



Poszerzenie widma impulsu laserowego poprzez zastosowanie przewężki dwustronnej na standardowym włóknie jednomodowym

KAROL A. STASIEWICZ, JAROSŁAW MŁYŃCZAK*,
LESZEK R. JAROSZEWICZ, KRZYSZTOF KOPCZYŃSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,
Instytut Fizyki Technicznej,

*Instytut Optoelektroniki, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Praca przedstawia eksperymentalne wyniki poszerzenia impulsu laserowego dużej mocy w standardowych światłowodach telekomunikacyjnych. Poszerzenie uzyskano poprzez wykorzystanie technologii przewężki dwustronnej, której optymalizacja dla danego typu włókna pozwala na sterowanie tak szerokością impulsu jak i składem widmowym wychodzącej wiązki, prowadząc w konsekwencji do generacji światła białego określanej jako efekt „supercontinuum”.

Słowa kluczowe: poszerzenie impulsu, efekt supercontinuum, przewężka światłowodowa, laser impulsowy

Symbole UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost zapotrzebowania na spójne przestrzennie źródła światła dużej mocy charakteryzujące się szerokim widmem, od ultrafioletu, poprzez zakres widzialny, aż po podczerwień. Źródła takie są coraz częściej stosowane w spektroskopii, optycznej tomografii koherentnej lub jako źródła ultrakrótkich impulsów laserowych stosowanych np. w metrologii częstotliwościowej. Efekt poszerzenia widma lasera zwany również efektem „supercontinuum” otrzymuje się poprzez przepuszczenie impulsu laserowego przez odpowiednio ukształtowany ośrodek silnie nieliniowy [1, 2], którym jest włókno fotoniczne lub standardowy światłowód telekomunikacyjny o bardzo małej średnicy rdzenia.

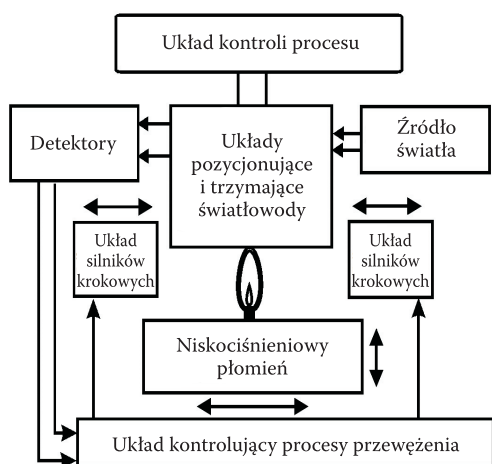
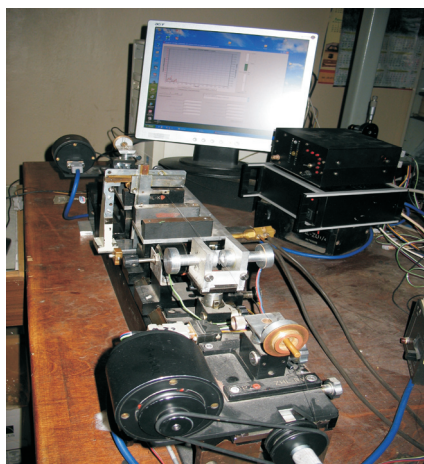
W przypadku zastosowania włókien fotonicznych poszerzenie widma wystąpi ze względu na specyficzną charakterystykę dyspersyjną tych światłowodów (możliwość sterowania położeniem zera dyspersyjnego), która może spowodować nieliniowe oddziaływanie na określonej długości włókna. Jednakże włókna te w dalszym ciągu charakteryzuje duża stratność i wysoka cena, co może mieć istotne znaczenie.

W niniejszym artykule opisane zostały eksperymenty z otrzymaniem poszerzenia widma poprzez propagację impulsu laserowego dużej mocy przez standardowy światłowod jednomodowy, przewężony dwustronnie na zadane średnice. Dzięki odpowiedniemu przewężeniu, uzyskuje się z jednej strony koncentrację mocy optycznej na małym obszarze co prowadzi do wystąpienia efektów nieliniowych, z drugiej zaś dopasowanie dyspersyjnych własności włókna (położenia zera dyspersji grupowej włókna) do uzyskania odpowiednio szerokiej spektralnie wiązki [3].

