



Politechnika
Wrocławska

Zjawiska nieliniowe w światłowodach

FTP003030W

rok akademicki 2022/23

semestr zimowy

Wykład 1

Karol Tarnowski

karol.tarnowski@pwr.edu.pl

L-1 p. 220



Plan wykładu

- Kamienie milowe rozwoju światłowodów
 - obserwacje zjawisk nieliniowych
- Typy światłowodów
- Właściwości światłowodów
 - tłumienie
 - dyspersja chromatyczna
 - nieliniowość



Kamienie milowe (1)

- 1841 - Colladon, demonstracja prowadzenia światła w oparciu o efekt całkowitego wewnętrznego odbicia
- 1920' - zgłoszenia patentowe na obrazówó
- 1954 - van Hell, Hopkins, wykorzystanie płaszczka w konstrukcji światłowodu
- 1966 - Kao, wykazanie, że można znacząco obniżyć tłumienie



Kamienie milowe (2)

- 1960 - Maiman, demonstracja akcji laserowej
- 1970' obserwacje efektów nieliniowych w światłowodach:
 - wymuszone rozpraszanie Ramana
 - wymuszone rozpraszanie Brillouina
 - optyczne zjawisko Kerra
 - mieszanie czterech fal
 - samomodulacja fazy

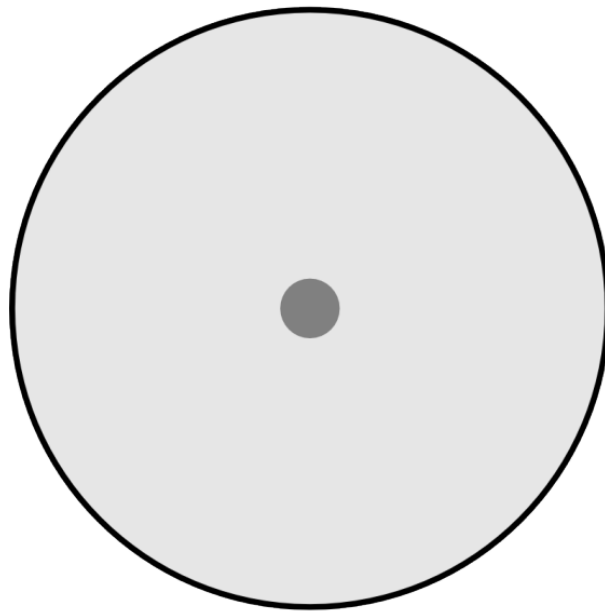


Kamienie milowe (3)

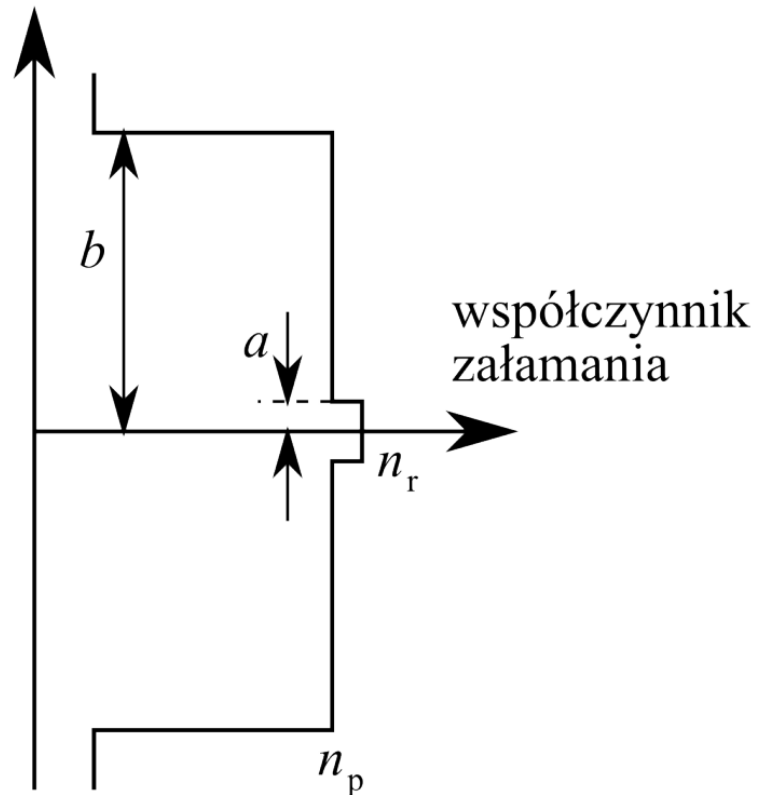
- 1973 - przewidywania dotyczące impulsów solitonowych
- 1980 - obserwacje impulsów solitonowych
- 1996 - światłowody mikrostrukturalne (kształtowanie właściwości liniowych oraz nieliniowych)

