

**Dominik DOROSZ, Marcin KOCHANOWICZ, Jacek ŻMOJDA,  
Andrzej ZAJĄC, Jan DOROSZ**  
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, KATEDRA PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO

## Właściwości luminescencyjne światłowodów specjalnych

**Dr Dominik DOROSZ**

Absolwent Wydziału Chemii Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie (1999). W 2003 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej. Obecnie pracownik naukowo - dydaktyczny w Katedrze Promieniowania Optycznego Politechniki Białostockiej. Zainteresowania naukowe obejmują światłowody i szkła domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich



e-mail: domdor@pb.edu.pl

**Prof. dr hab. inż. Andrzej ZAJĄC**

Absolwent Wydziału Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej (1979). Tytuł naukowy profesora otrzymał w lipcu 2008 r. Obecnie pracuje w Katedrze Promieniowania Optycznego Politechniki Białostockiej oraz w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Autor i współautor ok. 300 publikacji o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Jego zainteresowania naukowe obejmują konstrukcję laserów włóknowych dużej mocy oraz zastosowania promieniowania laserowego w medycynie.



e-mail: azajac@wat.edu.pl

**Mgr inż. Marcin KOCHANOWICZ**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej (2006). Od października 2006 uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Od 2007 pracownik naukowo - dydaktyczny w Katedrze Promieniowania Optycznego Politechniki Białostockiej. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na technologii specjalnych światłowodów aktywnych dla laserów włóknowych.



e-mail: m.kochanowicz@pb.edu.pl

**Prof. dr hab. inż. Jan DOROSZ**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej (1973). Od 1978 r. zajmuje się wytwarzaniem i zastosowaniami światłowodów. Tytuł naukowy profesora otrzymał w listopadzie 2006. Kierownik Katedry Promieniowania Optycznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej.



e-mail: doroszjan@pb.edu.pl

**Mgr inż. Jacek ŻMOJDA**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej (2006). Uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Od 2009 roku zatrudniony na stanowisku asystenta naukowego w Katedrze Promieniowania Optycznego Politechniki Białostockiej. Zajmują się technologią wytwarzania światłowodów i analizą szkieł domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich.



e-mail: j.zmojda@pb.edu.pl

Moreover, optimization of material and geometrical optical fibre properties enables to increase volume of active material (core diameter) while single mode operation is preserved. The luminescence spectra of both types of manufactured optical fibres doped with  $\text{Nd}^{3+}$  are presented (Fig. 7, 8, 12).

**Keywords:** multicore fiber, helical core fiber, luminescence.

### 1. Wstęp

Pojawienie się nowych metod pompowania optycznego pomp wymusza poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych światłowodów aktywnych jako elementów laserów włóknowych. Lasery tego typu, ze względu na wyróżniające je właściwości takie jak: wysokie wzmocnienie, niski próg wzbudzenia, duża sprawność, doskonała jakość emitowanej wiązki promieniowania oraz brak konieczności chłodzenia (poza przypadkami ekstremalnymi), są przedmiotem intensywnych prac badawczych, a osiągnięty w ostatnim okresie postęp spowodował, że stały się one jedną z podstawowych konstrukcji laserów ciała stałego [1- 6]. Zdolność ośrodka czynnego do gromadzenia energii zależy od jego objętość oraz koncentracji domieszki ziemi rzadkiej. Niestety, oba te parametry są ograniczone warunkami technologicznymi. Pomimo swoich zalet, klasyczna już konstrukcja aktywnych światłowodów dwupłaszczyznowych, wykorzystywanych do budowy laserów włóknowych dużej mocy, obciążona jest ograniczeniami. W przypadku włókien aktywnych, przeznaczonych do budowy impulsowych źródeł promieniowania (głównie w nanosekundowym reżimie generacji) zmniejszenie apertury numerycznej w celu zwiększenia średnicy rdzenia, przy jednoczesnym zachowaniu warunku jednodomowości, prowadzi do znacznego wypromieniowania do płaszcza energii zgromadzonej w rdzeniu. Spowodowane jest to wzmocnioną emisją spontaniczną. Przy generacji monoimpulsów, w układach laserów włóknowych występują zjawiska ograniczające ich parametry energetyczne. Energia impulsu jest określona przez energię zgromadzoną w ośrodku aktywnym, która to z kolei ograniczona jest przez zawartość domieszki czynnej i objętość aktywnego rdzenia, oraz wzmocnienie emisji spontanicznej (ang. Amplified Spontaneous Emission - ASE). Dla innych geometrii ośrodka aktywnego, powodujących skrócenie długości czynnego odcinka światłowodu, zjawisko ASE

