



Politechnika
Wrocławska

Podstawy Telekomunikacji

Światłowody

dr inż. Bogusław Szczupak

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki



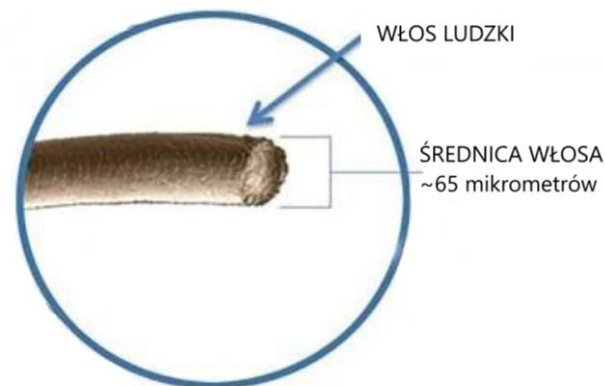
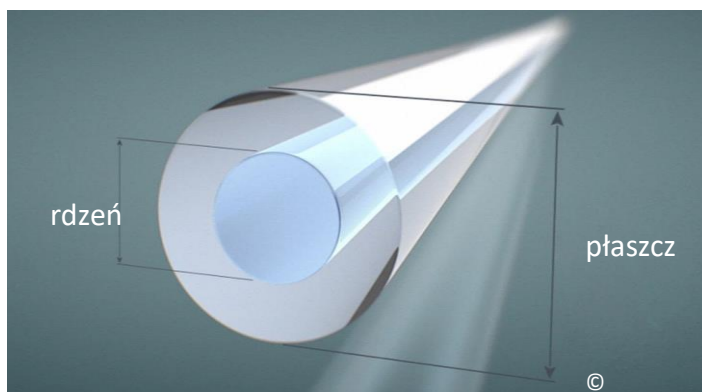
Plan wykładu

- 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 μm . 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



Zasada działania światłowodu (1)

- **Światło jest falą elektromagnetyczną** i jak każda fala elektromagnetyczna, charakteryzuje się częstotliwością f i długością fali λ
- 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)

- 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**



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:

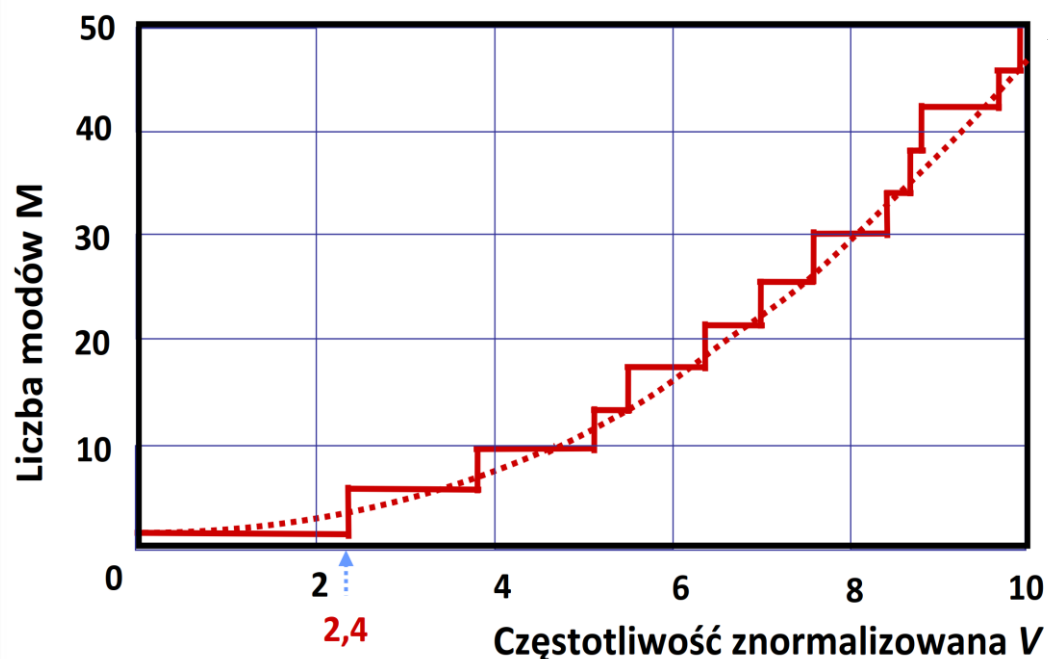
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA \cong \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

gdzie: a oznacza promień rdzenia światłowodu, λ_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



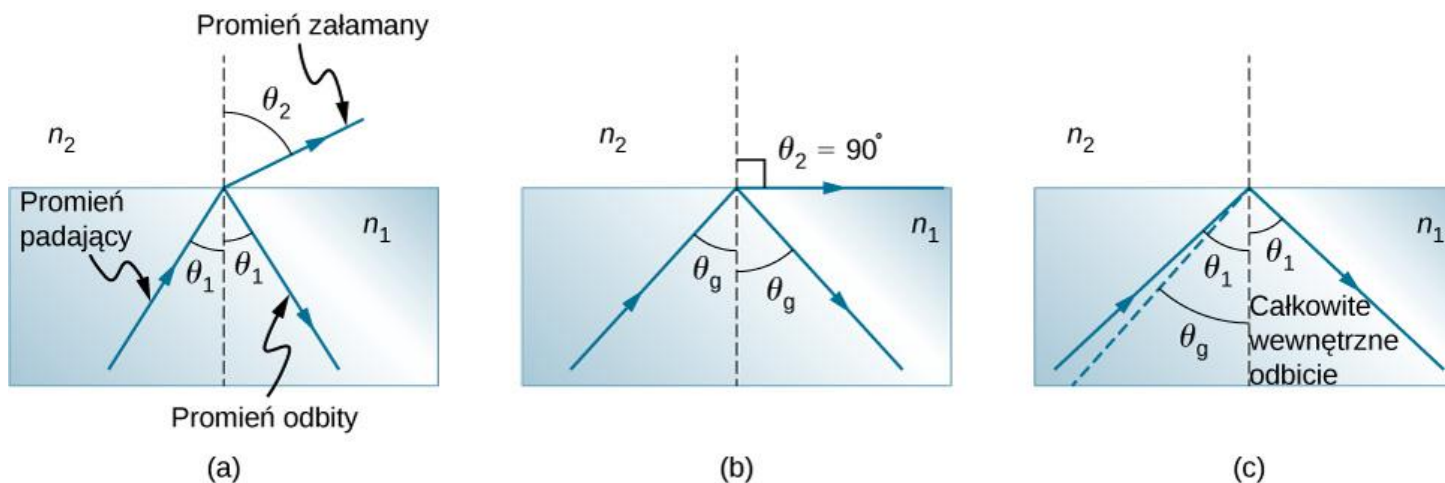
⇐ Dla $V < 2,405$ w światłowodzie wzbudza się tylko 1 mod podstawowy. Dla $V \gg 1$ liczba modów M jest duża i z dobrym przybliżeniem można napisać, że **dla światłowodu o skokowym profilu współczynnika załamania $M = V^2/2$ a dla światłowodu o gradientowym profilu współczynnika załamania $M = V^2/4$**

- 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 θ_g jest kątem padania, dla którego kąt załamania wynosi 90° . **(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

