

Zjawiska nieliniowe w światłowodach

W110PA-SM0050W (FTP003030W)

rok akademicki 2024/25

semestr zimowy

Wykład 5

Karol Tarnowski

karol.tarnowski@pwr.edu.pl

L-1 p. 221

Plan wykładu

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

Moc progowa

Rozpraszanie Ramana

- opis odpowiedzi ramanowskiej
- modele odpowiedzi ramanowskiej
- reżim kwazi-ciągły
- reżim impulsowy

Procesy rozpraszania

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

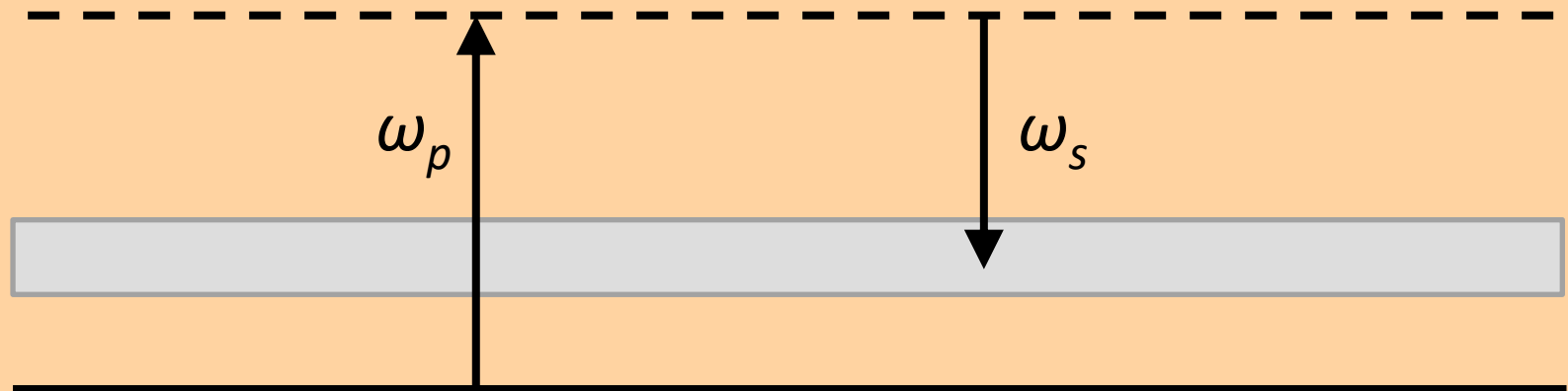
- Rozpraszanie Ramana
- Rozpraszanie Brillouina

- Zmiana częstotliwości fotonu w związku z transferem energii z/do fononu
- Fonony:
 - optyczne - rozpraszanie Ramana
 - akustyczne - rozpraszanie Brillouina

Procesy rozpraszania

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

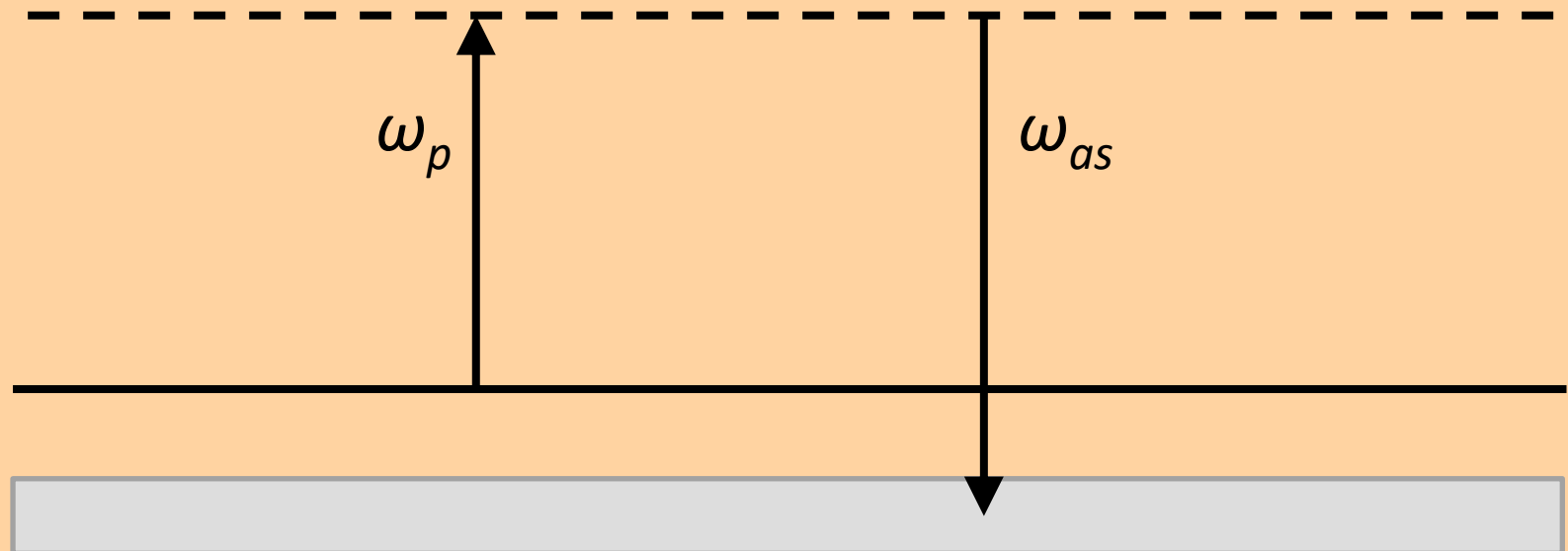
- Możliwość generacji fali stokesowskiej o niższej częstotliwości