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac nad zastosowaniem dwóch nowych typów światłowodów domieszkowanych jonami ziem rzadkich do budowy laserów włóknowych. Jednym z nich, są światłowody wielordzeniowe umożliwiające uzyskanie wiązki laserowej o dużej mocy i małej rozbieżności (supermodu). Drugi prezentowanym rozwiązaniem są światłowody, w których ukształtowany w spiralę rdzeń zapewnia silną absorpcję pompy, jak również łatwe jej odsprężenie na wyjściu światłowodu od generowanego w rdzeniu promieniowania. Wytworzono oba rodzaje światłowodów domieszkowanych jonami  $\text{Nd}^{3+}$  oraz określono ich właściwości luminescencyjne.

**Słowa kluczowe:** światłowod aktywny, światłowod wielordzeniowy, światłowod spiralny.

### Luminescence properties of special fibres

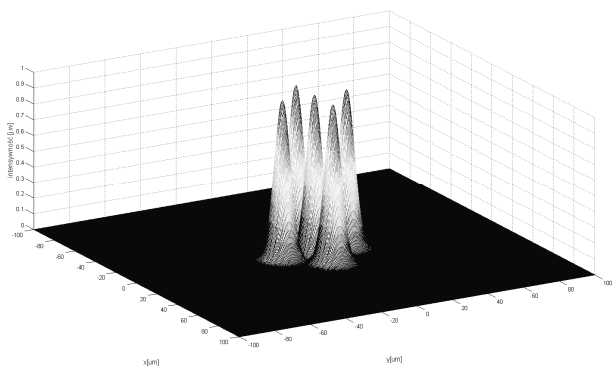
#### Abstract

The high power, short pulse generation in a fibre lasers is limited by nonlinear effects (Raman and Brillouin scattering, self - phase modulation). Therefore it's necessary to find innovative constructions of rare-earth doped optical fibres considerably different from conventional double-clad optical fibres. In the paper the possibility of applying new optical fibers as an active material for constructing high-power fiber lasers is presented. Multicore active optical fibre is one of new construction. Such a fibre enables attaining a high-intensity and low-divergence laser beam (supermod) in the far-field diffraction region (Fig. 2, 4). Second type of new active optical fibre is helical - core optical fibre. Due to a specific shape of the core such fibre is characterized by effective absorption of pump radiation.

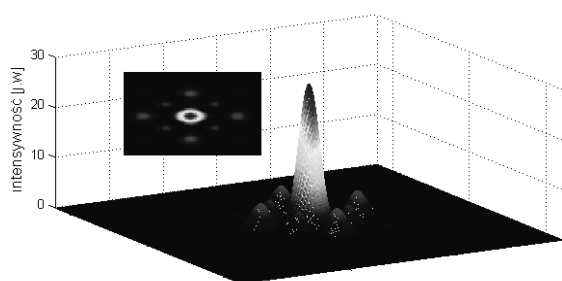
tak drastycznie nie występuje. Dodatkowo, stosunkowo małe pole powierzchni przekroju poprzecznego aktywnego rdzenia klasycznych światłowodów aktywnych sprzyja przekroczeniu gęstości mocy, przy której pojawiają się zjawiska nieliniowe (m.in. wymuszone rozproszenie Ramana, wymuszone rozpraszanie Brillouina oraz samomodulacja fazy). Ze zjawiskami nieliniowymi należy się liczyć szczególnie przy generacji krótkich impulsów o wysokich mocach szczytowych. Aktywny światłowod dwupłaszczowy jest wprawdzie bardzo dobrym ośrodkiem wzmacniającym i nadaje się doskonale do konstrukcji wysokosprawnych laserów włóknowych, to jednakże zjawiska ograniczające efektywną pracę tych układów wymuszają poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych światłowodów aktywnych, szczególnie do budowy laserów włóknowych dużej mocy [1].

