

OCENA JAKOŚCI WYKONANIA ŚWIATŁOWODU PCF – BADANIA GENERACYJNE

Dariusz Podniesiński^{1,2}, Anna Kozłowska¹, Magdalena Nakielska¹, Ryszard Stępień¹,
Marcin Franczyk¹

¹Institut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133,
e-mail: anna.kozłowska@itme.edu.pl

²Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,
e-mail: dpodniesinski@wat.edu.pl

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych jest jednym z nielicznych polskich ośrodków wytwarzających światłowody fotoniczne do zastosowań specjalnych. Włókna PCF zbudowane ze szkła metafosforanowego z rdzeniem domieszkowanym jonami itterbu o skomplikowanej strukturze wewnętrznej mogą ulegać mechanicznym uszkodzeniom podczas procesu wyciągania. Przydatność wytworzonych włókien PCF do zastosowań specjalnych (innych niż telekomunikacyjne) wymaga określenia ich jakości. W przedstawionej pracy zaproponowano sposób kontroli jakości wytwarzanych włókien PCF, poprzez badania generacyjne na laboratoryjnym stanowisku laserowym. Badaniom poddano, wybrane losowo, dwa krótkie odcinki włókna PCF o długości 220 mm. Promieniowanie lasera półprzewodnikowego z wyjściem światłowodowym o długości fali $\lambda = 976 \pm 5$ nm posłużyło do jednostronnego pompowania włókna PCF. Układ rezonatora tworzył światłowód, którego powierzchnie czoł wykorzystano jako wewnętrzne zwierciadła laserowe (wykorzystano zjawisko 4% odbicia Fresnela). Rozdzielenie promieniowania pompy i promieniowania generacji $\lambda = 1020$ nm zrealizowano za pomocą zwierciadła dichroicznego. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskano informację o jakości obu próbek włókna PCF oraz określono przyczynę braku generacji jednego z nich. Zaproponowana metoda w prosty i szybki sposób umożliwia kontrolę jakości wytworzonych światłowodów fotonicznych.

Słowa kluczowe: światłowód PCF, laser włóknowy, generacja laserowa

Quality assessment of the PCF fibres-generation studies

The Institute of Electronic Materials Technology is one of the few Polish centres producing photonic fibres for special applications. PCF fibres made of metaphosphate glass doped with ytterbium ions with a complex internal structure may be subject to mechanical damage during pulling. The usefulness of the manufactured PCF fibres for applications other than telecommunication is inextricably linked with a prior determination of their quality. This study proposes a method for controlling this parameter, using a laboratory laser setup. Two randomly selected PCF fibres, the short length of which was 220 mm, were studied in the performed tests. The radiation of a fibre pigtailed laser diode emitting at the wavelength $\lambda = 976 \pm 5$ nm was pumped unilaterally into the PCF fibre.

A laser resonator was created by the surfaces of the fibre ends (4% Fresnel reflection was used). The separation of the pump radiation and the radiation at $\lambda = 1020$ nm was realized using a dichroic mirror. The results of the experiments provide information about the quality of PCF fibre samples and make it possible to identify the cause of the generation lack of one of them. The proposed method is a simple and fast way allowing to control the quality of the manufactured photonic optical fibres.

Key words: PCF fibre, fibre-optic, laser, laser generation

WSTĘP

W ostatnim dziesięcioleciu, w dziedzinie techniki światłowodowej, szczególnie duże zainteresowanie ośrodków badawczych skierowane jest na rozwój technologii i zastosowania światłowodów PCF (*Photonic Crystal Fibre*). Prace prowadzone są dwutorowo z podziałem na zastosowania telekomunikacyjne oraz specjalne. Ze względu na dużą różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych światłowodów PCF można przyjąć, że główną cechą odróżniającą je od innych światłowodów jest występowanie charakterystycznych dwóch stref: powietrznych mikrokanalików rozmieszczonych wzdłuż osi optycznej. Strefa wewnętrzna w postaci symetrycznego ażurowego wzoru, w przekroju poprzecznym, tworzy bezpośrednie otoczenie pełnego lub pustego rdzenia światłowodu. Strefę zewnętrzną tworzy pierścień pojedynczych powietrznych mikrokanalików w bliskiej odległości od powierzchni bocznej światłowodu. Włókno nie ma klasycznego płaszcza; zewnętrzny pierścień mikrokanalików jest płaszczem światłowodu PCF. Objętość jednorodnego materiału między strefami jest falowodem dla transmitowanego promieniowania. Zależności geometryczne otworów i ich wzajemnego położenia są silnie związane z długościami fal stosowanych laserów. Podstawowymi różnicami między światłowodami PCF decydującymi o ich

zastosowaniu są: rodzaj materiału bazowego (szkła, tworzywa sztuczne), wartości współczynników tłumienia, typy i ilości stosowanych rdzeni oraz rodzaj domieszki pierwiastków ziem rzadkich. Współczesne światłowody telekomunikacyjne wykonuje się najczęściej na bazie szkieł SiO_2 , które charakteryzują się wartościami współczynnika tłumienia poniżej 0,2 dB/km zapewniając przenoszenie sygnału świetlnego na odległości przekraczające dziesiątki kilometrów. Rdzeń światłowodu może być pusty lub pełny co zależne jest od przyjętej koncepcji technologicznej. W przeciwieństwie do zastosowań telekomunikacyjnych światłowody PCF do zastosowań specjalnych charakteryzują się dużymi wartościami współczynników tłumienia na poziomie dziesiątek dB/m a stosowane odcinki nie przekraczają długości większych niż pojedyncze metry. Jednym z przykładów zastosowania specjalnych światłowodów PCF są lasery włóknowe, które stanowią interesującą alternatywę dla objętościowych laserów na ciele stałym pompowanych diodami laserowymi [1 - 4]. Lasery włóknowe znajdują zastosowanie m.in. w obróbce materiałowej, a ich zalety to przede wszystkim wysoka jakość wiązki laserowej, możliwość uzyskania wysokich mocy emisji pozwalających na uzyskanie większej sprawności niż lasery oparte na włóknach *step-index* (dla włókien o niewielkich długościach). Odcinek światłowodu PCF stanowi sam w sobie układ rezonatora, w którym generację laserową można uzyskać bez zwierciadeł zewnętrznych. Może to być zrealizowane poprzez wykorzystanie powierzchni czoł światłowodu jako zwierciadeł laserowych; wykorzystuje się przy tym 4%-we odbicia Fresnela.

