



Światłowody



Plan prezentacji

- ▶ Współczynnik załamania
- ▶ Całkowite wewnętrzne odbicie
- ▶ Co to jest światłowód i jak działa?
- ▶ Materiały na światłowody
- ▶ Zjawiska zachodzące w światłowodach i ich pomiary
- ▶ Światłowody „specjalne”
- ▶ Podsumowanie

Trochę historii...

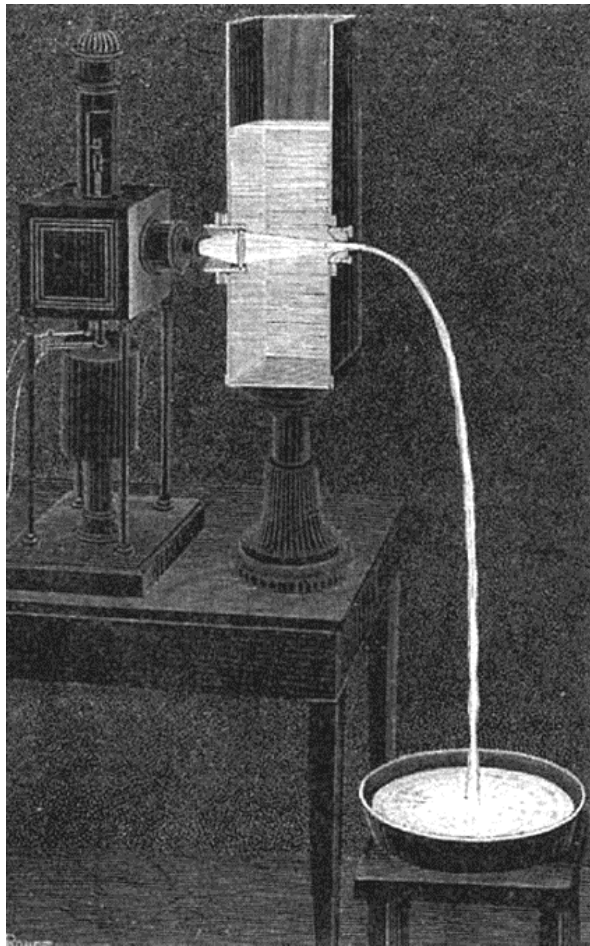
ŚWIAT

- ▶ 1870 r. – Tyndall – całkowite wewnętrzne odbicie
- ▶ 1910 r. – Hondors, Debye – teoria kołowego światłowodu skokowego
- ▶ 1920 r. – światłowody z płaszczem powietrznym
- ▶ 1928 r. – Baird – koncepcja płaszczka dielektrycznego
- ▶ 1950 r. – światłowód z płaszczem dielektrycznym do przesyłania obrazu
- ▶ 1962 r. – Yeh – teoria światłowodu eliptycznego
- ▶ 1966 r. – Kao, Hockham – transmisja sygnałów (1000 dB/km)
- ▶ 1970 r. – Corning Glass – pierwszy światłowód wielomodowy – 20 dB/km
- ▶ 1979 r. – Japonia – światłowód jednomodowy – 0.2 dB/km @ 1550 nm
- ▶ 2006 r. – światłowód – główne medium transmisyjne w telekomunikacji

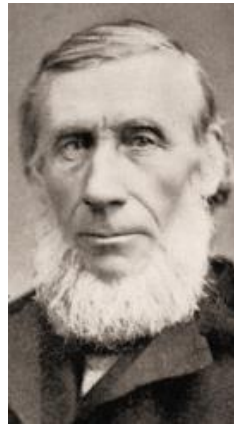
POLSKA

- ▶ 1971 r. – pierwsze opublikowane informacje nt. światłowodów
- ▶ 1976 r. – pierwsza poważniejsza publikacja nt. światłowodów
- ▶ 1982 r. – pierwsze światłowody wielopłaszczkowe o małej dyspersji

Trochę historii...



Jean-Daniel
Colladon
1841



John Tyndall
1870

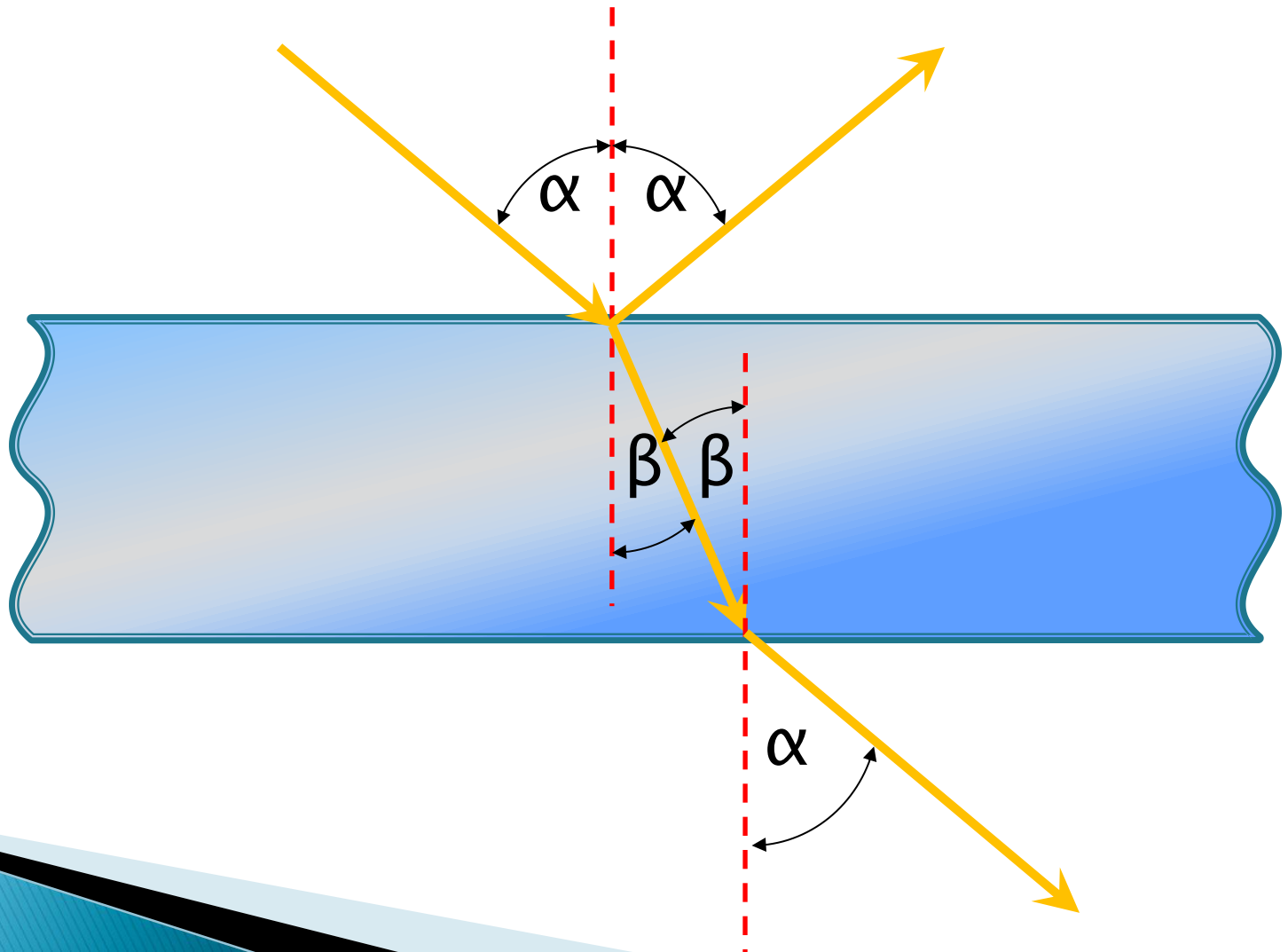


Współczynnik załamania

$n_1 = 1.0$

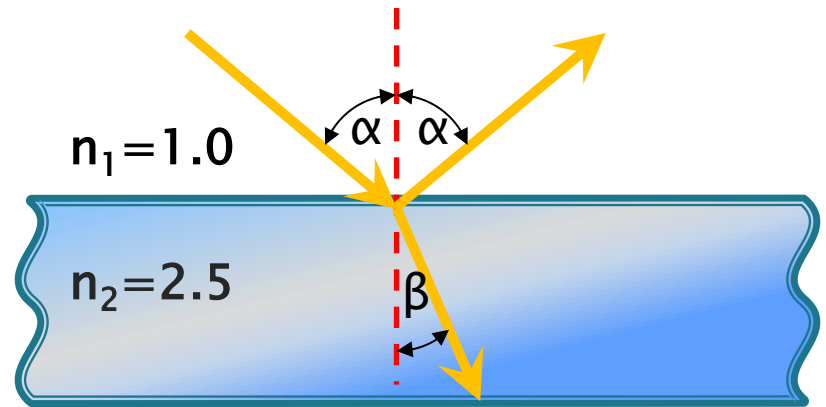
$n_2 = 2.5$

$n_3 = 1.0$



Współczynnik załamania

$$n_1 < n_2$$
$$\alpha > \beta$$



$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

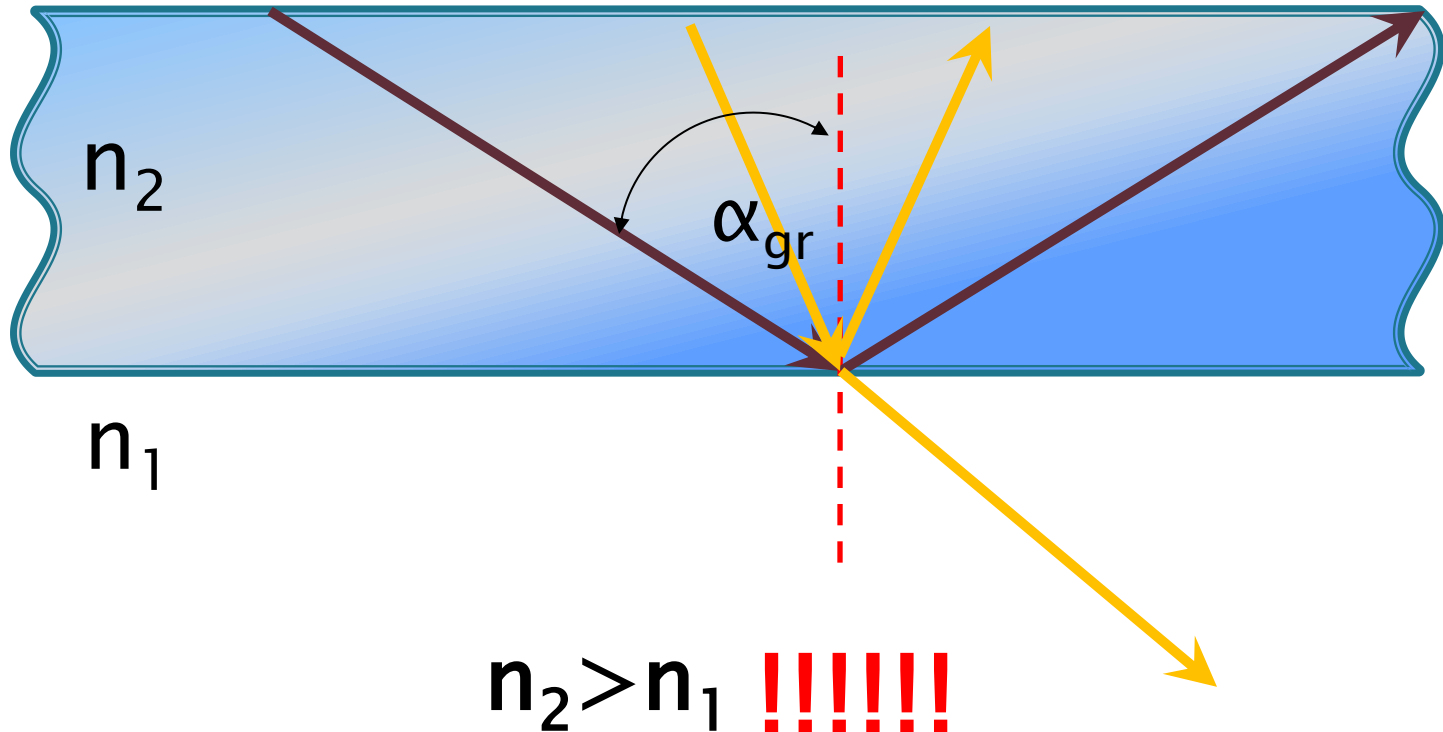
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Prawo Snella (Snelliusa) – XVII w.

Z zasady Fermata wynika...

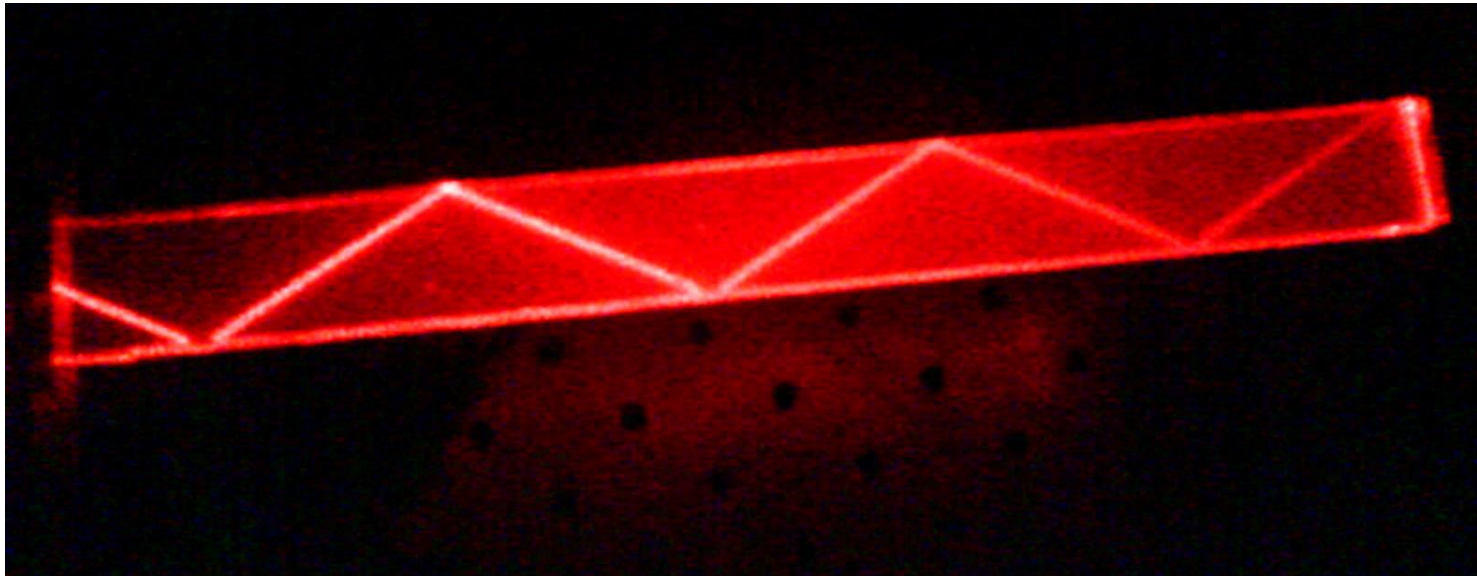
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

Całkowite wewnętrzne odbicie Total Internal Reflection (TIR)



$$\sin \alpha_{gr} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow \alpha_{gr} = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$$