Procesy rozpraszania

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

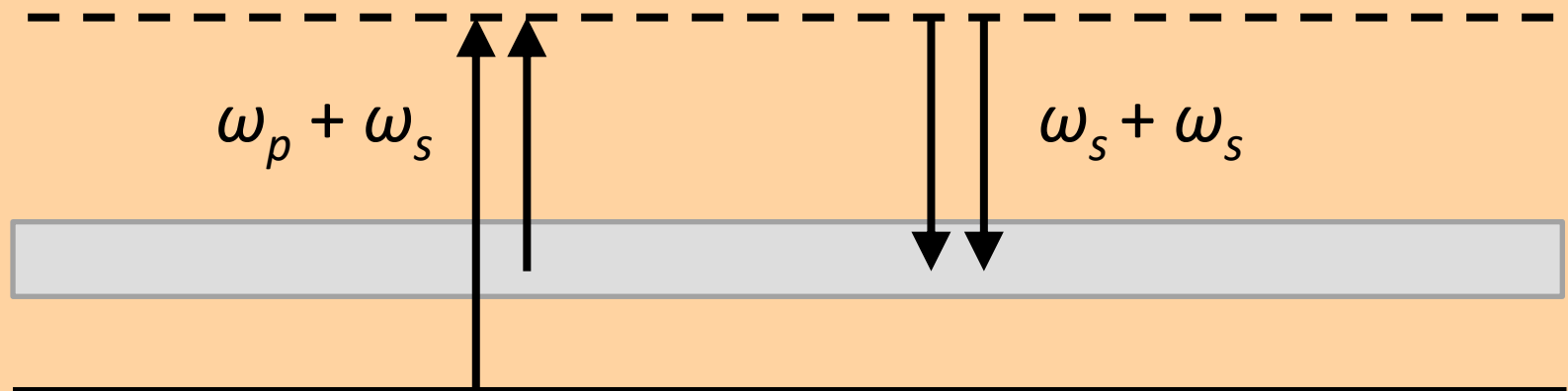
- Możliwość generacji fali anty-stokesowskiej o wyższej częstotliwości



Procesy rozpraszania

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

- Możliwość generacji fali stokesowskiej w procesie wymuszonym



Procesy rozpraszania

Wymuszone procesy niesprężystego rozpraszania

- Wzrost intensywności fali stokesowskiej
- Początkowy wzrost intensywności

$$\frac{dl_s}{dz} = g_{R/B} I_p I_s$$

$$g_R \approx 6 \times 10^{-14} \text{ m/W}$$

$$g_B \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/W}$$

Procesy rozpraszania

Moc progowa

- Rozpraszanie Ramana/Brillouina może być obserwowane po przekroczeniu przez pompę mocy progowej

$$I_p^{\text{th}} \approx 16(\alpha/g_R)$$

$$I_p^{\text{th}} \approx 21(\alpha/g_B)$$

$$I_R \approx 1 \text{ W}$$

$$I_B \approx 1 \text{ mW}$$

Rozpraszanie Ramana

Opis matematyczny

- Nieliniowe równanie falowe

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2}$$

- Polaryzacja elektryczna

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{NL}(\mathbf{r}, t) = & \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t dt_1 \int_{-\infty}^t dt_2 \int_{-\infty}^t dt_3 \\ & \times \chi^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) : \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_1) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_2) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t_3) \end{aligned}$$

Rozpraszanie Ramana

Opis matematyczny

- Podatność nieliniowa trzeciego rzędu

$$\chi^{(3)}(t-t_1, t-t_2, t-t_3) = \chi^{(3)} R(t-t_1) \delta(t-t_2) \delta(t-t_3)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} R(t) dt = 1$$

$$P_{NL}(\mathbf{r}, t) = \frac{3\varepsilon_0}{4} \chi_{xxxx}^{(3)} E(\mathbf{r}, t) \int_{-\infty}^t R(t-t_1) E^*(\mathbf{r}, t_1) E(\mathbf{r}, t_1) dt_1$$

Rozpraszanie Ramana

Opis matematyczny

- Uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = i\gamma A \int_0^{+\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'$$

$$R(t) = (1 - f_R) \delta(t - t_e) + f_R h_R(t)$$

odpowiedź elektronowa

odpowiedź ramanowska

Rozpraszanie Ramana

Wyznaczenie odpowiedzi ramanowskiej

- Złożona postać odpowiedzi ramanowskiej $h_R(t)$ ze względu na amorficzną naturę ośrodka

- Pomiar widma wzmocnienia $g_R(\Delta\omega)$

pozwała wyznaczyć $\text{Im}\tilde{h}_R(\Delta\omega)$

$$g_R(\Delta\omega) = \frac{\omega_0}{cn(\omega_0)} f_R \chi_{xxxx}^{(3)} \text{Im}[\tilde{h}_R(\Delta\omega)] \quad \Delta\omega = \omega - \omega_0$$