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych jest jednym z niewielu ośrodków w Polsce, w którym prowadzone są badania nad opracowaniem aktywnych włókien fonicznych (PCF) do zastosowań specjalnych [5]. Skomplikowany proces technologiczny nie zawsze pozwala na wytworzenie włókien o zamierzonych parametrach technicznych, stąd też występuje potrzeba określania ich jakości. Ocenie podlegają parametry mechaniczne (np. wytrzymałość na zginanie, twardość, jednolitość i ciągłość materiału), geometria przekroju włókna (np. symetria, przezierność otworów), termiczne (np. dopuszczalna temperatura pracy włókna) oraz właściwości optyczne (np. tłumienie, absorpcja, generacja, charakterystyki spektralne). W przedstawionym poniżej materiale ocena jakości światłowodu PCF zostanie ograniczona do określenia jego właściwości optycznych poprzez badania mające na celu uzyskanie generacji promieniowania laserowego o długości fali bliskiej $\lambda = 1020 \text{ nm}$.

2. BADANE PRÓBKI ORAZ UKŁAD EKSPERYMENTALNY

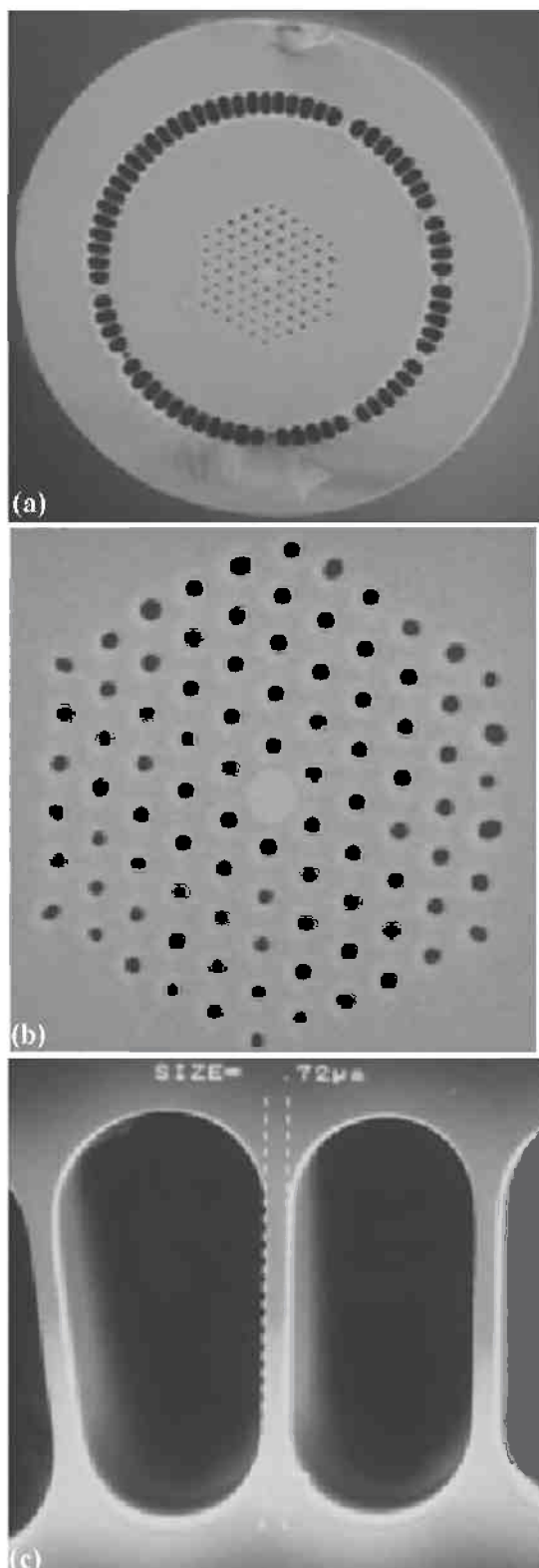
Badaniom jakościowym poddano dwa losowo wybrane odcinki światłowodów PCF ze szkła metafosforanowego IRF-16/02 z rdzeniami wykonanymi ze szkła IRF-16/5Yb domieszkowanymi jonami iterbu Yb^{+3} , które zostały wytworzone w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. Oba światłowody pochodziły z jednego procesu technologicznego i charakteryzowały się następującymi parametrami:

- średnica rdzenia: 12 μm ,
- średnica płaszczki wewnętrznej: 180 μm (fale wód dla pompy),
- średnica zewnętrzna: 289 μm ,
- średnica otworów w strukturze fonicznej PCF d : 3 μm ,
- stała siatki (pitch): 8 μm ,
- stopień domieszkowania włókna Yb_2O_3 : 3% mol; ok. 8,9% wag.,
- długość odcinka światłowodu: 220 mm.

Na Rys. 1. przedstawiono wzorcowy obraz przekroju badanych światłowodów o parametrach geometrycznych pozytywnie zweryfikowanych za pomocą mikroskopu elektronowego.

W laserze włóknowym możliwe jest stosowanie dwustronnego wprowadzania promieniowania pompującego [6 - 7] lub jednostronnego [8]. W opisywanym eksperymencie przyjęto rozwiązanie z pompowaniem jednostronnym. Światłowody umieszczane były kolejno w układzie eksperymentalnym (Rys. 2), zbudowanym w oparciu o schemat funkcjonalny przedstawiony w pracy [8].