2. Przewężka światłowodowa i jej typy

Przewężka światłowodowa już od dawna wzbudzała szerokie zainteresowanie jako jeden ze sposobów modyfikacji właściwości propagacyjnych (warunki brzegowe) światłowodów standardowych i fotonicznych. Zastosowanie przewężki umożliwia dowolną zmianę średnicy rdzenia na wybranym odcinku włókna światłowodowego bez konieczności wytwarzania nowych preform i wyciągania całkowicie nowych włókien.

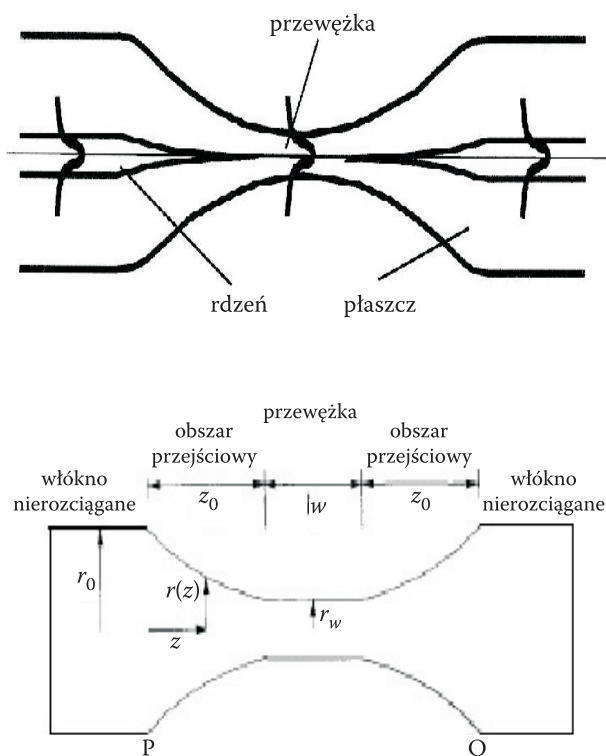
Znajdujące się w Zakładzie Technicznych Zastosowań Fizyki stanowisko technologiczne pokazane na rysunku 1, pozwala na dowolne przewężania włókna w zakresie 0-150 mm. Zasada działania układu bazuje na wyciąganiu włókna pod-



Rys. 1. Widok stanowiska do wytwarzania przewęzek dwustronnych metodą niskociśnieniową

danego podgrzaniu za pomocą niskociśnieniowego palnika tlenowo-propanowego. Prędkością procesu wytwarzania przewężania można sterować za pomocą prędkości ruchu dwu silników krokowych sterujących procesem wyciągania włókna. Stanowisko pozwala na wytwarzanie przewęzek dwustronnych z obszarem adiabatycznym pomiędzy strefą przewężaną a strukturą światłowodu nieprzewężanego, zaś jedną z głównych zalet tego stanowiska jest możliwość przewężania wszystkich rodzajów włókien. Stanowisko to pozwala również na wytwarzanie złożonych elementów, takich jak sprzęgacze, polaryzatory itp.

Wykonana na powyższym stanowisku przewężka stanowi miejscowe zmniejszenie średnicy włókna i zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2 zawiera dwa zasadnicze obszary: obszar przewężenia o długości l_w i zredukowanej średnicy $2r_w$ otoczony z dwu stron obszarem przejściowym o długości z_0 , którego średnica monotonnie maleje od średnicy włókna $2r_0$ do średnicy przewężenia $2r_w$.