Typy światłowodów

Światłowod step-index



odległość od środka



Typy światłowodów

Światłowod step-index

- Względna różnica współczynników załamania

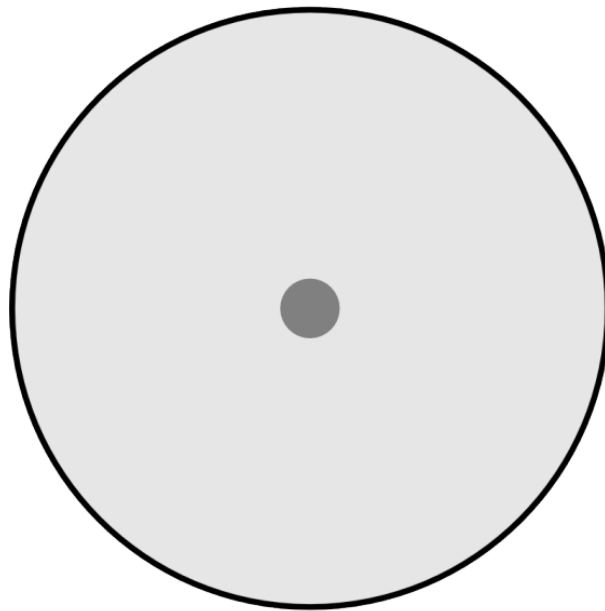
$$\Delta = \frac{n_r - n_p}{n_r}$$

- Częstotliwość znormalizowana

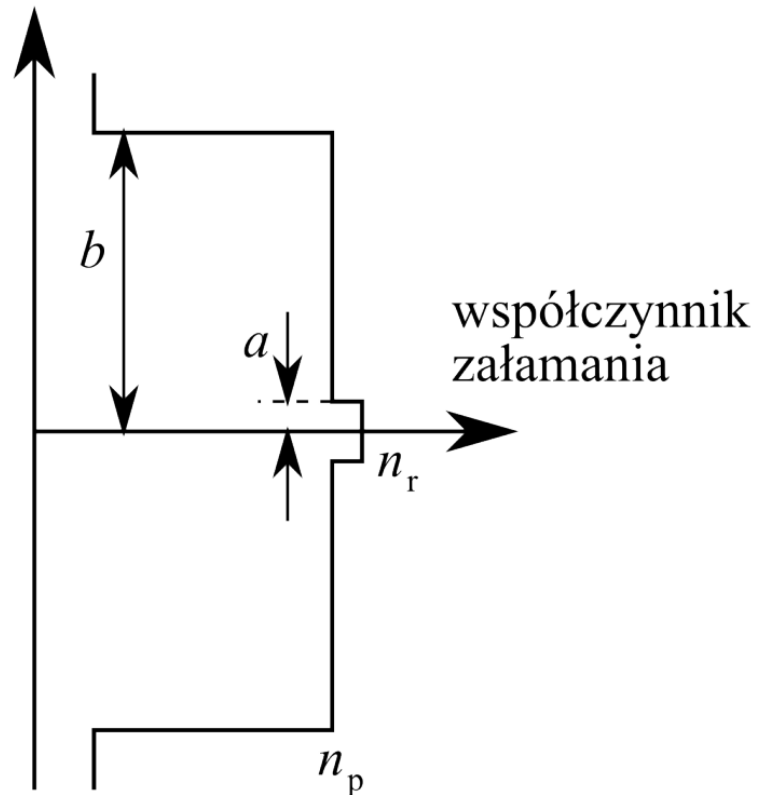
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_r^2 - n_p^2} = k_0 a \sqrt{n_r^2 - n_p^2} = k_0 a NA$$

