

Fosforanowe włókno fotoniczne o powiększonym rdzeniu domieszkowanym jonami Yb^{3+} do zastosowań laserowych

Marcin Franczyk¹, Ryszard Stępień¹, Dariusz Pysz¹, Ireneusz Kujawa¹, Ryszard Buczyński^{1,2}

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
Tel.: (48 22) 835 30 41 w. 456, e-mail: marcin.franczyk@orange.com

² Zakład Optyki Informacyjnej, Wydział Fizyki,
Uniwersytet Warszawski,
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa

Streszczenie: W publikacji przedstawiono prace wykonane w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych dotyczące wytworzenia światłowodu fotonicznego wykonanego ze szkła fosforanowego z przeznaczeniem do konstrukcji lasera włóknowego. Wykonane zostały wytopy szkieł domieszkowanych i niedomieszkowanych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów spektralnych przeprowadzono analizę własności absorpcyjnych i emisyjnych wytworzonego szkła domieszkowanego. Zweryfikowano parametry dopasowania szkieł domieszkowanego i niedomieszkowanego pod kątem właściwości reologicznych i współczynnika załamania. Wytworzone zostało włókno laserowe ze szkła fosforanowego o strukturze dwupłaszczowej (*double-clad*) w pełni wykonanej w technologii fotonicznej. Poprzez zastosowanie włókna o powiększonej średnicy rdzenia uzyskano znaczne zwiększenie absorpcji promieniowania pompy i skrócenie długości lasera. Ponadto stosując płaszcz powietrzny osiągnięto rekordową wartość apertury numerycznej falowodu pompy we włóknie typu *double-clad* ze szkła fosforanowego wynoszącą 0,91. Maksymalna moc generacji w laboratoryjnym układzie lasera we włóknie o długości 19 cm wyniosła 12,4 W przy sprawności różniczkowej 42,8 %.

Słowa kluczowe: światłowód fotoniczny, włókno aktywne, LMA PCF, światłowód o powiększonym rdzeniu, światłowód ze szkła fosforanowego, iterb

Yb^{3+} doped phosphate LMA photonic crystal fiber for laser applications

Abstract: This paper presents the research work on a Yb^{3+} doped photonic crystal fiber laser with an extended mode area made of phosphate glass carried out at ITME. By increasing the mode area we obtained the laser with a higher power level and a shorter fiber length than before. The doped and undoped glass was manufactured and subsequently the measurements of optical and rheological properties were done. The analysis of both absorption and emission of the doped glass was performed. The fiber with the extended mode area was manufactured and its passive properties were examined. The numerical aperture of the pump waveguide was found to be very high and equaled 0.91, which is a record-breaking value for phosphate photonic structures and, at the same time, one of the highest values obtained for structures made of silica. We achieved laser generation from the 19 cm fiber with the maximum power of 12.4 W and the slope efficiency of 42.8 %.

Key words: photonic crystal fiber, laser fiber, LMA PCF, extended mode area fiber, phosphate fiber, ytterbium

1. Wstęp

Włókna aktywne odgrywają ogromną rolę w konstrukcji laserów oraz wzmacniaczy światłowodowych. Obecnie podstawowe komercyjne konstrukcje nadal bazują na standardowych światłowodach typu *step - index*, ale zostało również opracowanych wiele konstrukcji laserów wykorzystujących światłowody fotoniczne (PCF - *Photonic Crystal Fiber*). Mają one wiele cech przewyższających cechy standardowych włókien *step - index* w zastosowaniach laserowych, które pozwalają na znaczne skrócenie długości włókna aktywnego, zachowując jednocześnie podobne parametry generacji. Skrócenie długości włókna aktywnego jest możliwe dzięki znacznemu zwiększeniu absorpcji promieniowania pompującego, które w strukturze dwupłaszczowej (*double - clad*) jest osiągalne poprzez:

- stosowanie zewnętrznego płaszcza powietrznego (*air - cladding*) pozwalającego na uzyskiwanie bar-

dzo dużych wartości apertury numerycznej NA falowodu pompy 0,5 - 0,8 [1],

- możliwości stosowania rdzenia powiększonego (światłowód LMA - *Large Mode Area*) o średnicy nawet do 85 μm dla włókna aktywnego, przy zachowaniu propagacji jednomodowej i w związku z tym uzyskiwania znakomitej jakości generowanej wiązki [2 - 3].

