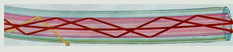
Światłowody – elementarz



Trochę historii ...

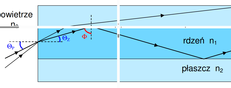
- 1854 - John Tyndall - propagacja światła w strumieniu wody

- 1940 - metoda wytwarzania czystego SiO_2 (Corning Glass)
- 1962 - laser półprzewodnikowy GaAs (GE, IBM, MIT)
- 1974 - światłowód o tłumieniu < 2 dB/km;
- 1978 - laser na pasmo 1300 nm
- 1980 - laser na pasmo 1550 nm
- 1987 –światłowodowy wzmacniacz optyczny EDFA
- 1990 – multipleksacja falowa WDM (Bell Labs)

Dlaczego transmisja światłowodowa?

- Potencjalnie bardzo szerokie pasmo transmisyjne (kilkadziesiąt THz)
- Niskie tłumienie
- Odporność na zaburzenia elektromagnetyczne
- Brak generacji zewnętrznych pól EM
- Separacja galwaniczna pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem
- Mały ciężar włókna światłowodowego

Idea propagacji światła w światłowodzie skokowym



$n_1 > n_2$!!!

$n_0 \sin\Theta_P = n_1 \sin\Theta_P$ (zasada Snelli sa)

$n_1 \sin\Phi_P = n_2 \sin\Phi_P \longrightarrow \sin\Phi_K = n_2 / n_1 \longrightarrow$ dla $\Phi > \Phi_K$ zachodzi całkowite wewnętrzne odbicie

apertura numeryczna $NA = \frac{n_1}{n_0}\sin\Theta_{PK} \approx \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$

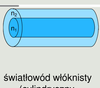
n_1=1,46 n_2=1,42 $\Rightarrow$ NA=0,34 (kąt akceptacji 20°)
n_1=1,44 n_2=1,42 $\Rightarrow$ NA=0,24 (kąt akceptacji 13°)

Problem:

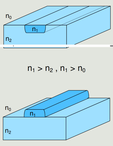
Czy apertura numeryczna powinna być duża, czy mała?

$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \approx$ kąt akceptacji (w radianach)

Konstrukcje przestrzenne światłowodów



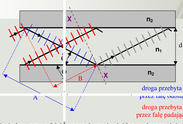
światłowód włóknisty (cylindryczny, o przekroju kołowym)



$n_1 > n_2$, $n_1 > n_0$

światłowody planarne

Ilustracja powstawania modów propagacyjnych



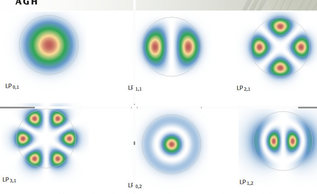
Pomijając przesunięcie fazy przy odbiciu warunek zgodności faz w płaszczyźnie X ma postać:

$A - B = m\lambda_1$ (λ_1 to dł. fali w osr. o wsp.zal. n_1)

co prowadzi do: $2d \sin\Theta = m\lambda_1$

MODY PROPAGACYJNE - różne rodzaje pól, które mogą się rozchodzić w światłowodzie ≈ zbiór możliwych „zygzaków"

Rozkład gęstości mocy dla różnych modów

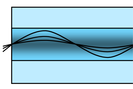


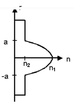
Uwaga: dystrybucja mocy wykracza poza obrys rdzenia!

Parę wątpliwości

- Czy wielość modów jest korzystna czy niekorzystna?
- Czy można korzystając z kilku modów przesyłać kilka niezależnych sygnałów?
- Czy mod trzeba wzbudzić, czy wzbudzi się sam?

Światłowód gradientowy

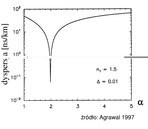




$$n(r) = n_1\left(1 - \Delta(r/a)^{\alpha}\right) \quad ; \quad r < a$$

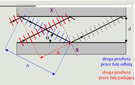
$$n(r) = n_2 \quad ; \quad r \geq a$$

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$$



źródło: Agrawal 1997

Światłowód jednomodowy



$$A - B = 2d\sin\Theta = m\lambda_1 = m\frac{\lambda_0}{n_1}$$

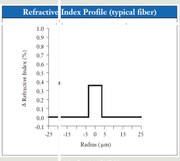
$$m = \frac{2d\sin\Theta}{\lambda_0}n_1 < 1$$

$$d \leq \frac{\lambda_0}{2\cdot NA}$$

Dokładne rozwiązanie równań Maxwella dla światłowodu cylindrycznego daje wynik:

$$d \leq 0.77\frac{\lambda_0}{NA}$$

Profil wsp. załamania standardowego światłowodu jednomodowego

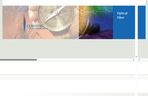


źródło: Corning, SMF-28

Uwaga 1.