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

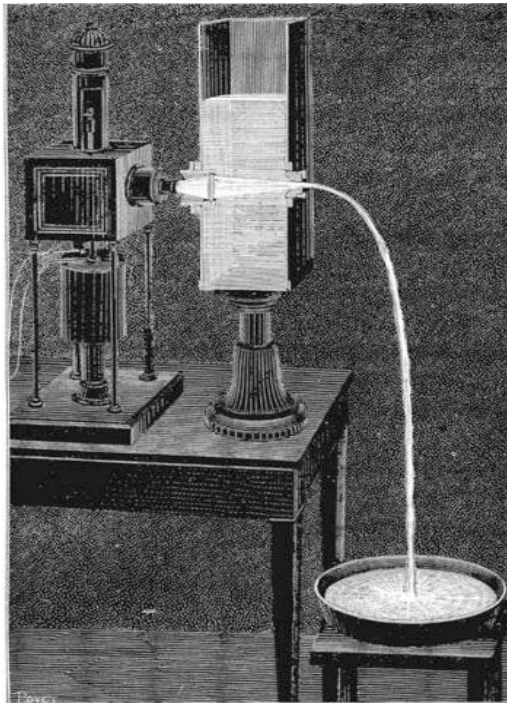
dla $n_1 > n_2$



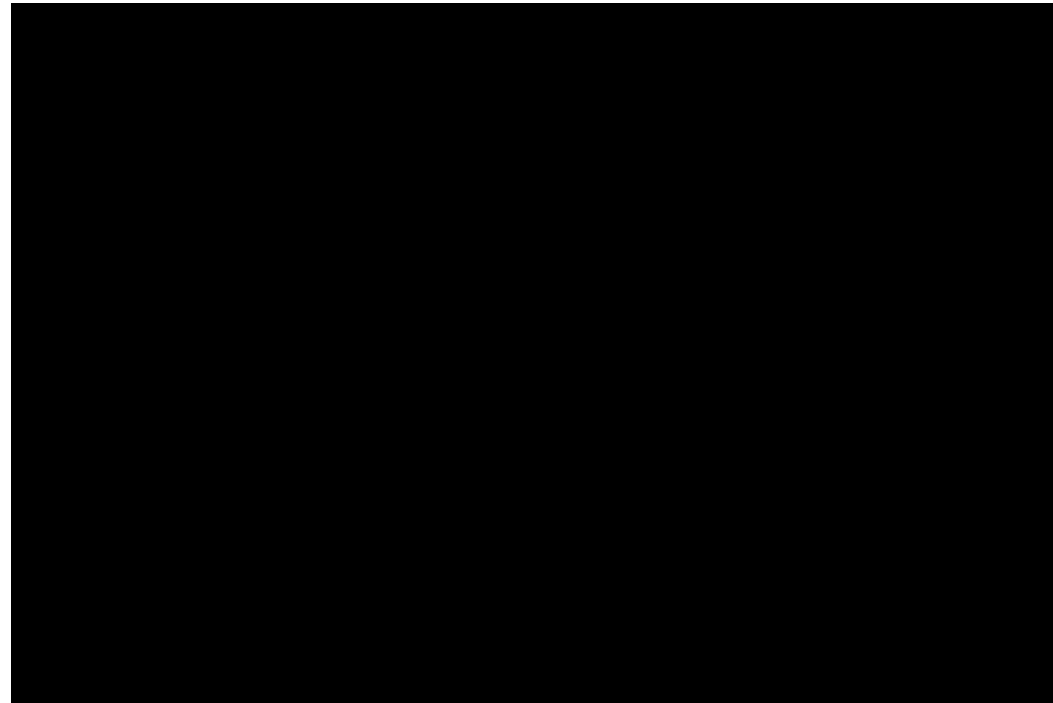
Politechnika
Wrocławska

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

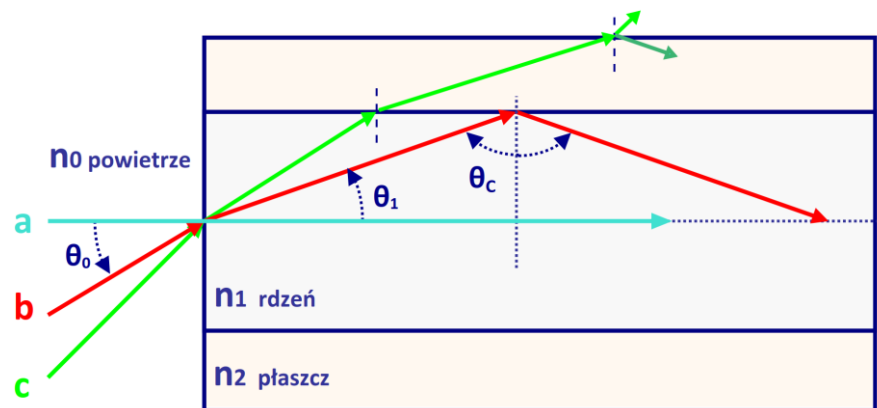


Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=3ZbMq8r1B5g>

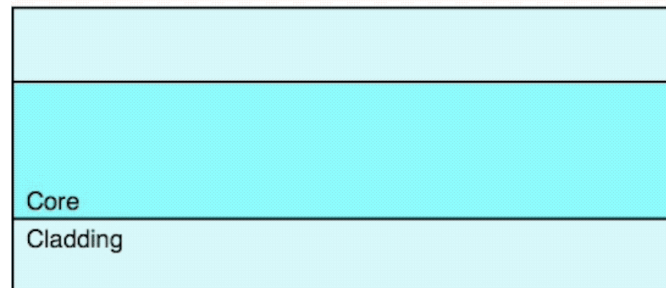


Zasada działania światłowodu (11)

- 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**

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

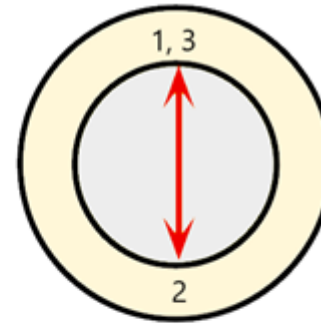
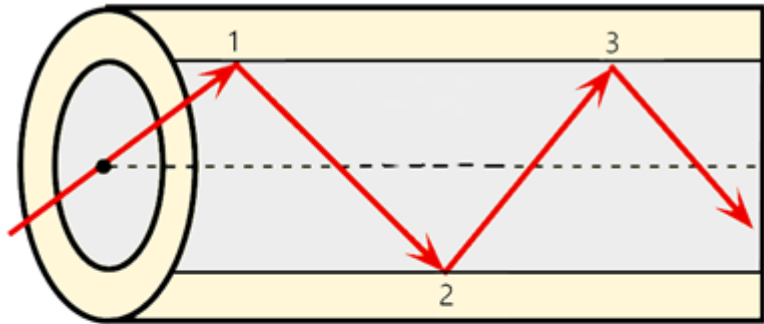
$$NA = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Δ – względna różnica współczynników załamania rdzenia i płaszczu

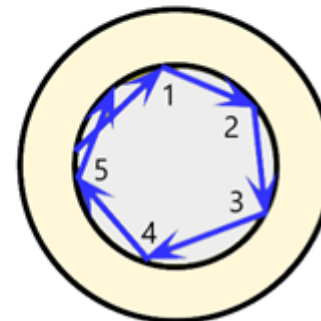
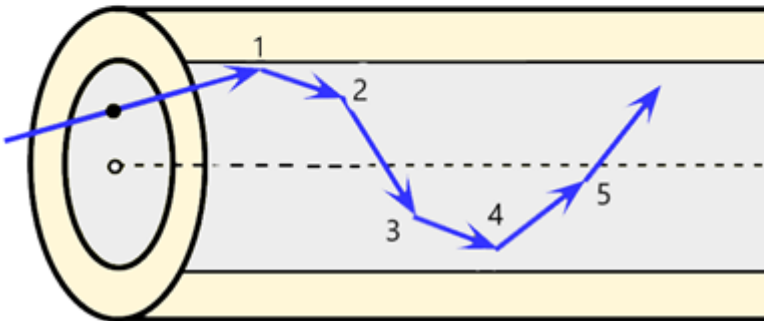
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,001 - 0,02$$

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



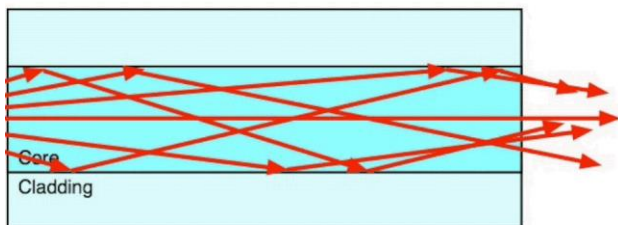
Podział światłowodów (2)

Światłowody jednomodowe:

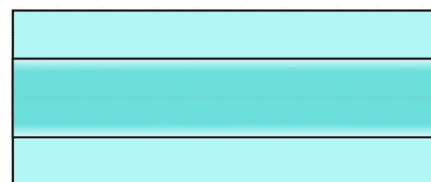
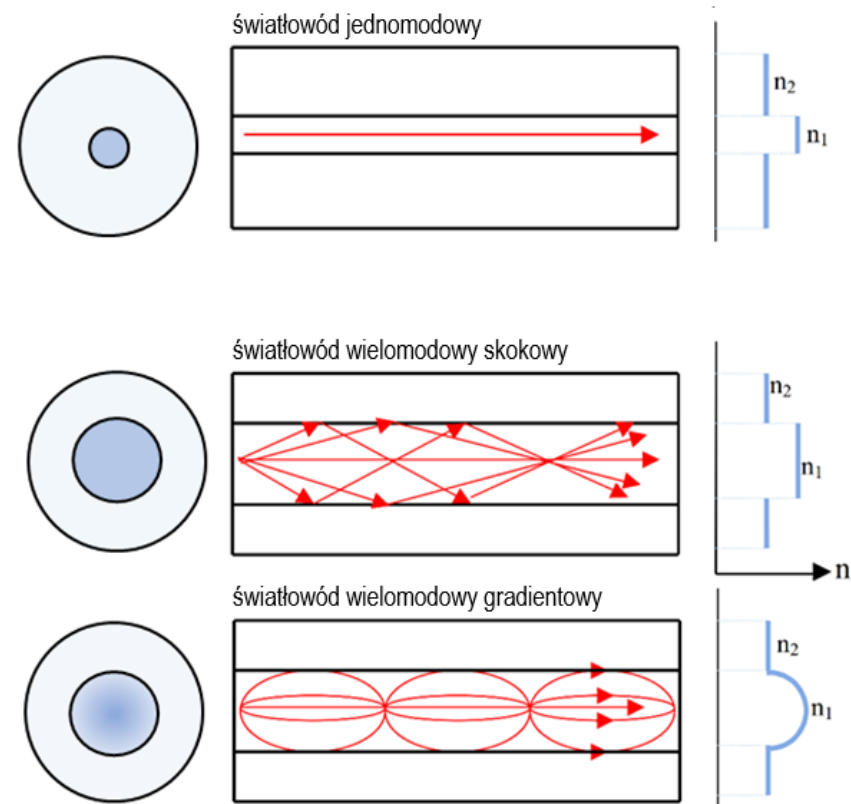
- średnica rdzenia: 5-10 μm
- współczynnik załamania rdzenia $n_1=1,460$
- średnica płaszczka: 125 μm
- współczynnik załamania płaszczka $n_2=1,456$
- $NA = 0,08 - 0,15$

Światłowody wielomodowe:

- średnica rdzenia: 50 μm / 62,5 μm
- współczynnik załamania rdzenia $n_1=1,48$
- średnica płaszczka: 125 μm
- współczynnik załamania płaszczka $n_2=1,46$
- apertura numeryczna $NA = 0,2 - 0,3$



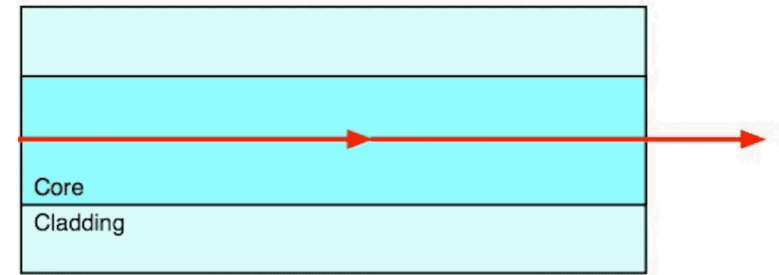
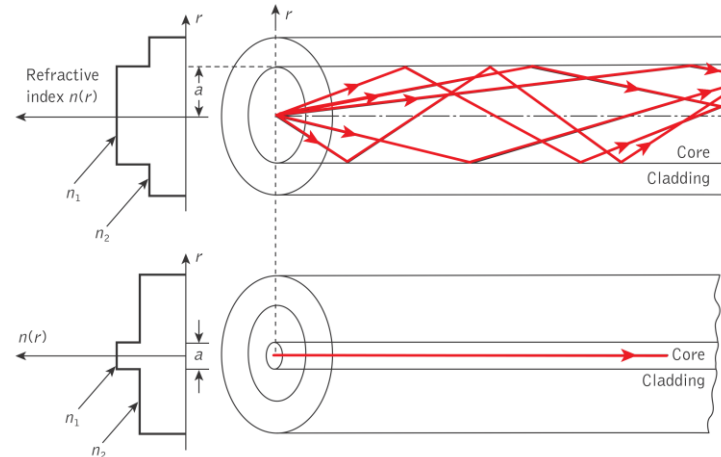
Źródło: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>



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

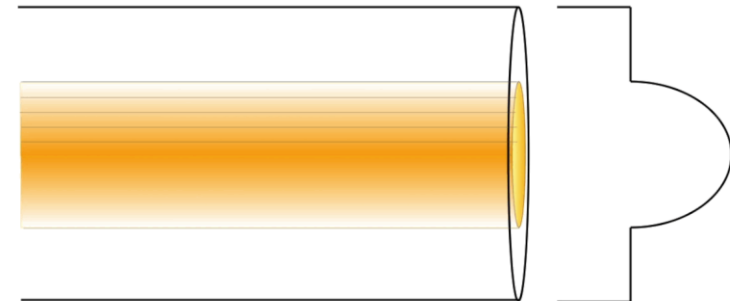
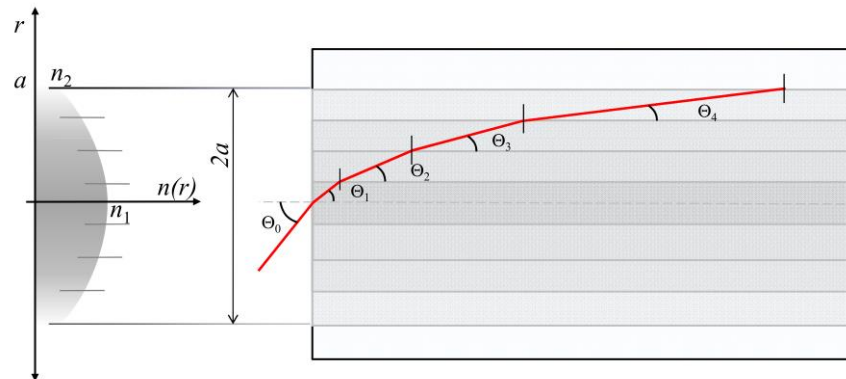
Podział światłowodów (3)

- 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>

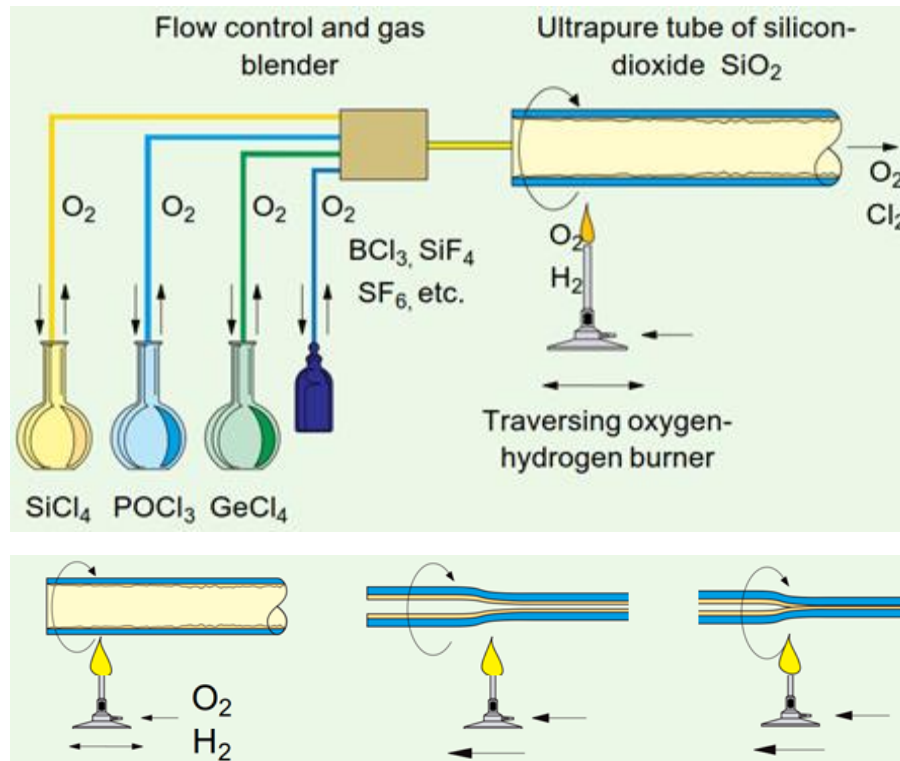


Wytwarzanie światłowodów (1)