Płaszcz powietrzny ze względu na specyficzną technologię wytwarzania światłowodów fotonicznych posiada nieregularny kształt, co zwiększa sprawność pompowania przez ograniczenie pojawiania się modów kołowych i modów omijających domieszkowany rdzeń, co jest charakterystyczne dla płaszczy typu *step - index* o kształcie symetrycznym.

Dzięki ww. zaletom włókien fotonicznych długość włókna laserowego wykonanego w technologii krzemionkowej (SiO_2) zmniejszyła się z kilkudziesięciu metrów

w przypadku włókna *step - index* do długości kilkudziesięciu centymetrów dla włókna fotonicznego.

W celu wytworzenia jeszcze krótszych laserów poszukuje się rozwiązań w technologii pozwalającej na wprowadzenie większej domieszki jonów ziem rzadkich. Stosowane jest szkło fosforanowe, dzięki któremu pojawiły się lasery o długości kilku centymetrów generujące wiązkę w modzie podstawowym. W przypadku szkła fosforanowego, które jest dużo bardziej stratne niż szkło krzemionkowe, skrócenie włókna przynosi nie tylko zmniejszenie rozmiarów końcowego urządzenia, ale jest również istotne ze względu na zmniejszenie strat we wnętrzu lasera i zwiększenie przez to sprawności lasera i polepszenie parametrów generacyjnych. Skrócenie wnęki lasera kompensuje w pewnym stopniu większą tłumienność uzyskiwaną dla szkła fosforanowego w porównaniu ze szkłem krzemionkowym.

W niniejszej publikacji przedstawiono fosforanowe włókno laserowe o strukturze podwójnego płaszczu (*double - clad*) wykonane całkowicie w technologii fotonicznej, tj. zastosowana została struktura PCF stanowiąca rdzeń i płaszcz wewnętrzny oraz struktura fotonicznego płaszczu powietrznego (*air - cladding*) stanowiąca płaszcz zewnętrzny. W literaturze poza pracami autorów niniejszej publikacji nie spotyka się laserów bazujących na włóknach ze szkła fosforanowego o strukturze *double - clad* wykonanej w pełni w technologii fotonicznej [4].

W literaturze można spotkać prace dotyczące dwóch rodzajów włókien laserowych wykonanych ze szkła fosforanowego:

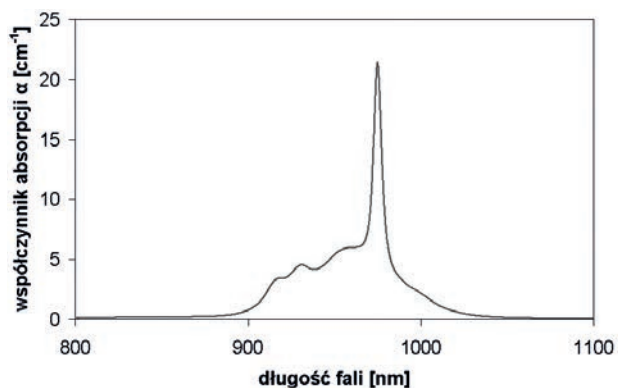
- włókna wykonane w technologii mieszanej - ze strukturą fotoniczną w płaszczu wewnętrznym i z płaszczem zewnętrznym wykonanym w technologii *step - index* [5]
- włókna wykonane w pełni w technologii *step - index* [6].

Dzięki wykorzystaniu zalet światłowodów fotonicznych oraz dużej rozpuszczalności jonów ziem rzadkich w szkłe fosforanowym uzyskano laser o długości 19 cm i mocy generacji 12,4 W przy sprawności różniczkowej 42,8 %. Wartość absorpcji pompy wyniosła ponad 91 dB/m, co znacznie przekracza wartości uzyskiwane we włóknach krzemionkowych wynoszące maksymalnie 30 dB/m [2 - 3]. Wyniki pracy zostały przedstawione poniżej.