Rozpraszanie Ramana

Wyznaczenie odpowiedzi ramanowskiej

- Wykorzystując relację Kramersa-Kroniga

można wyznaczyć $\text{Re} \tilde{h}_R(\Delta\omega)$

- Następnie $h_R(t) = \mathcal{F}^{-1}[\tilde{h}_R(\Delta\omega)]$

- Przybliżona postać analityczna

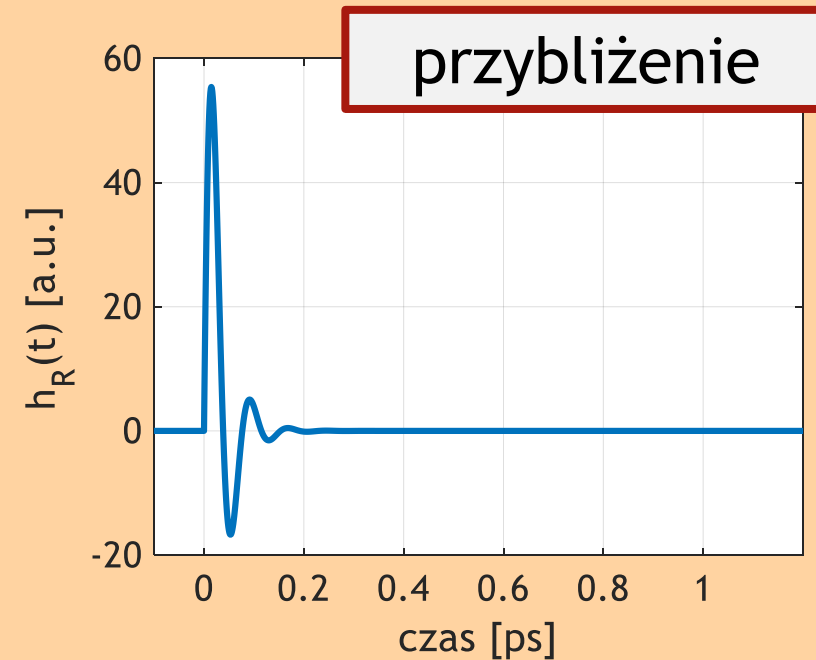
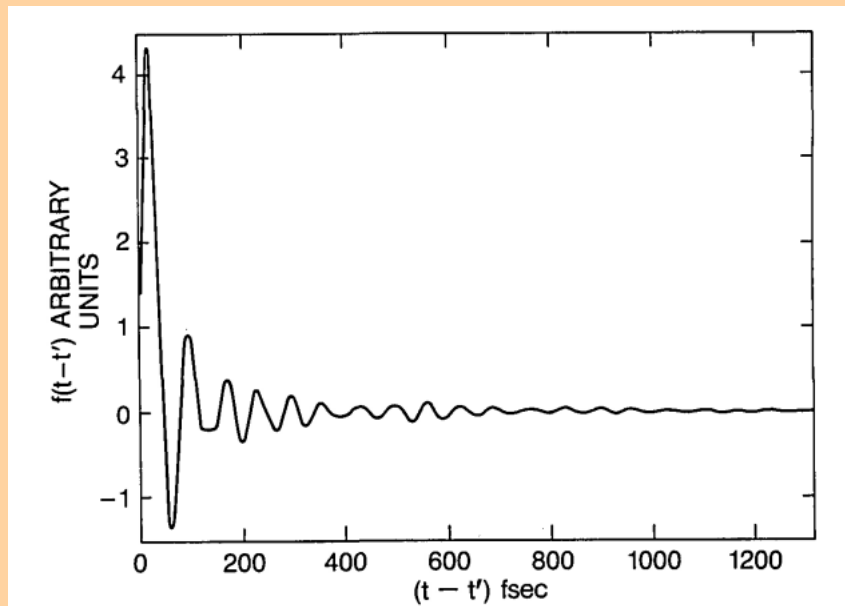
$$h_R(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{\tau_1\tau_2^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \sin\left(\frac{t}{\tau_1}\right)$$

$$\tau_1 = 12,2 \text{ fs}$$

$$\tau_2 = 32 \text{ fs}$$

Rozpraszanie Ramana

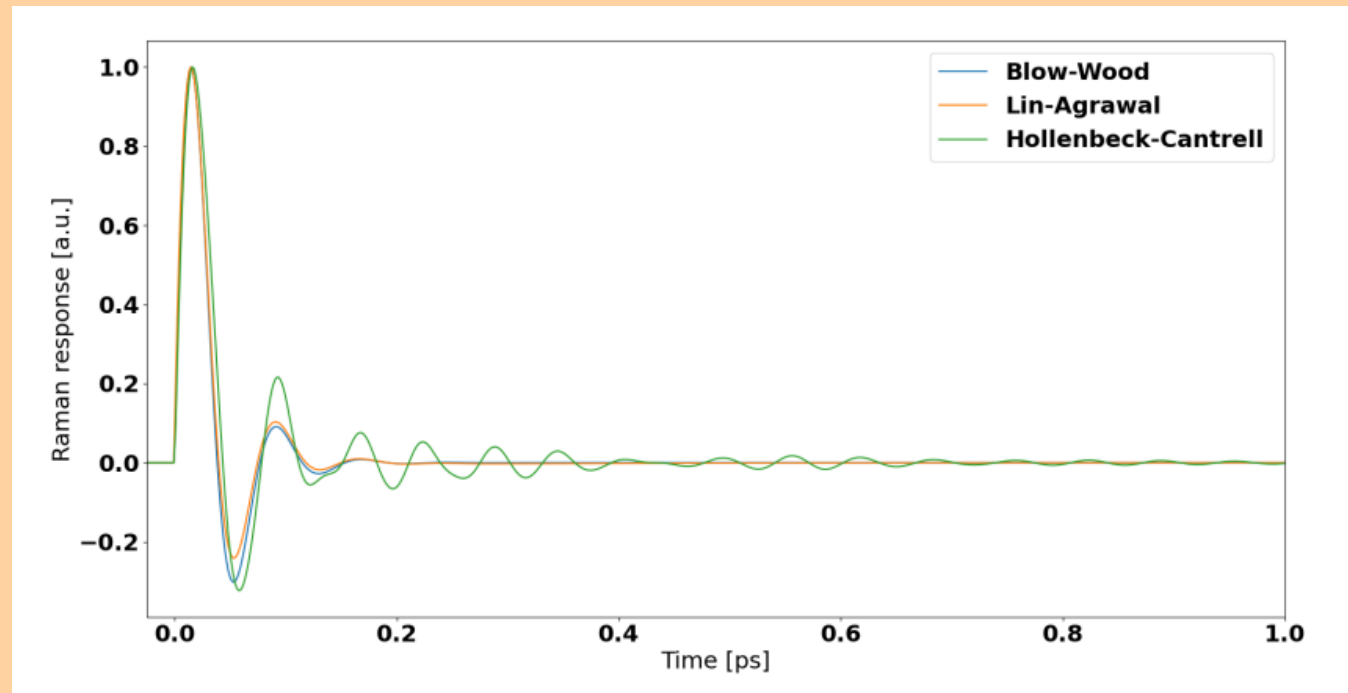
Wyznaczenie odpowiedzi ramanowskiej



R. H. Stolen, W. J. Tomlinson, H. A. Haus, J. P. Gordon, "Raman response function of silica-core fibers," J. Opt. Soc. Am. B 6(6): 1159 (1989).