Całkowite wewnętrzne odbicie



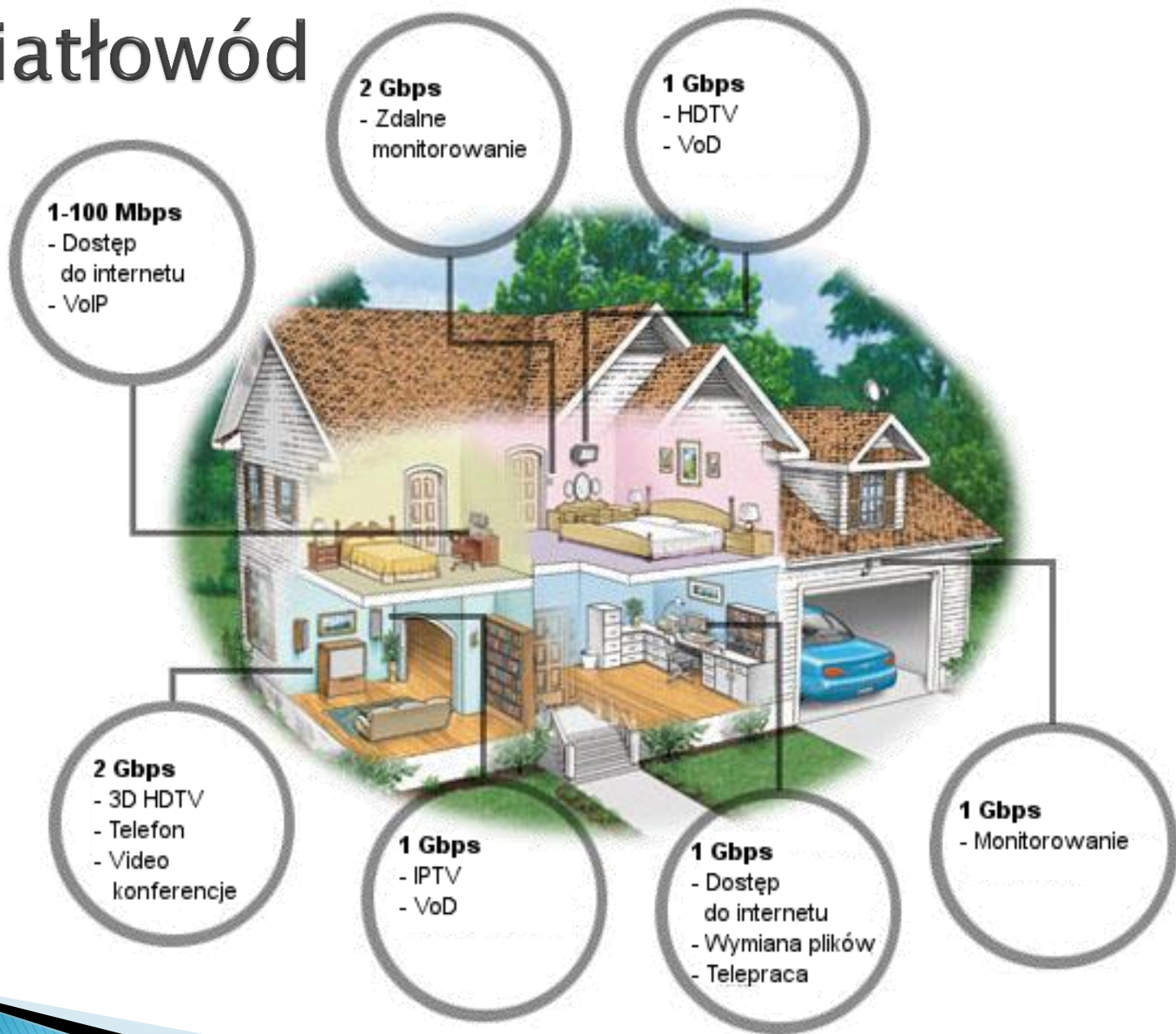
1 odbicie od powierzchni metalu straty $\sim 1\%$ mocy, odbija się 99% .
100 kolejnych odbić pozostawia zaledwie 36% początkowej mocy

1 odbicie na powierzchni dielektrycznej (TIR) traci zaledwie ok. 0.00001% mocy, odbija się 99.99999% . 100 kolejnych odbić pozostawia 99.99900000495% początkowej mocy.

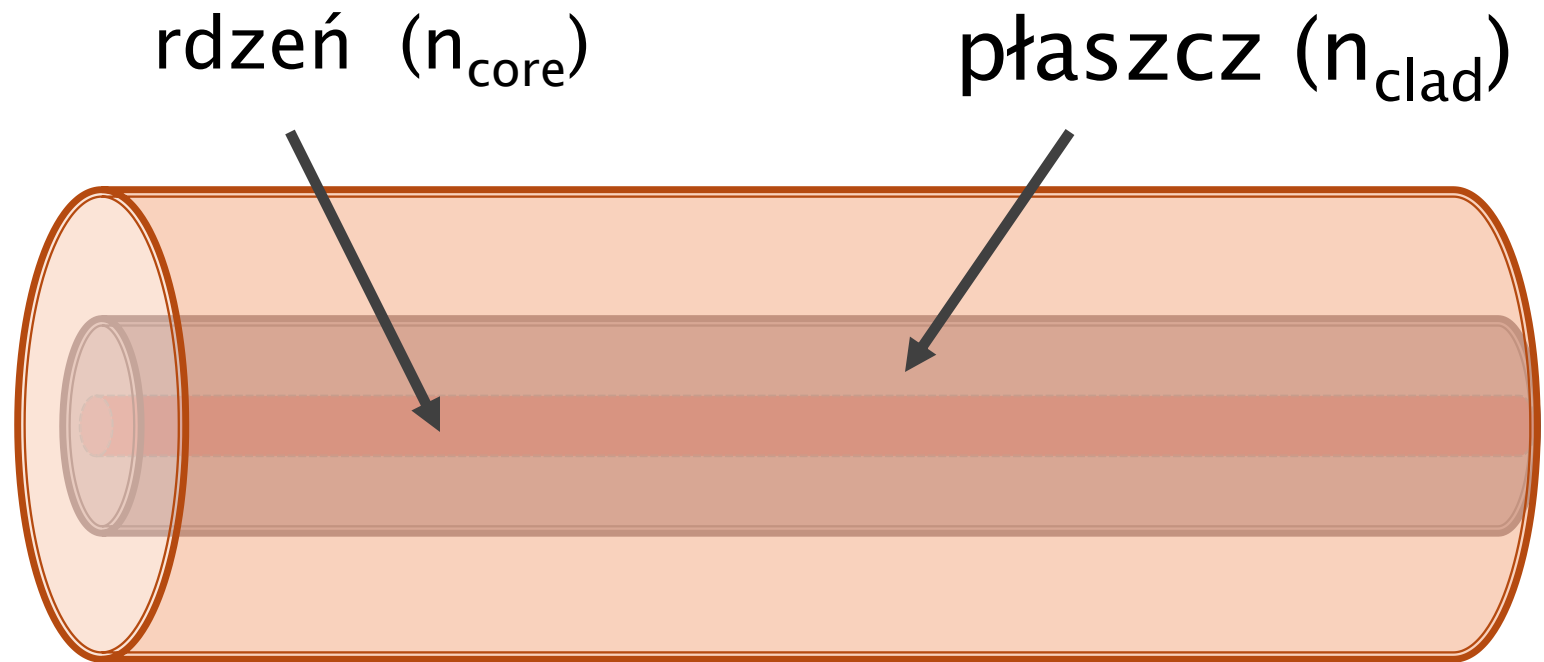
Światłowód



Światłowód

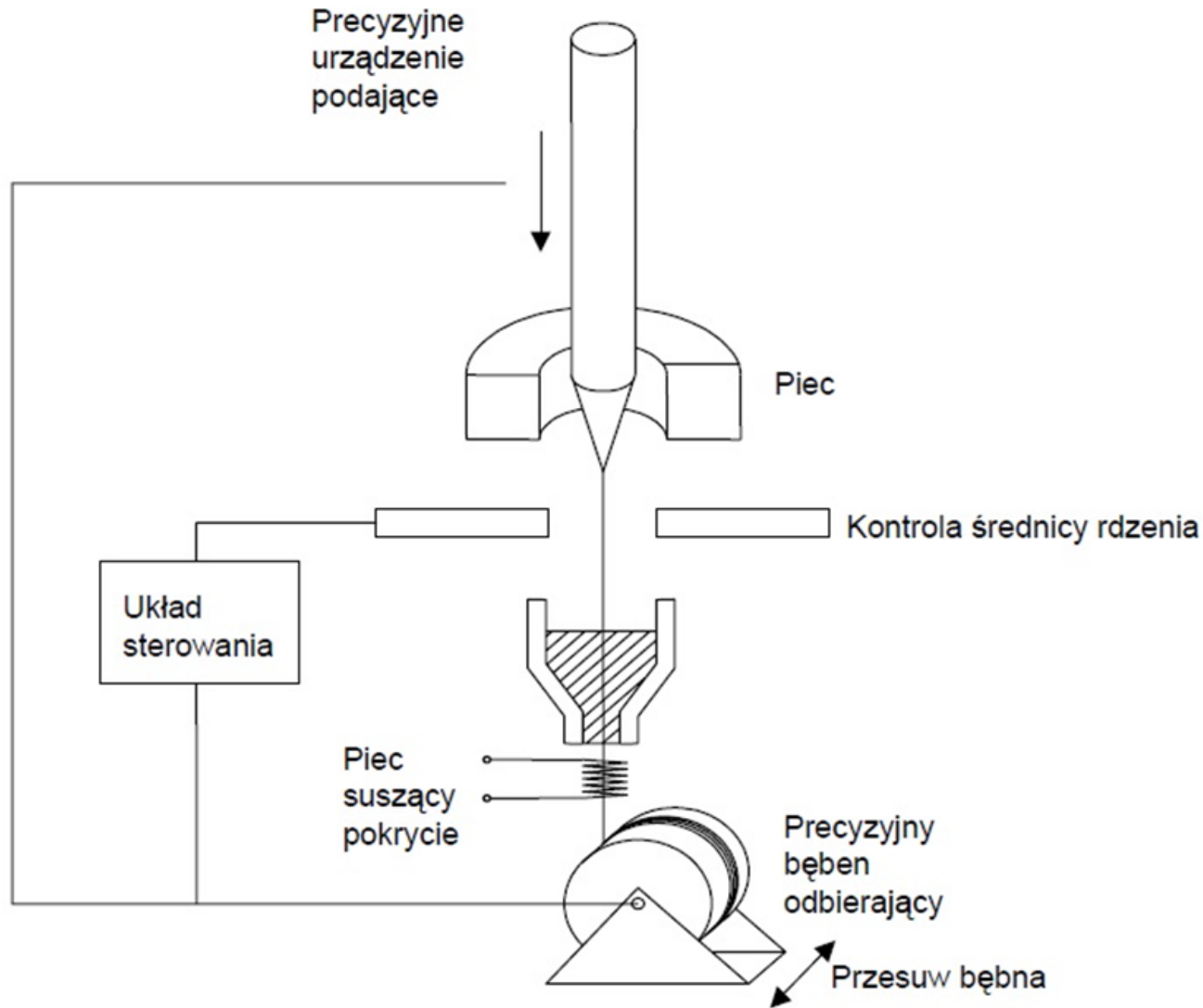


Światłowód



$$n_{\text{core}} > n_{\text{clad}}$$

Wytwarzanie światłowodów



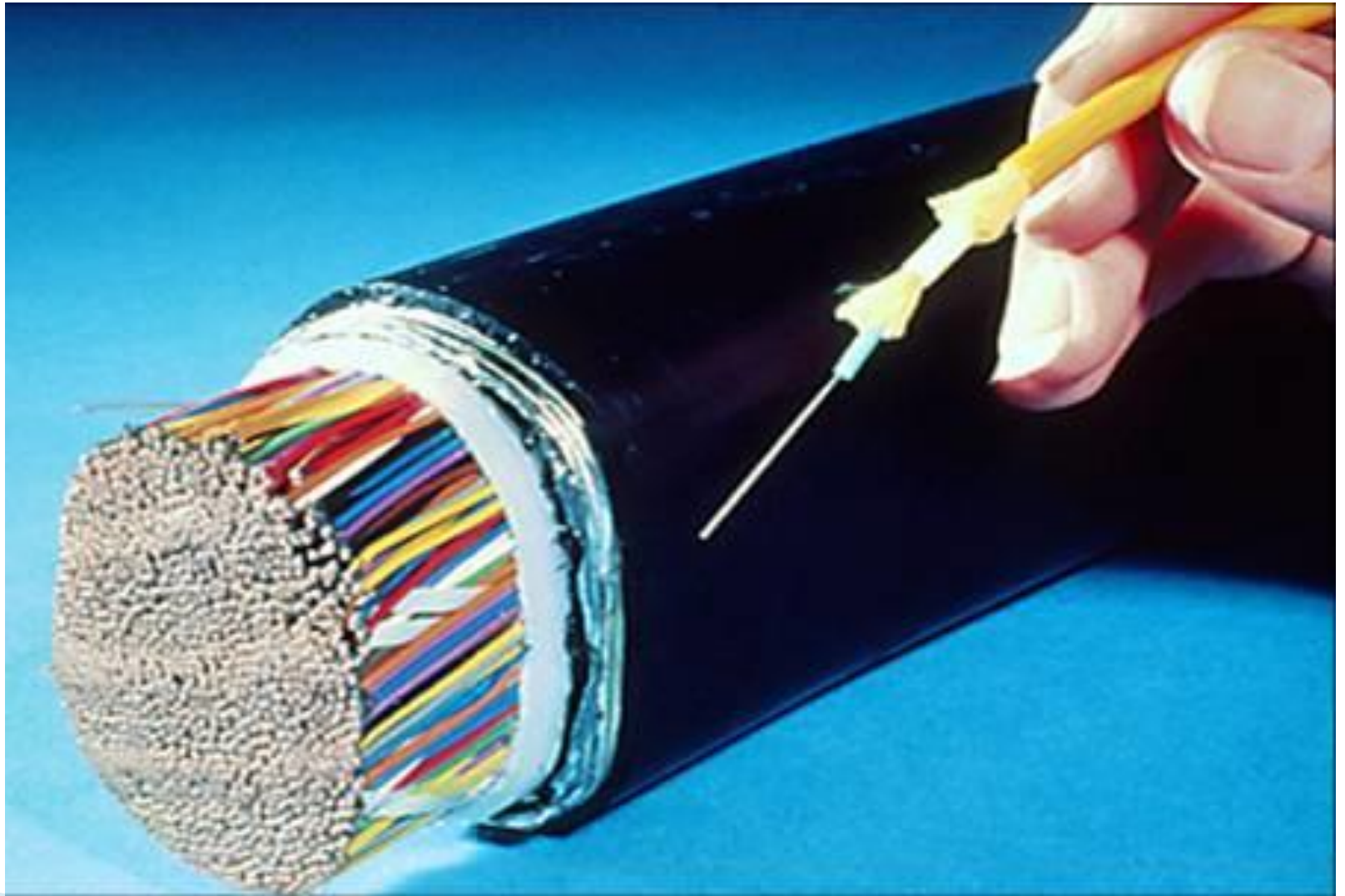
Światłowód

Black Box Explains...

Fiber optic cable construction.