Typy światłowodów

Światłowod step-index

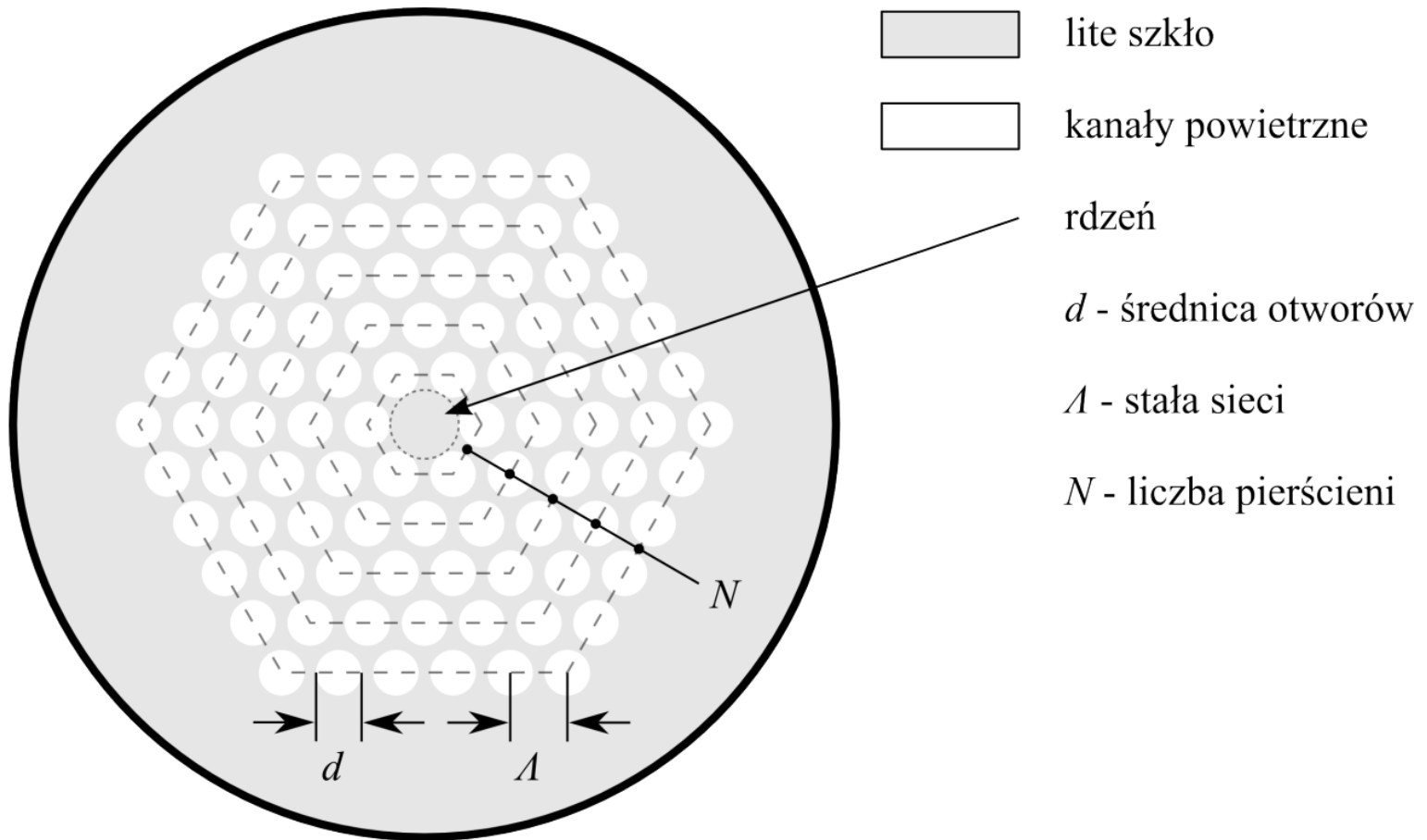


odległość od środka



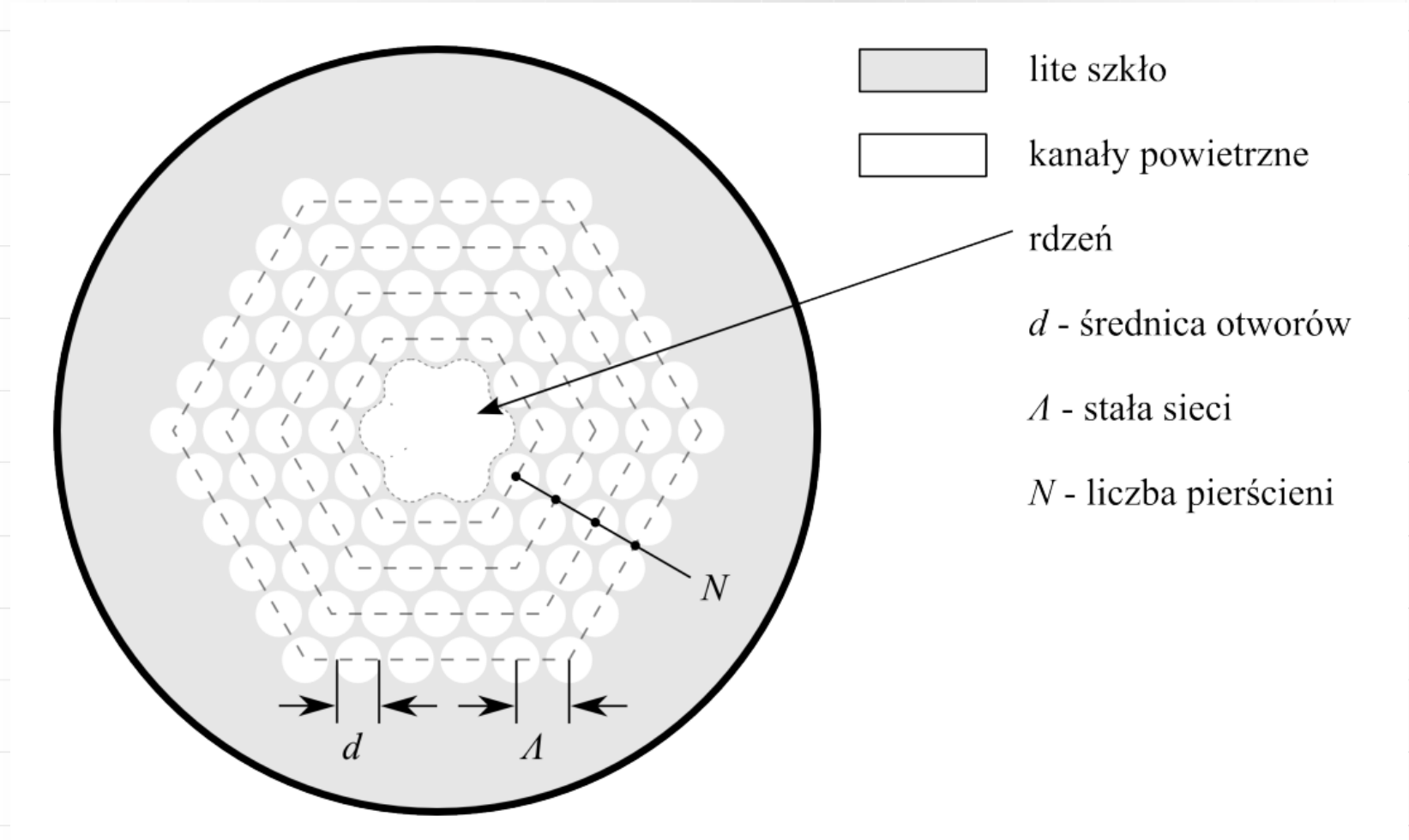
Typy światłowodów

Światłowod mikrostrukturalny index-guided



Typy światłowodów

Światłowod fotoniczny





Właściwości światłowodów

Tłumienie

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

