

Zjawiska nieliniowe w światłowodach

W110PA-SM0050W (FTP003030W)

rok akademicki 2023/24

semestr zimowy

Wykład 7

Karol Tarnowski

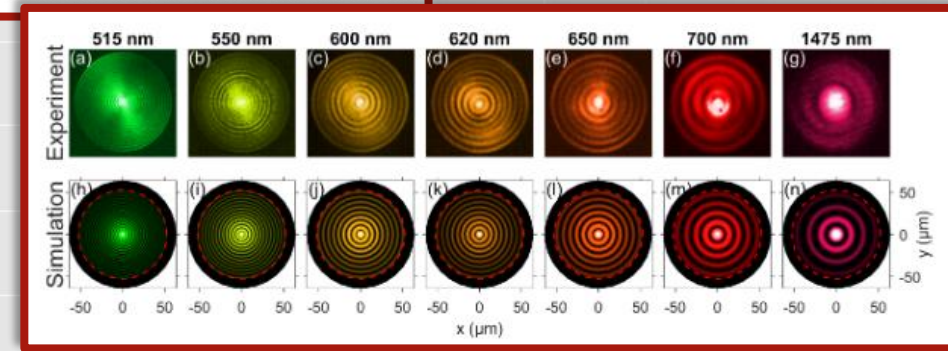
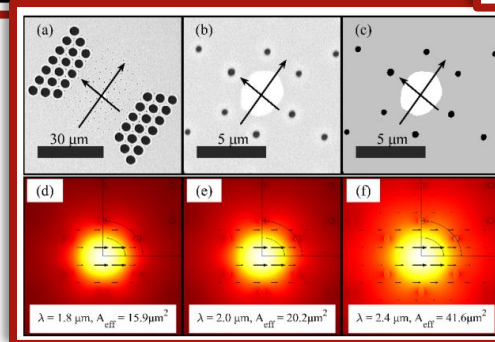
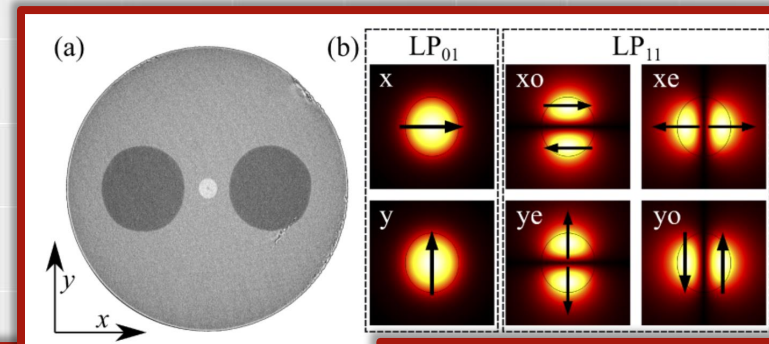
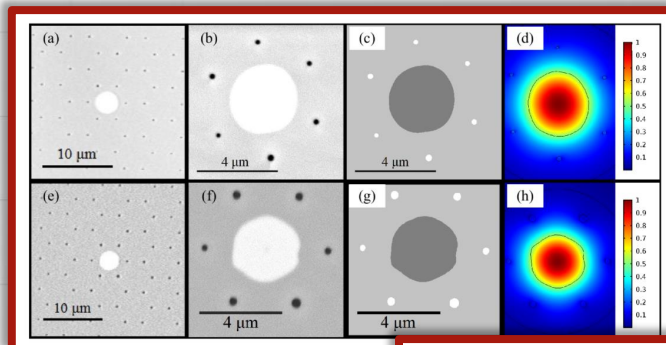
karol.tarnowski@pwr.edu.pl

L-1 p. 220



Politechnika
Wroclawska

Zjawiska nieliniowej optyki światłowodowej - procesy konwersji częstotliwości w światłowodach jednomodowych, dwójłomnych, kilkumodowych oraz wielomodowych



unite!
University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Karol Tarnowski

Politechnika Wroclawska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki,
Katedra Optyki i Fotoniki, Grupa Optyki Światłowodowej

13.12.2023

Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

Światłowody kilkumodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa

Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

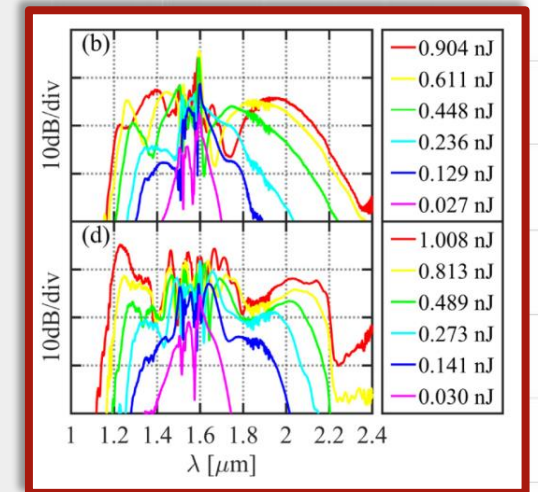
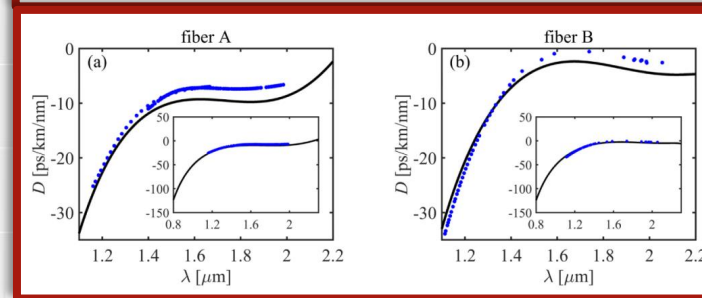
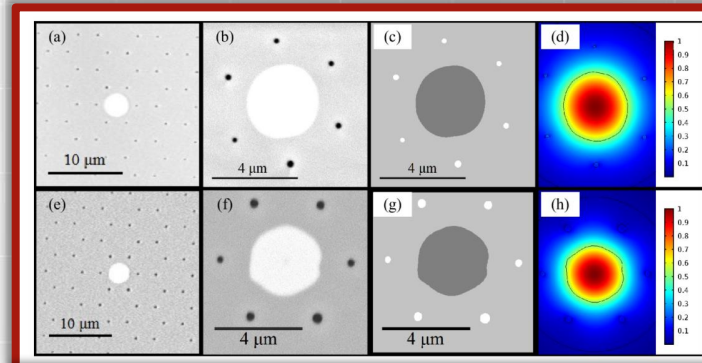
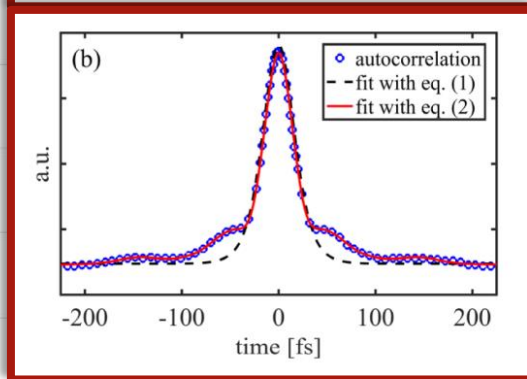
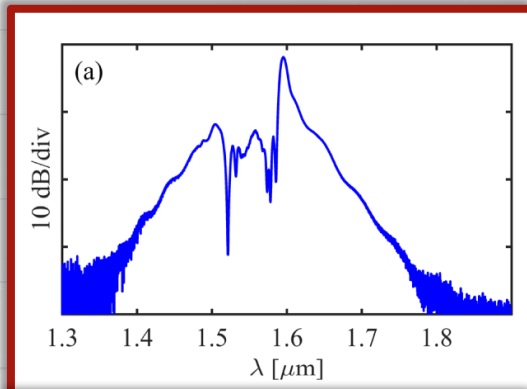
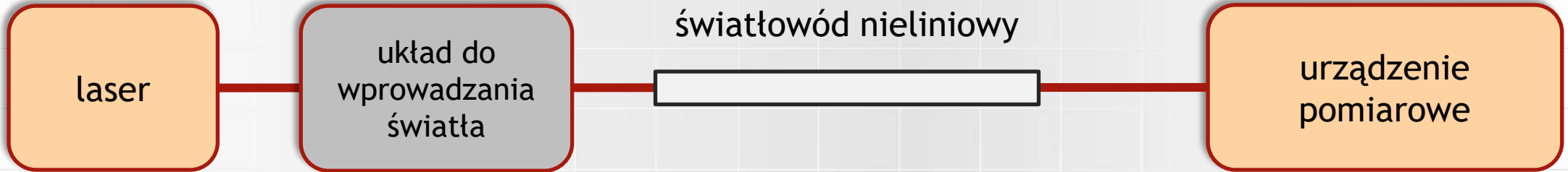
Światłowody kilkumodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

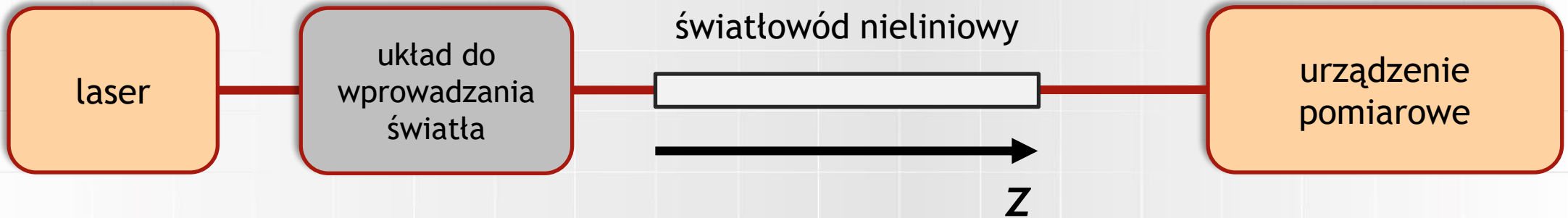
Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa

Typowy układ pomiarowy



Eksperyment numeryczny

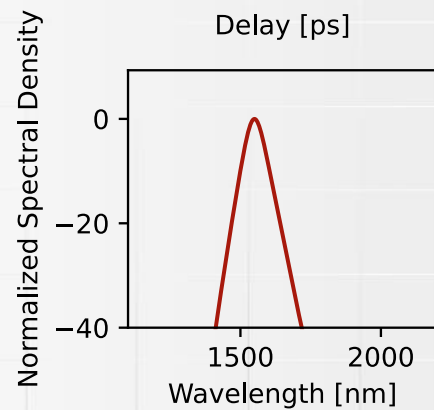
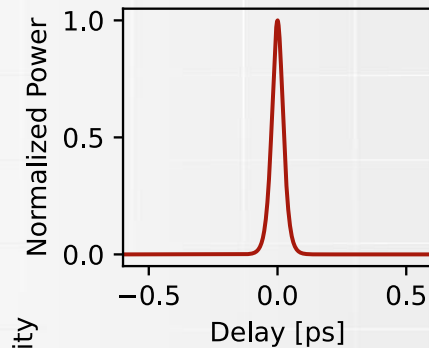
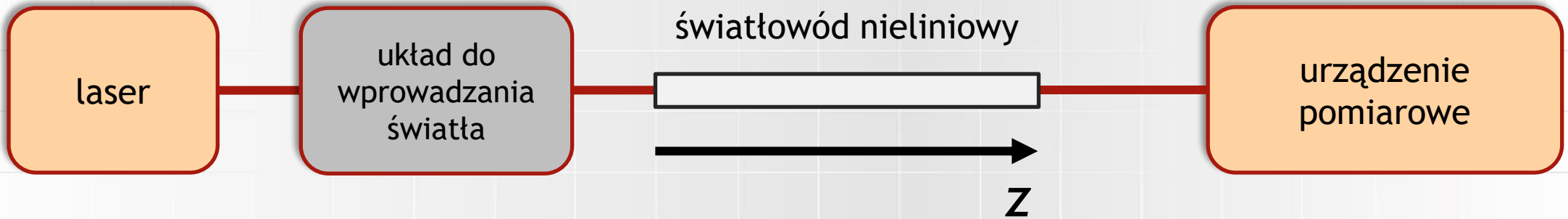


$$A(0, T) = \mathcal{F}^{-1} \{ \tilde{A}(0, \Omega) \}$$
$$\tilde{A}(0, \Omega) = \mathcal{F} \{ A(0, T) \}$$

