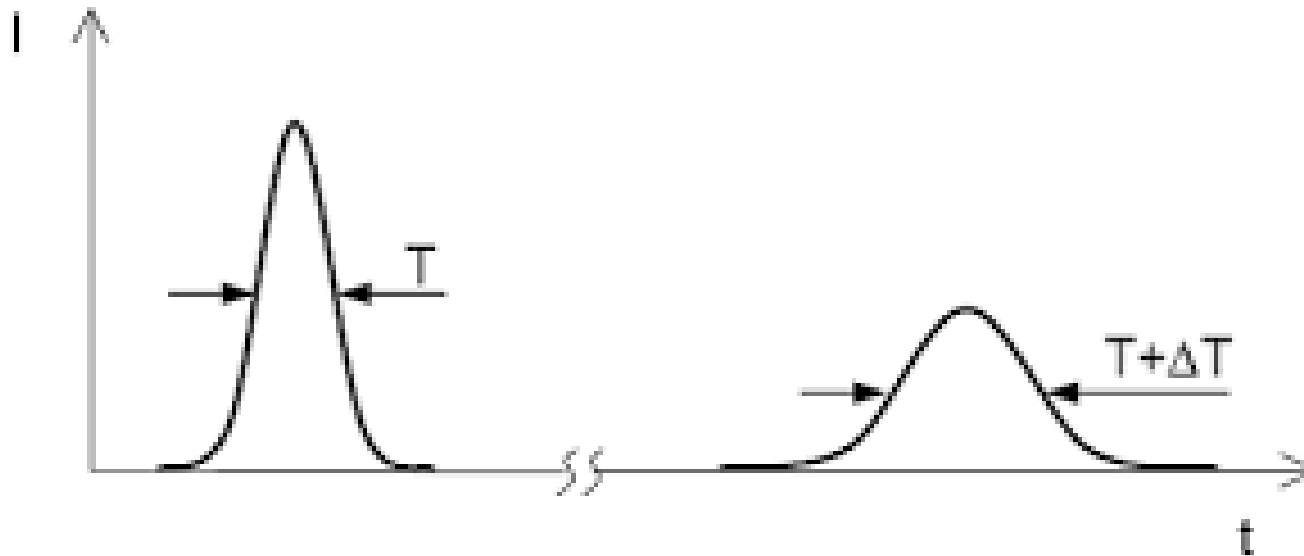
gdzie:

- P_T = moc nadajnika [dBm],
- S_R = czułość odbiornika (fotodetektora) [dBm],
- A = tłumienie włókna światłowodowego [dB/km],
- L_F = długość włókna światłowodowego [km],
- L_C = straty na złączu (złączach) i spawach [dB],
- L_A = inne znane straty transmisji [dB],
- M = margines bezpieczeństwa [dB].