Światłowód



Złącza światłowodowe



ST



FC



LC

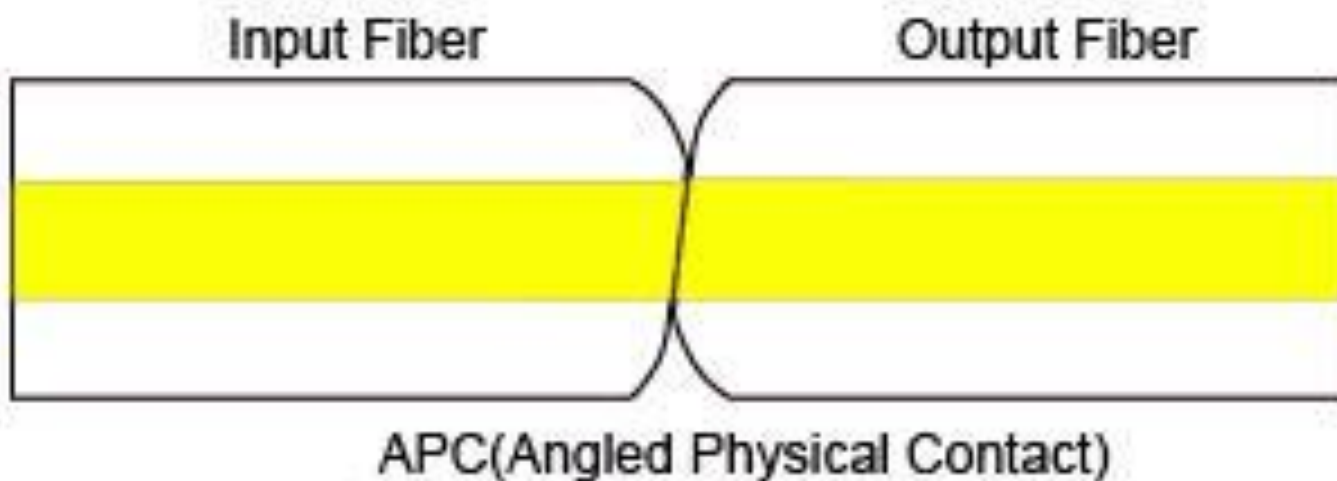
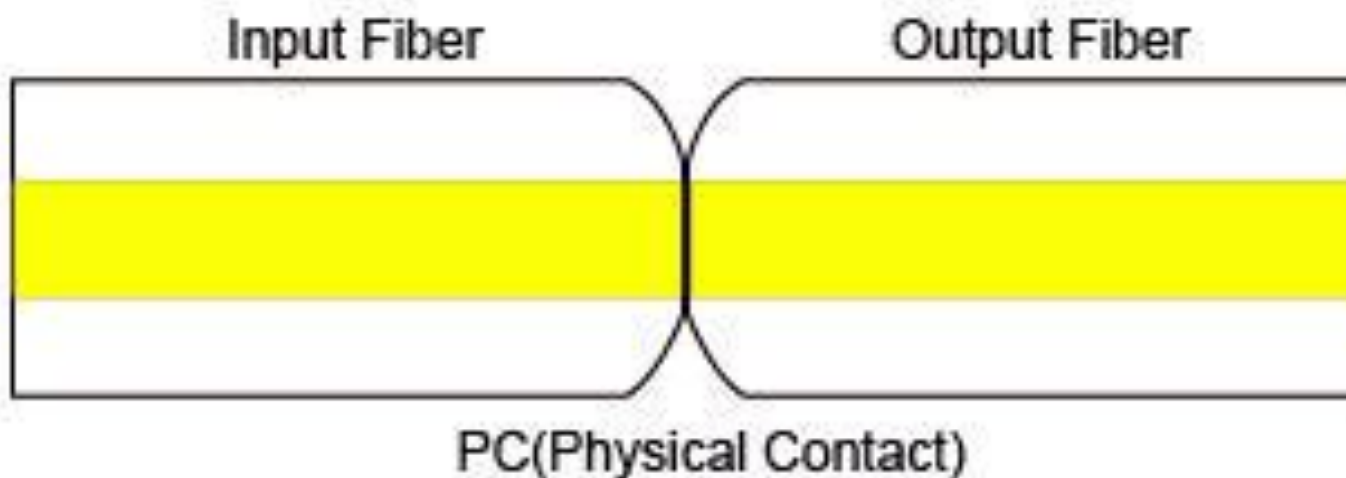


SMA



SC

Złącza światłowodowe



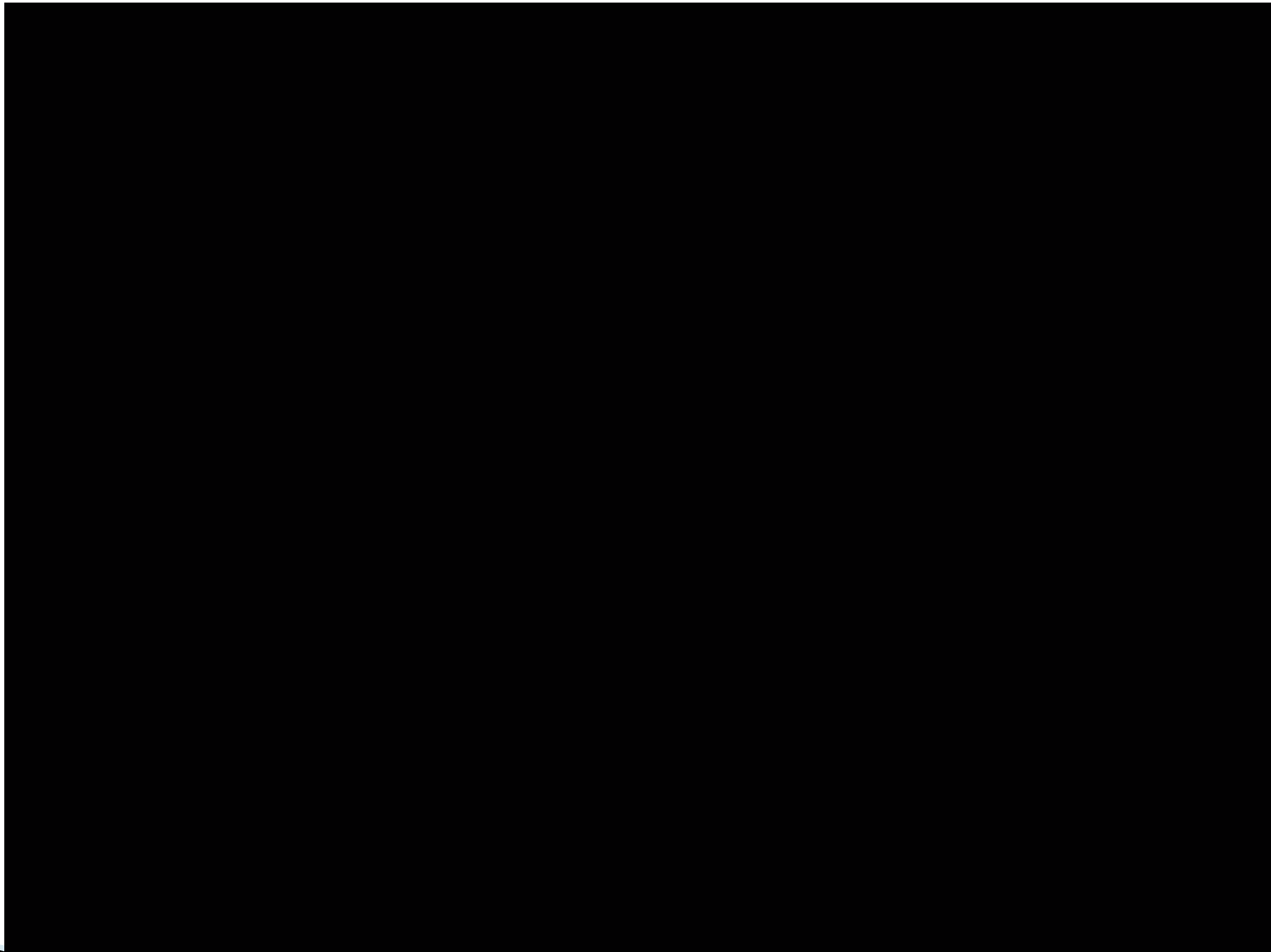
Łączenie światłowodów



Łączenie światłowodów



Łączenie światłowodów



Mody światłowodowe

Równania Maxwella...

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} +$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

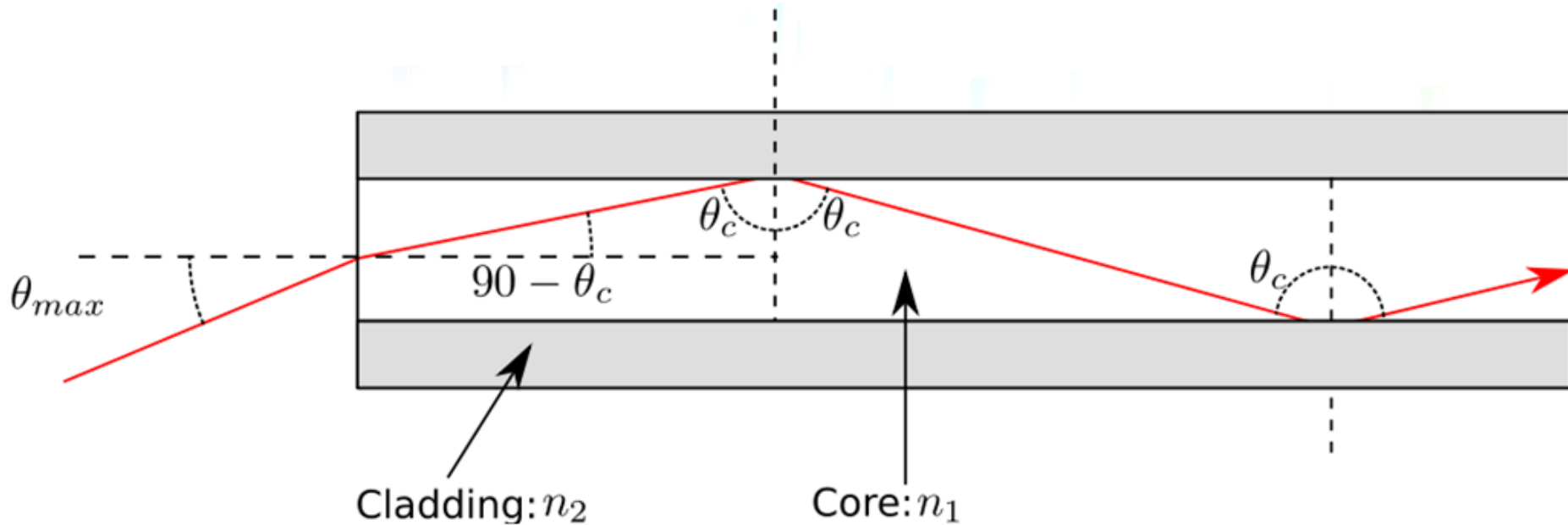
$$E = E_0(x, y)e^{-j\beta z + j\omega t}$$

$$H = H_0(x, y)e^{-j\beta z + j\omega t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

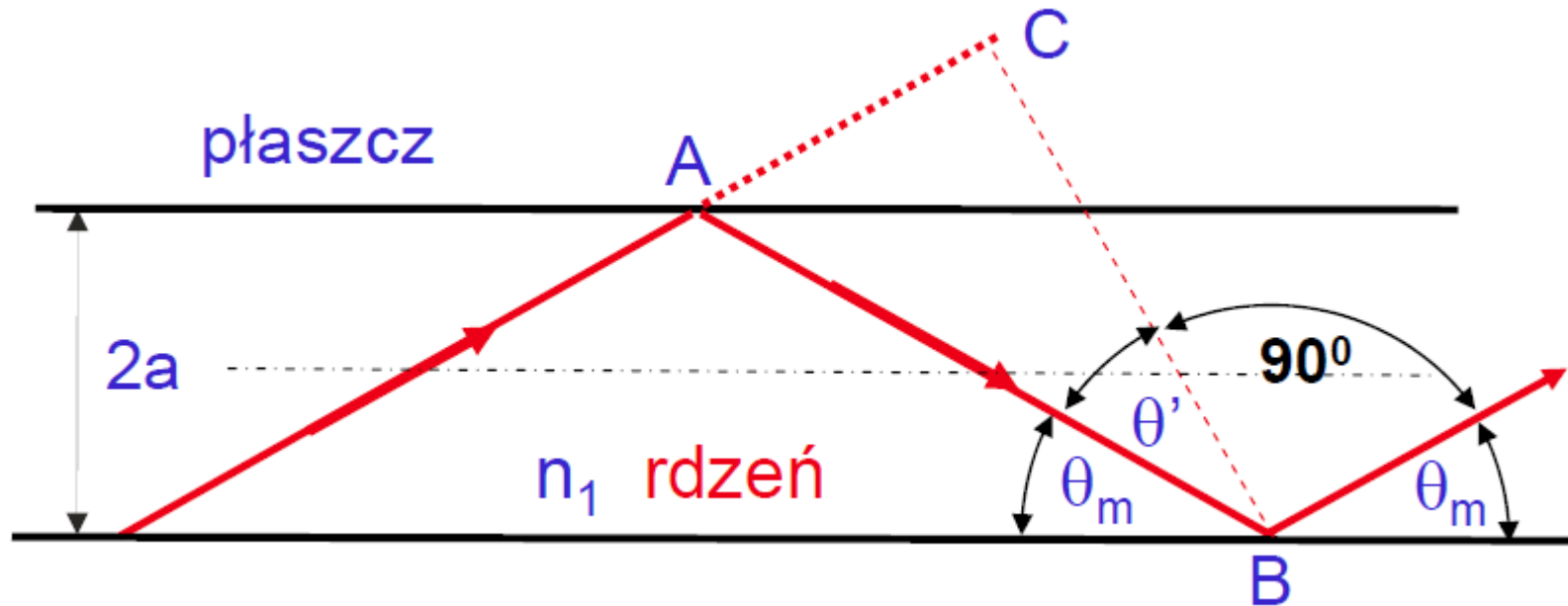
$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

Mody światłowodowe



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

Mody światłowodowe



- ▶ $n_1(AB-AC) = m\lambda$ – warunek zgodności faz
- ▶ $\sin\theta_m = 2a/AB$

$$4a \cdot n_1 \sin\theta_m = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Mody światłowodowe

Częstotliwość znormalizowana

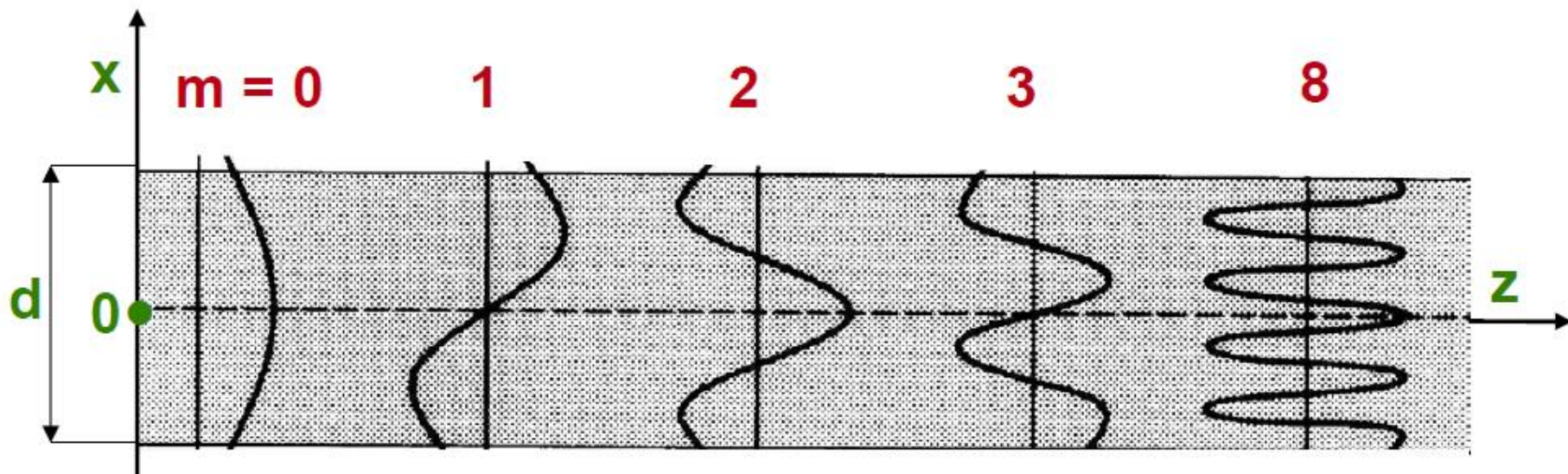
$$V = \frac{2a\pi}{\lambda} NA$$

Światłowod jednomodowy gdy:

$$0 < V < 2.405$$

$$NA=0.11, \lambda=1.55 \mu\text{m} \rightarrow 2a < 10 \mu\text{m}$$

Mody światłowodowe



Światłowód

9/125 μm

50/125 μm

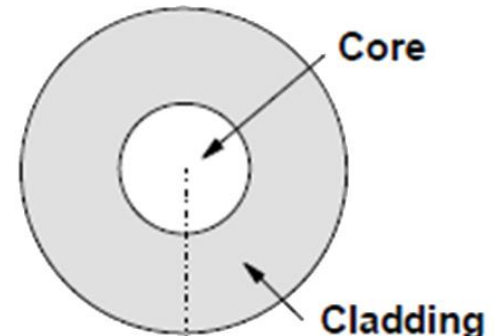
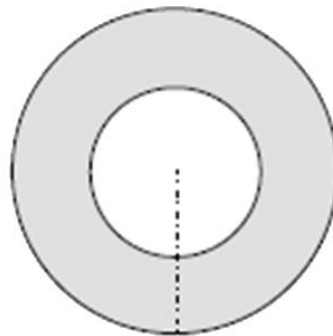
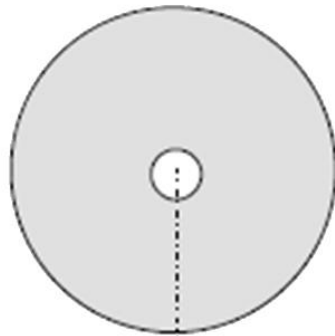
62.5/125 μm