## 2. Aktywne światłowody wielordzeniowe

Dwupłaszczowe światłowody wielordzeniowe otwierają nowe możliwości w zakresie konstrukcji krótkich laserów włóknowych dużej mocy. We włóknaх tego typu zgromadzona ilość jonów domieszki ziemi rzadkiej jest znacząco większa, niż w klasycznym światłowodzie o jednym, jednomodowym rdzeniu. Ponadto, umieszczenie w jednym płaszczu wielu rdzeni umożliwia  $N$ -krotną ( $N$ - liczba rdzeni) redukcję długości światłowodu, niezbędnej do absorpcji promieniowania pompującego [4, 5]. Jeżeli promieniowanie generowane w poszczególnych rdzeniach jest wzajemnie koherentne, to na obraz dyfrakcyjny wiązki laserowej w polu dalekim składa się centralnie położony pik o dużym natężeniu i małej rozbieżności (supermod) oraz symetrycznie rozłożone listki boczne o znacznie mniejszym natężeniu. Rozbieżność kątowna centralnego piku zmniejsza się proporcjonalnie do liczby emiterów (elementów macierzy) generujących promieniowanie wzajemnie koherentne [6]. Obecnie trwają intensywne badania dotyczące fazowania promieniowania generowanego we włóknaх aktywnych [7, 8].



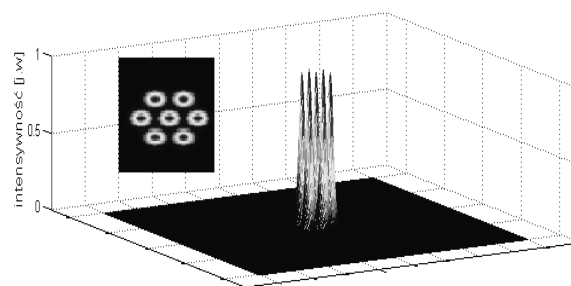
Rys. 1. Obraz bliskiego pola światłowodu 5-rdzeniowego,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$   
Fig. 1. Near field of 5-core phased – locked optical fibre,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$



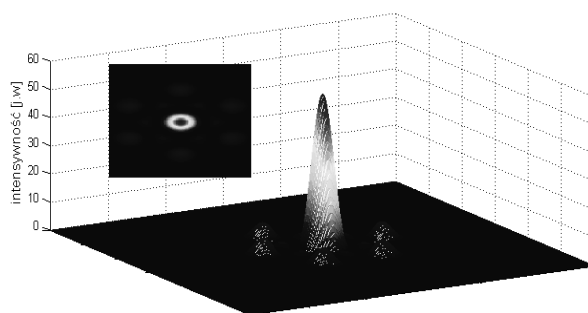
Rys. 2. Obraz dalekiego pola światłowodu 5-rdzeniowego,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$   
Fig. 2. Far field pattern of 5-core phased – locked optical fibre,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$

W niniejszej pracy przedstawiono właściwości luminescencyjne światłowodów typu double clad o 5 i 7 rdzeniach, domieszkowanych jonami  $\text{Nd}^{3+}$ . Wyniki symulacji obrazu bliskiego i dalekiego pola, przy założeniu zgodności faz promieniowania generowanego w poszczególnych rdzeniach, przedstawiają rys. 1-4. Natężenie centralnego piku jest znacząco większe, niż w przypadku emiterów pracujących niezależnie. W idealnym przypadku, natężenie głównego piku wzrasta z kwadratem liczby emiterów (rys. 2, 4). Jednakże w praktyce jest to trudne do osiągnięcia.

