



Politechnika  
Wrocławska

# Podstawy Telekomunikacji

## Światłowody

*dr inż. Bogusław Szczupak*

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki



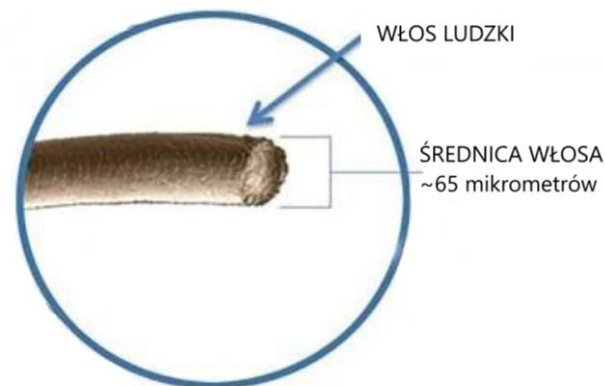
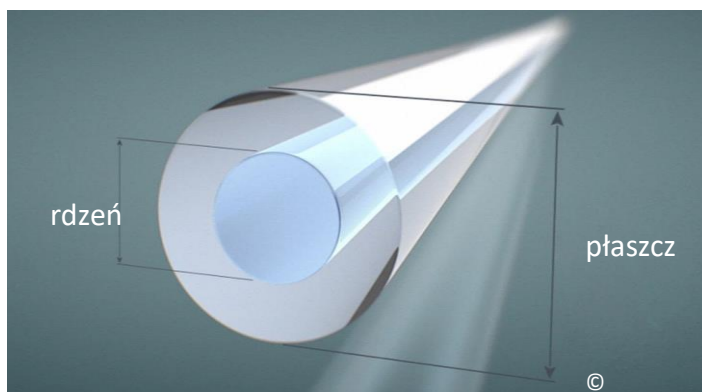
# Plan wykładu

- Co to jest światłowód i jakie są jego zalety?
- Zasada działania światłowodu
- Podział światłowodów
- Metody wytwarzania światłowodów
- Budowa kabli światłowodowych
- Parametry transmisyjne światłowodów
- Przesyłanie informacji przez światłowód



# Co to jest światłowód?

- **Światłowód telekomunikacyjny** jest falowodem dielektrycznym służącym do przesyłania światła z zakresu bliskiej podczerwieni jako nośnika informacji
- Typowy światłowód telekomunikacyjny jest cienkim włóknem szklanym wykonanym ze szkła krzemionkowego o przekroju kołowym i standardowej średnicy 125  $\mu\text{m}$ . Można w nim wyróżnić dwa obszary: położony centralnie rdzeń i otaczający go płaszcz
- Materiał rdzenia ma większy współczynnik załamania niż materiał płaszcza dzięki czemu światło jest prowadzone głównie wzdłuż osi rdzenia światłowodu, ulegając kolejnym całkowitym wewnętrznym odbiciom na granicy rdzeń-płaszcz





# Zalety światłowodów

- Ogromna pojemność informacyjna pojedynczego włókna
- Małe straty umożliwiające przesyłanie informacji na duże odległości bez potrzeby regeneracji sygnału
- Całkowita niewrażliwość na zakłócenia i przesłuchy elektromagnetyczne
- Utrudniony, wręcz niemożliwy podsłuch przesyłanych danych
- Małe wymiary i mała waga
- Bezpieczeństwo pracy (brak iskrzenia)
- Relatywnie niski koszt

$10^{27} B \leftarrow \text{air type???$

[illegible]

Penta terva bajty

PT



# Zasada działania światłowodu (1)

- **Światło jest falą elektromagnetyczną** i jak każda fala elektromagnetyczna, charakteryzuje się częstotliwością  $f$  i długością fali  $\lambda$
- Częstotliwość fali świetlnej jest niezmienna przy przejściu między różnymi ośrodkami, natomiast długość fali może ulec zmianie. W ośrodkach o mniejszej prędkości światła niż w próżni, długość fali zmniejsza się zgodnie ze wzorem:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{gdzie } v - \text{prędkość światła w danym ośrodku}$$



# Zasada działania światłowodu (2)

*istnieją 6 kanałów światłowodowych*

- Prędkość światła zależy silnie od ośrodka. Stała materiałowa, zwana **współczynnikiem załamania  $n$** , opisuje prędkość światła w danym ośrodku wzorem:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{gdzie } c - \text{prędkość światła w próżni}$$

- Rozchodzeniu się światła towarzyszą efekty falowe jak: odbicie, załamanie, ugięcie (dyfrakcja), interferencja, polaryzacja



# Zasada działania światłowodu (3)

- Propagację światła w światłowodach rozpatruje się zazwyczaj w kontekście optyki geometrycznej i optyki falowej
- **Optyka geometryczna** zajmuje się wytłumaczeniem zjawisk optycznych przy użyciu pojęcia „promienia świetlnego”. Promień świetlny symbolizuje kierunek rozchodzenia się fali płaskiej o znacznych wymiarach poprzecznych. Optyka geometryczna ma zastosowanie np. do analizy zjawisk odbicia i załamania światła czy przejścia światła przez soczewę. **Przybliżenie optyki geometrycznej jest sensowne jedynie dla światłowodów o dużych rozmiarach poprzecznych w porównaniu z długością fali świetlnej** (np. dla światłowodów wielomodowych)



# Zasada działania światłowodu (4)

- **Optyka falowa** uwzględnia falową naturę światła. W ramach optyki falowej badane są zjawiska optyczne charakterystyczne dla ruchu falowego takie jak dyfrakcja, interferencja czy polaryzacja. Podejście to jest **niezbędne przy opisie prowadzenia światła w światłowodach, w których rozmiar przekroju poprzecznego jest porównywalny z długością fali świetlnej** (tak jest w przypadku światłowodów jednomodowych)





# Zasada działania światłowodu (5)

- Propagacją światła, podobnie jak propagacją innych fal elektromagnetycznych, rządzą równania Maxwella. Z równań Maxwella otrzymuje się równanie falowe, które opisuje propagowanie światła w światłowodzie
- Rozwiązując równania Maxwella dla struktury światłowodu otrzymuje się w wielu wypadkach nie jedno a wiele rozwiązań. Oznacza to, że w światłowodzie można propagować fale elektromagnetyczną o różnych konfiguracjach pola elektrycznego i magnetycznego. Mówi się wtedy, że **światło propagowane jest wzdłuż światłowodu w formie różnych modów**

*jedno mody / wiele mody*



# Zasada działania światłowodu (6)

- Każdy mod światłowodowy charakteryzuje się innym przestrzennym rozkładem pola elektromagnetycznego i innymi wartościami stałej propagacji, prędkości grupowej i fazowej, oraz polaryzacji i tłumienia
- W światłowodzie propagowane są mody  $TM$ ,  $TE$ ,  $HE$  i  $EH$ . Mody  $TM$  charakteryzują się niezerową składową pola magnetycznego w kierunku propagacji  $z$ , mody  $TE$  charakteryzują się niezerową składową pola elektrycznego w kierunku propagacji  $z$ , natomiast mody hybrydowe  $HE$  i  $EH$  mają niezerowe obie składowe pól elektrycznego i magnetycznego w kierunku propagacji  $z$



# Zasada działania światłowodu (7)

- O tym ile modów przenosi dany światłowód decyduje jego kształt, średnica rdzenia, apertura numeryczna i długość fali propagującej się w tym światłowodzie
- Można wprowadzić parametr  $V$ , zwany **częstotliwością znormalizowaną**, określony jako:

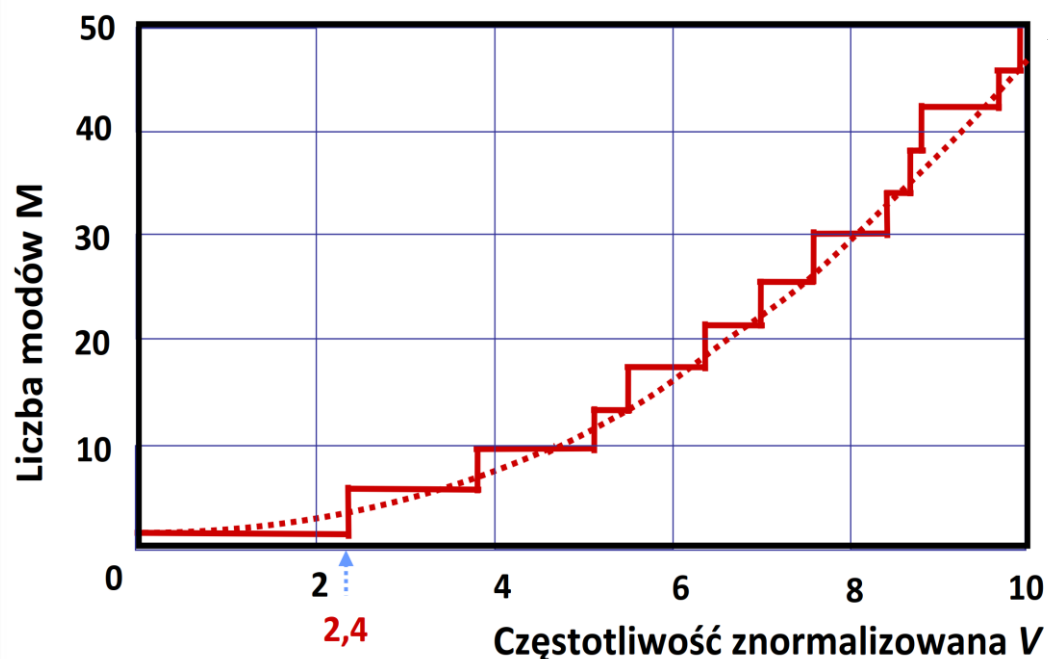
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA \cong \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

gdzie:  $a$  oznacza promień rdzenia światłowodu,  $\lambda_0$  długość fali świetlnej,  $n_1$  współczynnik załamania rdzenia,  $n_2$  współczynnik załamania płaszczu,  $NA$  apertura numeryczna, a  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$