Rozpraszanie Ramana

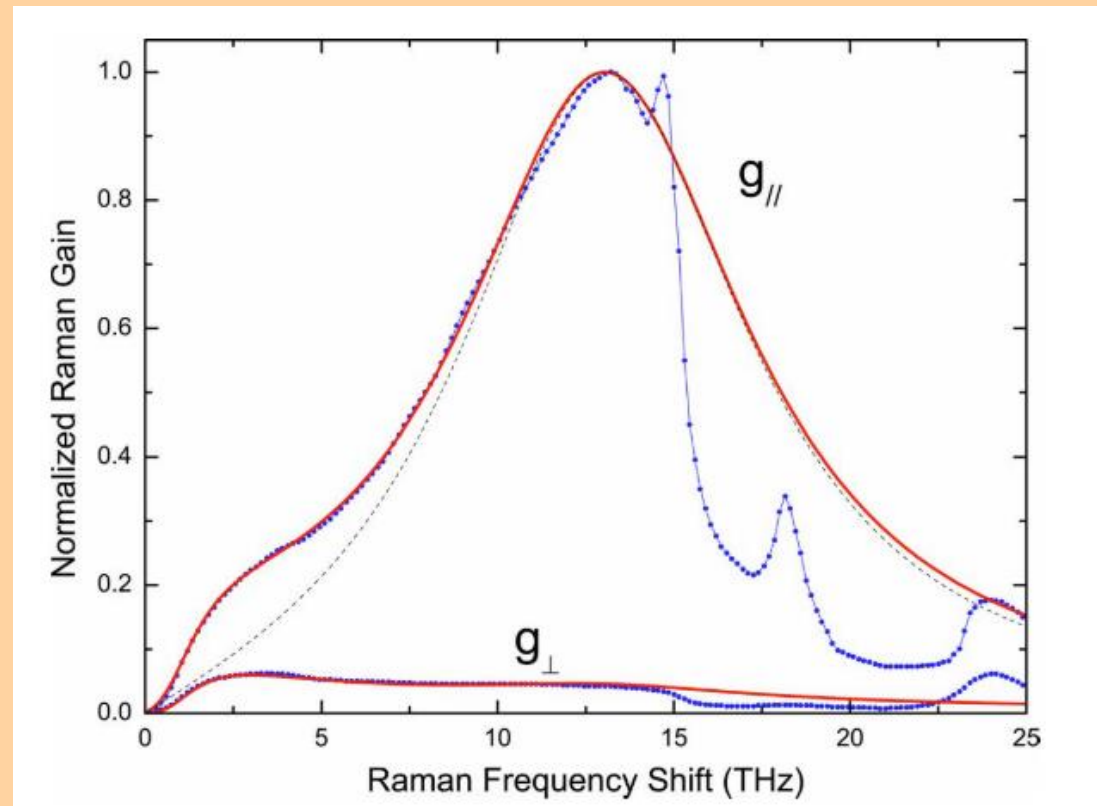
Modele odpowiedzi ramanowskiej



P. Redman, M. Zatorska, et al., "gnlse-python: Open Source Software to Simulate Nonlinear Light Propagation In Optical Fibers, arXiv:2110.00298 (2021).