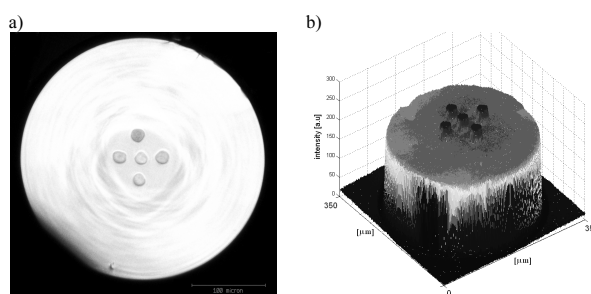
Z punktu widzenia parametrów geometrycznych i materiałowych aktywnego światłowodu wielordzeniowego, wiązkę laserową o najlepszym współczynniku jakości uzyskuje się przy możliwie małej wartości częstotliwości znormalizowanej oraz małej odległości między rdzeniami [9]. Uwzględniając powyższe założenia, oraz na podstawie przeprowadzonych analiz [10], określono parametry materiałowe i geometryczne aktywnego światłowodu o 5-ciu i 7-miu rdzeniach (tabela 1), umożliwiające budowę lasera włóknowego (rys 5, 6).



Rys. 3. Obraz bliskiego pola światłowodu 7-rdzeniowego,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$   
Fig. 3. Near field of 7-core phased – locked optical fibre,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$

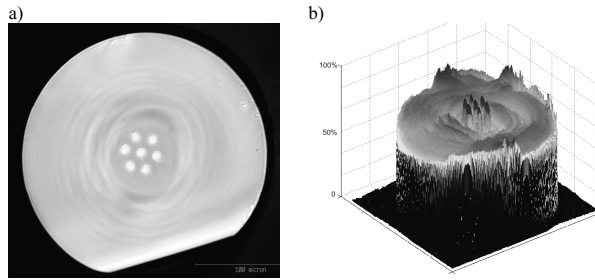


Rys. 4. Obraz dalekiego pola światłowodu 7-rdzeniowego,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$   
Fig. 4. Far field pattern of 7-core phased – locked optical fibre,  $d=18\mu\text{m}$ ,  $V=2,4$



Rys. 5. Przekrój poprzeczny (a), rozkład luminancji czoła wytworzonego światłowodu (b)

Fig. 5. Cross section of the fabricated multicore fibre (a), and its luminance distribution (b)



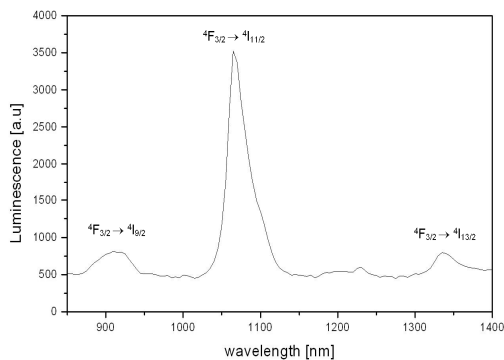
Rys. 6. Przekrój poprzeczny (a), rozkład luminancji czoła wytworzonego światłowodu (b)

Fig. 6. Cross section of the fabricated multicore fibre (a), and its luminance distribution (b)

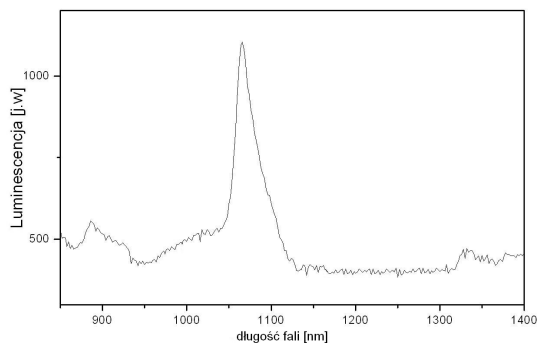
Tab. 1. Właściwości światłowodów 5 i 7 - rdzeniowego  
Tab. 1. Properties of 5 and 7-core optical fibres

Parametr	5 rdzeni	7-rdzeni
Średnica światłowodu, $\mu\text{m}$	350	250
Średnica rdzeni, $\mu\text{m}$	13	10
$NA_{\text{rdzenia}}$	0,07	0,07
$NA_{\text{płaszczka}}$	0,58	0,58

Wytworzone światłowody wielordzeniowe charakteryzują się silną luminescencją (rys. 7, 8). Duża apertura numeryczna płaszczka wewnętrznej umożliwia efektywne pompowanie. W wyniku pobudzenia diodą laserową AlGaAs,  $P_{\text{max}}=30$  W ( $\lambda=808$  nm) największy poziom luminescencji otrzymano dla najbardziej efektywnego przejścia  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ , w strukturze poziomów  $\text{Nd}^{3+}$ , co odpowiada emisji na długości fali 1060 nm. Zauważalne są również charakterystyczne dla neodymu pasma przy 900 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ) oraz 1330 nm ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ).