# Zasada działania światłowodu (8)

- Liczba modów  $M$  w zależności od wartości parametru  $V$



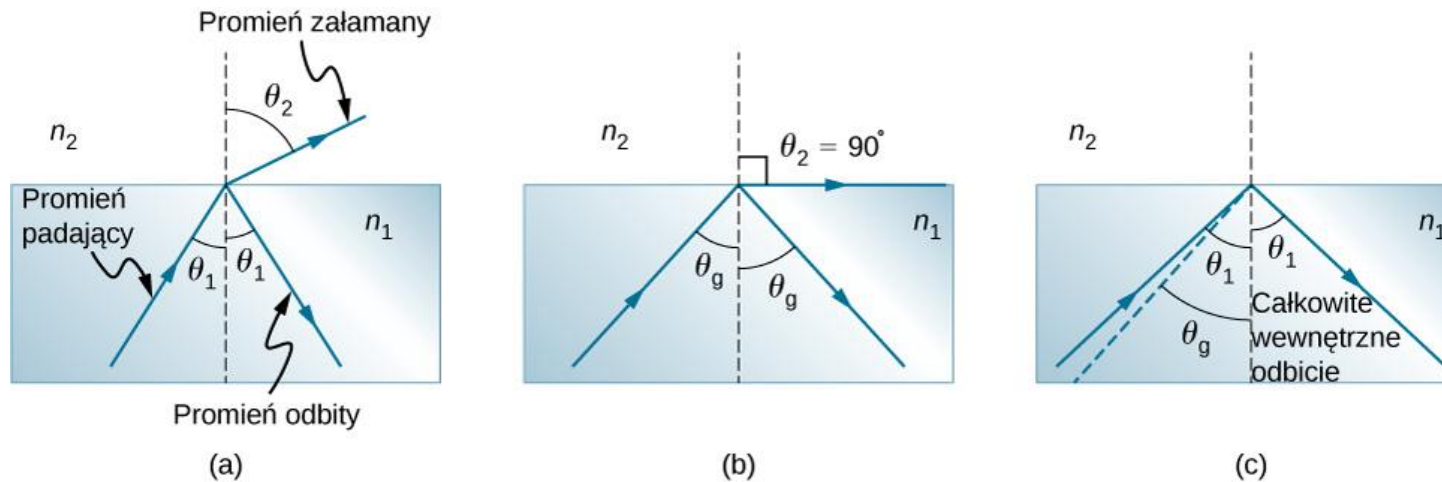
⇐ Dla  $V < 2,405$  w światłowodzie wzbudza się tylko 1 mod podstawowy. Dla  $V \gg 1$  liczba modów  $M$  jest duża i z dobrym przybliżeniem można napisać, że **dla światłowodu o skokowym profilu współczynnika załamania  $M = V^2/2$  a dla światłowodu o gradientowym profilu współczynnika załamania  $M = V^2/4$**

- Światłowód prowadzący tylko mod podstawowy nazywany jest światłowodem jednomodowym natomiast światłowód prowadzący mod podstawowy i mody wyższego rzędu nazywany jest światłowodem wielomodowym



# Zasada działania światłowodu (9)

- Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia



**(a)** Promień światła przechodzi przez granicę, gdzie następuje zmniejszenie współczynnika załamania światła, to znaczy  $n_2 < n_1$ . Promień odchyła się od prostej prostopadłej (normalnej). **(b)** Kąt graniczny  $\theta_g$  jest kątem padania, dla którego kąt załamania wynosi  $90^\circ$ . **(c)** Całkowite wewnętrzne odbicie zachodzi wtedy, gdy kąt padania jest większy od kąta granicznego.

Rysunek i opis z książki: Fizyka dla szkół wyższych Tom 3, OpenStax 2020

## Współczynnik załamania ( $n$ )

$$n = \frac{\text{prędkość światła w próżni}}{\text{prędkość światła w ośrodku}} = \frac{c}{v}$$

## Prawo Snella

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

## Kąt graniczny

$$\sin \theta_g = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \theta_g = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

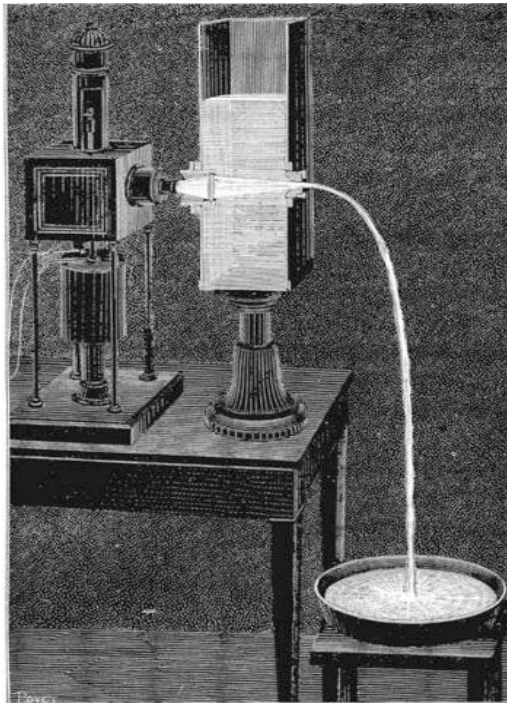
dla  $n_1 > n_2$



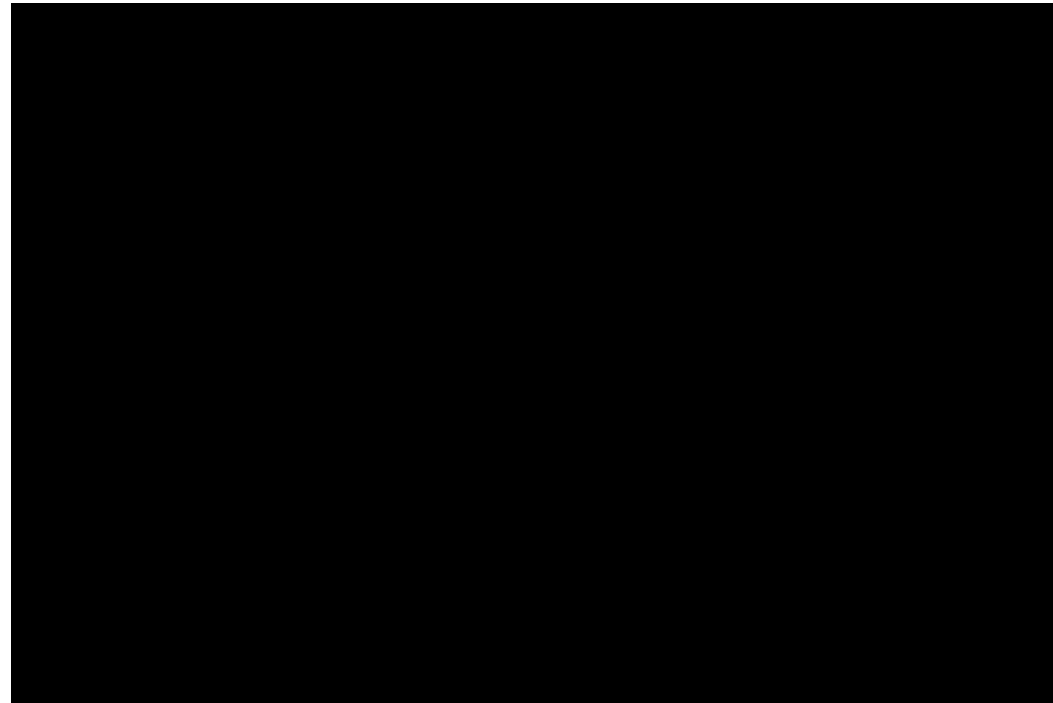
Politechnika  
Wrocławska

# Zasada działania światłowodu (10)

- Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia



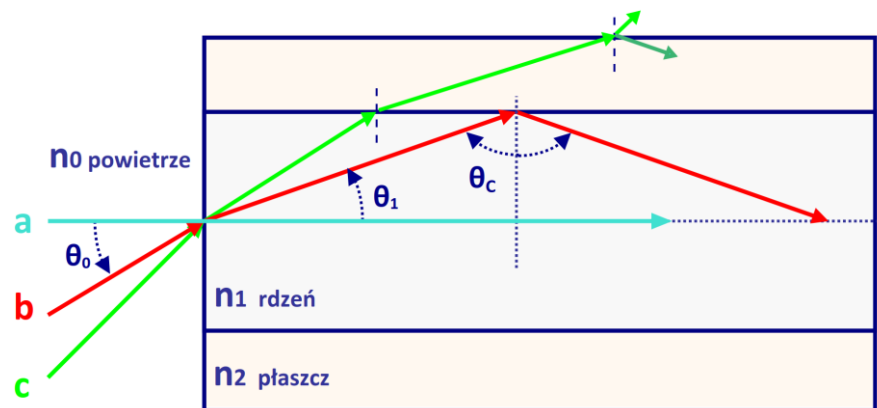
Źródło: Comptes Rendes, 15, 800–802, October 24, 1842;  
Cnum, Conservatoire Numérique des Arts et Métiers,  
France



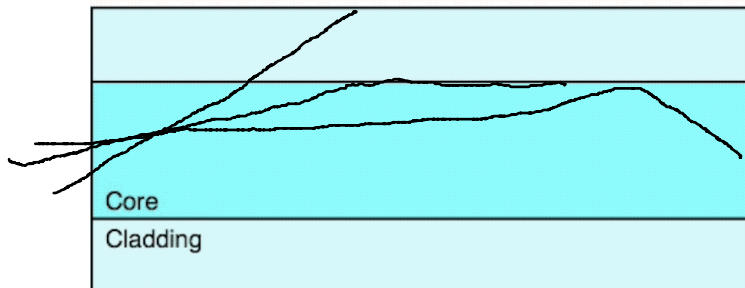
Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=3ZbMq8r1B5g>