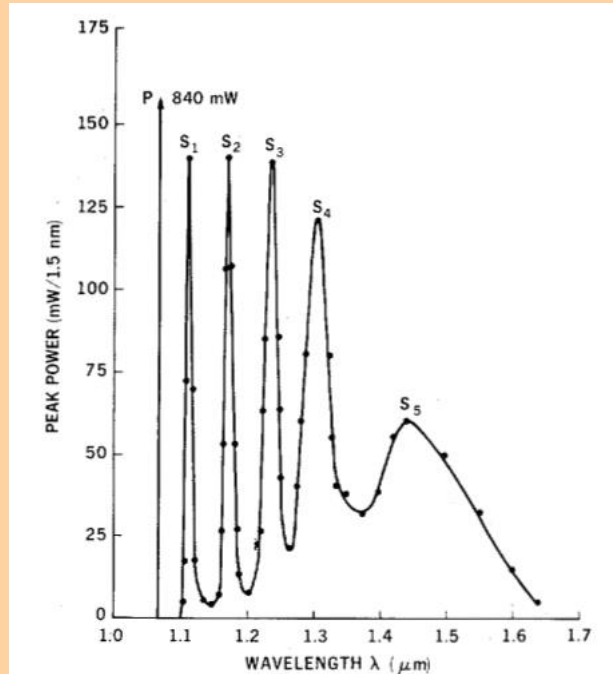
Rozpraszanie Ramana

Modele odpowiedzi ramanowskiej



Rozpraszanie Ramana

Pompowanie w trybie (kwazi)ciągłym



$$\lambda_p = 1,06 \mu\text{m}$$

$$\lambda_1 = 1,12 \mu\text{m}$$

$$\lambda_2 = 1,18 \mu\text{m}$$

$$\lambda_3 = 1,24 \mu\text{m}$$

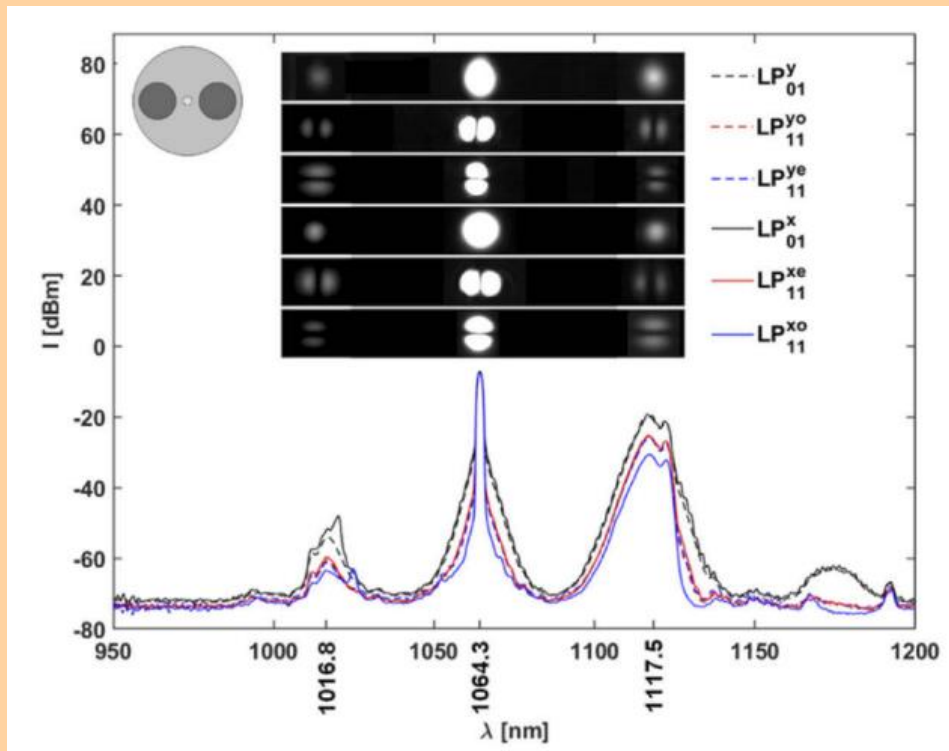
$$\lambda_4 = 1,31 \mu\text{m}$$

$$\lambda_5 = 1,44 \mu\text{m}$$

L. G. Cohen, C. Lin, "A Universal Fiber-optic (UFO) Measurement System," J. Quantum Electron. QE-14(11), 855-859 (1978)

Rozpraszanie Ramana

Pompowanie w trybie (kwazi)ciągłym



K. Żołnacz, W. Urbanczyk, "Selective excitation of different combinations of LP_{01} and LP_{11} polarization modes in a birefringent optical fiber using a Wollaston prism," *Opt. Express* 30(2), 926-938 (2022).

Rozpraszanie Ramana

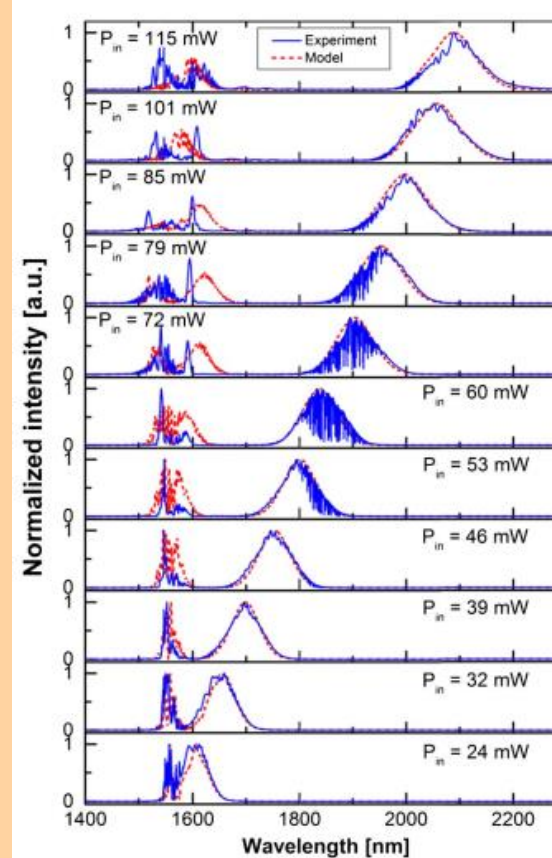
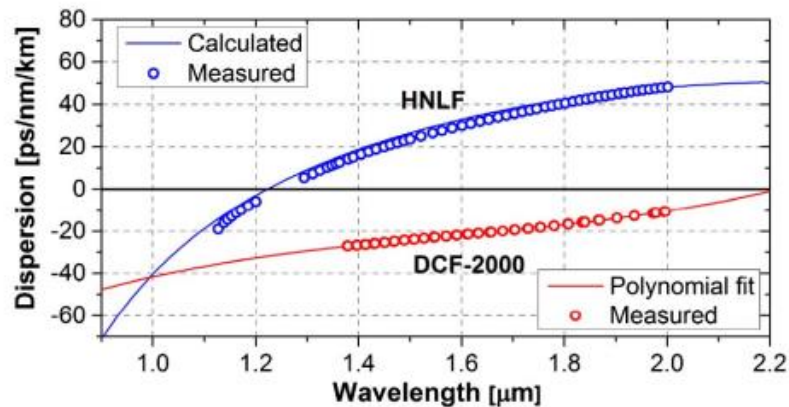
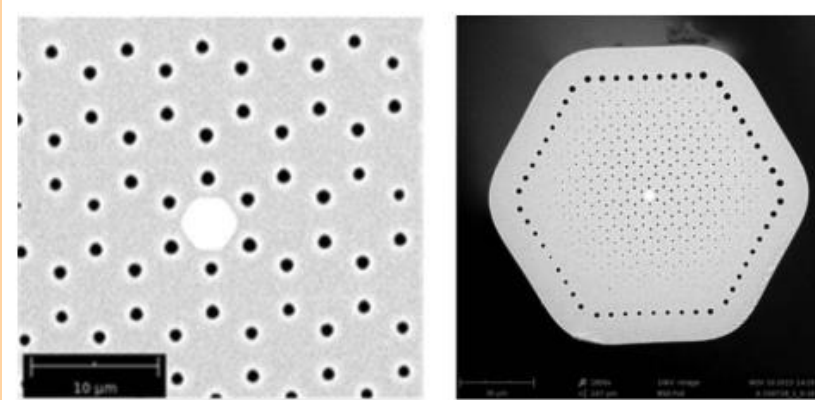
Charakterystyczne długości

- Dyspersja
- Separacja czasowa (walk-off)
- Nieliniowość
- Rozpraszanie Ramana

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad L_W = \frac{T_0}{|\Delta\beta_1|}, \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma_0 P_0}, \quad L_G = \frac{1}{g_p P_0}$$