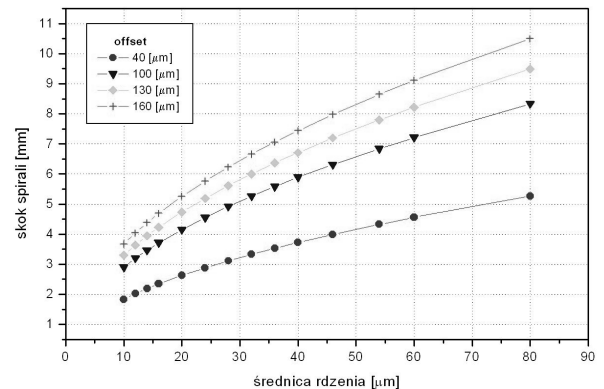
Rys. 7. Widmo luminescencji światłowodu 5 - rdzeniowego domieszkowanego  $\text{Nd}^{3+}$   
Fig. 7. Luminescence spectra of 5 - core fibre doped with  $\text{Nd}^{3+}$



Rys. 8. Widmo luminescencji światłowodu 7 - rdzeniowego domieszkowanego  $\text{Nd}^{3+}$   
Fig. 8. Luminescence spectra of 7 - core fibre doped with  $\text{Nd}^{3+}$

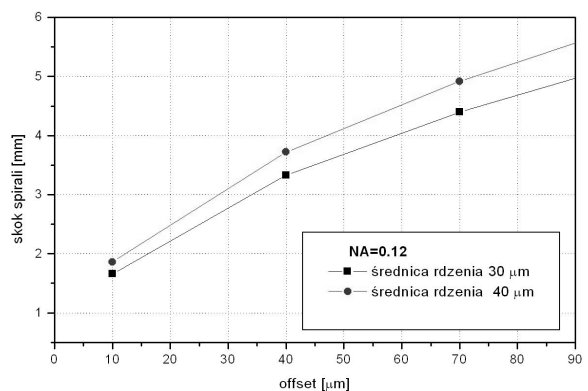
### 3. Aktywny światłowod o spiralnym rdzeniu

W ciągu ostatnich kilku lat pojawiła się nowa koncepcja zwiększenia objętości rdzenia włókna aktywnego (zwiększenie energii zgromadzonej w rdzeniu) polegająca na wykonaniu cylindrycznego włókna dwupłaszczowego z helikalnym rdzeniem [11 - 14]. Uformowanie rdzenia w kształcie spirali umożliwia wzrost jego średnicy, a tym samym zwiększenie ilości jonów domieszki ziemi rzadkiej, przy jednoczesnym zachowaniu pracy jednomodowej. Mody wyższych rzędów wypromieniowywane są podczas propagacji promieniowania w spiralnym rdzeniu. Porównując aktywny światłowod tego typu do klasycznej już konstrukcji typu double clad należy zaznaczyć, że włókno o spiralnym rdzeniu charakteryzuje się większym efektywnym współczynnikiem absorpcji promieniowania pompy. Fakt ten, umożliwia więc zwiększenie zdolności do gromadzenia energii przez ośrodek czynny umożliwiając tym redukcję długości włókna niezbędnej do absorpcji promieniowania pompującego. Rys. 7 i 8 prezentują obliczone parametry geometryczne i materiałowe helikalnego rdzenia, dla których spełnione są warunki pracy jednomodowej. Przy większej średnicy rdzenia propagację jednomodową uzyskuje się przy większym skoku spirali. Natomiast, wartość offsetu (przesunięcia względem osi włókna) rdzenia jest wprost proporcjonalna do skoku spirali.