# Zasada działania światłowodu (11)

- Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia w światłowodzie



promienie prowadzone ————  
promienie wyciekające ————



Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>

**Apertura numeryczna (NA)** - wielkość fizyczna definiowana jako sinus kąta stożka akceptacji, to znaczy maksymalnego kąta w stosunku do osi rdzenia włókna, pod którym światło wprowadzone do światłowodu nie będzie z tego włókna uciekać. Innymi słowy, jest to **liczba charakteryzująca zdolność włókna światłowodowego do transmisji promieni padających na jego czoło pod kątem**

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$NA = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

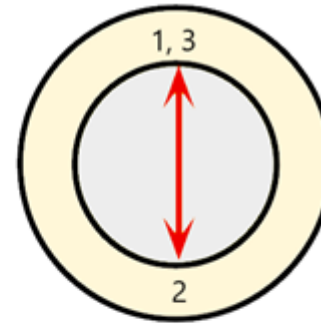
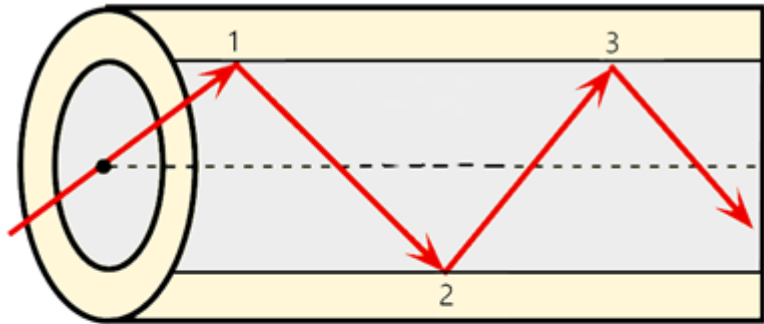
$\Delta$  – względna różnica współczynników załamania rdzenia i płaszczu

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,001 - 0,02$$

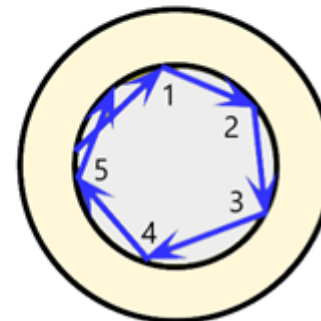
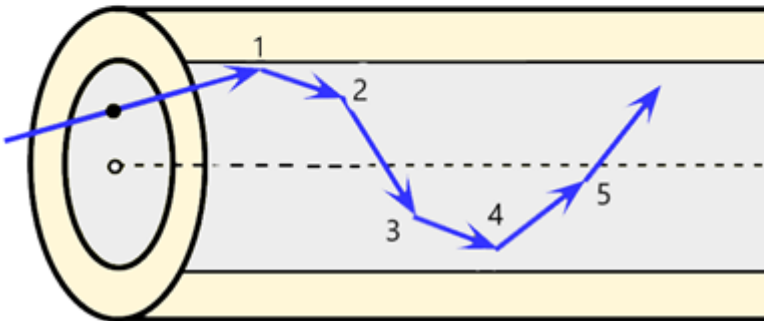


# Zasada działania światłowodu (12)

- Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia w światłowodzie



← **Promienie południkowe**  
**przecinają**  
oś światłowodu



← **Promienie skośne**  
**nie przecinają**  
osi światłowodu





# Podział światłowodów (1)

- Ze względu na charakterystykę modową: jednomodowe, wielomodowe
- Ze względu na rozkład współczynnika załamania w rdzeniu: skokowe, gradientowe
- Ze względu na materiał wykonania: szklane, plastikowe, szafirowe
- Ze względu na zastosowanie: telekomunikacyjne, czujnikowe, pasywne, aktywne, ...
- Ze względu na rodzaj dyspersji (światłowody jednomodowe): klasyczne (dyspersja naturalna), z przesuniętą dyspersją, z odwróconą dyspersją, z ujemną dyspersją, z płaską charakterystyką dyspersji



# Podział światłowodów (2)

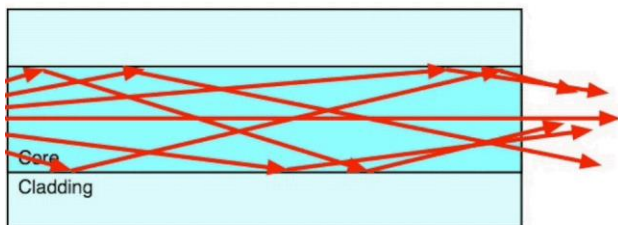
## Światłowody jednomodowe:

- średnica rdzenia: 5-10  $\mu\text{m}$
- współczynnik załamania rdzenia  $n_1=1,460$
- średnica płaszczka: 125  $\mu\text{m}$
- współczynnik załamania płaszczka  $n_2=1,456$
- $NA = 0,08 - 0,15$

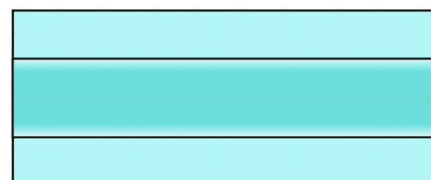
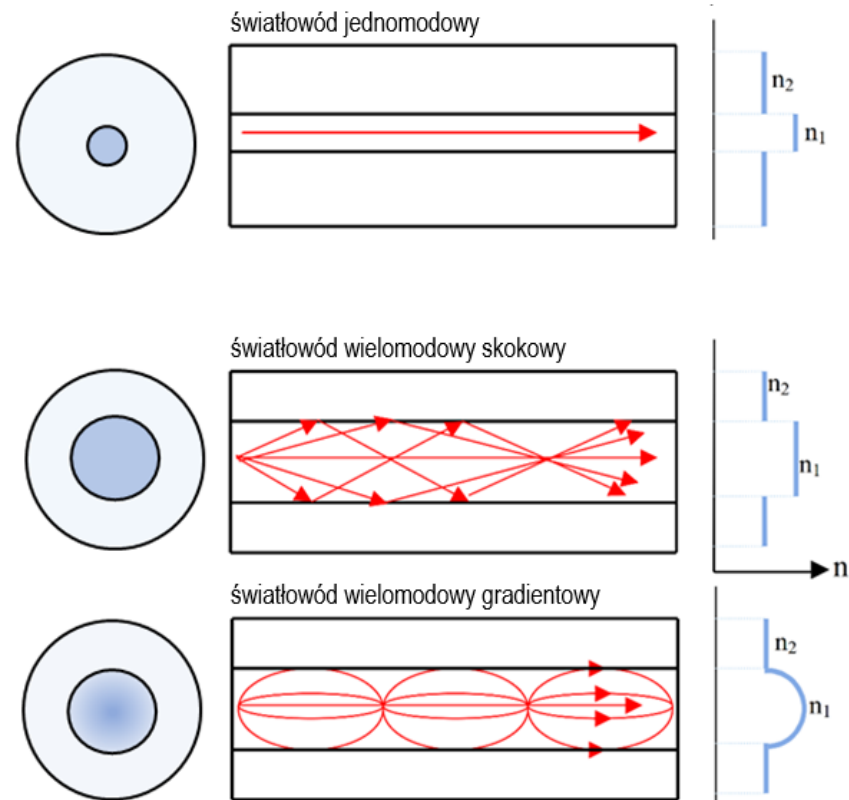
## Światłowody wielomodowe:

- średnica rdzenia: 50  $\mu\text{m}$  / 62,5  $\mu\text{m}$
- współczynnik załamania rdzenia  $n_1=1,48$
- średnica płaszczka: 125  $\mu\text{m}$
- współczynnik załamania płaszczka  $n_2=1,46$
- apertura numeryczna  $NA = 0,2 - 0,3$

mniejszy  
rdzeń  
to mniej  
modów



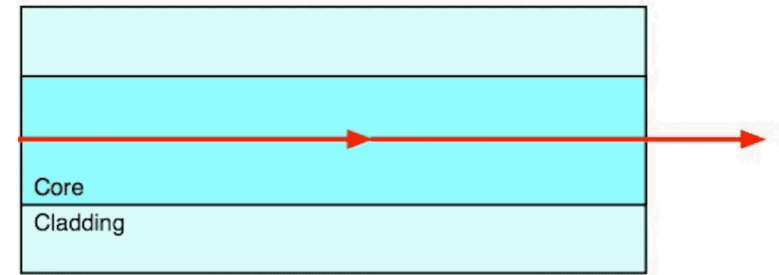
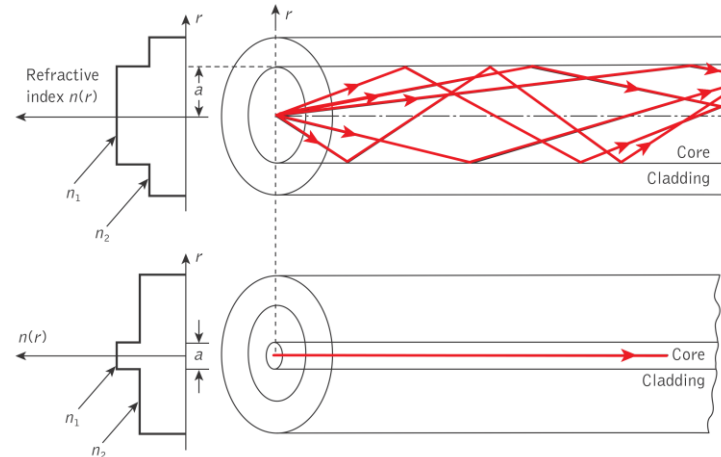
Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>



Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>

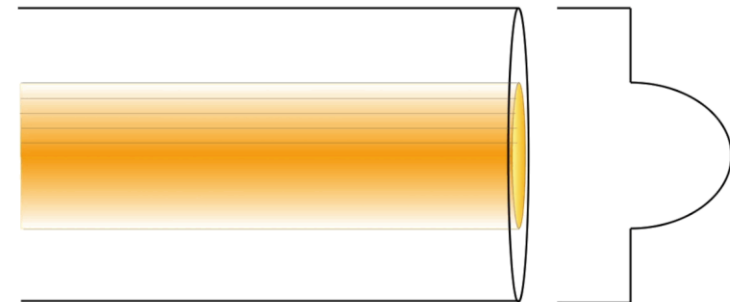
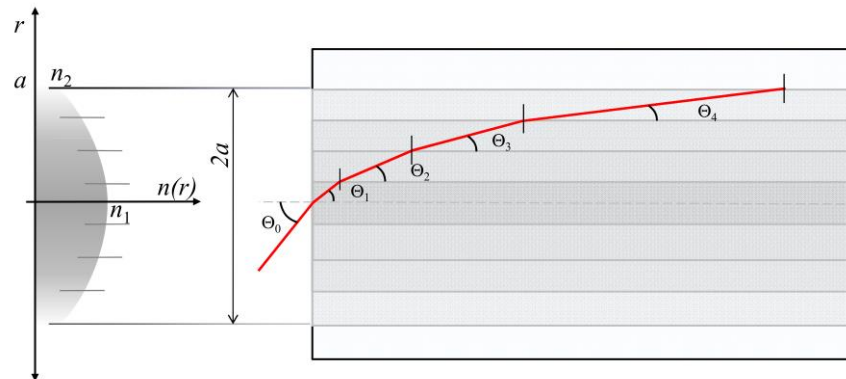
# Podział światłowodów (3)

- Światłowodowy o skokowym profilu współczynnika załamania



Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>

- Światłowodowy o gradientowym profilu współczynnika załamania



Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>

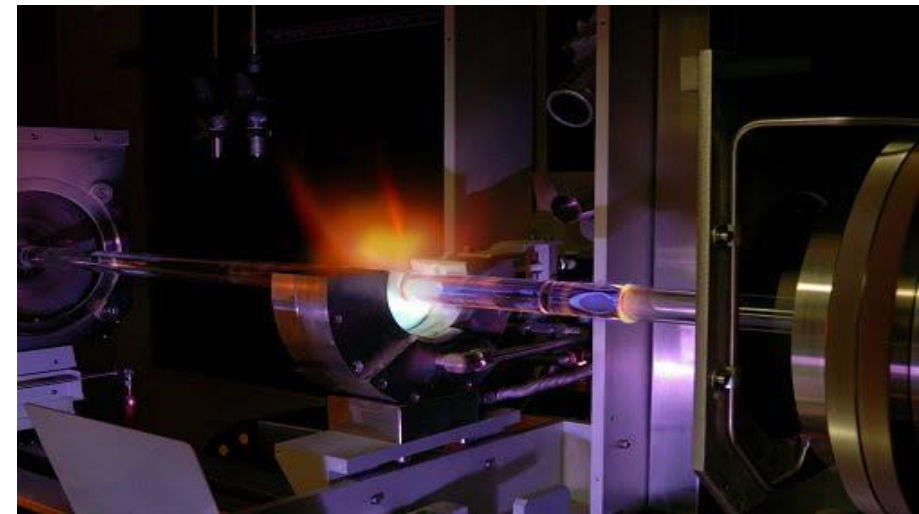
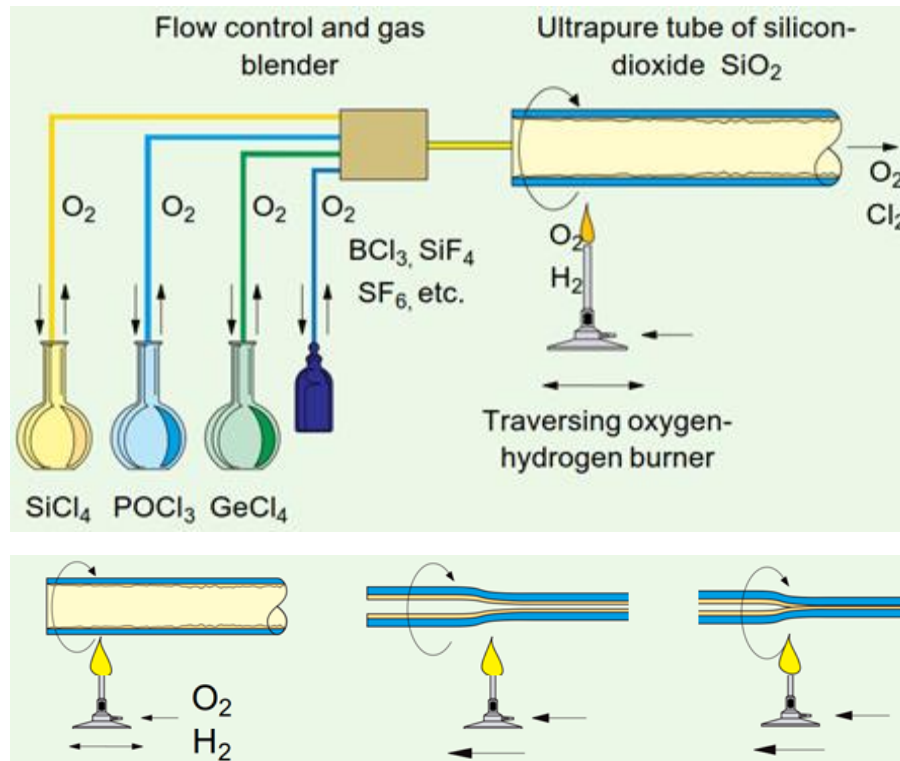


# Wytwarzanie światłowodów (1)

- Metody wytwarzania włókien światłowodowych:
  - Metoda bezpośredniego wyciągania włókna (metoda podwójnego tygla)
  - Metoda wyciągania włókna z preformy
    - Formowanie preformy
    - Wyciąganie włókna z preformy, ochrona i uelastycznianie
- Metody formowania preformy:
  - Metoda zewnętrznego osadzania szkła OVD (ang. Outside Vapor Deposition)
  - Metoda wewnętrznego osadzania szkła MCVD (ang. Modified Chemical Vapor Deposition)
  - Metoda pionowego osadzania szkła VAD (ang. Vapor Axial Deposition)

# Wytwarzanie światłowodów (2)

- Formowanie preformy metodą wewnętrznego osadzania szkła MCVD



Źródło: [www.photonics.com/Articles/Clemson\\_Researchers\\_Seek\\_Improved\\_Beam\\_Quality/a62313](http://www.photonics.com/Articles/Clemson_Researchers_Seek_Improved_Beam_Quality/a62313)

⇐ Kolaps preformy

Źródło: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002

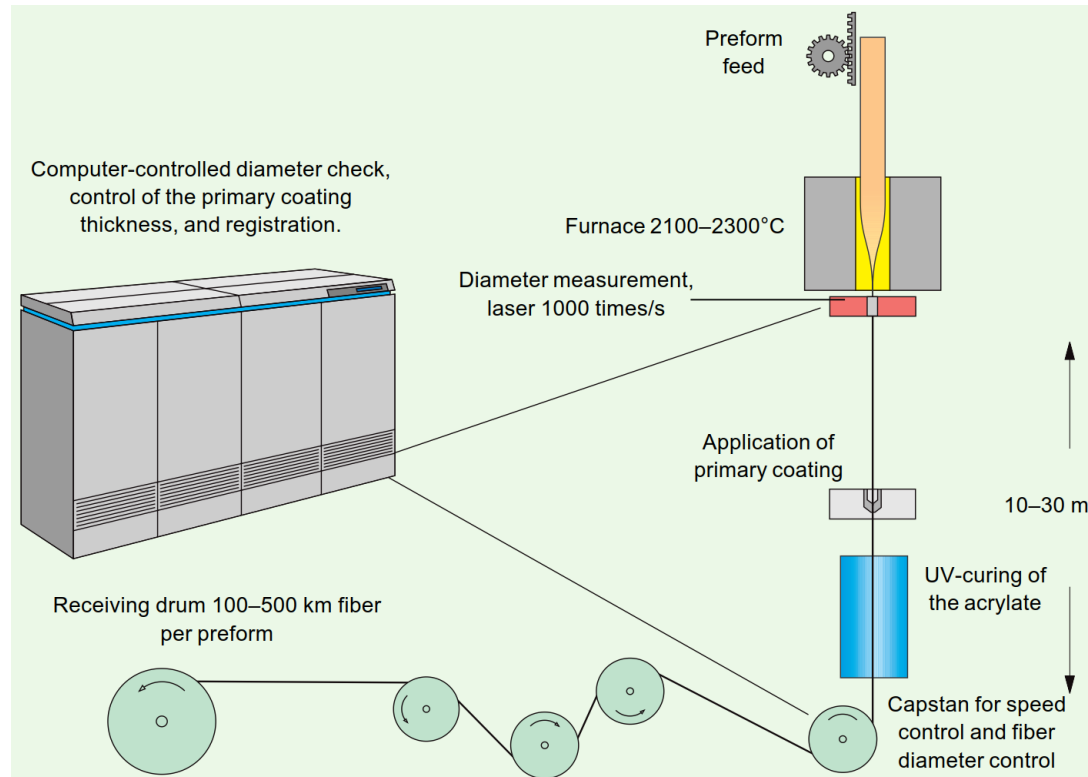




Politechnika  
Wrocławska

# Wytwarzanie światłowodów (3)

- Wyciąganie włókna z preformy



Źródło: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002

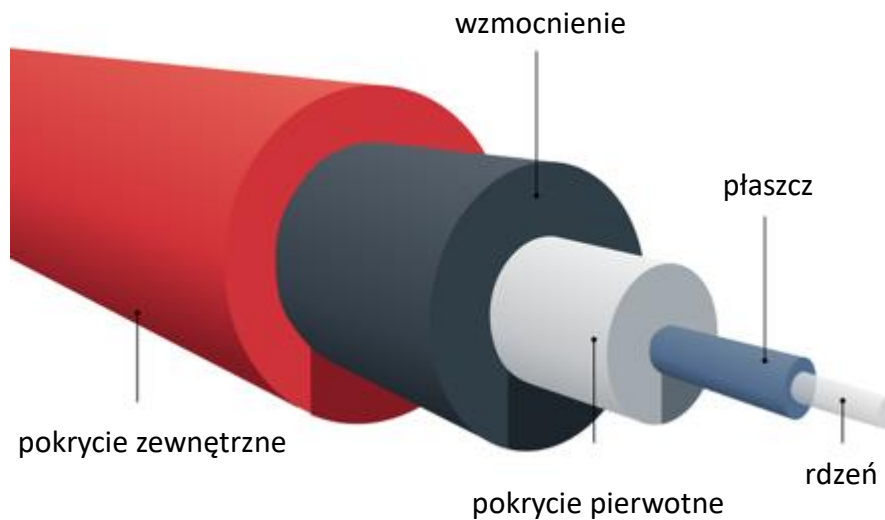


Źródło: [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com)