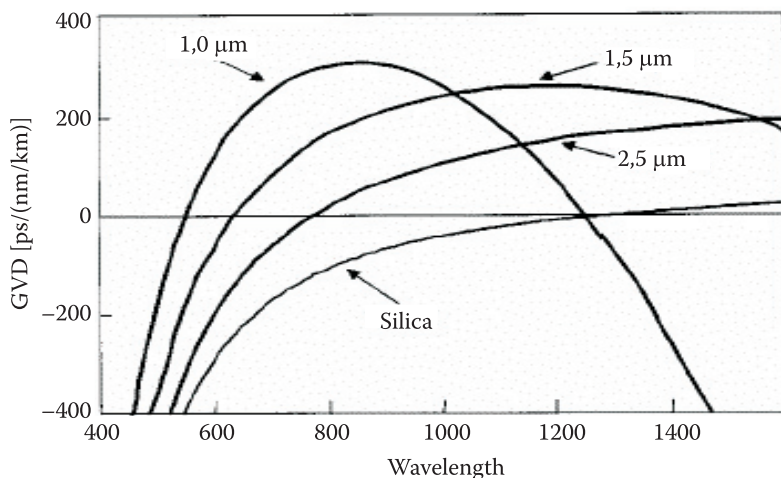


Rys. 2. Schemat pokazujący podstawowe segmenty wytwarzanej przewężki [2]. Parametry: r_0 — promień nierozciągniętego włókna, r_w — promień przewężki, l_w — długość obszaru przewężenia, z_0 — długość obszaru przejściowego, $r(z)$ — malejący promień obszaru przejściowego

Do badań nad poszerzeniem impulsu przechodzącego przez światłowód wytworzono trzy rodzaje przewęzek:

- przewężkę punktową — uzyskaną poprzez nieruchome umieszczenie palnika bezpośrednio pod przewężanym włóknem. Wytworzona tą drogą przewężka charakteryzuje się długimi strefami przejściowymi i bardzo krótkim obszarem przewężenia o długości l_w zależnej od szerokości palnika. Metoda ta pozwala na szybkie przewężenie włókna do kilku lub kilkunastu μm . Wadą tak powstałych przewężeń jest ich niewielka wytrzymałość na uszkodzenia mechaniczne,
- przewężkę na zadanej długości — uzyskaną poprzez ruch palnika „tam i z powrotem” na zadanej z góry długości włókna. Powstała przewężka charakteryzuje się długim i równomiernym obszarem przewężenia l_w , a także dość długimi strefami przejściowymi, które umożliwiają adiabaticzne przejście pomiędzy nie rozciągającym włóknem a obszarem przewężki właściwej,
- przewężkę na zwiększonym obszarze grzania — zakres ruchu palnika zwiększa się wraz z procesem wyciągania. W metodzie tej podgrzewany jest zawsze ten sam obszar włókna, co znacznie przyspiesza proces wyciągania oraz pozwala na osiągnięcie przewężki o niewielkiej średnicy na znacznym odcinku. Wyciąganie to odbywa się jednak kosztem krótszego obszaru przejściowego [4].

Jak wspomniano we wstępie, proces przewężania pozwala nam na kontrolowanie położenia zera dyspersji grupowej (GVD). Pompowanie włókna laserem o długości wiązki zgodnej co do zera dyspersyjnego ułatwia uzyskanie efektu poszerzenia widma. Na rysunku 3 pokazano zasymulowane zmiany położenia GVD

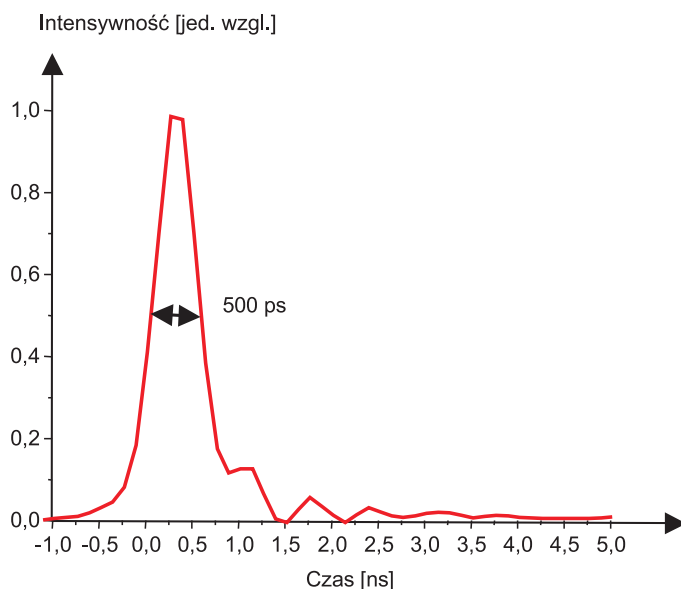


Rys. 3. Symulacja przesunięcia zera dyspersyjnego odpowiadającego procesowi przewężania [1, 5]

w zależności od zmiany średnicy rdzenia [1, 5]. Jak można zauważyć, proces przewężania przesuwa położenie zera dyspersyjnego w stronę fal krótszych do zakresu widzialnego. Przy znacznym przewężeniu $< 1,5 \mu\text{m}$ można zauważyć powstanie dwóch zer dyspersyjnych dla zakresu widzialnego i podczerwieni.