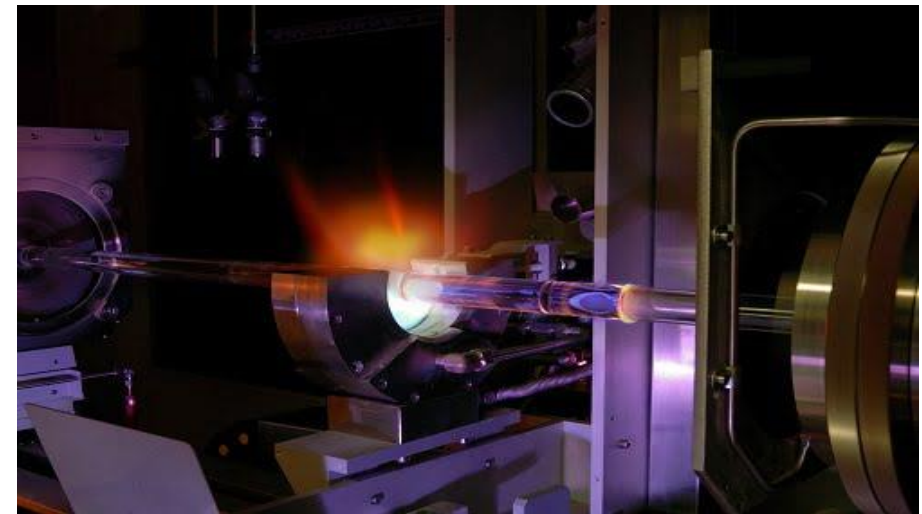
- Metody wytwarzania włókien światłowodowych:
 - Metoda bezpośredniego wyciągania włókna (metoda podwójnego tygla)
 - Metoda wyciągania włókna z preformy
 - Formowanie preformy
 - Wyciąganie włókna z preformy, ochrona i uelastycznianie
- Metody formowania preformy:
 - Metoda zewnętrznego osadzania szkła 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: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002



Źródło: www.photonics.com/Articles/Clemson_Researchers_Seek_Improved_Beam_Quality/a62313

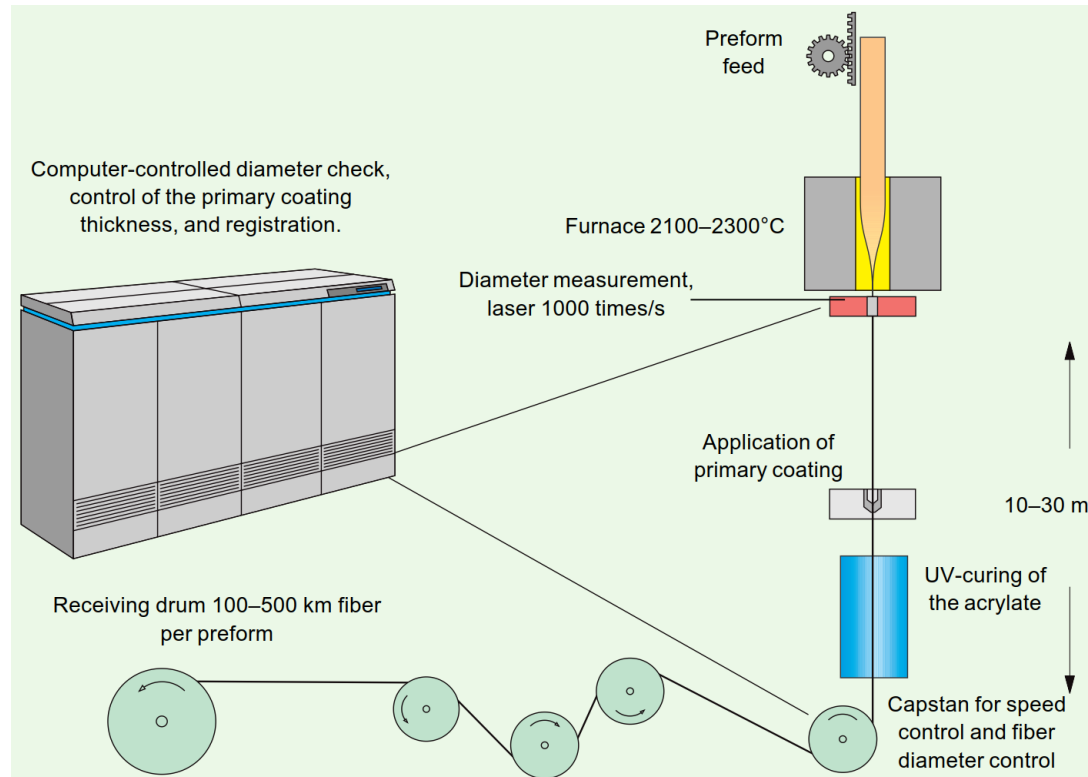
⇐ Kolaps preformy



Politechnika
Wrocławska

Wytwarzanie światłowodów (3)

- Wyciąganie włókna z preformy



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

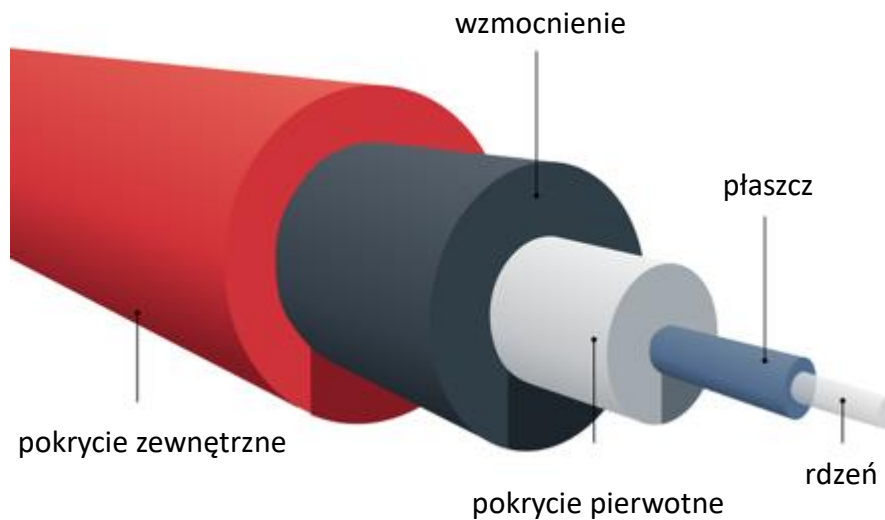


Źródło: www.thorlabs.com

Budowa kabli światłowodowych (1)