# Budowa kabli światłowodowych (1)

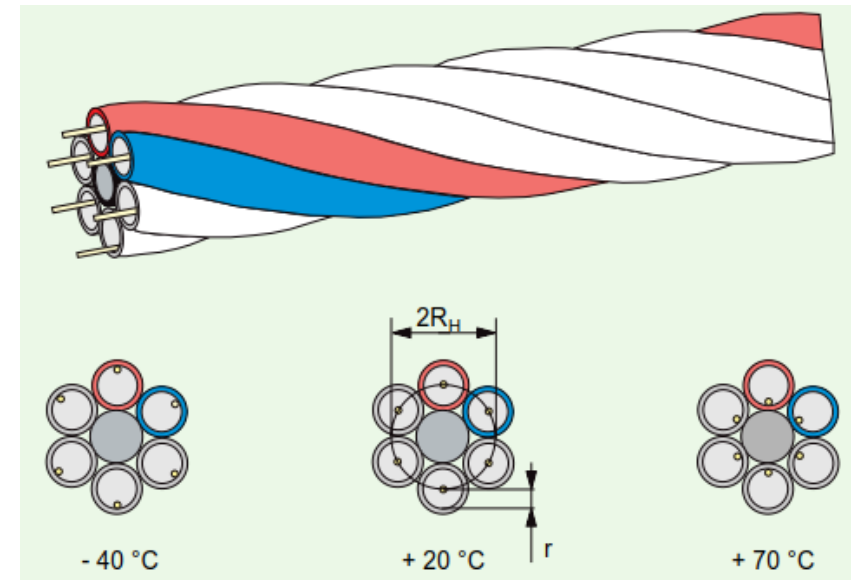
- Struktura kabla światłowodowego zależy od jego przeznaczenia

a) Kable światłowodowe w ścisłej tubie



Rysunek na podstawie: [www.ofsoptics.com/optical-fiber-coatings/](http://www.ofsoptics.com/optical-fiber-coatings/)

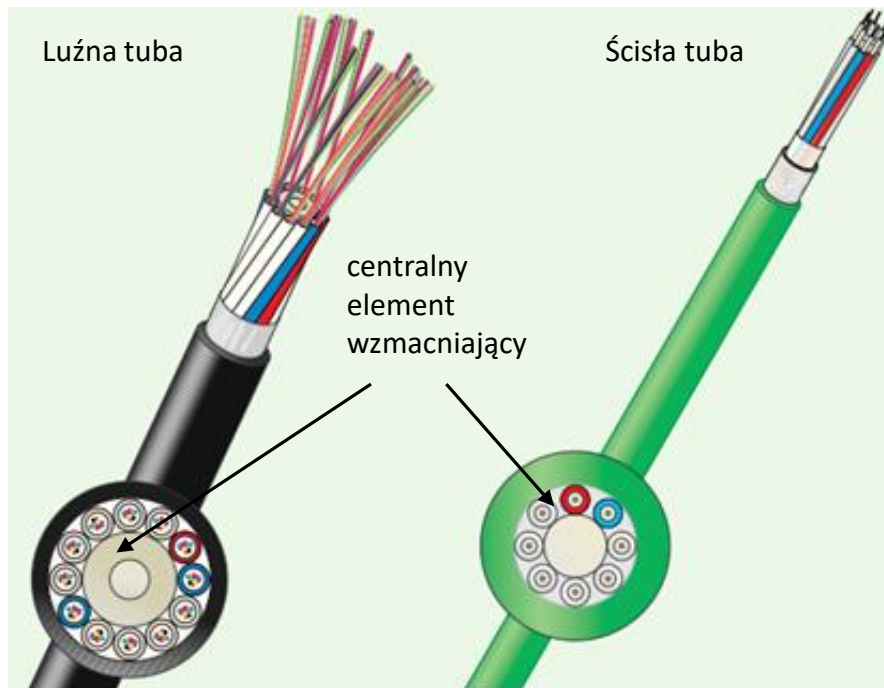
b) Kable światłowodowe w luźnej tubie



Źródło: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002

# Budowa kabli światłowodowych (2)

- Przykłady kabli światłowodowych



Rysunek z książki: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002



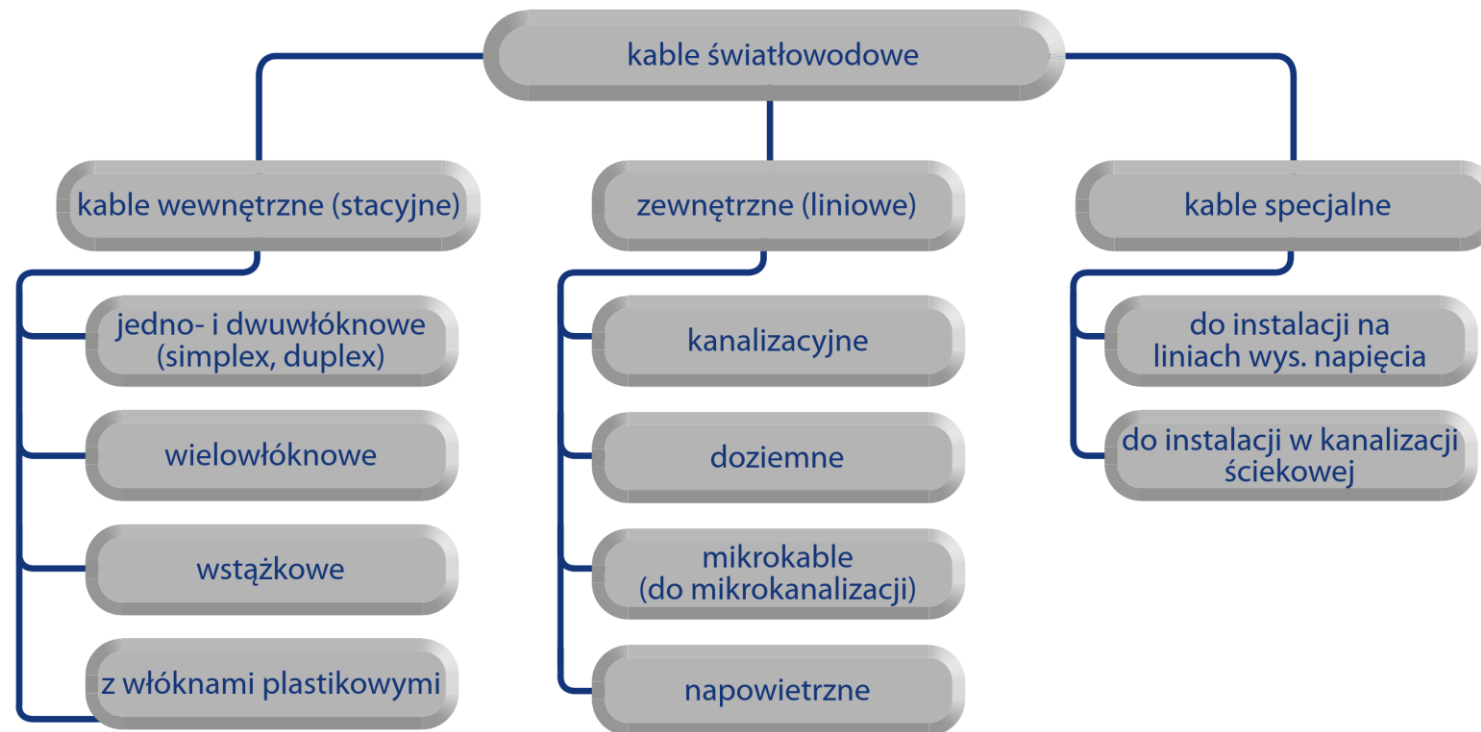
Źródło [www.nai-group.com/optical-fiber-technology-how-it-works/](http://www.nai-group.com/optical-fiber-technology-how-it-works/)





# Budowa kabli światłowodowych (1)

- Ogólna klasyfikacja kabli światłowodowych



# Budowa kabli światłowodowych (3)

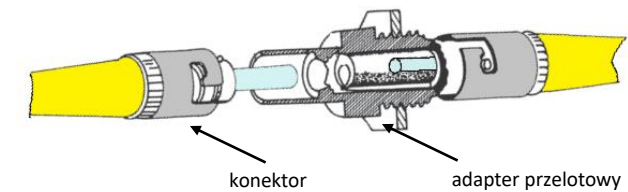
- Łączenie światłowodów/kabli światłowodowych

a) Zgrzewanie (spawanie)



Źródło <http://latestmarketupdates.weebly.com/blog/united-states-fiber-splicer-market-analysis-growth-forecast-analysis-by-manufacturers-regions-type-and-application-to-2025/>

b) złącza (konektory) światłowodowe



LC Connector



SC Connector



ST Connector



MTRJ



MU



E 2000 Connector

Źródło: [www.ad-net.com.tw/16-types-fiber-optic-connectors-choose/](http://www.ad-net.com.tw/16-types-fiber-optic-connectors-choose/)