2. Charakterystyka szkła fosforanowego

Do wytworzenia lasera włóknowego użyto domieszkowanych i niedomieszkowanych szkieł fosforanowych z układu tlenkowego $P_2O_5-Al_2O_3-BaO-ZnO-MgO-Na_2O$.

Dokonano pomiarów transmisji o wysokiej rozdzielczości (0,1 nm) dla zakresu 800 - 1100 nm dla wytopionego szkła domieszkowanego o stężeniu domieszki 6 % mol dla próbki o grubości 0,5 mm. Zastosowanie próbek



Rys. 1. Wykres wartości współczynnika tłumienia (absorpcji) α dla szkła domieszkowanego 6 % mol iterbu dla zakresu długości fal 800 - 1100 nm.

Fig. 1. Absorption coefficient of 6 % mol ytterbium doped phosphate glass for the 800 - 1100 nm spectrum.

o większej szerokości wprowadzałyby duże błędy określenia wartości współczynnika w zakresie długości fal absorpcji dla domieszki aktywnej. Dzięki pomiarom transmisji uzyskano charakterystykę spektralną wartości współczynnika tłumienia. Wyniki zostały przedstawione na Rys. 1.

Najwyższą wartość absorpcji uzyskano dla długości 975,2 nm charakterystycznej dla jonów iterbu w szkłe fosforanowym. Zakres absorpcji domieszki zawierał się w przedziale 880 - 1040 nm. Poza zakresem absorpcji domieszki współczynnik tłumienności szkła domieszkowanego oraz szkła niedomieszkowanego w zakresie długości fal 800 - 1100 nm wyniósł $\sim 0,23 \text{ cm}^{-1}$ (10 dB/m).

Znając wartości absorpcji można obliczyć przekrój czynny na absorpcję, korzystając z następującej zależności [7]:

$$\sigma_{abs}(\lambda) = \frac{\alpha_{abs}(\lambda)}{N}, \quad (1)$$

gdzie N [$1/\text{cm}^3$] jest koncentracją aktywnej domieszki, tj. ilością jonów domieszki w objętości badanego szkła.

Koncentrację aktywnej domieszki uzyskano poprzez przeprowadzenie analizy składu chemicznego zaprojektowanego szkła. W tym celu skorzystano z prostych przekształceń oraz wzoru na ilość jonów w substancji [8]:

$$N = \rho \cdot \frac{m \cdot d}{100} \cdot \frac{N_A}{M_i}, \quad (2)$$

gdzie ρ jest zawartością Yb_2O_3 określoną w % mas, d - gęstością badanego szkła, N_A - liczbą Avogadro $6,022 \cdot 10^{23}$, M_i - liczbą masową Yb_2O_3 , m - liczbą atomów w cząsteczce (w naszym przypadku jest to $m = 2$).

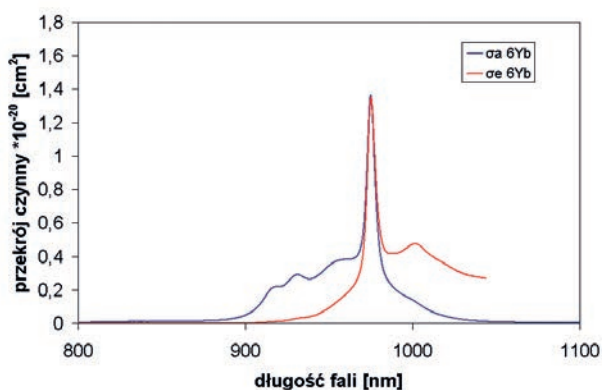
Koncentracja jonów iterbu wyniosła $15,69 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Korzystając z teorii McCumber'a [9 - 10], znając parametry absorpcyjne, można uzyskać parametry spektrum emisyjnego. Teoria McCumber'a wskazuje na relację pomiędzy przekrojem czynnym na emisję, a przekrojem czynnym na absorpcję. Poniżej został przedstawiony zmodyfikowany wzór określający tę zależność [11]:

$$\sigma_{emi}(\lambda) = \sigma_{abs}(\lambda) \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{zl} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right), \quad (3)$$

gdzie: k jest stałą Boltzmana, h – stałą Plancka, c – prędkością światła, a E_{zl} określa energię separacji najniższych poziomów Starkowskich stanu podstawowego i wzbudzonego (*zero - line energy*). Wartość Z_l/Z_u w temperaturze pokojowej dla szkieł domieszkowanych Yb^{3+} wynosi 0,98 dla szkła fosforanowego [12].

Rys. 2 przedstawia wykresy obliczonego przekroju czynnego na absorpcję i emisję metodą McCumbera. Dla maksimum absorpcji (975,2 nm) wartość przekroju czynnego na emisję wyniosła $1,364 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$, natomiast dla spodziewanej długości fali generacji lasera 1030 nm wartość ta wyniosła $0,30 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$.



Rys. 2. Wykres obliczonego przekroju czynnego na absorpcję (wykres niebieski) oraz przekroju czynnego na emisję (wykres czerwony) dla szkła domieszkowanego jonami itterbu o stężeniu 6 % mol.

Fig. 2. Calculated absorption (blue line) and emission (red line) cross section of 6 % mol ytterbium doped phosphate glass for the 800 - 1100 nm spectrum.

Przedstawiona wyżej analiza charakteryzuje parametry absorpcyjne i emisyjne szkła domieszkowanego określające zdolność materiału do zastosowań laserowych.

W przypadku struktur wykonanych ze szkieł różniących się składem chemicznym (szkło domieszkowane i niedomieszkowane) niezwykle istotne jest dopasowanie właściwości reologicznych. Dopasowanie tych parametrów daje możliwość łączenia tych szkieł i wytworzenia włókna finalnego. W przypadku niedopasowania właściwości reologicznych podczas procesów wytwarzania włókna mogłoby dojść do zbyt dużych naprężeń i pęknięcia preformy lub włókna.

W przypadku światłowodów fotonicznych przeznaczonych na lasery istotne jest również to, aby uzyskać zgodność współczynników załamania światła dla szkieł domieszkowanych i niedomieszkowanych. W przypadku, gdyby domieszkowane szkło rdzeniowe miało współczynnik załamania wyższy niż szkło niedomieszkowane przeznaczone na płaszcz, można uzyskać propagację fali świetlnej na zasadzie *step - index* i nie można by wykorzystać właściwości propagacyjnych charakterystycznych

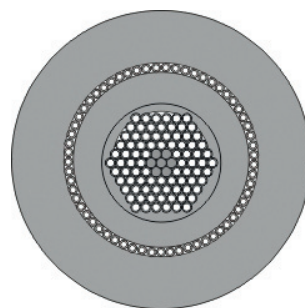
dla światłowodów fotonicznych. W światłowodach fotonicznych dopuszcza się także wykorzystanie szkła domieszkowanego o wartości współczynnika załamania niższej niż szkło niedomieszkowane. W takiej strukturze może również występować propagacja na zasadach charakterystycznych dla światłowodów fotonicznych.

Wytworzone w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych szkła domieszkowane i niedomieszkowane tworzące strukturę fotoniczną włókna były dobrze dopasowane pod kątem reologicznym i współczynnika załamania światła. Wytopione szkła nie ulegały krystalizacji.

