

Zjawiska nieliniowe w światłowodach

W11OPA-SM0050W
rok akademicki 2025/26
semestr zimowy

Wykład 1

Karol Tarnowski

karol.tarnowski@pwr.edu.pl

L-1 p. 221

Plan wykładu

Przełomowe obserwacje

- prowadzenie światła w światłowodach
- obserwacje zjawisk nieliniowych

Typy światłowodów

Właściwości światłowodów

- tłumienie
- dyspersja chromatyczna
- nieliniowość

Przełomowe obserwacje



1841 – **Colladon**

1854 – **Tyndall**

przewodzenie światła w strumieniu wody



1910 – Hondros, **Debye**

teoria falowodu cylindrycznego



1954 – **van Heel**, Hopkins, Kapany
włókna pokryte płaszczem



1966 – 1969 **Kao**

wykorzystanie światłowodów
w telekomunikacji (*Nagroda Nobla 2009*)

Przełomowe obserwacje

1960

- Theodore Maiman
- demonstracja akcji laserowej

1970'

- obserwacje efektów nieliniowych w światłowodach:
 - wymuszone rozpraszanie Ramana
 - wymuszone rozpraszanie Brillouina
 - optyczne zjawisko Kerra
 - mieszanie czterech fal
 - samomodulacja fazy

Przełomowe obserwacje

1973

- przewidywania dotyczące impulsów solitonowych (Hasegawa, Tappert)

1980

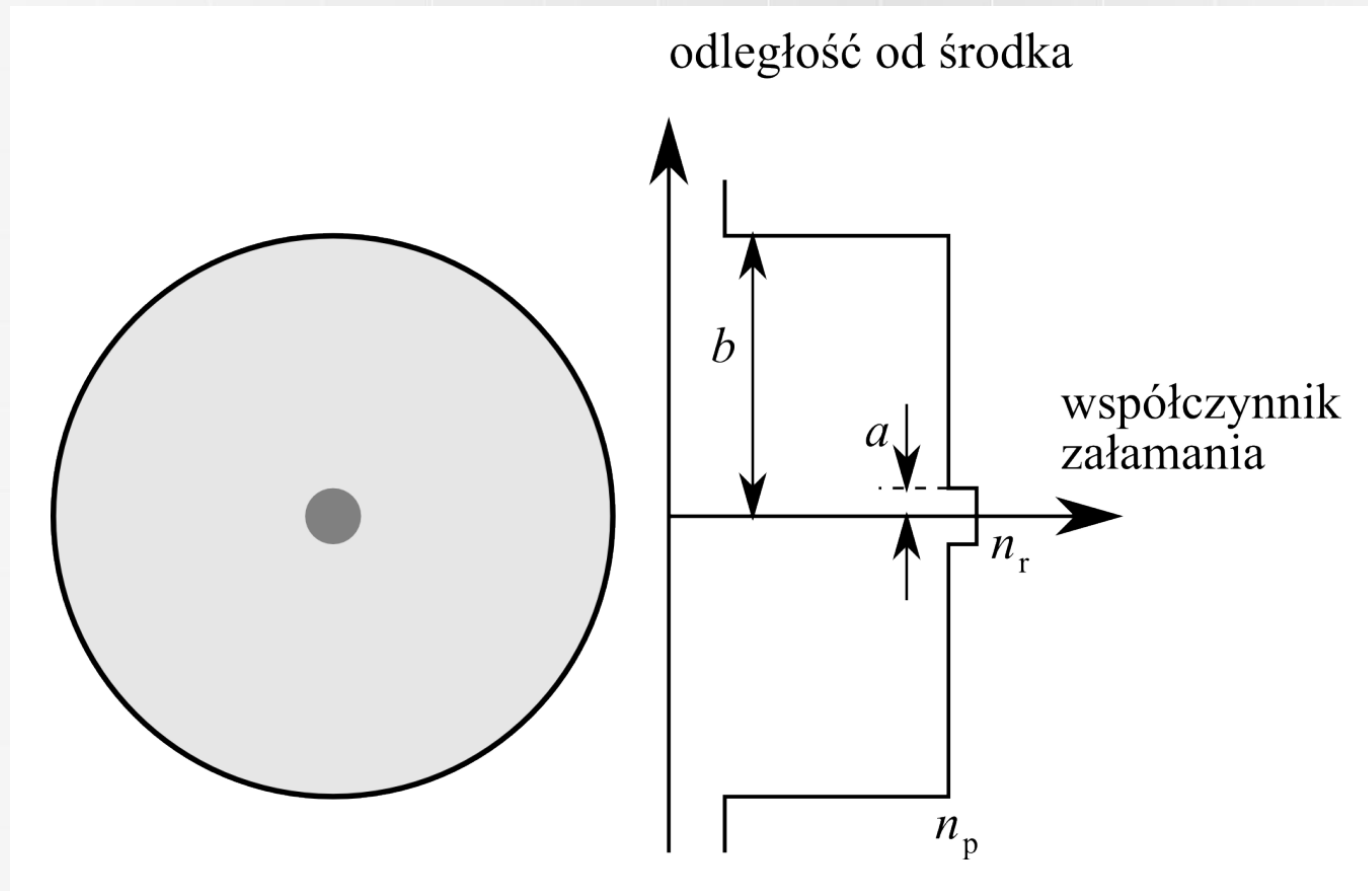
- obserwacje impulsów solitonowych (Mollenauer)

1996

- światłowody mikrostrukturalne (kształtowanie właściwości liniowych oraz nieliniowych)