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

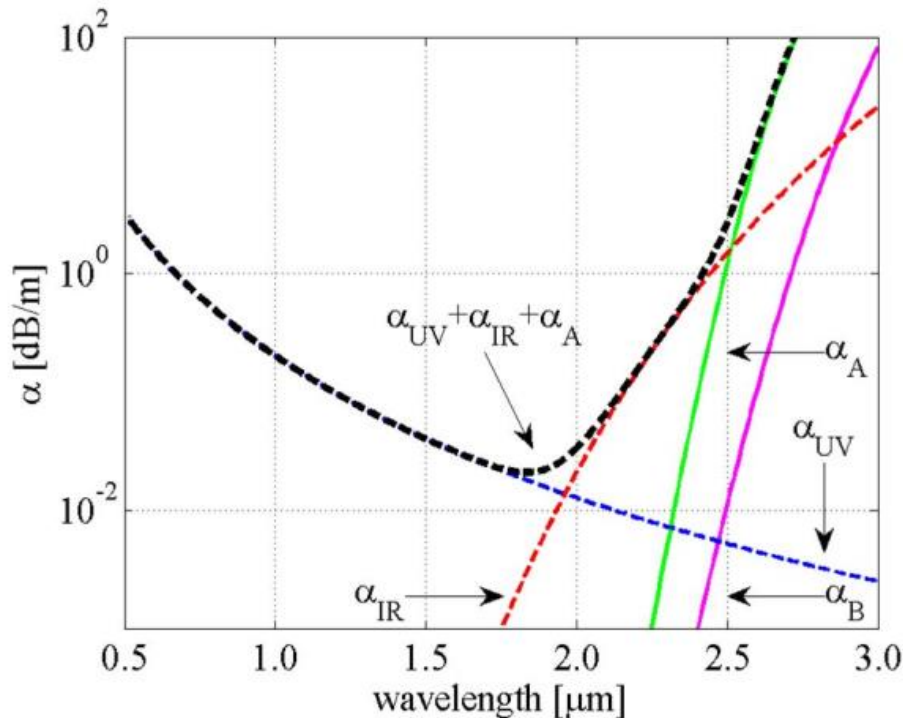
- Często tłumienie wyraża się w skali decybelowej

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

Właściwości światłowodów

Tłumienie

- Przykładowe charakterystyki tłumienia w światłowodach mikrostrukturalnych o rdzeniu domieszkowanym germanem