Rozpraszanie Ramana

Przestrzajanie impulsów femtosekundowych

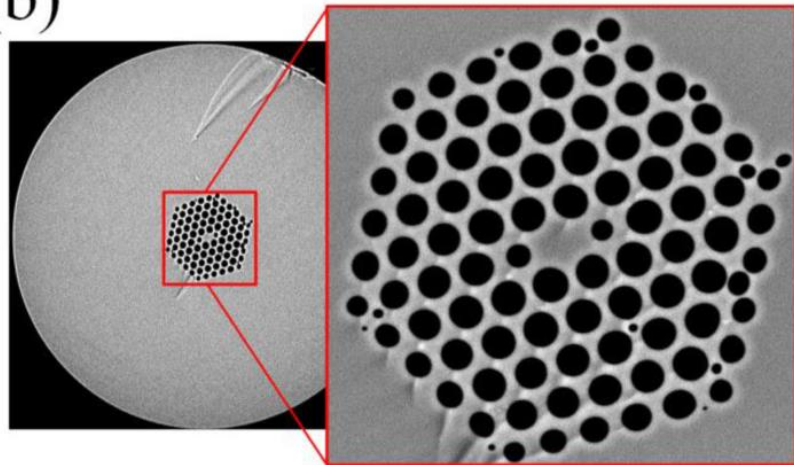


G. Soboń, T. Martynkien et al.
Photonics Res. 5(3), 151 (2017).

Rozpraszanie Ramana

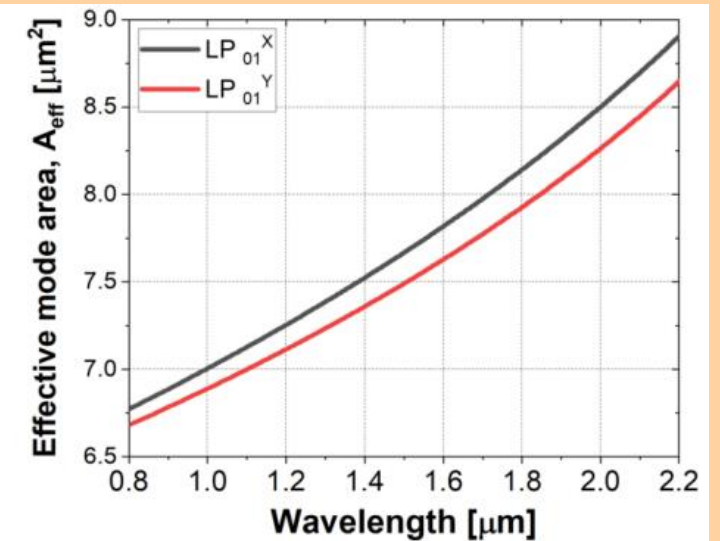
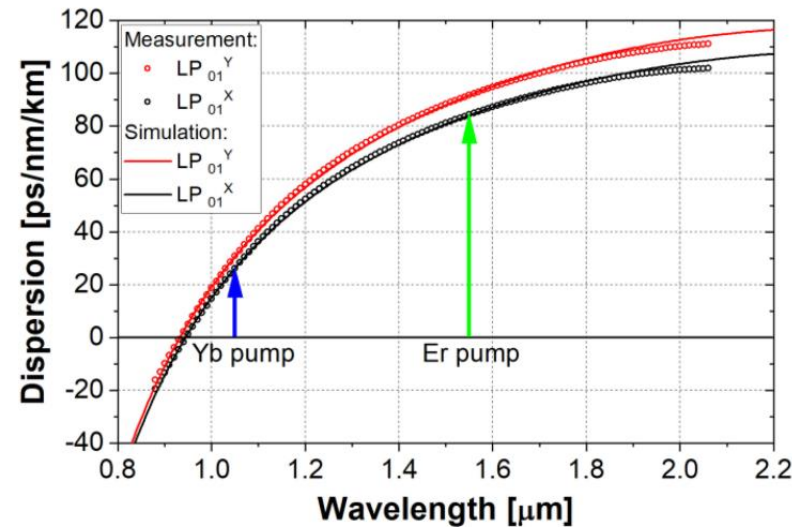
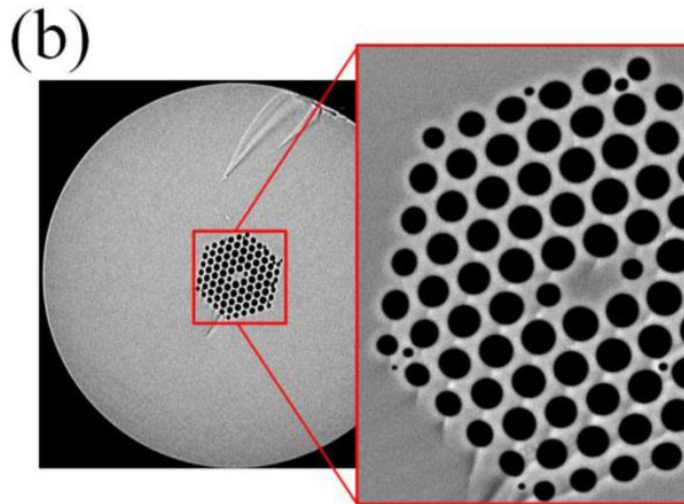
Przestrzajanie impulsów femtosekundowych

(b)



Rozpraszanie Ramana

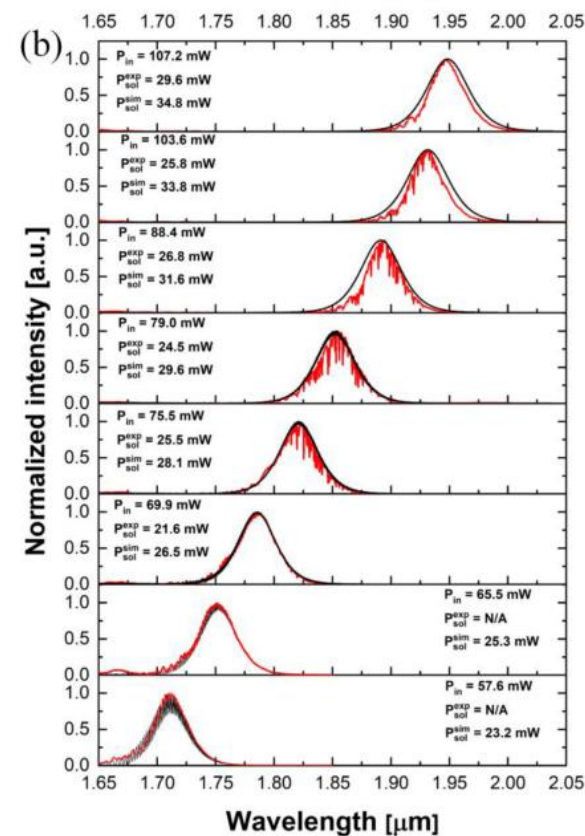
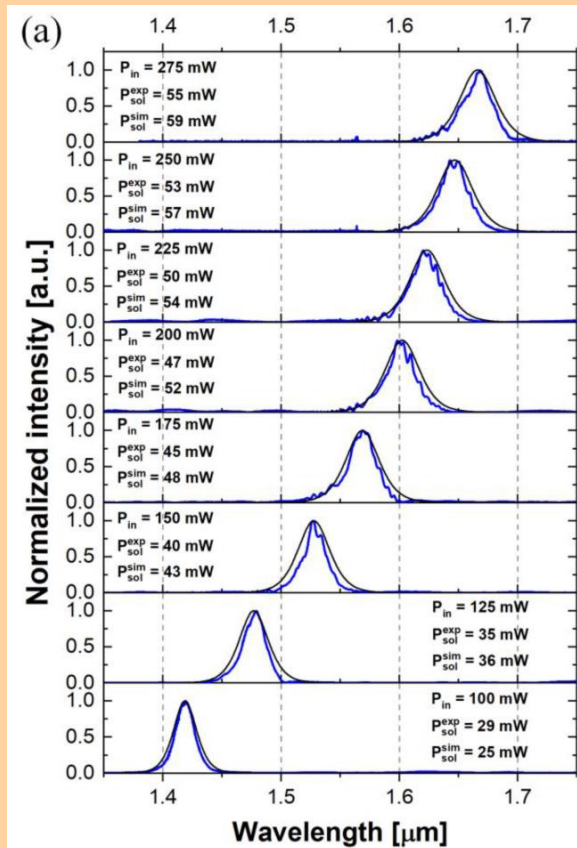
Przestrzajanie impulsów femtosekundowych