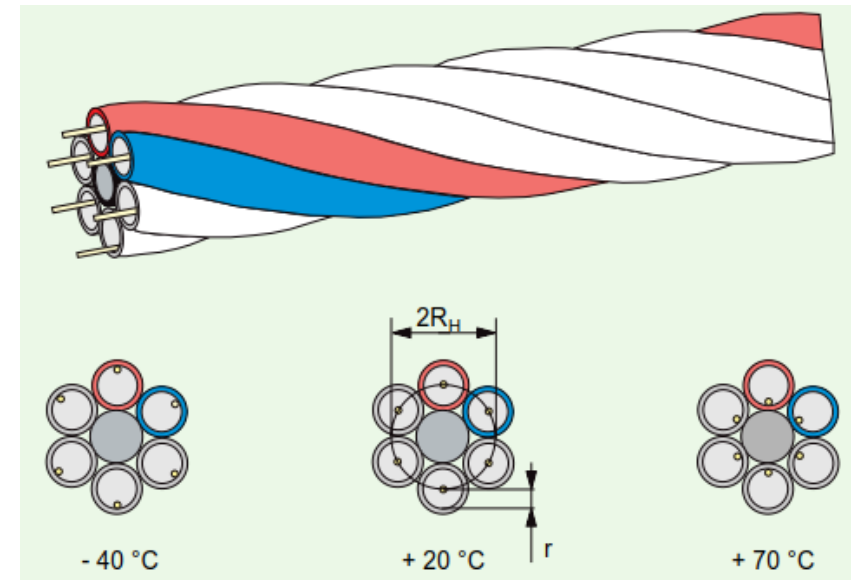
- Struktura kabla światłowodowego zależy od jego przeznaczenia

a) Kable światłowodowe w ścisłej tubie



Rysunek na podstawie: www.ofsoptics.com/optical-fiber-coatings/

b) Kable światłowodowe w luźnej tubie

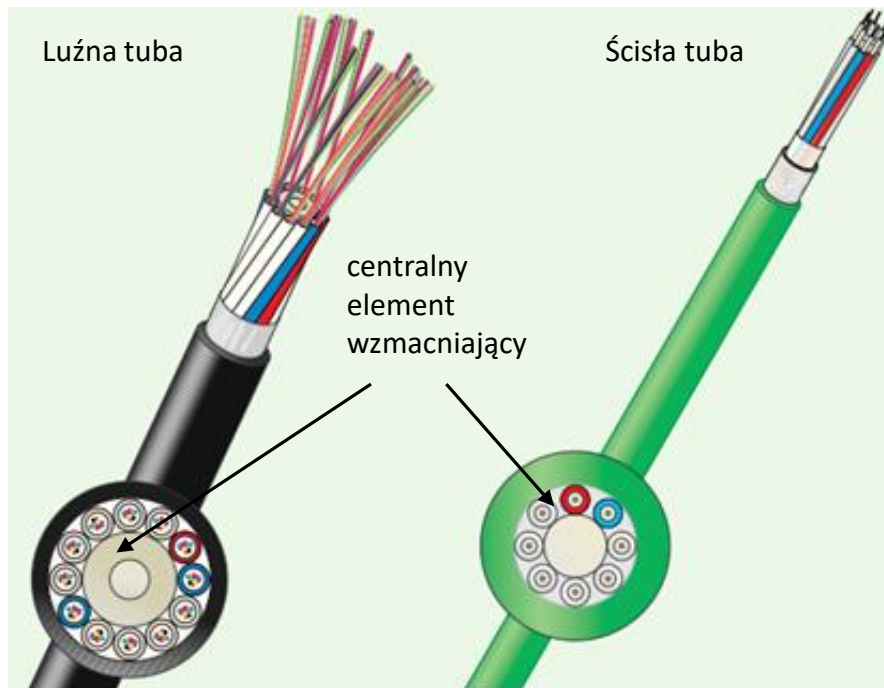


Źródło: S. Nilsson-Gistvik, Optical fiber theory for communication networks, Ericsson, 2002



Budowa kabli światłowodowych (2)

- Przykłady kabli światłowodowych



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

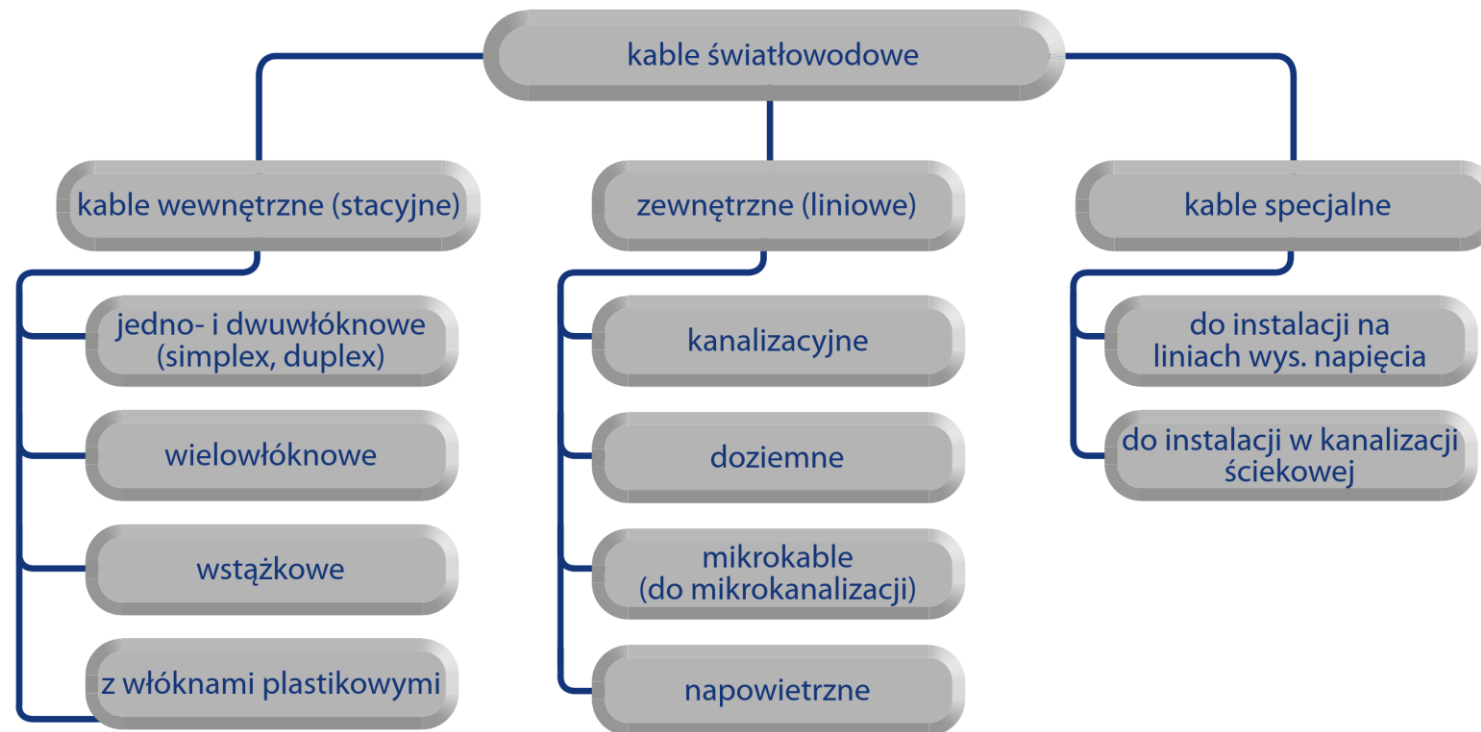


Źródło www.nai-group.com/optical-fiber-technology-how-it-works/



Budowa kabli światłowodowych (1)

- Ogólna klasyfikacja kabli światłowodowych



Budowa kabli światłowodowych (3)

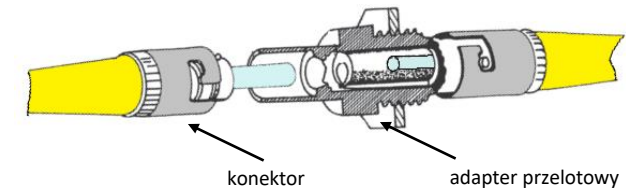
- Łączenie światłowodów/kabli światłowodowych

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



Źródło: 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:

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

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

Tłumienność sygnału α (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



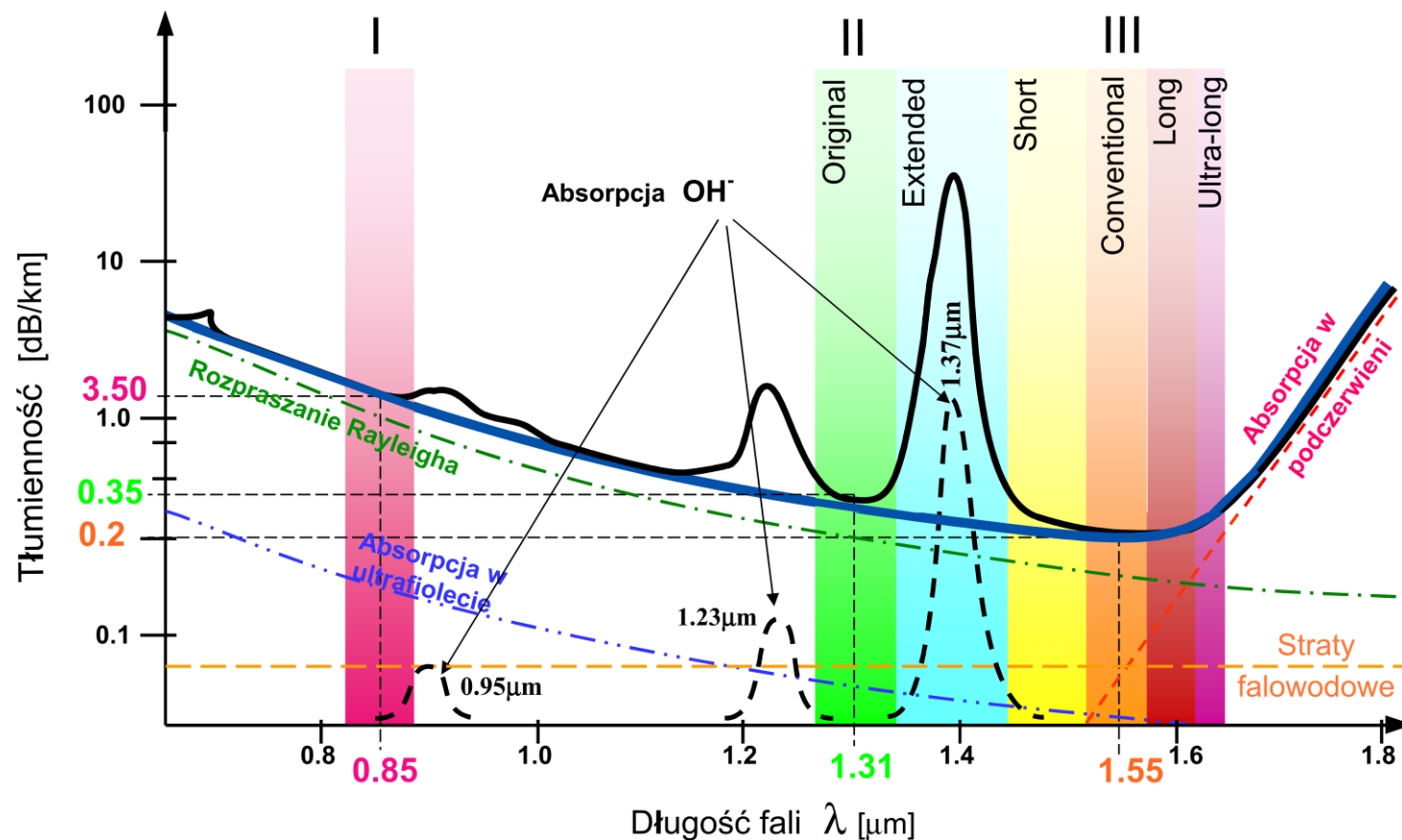
Parametry transmisyjne światłowodów (2)

- **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 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



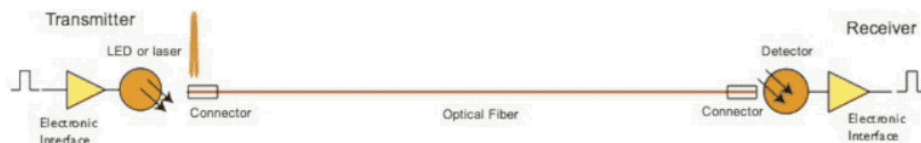
↩ Charakterystyka tłumienia światłowodu kwarcowego w funkcji długości fali

(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

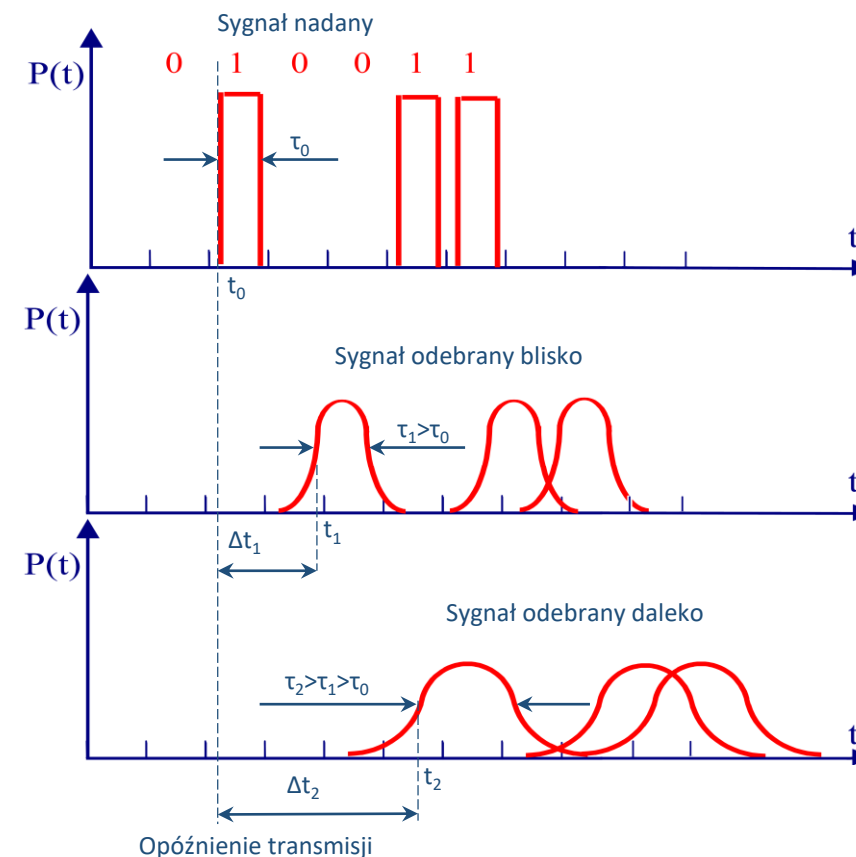
Parametry transmisyjne światłowodów (4)