Typy światłowodów

Światłowod step-index



Typy światłowodów

Światłowod step-index

Względna różnica
współczynników załamania

$$\Delta = \frac{n_r - n_p}{n_r}$$

Częstotliwość
znormalizowana

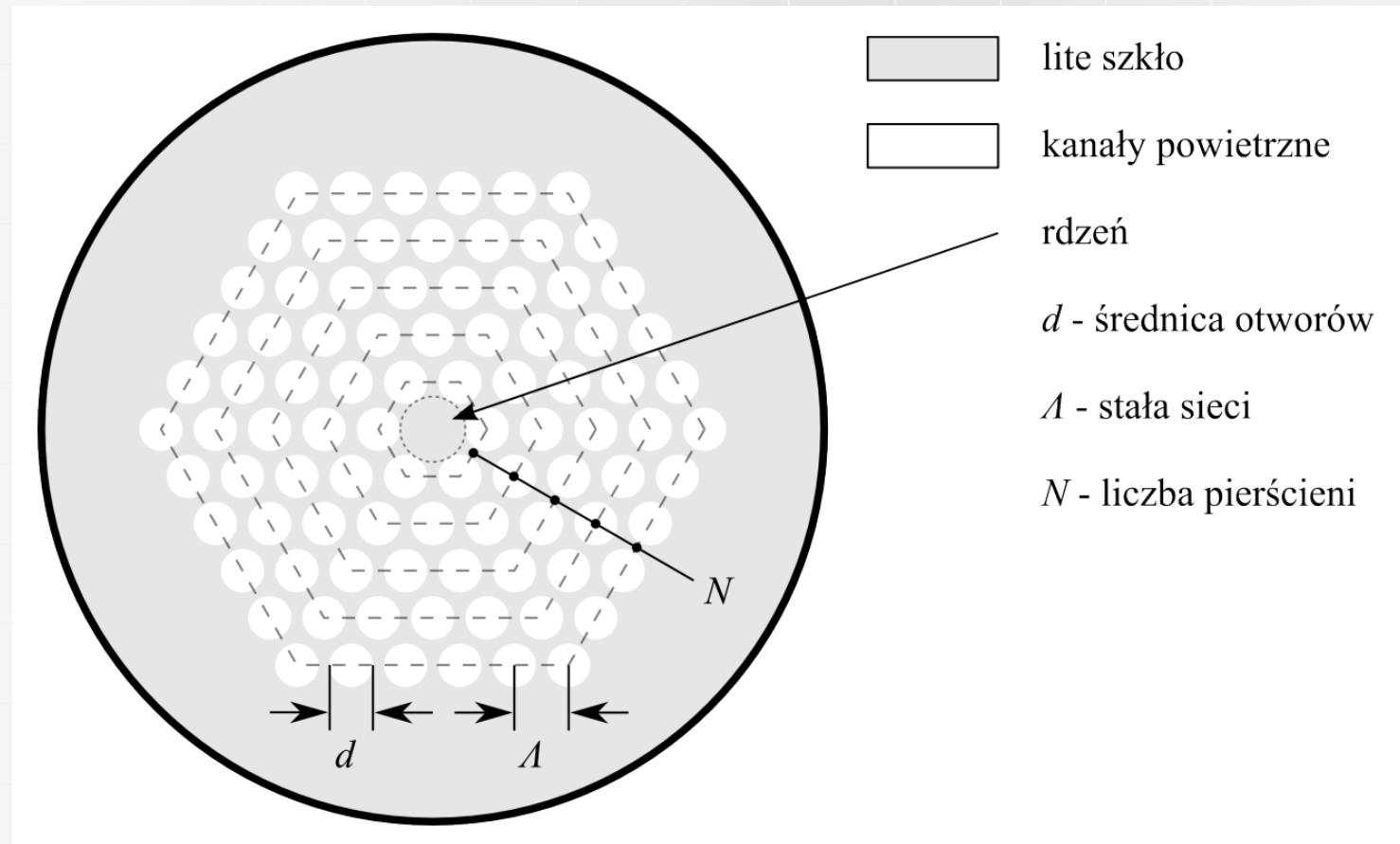
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_r^2 - n_p^2}$$