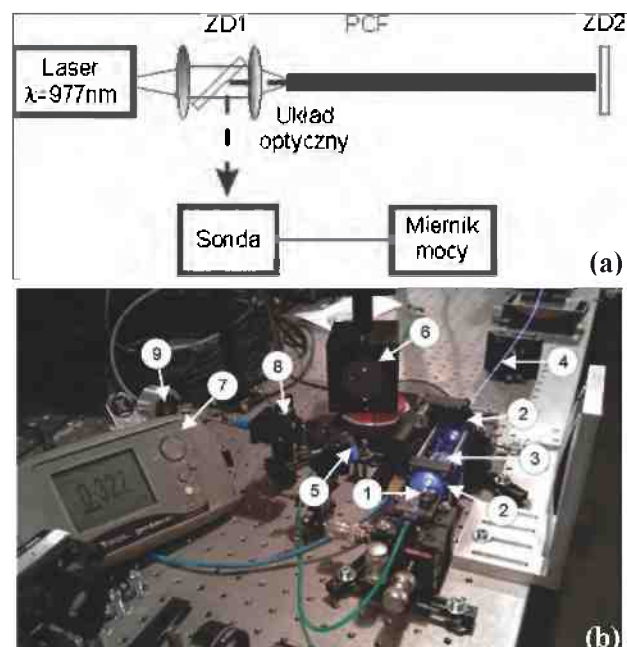
W laboratoryjnym układzie lasera włóknowego źródłem promieniowania pompującego była dioda laserowa typu FLD97520K firmy IPG z wyjściem światłowodowym o średnicy rdzenia $\Phi = 105 \mu\text{m}$ generująca promieniowanie o nominalnej długości fali $\lambda = 976 \pm 5 \text{ nm}$ i mocy optycznej cw do $P = 20 \text{ W}$. Do zasilania lasera wykorzystano dwa rodzaje zasilaczy pracujących w reżimie cw oraz q-cw: zasilacz typu ZDL-100 (cw) oraz zasilacz typu SDL-830 (q-cw). Stabilizację temperaturową diody laserowej w zakresie od $T = 15^\circ\text{C}$ do $T = 36^\circ\text{C}$ realizował termoelektryczny układ chłodzenia z modulem Peltier'a sterowany kontrolerem LDD-60. Układ optyczny stanowiły dwie soczewki kolimacyjne o ogniskowych $f = 18 \text{ mm}$ ustawione w układzie firmy Thorlabs pozwalające na jednostronne wprowadzenie wiązki promieniowania pompującego do wnętrza włókna z średnicą płaszczki wewnętrznej 180 μm (warunek wynikający ze średnicy płaszczki wewnętrznej – Rys. 1). Druga strona włókna zamknięta była płaskim



Rys. 1. Struktura wzorcowa światłowodu PCF (fotografia SEM) a) przekrój poprzeczny światłowodu PCF, b) powiększenie części środkowej z uwypukleniem położenia rdzenia i grupy kanałków powietrznych, c) powiększenie zewnętrznego pierścienia kanałków powietrznych [5].

Fig. 1. Exemplary structure of the PCF fiber (SEM photography): a) cross section of the PCF fiber, b) enlarged central part with an emphasis on the position of the core and the group of air channels, c) magnification of the outer ring of air channels [5].

zwierciadłem ZD2 odbijającym promieniowanie dla zakresu od $\lambda = 970$ nm do $\lambda = 1100$ nm. Rozdzielenie promieniowania pompującego od promieniowania generacyjnego realizowane było za pomocą zwierciadła dichroicznego ZD1 ustawionego pod kątem 45° do osi optycznej. Generowane promieniowanie laserowe wyprowadzane było na zewnątrz układu pod kątem 90° . Zmiany widm fluorescencji i widm promieniowania podczas eksperymentów rejestrowane były za pomocą spektrometrów SpectraPro SP-2300 firmy Acton oraz C10083 firmy Hamamatsu. Zmiany sygnałów optycznych rejestrowane były za pomocą detektora germanowego GM-5 i oscyloskopu TDS2022B firmy Tektronix. Pomiary mocy wyjściowej wykonywane były za pomocą miernika firmy Gentec z sondą model 117. Widok laboratoryjnego stanowiska lasera włóknowego przedstawiony jest na Rys. 2a.



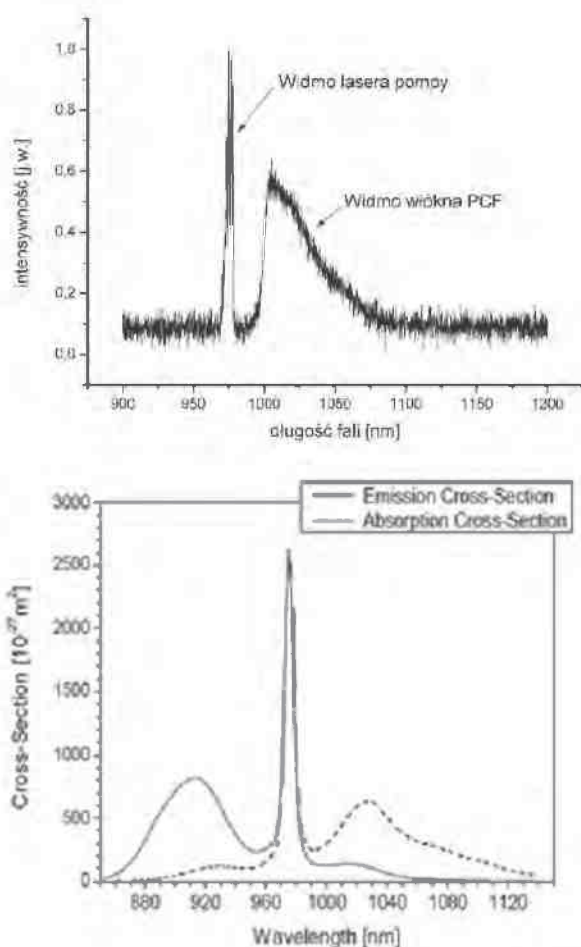
Rys. 2. Stanowisko eksperymentalne lasera włóknowego PCF z jednostronnym pompowaniem. a) schemat układu, b) fotografia stanowiska podczas rejestracji mocy wyjściowej. Elementy stanowiska: 1. wyjście światłowodu lasera pompującego, 2. soczewki kolimacyjne, 3. zwierciadło dichroiczne, 4. włókno aktywne PCF, 5. zwierciadło odbijające wiązkę wyjściową, 6. sonda miernika mocy, 7. miernik mocy, 8. układ wprowadzania wiązki wyjściowej za pomocą światłowodu transmisyjnego do spektrometru, 9. detektor germanowy.