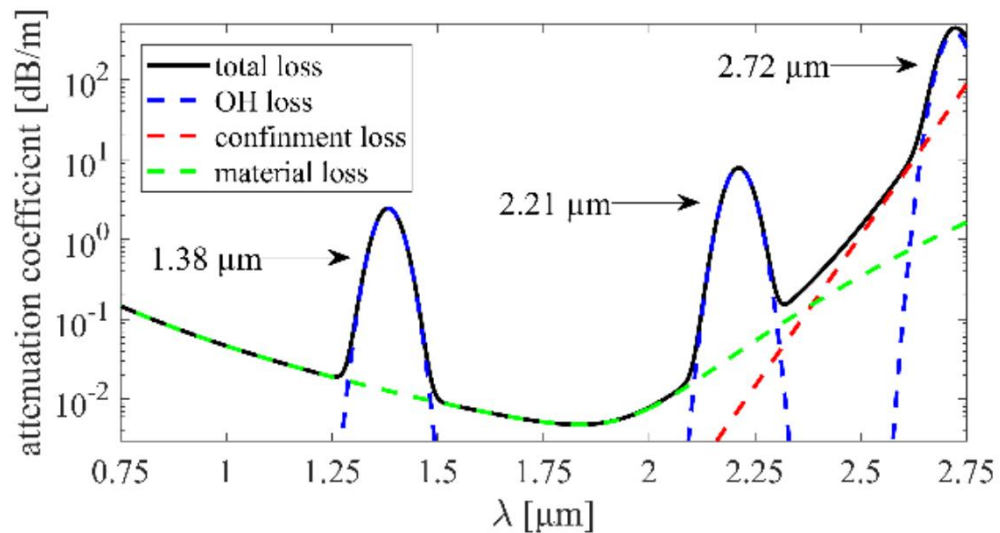


Tarnowski, K., Urbanczyk, W. All-normal dispersion hole-assisted silica fibers for generation of supercontinuum reaching midinfrared. *IEEE Photonics Journal*, 8(1): 7100311

Właściwości światłowodów

Tłumienie

- Przykładowe charakterystyki tłumienia w światłowodach mikrostrukturalnych o rdzeniu domieszkowanym germanem