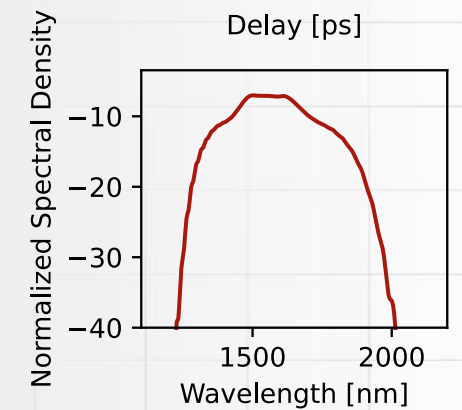
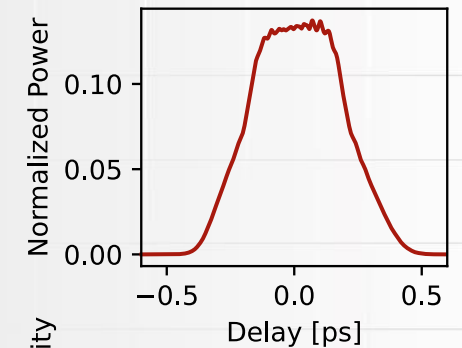
$$\frac{\partial A}{\partial z} = D(A) + N(A)$$

$$I(\Omega)$$
$$I(T)$$
$$S(\Omega, T)$$

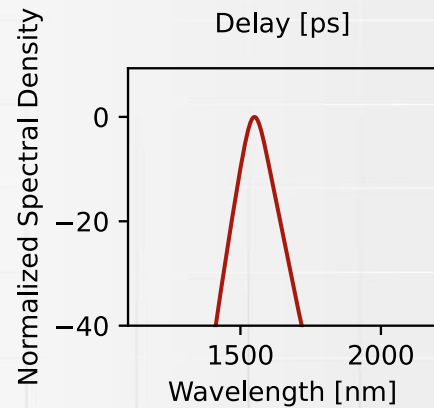
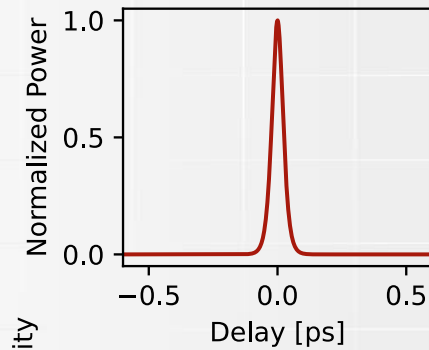
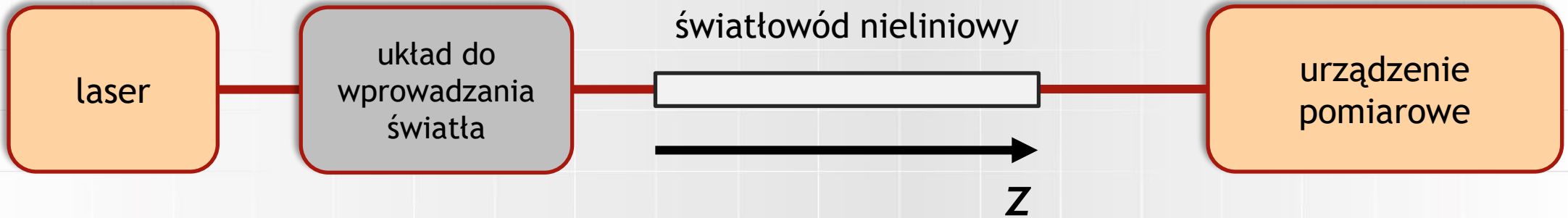
Eksperyment numeryczny



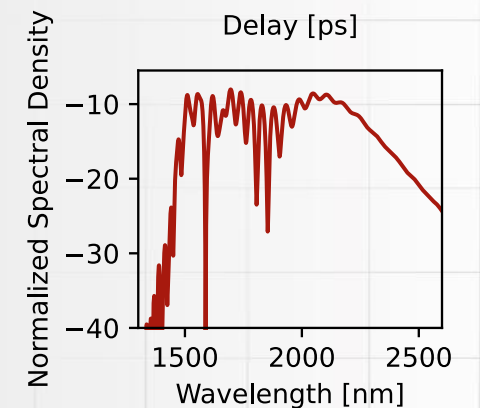
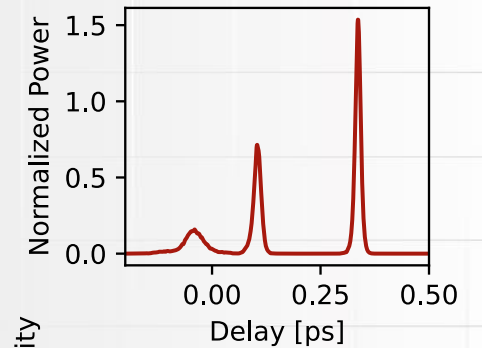
światłowód
o dyspersji
normalnej



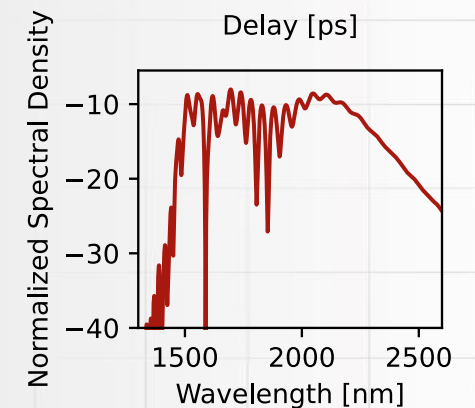
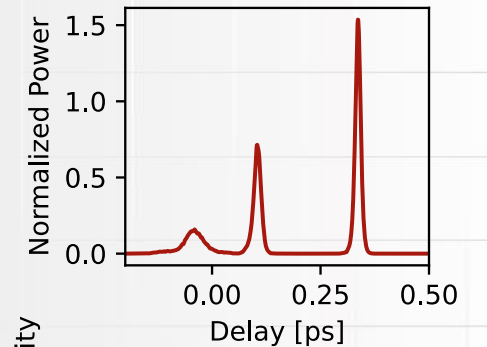
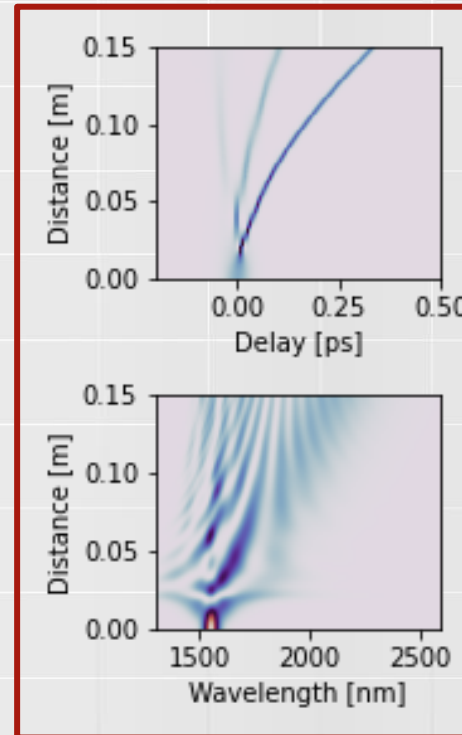
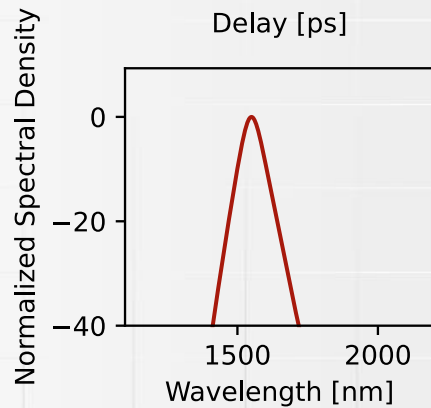
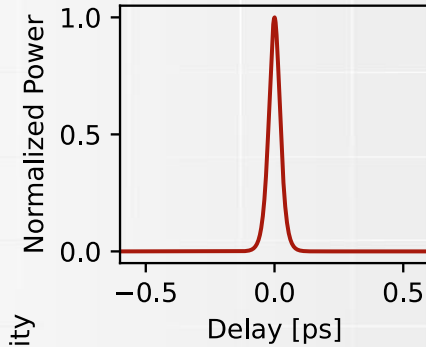
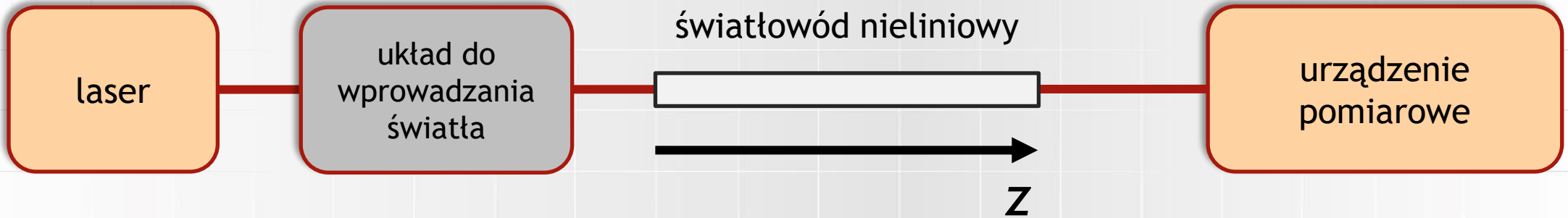
Eksperyment numeryczny



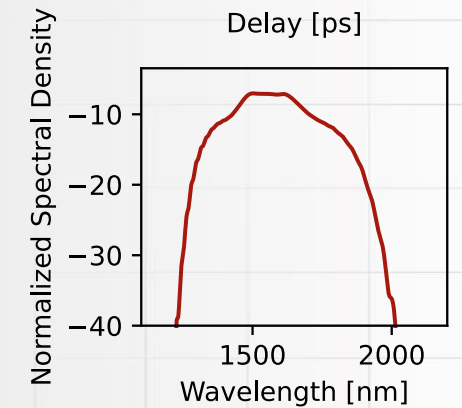
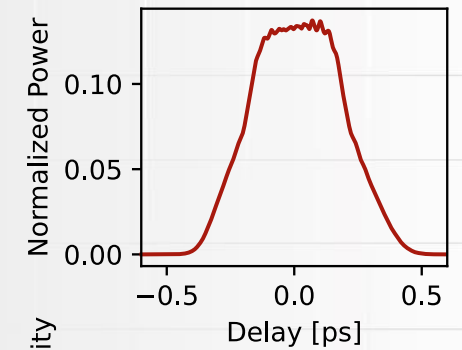
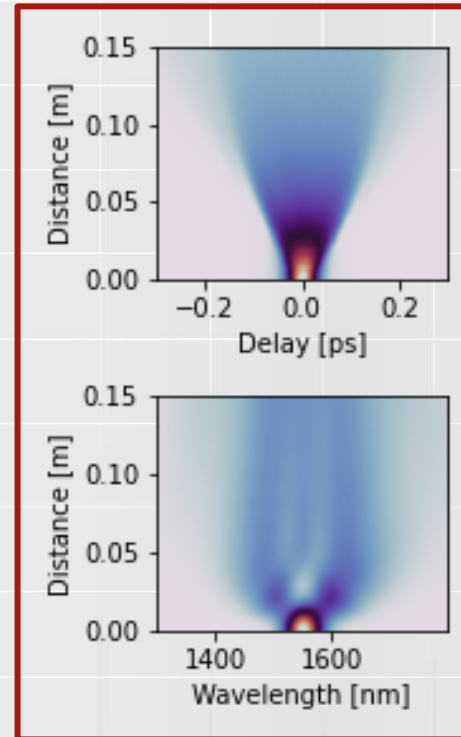
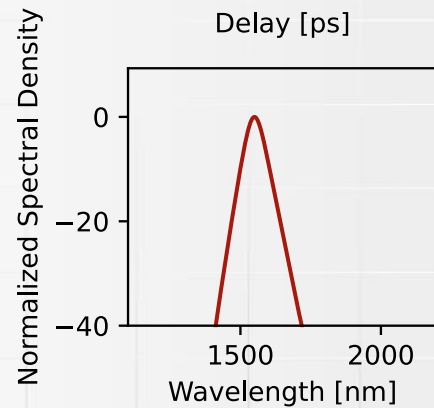
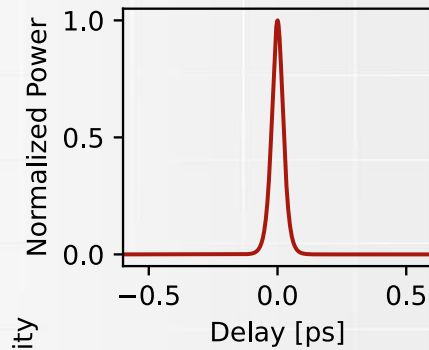
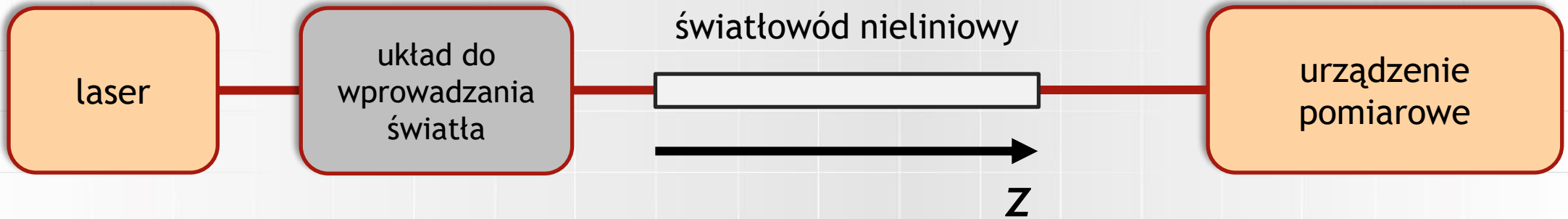
światłowód
o dyspersji
anomalnej



Eksperyment numeryczny



Eksperyment numeryczny



Nieliniowe równanie Schrödingera

Uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2} A + i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n \beta_n}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial t^n}}_{D(A)} + \underbrace{i \gamma A \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'}_{N(A)}$$

Nieliniowe równanie Schrödingera

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left(-\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 \right) A$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi$$

Procesy konwersji częstotliwości

Optycznie indukowana zmiana współczynnika załamania

- samomodulacja fazy (SPM, self-phase modulation)
- wzajemna modulacja fazy (XPM, cross-phase modulation XPM)
 - różne długości fal w tym samym modzie światłowodu
 - ortogonalne polaryzacje w tym samym modzie światłowodu
 - różne mody
- niestabilność modulacyjna (MI, modulation instability)
- mieszanie czterech fal (FWM, four-wave mixing)