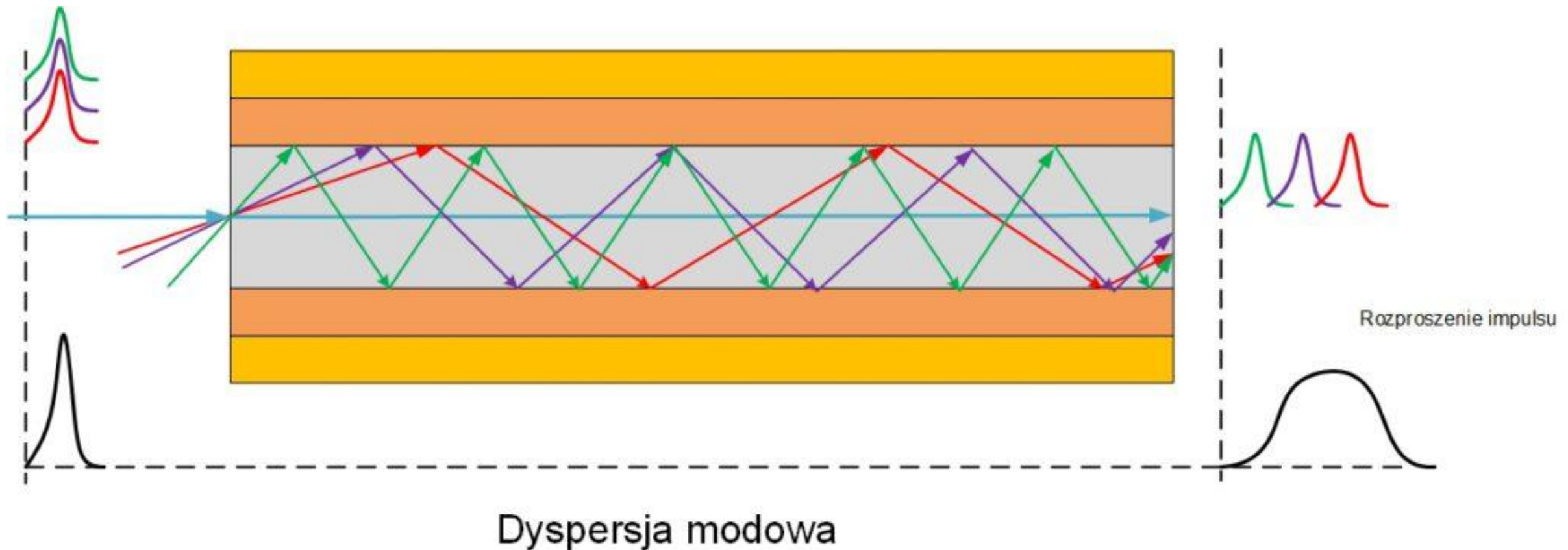
- Dyspersja w światłowodach

Impuls biegnący w każdym falowodzie (więc i w światłowodzie) ulega rozmyciu, co ogranicza maksymalną częstotliwość przesyłanego sygnału:

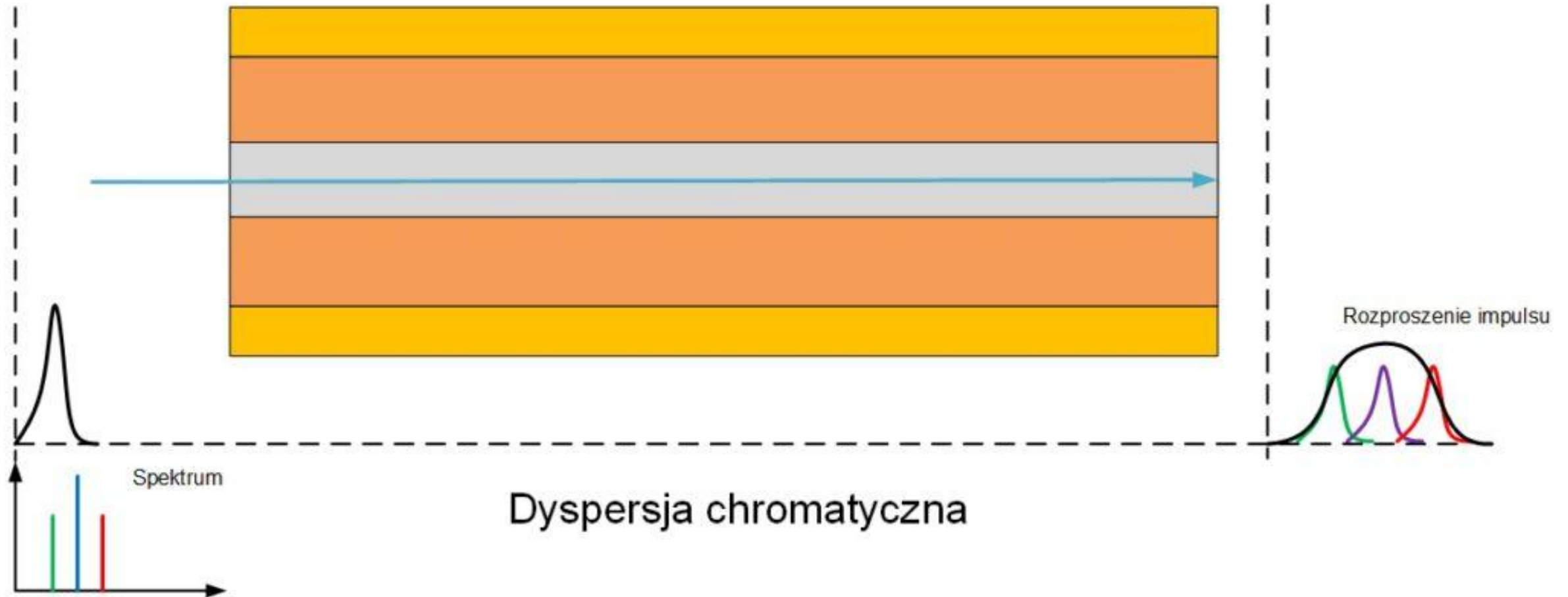
- fale świetlne we włóknie nie mają dokładnie takiej samej długości fali,
- dyspersja ogranicza długość światłowodu, przez który może być przesyłany sygnał o danej częstotliwości.