3. Technologia wytworzenia włókna laserowego z powiększonym rdzeniem aktywnym

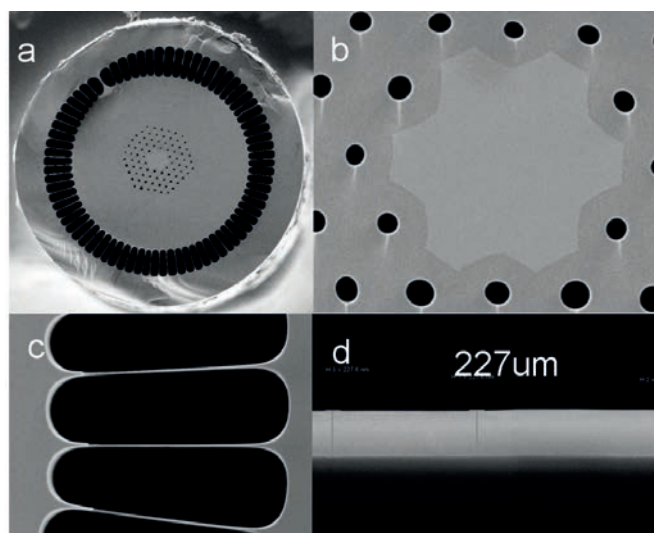
Najczęściej stosowana technologia wytwarzania włókien fotonicznych (*stack-and-draw method*) jest związana ze składaniem preformy z kapilar i pręcików tworzących strukturę fotoniczną. W preformie mogą występować również większe elementy takie jak rury szklane będące z reguły elementami konstrukcyjnymi lub zewnętrzną warstwą struktury pełniącą często funkcje zwiększające wytrzymałość struktury i chroniącą elementy umieszczone wewnątrz.

Struktura włókna finalnego odwzorowuje, z reguły dosyć wiernie, strukturę i proporcje przygotowanej wcześniej preformy, dlatego niezwykle istotne jest właściwe zaprojektowanie struktury preformy (Rys. 3). Preforma składała się z kapilar i pręcików stanowiących fotoniczną strukturę wewnętrzną. Rdzeń powiększony utworzono poprzez umieszczenie w części centralnej preformy siedmiu pręcików ze szkła domieszkowanego. Wewnętrzna struktura fotoniczna została umieszczona w rurze wewnętrznej. Kolejną warstwę stanowiły kapilary mające na celu utworzenie powietrznego płaszczu zewnętrznego, który ma tworzyć falowód dla promieniowania pompującego o bardzo dużej aperturze numerycznej. W celu uzyskania dużej apertury numerycznej, mostki w płaszczu powietrznym nie powinny być szersze niż połowa długości fali promieniowania pompy, natomiast



Rys. 3. Struktura preformy na włókno fotoniczne z rdzeniem powiększonym.

Fig. 3. The structure of an extended core photonic crystal fiber preform.



Rys. 4. Zdjęcia SEM przekroju poprzecznego światłowodu o powiększonym rdzeniu z płaszczem powietrznym o następujących wymiarach: a) średnica zewnętrzna światłowodu 290 μm , średnica płaszcza wewnętrznego 180 μm , b) stała siatki struktury fonicznej - 7 μm , średnica rdzenia - 27 μm , średnica obszaru domieszkowanego - 23 μm , c) d) szerokość i długość mostków szklanych w płaszczu powietrznym odpowiednio 230 nm i 18 μm .

Fig. 4. SEM images of a cross section of an extended core air-cladding fiber with the following dimensions: a) fiber diameter – 290 μm , internal cladding diameter – 180 μm , b) photonic crystal structure pitch – 7 μm , core diameter – 27 μm , doped area diameter – 23 μm , c) d) width and length of glass bridges 230 μm and 18 μm respectively.

ich długość powinna wielokrotnie przekraczać długość tej fali [13]. W przypadku struktur domieszkowanych iterbem Yb, szerokość mostków szklanych nie powinna przekraczać 470 - 485 nm, a ich długość nie powinna być mniejsza niż kilka mikrometrów. Aby płaszcz powietrzny w docelowym włóknie spełniał swoją rolę zostały użyte kapilary cienkościenne.

Tak przygotowana preforma podlegała dwukrotnemu procesowi pocieniania na wieży do wyciągania światłowodów. Szczegóły procesu zostały przedstawione w pracy doktorskiej głównego autora publikacji [14].