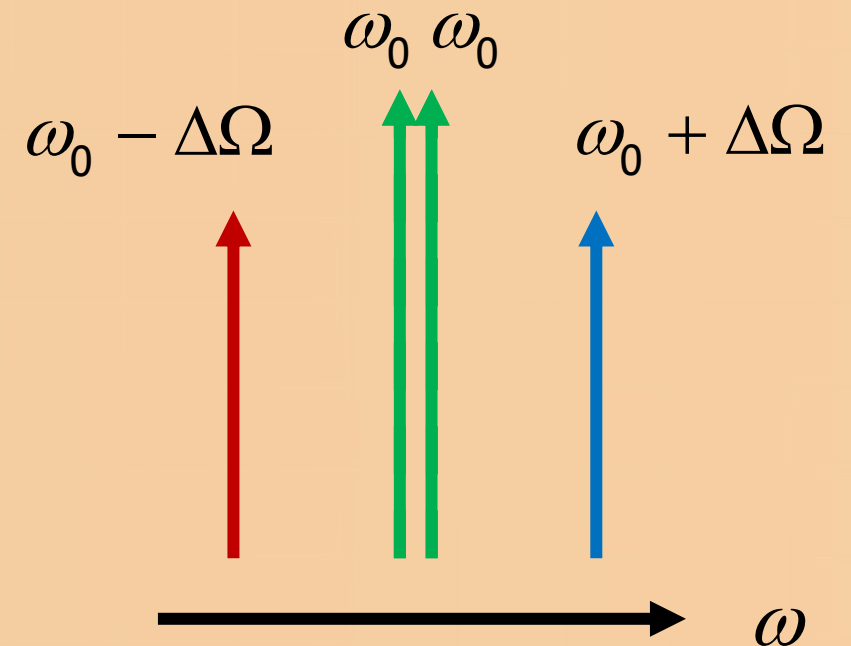
Procesy nieelastycznego rozpraszania

- wymuszone rozpraszanie Ramana (SRS, stimulated Raman scattering)

Procesy konwersji częstotliwości

Optycznie indukowana zmiana współczynnika załamania

- samomodulacja fazy
- wzajemna modulacja fazy
- niestabilność modulacyjna
- mieszanie czterech fal



Procesy konwersji częstotliwości

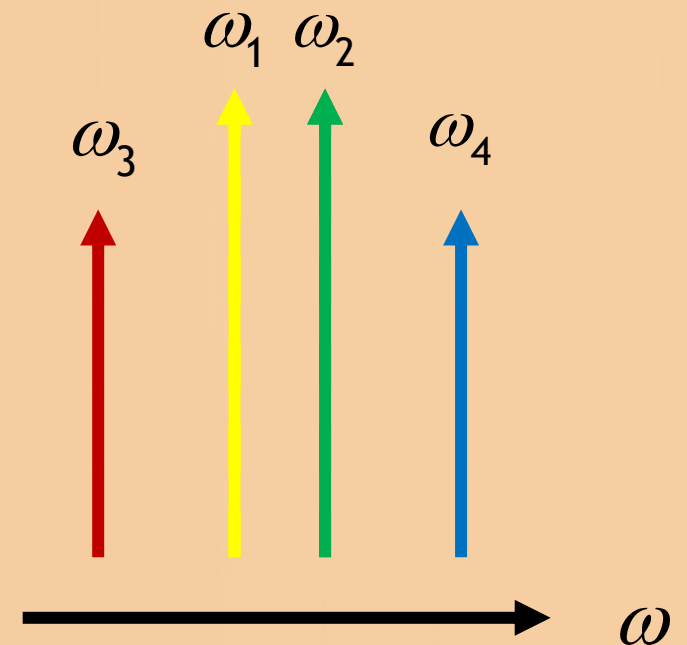
Optycznie indukowana zmiana współczynnika załamania

- mieszanie czterech fal

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \beta_3 + \beta_4$$

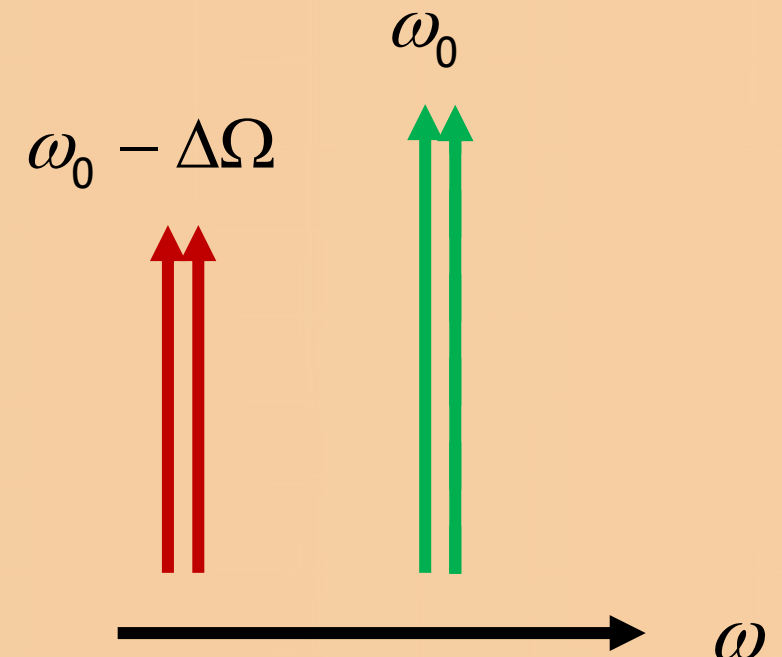
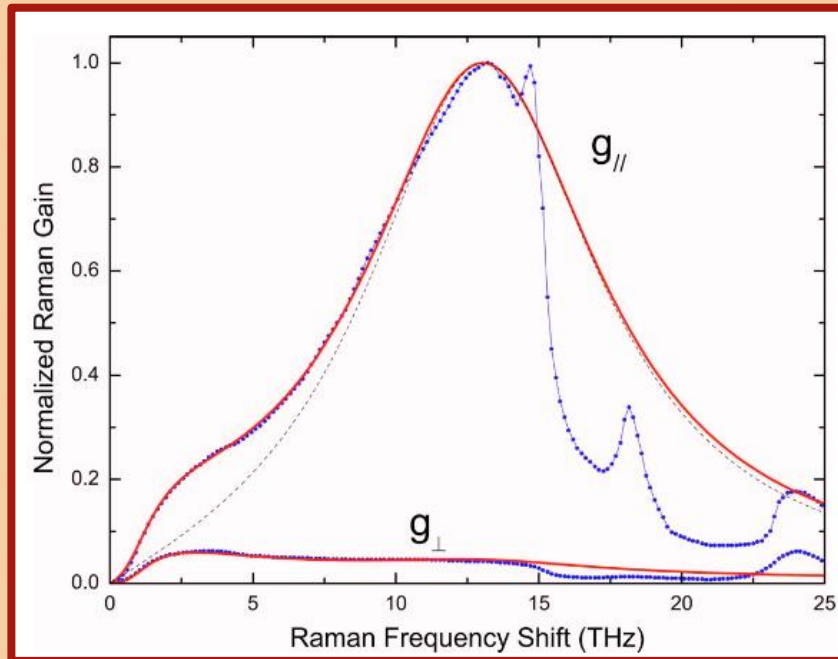
$$\beta_1 + \beta_2 = \beta_3 + \beta_4 + \Delta k_{\text{NL}}$$



Procesy konwersji częstotliwości

Procesy nieelastycznego rozpraszania

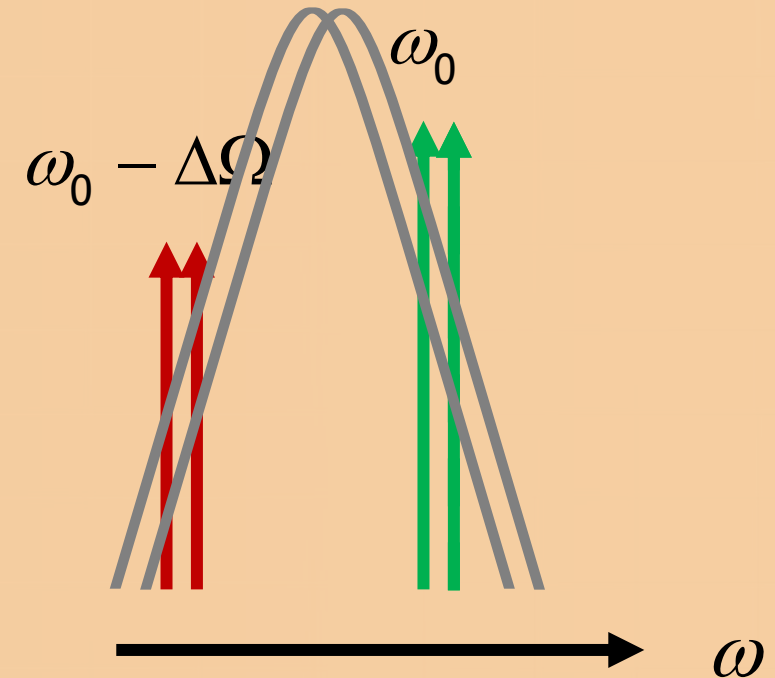
- wymuszone rozpraszanie Ramana



Procesy konwersji częstotliwości

Procesy nieelastycznego rozpraszania

- rozpraszanie Ramana w impulsie (intrapulse Raman scattering)



Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

Światłowody kilkumodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

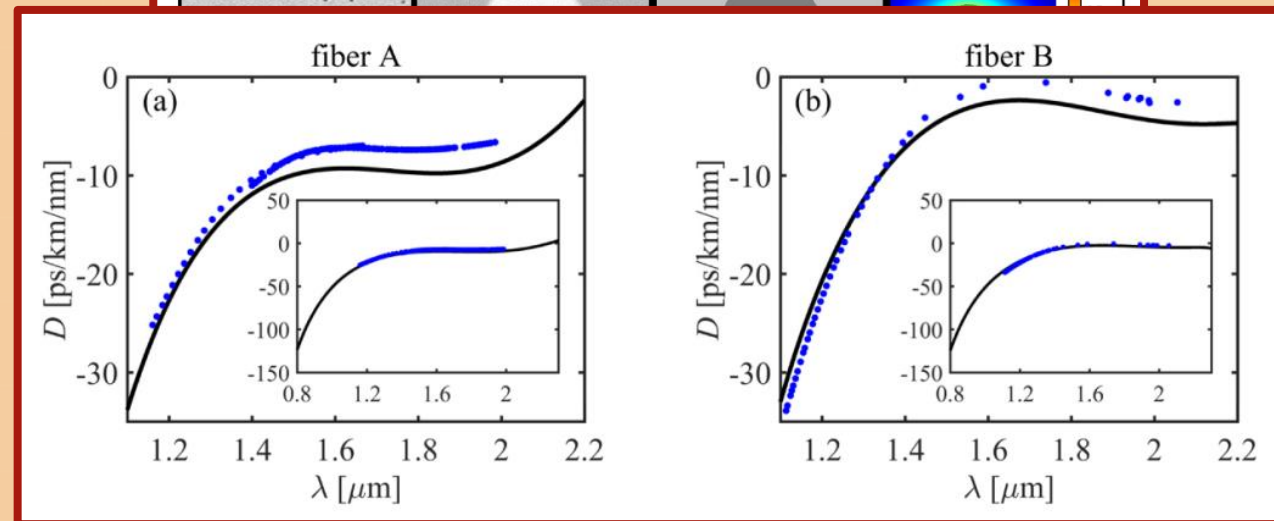
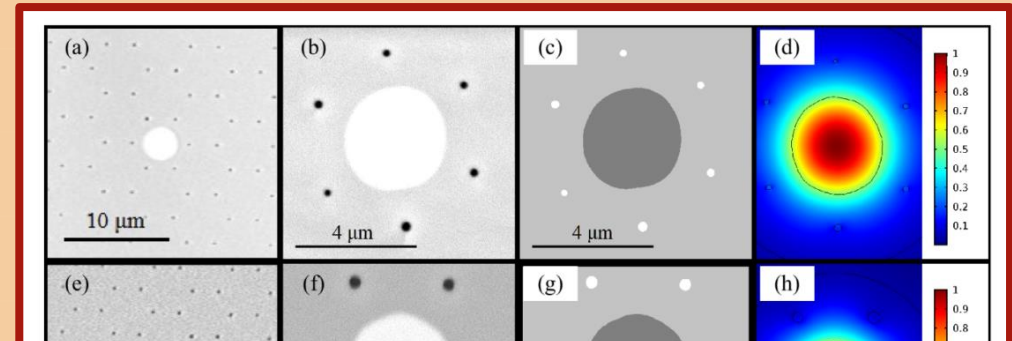
Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa

Generacja superkontinuum ANDi

Nieliniowe światłowody mikrostrukturalne o dyspersji normalnej

- projekt
- wytworzenie
- pomiar właściwości
- generacja superkontinuum

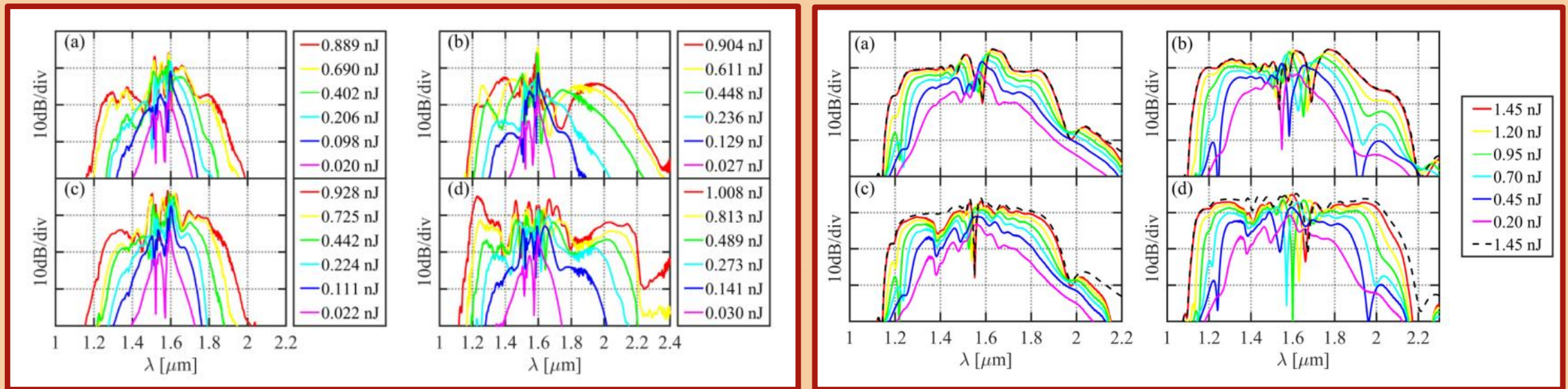


Generacja superkontinuum ANDi

Nieliniowe światłowody mikrostrukturalne
o dyspersji normalnej

- szerokie i koherentne widmo superkontinuum

23-fs
pumping

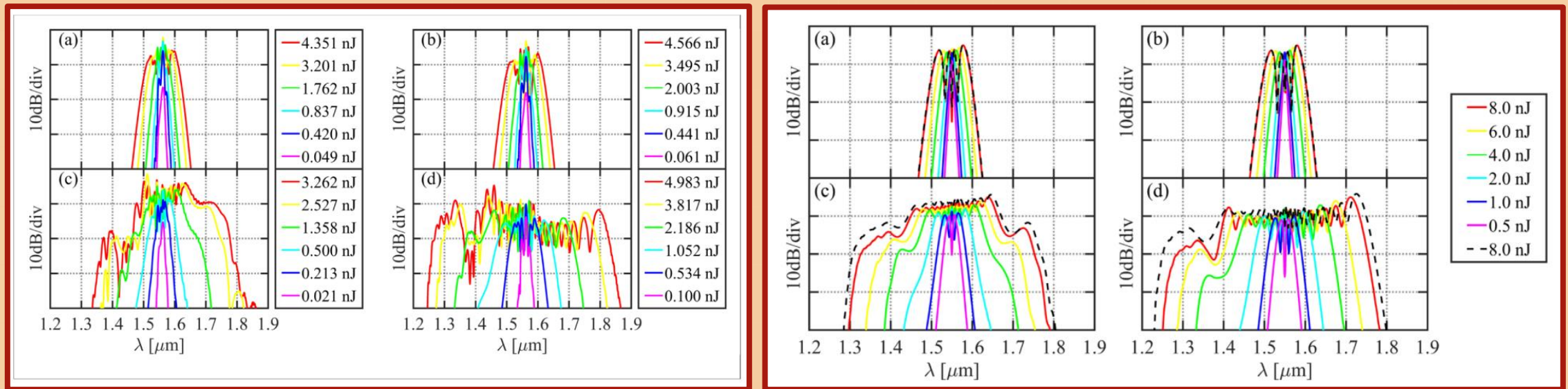


Generacja superkontinuum ANDi

Nieliniowe światłowody mikrostrukturalne
o dyspersji normalnej

- szerokie i koherentne widmo superkontinuum

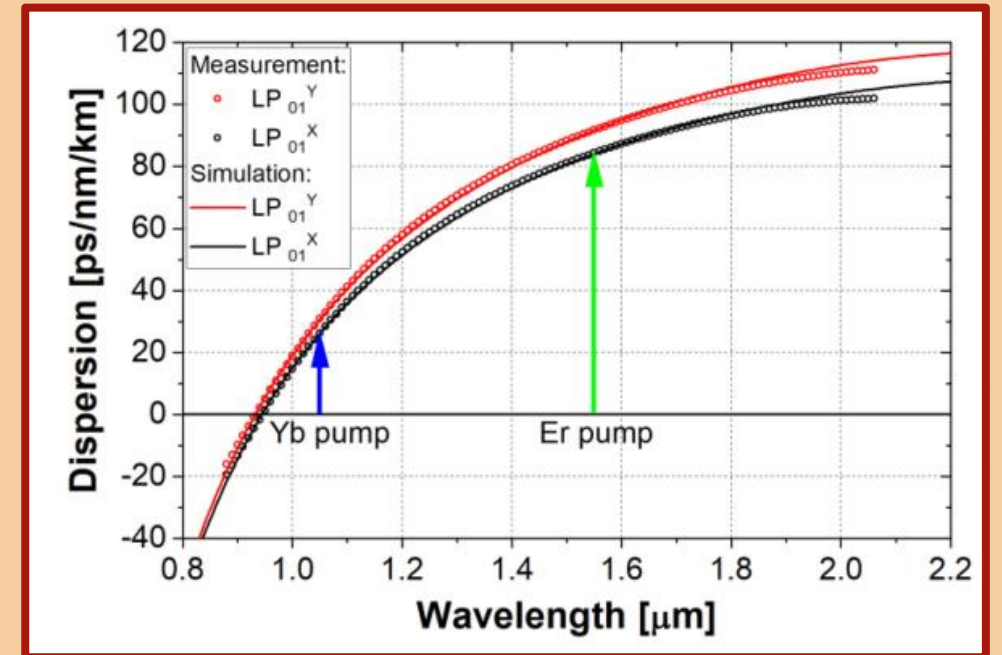
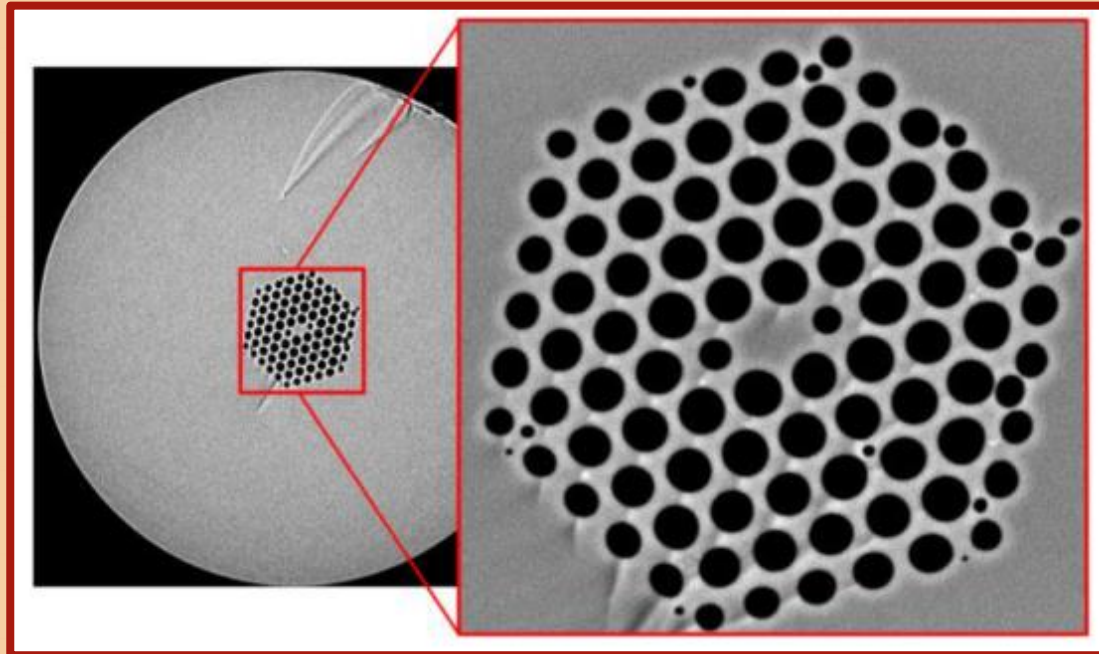
460-fs
pumping



Przestrzajanie solitonów

Nieliniowe światłowody mikrostrukturalne o dyspersji anomalnej

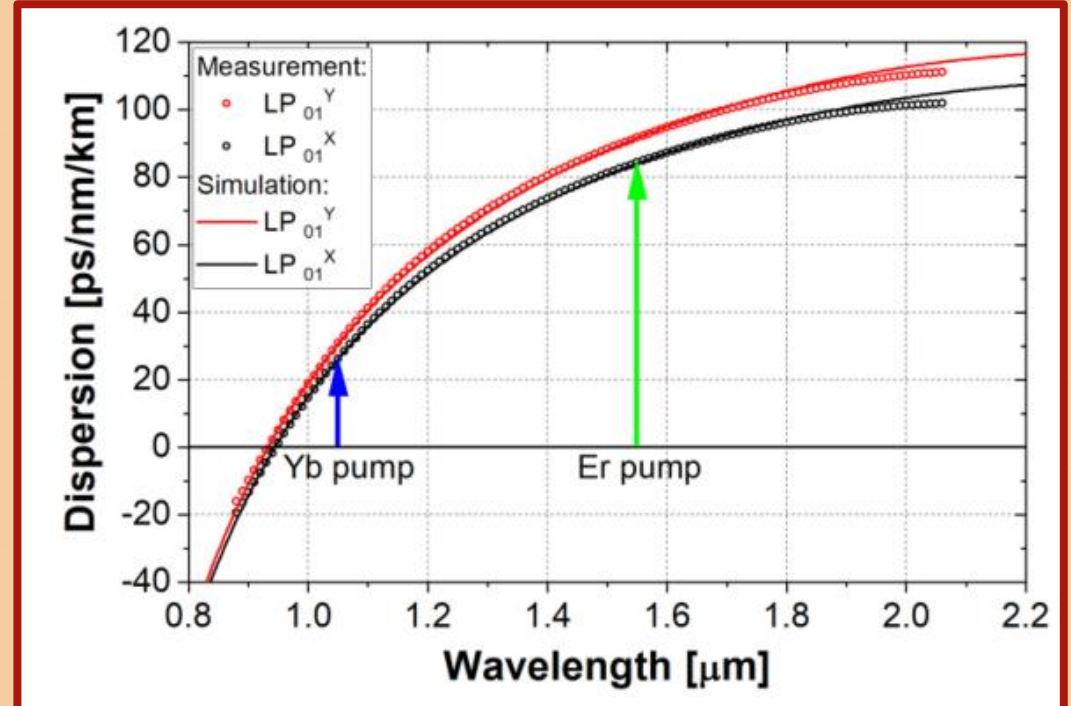
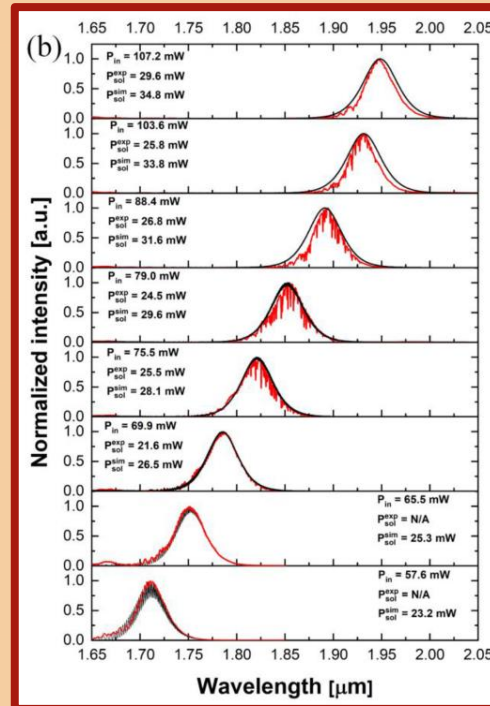
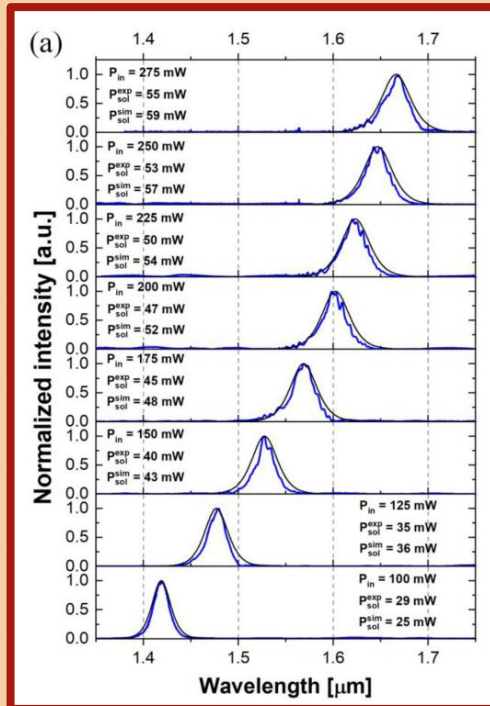
- szerokie przestrzajanie solitonów



Przestrzajanie solitonów

Nieliniowe światłowody mikrostrukturalne o dyspersji anomalnej

- szerokie przestrzajanie solitonów



Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

Światłowody kilkumodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa

Światłowody dwójłomne

Sprężone nieliniowe równania Schrödingera

$$\tilde{C}_x = \sqrt[4]{\frac{A_{\text{eff}}(\omega)}{A_{\text{eff}}(\omega_0)}} \tilde{A}_x, \quad \tilde{C}_y = \sqrt[4]{\frac{A_{\text{eff}}(\omega)}{A_{\text{eff}}(\omega_0)}} \tilde{A}_y$$

$$\frac{\partial \tilde{C}_x}{\partial z} = D_x(\tilde{C}_x) +$$

$$+ i \frac{n_2 n_0 \omega}{c n_{\text{eff}} \sqrt{A_{\text{eff}}(\omega) A_{\text{eff}}(\omega_0)}} \cdot \mathcal{F} \left\{ \left(|C_x|^2 + \frac{2}{3} |C_y|^2 \right) C_x + \frac{1}{3} C_y^2 C_x^* \exp(-2i\Delta\beta z) \right\}$$