# Parametry transmisyjne światłowodów (1)

- **Tłumienność**

Moc wiązki optycznej  $P(z)$  propagującej się we włóknie światłowodowym maleje wykładniczo wzdłuż przebytej drogi z zgodnie z zależnością:

$$P(z) = P(0) \exp(-\alpha z)$$

$\downarrow$  droga  
 $\uparrow$  [tłumienie / km] = [dB / km]

gdzie  $P(0)$  oznacza moc początkową a  $\alpha$  to stała tłumienia/tłumienność

**Tłumienność** sygnału  $\alpha$  (tłumienie jednostkowe) jest to tłumienie sygnału przypadające na jednostkę długości toru transmisyjnego. Przyjęto charakteryzować tłumienność danego typu światłowodu poprzez podanie strat, wyrażonych w decybelach, występujących na długości jednego kilometra włókna



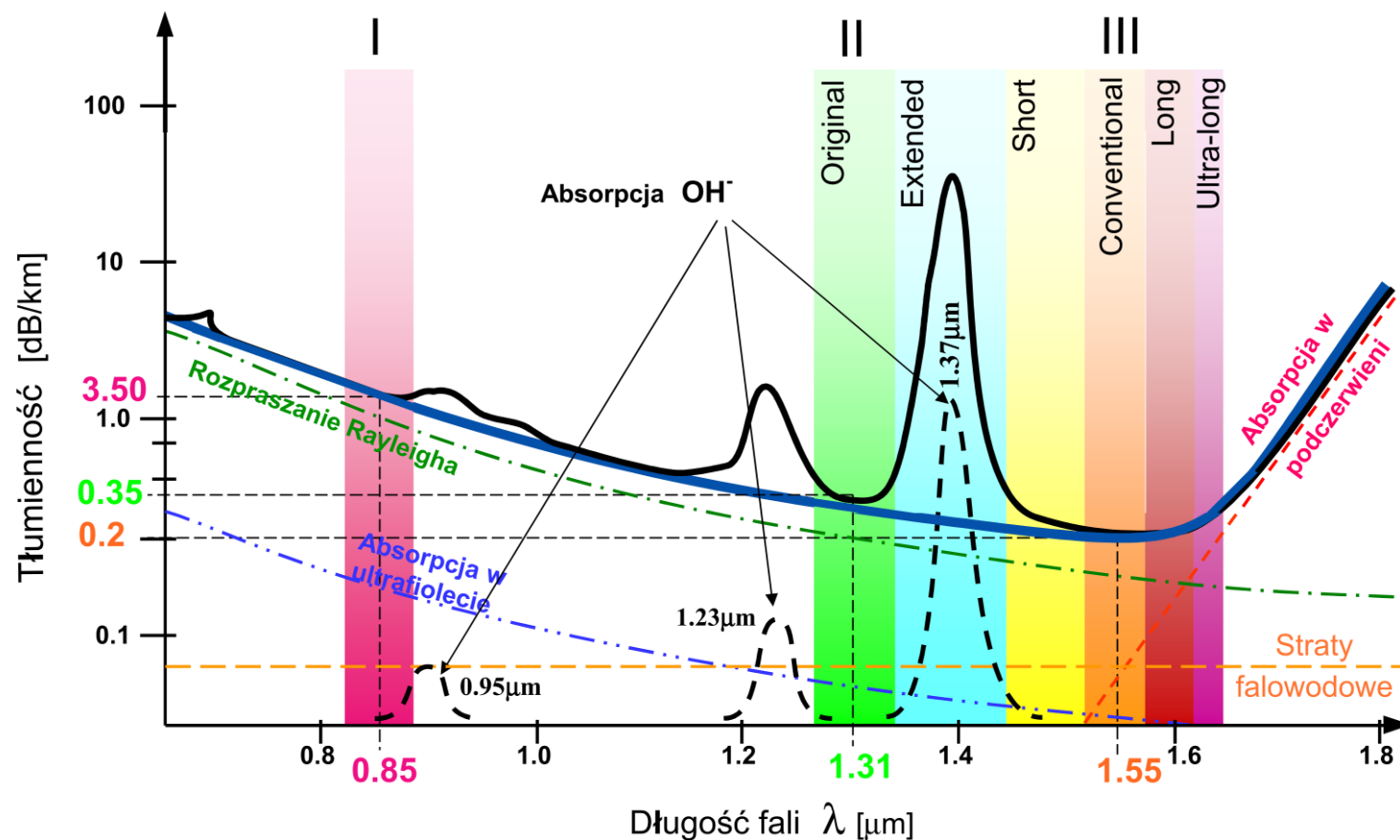
# Parametry transmisyjne światłowodów (2)

- **Tłumienność – przyczyny strat**
- Mechanizmy powstawania strat:
  - **Absorbcja** - w podczerwieni spowodowana drganiami molekularnymi a w ultrafiolecie wybijaniem przez fotony elektronów walencyjnych do pasma przewodnictwa, oraz wpływ domieszkowania i zanieczyszczeń (jony  $\text{OH}^-$ )
  - **Rozpraszanie** (rozpraszanie Rayleigha i rozpraszanie Mie)
  - **Mikro- i makroskopowe zagięcia**
  - **Zjawiska nieliniowe** (Stymulowane rozpraszanie Brillouina i Stymulowane rozpraszanie Ramana)



# Parametry transmisyjne światłowodów (3)

- Tłumienność - okna transmisyjne



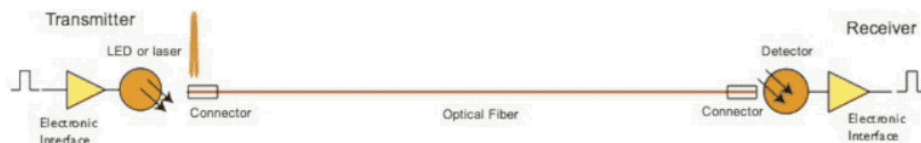
↩ Charakterystyka tłumienia światłowodu kwarcowego w funkcji długości fali

(I) Okno:	800 – 900 nm
(II) Original:	1260 – 1360 nm
Extended:	1360 – 1460 nm
Short:	1460 – 1530 nm
(III) Conventional:	1530 – 1565 nm
Long:	1565 – 1625 nm
Ultra-long:	1625 – 1675 nm

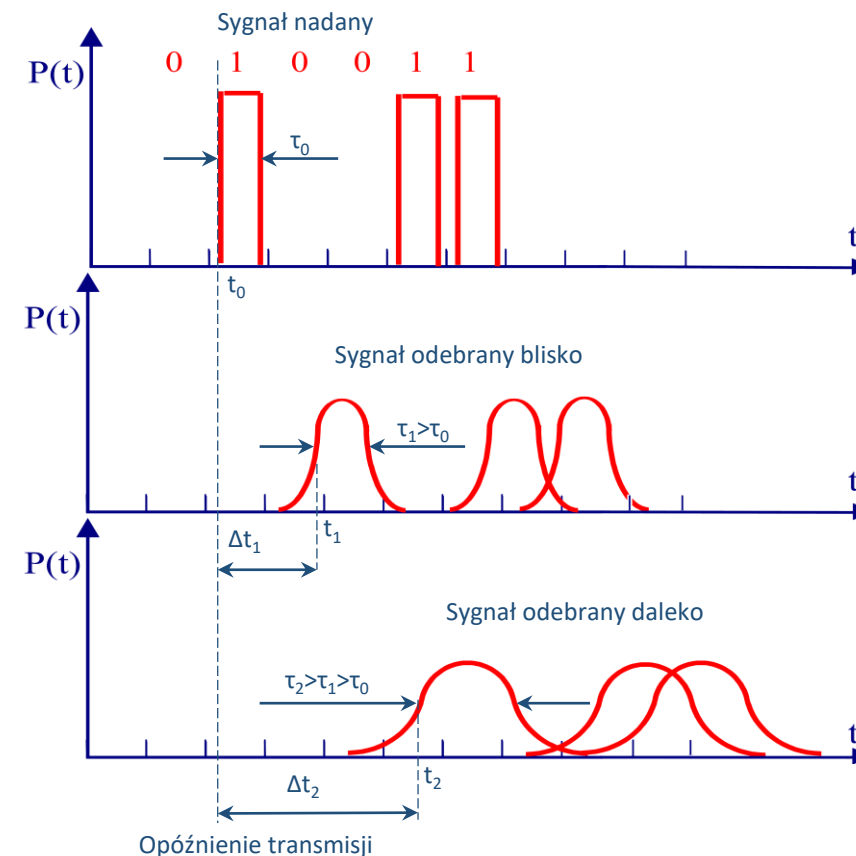
# Parametry transmisyjne światłowodów (4)

## • Dyspersja

- Dyspersja światła wynika z zależności współczynnika załamania od jego częstotliwości
- Widocznym efektem wpływu dyspersji jest rosnące wraz z odległością poszerzenie transmitowanego impulsu, co negatywnie wpływa na szybkość przesyłania informacji



Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>





# Parametry transmisyjne światłowodów (5)

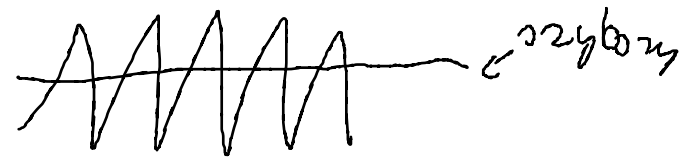
- **Rodzaje dyspersji występującej w światłowodach**

- Dyspersja chromatyczna

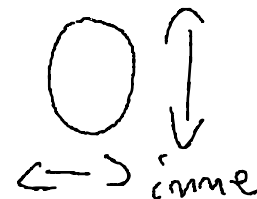
- Dyspersja falowodowa
- Dyspersja materiałowa

- Dyspersja modowa (międzymodowa)