Single-mode

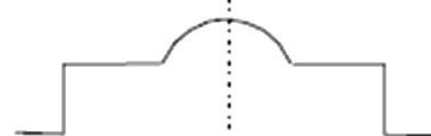
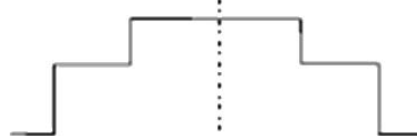
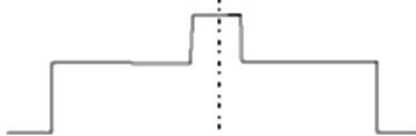
Multi-mode
Step-Index

Multimode
Graded-Index

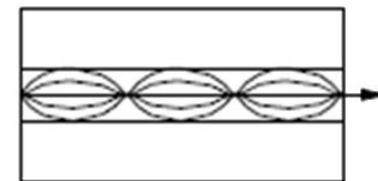
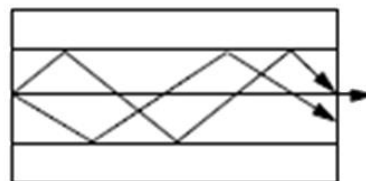
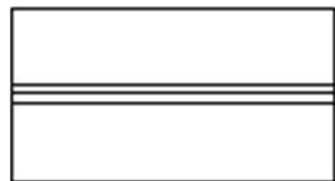
Cross
Section