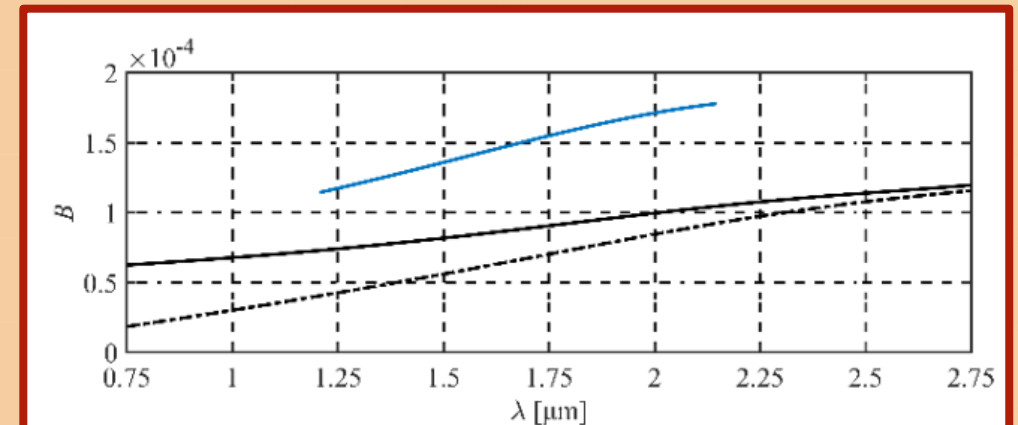
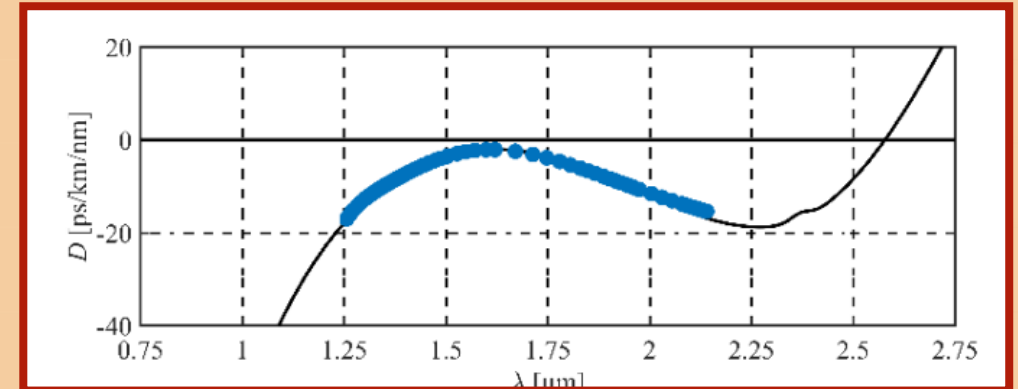
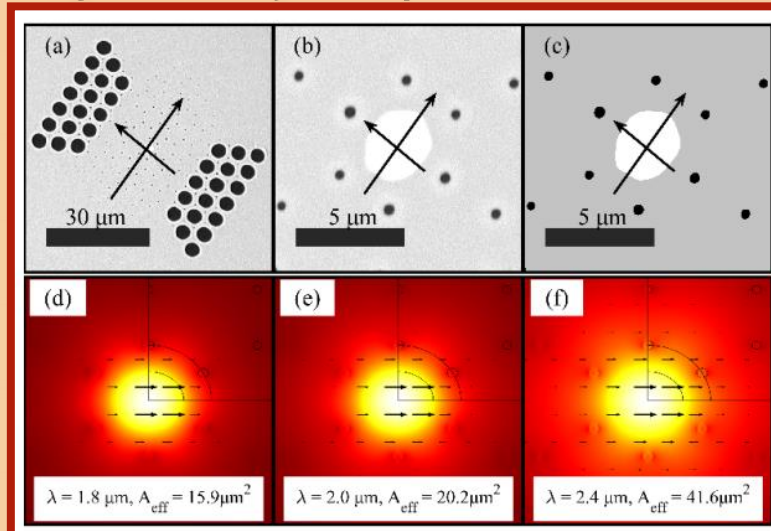
$$\frac{\partial \tilde{C}_y}{\partial z} = D_y(\tilde{C}_y) +$$

$$+ i \frac{n_2 n_0 \omega}{c n_{\text{eff}} \sqrt{A_{\text{eff}}(\omega) A_{\text{eff}}(\omega_0)}} \cdot \mathcal{F} \left\{ \left(|C_y|^2 + \frac{2}{3} |C_x|^2 \right) C_y + \frac{1}{3} C_x^2 C_y^* \exp(+2i\Delta\beta z) \right\}$$

Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)

Nieliniowy dwójłomny światłowód mikrostrukturalny o dyspersji normalnej

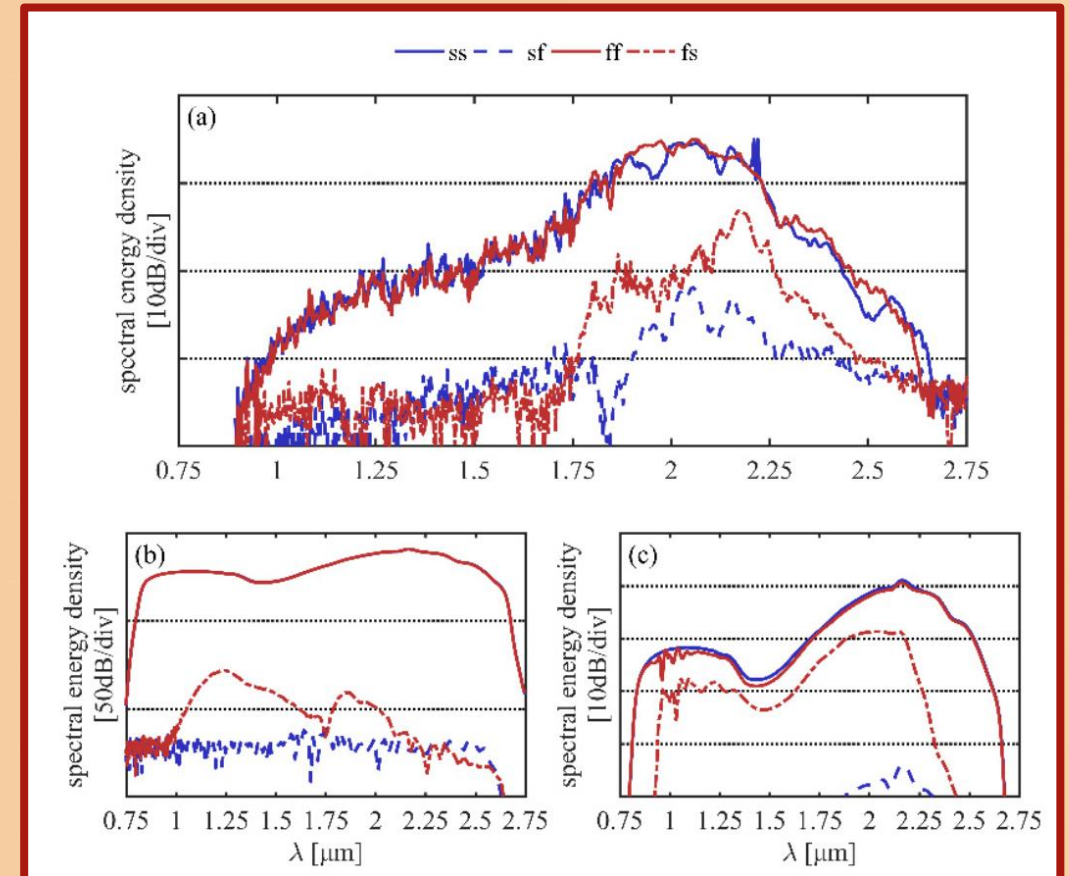
- projekt
- wytworzenie
- pomiar właściwości
- generacja superkontinuum



Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)

Generacja superkontinuum

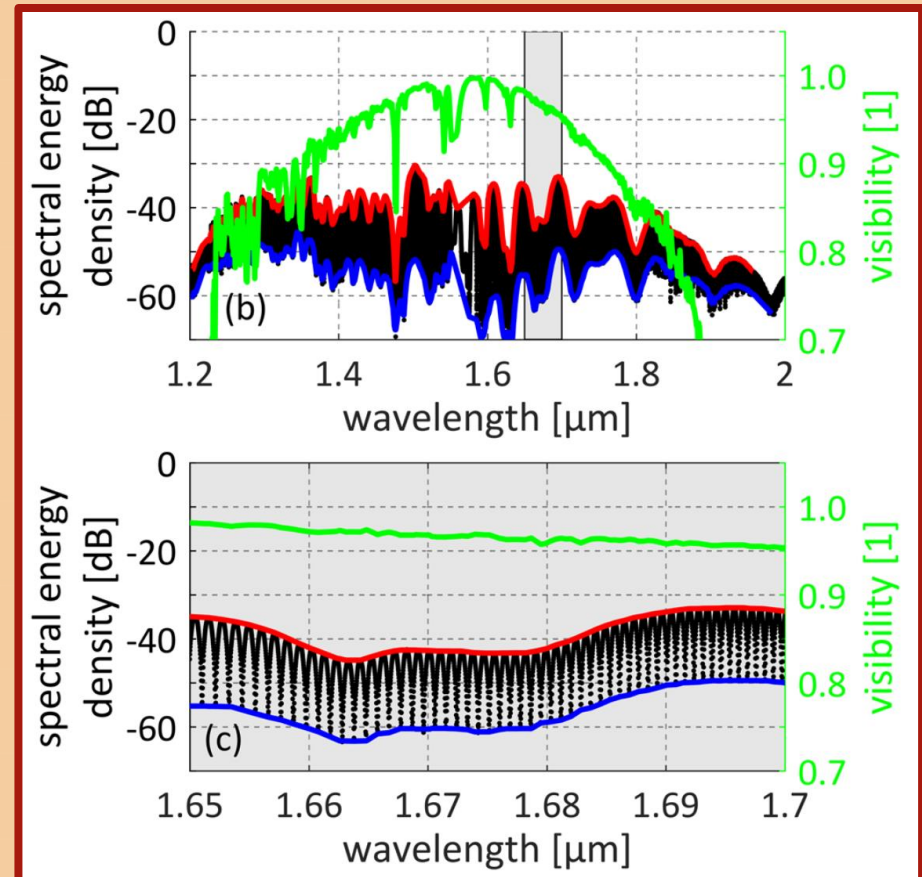
- reżim dyspersji normalnej
- spolaryzowane
- koherentne



Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)