- Dyspersja modowa – występuje w światłowodach wielomodowych. Impuls światła jest superpozycją wielu modów, z których każdy ma do przebycia inną drogę - aby wyeliminować dyspersję modową używa się włókien gradientowych.



- Dyspersja chromatyczna - wywoływana przez zmianę współczynnika załamania szkła w funkcji długości fali (nie istnieje źródło światła ściśle monochromatyczne).



Światłowody

Podsumowanie - zalety systemów światłowodowych:

- duża pojemność informacyjna,
- małe straty sygnału,
- niewrażliwość na zakłócenia,
- mała waga i wymiary poprzeczne,
- bezpieczeństwo,
- niezawodność.

Światłowody

- Podsumowanie ogólne:
 - prowadzenie światła w światłowodzie następuje dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia;
 - światłowodowi można przyporządkować aperturę numeryczną będącą miarą wartości kąta padania na granicę rdzeń/płaszczka, przy której zaczyna się całkowite wewnętrzne odbicie;
 - nie całe światło ulegające całkowitemu wewnętrznemu odbiciu rozchodzi się w światłowodzie – światłowody mają mody związane z kątami padania światła, dla których zachodzi interferencja wzmacniająca czoła fal poruszających się w tym samym kierunku;

- istnieją następujące rodzaje światłowodów:
 - wielomodowe o skokowej zmianie współczynnika załamania;
 - wielomodowe o gradientowej zmianie współczynnika załamania;
 - jednomodowe o skokowej zmianie współczynnika załamania;
- straty w światłowodzie są powodowane pochłanianiem i rozpraszaniem we włóknie, zgięciami i słabą jakością połączeń;
- bilans mocy wykonuje się w celu określenia wartości sygnału wyjściowego światłowodu z uwzględnieniem wszystkich strat – jest to kluczowe narzędzie projektanta takich systemów;

- impulsy świetlne w światłowodzie ulegają rozmyciu z powodu dyspersji;
- dyspersja o największym znaczeniu występuje w światłowodach wielomodowych – jest ona spowodowana różnicami dróg przebywanych przez poszczególne mody podczas przesyłania światła światłowodem;
- w światłowodach gradientowych problem dyspersji modowej minimalizuje się pozwalając światłu poruszać się tym szybciej, im dalej od środka rdzenia. Taka droga eliminacji dyspersji modowej nie zawsze jest jednak idealna z powodu fluktuacji parametrów powstającej w procesie produkcyjnym;
- stosowanie światłowodów jednomodowych rozwiązuje problem dyspersji modowej, ale występuje też dyspersja materiałowa, której przyczyną jest różna prędkość rozchodzenia się światła o różnych długościach fal.

Dziękuję za uwagę