Fig. 2. Experimental arrangement of a single-side pumped PCF laser. a) the setup scheme, b) the photograph of the setup taken during the measurement of the output power. Elements of the experimental setup: 1. fibre output of the pumping laser, 2. collimating lenses, 3. dichroic mirror, 4. active PCF fibre, 5. mirror reflecting the output beam, 6. power meter head, 7. power metre monitor, 8. elements allowing to launch the output beam via the transmission fibre into the spectrometre, 9. germanium detector.

3. WYNIKI BADAŃ

W początkowej fazie badań wykonany został pomiar widm fluorescencji próbek włókien PCF. Wynik pomiaru przedstawiony został na Rys. 3a.

Potwierdzenie zgodności widma badanego włókna PCF z widmem referencyjnym dla tego typu materiału (zaczepniętym z pracy [9], Rys. 3b) pozwoliło na kontynuowanie badań o charakterze energetycznym, mających na celu uzyskanie generacji laserowej.



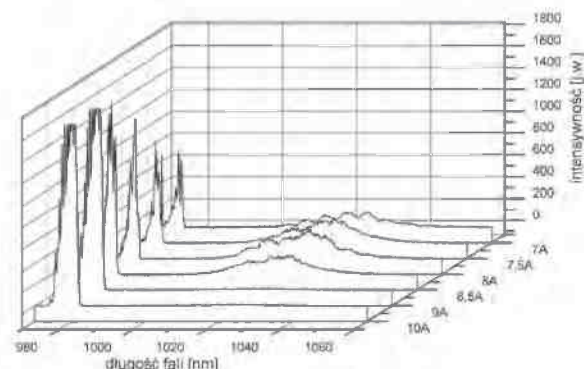
Rys. 3. a) widmo fluorescencji badanego światłowodu PCF, b) referencyjne przekroje czynne na absorpcję i emisję dla szkła fosforanowego domieszkowanego iterbem [9].
Fig.3. a) fluorescence spectrum of the tested PCF fiber, b) emission and absorption crosssections of a standard phosphate glass doped with ytterbium [9].

Ze względu na przyjęte rozwiązanie układu generacyjnego z wykorzystaniem zwierciadła dichroicznego, rozdzielającego blisko siebie położone długości fali pompującej ($\lambda = 977$ nm) i generacyjnej ($\lambda = 1020$ nm), istotnym było zapewnienie stabilności temperaturowej lasera pompującego. Warunek ten wynika bezpośrednio z silnej zależności gene-

rowanej długości fali lasera półprzewodnikowego od temperatury złącza p-n powstającej na skutek wydzielanego ciepła strat podczas przepływu prądu zasilania. W przeprowadzanych badaniach optymalizację parametrów zasilania przeprowadzono dla warunku stałej temperatury i zmiennych wartości prądu zasilania oraz dla warunku stałej wartości prądu zasilania przy zmianach temperatury.

- Eksperymenty z włóknem PCF (odcinek nr 1)

Próba uzyskania generacji laserowej w trybie cw przyniosła niepowodzenie dla całego zakresu dopuszczalnych zmian prądu od $I = 1$ A do $I = 10$ A dla lasera pompującego i nie będzie opisywana. Zmiana trybu zasilania na q-cw pozwoliła uzyskać charakterystyki zmiany widma emisji swobodnej dla układu laserowego w funkcji zmian prądu zasilania lasera pompującego. Przykładowe charakterystyki zarejestrowane dla temperatury $T = 30^\circ\text{C}$ przedstawione są na Rys. 4.

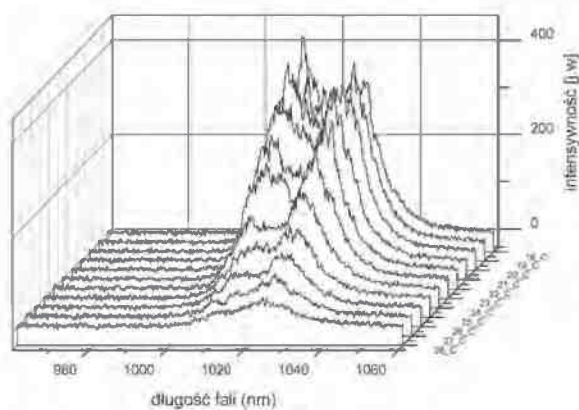


Rys. 4. Widma emisji spontanicznej włókna nr 1 dla stałej temperatury diody lasera pompującego $T = 30^\circ\text{C}$ przy zmianie prądu zasilania w zakresie od $I = 7$ A do 10 A.
Fig. 4. Spontaneous emission spectra of fibre No. 1 with a pump laser diode temperature fixed at $T = 30^\circ\text{C}$ at different the power supply currents ranging from $I = 7$ A to 10 A.