3. Efekt poszerzenia widma

W tym rozdziale przedstawimy wyniki eksperymentalnych badań efektu supercontinuum na bazie przewężenia włókna jednomodowego dla długości fali $1,31 \mu\text{m}$ o średnicy początkowej rdzenia około $9 \mu\text{m}$. W badaniach, jako źródło promieniowania pompującego 532 nm , wykorzystano system laserowy pracujący w układzie MOPA z konwersją częstotliwości na drugą harmoniczną. Jako główny oscylator został wykorzystany laser NanoLase, generujący impulsy promieniowania 1064 nm o czasie trwania $0,6 \text{ ns}$ i energii 61 uJ z częstotliwością 1 kHz . Kształt oraz czas trwania impulsu (FWHM) zmierzony za pomocą szybkiej fotodiody ET3000 oraz oscyloskopu Agilent $1,5 \text{ GHz}$ jest przedstawiony na rysunku 4.



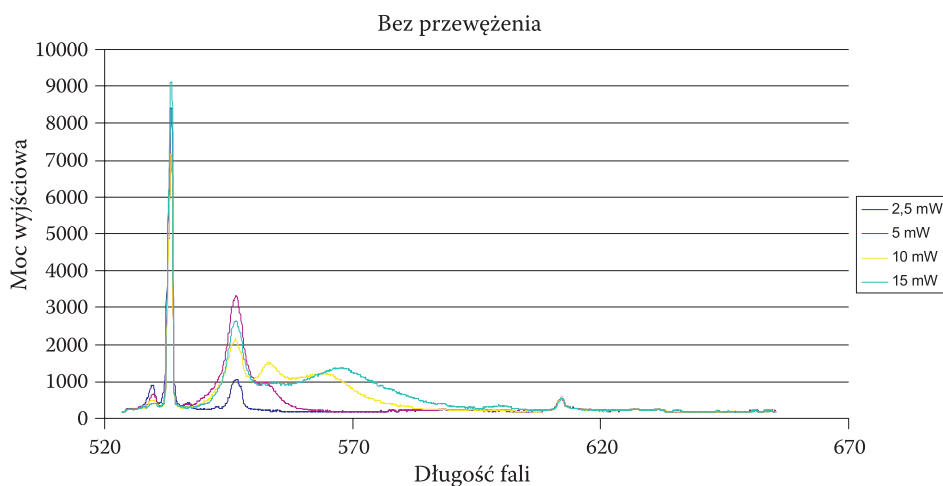
Rys. 4. Kształt impulsu na wyjściu oscylatora zmierzony za pomocą szybkiej fotodiody ET3000

W celu wzmocnienia energii w impulsie wiązka laserowa z głównego oscylatora była kierowana na wzmacniacz, którym był kryształ Nd:YVO_4 o wymiarach $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$ i koncentracji domieszki $0,1\%$. Do pompowania wzmacniacza została użyta dioda laserowa JOLD-120-QPXF-2P firmy JenOptik z wyjściem światło-