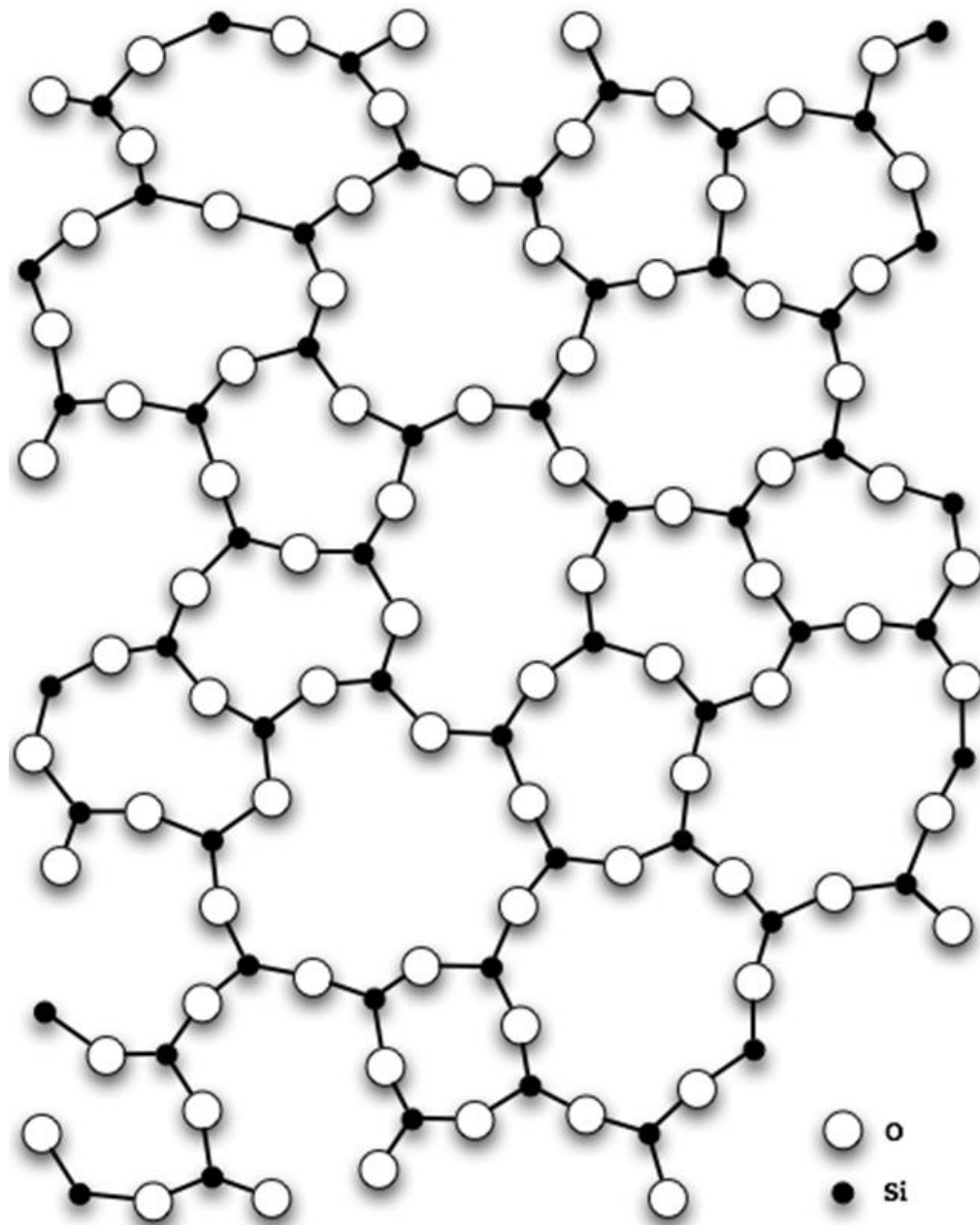
Refractive
Index
Profile



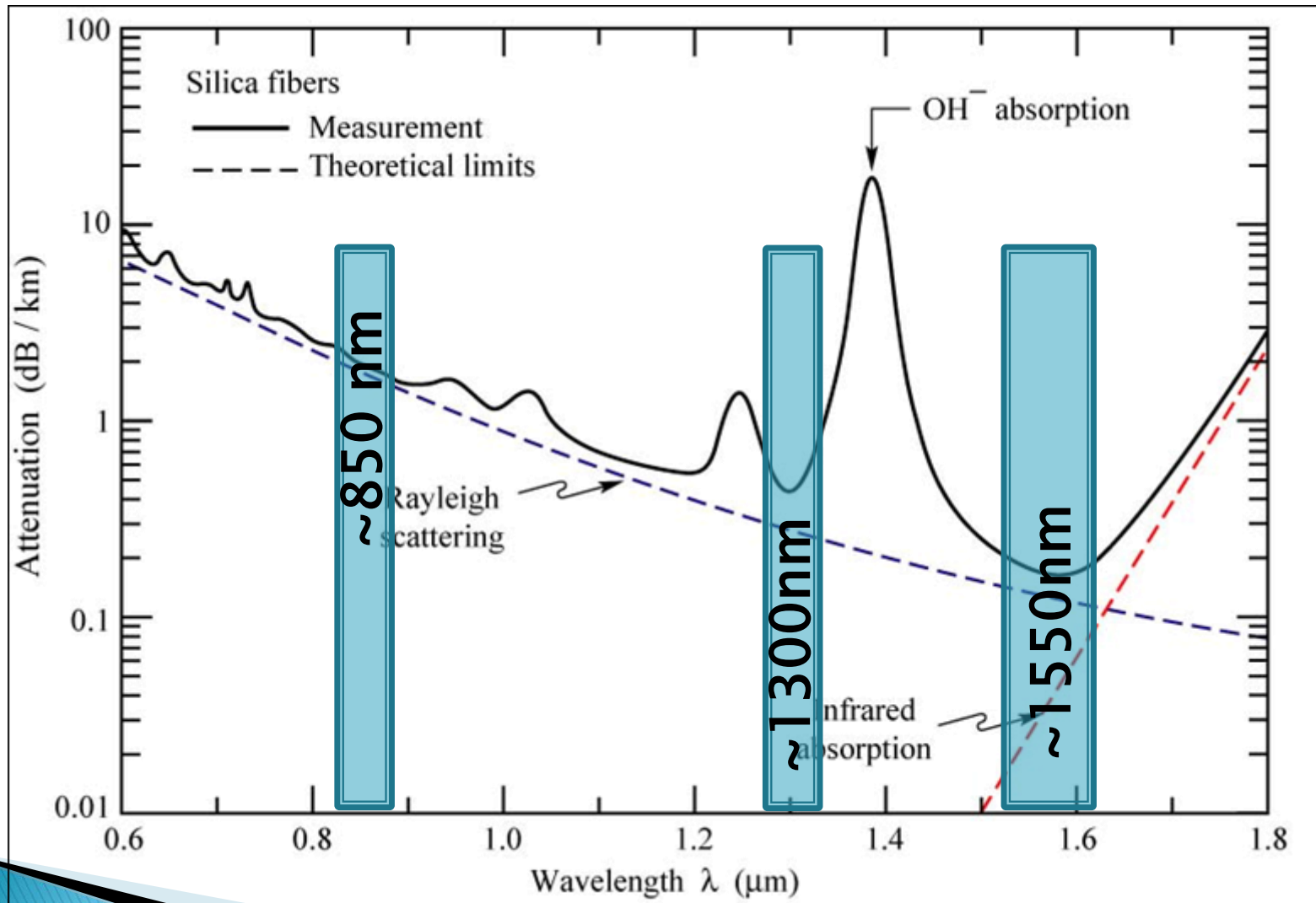
Light
Path



Tłumienie



Tłumienie

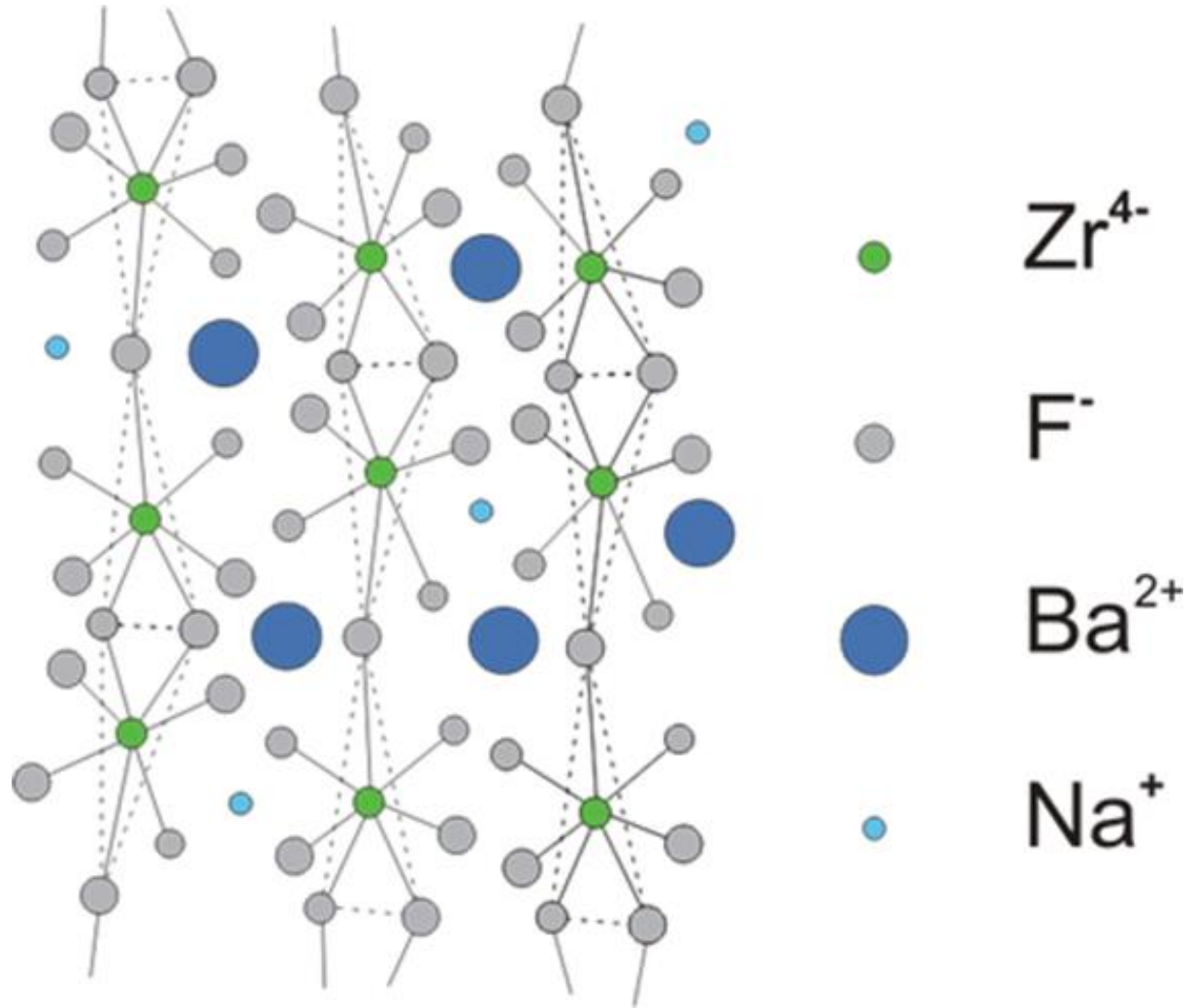


Tłumienie

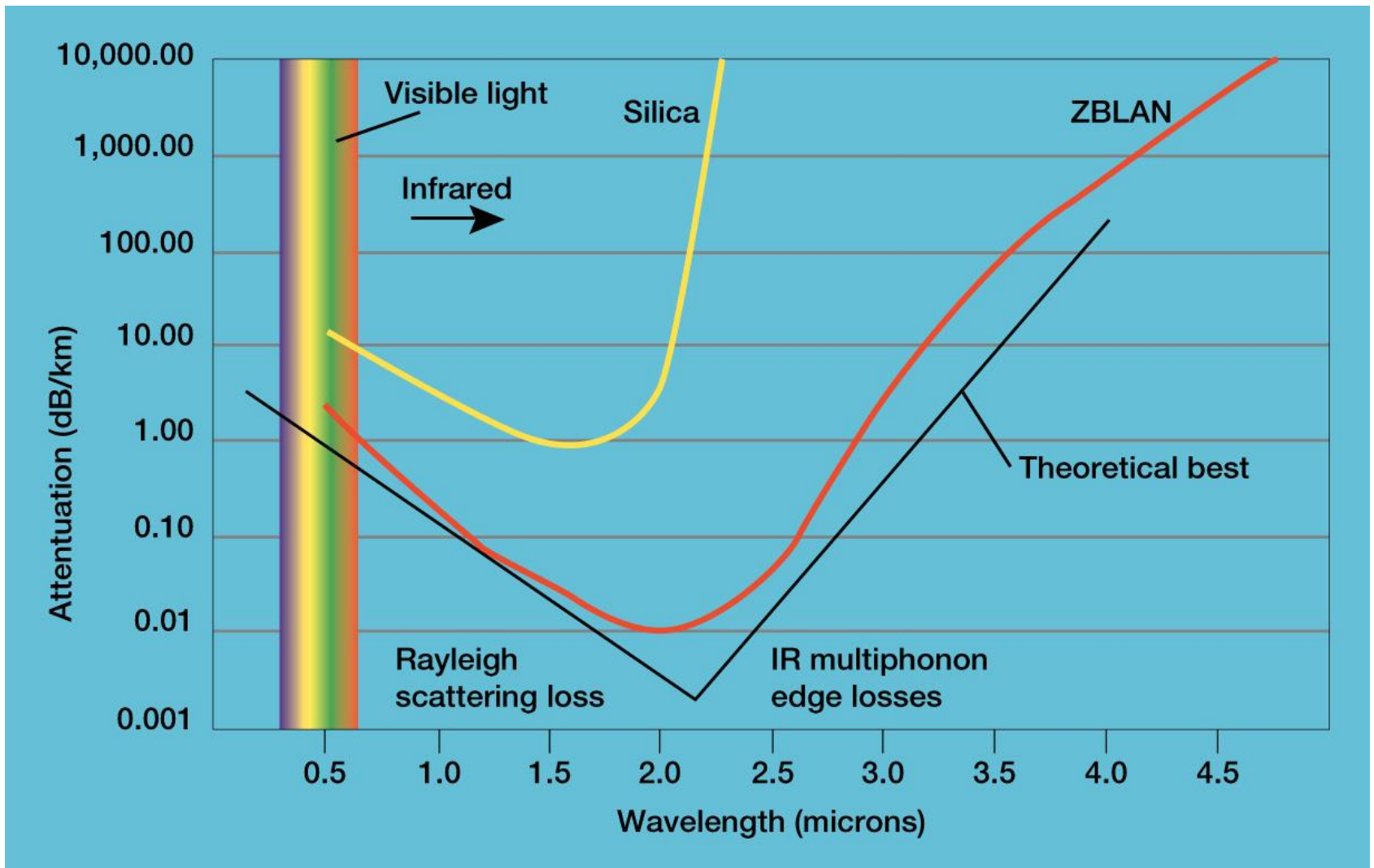
ZBLAN

ZrF₄, BaF₂, LaF₃, AlF₃, NaF

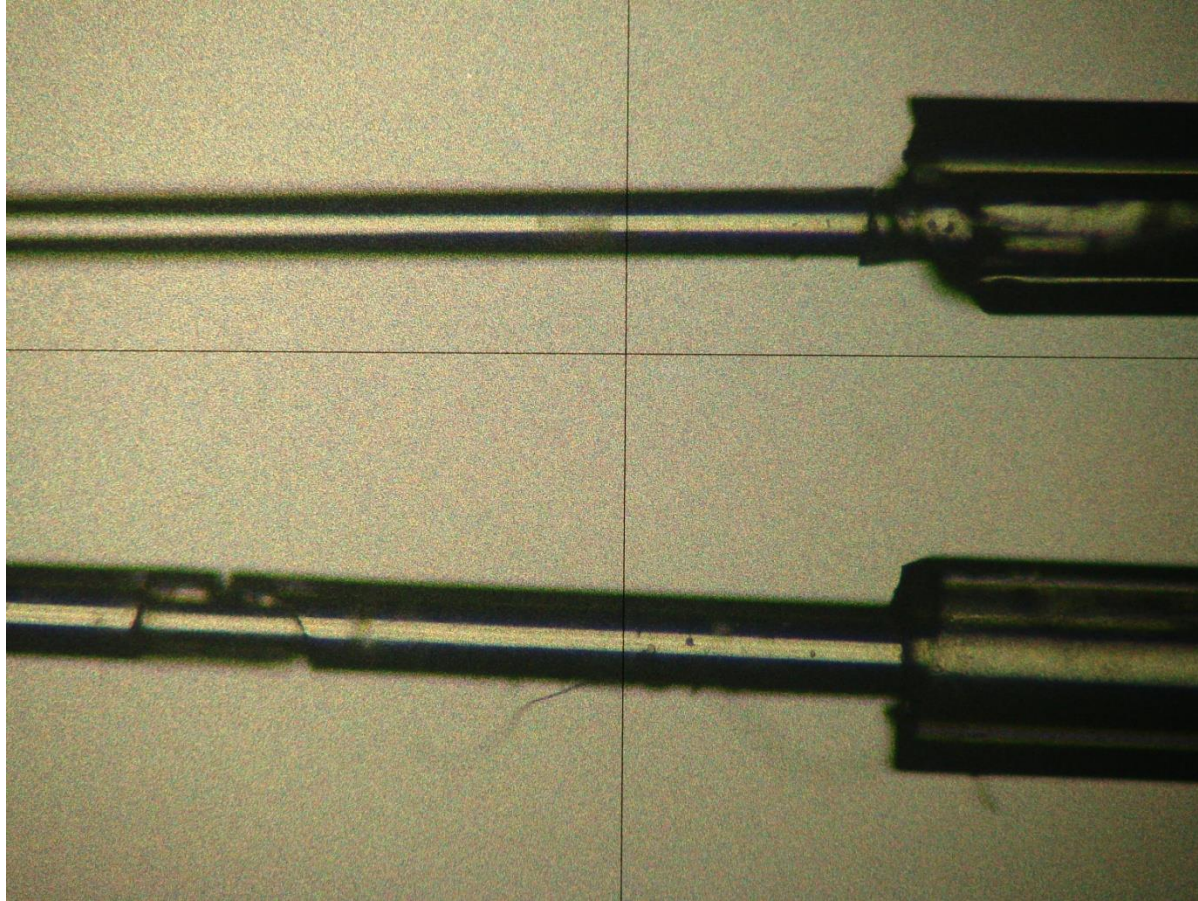
53 : 20 : 4 : 3 : 20



Tłumienie



Tłumienie



Światłowody polimerowe

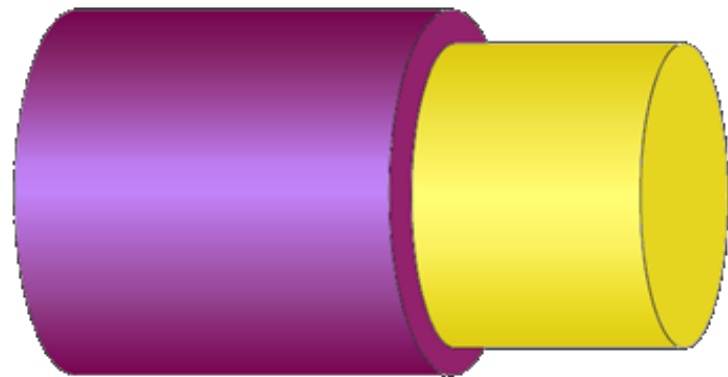
POF

Polymer Optical Fiber

PMMA (Polymethylmethacrylate)
PMMA-d8 (Complete deuterated PMMA)
PS (Polystyrole)
CYTOP[®] (perfluorinated polymer, aka PF)
TPX (Polymethylpentene)
SAN (copolymer – styrene acrylonitrile)
CR-39 (Diethyleneglycol bisallyl carbonate)

Dla wysokich temperatur:

PC (Polycarbonate)
PC(AF) (Partially fluorinated polycarbonate)
ARTON [Fujitsu]
silicon elastomer

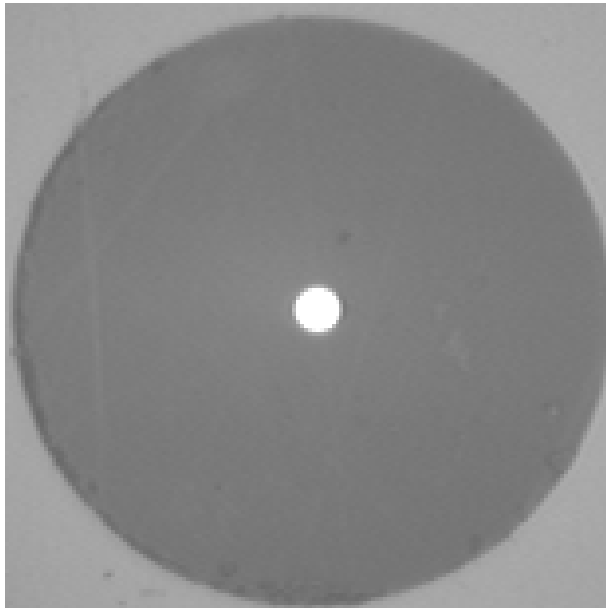


∅ typical 1 mm

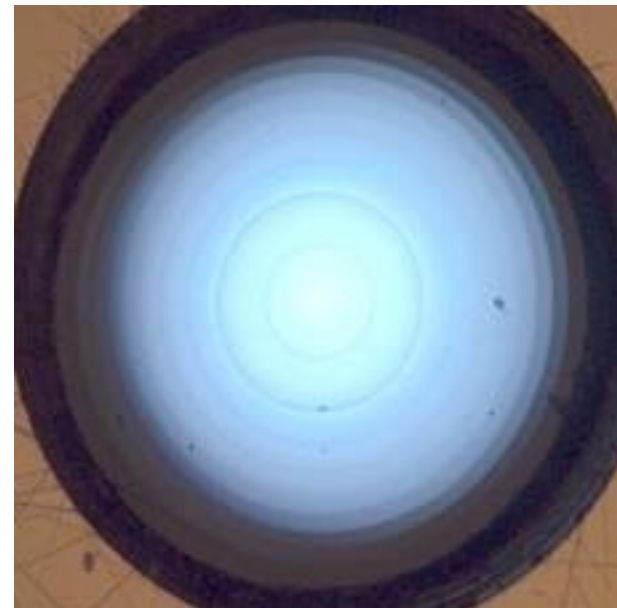
$n = 1.492$

$n = 1.412$

Światłowody polimerowe

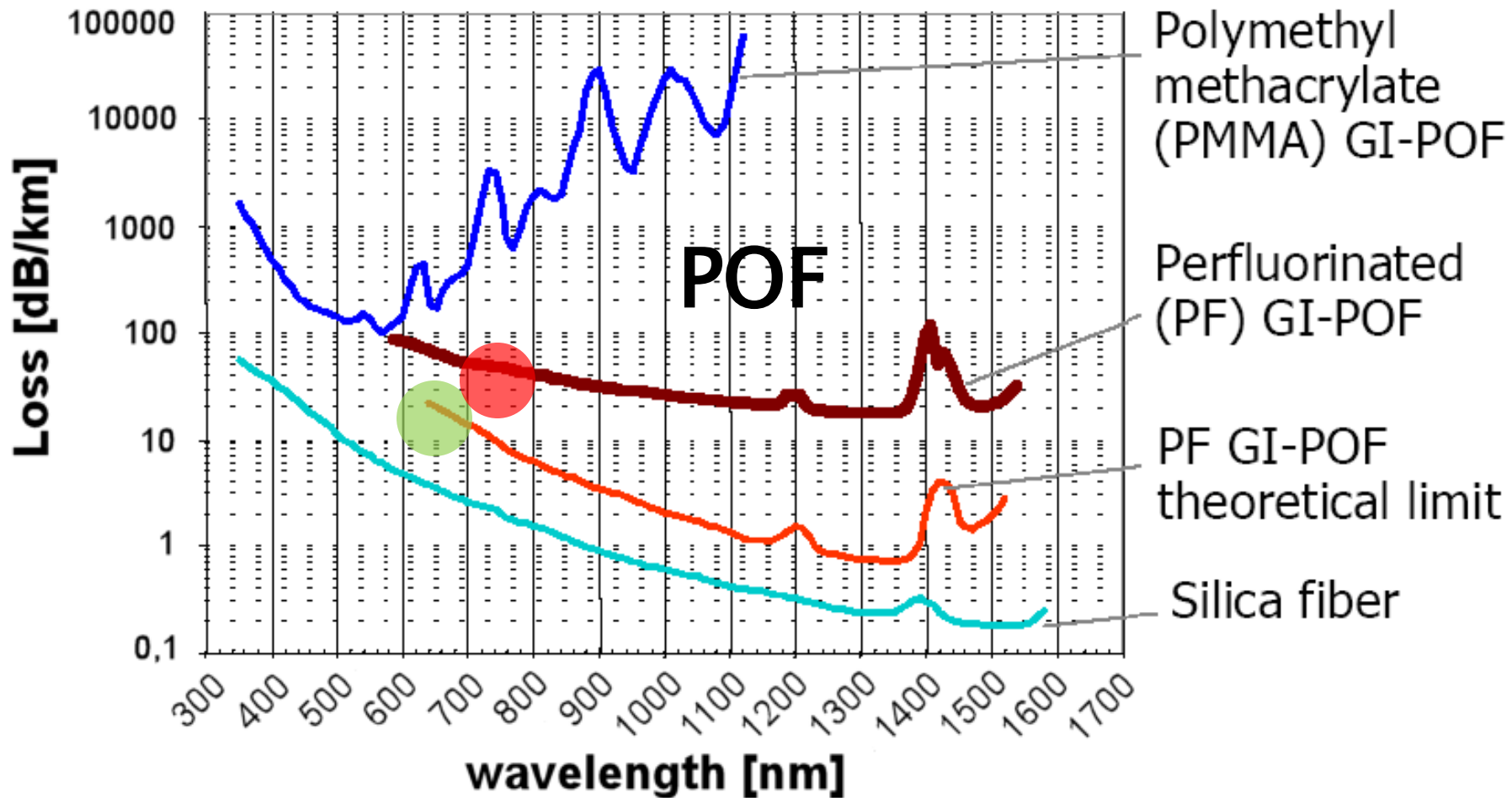


klasyczne włókno
kwarcowe 9/125 μm



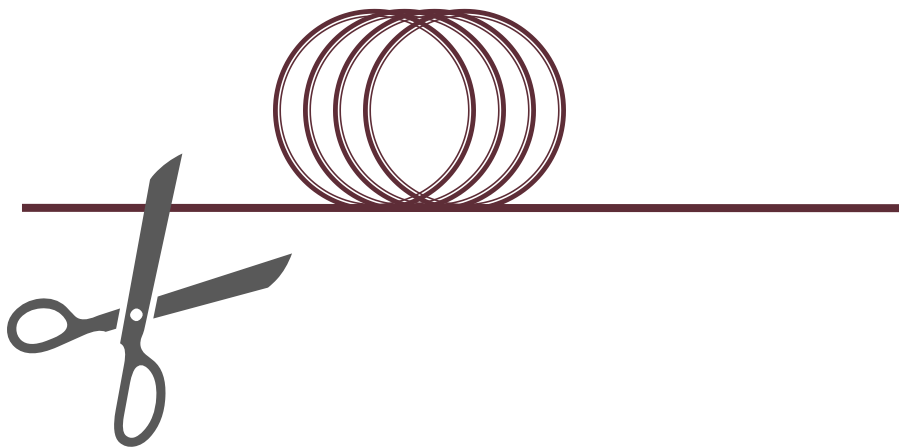
klasyczne włókno
plastikowe 980/1000
 μm

Tłumienie



Jak mierzyć tłumienie?