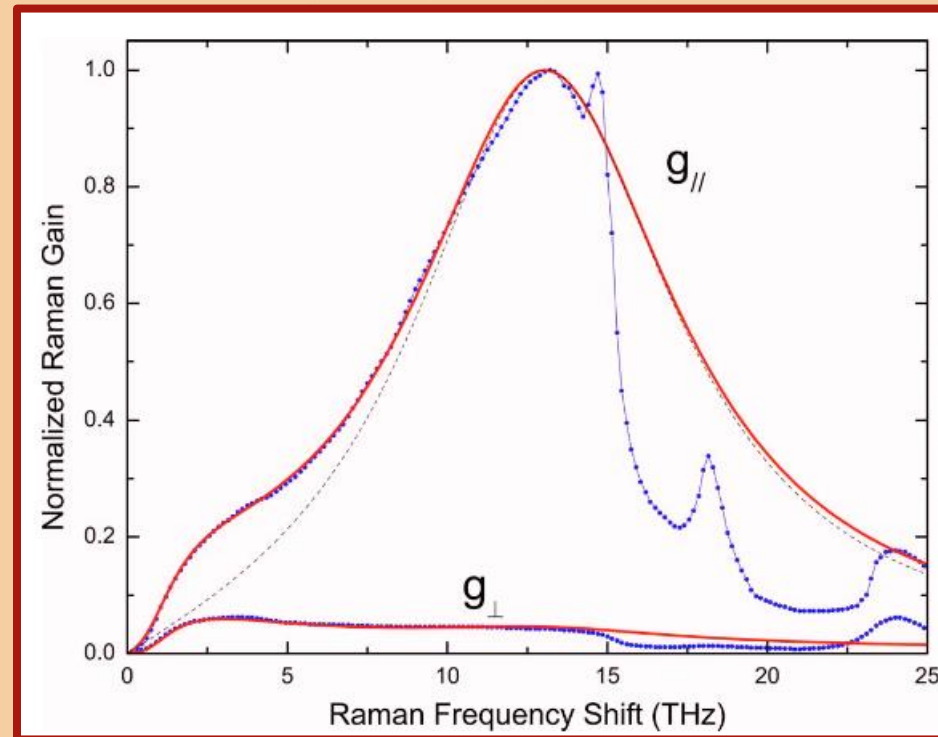
Generacja superkontinuum

- reżim dyspersji normalnej
- spolaryzowane
- koherentne



Ortogonalne rozpraszanie Ramana

Widmo wzmocnienia rozpraszania Ramana



Ortogonalne rozpraszanie Ramana

Sprężone nieliniowe równania Schrödingera

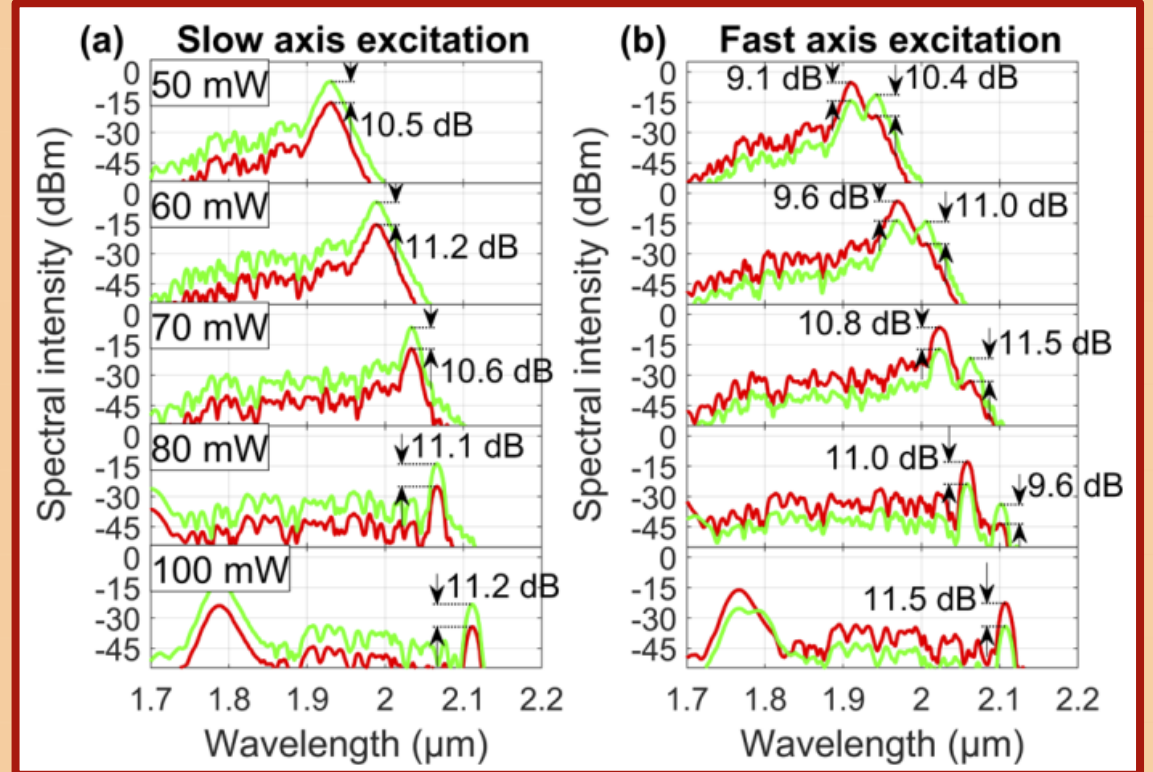
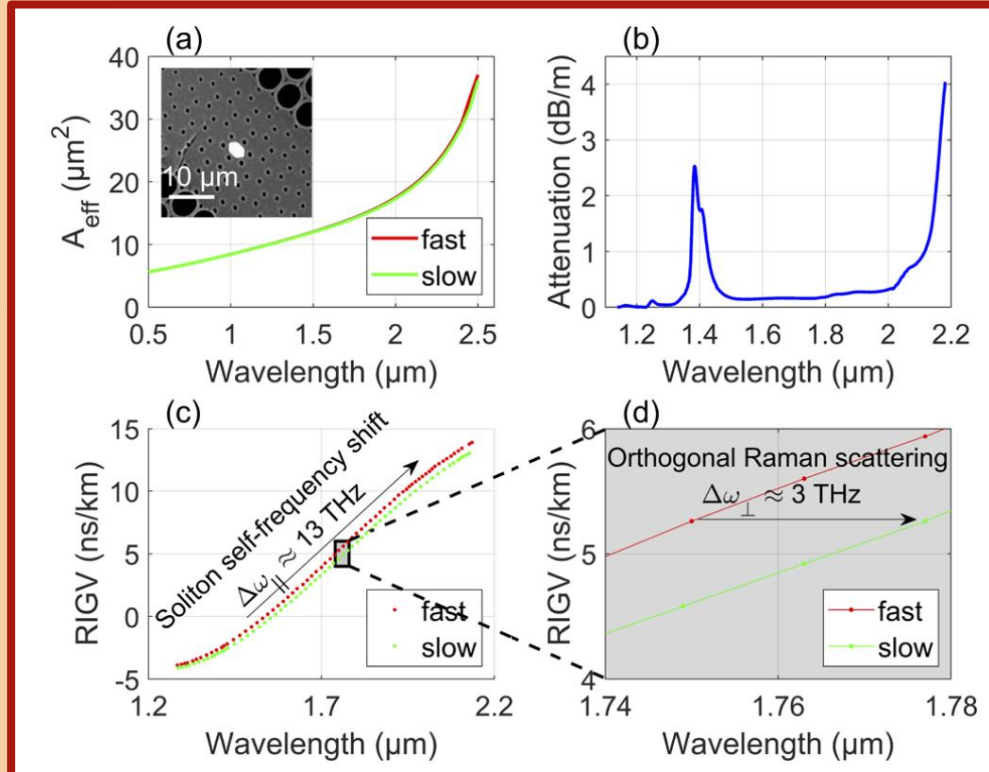
- z uwzględnieniem odpowiedzi ramanowskiej

$$N_x(\tilde{C}_x, \tilde{C}_y) = \bar{\gamma}_x \mathcal{F} \left\{ \begin{array}{l} (1 - f_R) \times \left(\left(|C_x|^2 + \frac{2}{3} |C_y|^2 \right) C_x + \frac{1}{3} C_y^2 C_x^* \exp(-2i\Delta\beta z) \right) + \\ + f_R \times \left[\begin{array}{l} (h_1 \otimes |C_x|^2 + h_2 \otimes |C_y|^2) C_x + \\ + h_3 \otimes (C_x C_y^* + C_y C_x^* \exp(-2i\Delta\beta z)) C_y \end{array} \right] \end{array} \right\}$$

$$N_y(\tilde{C}_y, \tilde{C}_x) = \bar{\gamma}_y \mathcal{F} \left\{ \begin{array}{l} (1 - f_R) \times \left(\left(|C_y|^2 + \frac{2}{3} |C_x|^2 \right) C_y + \frac{1}{3} C_x^2 C_y^* \exp(+2i\Delta\beta z) \right) + \\ + f_R \times \left[\begin{array}{l} (h_1 \otimes |C_y|^2 + h_2 \otimes |C_x|^2) C_y + \\ + h_3 \otimes (C_y C_x^* + C_x C_y^* \exp(+2i\Delta\beta z)) C_x \end{array} \right] \end{array} \right\}$$

Ortogonalne rozpraszanie Ramana

Konwersja polaryzacji



Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

Światłowody kilkunomodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa



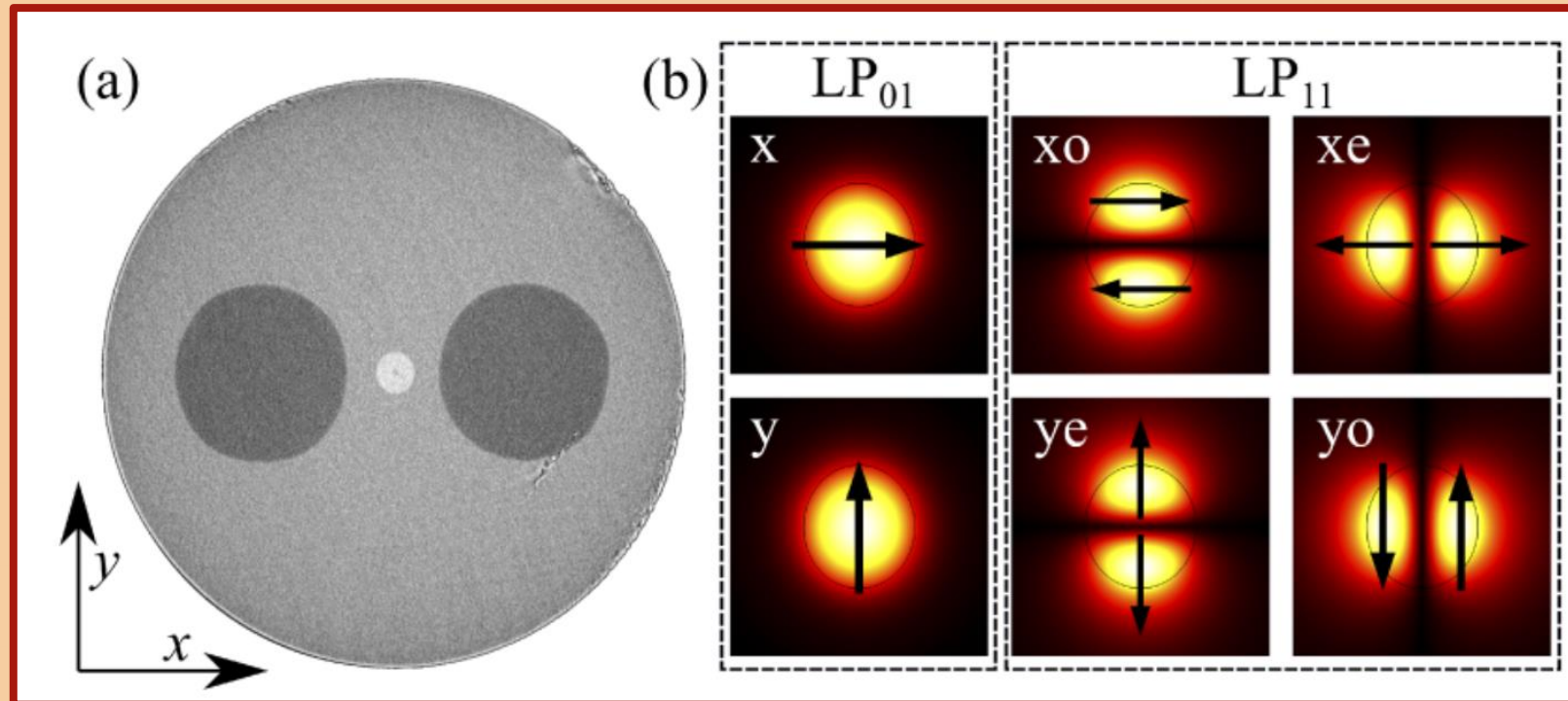
Światłowody kilkumodowe

Układ sprzężonych nieliniowych równań Schrödingera

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial z} = & -\frac{\alpha_p}{2} A_p + i \left(\beta_0^{(p)} - \beta_0^{(0)} \right) A_p + \\ & - \left(\beta_1^{(p)} - \beta_1^{(0)} \right) \frac{\partial A_p}{\partial t} + i \sum_{n \geq 2} \frac{i^n \beta_n^{(p)}}{n!} \frac{\partial^n A_p}{\partial t^n} + \\ & + i \frac{n_2 \omega_0}{c} \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \times \\ & \times \sum_{l, m, n}^{N-1} \left\{ (1 - f_R) S_K^{(plmn)} A^{(l)} A^{(m)} A^{(n)*} + f_R S_R^{(plmn)} A^{(l)} \left[h \otimes \left(A^{(m)} A^{(n)*} \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

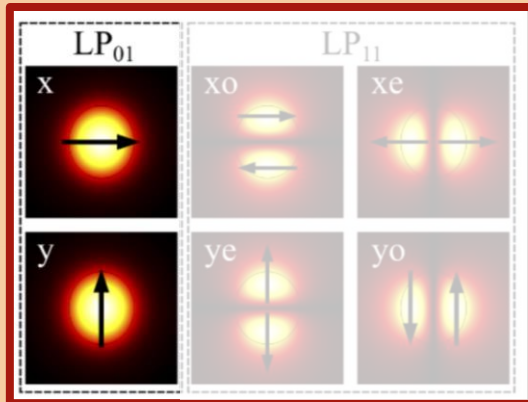
Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Mody światłowodu



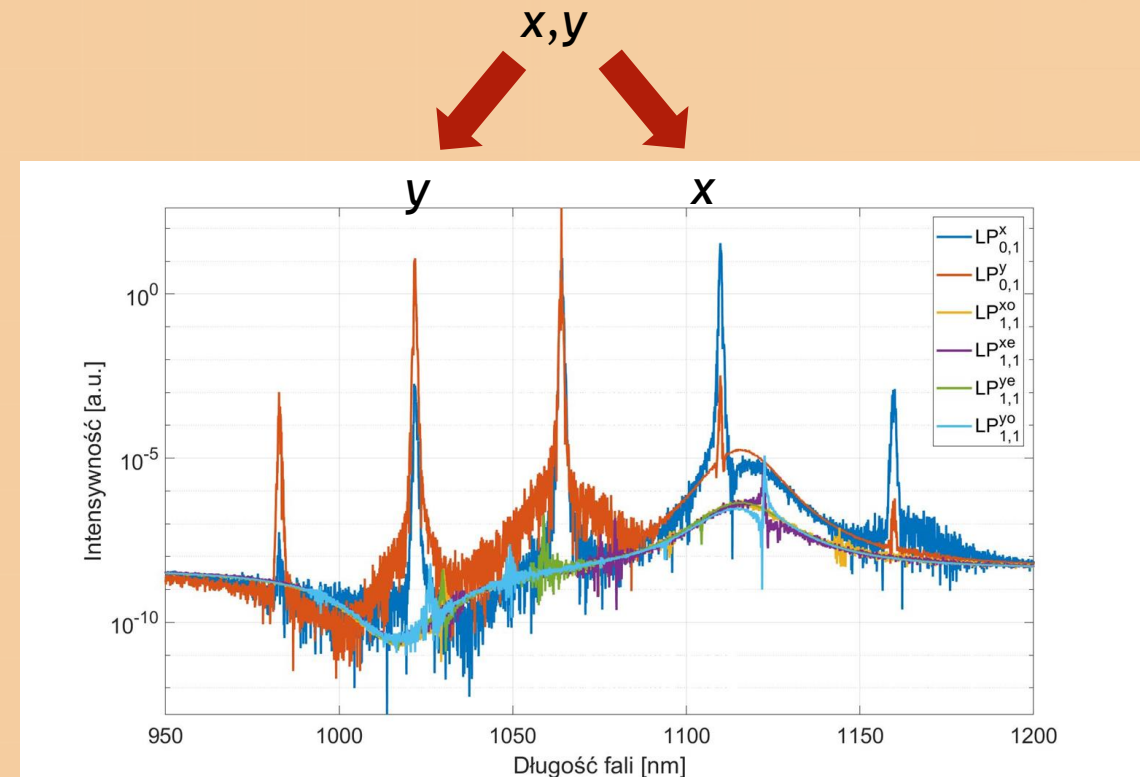
Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Wektorowe mieszanie czterech fal