$$V = k_0 a \sqrt{n_r^2 - n_p^2}$$

$$V = k_0 a NA$$

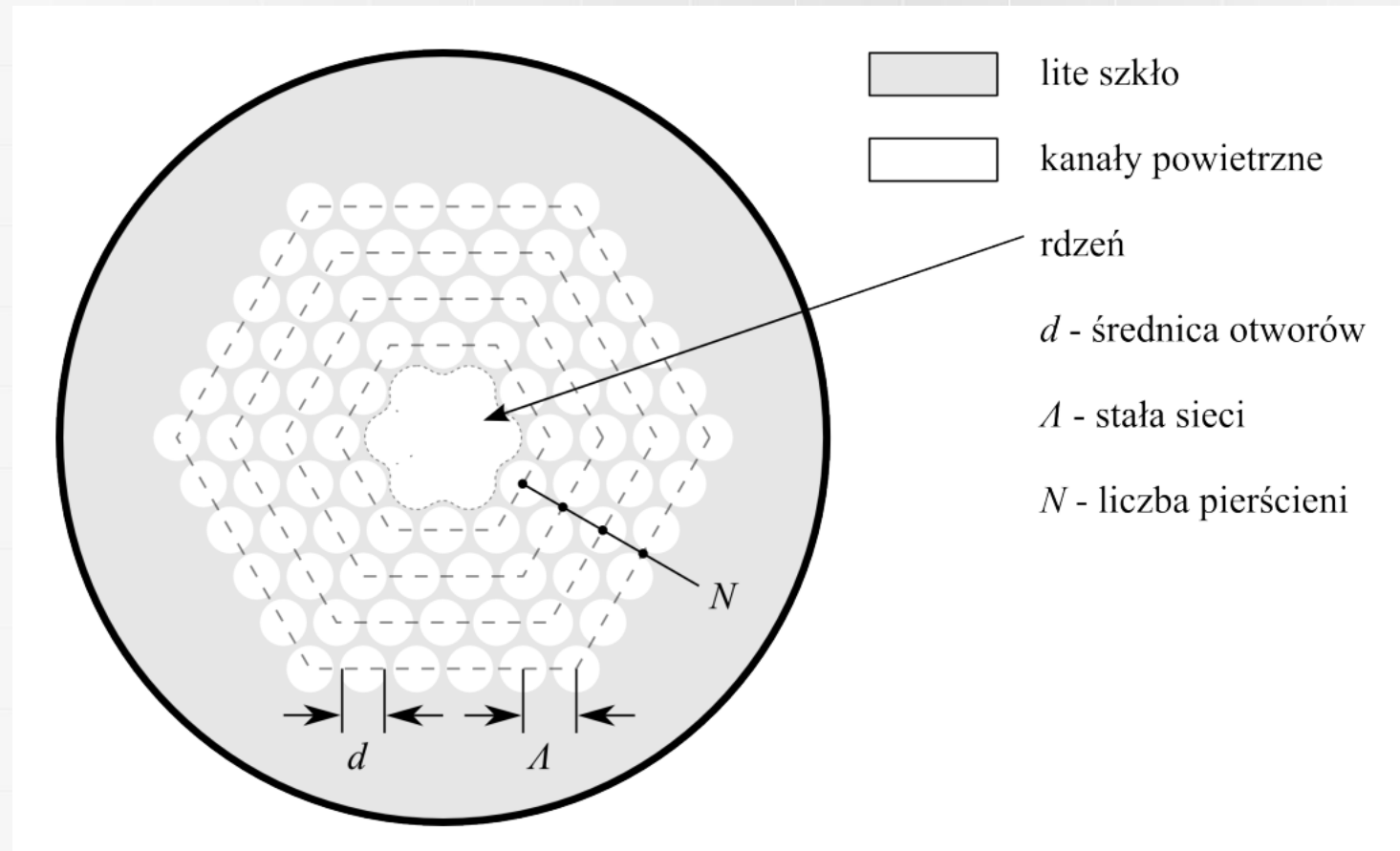
Typy światłowodów

Światłowod mikrostukturalny index-guided



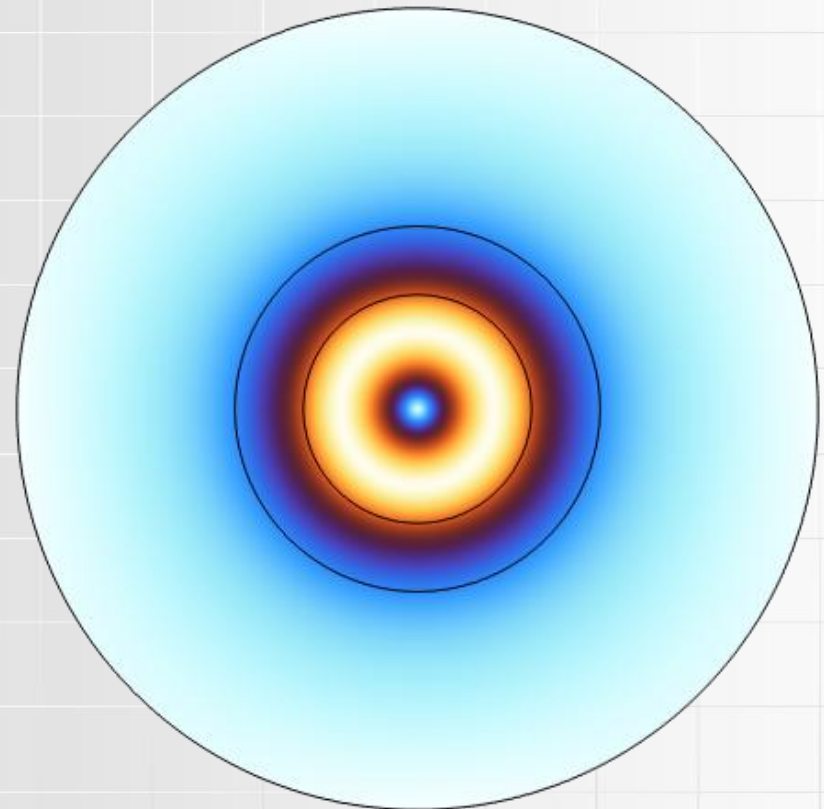
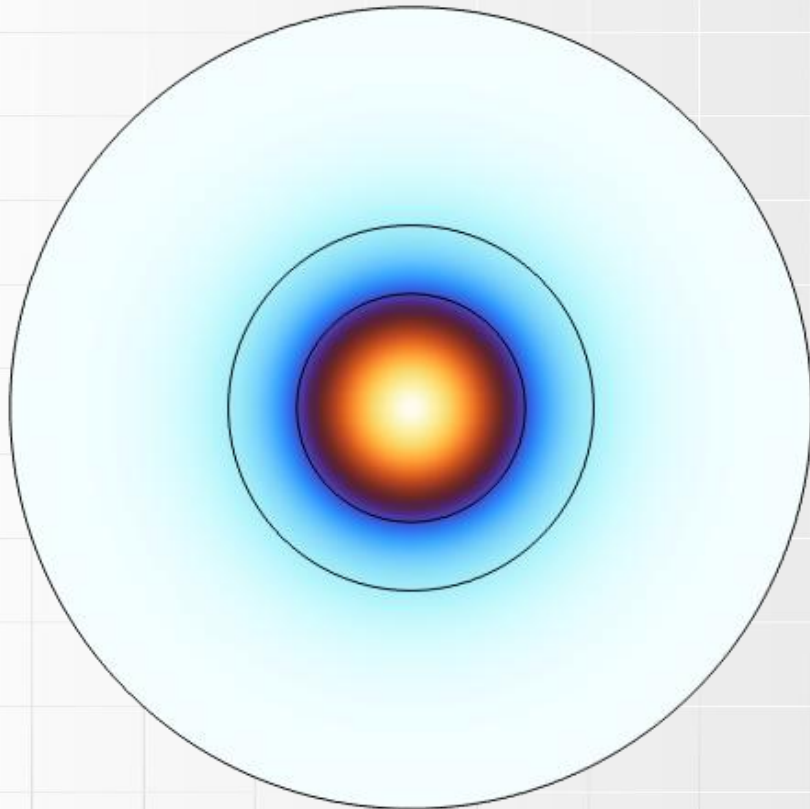
Typy światłowodów