Obserwowane charakterystyki spektralne dla zmian prądu zasilania w zakresie od $I = 7$ A do $I = 10$ A wykazują małe zmiany intensywności widma dla spodziewanego zakresu generacyjnego. Dodatkowo, na tle widocznego wzrostu amplitudy widma lasera pompującego proporcjonalnie do dostarczanej mocy pompującej widmo emisji spontanicznej pozostaje szerokie, zachowując względną symetrię do spodziewanej nominalnej długości fali $\lambda = 1020$ nm. Rejestrowane maksymalne zmiany szerokości widma zmieniały się w zakresie $\lambda = 1020$ nm ± 20 nm.

Próba uzyskania generacji laserowej poprzez dobór optymalnej temperatury pracy lasera pom-

pującego dla stałej wartości prądu lasera pompującego $I = 10\text{A}$ pozwoliła na rejestracje zmian widm (Rys. 5). Uzyskane widmo jest szerokie. Dodatkowo, układ nie wykazuje tendencji do jego zawężania w całym zakresie zmian parametrów zasilania lasera pompującego. Wyraźnie zauważalny jest wzrost intensywności amplitudy widma wraz z obniżaniem wartości temperatury i przesuwanie się maksimum sygnału w kierunku niższych długości fal. Widmo lasera pompy zostało odcięte filtrem pasmowo-przepustowym dla uwypuklenia zmian widma emisji spontanicznej.



Rys. 5. Widma emisji spontanicznej włókna nr 1 dla stałej wartości prądu lasera pompującego $I = 10\text{A}$ w trybie q-cw przy wymuszaniu zmian temperatury diody lasera pompującego w zakresie od 18°C do 28°C .

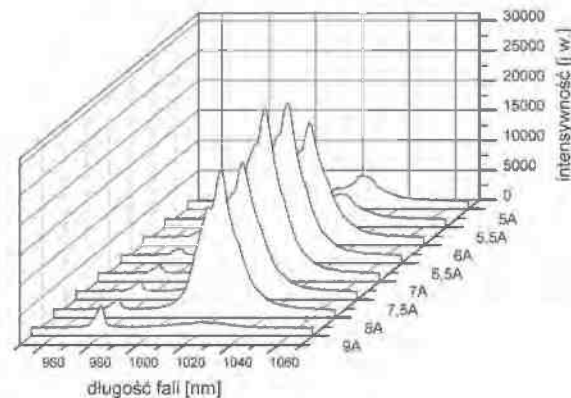
Fig. 5. Spontaneous emission spectra of fibre No. 1 at a constant pump laser power supply current in the q-cw mode ($I = 10\text{A}$) taken at different pump laser diode temperatures ranging from 18°C to 28°C .

- Eksperymenty z włóknem PCF (odcinek nr 2)

Na Rys. 6 przedstawione zostały zarejestrowane przykładowe zmiany charakterystyk widmowych podczas próby uzyskania generacji laserowej w trybie cw dla lasera pompującego zasilanego prądem w zakresie od $I = 5\text{A}$ do $I = 9\text{A}$ przy stałej temperaturze 36°C . Widmo promieniowania lasera pompy zostało odcięte przy pomocy filtra pasmowo-przepustowego.

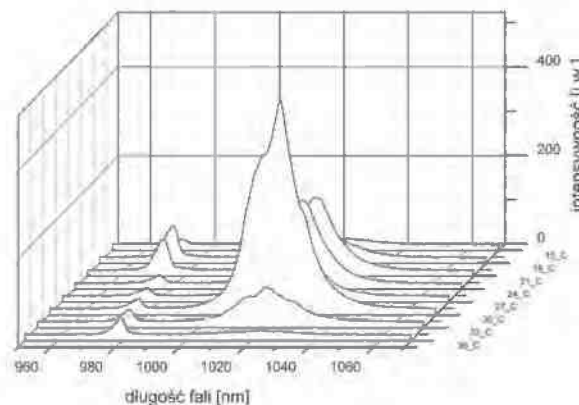
Przykład optymalizacji termicznych warunków pracy pompującej diody laserowej przy stałej wartości prądu zasilania pokazany jest na Rys. 7. Wyraźnie widoczna jest różnica zmian amplitudy intensywności rejestrowanego widma dla temperatury $T = 30^\circ\text{C}$ i stałego prądu zasilania $I = 9\text{A}$ w stosunku do amplitud dla pozostałych temperatur.

Zarówno w przypadku pokazanym na Rys.6 jak i Rys.7. widmo promieniowania ma silne tendencje



Rys. 6. Widma emisji wymuszonej włókna nr 2. Tryb pracy cw, temperatura 36°C , zmiana prądu zasilania w zakresie od $I = 5\text{A}$ do 9A .

Fig. 6. Stimulated emission spectra of fiber No. 2 in cw mode of operation, temperature of 36°C and change of the power supply current from $I = 5\text{A}$ to 9A .



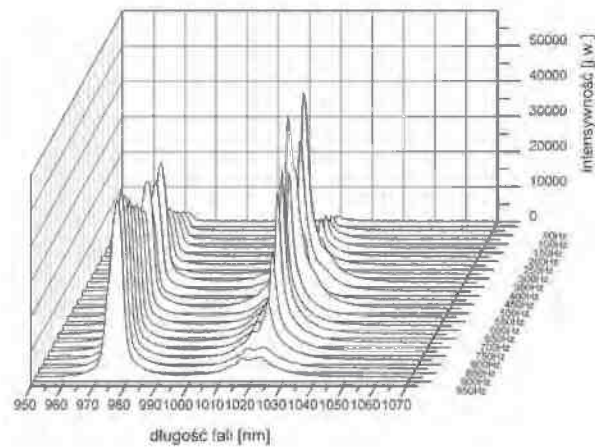
Rys. 7. Widma emisji wymuszonej dla włókna nr 2. Tryb pracy cw, prąd $I = 9\text{A}$ przy zmianach temperatury w zakresie od $T = 19^\circ\text{C}$ do $T = 36^\circ\text{C}$.