Rys. 9. Zależność skoku spirali rdzenia od jego średnicy przy zachowaniu propagacji jednomodowej

Fig. 9. Helical pitch vs core diameter while preserving single mode operation



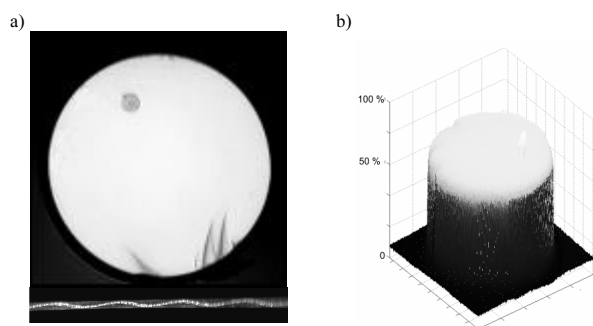
Rys. 10. Zależność skoku spirali rdzenia od offsetu przy zachowaniu propagacji jednomodowej

Fig. 10. Helical pitch vs core offset while preserving single mode operation

Światłowod o spiralnym rdzeniu wytworzono poprzez obrót wcześniej przygotowanej preformy w trakcie procesu formowania światłowodu [13]. Parametry wytworzonego światłowodu przedstawiono w tabeli 2, a widok przekroju i rozkład luminancji czoła na rys. 11.

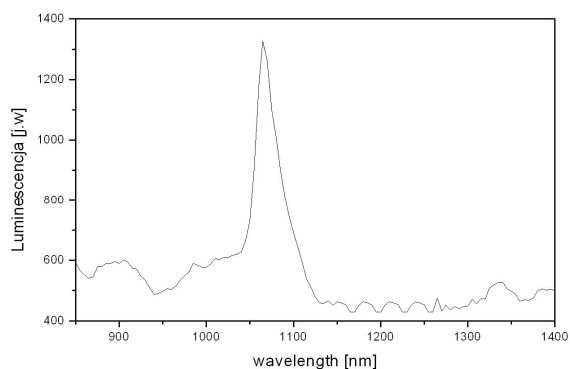
Tab. 2. Właściwości wytworzonego światłowodu o spiralnym rdzeniu  
 Tab. 2. Properties of the manufactured helical-core fibre

Parametr	Wartość
Średnica światłowodu, $\mu\text{m}$	380
Średnica rdzenia, $\mu\text{m}$	30
$NA_{\text{rdzenia}}$	0,2
off-set, $\mu\text{m}$	160
Skok spirali, cm	4,5



Rys. 11. Widok przekroju (a), rozkład luminancji czoła (b) światłowodu o spiralnym rdzeniu

Fig. 11. Cross section of the fabricated multicore fibre (a), and its luminance distribution (b)



Rys. 12. Widmo luminescencji światłowodu o helikalnym rdzeniu domieszkowanym  $\text{Nd}^{3+}$

Fig.12. Luminescence spectra of the helical core fibre doped with  $\text{Nd}^{3+}$

## 4. Podsumowanie

Aktywne światłowody typu double clad o zwiększonej koncentracji domieszki aktywnej wprowadzają nowe możliwości w konstruowaniu laserów włóknowych. W wytworzonych światłowodach (wielordzeniowy, spiralny) ilość jonów domieszki ziemii rzadkiej (zgromadzona energia) jest znacząco większa niż w klasycznym światłowodzie.

W przypadku aktywnych światłowodów wielordzeniowych o rdzeniach generujących promieniowanie wzajemnie koherentne możliwe jest skrócenie włókna niezbędnego do zaabsorbowania promieniowania pompy. Ponadto, przy spełnieniu warunku zgodności faz promieniowania generowanego w rdzeniach światłowodu, w polu dalekim wiązki laserowej, uzyskuje się centralnie położony pik o dużym natężeniu i małej rozbieżności (supermodu).