- Dyspersja polaryzacyjna



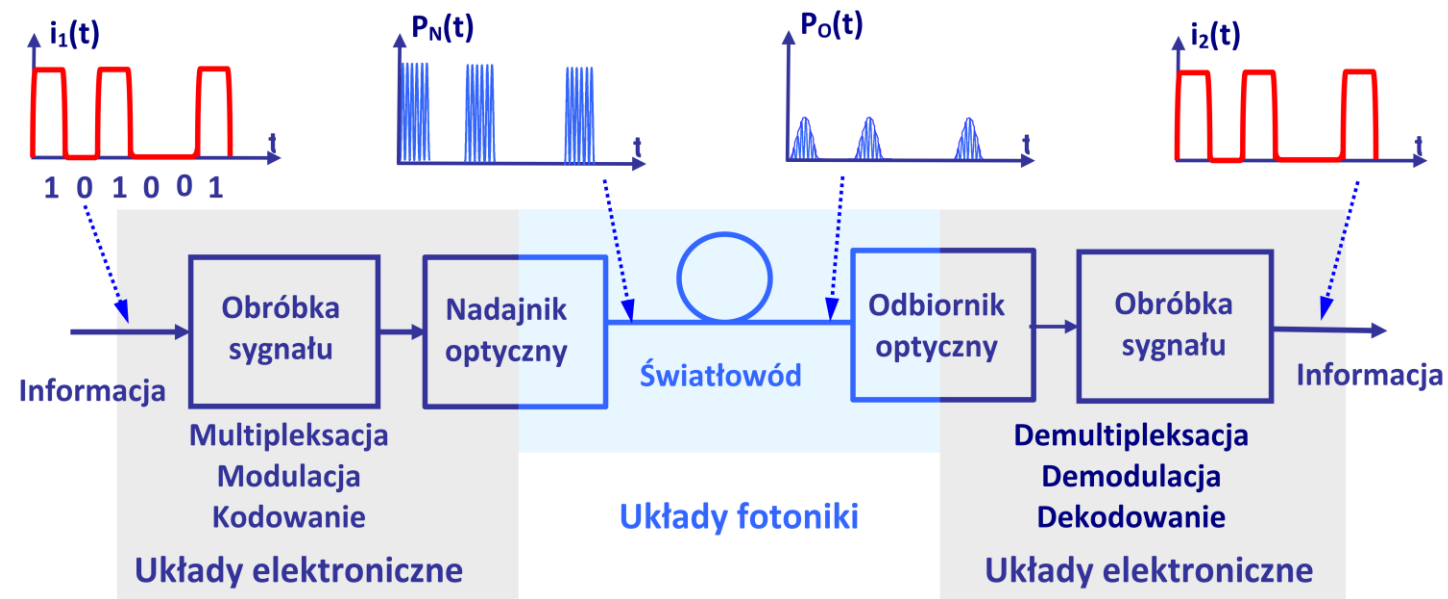
↑  
nieidealna budowa





# Przesyłanie informacji przez światłowód

- Podstawowa struktura łącza światłowodowego do transmisji sygnałów cyfrowych



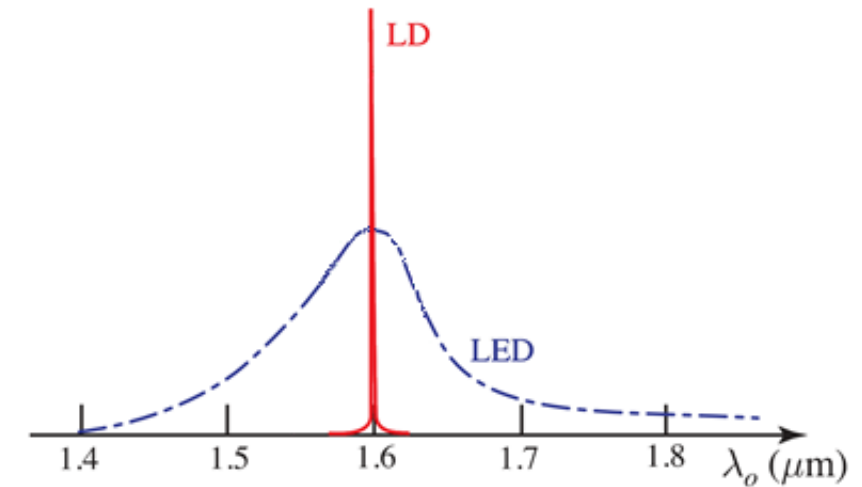
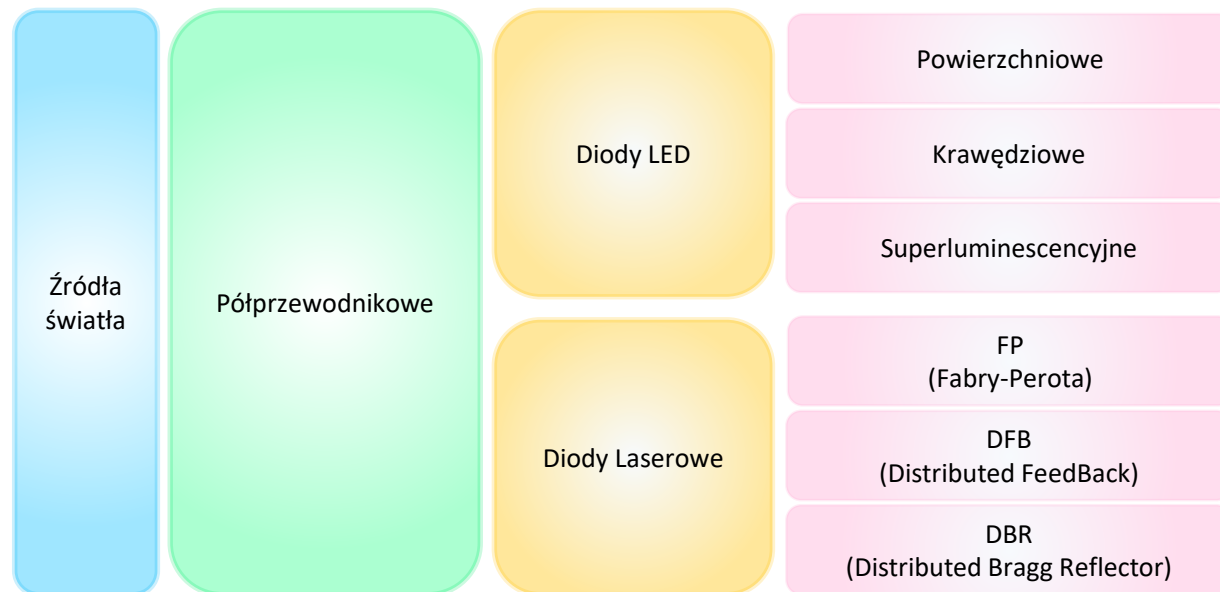
Źródło: B. Galwas, Podstawy telekomunikacji optofalowej, WWSI, 2018





# Przesyłanie informacji przez światłowód

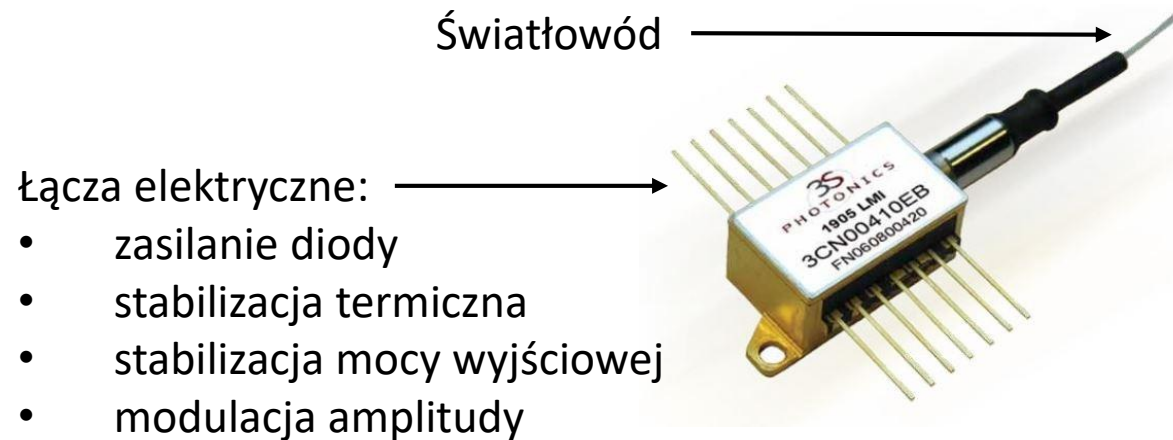
- Źródła światła stosowane w telekomunikacji światłowodowej



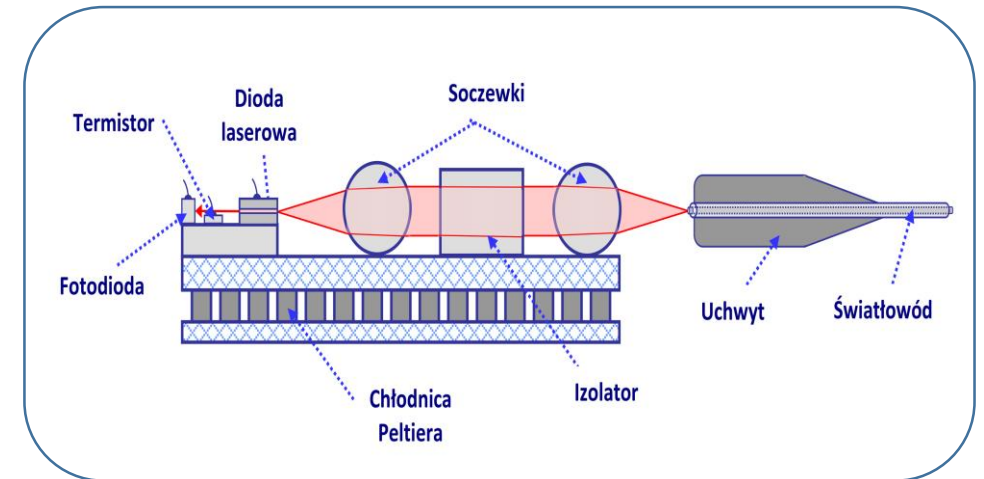
Charakterystyka widmowa diody **LED** i diody laserowej (**LD**)