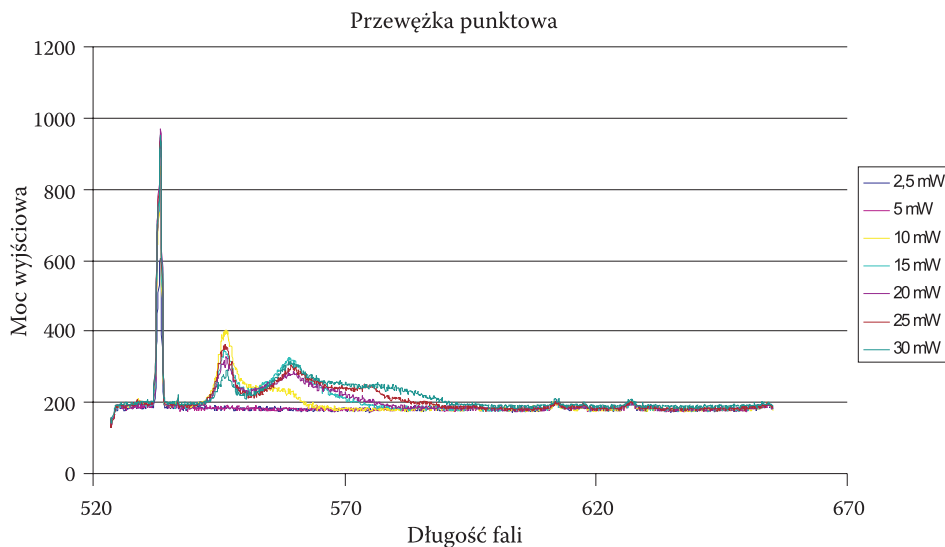
wodowym. Czoło światłowodu diody pompującej było bezpośrednio zbliżone do kryształu bez żadnego układu optycznego, zapewniając duży obszar wzmacniający (średnica 600 μm) w kryształach. Przed wejściem wiązki laserowej do wzmacniacza, jej średnica była zwiększana za pomocą soczewki o ogniskowej 300 mm do średnicy 650-700 μm , dobrze pasującej do średnicy obszaru wzmacniającego (600 μm). W wyniku czterokrotnego przejścia promieniowania z głównego oscylatora przez kryształ wzmacniający uzyskano impulsy o energii ok. 1 mJ. Wiązka laserowa charakteryzowała się tu parametrem M^2 równym 1,17, co oznacza, że dobrze nadaje się do konwersji częstotliwości. Generacja drugiej harmonicznej odbywała się w kryształach KTP o długości 15 mm z pokryciami antyrefleksyjnymi dla długości fal 1064 i 532 nm. Kryształ ten był umocowany w uchwycie z miedzi w celu kontroli temperatury. Przed kryształem KTP umieszczono półfalówkę w celu regulacji polaryzacji promieniowania 1064 nm. Sprawność konwersji sięgała powyżej 50%.

Do pomiaru widma promieniowania używano spektrometru SpectraPro-300i firmy Action Research Corporation z rozdzielczością pomiarową 0,1 nm.

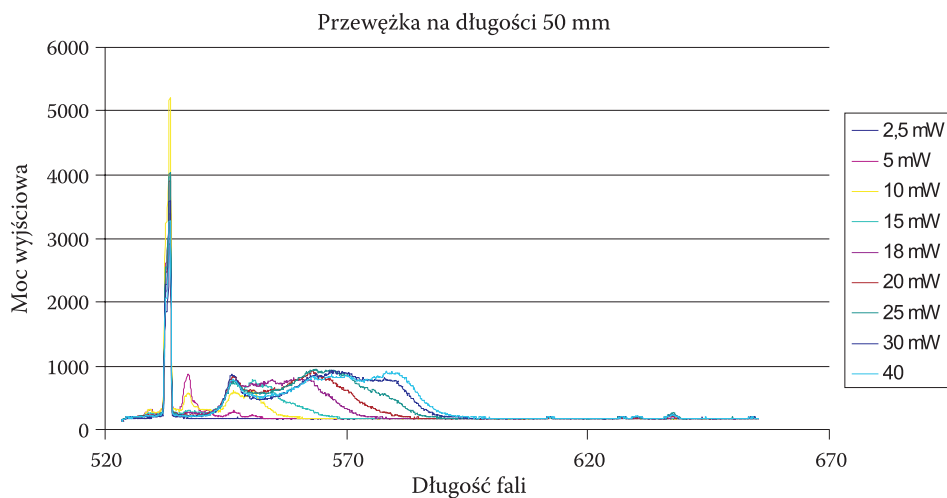
Przebadane zostały cztery próbki światłowodu: odcinek włókna standardowego bez przewężenia, włókno z przewężką punktową na długość 6 mm, włókno z przewężką na zadanej długości 50 mm na odległość 15,6 mm oraz włókno z przewężką o zwiększonym obszarze grzania na długość 7,5 mm. Poniżej na rysunkach 5-8, przedstawiono wyniki porównawcze dla wszystkich mierzonych włókien oraz wartości średniej mocy źródła od ok. 2,5 mW do około 50 mW.