Fig. 7. Stimulated emission spectra of fiber No. 2 in the cw mode of operation, the current $I = 9\text{A}$, the temperature change from $T = 19^\circ\text{C}$ to $T = 36^\circ\text{C}$.

do zawężania, co można uznać za przekroczenie wartości prądu progowego i uzyskanie akcji laserowej o niskim poziomie wyjściowej mocy optycznej.

Na Rys. 8. zademonstrowano przykładowe zmiany widma generacji lasera włóknowego pracującego w trybie q-cw dla stałej temperatury. W układzie pomiarowym nie stosowano filtra pasmowo-przepustowego w celu porównania widm lasera pompy i widm promieniowania generacji laserowej. W przedstawionym układzie przyjęto stałą wartość temperatury $T = 32^\circ\text{C}$ i stałą wartość prądu zasilania diody lasera pompującego $I = 9\text{A}$. Regulacja mocy optycznej lasera pompującego realizowana była poprzez zmianę współczynnika wypełnienia impulsu w zakresie od 5% do 95%. Przy stałym czasie trwania

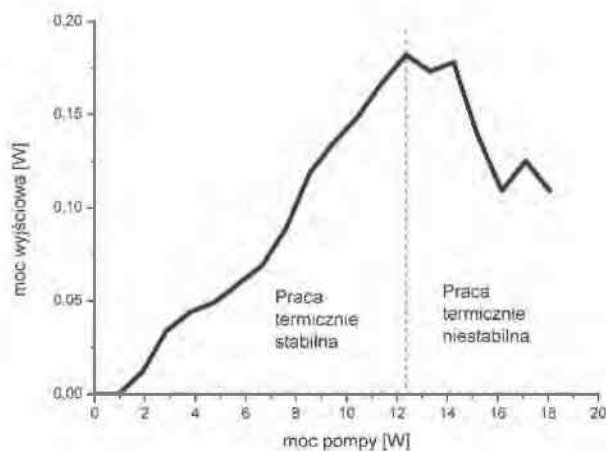
impulsu $t_i = 1$ ms zmieniano częstotliwości sygnału prądowego zasilacza w zakresie od $f = 50$ Hz do $f = 950$ Hz.



Rys. 8. Widma emisji wymuszonej lasera włókna nr 2. Tryb pracy q-cw, temperatura 32°C, prąd zasilania $I = 9$ A, czas trwania impulsu $t_i = 1$ ms, częstotliwość impulsów zmienna w zakresie od $f = 50$ Hz do $f = 950$ Hz.

Fig. 8. Stimulated emission spectra of laser fiber No. 2 in the Q-cw mode of operation, the temperature of 32°C, the power supply current $I = 9$ A, pulse duration $t_i = 1$ ms, pulse frequency variable in the range of $f = 50$ Hz to $f = 950$ Hz.

Dla układu lasera włóknowego PCF została zdjęta charakterystyka mocy wyjściowej w funkcji mocy pompującej. Zarejestrowane zmiany mocy promieniowania generowanego w układzie lasera włóknowego o długości fali $\lambda = 1020$ nm ± 1 nm zostały przedstawione na Rys. 9. Wykres został podzielony pionową linią przerywaną na dwie części: pracę termicznie stabilną oraz termicznie niestabilną. W części termicznie stabilnej widać liniowy wzrost mocy wyjściowej natomiast w części niestabilnej



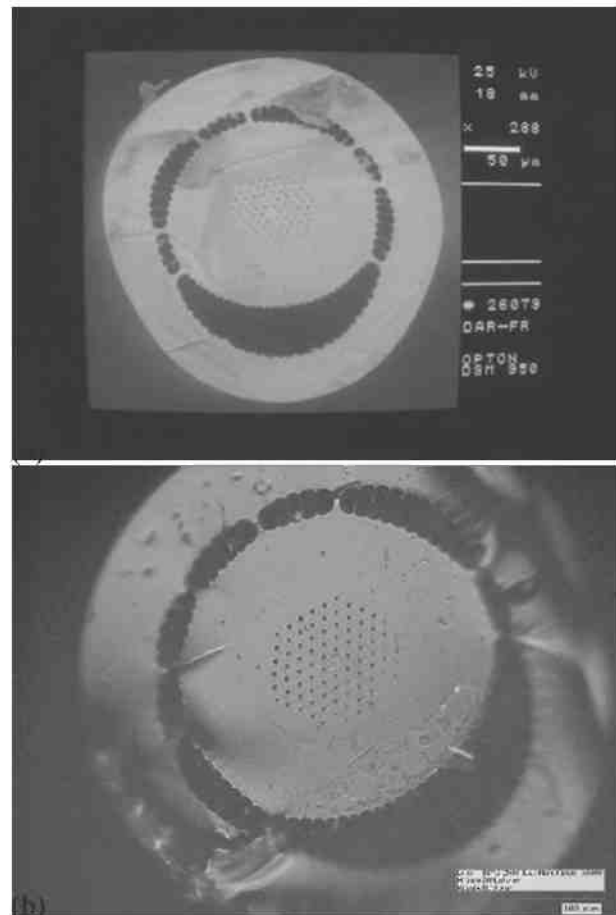
Rys. 9. Charakterystyka mocy wyjściowej lasera włóknowego w funkcji mocy pompy dla włókna nr 2.

Fig. 9. Output power characteristics of the fiber laser as a function of pump power for fiber No. 2.

moc wyjściowa ma charakter nieliniowo malejącej. Akcję laserową uzyskano w trybie pracy q-cw dla warunku zasilania prądem $I = 9$ A z wypełnieniem $t = 35\%$ dla $f = 350$ Hz.