Światłowód fotoniczny



Właściwości światłowodów

Dyskretny zbiór modów prowadzonych



Właściwości światłowodów

Tłumienie

- Współczynnik tłumienia wiąże moc wprowadzoną do włókna P_0 , moc transmitowaną P_T oraz długość włókna L

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L)$$

- Często tłumienie wyraża się w skali decybelowej

$$\alpha_{\text{dB}} = -\frac{10}{L} \ln\left(\frac{P_T}{P_0}\right) \approx 4,343\alpha$$

Właściwości światłowodów

Tłumienie

ELECTRONICS LETTERS 15th February 1979 Vol. 15 No. 4

ULTIMATE LOW-LOSS SINGLE-MODE FIBRE AT 1.55 μm

Indexing terms: Losses, Optical fibres

A very low loss single-mode fibre with a minimum loss of 0.20 dB/km at a wavelength of 1.55 μm is attained; this loss reaches the ultimate lower loss limit of silica-based optical glass fibre. The loss mechanism is also discussed.

T. MIYA
Y. TERUNUMA
T. HOSAKA
T. MIYASHITA

2nd January 1979

Ibaraki Electrical Communication Laboratory
Nippon Telegraph & Telephone Public Corporation
Tokai, Ibaraki, Japan

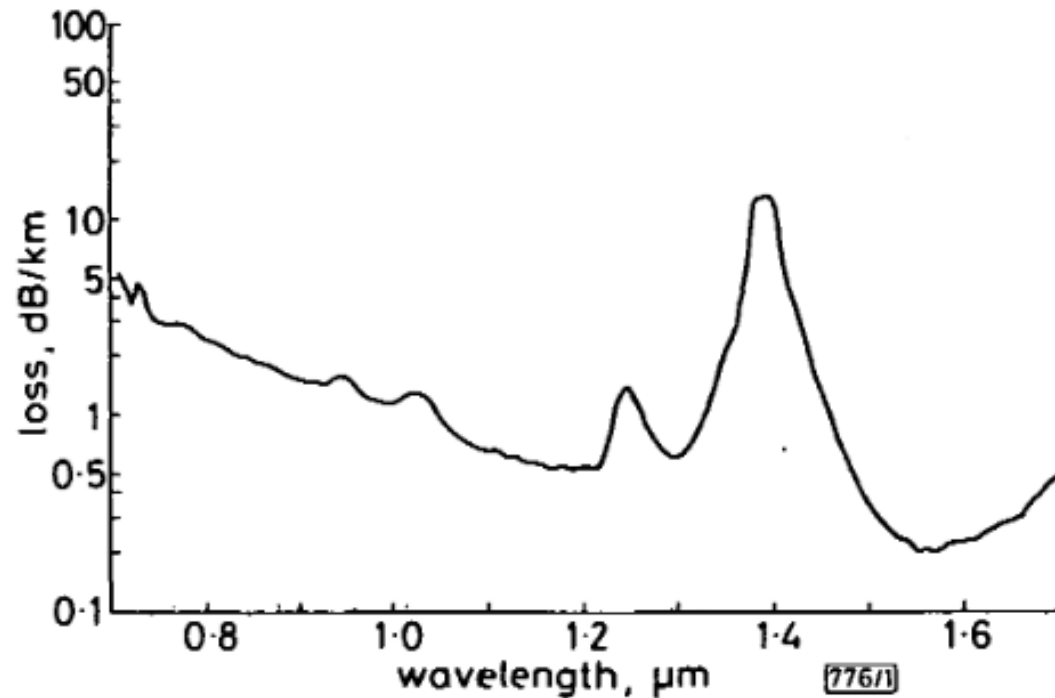


Fig. 1 Spectral loss of 2.2 km single-mode fibre characterised by 9.4 μm core diameter, 0.0028 refractive-index difference between core and cladding and 1.1 μm cutoff wavelength

Właściwości światłowodów

Tłumienie

ELECTRONICS LETTERS 15th February 1979 Vol. 15 No. 4

ULTIMATE LOW-LOSS SINGLE-MODE FIBRE AT 1.55 μm

Indexing terms: Losses, Optical fibres

A very low loss single-mode fibre with a minimum loss of 0.20 dB/km at a wavelength of 1.55 μm is attained; this loss reaches the ultimate lower loss limit of silica-based optical glass fibre. The loss mechanism is also discussed.

T. MIYA
Y. TERUNUMA
T. HOSAKA
T. MIYASHITA

2nd January 1979

Ibaraki Electrical Communication Laboratory
Nippon Telegraph & Telephone Public Corporation
Tokai, Ibaraki, Japan

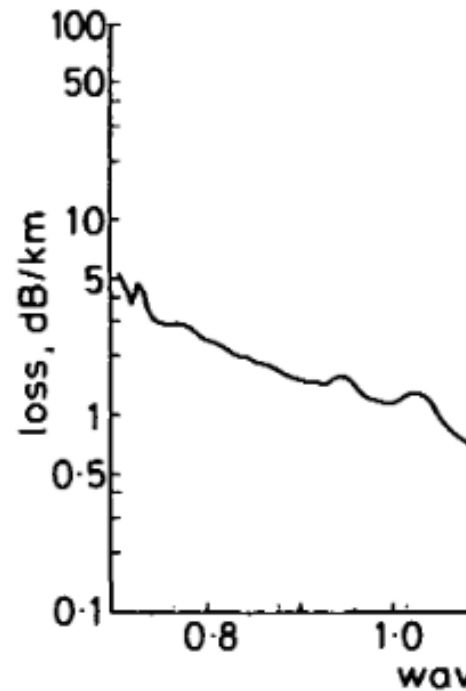


Fig. 1 Spectral loss of 2.2 core diameter, 0.0028 refracting index and 1.1 μm cutoff wavelength optical fibre