• 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>





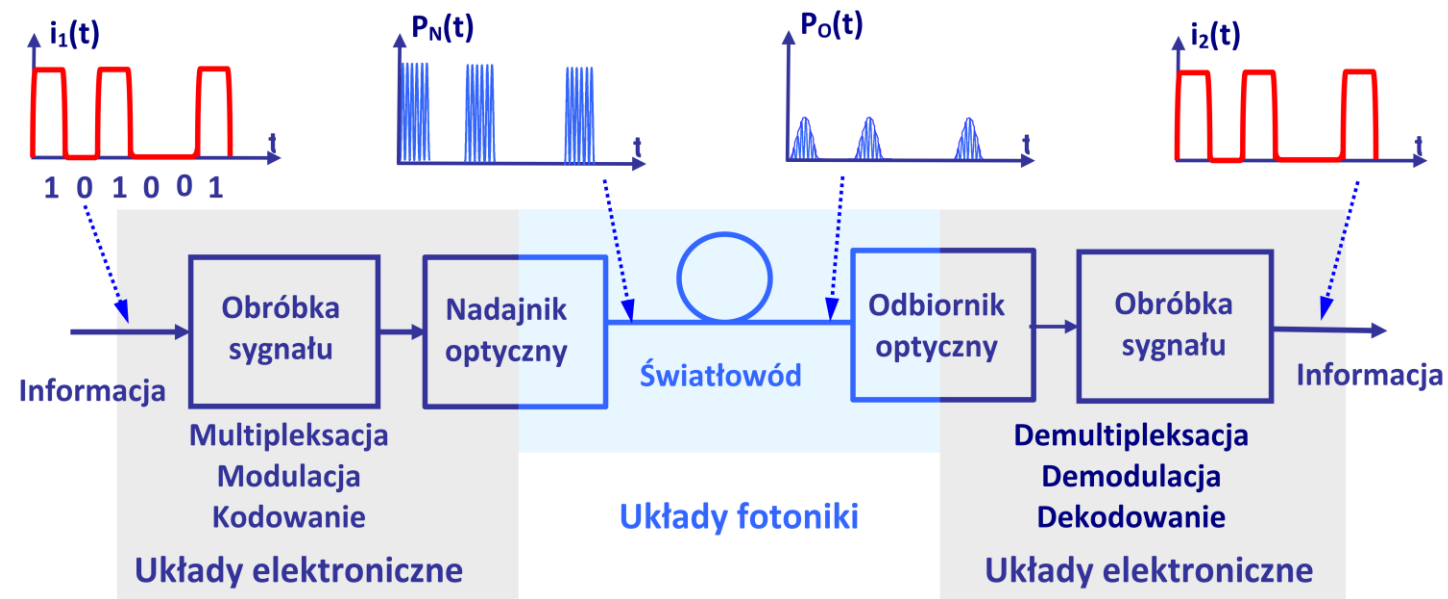
Parametry transmisyjne światłowodów (5)

- **Rodzaje dyspersji występującej w światłowodach**
- Dyspersja chromatyczna
 - Dyspersja falowodowa
 - Dyspersja materiałowa
- Dyspersja modowa (międzymodowa)
- Dyspersja polaryzacyjna



Przesyłanie informacji przez światłowód

- Podstawowa struktura łącza światłowodowego do transmisji sygnałów cyfrowych

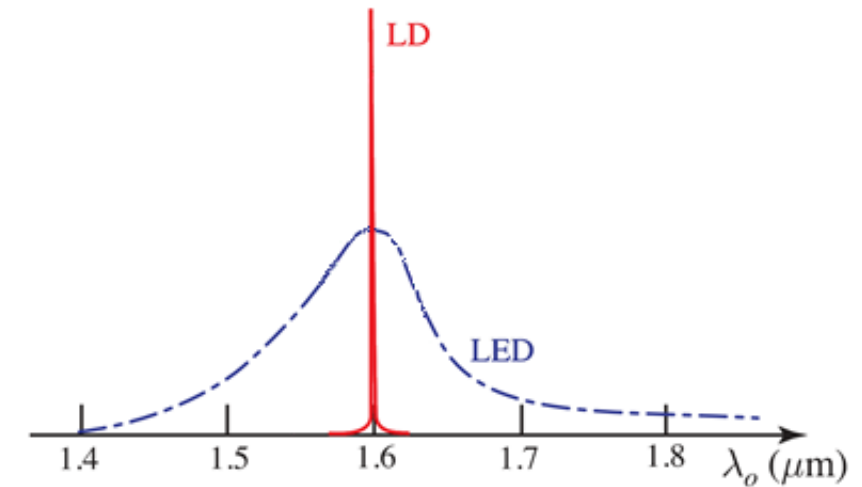
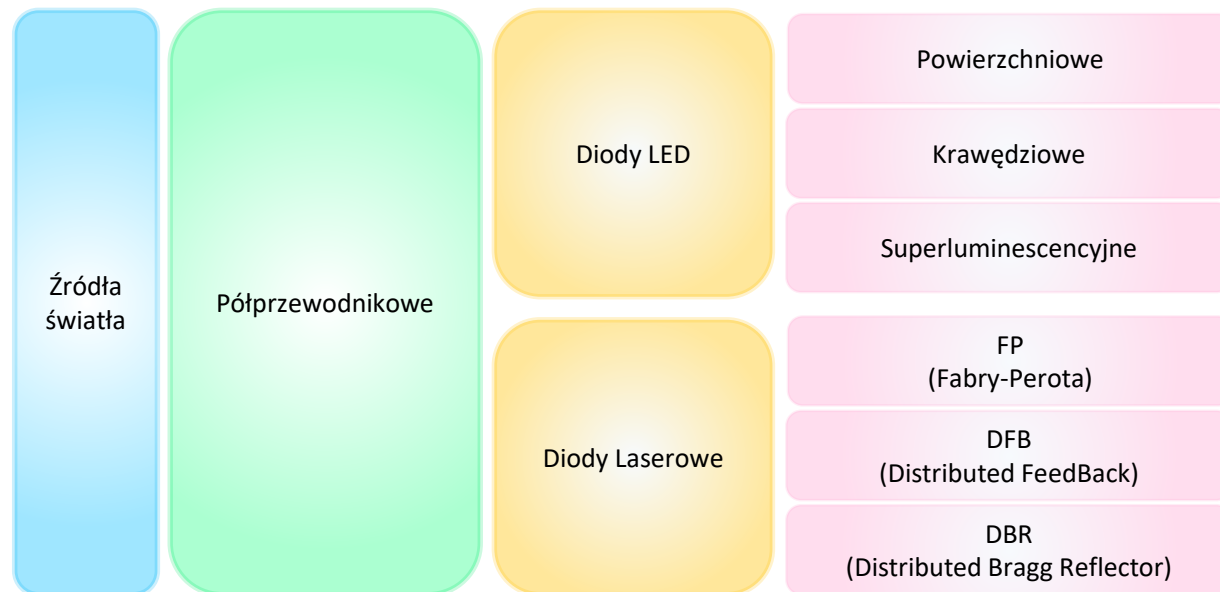


Źródło: B. Galwas, Podstawy telekomunikacji optofalowej, WWSI, 2018



Przesyłanie informacji przez światłowód

- Źródła światła stosowane w telekomunikacji światłowodowej



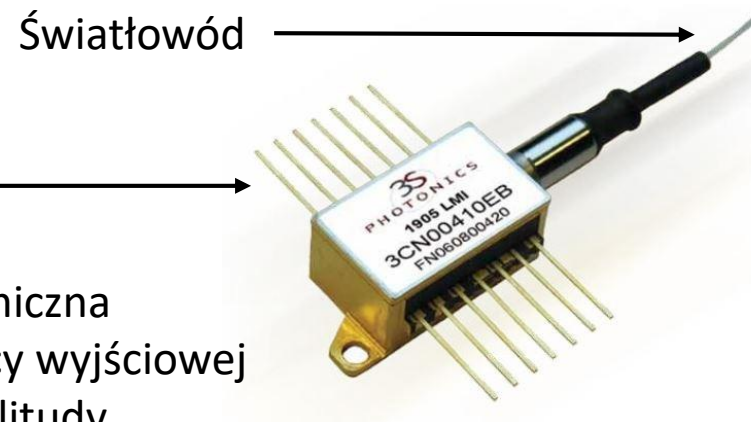
Charakterystyka widmowa diody LED i diody laserowej (LD)

Przesyłanie informacji przez światłowód

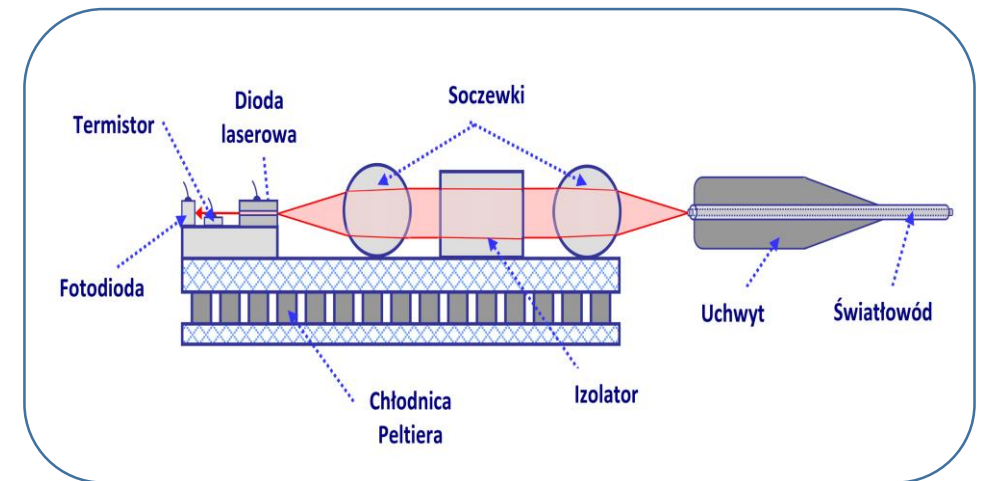
- **Źródła światła** - diody laserowe, (diody luminescencyjne)