O. Szewczyk et al., J. Light.
Technol. 39(10), 3260-3268 (2021).

Rozpraszanie Ramana

Przestrzajanie impulsów femtosekundowych



O. Szewczyk et al., J. Light.
Technol. 39(10), 3260-3268 (2021).

Rozpraszanie Ramana

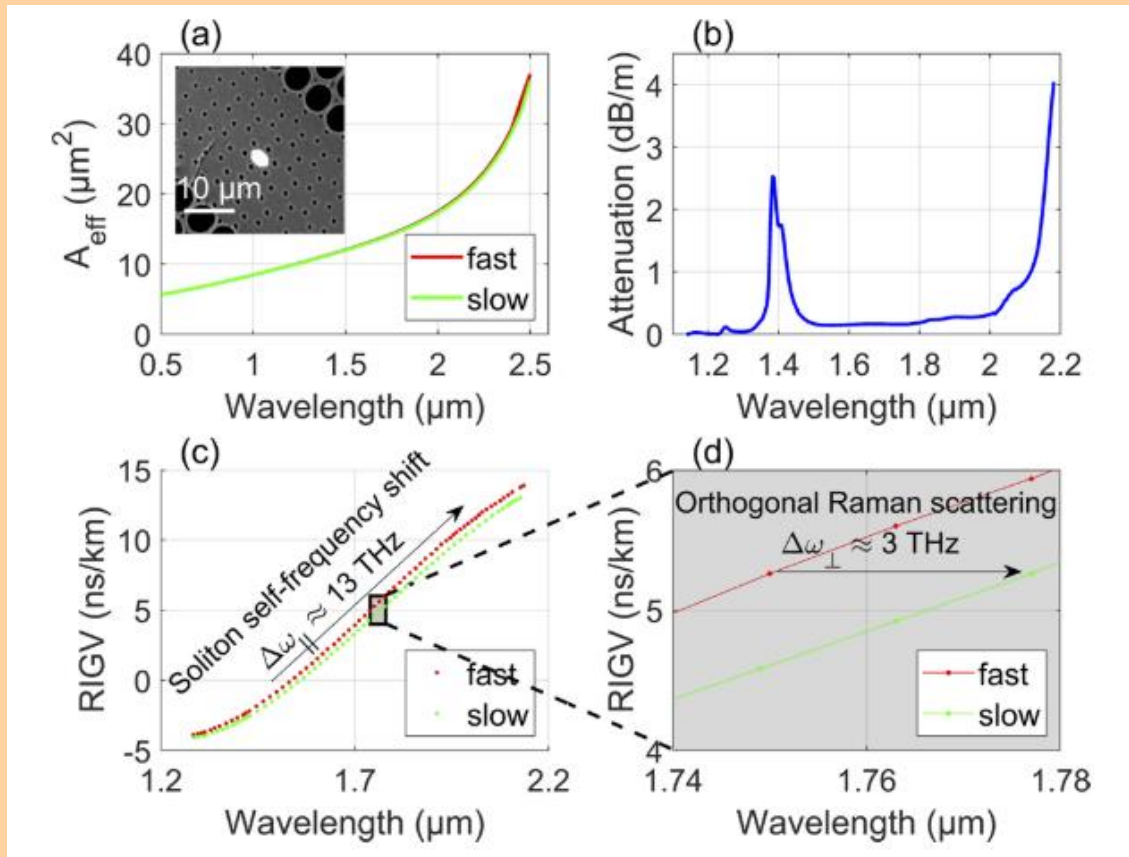
Przestrzajanie impulsów femtosekundowych

- Przewrojenie solitonu w funkcji dystansu propagacji

$$\Omega_p(z) = -\frac{8T_R \gamma P_0}{15T_0^2} z = -\frac{8T_R |\beta_2|}{15T_0^4} z$$