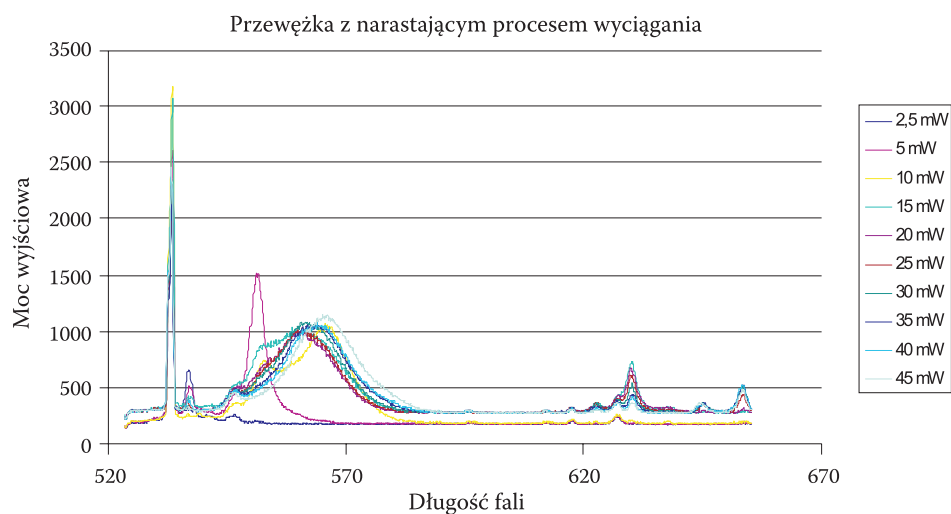
Rys. 5. Poszerzenie impulsu dla włókna nieprzewężonego



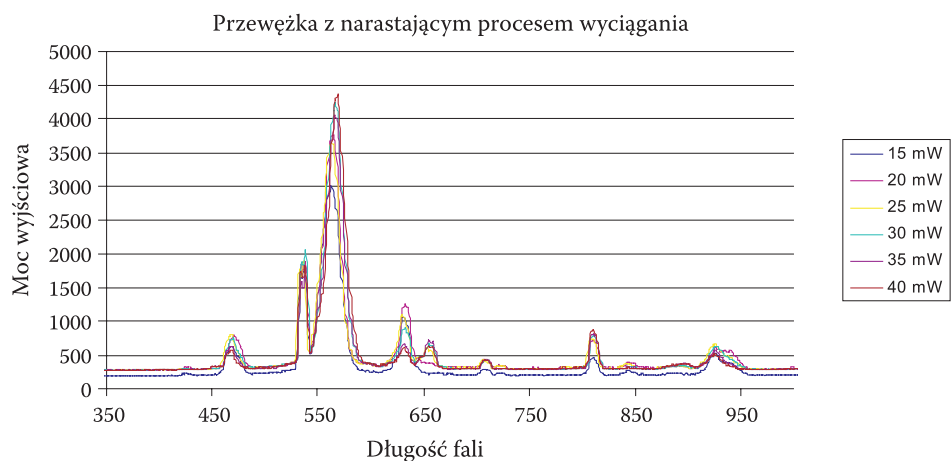
Rys. 6. Wyniki poszerzenia impulsu dla przewężki punktowej wyciągniętej na długość 6 mm



Rys. 7. Poszerzenie impulsu dla przewężki światłowodowej wyciąganej na zadanej długości 50 mm o długość 16 mm



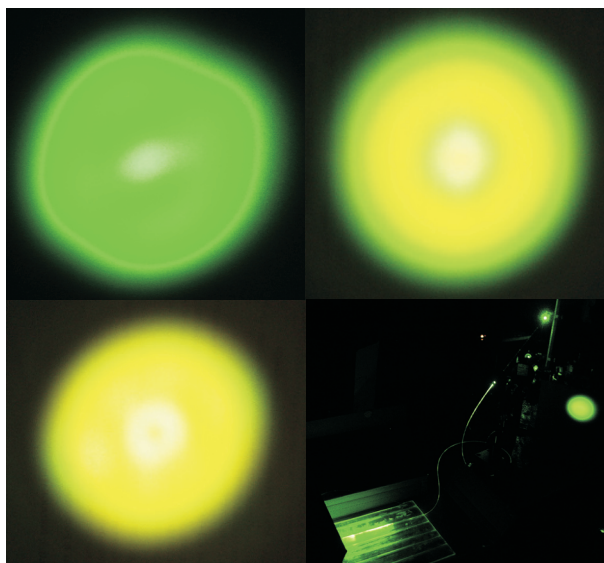
Rys. 8a. Poszerzenie impulsu dla przewężki ze zwiększonym obszarem grzania do wielkości 7,5 mm (zakres spektrometru do 700 nm)



Rys. 8b. Poszerzenie impulsu dla przewężki ze zwiększonym obszarem grzania do wielkości 7,5 mm (zakres spektrometru do 1000 nm)

Poszerzenie impulsu spowodowane jest występowaniem efektu Ramana, który charakteryzuje się powstaniem kolejnych pików w zależności od budowy materiału nieliniowego (w naszym przypadku rdzenia światłowodu po przewężeniu otoczonego powietrzem). Na wszystkich wykresach widoczne jest jednostronne poszerzenie impulsu (w zakresie fal dłuższych), co może oznaczać, że sprawność powstawania pików w zakresie fal krótszych jest znacznie ograniczona ze względu na właściwości nieliniowe ośrodka.