Na Rys. 4 został przedstawiony wytworzony światłowód laserowy o powiększonym rdzeniu. Szerokość mostków powietrznych w strukturze płaszcza powietrznego wyniosła 230 nm, co gwarantuje otrzymanie wysokiej wartości apertury numerycznej. Widoczny jest jeden defekt powstały przez zamknięcie się jednej kapilary w płaszczu powietrznym. Pomimo tego defektu uzyskano bardzo dobre wyniki pomiaru apertury numerycznej oraz parametrów generacyjnych lasera.

Wymiar zewnętrzny włókna wyniósł 290 μm , średnica płaszcza wewnętrznego - falowodu pompy wyniosła 180 μm , a średnica rdzenia, w którym ma następować generacja laserowa wyniosła 27 μm (średnica obszaru domieszkowanego w rdzeniu wyniosła 23 μm). Stała siatki w strukturze fonicznej wyniosła 7 μm .

Współczynnik absorpcji promieniowania pompy α jest określany na podstawie wzoru często stosowanego w przypadku struktur typu *double-clad* [8]:

$$\alpha = \alpha_{szkla} \cdot \frac{A_r}{A_p}, \quad (4)$$

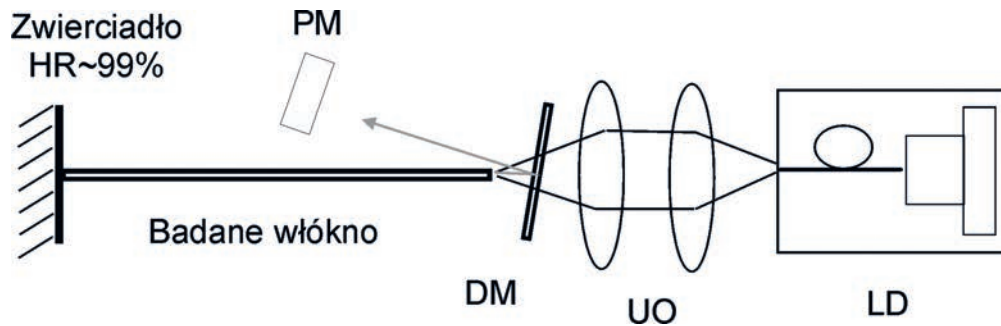
gdzie: α_{szkla} – współczynnik absorpcji w szkle domieszkowanym, A_r – pole powierzchni obszaru domieszkowanego w przekroju poprzecznym włókna, A_p – pole powierzchni falowodu pompy w przekroju poprzecznym włókna.

Powyższy wzór dotyczy sytuacji, gdy rozkład promieniowania pompy jest równomierny w falowodzie pompy. Przyjmując powyższe założenie oraz uwzględniając charakterystykę widmową diody pompującej, wytworzone włókno charakteryzuje się absorpcją o wartości 91 dB/m, co jest wartością trzykrotnie większą niż w przypadku włókien domieszkowanych wykonanych ze szkła krzemionkowego.

Dla wytworzonego włókna z Rys. 4 dokonano pomiaru wartości apertury numerycznej falowodu pompy. Pomiaru dokonano używając włókna o długości 20 cm. Do pomiaru użyto lasera na długość fali 1064 nm, którego wiązka była ustawiana po różnych kątach w stosunku do czoła wytworzonego włókna. W wyniku pomiarów określono aperturę numeryczną o wartości 0,91. Uzyskana wartość apertury jest największą aperturą osiągniętą w strukturze ze szkła fosforanowego i jedną z większych osiągniętych w strukturach fonicznych wytworzonych ze szkła krzemionkowego [1].