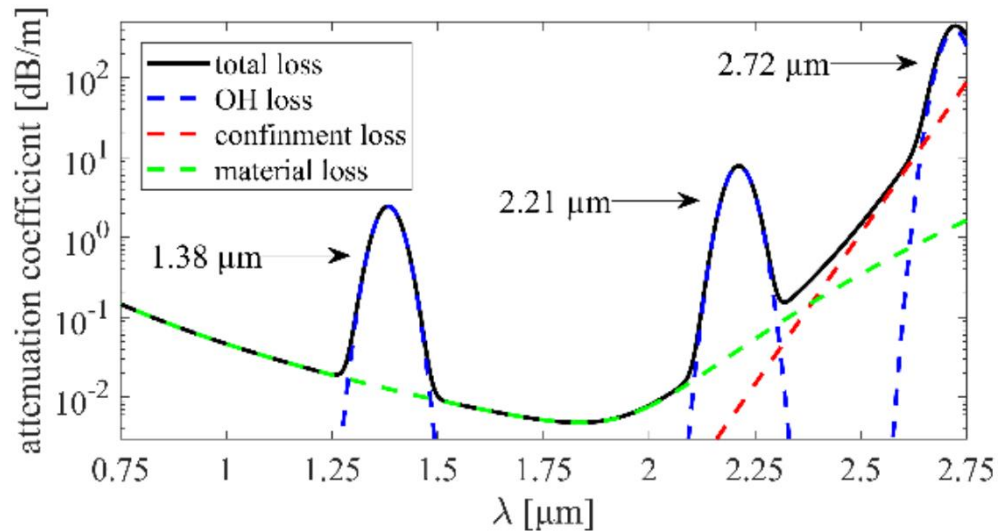


Tarnowski, K., Martynkien, T. et al. Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5 μm generated in a birefringent microstructured silica fiber. *Optics Express*, 25(22): 27452

Właściwości światłowodów

Tłumienie

- Przykładowe charakterystyki tłumienia w światłowodach mikrostrukturalnych o rdzeniu domieszkowanym germanem



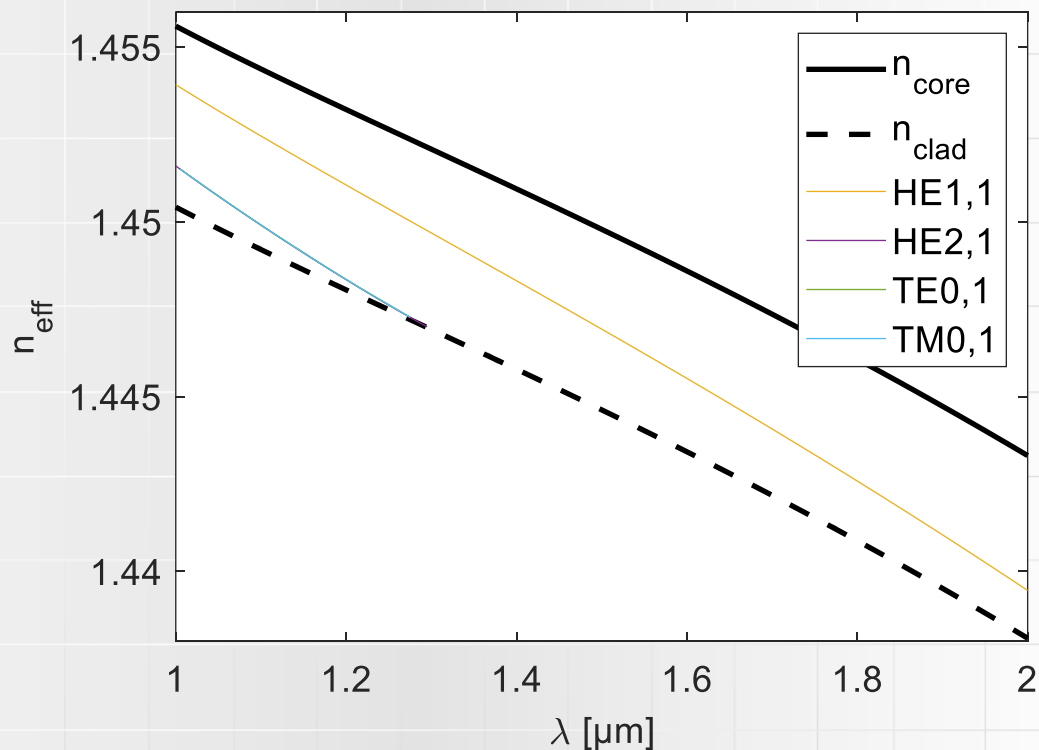
Tarnowski, K., Martynkien, T. et al. Polarized all-normal dispersion supercontinuum reaching 2.5 μm generated in a birefringent microstructured silica fiber. *Optics Express*, 25(22): 27452