Przedstawione rozwiązanie dwupłaszczowych światłowodów aktywnych ze spiralnym rdzeniem, umożliwia zwiększenie jego średnicy (ilości jonów domieszki ziemii rzadkiej), przy jednoczesnym zachowaniu jednomodowej propagacji. Mody wyższych rzędów są wypromieniowywane w czasie propagacji w spiralnym

rdzeniu. Kształtowanie spirali rdzenia (skok, offset) pozwala na konstrukcję rdzenia o średnicy do 200  $\mu\text{m}$ , czego nie można zrealizować w dotąd znanych rozwiązaniach. Należy też zauważyć, że przedstawiony światłowod o spiralnym rdzeniu nie wymaga tak dużego obniżenia wartości apertury numerycznej rdzenia, jak ma to miejsce w przypadku włókien LMA nie pogarszając jakości wiązki generowanego promieniowania. Ponadto, specyficzny kształt helisy rdzenia przyczynia się do zwiększenia efektywnego współczynnika absorpcji pompy i umożliwia łatwe odsprężenie generowanego promieniowania rdzenia.

Autorzy opanowali technologię wytwarzania obu typów światłowodów aktywnych. Wytworzono kilka serii dwupłaszczowych światłowodów wielordzeniowych (5 i 7 rdzeni) oraz z helikalnym rdzeniem, domieszkowanych jonami neodymu. Możliwe jest zastosowanie wytworzonych światłowodów do budowy krótkich laserów włóknowych dużej mocy generujących promieniowanie na długości fali 1,06  $\mu\text{m}$ .

Praca została wykonana w ramach pracy statutowej S/WE/2/08 oraz pracy badawczej W/WE/13/06 Politechniki Białostockiej.

## 5. Literatura

- [1] Zając A., Świdorski J., Konieczny P., Gągała S.: Lasery włóknowe dużej mocy – analiza i wymogi konstrukcyjne. WAT 2008.
- [2] Kono Y., Takeoka M., Uto K., Uchida A., Kannari F.: A Coherent All-Solid-State Laser Array Using the Talbot Effect in a Three-Mirror Cavity. IEEE J. of Quantum Electronics, vol. 36, no. 5, 2000.
- [3] Li Y., Qiana L., Lua D., Fana D., Wenb S.: Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution. Optics & Laser Technology 39 2007.
- [4] Kochanowicz M., Dorosz D., Żmojda J.: Coherent beam combining of active multicore optical fiber. Proc of SPIE, Vol: 7502 2009.
- [5] Kochanowicz M. Dorosz D., Zając A.: Generacja promieniowania wzajemnie koherentnego w aktywnym światłowodzie wielordzeniowym, Elektronika – Konstrukcje, Technologie, 10/2009.
- [6] Li Y., Qiana L., Lua D., Fana D., Wenb S.: Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution. Optics&Laser Technology 39 2007.
- [7] Chen Z., Hou J., Zhou P., Jiang Z.: Mutual Injection-Locking and Coherent Combining of Two Individual Fiber Lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, vol 44, no. 6 2008.
- [8] Z. Chen, J. Hou, P. Zhou, X. Wang, X. Xu, Z. Jiang, Z. Liu, 'Mutual injection locking and coherent combining of three individual fiber lasers', Optics Communications 282 2009.
- [9] Zhou P., Liu Z., Xu X., Chen Z., Wang X.: Beam quality factor for coherently combined fiber laser beams, Optics&Laser Technology 41 2009.
- [10] Kochanowicz M., Dorosz D., Żmojda J., Dorosz J.: Analiza możliwości generacji supermodu w aktywnym światłowodzie o heksagonalnym układzie rdzeni. Krasnobród 2009.
- [11] Jiang Z., Marciante J.R.: Mode-Area Scaling of Helical-Core Dual-Clad Fiber Laser and Amplifiers. Conf. on Laser & Electro-Optics (CLEO) 2005.
- [12] Wang P., Cooper L.J., Williams R.B., Sahu J.K. and Clarkson W.A.: Helical-core ytterbium-doped fibre laser. Electronics Letters 14th October 2004.
- [13] Dorosz D., Błaszczak U., Dorosz J., Zając A.: Światłowod o spiralnym rdzeniu. Elektronika, nr 11 2008.
- [14] Wassmann F.: Radiation from pulses in helical fibres. Optics Communications, Vol. 162, no 4, pp. 306-323, 15 April 1999.