Jak można zauważyć z analizy uzyskanych rozkładów widmowych, pompowanie włókna z przewężkami prowadzi do poszerzenia zakresu widmowego, co obserwowane jest jako zmiana barwy wiązki wyjściowej w funkcji mocy pompy (patrz rys. 9).



Rys. 9. Zarejestrowane zmiany barwy na wyjściu ze światłowodu w polu dalekim dla różnych mocy pompujących

Należy zaznaczyć, że wpływ na stopień poszerzenia widmowego wiązki impulsu laserowego ma także jakość wprowadzenia wiązki do rdzenia światłowodu oraz straty powstałe w wyniku przewężania włókna. Szczególnie widoczne jest to dla przewężania punktowego (rys. 6), gdzie poszerzenie jest najslabsze, lecz w tym wypadku także całkowita moc na wyjściu jest niewielka w porównaniu z innymi wynikami, co może być związane z niewłaściwym wprowadzeniem oraz dużymi stratami na samej przewężce.

Obserwowane na rysunku 5 poszerzenie impulsu dla włókna nieprzewężonego spowodowane jest dużą mocą wprowadzaną do niewielkiego rdzenia o średnicy rzędu około 9 μm .

Najbardziej płaska charakterystyka powstała dla przewężki wyciąganej na stałym odcinku 50 mm. Wraz ze wzrostem pompowanej mocy następuje rozszerzenie widma w stronę fal dłuższych.

Dla przewężenia o zwiększonym obszarze grzania zaobserwowaliśmy także powstanie dodatkowych pików dla fal 950 nm. Pik dla 808 nm pochodzi od diody pompującej.

4. Podsumowanie

Jak można zauważyć, zastosowanie przewężki światłowodowej wraz z zastosowaniem impulsowego źródła laserowego zmienia zakres spektralny, prowadząc do poszerzenia widma. Z powyższej analizy można wywnioskować, że najlepiej na poszerzenie impulsu wpływa przewężenie powstałe w skutek podgrzewania dość długiego odcinka i wyciągania go. Dla tego przypadku możemy zaobserwować powstanie widma o dość płaskim charakterze pod względem mocy. Wraz ze zwiększaniem mocy lasera pompującego dane włókno, widoczne było stopniowe rozszerzenie widma w stronę dłuższych fal bez gwałtownych i przypadkowych zmian mocy dla długości początkowych. Teoretycznie najlepsze poszerzenie widma powinno się osiągnąć dla długości stałego przewężenia około 100 mm, co będzie zakresem dalszych prac badawczych.

Podczas badań można było zauważyć, że znaczny wpływ na otrzymanywane wyniki miał sposób wprowadzenia wiązki do włókna. Dostępne urządzenia pozwalające na prawidłowe wprowadzenie wiązki z lasera do włókna zależne są w dużej mierze od czynnika ludzkiego (umiejętności, dokładności i doświadczenia osoby przeprowadzającej wiązkę), co przy średnicy rzędu 9 μm nawet przy niewielkim odchyleniu może znacząco wpływać na otrzymane wyniki. Kolejnym czynnikiem, który miał wpływ na wyniki końcowe były straty spowodowane procesem przewężania (wraz ze zmniejszaniem średnicy część energii wydostawała się poza włókno, co można zauważyć na rysunku 9 — świecenie się okolic przewężki). Dodatkowym mankamentem była konieczność użycia około 1-1,5 m włókna na wyjściu, zarówno przed, jak i za przewężką w celu swobodnego wprowadzenia wiązki oraz podłączenia badanego włókna do analizatora, co mogło wpływać na zwiększenie strat tłumienia dla niektórych długości. Duży wpływ na jakość wyników miało także zastosowanie włókna o zerze dyspersyjnym nieodpowiadającym długości fali pompującej (532 nm). Proces przewężania, który przesuwają zero dyspersyjne w stronę fal krótszych był niewystarczający, aby osiągnąć średnicę około 1 μm , tak przewężone włókno podatne byłoby na uszkodzenia mechaniczne, a szczególnie na wstrząsy w trakcie transportu przewęzek.