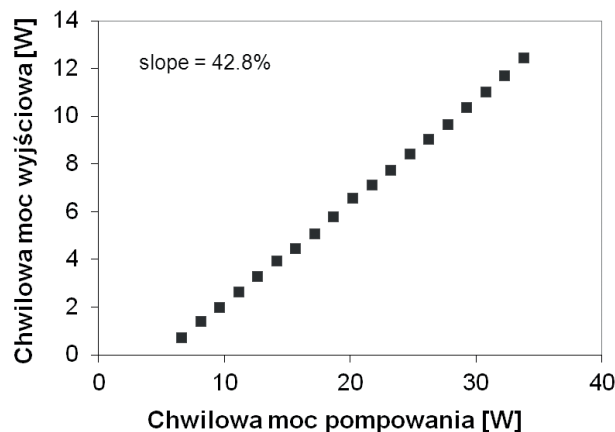
4. Właściwości generacyjne włókna

Pomiarów właściwości generacyjnych wytworzonego włókna dokonano w laboratoryjnym układzie lasera przedstawionym na Rys. 5. Włókno było pompowane za pomocą diody z jednej strony. Wnęka lasera była utworzona przez zwierciadło silnie odbijające ($R > 99\%$) dla dłu-



Rys. 5. Laboratoryjny układ lasera; DM - zwierciadło dichroiczne, PM – miernik mocy, UO – układ optyczny formujący wiązkę pompującą, LD – dioda pompująca 975 nm.

Fig. 5. The experimental laser setup; DM – dichroic mirror, PM – power meter, UO – optical arrangement forming pump beam radiation, LD – 975 nm laser diode.



Rys. 6. Charakterystyka energetyczna lasera na włóknie o długości 19 cm.

Fig. 6. The output power versus the launched power for the 19 cm fiber laser.

gości fali pompy oraz długości fali generacji (zwierciadło odbijające dotykało czoła światłowodu) oraz przez odbicie Fresnela 4,3 % od czoła włókna. Do rozdzielania wiązki pompy oraz promieniowania generacji użyto zwierciadła dichroicznego z transmisją 99 % dla promieniowania pompy i odbiciem 99 % dla generacji przy ustawieniu zwierciadła pod kątem 15 - 20° w stosunku do obu wiązek. Użyta dioda pompująca miała moc maksymalną 35 W na długości fali 975 nm.

Dokonano pomiarów kilku włókien o długości od 8 do 40 cm. Optymalna długość lasera określona eksperymentalnie wyniosła 19 cm i poniżej przedstawiono wyniki dla tej długości włókna laserowego. Uzyskano próg generacji 3,92 W, sprawność różniczkową wynoszącą 42,8 % (w stosunku do mocy promieniowania pompującego) oraz maksymalną moc wyjściową 12,4 W. Generacja lasera następowała w modzie podstawowym o aperturze numerycznej wynoszącej $\sim 0,06$. Środkowa długość fali generacji wyniosła 1044 nm, a szerokość widma generacji wyniosła ~ 20 nm.

Pomiary były wykonywane w reżimie QCW ($T=49$ ms, $t=3$ ms). Zatem wykres (Rys. 6) pokazuje potencjalne możliwości lasera. W przypadku zastosowania reżimu CW, wymagane byłoby zastosowanie układu chłodzenia włókna.

5. Podsumowanie

W niniejszej publikacji zostały przedstawione wyniki prac związanych z wytworzeniem fotonicznego lasera włóknowego na szkłe fosforanowym domieszkowanego iterbem. Należy podkreślić, że włókno laserowe zostało w pełni wykonane w ITME, począwszy od opracowania matrycy szkła domieszkowanego i niedomieszkowanego, wytopienia szkła, przeprowadzenia pomiarów szkła, dobrania do siebie szkieł pod kątem zgodności właściwości reologicznych i wartości współczynnika załamania, aż do zaprojektowania oraz opracowania technologii wytwarzania włókna mikrostrukturalnego z płaszczem powietrznym i wykonania włókna finalnego.

Uzyskano rekordową wartość apertury numerycznej falowodu pompy we włóknie typu *double-clad* ze szkła fosforanowego i jedną z większych wartości uzyskiwanych w przypadku struktur ze szkła krzemionkowego wynoszącą 0,91, dzięki wytworzeniu płaszczu powietrznego, w którym szerokość mostków szklanych wyniosła 230 μm .

Przeprowadzono badania generacyjne wytworzonych włókien w laboratoryjnym układzie lasera. Uzyskano laser o długości 19 cm o maksymalnej mocy wyjściowej 12,4 W i sprawności różniczkowej 42,8 %, co jest jednym z lepszych wyników uzyskiwanych we włóknach fosforanowych na świecie.