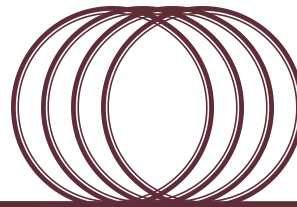
- ▶ Metoda odcięcia



$$A = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Jak mierzyć tłumienie?

- ▶ Metoda pomiaru wstecznego



- ▶ Rozproszenie Rayleigha
- ▶ Odbicie od złączy
- ▶ Straty na spawach, zgięciach

OTDR

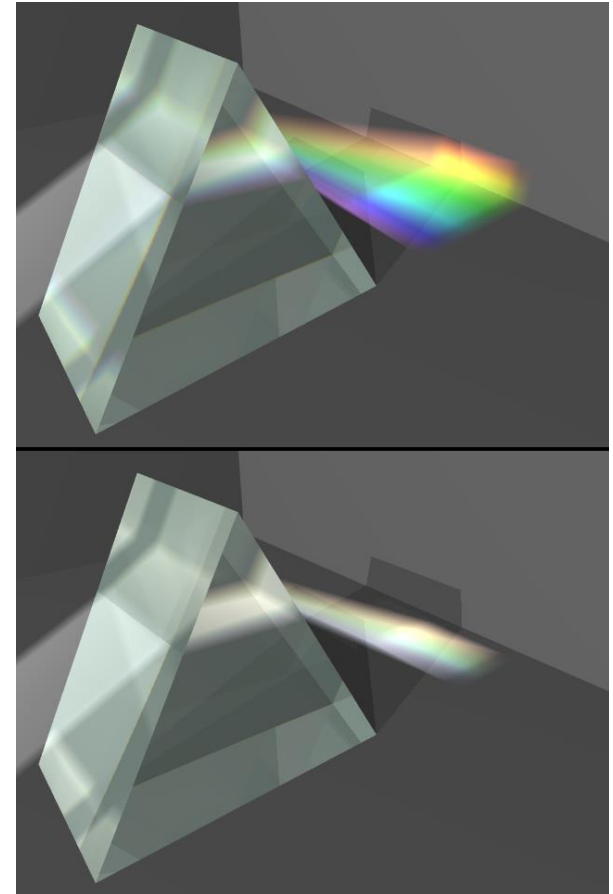
Optical Time Domain Reflectometer wykorzystuje zjawisko rozpraszania (Rayleigha) światła na cząsteczkach szkła, z którego zbudowany jest światłowód, oraz na innych elementach toru optycznego (złączach, spawach) i defektach struktury (domieszki, pęknięcia).



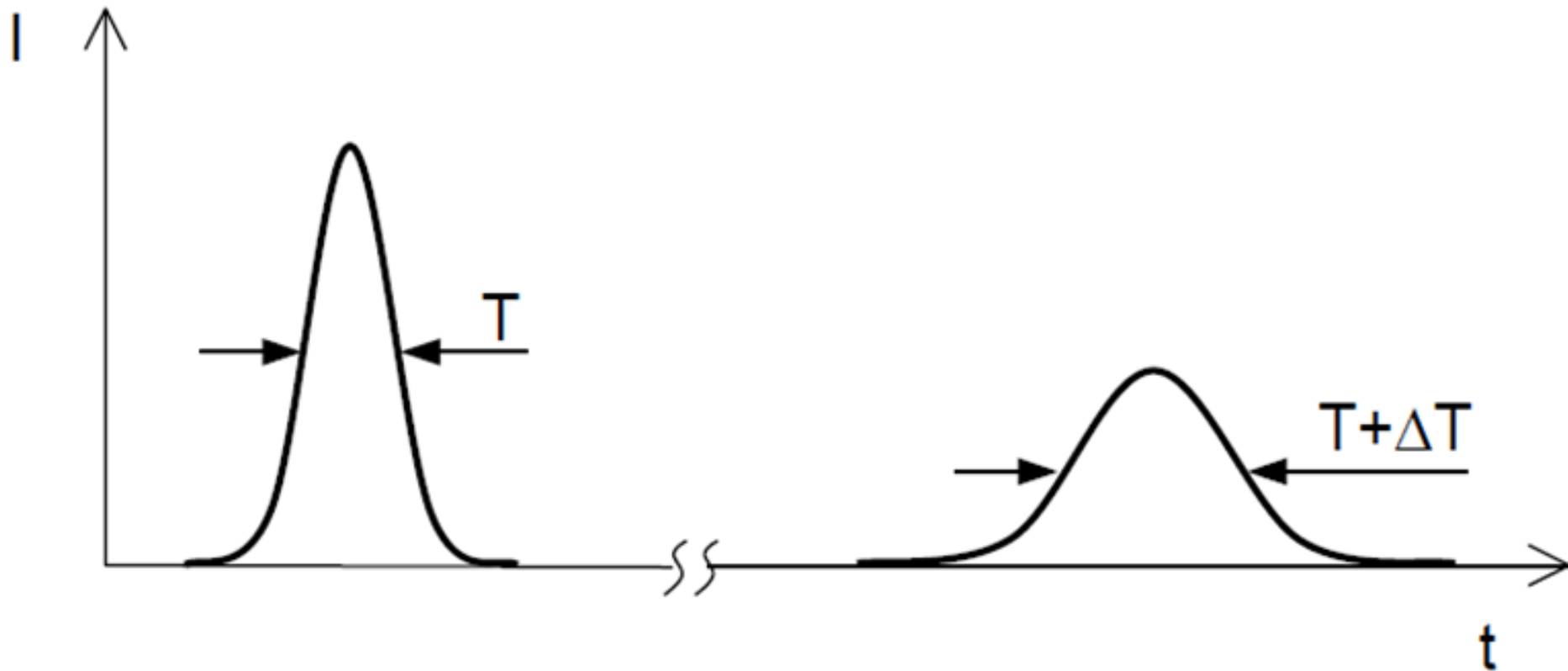
Dyspersja

Dyspersja to zjawisko, w którym prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od jej częstotliwości (długości fali)

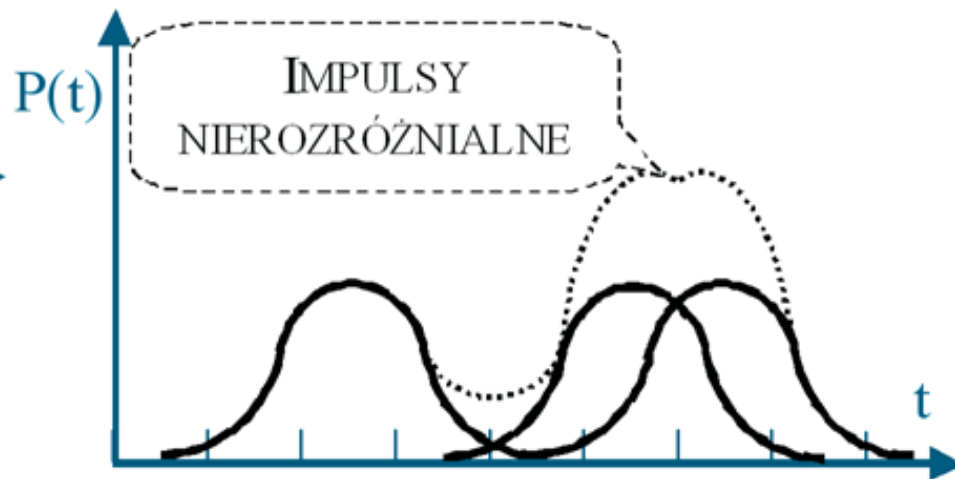
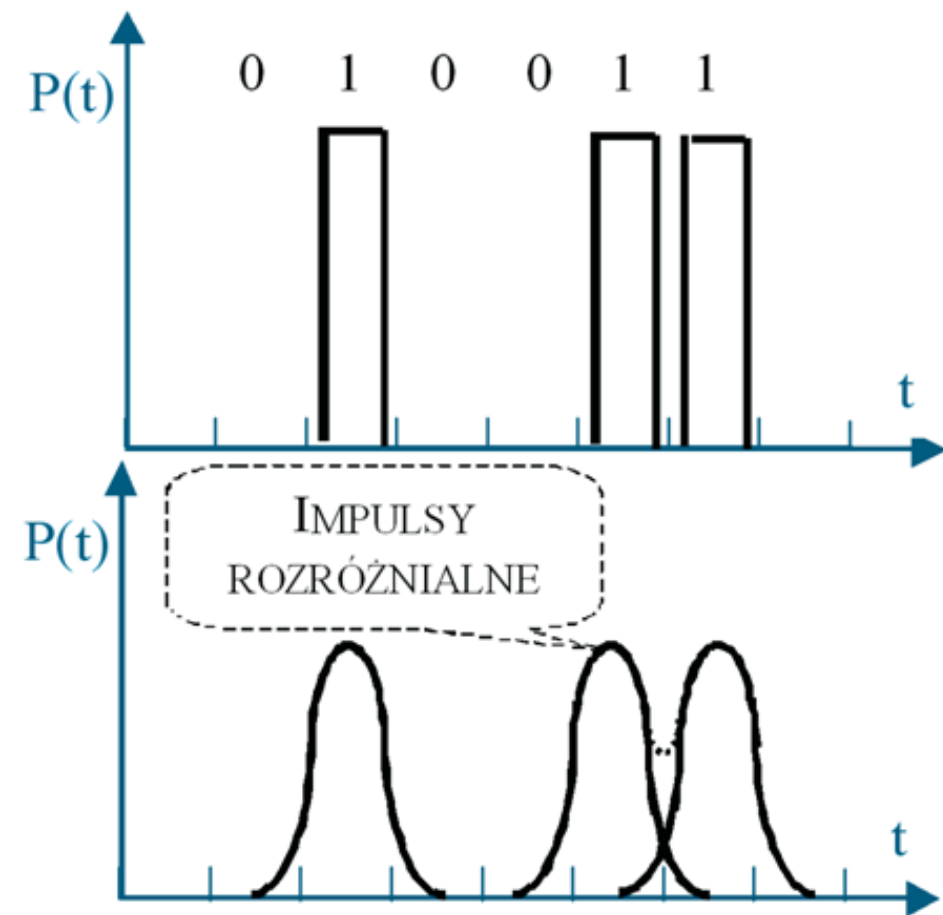
W telekomunikacji terminu dyspersja używa się opisując procesy, w których sygnał niesiony przez falę elektromagnetyczną rozchodzącą się w ośrodku ulega degradacji. Degradacja ta występuje, ponieważ różne składowe fali (różniące się częstotliwościami lub wektorami falowymi) rozchodzą się z różnymi szybkościami.



Dyspersja



Dyspersja



Dyspersja

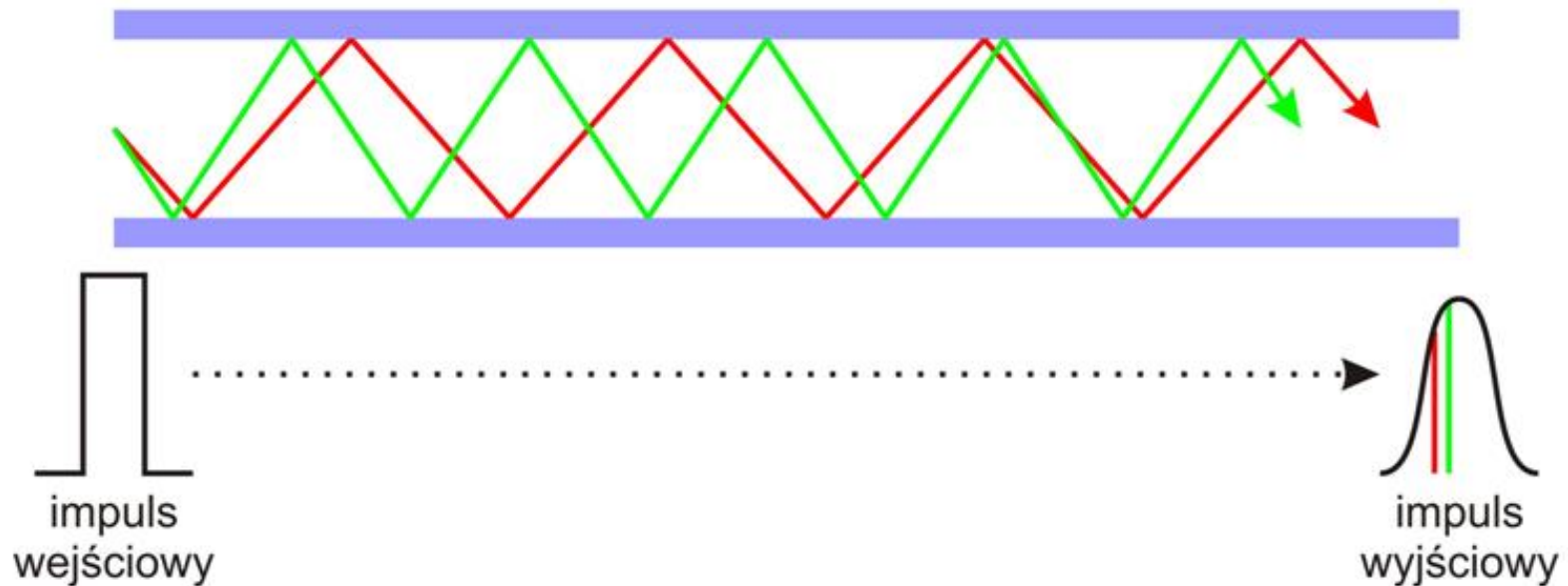
DYSPERSJA

- modowa
- polaryzacyjna
- chromatyczna
 - materiałowa
 - falowodowa

Dyspersja modowa

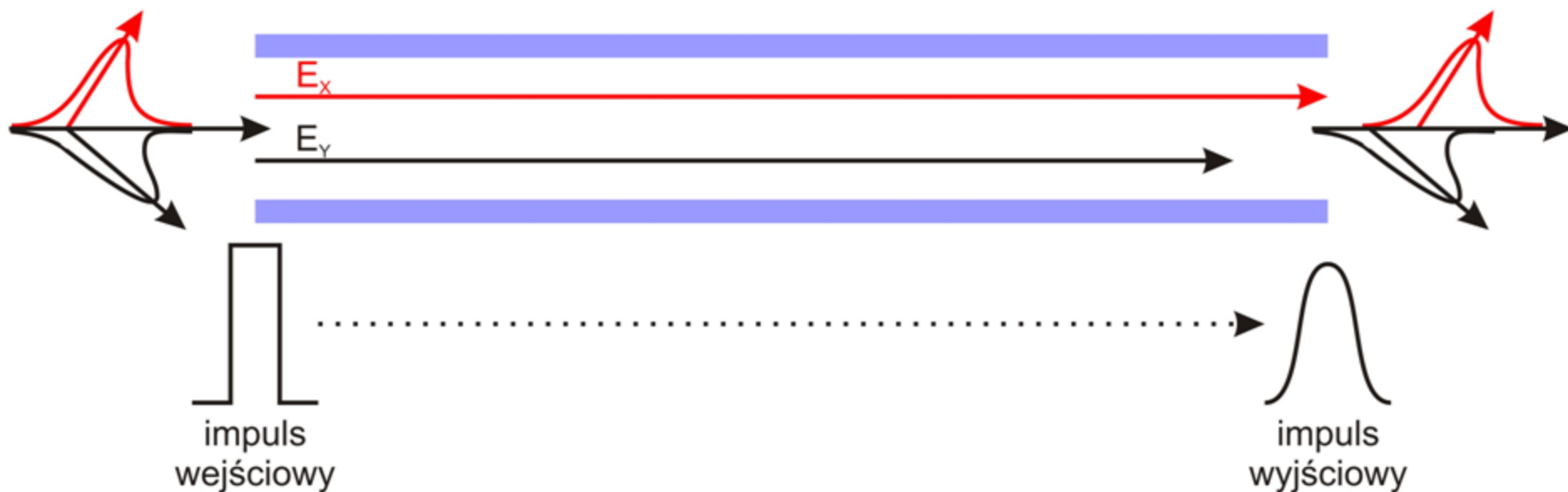
Występuje w światłowodach wielomodowych i jest rezultatem różnicy prędkości grupowych poszczególnych modów.