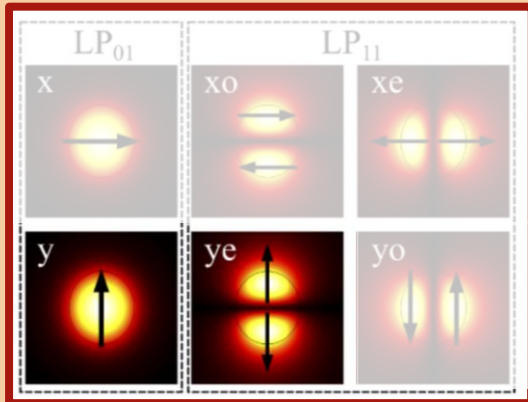
$$\beta_0^x + \beta_0^y = \beta_0^x + \beta_1^x \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^x \Omega^2 + \beta_0^y - \beta_1^y \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^y \Omega^2$$

$$-\Delta\beta_1 \Omega = \beta_2 \Omega^2$$



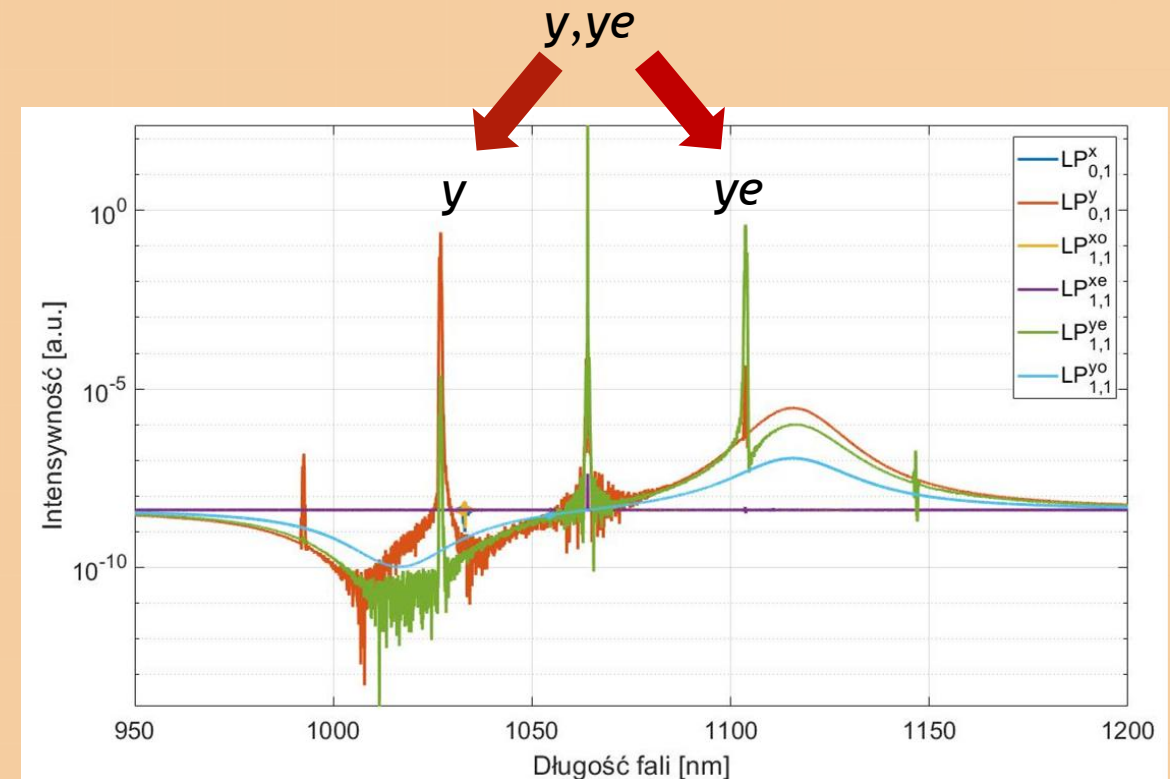
Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Międzymodowe mieszanie czterech fal



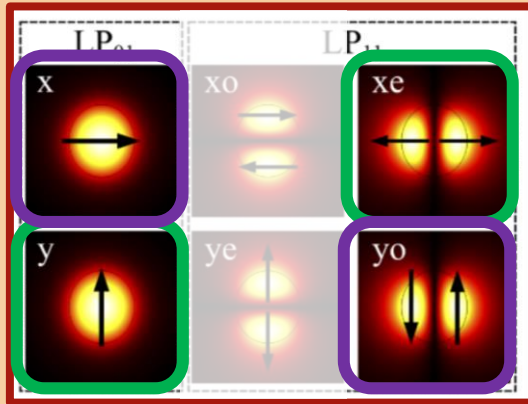
$$\beta_0^y + \beta_0^{ye} = \beta_0^y + \beta_1^y \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^y \Omega^2 + \beta_0^{ye} - \beta_1^{ye} \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^{ye} \Omega^2$$

$$-\Delta\beta_1 \Omega = \beta_2 \Omega^2$$



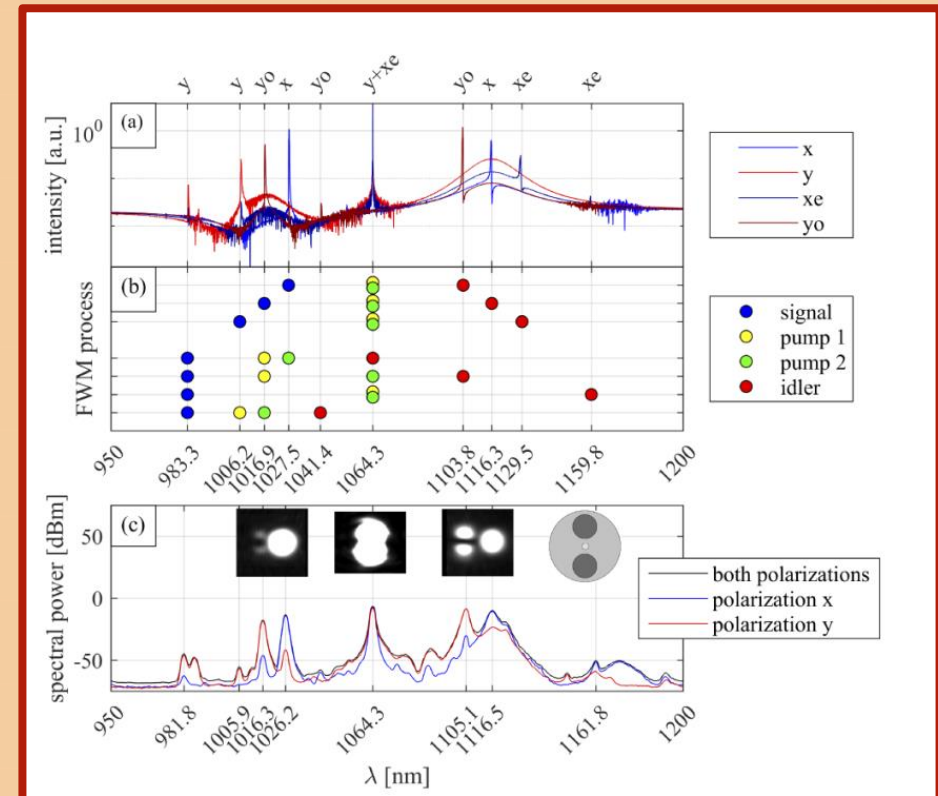
Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

Procesy możliwe dzięki selektywnemu pobudzeniu modów



$$\beta_0^y + \beta_0^{xe} = \beta_0^x + \beta_1^x \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^x \Omega^2 + \beta_0^{ye} - \beta_1^{ye} \Omega + \frac{1}{2} \beta_2^{ye} \Omega^2$$

$$\frac{1}{2} (\beta_2^x + \beta_2^{ye}) \Omega^2 + (\beta_1^x - \beta_1^{ye}) \Omega + \Delta\beta_0^{x,y} - \Delta\beta_0^{xe,ye} = 0$$



Plan prezentacji

Wprowadzenie

- Badania zjawisk nieliniowych w światłowodach
- Procesy konwersji częstotliwości

Propagacja jednomodowa

- Generacja superkontinuum w reżimie dyspersji normalnej (ANDi)
- Przeszajanie solitonów

Światłowody dwójłomne

- Generacja spolaryzowanego superkontinuum (ANDi)
- Przeszajanie solitonów - ortogonalne rozpraszanie Ramana