Łączya elektryczne:

- zasilanie diody
- stabilizacja termiczna
- stabilizacja mocy wyjściowej
- modulacja amplitudy



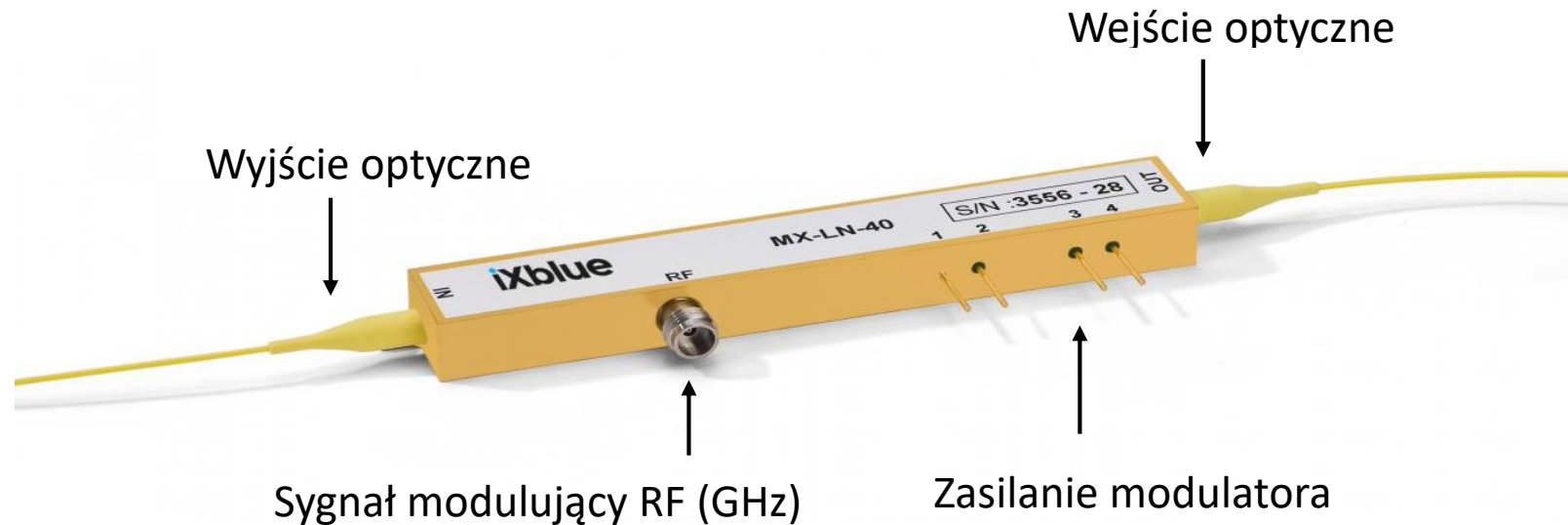
Źródło:
www.laserdiodesource.com/shop/1529nm-1569nm-30mW-butterfly-3SPGroup



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

Przesyłanie informacji przez światłowód

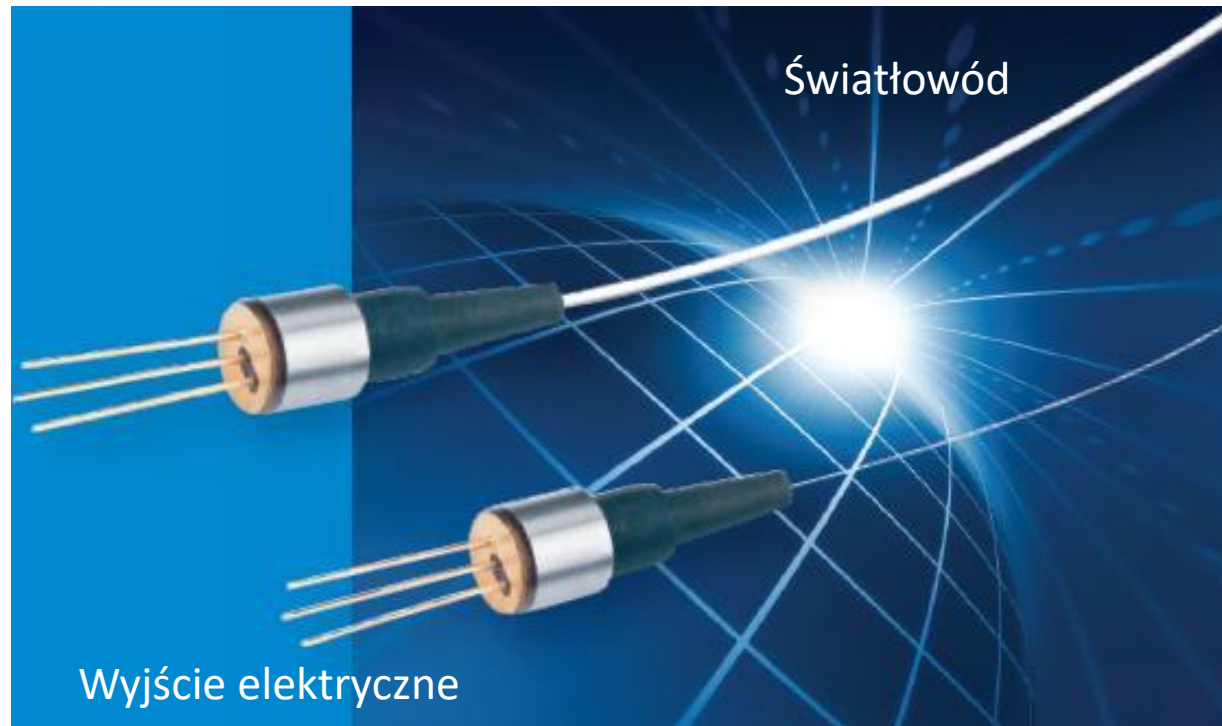
- **Modulacja światła** - modulatory elektrooptyczne



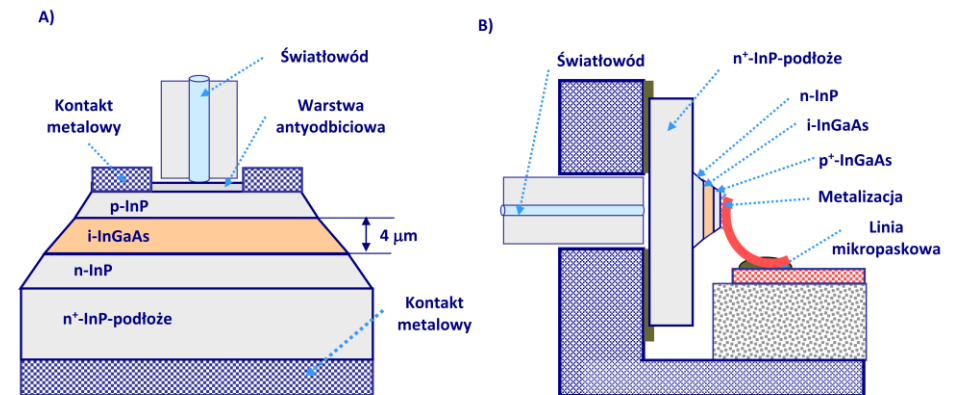
Źródło: <https://photonics.ixblue.com/products-and-applications/lithium-niobate-electro-optic-modulator>

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



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



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