Właściwości światłowodów

Efektywny współczynnik załamania - dyspersja

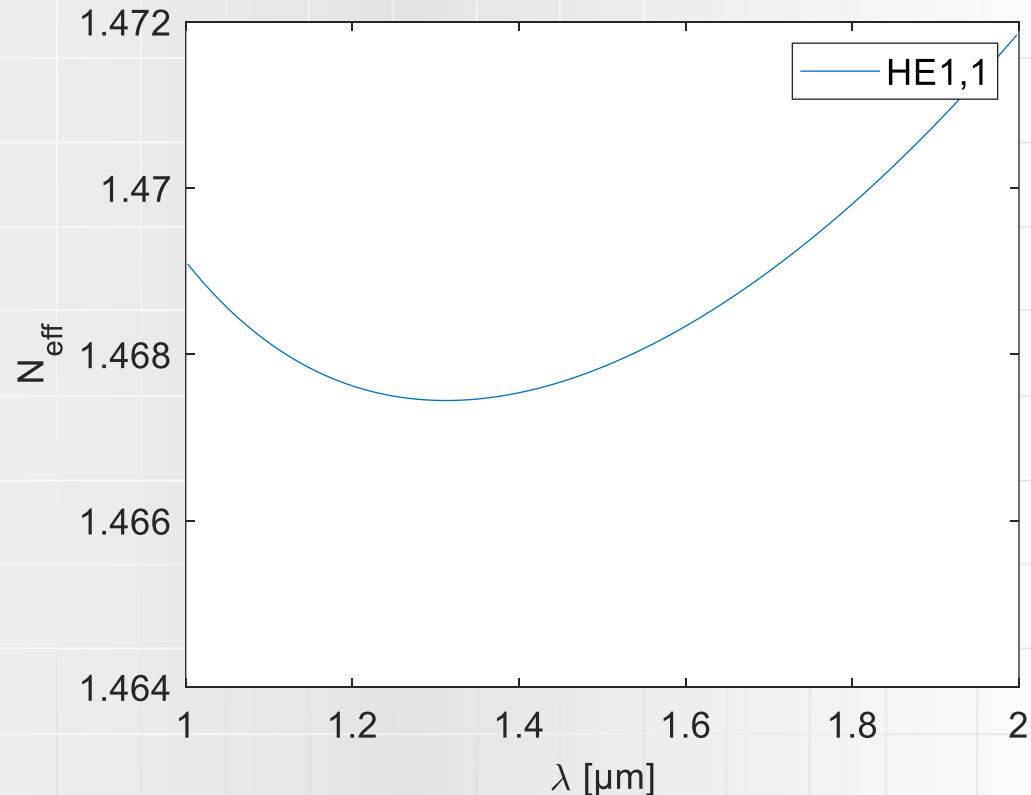
- Przykładowa zależność efektywnych współczynników załamania modów prowadzonych



Właściwości światłowodów

Grupowy współczynnik załamania - dyspersja

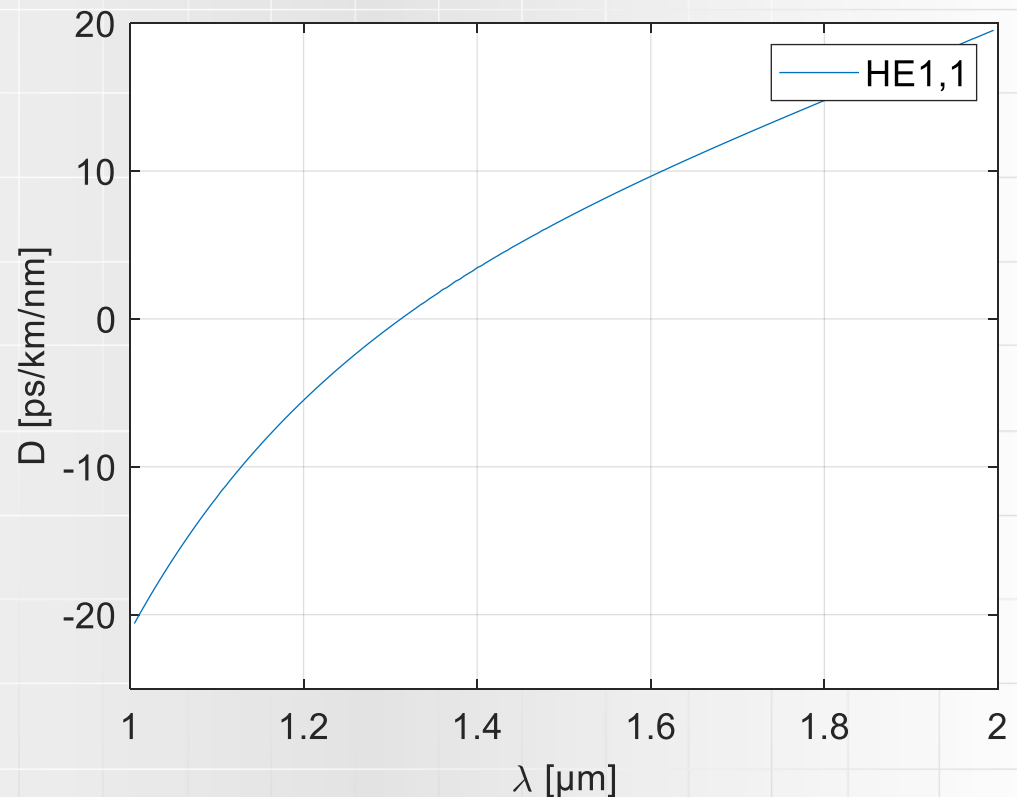
- Przykładowa zależność grupowego współczynnika załamania modu podstawowego



Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna

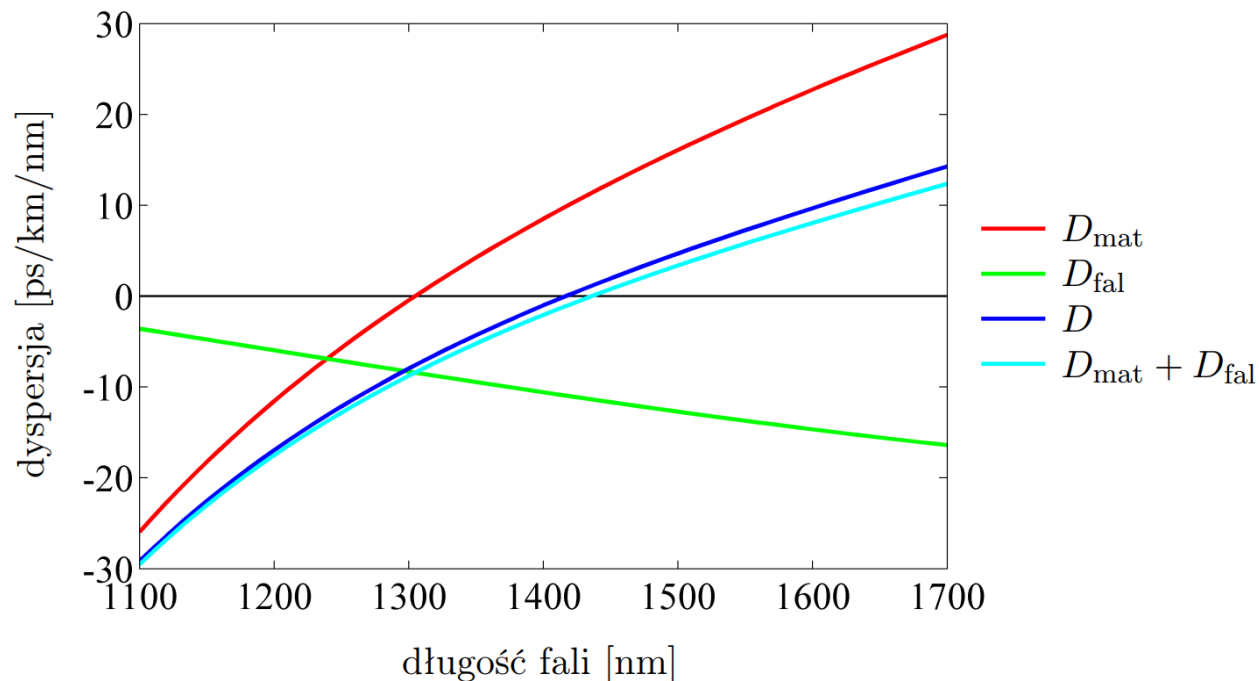
- Przykładowa zależność dyspersji chromatycznej modu podstawowego



Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna

- Przykładowa zależność dyspersji chromatycznej z zaznaczeniem wkładu materiałowego i falowodowego





Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna

- Stała propagacji modu rozwinięta w szereg Taylora

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

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



Właściwości światłowodów

Dyspersja chromatyczna

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

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

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



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

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

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



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).



Właściwości światłowodów

Nieliniowość

- 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