W dalszym etapie prac planuje się wprowadzenie do powyższych włókien wiązki z lasera impulsowego o długości 1064 nm.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.11.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2007 r.

LITERATURA

- [1] W. J. WADSWORTH, A. ORTIGOSA-BLANCH, J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, T. P. M. MAN, P. ST. J. RUSSELL, *Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source*, J. Opt. Soc. Am. B., 19, 2002, 2148-2155.

- [2] T. A. BIRKS, Y. W. LI, *The shape of fiber tapers*, J. of Lightwave Techn., 10, 1992, 432-438.
- [3] L. R. JAROSZEWICZ, R. ŚWIŁŁO, Z. KRAJEWSKI, P. MARĆ, *Technological set-up for TAPER type fiber-optic elements manufacturing*, Optoelektronika 2003 — Oferta Nauki Polskiej dla Przemysłu, 11-12.06, Poznań, 2003, 94-96.
- [4] S. G. LEON-SAVAL, T. A. BIRKS, W. J. WADSWORTH, P. RUSSEL, *Supercontinuum generation in submicron fiber waveguides*, Optics Express, 12, 2004, 2864-2869.
- [5] W. J. WADSWORTH, T. A. BIRKS, P. ST. J. RUSSELL, *Supercontinuum generation in tapered fibers*, Opt. Lett., 25, 2000, 1415-1417.
- [6] G. HUMBERT, W. J. WADSWORTH, S. G. LEON-SAVAL, J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, P. ST. J. RUSSEL, *Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fibre*, Optic Express, 14, no. 4, 2006.

K. A. STASIEWICZ, J. MŁYŃCZAK, L. R. JAROSZEWICZ, K. KOPCZYŃSKI

Broadening of a pulse laser spectrum obtained by biconical taper on a standard single mode optical fiber

Abstract. The paper describes the results of a laser pulse broadening in tapered standard single mode fiber. Additional description of a set-up for taper manufacturing, with a principle of its operation, based on elongation procedure of fiber-optics in a low-pressure gas burner, is also presented. A virtue of such a set-up is the possibility of different kinds of taper manufacturing, like punctual, long distance on regular or increasing distance. Tapering process allows us to change a diameter of an optical fiber what means boundary condition changes, beam is propagating in a core (made from silica) surrounded by air. There is a large refractive index step between these two media, allowing for confined pulse (with high power) in a very small area. This effect causes increasing intensity of a propagated beam and amplifies nonlinear effects, like self-phase modulation etc.

The article presents the results of pulse broadening obtained in different tapers, made on a single-mode fiber for a wavelength of 1310 nm and a core diameter of about 9 μm . As a light source, the pumped laser operated at a wavelength of 532 nm, which emitted the pulses of 0.6 ns with a repetition rate of about 1 kHz, has been used. All the measured fibers with a taper have a length of about 3 m, where about 1.2 m was for the input (for easier launching) and the output (for easier connection with an optical spectrum analyzer).

Experimental results show the pulse broadening in the used taper structures. The best results are obtained for a long distance taper, where the elongated part was about 50 mm (flame brush is travelling to and from along the constant length). For this taper, it can be observed more flat spectrum broadening to the longer wavelength, together with increasing average power of a laser. Theoretically, the best broadening we should obtain for a taper length of about 100 mm what will be one of the next subjects of our research.

Other tapers also cause broadening effects but their spectra are not so flat. Interesting example is a taper with an increasing length of elongation. We observed additional spectral 'pick' at the wavelength of about 630 nm and 950 nm. These picks are connected with the smaller core diameter obtained in this type of tapering process (the smaller core, the larger broadening).

The worst results were for a punctual taper. In this case, a diameter of a taper is very small (about several micrometers) but the losses are very high.

The presented results show that biconical tapered standard single mode optical fiber is a good way to obtain spectral broadening (supercontinuum effect).

Keywords: broadening of a pulse, supercontinuum generation, optical fiber taper, pulse laser

Universal Decimal Classification: 621.375.826