4. ANALIZA WYNIKÓW

Analiza wyników badań dla włókna nr 1 wykazała, że prawdopodobną przyczyną braku generacji są uszkodzenia mechaniczne powstałe w procesie wyciągania. W tym celu przeprowadzono optyczną kontrolę struktury przekroju włókna. Na Rys. 10 przedstawiono zdjęcia dwóch różnych przekrojów poprzecznych włókna, wykonanych po zakończeniu eksperymentów. Obraz z Rys. 10a zarejestrowany został za pomocą mikroskopu elektronowego OSM950 firmy OPTON, natomiast obraz w części 10b zarejestrowano za pomocą mikroskopu cyfrowego KH-7700 firmy Hirox. Z porównania Rys. 1 i 10 wynika, że w badanym włóknie PCF występują



Rys. 10. Przekrój poprzeczny włókna nr 1: a) zdjęcie zarejestrowane mikroskopem elektronowym, b) zdjęcie zarejestrowane mikroskopem cyfrowym firmy Hirox.

Fig. 10. Cross section of fiber No 1: a) picture taken using an electron microscope, b) picture taken using Hirox digital microscope.

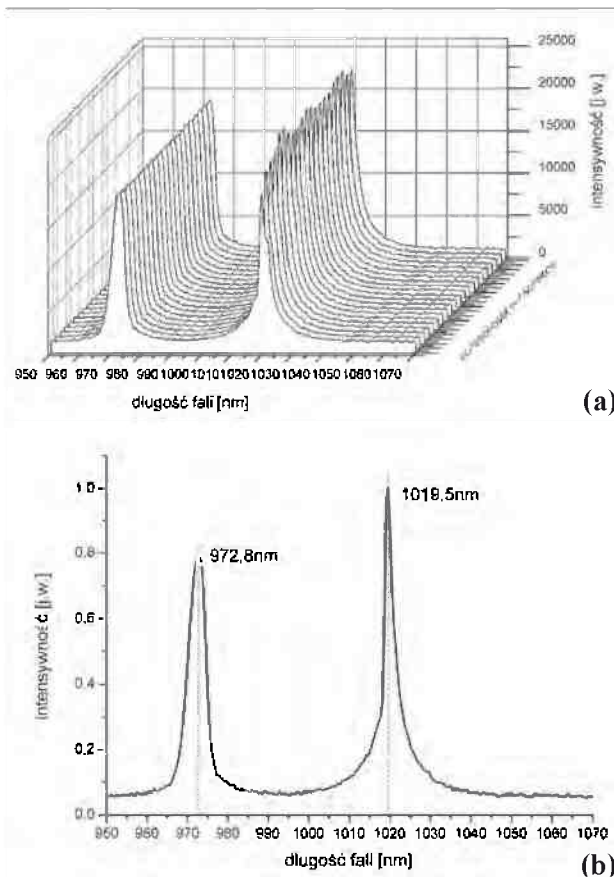
bardzo silne uszkodzenia struktury wewnętrznej. Zewnętrznym objawem uszkodzeń mechanicznych były punkty świetlne emitujące rozproszone promieniowanie lasera pompy, pokazane na Rys. 11. Otrzymane obrazy potwierdzają poprawność wstępnego założenia, że podstawową przyczyną zaburzenia transmisji promieniowania lasera pompującego oraz zmniejszenia sprawności falowodu były zaburzenia struktury włókna, szczególnie widoczne w zewnętrznym płaszczu fonicznym.



Rys. 11. Przykład uszkodzeń w strukturze wewnętrznej włókna PCF. Widoczne jasne punkty na włóknie wyraźnie zaburzają równomierność rozchodzenia się promieniowania pompy.

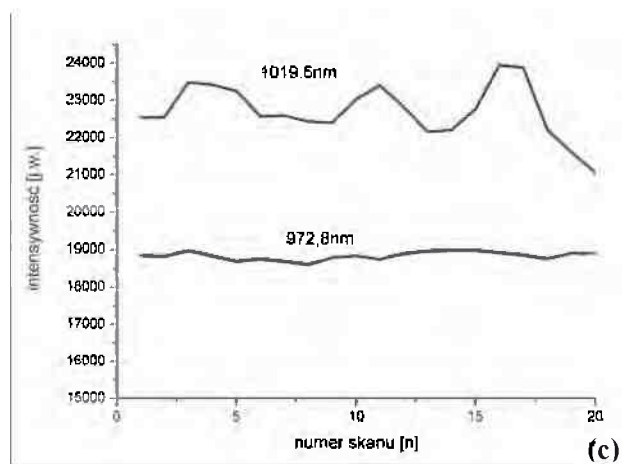
Fig. 11. Example of damage of the internal structure of the PCF fibre. Visible light spots on the fibre clearly disturb the uniformity of the distribution of the pump radiation.

Analiza wyników badań włókna nr 2, bez zaburzeń struktury, przeprowadzana była z punktu widzenia optymalizacji parametrów zasilania w celu uzyskania generacji laserowej. W punkcie 4 przedstawione zostały wyniki w postaci zbiorczych charakterystyk spektralnych, celem uwypuklenia

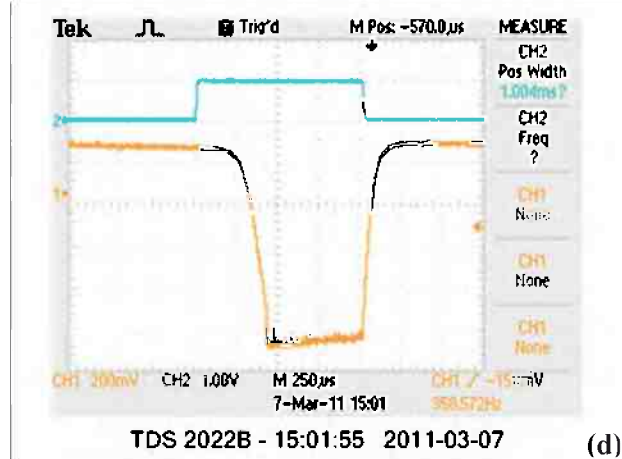


(a)

(b)



(c)



(d)

Rys.12. Przykład analizy charakterystyk widmowych: a) seria dwudziestu obrazów ze spektrometru Hamamatsu, b) wybrana optymalna charakterystyka widmowa, c) charakterystyka dynamiki zmian amplitud intensywności serii dwudziestu obrazów dla maksimum widma promieniowania lasera pompy i promieniowania generacji, d) oscylogram sygnału prądu zasilania lasera pompy (górny) oraz odpowiedź z detektora GM-5 (dolny).