Światłowody kilkunomodowe

- Międzymodowe/wektorowe mieszanie czterech fal

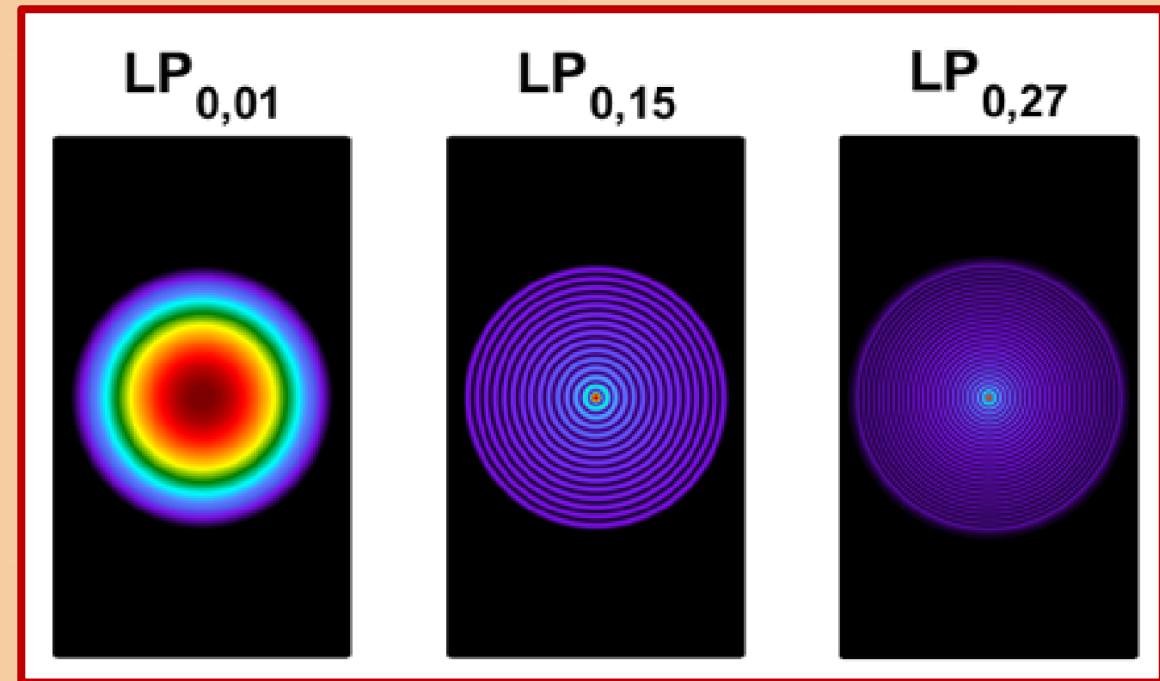
Światłowody wielomodowe

- Dyskretna emisja stożkowa

Dyskretna emisja stożkowa

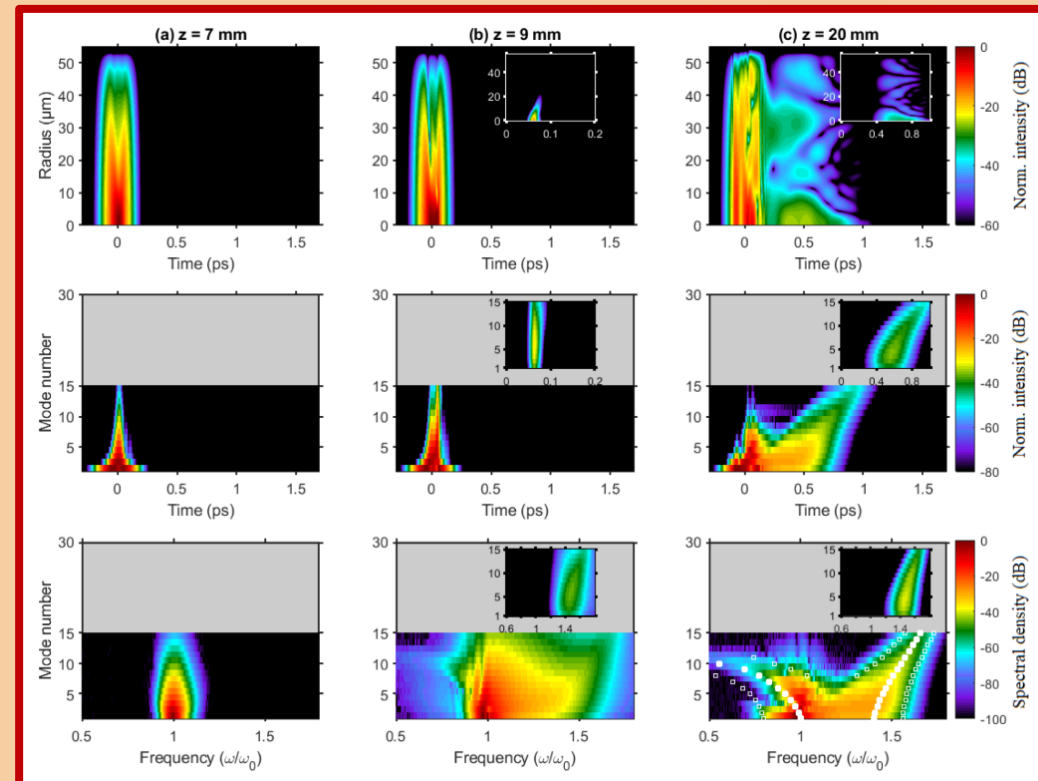
Światłowody wielomodowe

- Średnica rdzenia 105 μm
- NA = 0.22



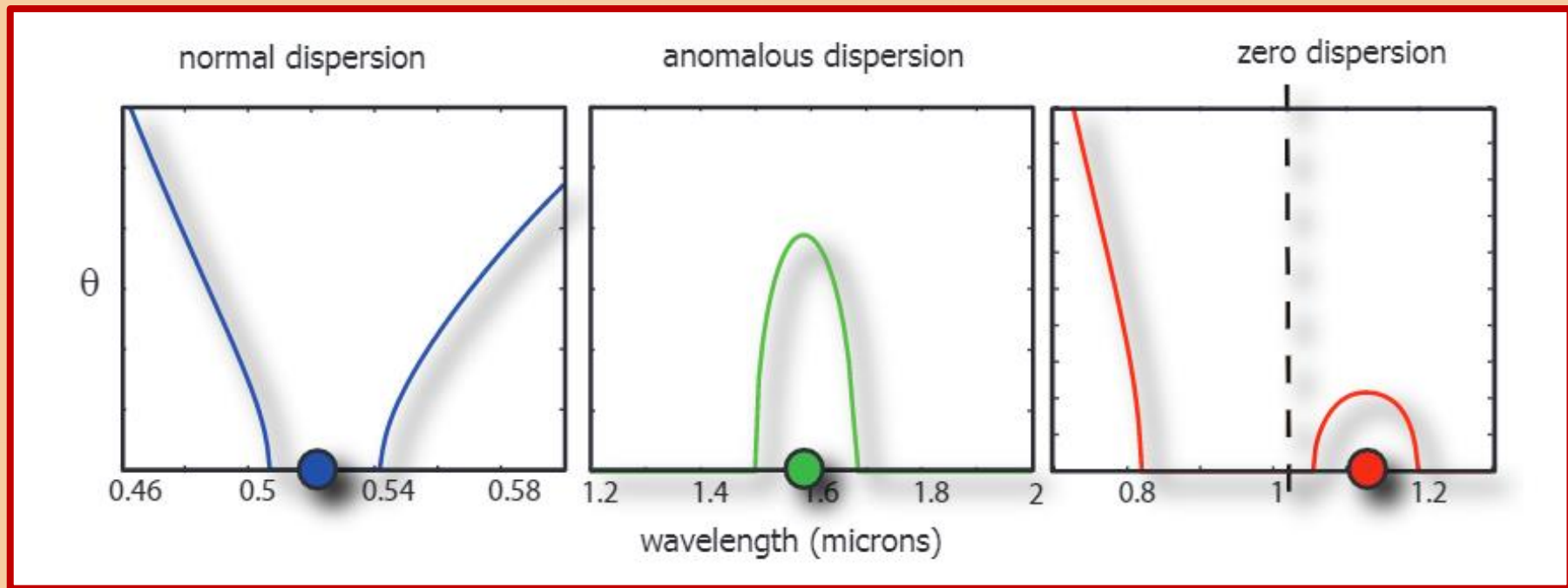
Dyskretna emisja stożkowa

Modelowanie z wykorzystaniem układu równań Schrödingera



Dyskretna emisja stożkowa

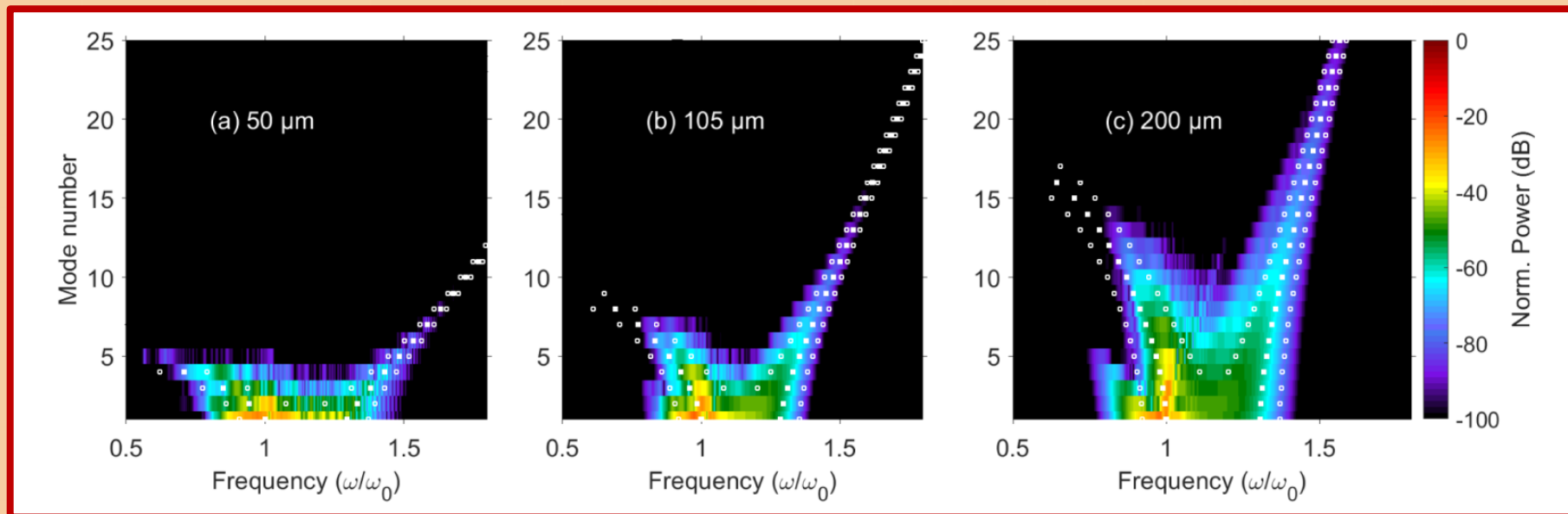
Fale stożkowe (conical waves)



Dyskretna emisja stożkowa

Modelowanie z wykorzystaniem UPPE

- Równanie jednokierunkowej propagacji impulsu (UPPE, unidirectional pulse propagation equation)

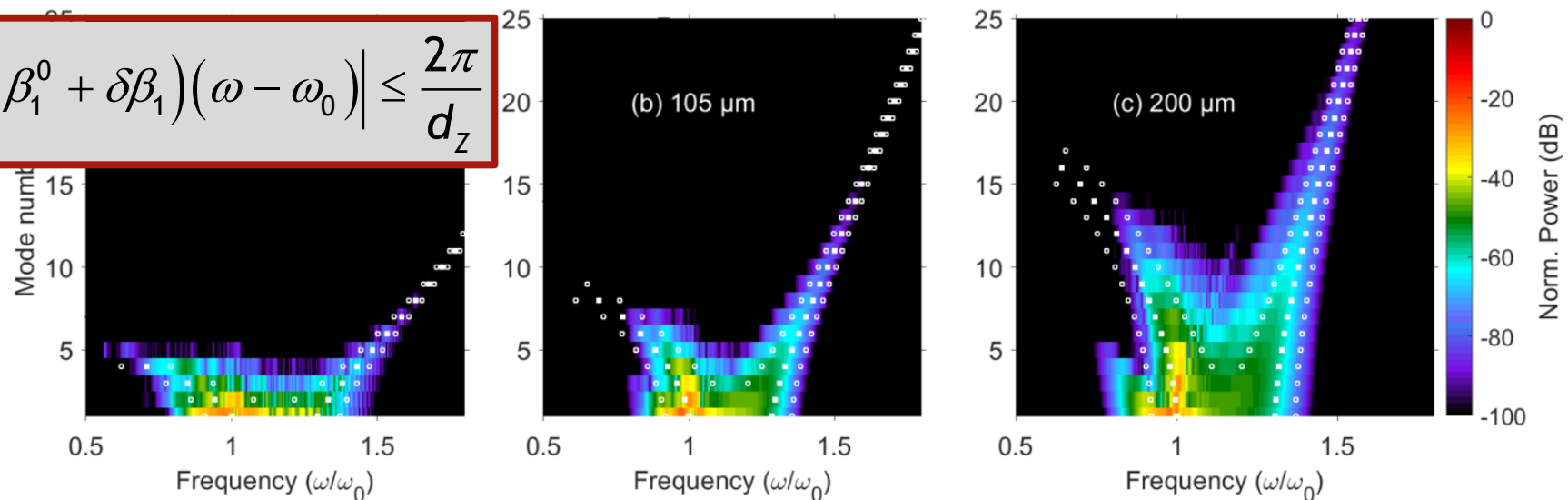


Dyskretna emisja stożkowa

Modelowanie z wykorzystaniem UPPE

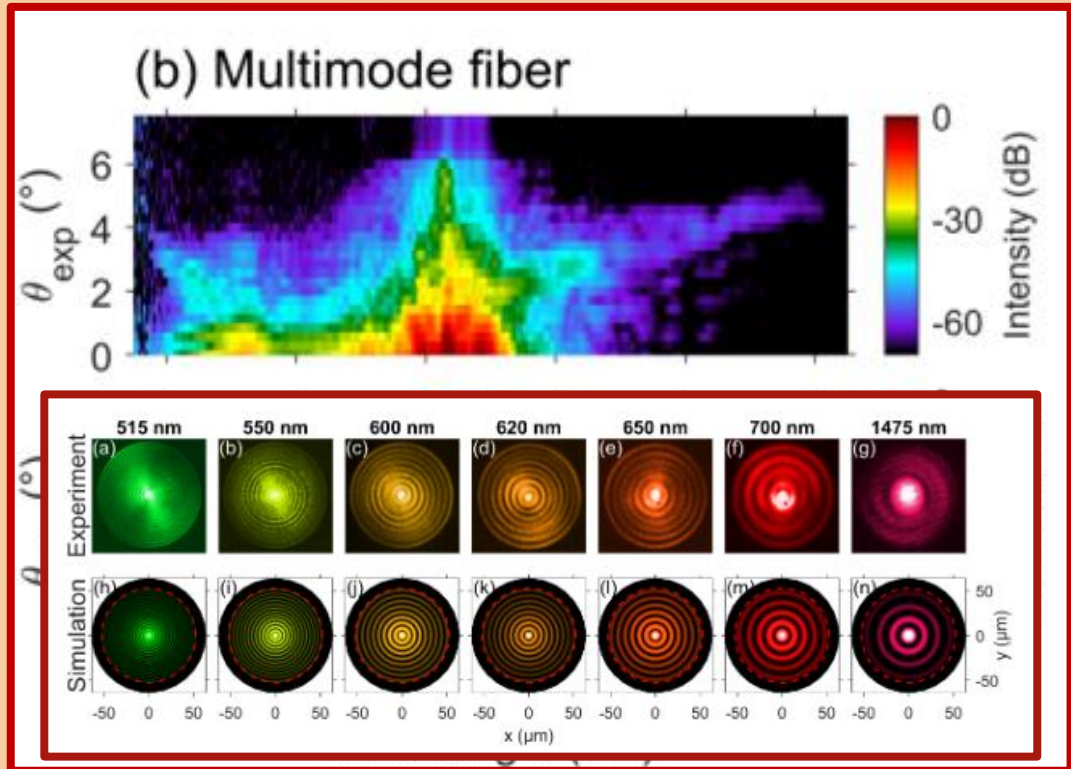
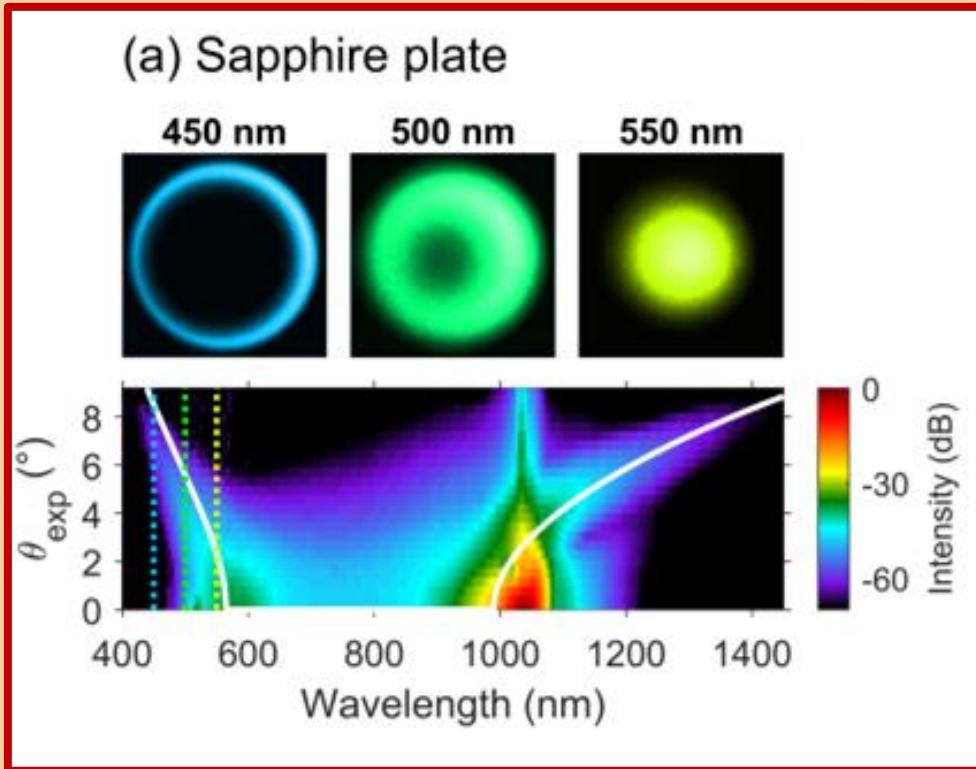
- Równanie jednokierunkowej propagacji impulsu (UPPE, unidirectional pulse propagation equation)

$$\left| \beta_{\omega}^p - \beta_0^0 - (\beta_1^0 + \delta\beta_1)(\omega - \omega_0) \right| \leq \frac{2\pi}{d_z}$$



Dyskretna emisja stożkowa

Wyniki pomiarów



Podsumowanie

W światłowodach może zachodzić szerokie spektrum procesów konwersji częstotliwości

Symulacje numeryczne pozwalają badać złożoną dynamikę zjawisk nieliniowych

Podziękowania

Grupa Optyki
Światłowodów
www.fog.pwr.edu.pl

Prof. Wacław Urbańczyk

Tadeusz Martynkien

Kinga Żołnacz

Sylwia Majchrowska

Andrzej Gawlik

Karolina Stefańska

Rafał Cichowski

Pracownia
Technologii
Światłowodów UMCS

Paweł Mergo

Krzysztof Poturaj

Grupa Elektroniki
Laserowej
i Światłowodowej

Jarosław Sotor

Grzegorz Soboń

Olga Szewczyk

Laboratoire
Interdisciplinaire
Carnot de
Bourgogne, Dijon

Bertrand Kibler

Pierre Béjot

Karolina Stefańska

Podziękowania

Narodowe Centrum Nauki

- 2014/13/D/ST7/02090, Sonata 7 Program
- 2018/30/E/ST7/00862, Sonata Bis 8
- 2016/22/A/ST7/00089, Maestro 8



NARODOWE CENTRUM NAUKI

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

- POIR.04.01.01-00-0037/17



Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej

- Polonium 2019-2021
- Polonium 2023-2024



NARODOWA AGENCJA
WYMIANY AKADEMICKIEJ



Politechnika
Wroclawska

Środowiskowe Seminarium Fotoniczne - 13.12.2023

Podziękowania

Dziękuję za uwagę