Rozpraszanie Ramana

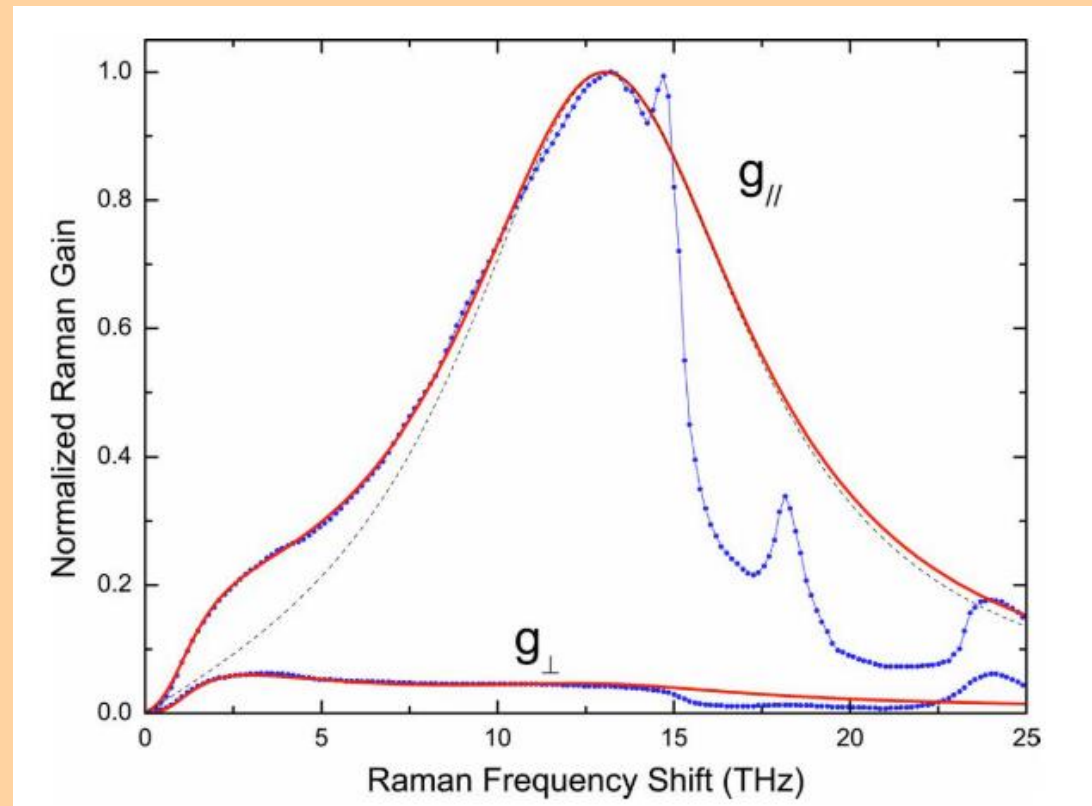
Przestrzajanie impulsów fs - efekty polaryzacyjne



K. Stefańska, S. Majchrowska et al.,
Opt. Lett. 47(16), 4183-4186 (2022).

Rozpraszanie Ramana

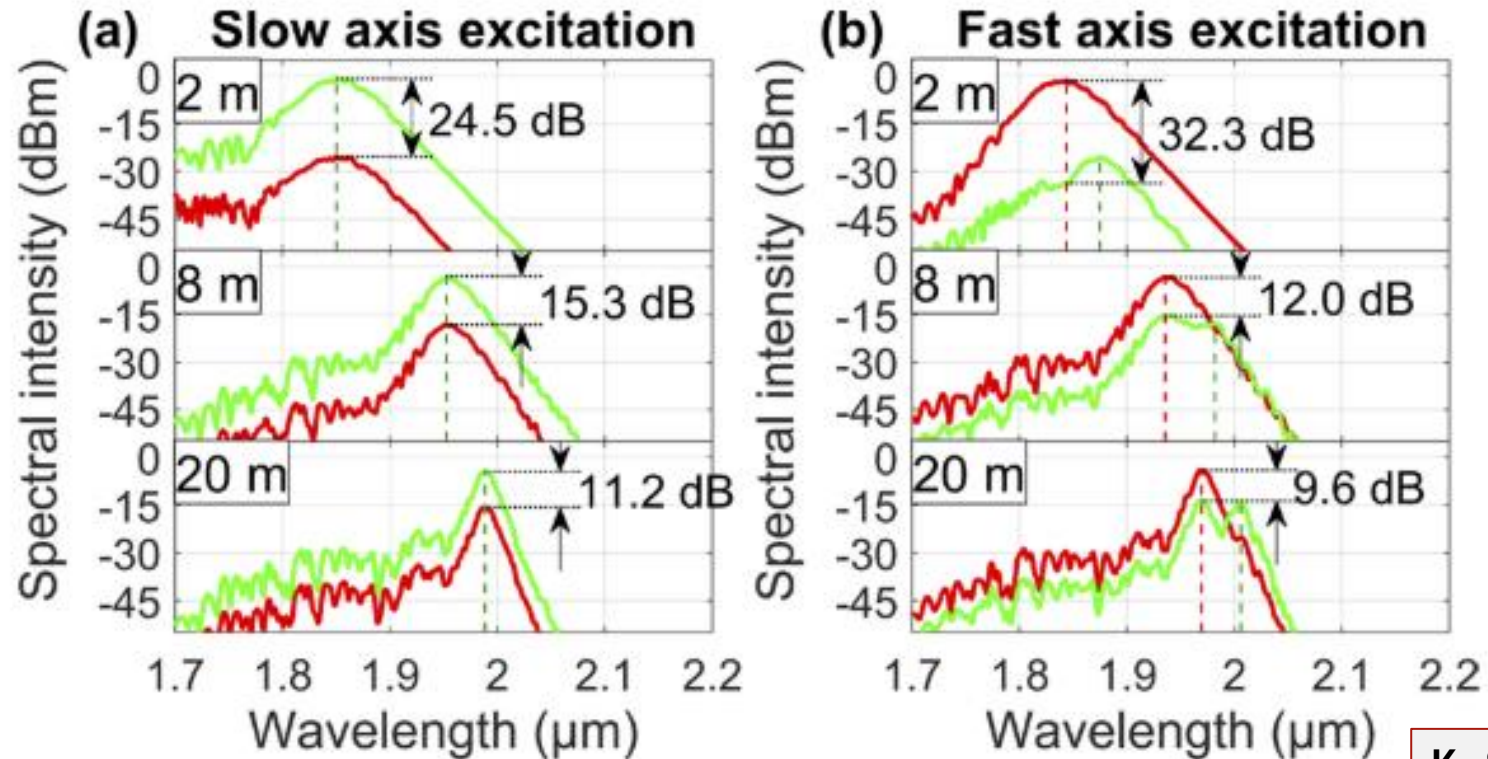
Ortogonalna składowa



Q. Lin, G. P. Agrawal, "Raman response function for silica fibers," Opt. Lett. 31(21): 3086-3088 (2006).

Rozpraszanie Ramana

Przestrzajanie impulsów fs - efekty polaryzacyjne



K. Stefańska, S. Majchrowska et al.,
Opt. Lett. 47(16), 4183-4186 (2022).

Podsumowanie

Opis odpowiedzi ramanowskiej

Rozpraszanie Ramana w reżimie kwazi-ciągłym

Rozpraszanie Ramana w reżimie impulsów femtosekundowych