Fig. 12. Example of spectrum characteristics analysis: a) series of twenty images from a spectrometre Hamamatsu, b) selected optimal spectral characteristics, c) characteristics of the dynamics of the amplitude-intensity series of twenty images for the spectral maxima of the pump laser radiation and radiation generation, d) oscillogram of a signal power supply laser pump (top) and the response of a detector GM-5 (lower).

występujących niestabilności pracy układu laserowego podczas przeprowadzania eksperymentów. Elementami składowymi były wybrane, optymalne dla danego warunku pomiarowego, pojedyncze rejestracje charakterystyk spektralnych. Przykładowy obraz dynamiki zmian intensywności amplitudy charakterystyki widmowej promieniowania lasera pompującego i promieniowania emisji wymuszonej z Rys. 8 powstał w wyniku rejestracji serii dwudziestu kolejnych obrazów dla każdej wartości prądu zasilania (Rys. 12a) za pomocą spektrometru firmy

Hamamatsu. Z każdej serii wybierany był optymalny przebieg (Rys. 12b) i dołączany do charakterystyki zbiorczej. Wybór optymalnego przebiegu dokonywany był na podstawie analizy zmian (maksimum) amplitudy intensywności widma dla promieniowania laserowego (Rys. 12c). Dodatkowo każda zmiana stanu pracy lasera włóknowego obserwowana była za pomocą detektora GM-5 i oscyloskopu (Rys. 12d).

5. WNIOSKI

W przeprowadzonych eksperymentach na laboratoryjnym stanowisku lasera włóknowego uzyskano informacje o jakości wytworzonych w ITME włókien PCF w zakresie możliwości uzyskania generacji laserowej. Eksperymenty laserowe zrealizowane zostały w tych samych warunkach technicznych dla obu próbek:

- włókno PCF nr 1 – **wynik negatywny**: nie otrzymano generacji laserowej,
- włókno PCF nr 2 – **wynik pozytywny**- otrzymano generację laserową.

Założonym celem eksperymentu było sprawdzenie jakości wykonania włókna PCF poprzez uzyskanie akcji laserowej. Cel ten został zrealizowany.

Podczas przeprowadzanych eksperymentów odnotowano bardzo silny wpływ stabilizacji temperatury lasera pompującego na otrzymaną sprawność generacji laserowej. Niestabilność generowanej długości fali lasera pompy powodowała zmiany mocy optycznej transmitowanej przez zwierciadło dichroiczne do włókna PCF. Istotnym zagadnieniem był wybór trybu zasilania między cw i q-cw. Zastosowanie trybu q-cw w istotny sposób zmniejszyło wahania temperatury i podnosiło stabilność pracy układu laserowego. Ze względu na występujące przesunięcie widma promieniowania, w kierunku niższych długości fal (o ~ 5 nm), w stosunku do zasilania w trybie cw laser pompujący musiał pracować w wyższej temperaturze. Przy założeniu, że uzyskanie akcji laserowej na włóknie PCF bez

określenia sprawności lasera jest wystarczające, wykazane zastrzeżenia nie mają istotnego znaczenia.

W przyszłych badaniach światłowodów, których celem byłoby uzyskanie maksymalnej możliwej mocy optycznej należy wyposażyć stanowisko eksperymentalne w odpowiednio stabilną aparaturę badawczą oraz zoptymalizować długość włókna PCF.

Opisane eksperymenty wykonane zostały w ramach realizacji pracy statutowej nr 07-1-1022-0 i były pierwszymi, skutecznymi próbami w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. uzyskania akcji laserowej z własnych włókien PCF.

LITERATURA

- [1] Roser F., Jaureui C., Limpert J., Tunnermann A.: 94W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser, *Optics Express*, 16, 22 (2008) 17310-18
- [2] Malinowski M.: Lasery światłowodowe; Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2003
- [3] Zając A., Świdorski J., Konieczny P., Gaęła S.L. Lasery włóknowe, WAT, Warszawa 2007
- [4] Wu R., Myers J.D., Myers M.J.: High power rare-earth-doped phosphate glass fiber and fiber laser, <http://www.kigre.com>
- [5] Franczyk M., Stępień R., Pysz D., Kujawa I., Buczyński R., Jabczyński J.K.: Ytterbium doped phosphate Glass photonic crystal fiber laser, *Opto-Electronics Review*, 17 (3) (2009) 231–235
- [6] Li JianFeng, KaiLiang D., YongZhi L., ZhiYong D., ZhongHua O.: Yb³⁺-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser with 210 W continuous-wave output power, *Chinese Sci. Bull.*, 54 (2009) 3670-3673
- [7] Chun-can Wang, Fan Zhang, Rui Geng, Chu Liu, Ti-gang Ning, Zhi Tong, Shui-sheng Jian: Photonic crystal fiber for fundamental mode operation of multicore fiber lasers and amplifiers, *Optics Communications*, 281 (2008) 5364–5371
- [8] Lee Y. W., Sinha S., Digonnet M. J. F., Byer R.L.: 20 W single-mode Yb³⁺-doped phosphate fiber laser, *Optics Letters*, 31, 22 (2006) 31
- [9] Paschotta R., Nilsson J., Tropper A.C., Hanna D. C.: Ytterbium-doped fiber amplifiers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 33 (1997) 1049-1056