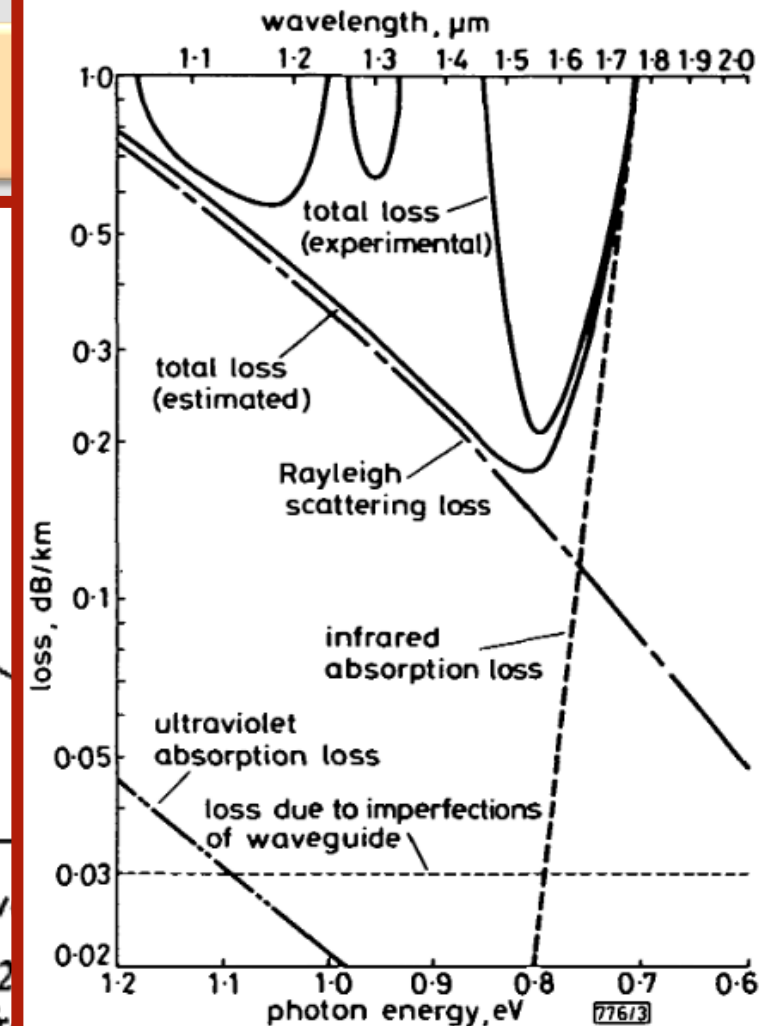
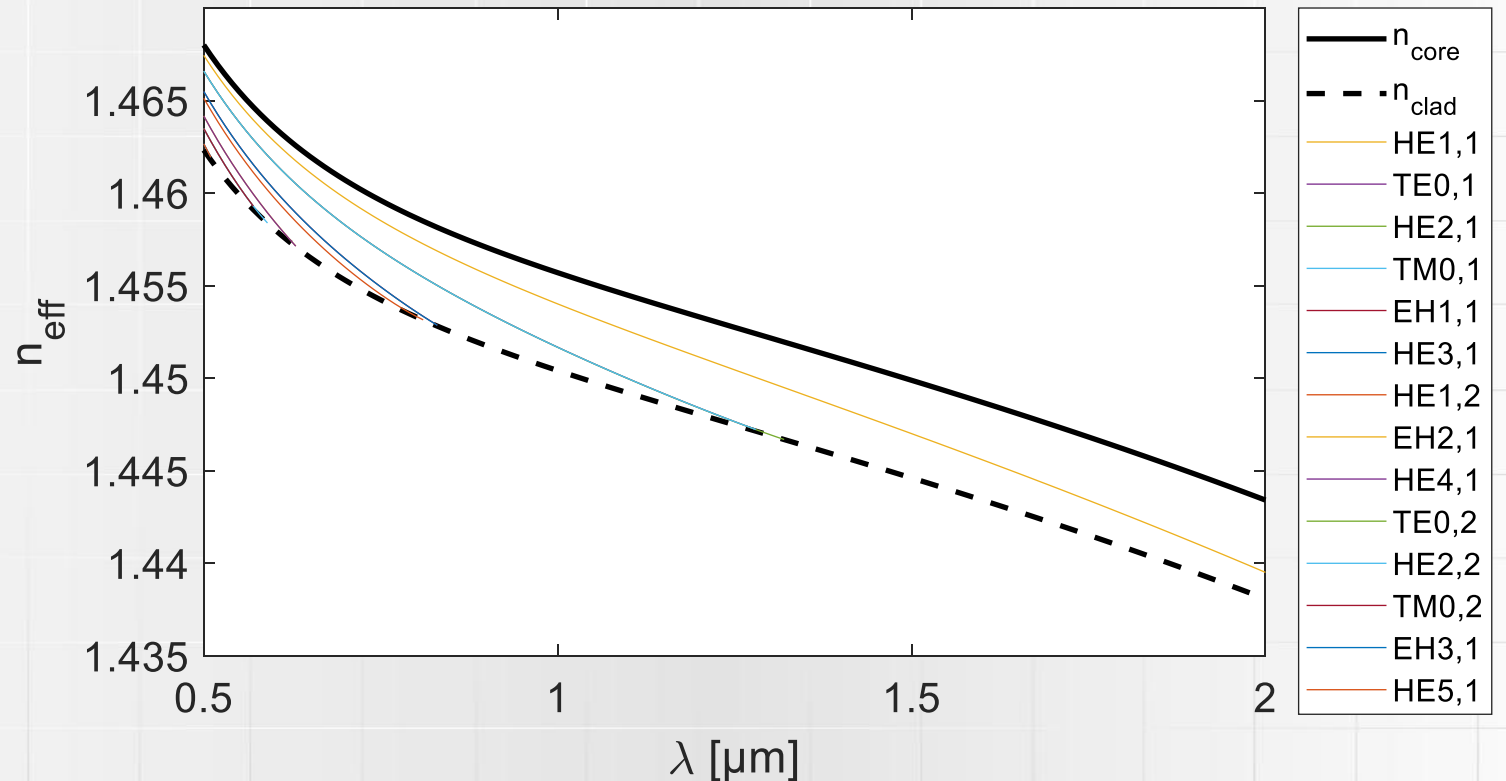