# Przesyłanie informacji przez światłowód

- **Źródła światła** - diody laserowe, (diody luminescencyjne)



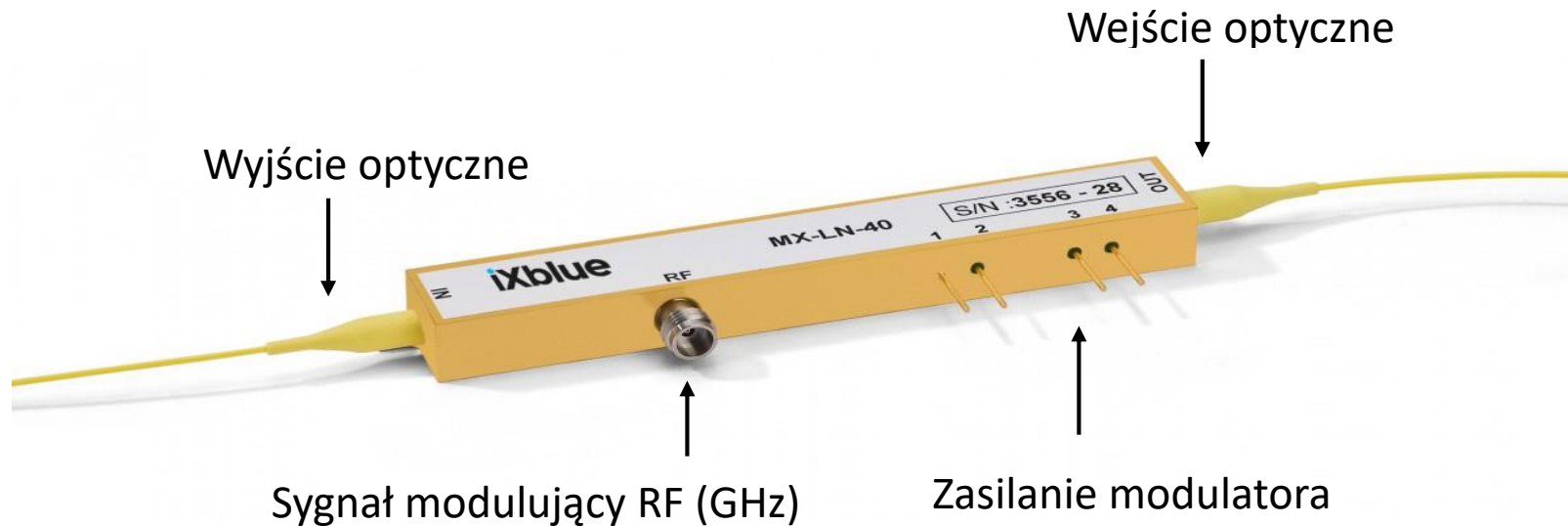
Źródło:  
[www.laserdiodesource.com/shop/1529nm-1569nm-30mW-butterfly-3SPGroup](http://www.laserdiodesource.com/shop/1529nm-1569nm-30mW-butterfly-3SPGroup)



Źródło: B. Galwas, Podstawy telekomunikacji optofalowej, WWSI, 2018

# Przesyłanie informacji przez światłowód

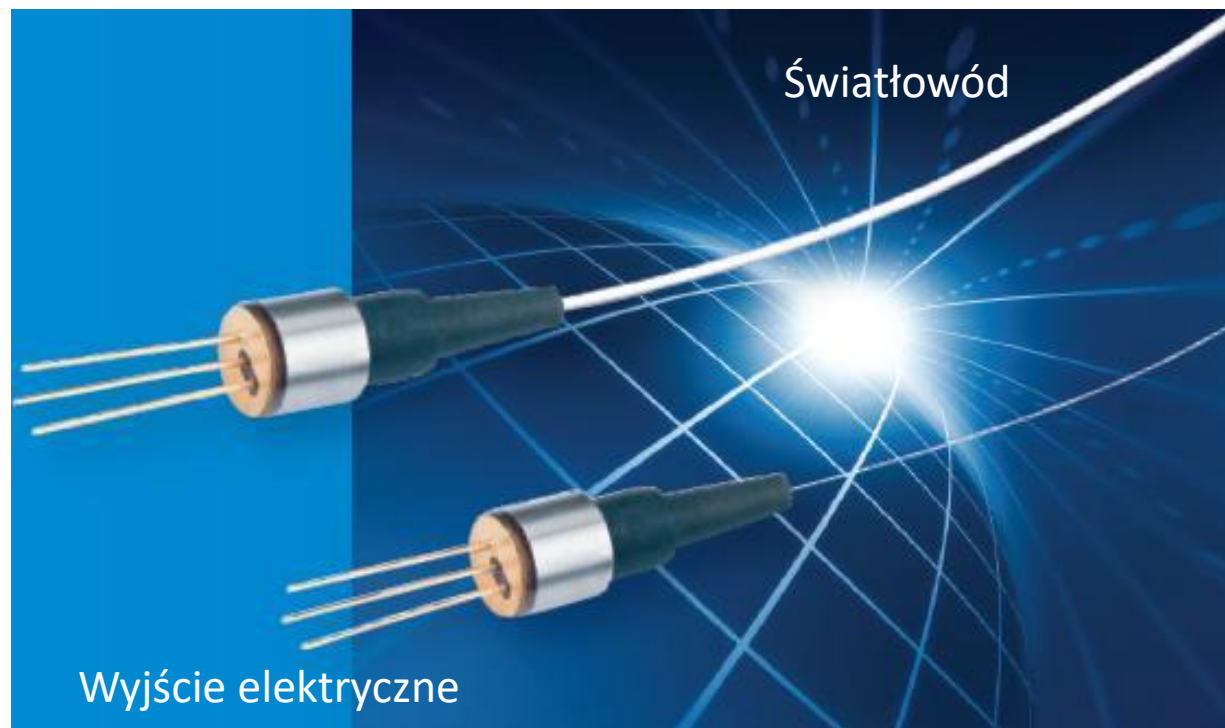
- **Modulacja światła** - modulatory elektrooptyczne



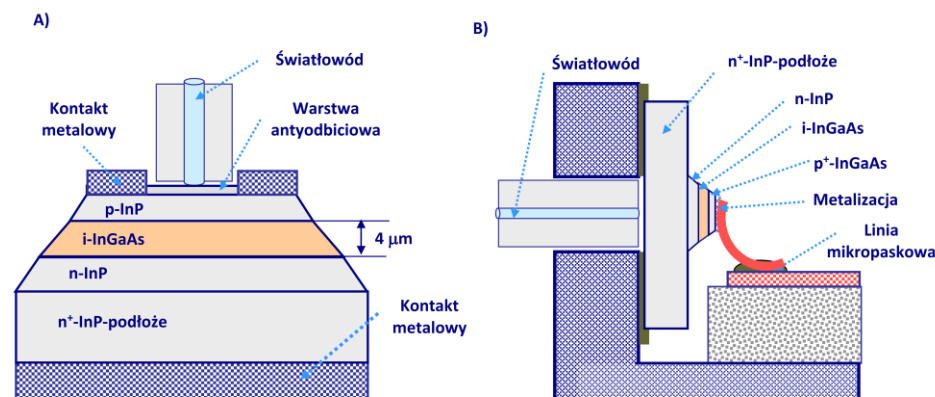
Źródło: <https://photonics.ixblue.com/products-and-applications/lithium-niobate-electro-optic-modulator>

# Przesyłanie informacji przez światłowód

- Detektory światła - diody PIN



Źródło: [www.findlight.net/light-detection-and-measurement/detectors/pin-detectors/ingaas-pin-photodiode-modules-for-telecom-applications](http://www.findlight.net/light-detection-and-measurement/detectors/pin-detectors/ingaas-pin-photodiode-modules-for-telecom-applications)



Fotodioda PIN z warstwą pochłaniającą z InGaAs i z przezroczystymi obszarami p oraz n wykonanymi z InP.  
A) Dioda oświetlona światłowodem „od przodu”  
B) Dioda oświetlona światłowodem od strony podłoża, „od tyłu”

Źródło: B. Galwas, Podstawy telekomunikacji optofalowej, WWSI, 2018



Politechnika  
Wrocławska

# Zagadnienia sprawdzające

- Co to jest światłowód i jaka jest jego budowa?
- Wymień zalety światłowodów
- Wyjaśnij zasadę działania światłowodu
- Podaj klasyfikację włókien światłowodowych
- Jakie są główne parametry transmisyjne światłowodu?
- Jakie czynniki i zjawiska wpływają na powstawanie strat w światłowodach?
- W oparciu o wykres zależności tłumienia światłowodu od długości fali wyjaśnij pojęcie okien telekomunikacyjnych i generacji systemów światłowodowych
- Co to jest dyspersja światłowodu i na co ma wpływ?
- Podaj ogólną klasyfikację kabli światłowodowych
- Narysuj i opisz podstawowy schemat łącza światłowodowego





# Literatura do wykładu

- J. Siuzdak, Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej, WKŁ 1997
- J. Siuzdak, Systemy i sieci fotoniczne, WKŁ 2009
- B. Galwas, Podstawy telekomunikacji optofalowej, WWSI, 2018
- P. Biernacki, M. Szablewska, M. Szymowska, FTTH, czyli po co komu światłowód do domu?, Eurotone SGU, 2010
- J.M. Senior, Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3rd ed. Pearson, 2008
- J. Hecht, Understanding Fiber Optics, 5th ed. Pearson, 2006
- S. Kumar i M. J. Deen, Fiber Optics Communications-Fundamentals and Applications, Wiley, 2014



Politechnika  
Wrocławska

Dziękuję za uwagę