Włókna fosforanowe dają możliwości wytwarzania laserów o niewielkich rozmiarach. Jednak przy zachowaniu struktury fotonicznej oraz wielkości rdzenia przedstawionych w publikacji, średnica płaszczu wewnętrznego (falowodu pompy), ze względu na konieczność implementacji kilku rzędów otworów powietrznych tworzących strukturę fotoniczną, mogłaby być zmniejszona najwyżej do 100 μm . Rezygnacja z zewnętrznych rzędów otworów w strukturze fotonicznej wpłynęłaby niekorzystnie na zwiększenie tłumienności struktury [15]. Uwzględniając powyższe ograniczenia, w zaprezentowanej strukturze fotonicznej ze zmniejszoną średnicą płaszczu wewnętrznego do 100 μm , można by uzyskać absorpcję pompy o wartości ponad 300 dB/m, a optymalną długość włókna można by skrócić do kilku centymetrów, wzrosłaby również sprawność różniczkowa takiego lasera.

Bibliografia

- [1] Bouwmans G., Percival R. M., Wadsworth W. J., Knight J. C., Russell P. St. J.: High power Er:Yb fiber laser with very high numerical aperture pump cladding waveguide, *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83, 817 - 818
- [2] Limpert J., Schmidt O., Rothhardt J., Röser F., Schreiber T., Tunnermann A.: Extended single-mode photonic crystal fiber lasers, *Opt. Express*, 2006, 14, 2715 - 2720
- [3] Materiały komercyjne NKT Photonics A/S, <http://www.nktphotonics.com/aerogain-rod-specifications>
- [4] Franczyk M., Stępień R., Pysz D., Kujawa I., Buczyński R., Jabczyński J. K.: Ytterbium doped phosphate glass photonic crystal fiber laser, *Opto-Electr. Rev.*, 2009, 17, 3, 231 - 235
- [5] Li L., Schulzgen A., Temyanko V. L., Qiu T., Morrell M., Wang Q., Mafi A., Moloney J. V., Peyghambarian N.: Short - length microstructured phosphate glass fiber lasers with large mode areas. *Opt. Lett.*, 2005, 30, 10
- [6] Lee Y., Digonnet M. J. F., Sinha S., Urbanek K.E., Byer R. L., Jiang S.: High - power Yb³⁺ - doped phosphate fiber amplifier." *IEEE JSQE*, 2009, 15, 1
- [7] Kuck S.: Laser-related spectroscopy of ion-doped crystals for tunable solid-state lasers, *Appl. Phys. B*, 2001, 72, 515 - 562
- [8] Zenteno L.: High power double-clad fibre lasers, *J. Lightwave Techn.*, 1993, 11, 9, 1435
- [9] McCumber D. E.: Theory of phonon-terminated optical masers, *Phys. Rev.*, 1964, 134, 299
- [10] McCumber D. E.: Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra, *Phys. Rev.*, 1964, 136, 954
- [11] Zou X., Toratani H.: Evaluation of spectroscopic properties of Yb³⁺ - doped glasses, *Phys. Rev. A*, 1995, 52, 22, 15889 - 15897
- [12] Yin H., Deng P., Zhang Y., Gan F.: Determination of emission cross section of Yb³⁺ in glasses by the reciprocity method, *Mat. Lett.* 1997, 30, 29 - 33
- [13] Wadsworth W. J., Percival R. M., Bouwmans G., Knight J. C., Birks T. A., Hedley T. D., Russell P. St. J.: Very high numerical aperture fibers, *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 2004, 16, 3
- [14] Franczyk M.: Aktywne włókna fotoniczne domieszkowane iterbem do zastosowań laserowych. Rozprawa doktorska, ITME, 2012
- [15] Jansen F., Stutzki F., Otto H., Baumgartl M., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A.: The influence of index-depressions in core-pumped Yb-doped large pitch fibers, *Optics Express*, 2010, 18, 26