- ▶ Pojedynczy impuls światła wchodzi do M-modowego światłowodu i rozmywa się na M impulsów z rosnącymi w funkcji odległości opóźnieniami różniczkowymi



Dyspersja polaryzacyjna

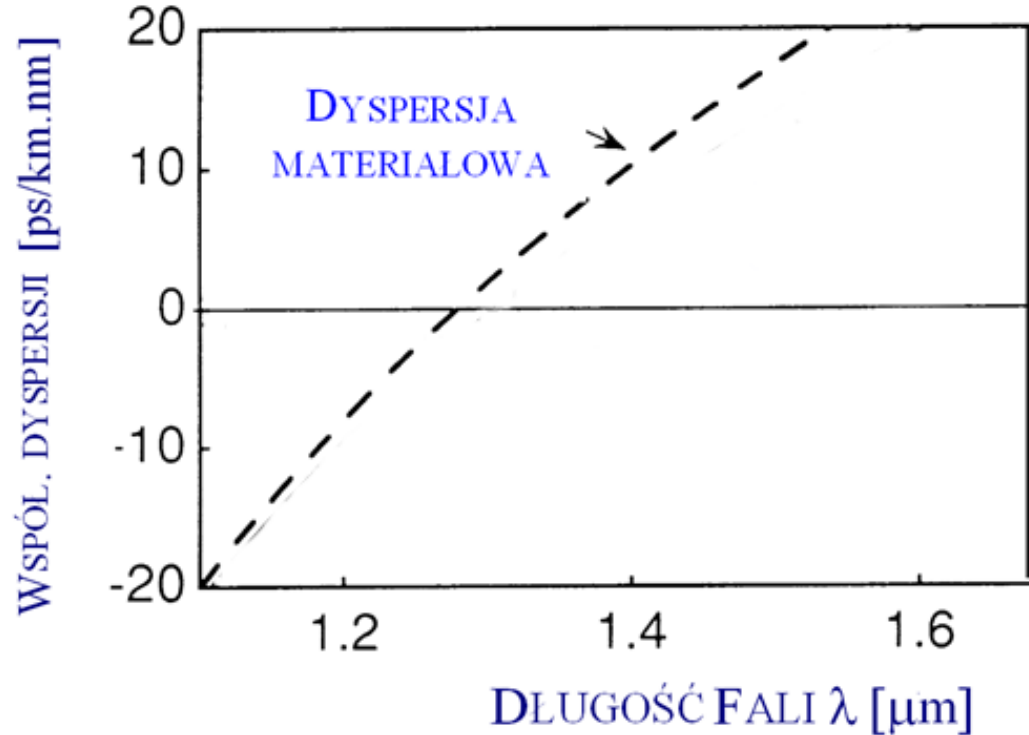
Propagowane światło jest „złożone” z różnych polaryzacji, które poruszają się z różnymi prędkościami.



Dyspersja materiałowa

Zależność współczynnika załamania materiału, z którego wykonane jest włókno optyczne, od częstotliwości (długości fali) propagowanego sygnału.

- współczynnik załamania materiału zależy od długości fali
- propagujący się impuls ma pewną szerokość spektralną (w systemach DWDM od 0.2 nm do 5 nm)
- niektóre długości fali podróżują szybciej, a niektóre wolniej



Dyspersja materiałowa

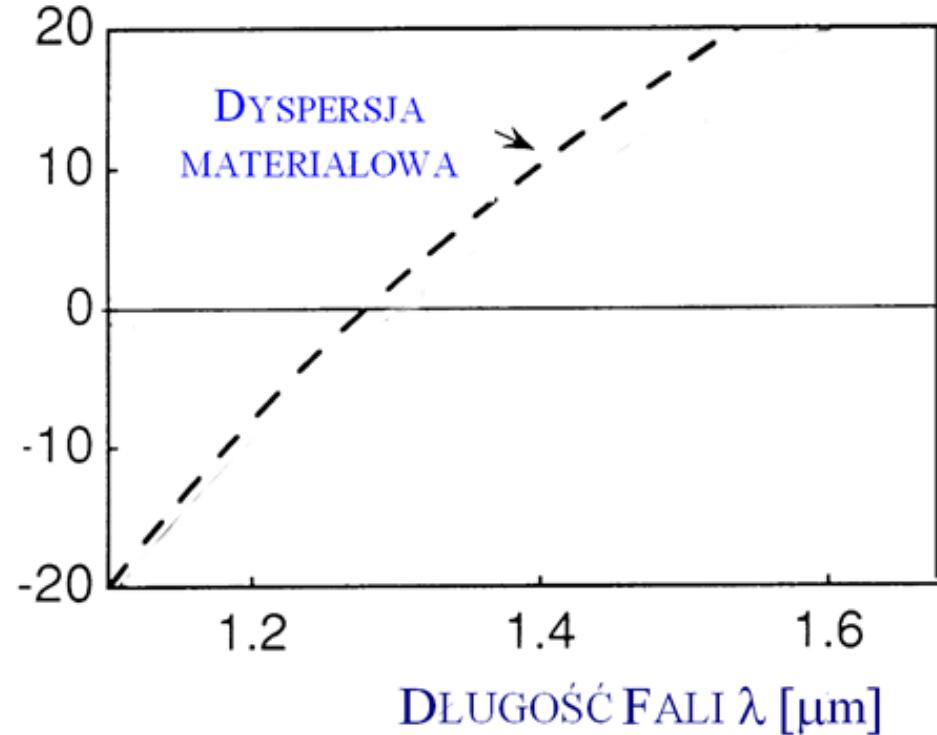
Szerokość impulsu o początkowej szerokości τ_0 [nm] po przebyciu odległości L wynosi:

$$\tau_1 = |D_\lambda| \cdot \tau_0 \cdot L$$

Gdzie D_λ jest współczynnikiem określającym dys. materiałową.

$$D_\lambda = -\frac{\lambda_0}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2} \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right]$$

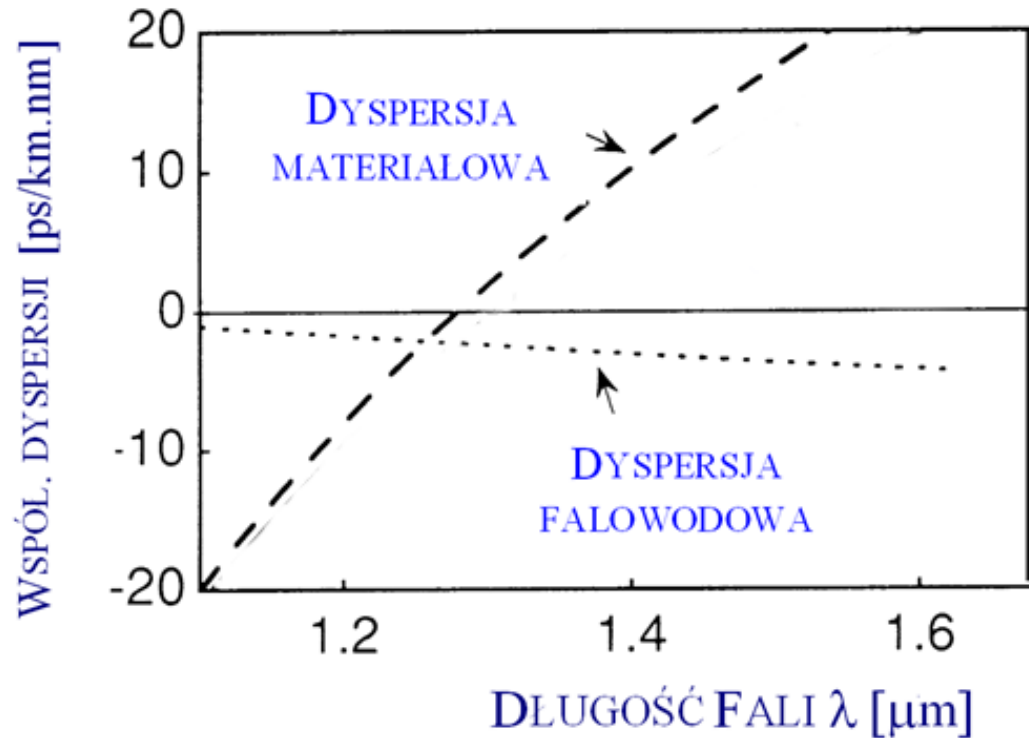
WSPÓŁ. DYSPERSJI [ps/km.nm]



Dyspersja falowodowa

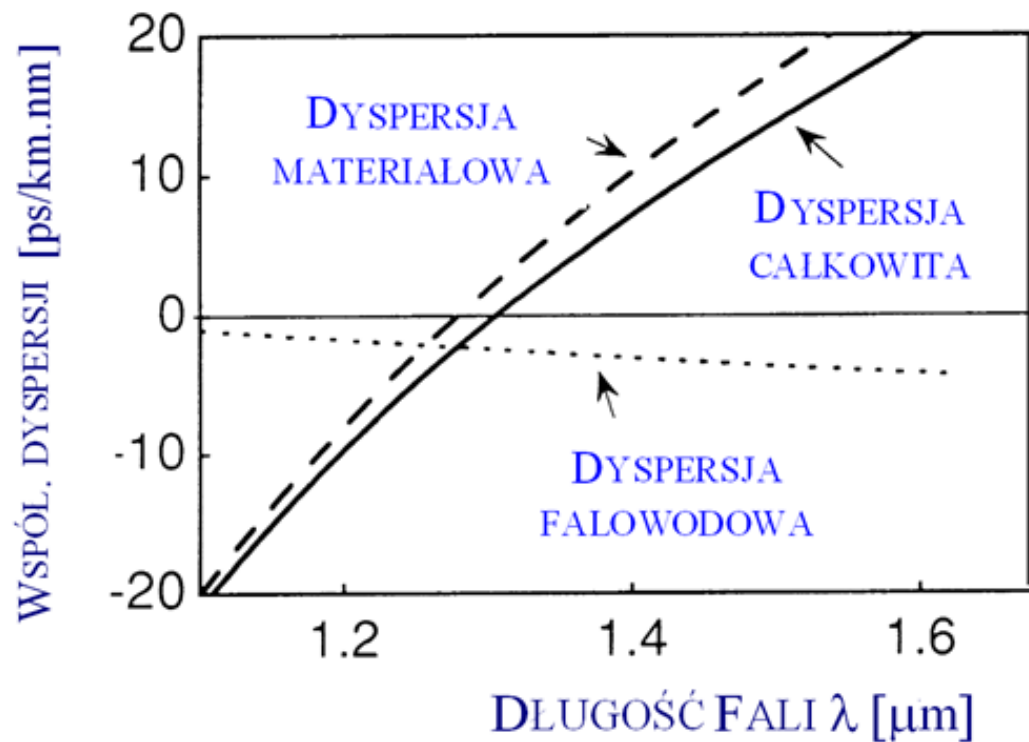
Wynika ze zmiany rozkładu mocy promieniowania między rdzeniem i płaszczem światłowodu, zachodząca przy zmianie częstotliwości (długości fali) sygnału.

- część światła w światłowodzie prowadzona jest w rdzeniu, a część w płaszczu - różne współczynniki załamania
- im większa długość fali tym większa część mocy propaguje się w płaszczu
- dla krótszych fal więcej mocy podróżuje w rdzeniu, a więc „widzi” większy efektywny współczynnik załamania
- dlatego krótsze fale podróżują wolniej niż dłuższe

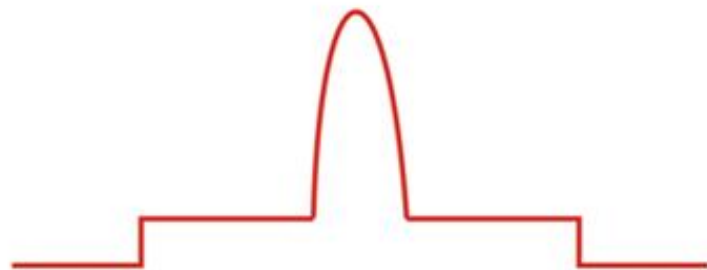


Dyspersja chromatyczna

Jest sumą dyspersji falowodowej materiałowej



Dyspersja chromatyczna



Non-zero dispersion-shifted fiber



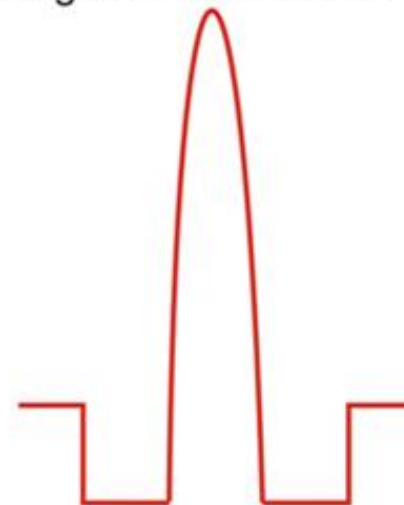
Step-index single-mode fiber



Fiber with flattened dispersion slope



Large effective area fiber



Dispersion-compensating fiber

Dyspersja chromatyczna



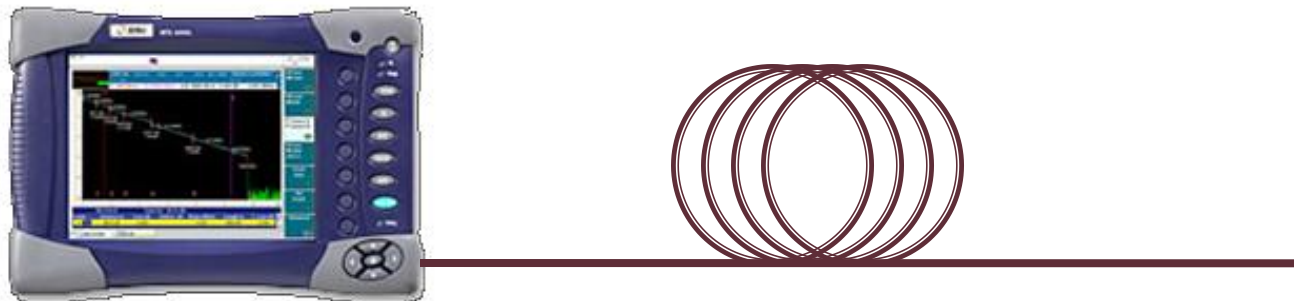
Pomiar dyspersji

Reflektometr OTDR wyposażony jednocześnie w kilka fal pomiarowych można wykorzystać do wyznaczenia dyspersji chromatycznej, wykorzystując metodę pomiaru różnicy czasu propagacji sygnału.