Fig. 3 Transmission-loss mechanism in the optical fibre discussed

Właściwości światłowodów

Efektywny współczynnik załamania

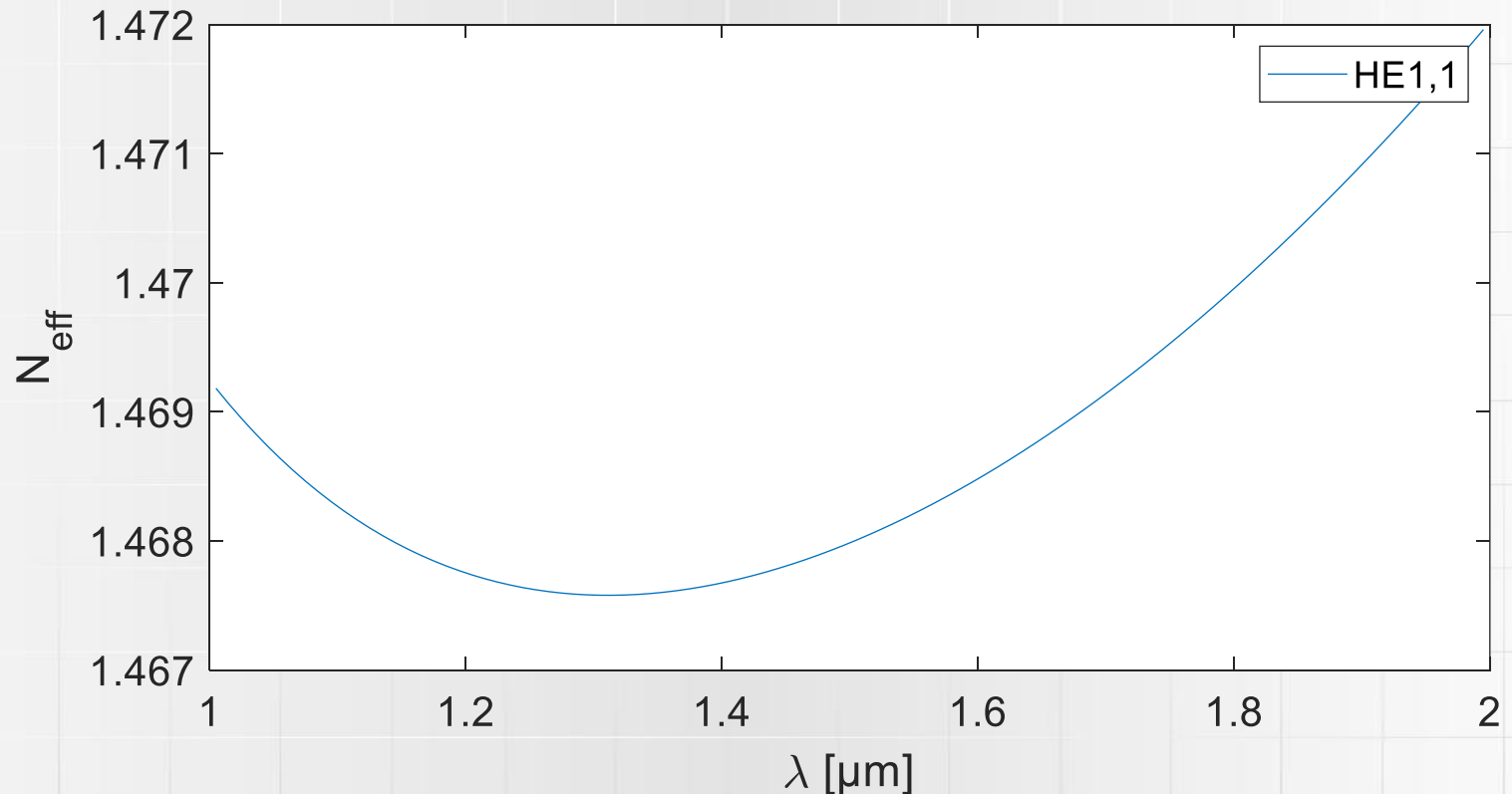
- Przykładowa zależność efektywnych współczynników załamania modów prowadzonych