Światłowód z napisem „jednomodowy" nie w każdych warunkach jest jednomodowy:

$$d \leq 0.77\frac{\lambda}{NA} \quad \Longrightarrow \quad \lambda \geq \frac{d\cdot NA}{0.77}$$



$\Longrightarrow$ *Cable Cutoff Wavelength* (λ_{cc})
$\lambda_{cc} \leq 1260$ nm

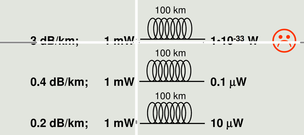
Uwaga 2.

W wielu zastosowaniach praca z częstotliwością zamiast dł. fali **w próżni**, po czym zapominamy, że w takiej konwencji w ośrodku materialnym wynosi ona λ/n !

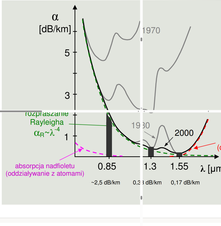
Tłumienność światłowodów

tłumienie światłowodu = absorpcja + rozpraszanie

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R$$

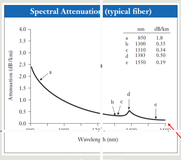


Tłumienność światłowodu



$$\alpha_R = \frac{C}{\lambda^4}$$

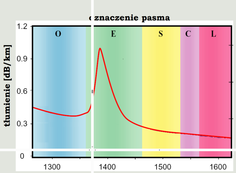
$$C \approx 0.7 \ldots 0.9 \cdot 60\Delta n \left[\frac{\text{dB}\cdot\mu\text{m}^4}{\text{km}}\right]$$



źródło: Corning, SMF-28

???

Tłumienność i pasma transmisyjne



długość fali [nm]

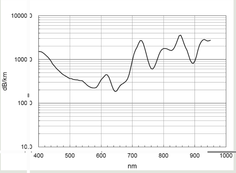
Światłowody plastikowe

POF – Plastic/Polymer Optic 1 Fiber

rdzeń – PMMA – Polymethyl-I lethacrylate (plexi)

polimery fluorowane LUCINA fiber)

płaszcz – fluorowany PMMA



Światłowody plastikowe - przykłady

- *Rdzeń skokowy*
  - *Mitsubishi ESKA*
    - *486/500 – 2944/3000; α ~200 dB/km @ 650 nm*
  - *AsahiKasei*
    - *1000/2200; α ~150 dB/km @ 650 nm*
- *Rdzeń gradientowy*
  - *FiberFin*
    - *675/750; α ~200 dB/km @ 650 nm; pasmo > 1.5 GHz/100m*
  - *Chromis Fiberoptic*
    - *120/490; 50/490; α ~60 dB/km @ 820 & 1300 nm*
- *Rdzeń jednomodowy*
  - *Paradigm Optics*
    - *3.13/115; 8/125*

Przykładowe parametry światłowodów

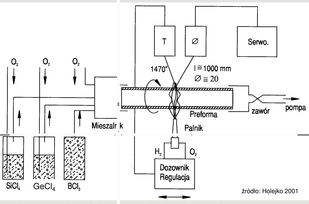
parametr	plastikowy	skokowy	gradientowy	jednomodowy	
długość fali [μm]	0.68	0.85 ÷ 1.3	0.85 ÷ 1.3	1.3	1.5
średn. rdzenia [μm]	500 ÷ 1000	50 ÷ 200	50 ÷ 100	10	10
średn. płaszcza [μm]		125 ÷ 380	125 ÷ 140	125	125
tłumienie [dB/km]	190	6	5 ÷ 1	0.35	0.22
NA	0.5	0.2 ÷ 0.4		0.1	0.1
cena [$/km]			300	100	100

Perspektywy „rewolucji" światłowodowych

- **nowe materiały;** szkła fluorkowe, chalkogenkowe, germanianowe
  α ~ 0,01 dB/km @ 2,5 μm

- **światłowody dziurowe** (photoniczne)
  ang. hollow-core photonic bandgap fibers

Wytwarzanie preformy metodą MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition)



$SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2\,Cl_2$

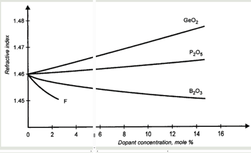
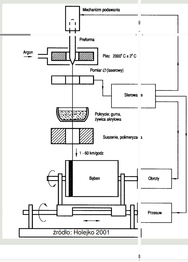
$GeCl_4 + O_2 \rightarrow GeO_2 + 2\,Cl_2$

$BCl_4 + O_2 \rightarrow BO_2 + 2\,Cl_2$

szybkość osadzania – 0.5 g/min

czas trwania procesu – 2 h (collaps)

Wpływ domieszkowania na wsp. załamania



Wyciąganie włókna