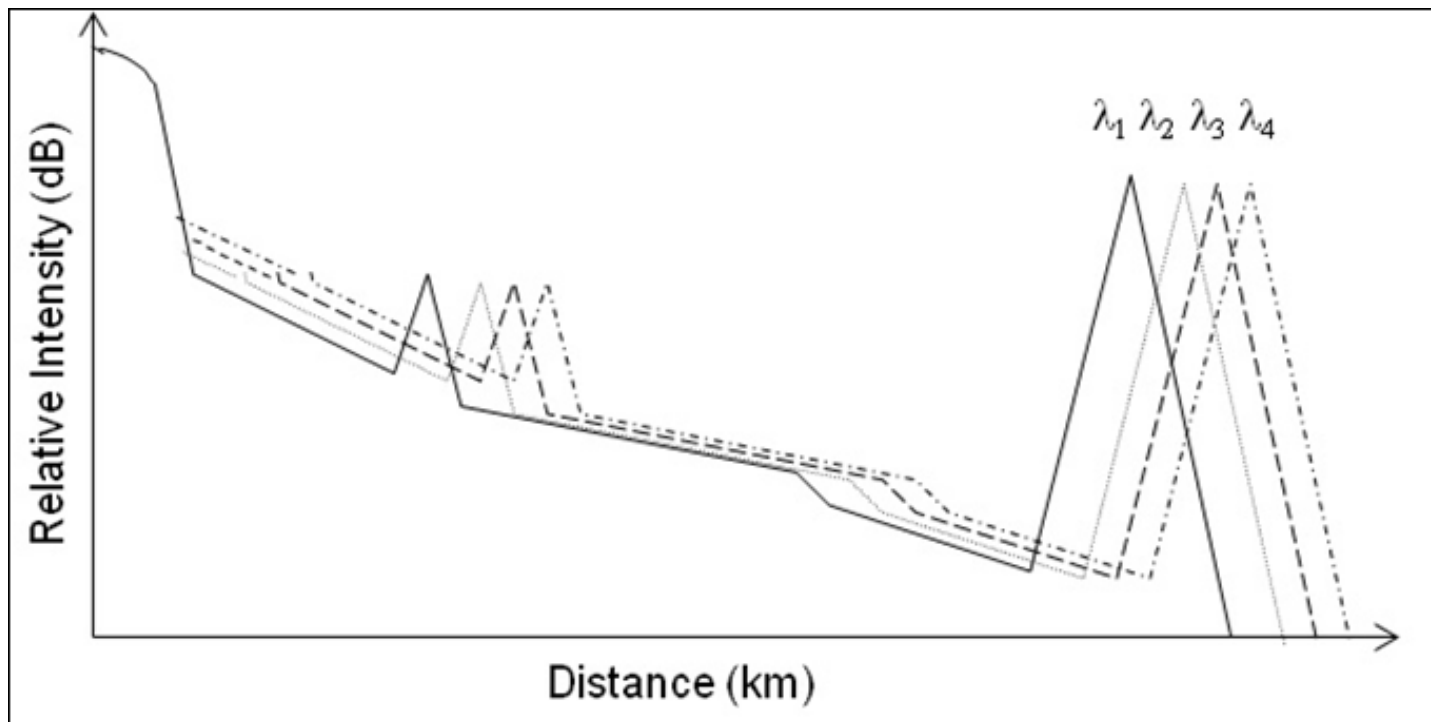
Pomiar następuje w kilku punktach, a następnie na podstawie odpowiednich równań i współczynników wyznaczane jest przybliżenie charakterystyki dyspersji



Pomiar dyspersji



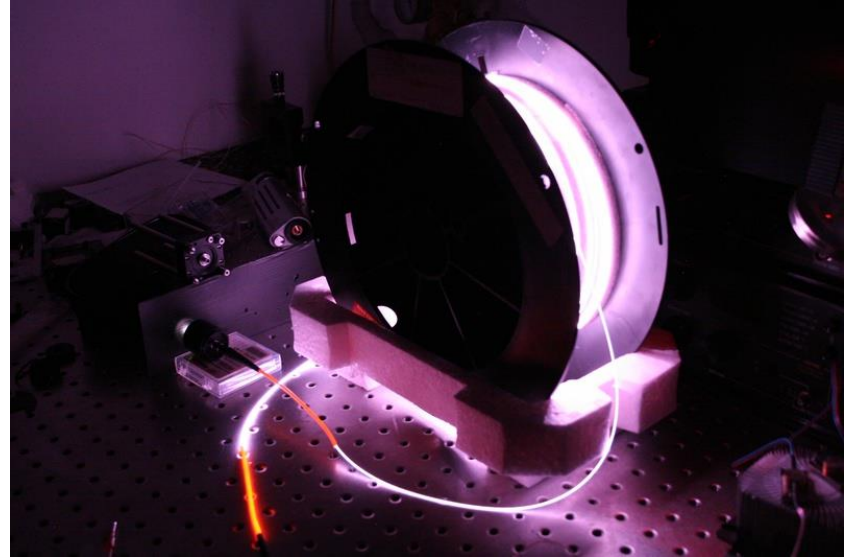
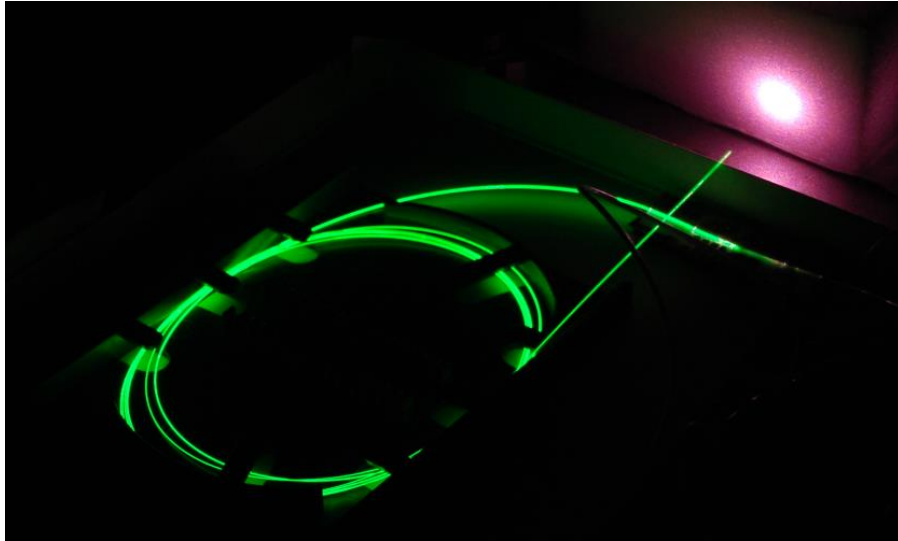
Pomiar dyspersji



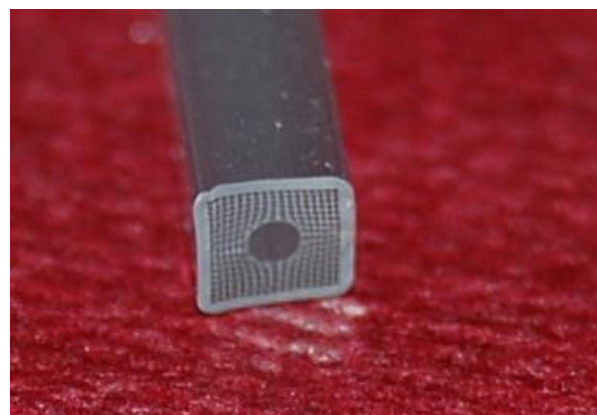
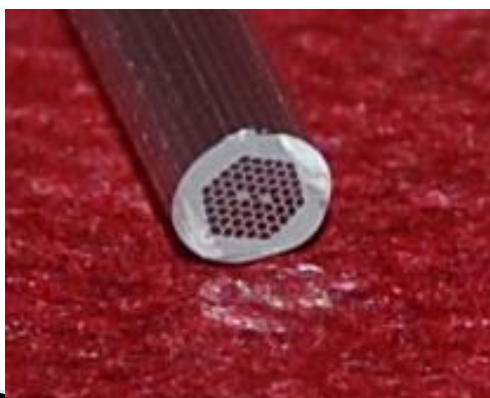
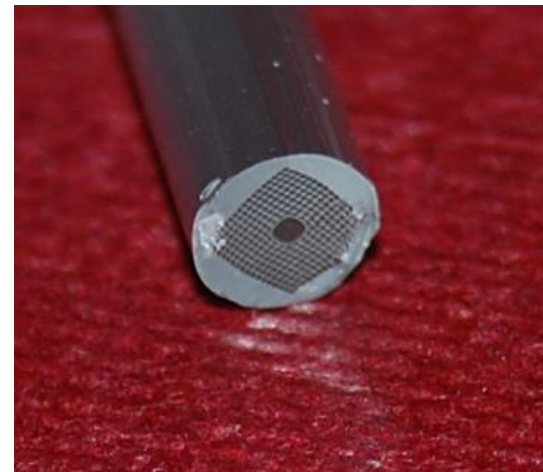
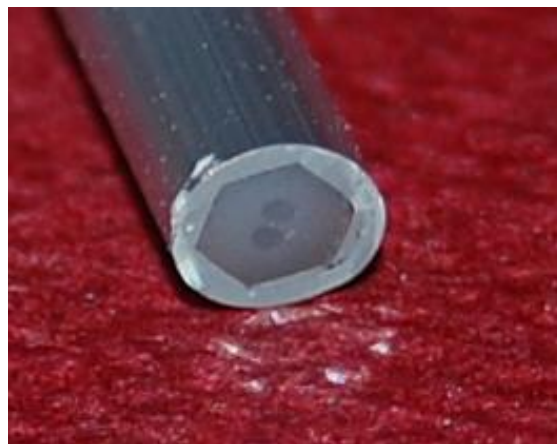
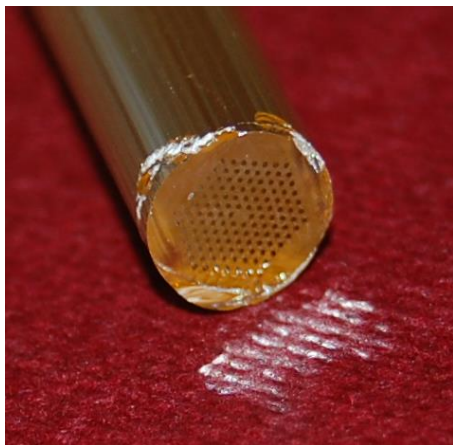
$$D = \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda \cdot L}$$

$\Delta\tau$ - zmierzona różnica czasu przejścia impulsów
 $\Delta\lambda$ - różnica między długościami emitowanych fal światła
 L - droga optyczna

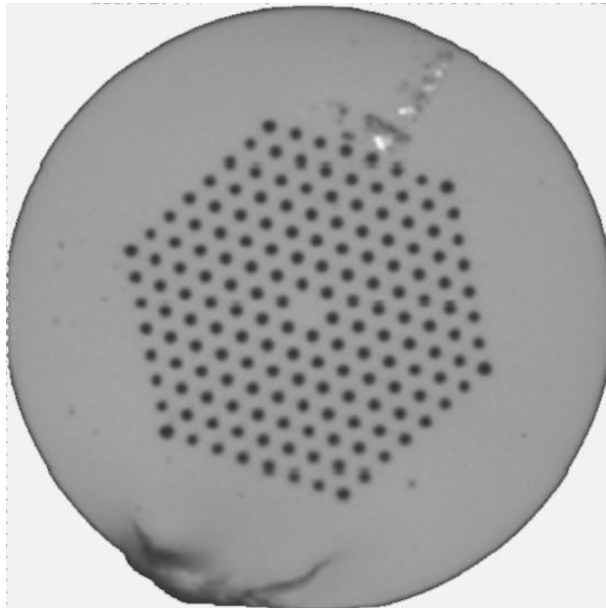
Światłowody „specjalne” – aktywne



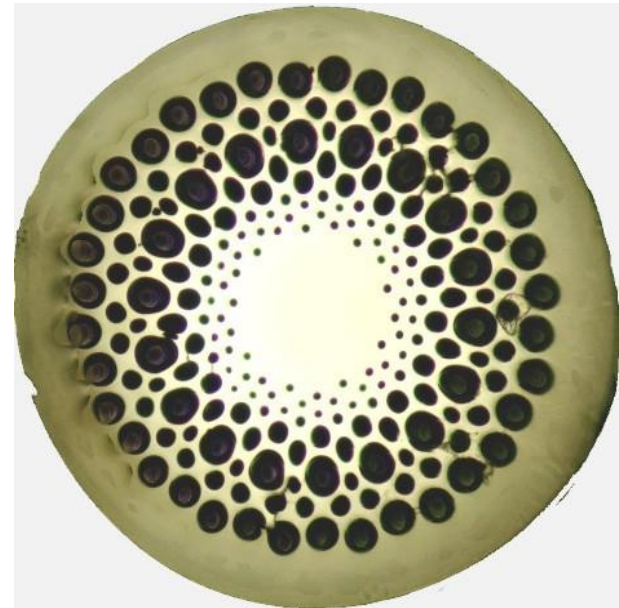
Światłowody „specjalne” – mikrostrukturalne



Światłowody „specjalne” – mikrostrukturalne

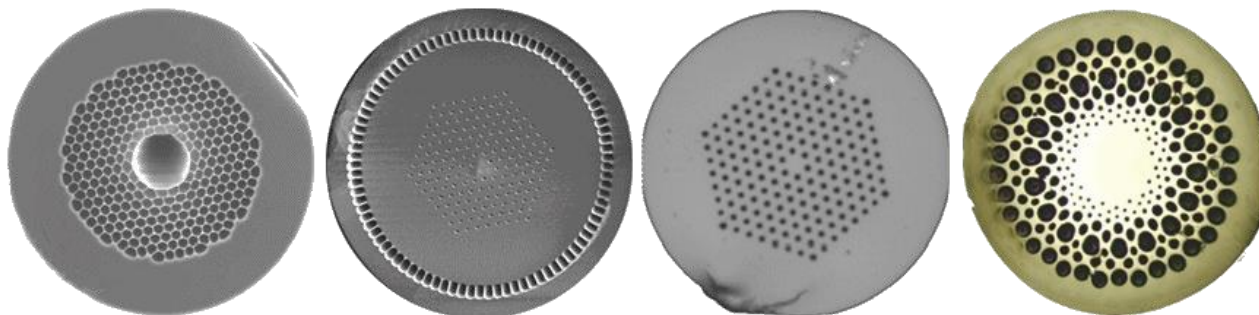


mikrostrukturalne
włókno
kwarcowe 125 μm



mikrostrukturalne
włókno
plastikowe 1000 μm

Światłowody „specjalne” – mikrostrukturalne



Zalety włókien mikrostrukturalnych – „włókien przyszłości”:

- praca jednomodowa w szerokim zakresie spektralnym
- kształtowanie pola modowego – możliwość wymuszenia pracy jednomodowej nawet przy dużych średnicach rdzenia
- możliwość kształtowania charakterystyk dyspersyjnych
- możliwość ograniczenia strat tłumieninościowych
- możliwość ograniczenia strat zgięciowych
- duże apertury numeryczne

Podsumowanie

ZALETY ŚWIATŁOWODÓW KLASYCZNYCH

- ▶ Ogromna pojemność informacyjna pojedynczego włókna
- ▶ Małe straty = zdolność przesyłania sygnałów na znaczne odległości
- ▶ Całkowita niewrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne
- ▶ Mała waga
- ▶ Małe wymiary
- ▶ Bezpieczeństwo pracy (brak iskrzenia)
- ▶ Utrudniony (prawie niemożliwy) podsłuch przesyłanych danych.
- ▶ Względnie niski koszt (i ciągle spada)
- ▶ Duża niezawodność (poprawnie zainstalowanych łączy światłowodowych)
- ▶ Prostota obsługi
- ▶ Brak możliwości sprzedaży na złomowisku ;)

Podsumowanie

WADY ŚWIATŁOWODÓW KLASYCZNYCH

- ▶ większa cena
- ▶ droższe nadajniki i odbiorniki
- ▶ droższe i bardziej skomplikowane łączenie
- ▶ materiał jest kruchy, łamliwy...

POF jest
lepszy!

...ale ma
większą
tłumienność...

POF mikrostrukturalny – możliwość kontroli
tłumienności, a przede wszystkim dyspersji

Podsumowanie

WADY ŚWIATŁOWODÓW KLASYCZNYCH

- ▶ światłowodu nie można wykorzystać co zasilania urządzenia końcowego (np. telefonu)

Nieprawda!!! – ROPS