Właściwości światłowodów

Grupowy współczynnik załamania

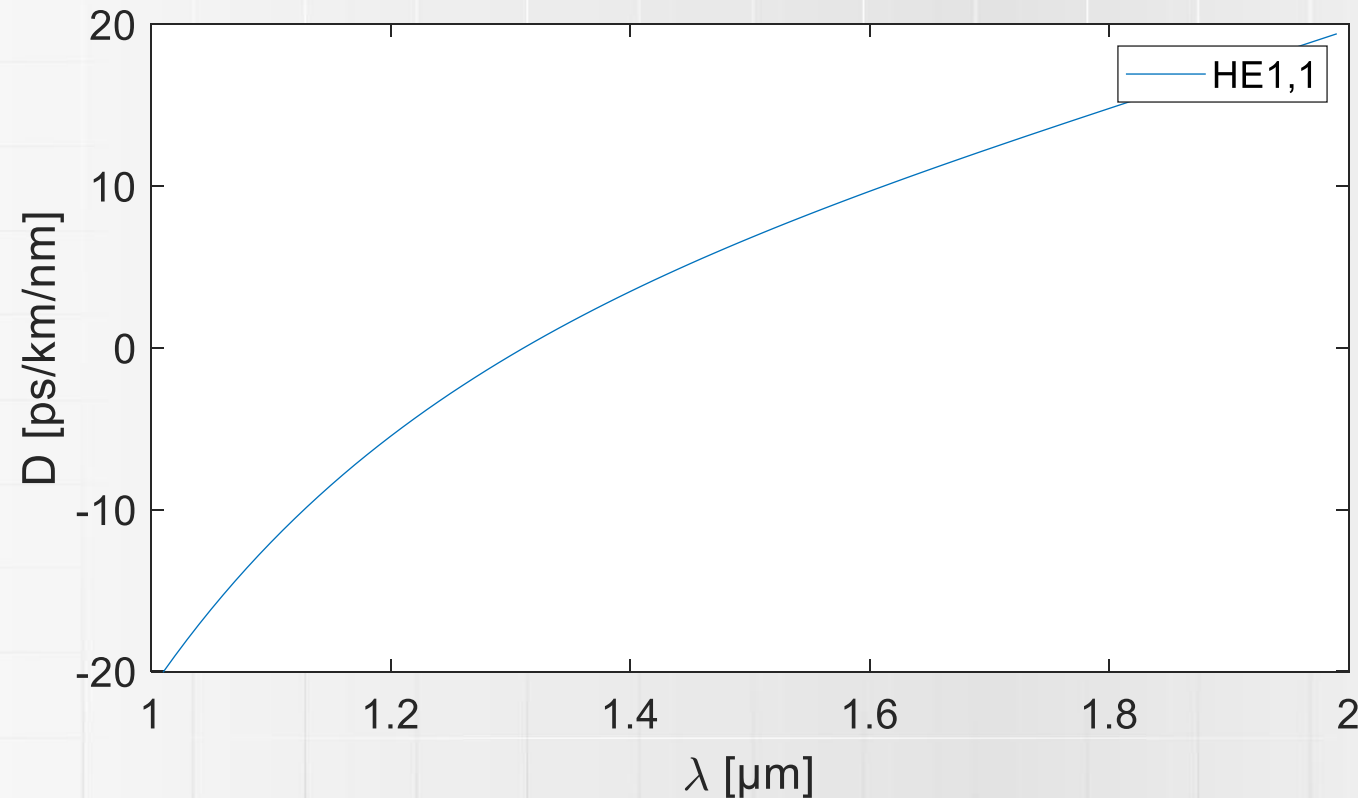
- Przykładowa zależność grupowego współczynnika załamania modu podstawowego



Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna

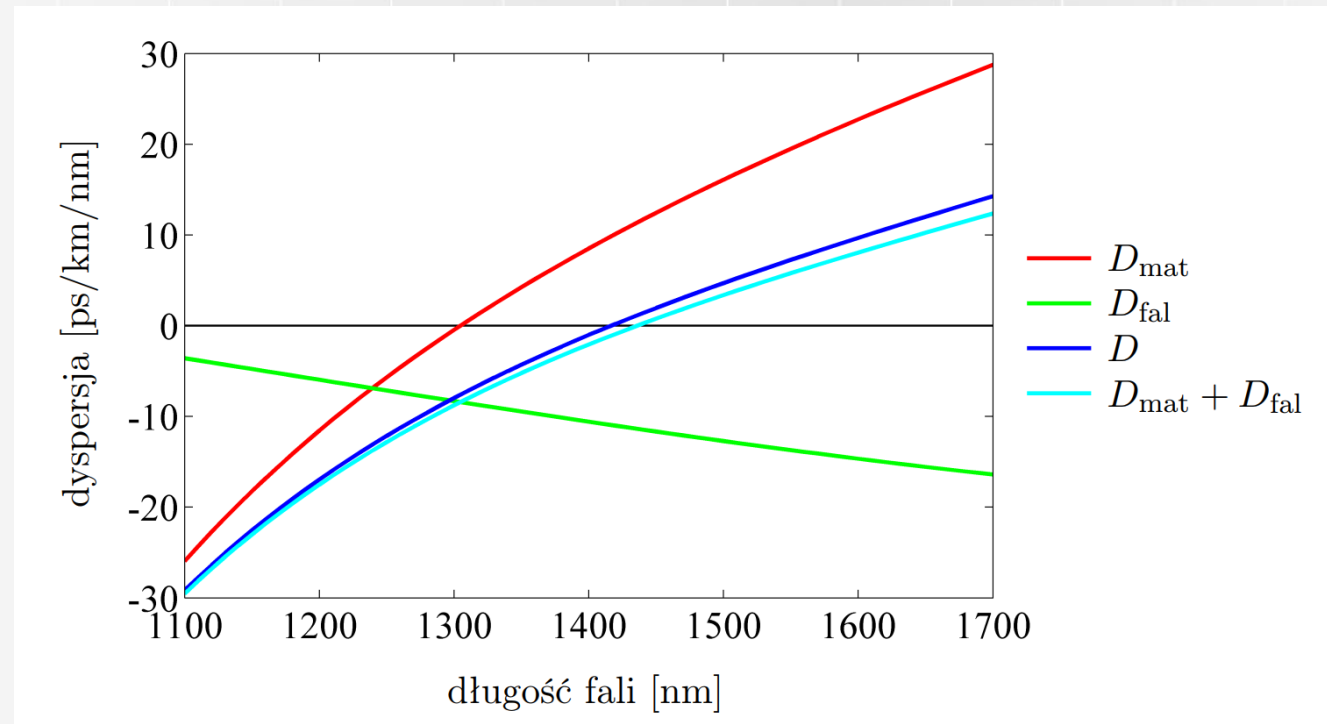
- Przykładowa zależność dyspersji chromatycznej modu podstawowego



Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna - wkład falowodowy

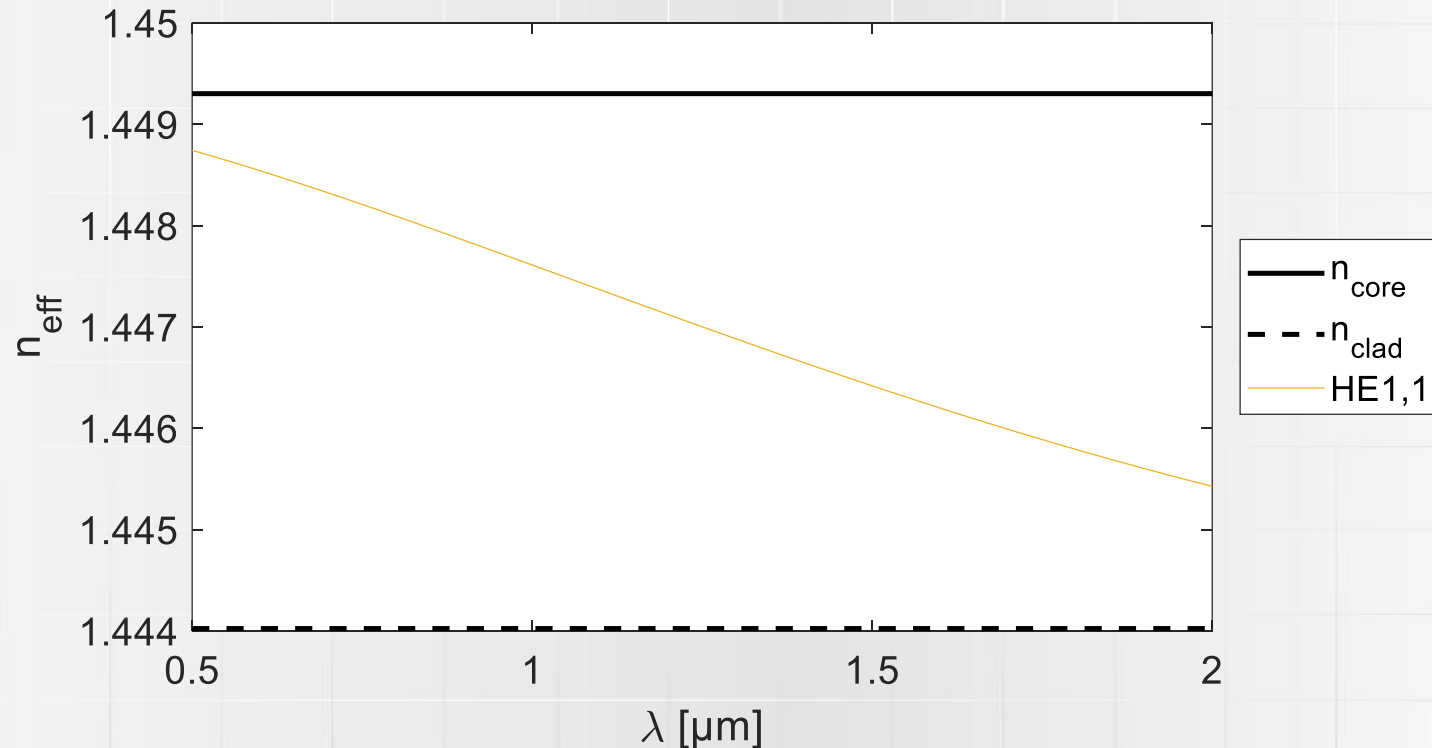
- Przykładowa zależność dyspersji chromatycznej z zaznaczeniem wkładu materiałowego i falowodowego



Właściwości światłowodów

Efektywny współczynnik załamania - wkład falowodowy

- Przykładowa zależność efektywnego współczynnika załamania modu podstawowego



Właściwości światłowodów

Rozwinięcie w szereg Taylora stałej propagacji

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3 (\omega - \omega_0)^3 + \dots$$

$$\beta_m = \frac{d^m \beta}{d\omega^m}$$

Właściwości światłowodów

$$\beta_1 = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right)$$

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right)$$

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

Właściwości światłowodów

Nieliniowość

- W przypadku ogólnym polaryzacja elektryczna nie jest liniową funkcją pola elektrycznego

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \right)$$

- Dla światłowodów podatność elektryczna rzędu drugiego zwykle jest zerowa

Właściwości światłowodów

Nieliniowość

- Dzięki nieliniowości współczynnik załamania ośrodka w obecności światła o intensywności I zależy od tej intensywności

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + n_2 I = n + \bar{n}_2 |E|^2$$

$$\bar{n}_2 = \frac{3}{8n} \text{Re} \left(\chi_{xxxx}^{(3)} \right)$$

Właściwości światłowodów

Nieliniowość

- Zależność ta powoduje nieliniową modulację fazy
- Może to być samomodulacja fazy (self-phase modulation SPM) oraz (wzajemna modulacja fazy, cross-phase modulation XPM)
- Obserwowane są także wymuszane procesy rozpraszania
 - rozpraszanie Ramana
 - rozpraszanie Brillouina

Tematyka wykładów

Nieliniowe równanie Schrödingera

Zjawiska samomodulacji fazy, niestabilności modulacyjnej

Solitony

Zjawiska nieliniowe w światłowodach dwójłomnych

Rozpraszanie Ramana

Mieszanie czterech fal

Generacja superkontinuum

Polecana literatura

G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics

M. Karpierz, E. Weinert-Rączka, Nieliniowa optyka światłowodowa

J. M. Dudley, Supercontinuum generation in optical fibers