



## Światłowodowy iterbowy wzmacniacz impulsów promieniowania o nanosekundowym czasie trwania

JACEK ŚWIDERSKI, MAREK SKÓRCZAKOWSKI,  
DOMINIK DOROSZ<sup>1</sup>, WIESŁAW PICHOLA

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

<sup>1</sup>Politechnika Białostocka, Katedra Promieniowania Optycznego,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45

**Streszczenie.** Opracowano nowoczesny układ laserowy: diodowy generator zadający — włóknowy wzmacniacz mocy w wersji dwukaskadowej. Jako generator zadający zastosowano jednomodową impulsową diodę laserową generującą promieniowanie o długości fali 1064 nm, natomiast jako ośrodki wzmacniające wykorzystano włókna dwupłaszczkowe domieszkowane iterbem, pompowane promieniowaniem diod laserowych o długości fali 976 nm. Opracowany układ generował impulsy promieniowania o czasie trwania z przedziału 8,5-250 ns przy częstotliwości repetycji od 50 kHz do 500 kHz. Moc średnia na wyjściu układu wynosiła max. 22 W.

**Słowa kluczowe:** wzmacniacz światłowodowy, aktywne włókno dwupłaszczkowe, generacja impulsowa

**Symbole UKD:** 535,8:: 621.39

### 1. Wstęp

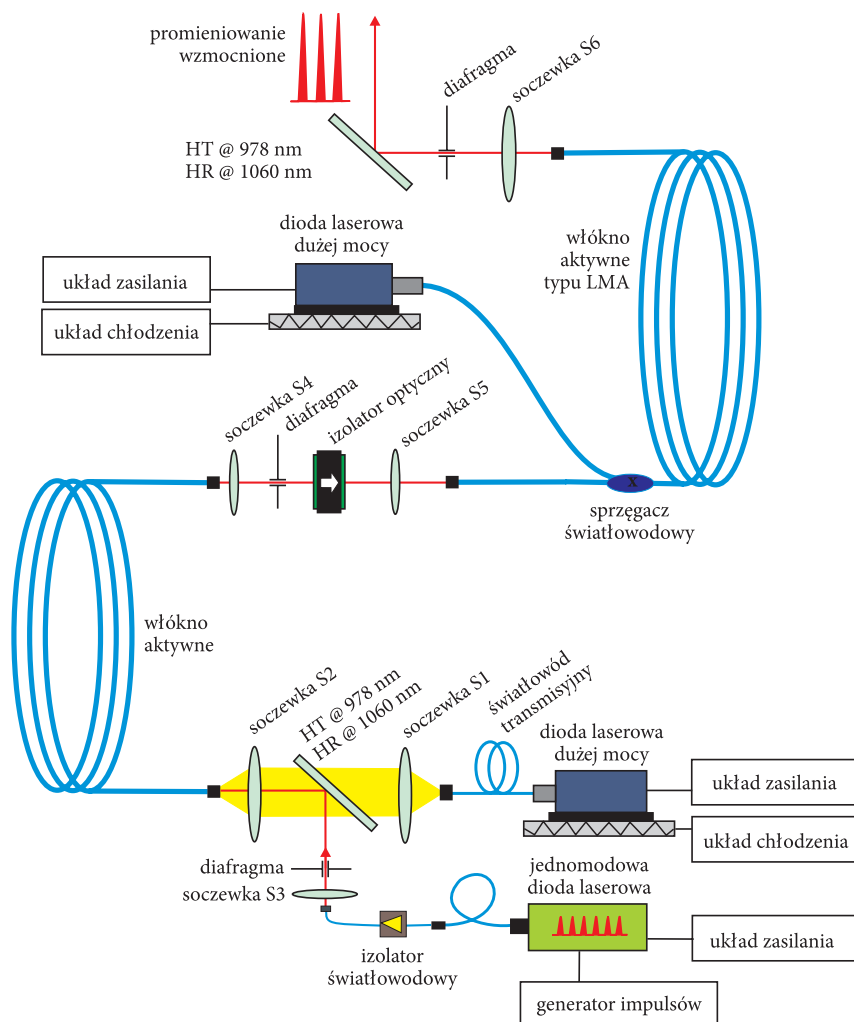
Lasery impulsowe generujące impulsy promieniowania o nanosekundowym czasie trwania i o wysokiej mocy szczytowej przy częstotliwości repetycji rzędu kHz stanowią bardzo użyteczne źródła dla ciągle szybko rosnącej liczby zaawansowanych aplikacji przemysłowych tychże urządzeń (np. znakowanie, grawerowanie materiałów) [1]. Obecnie ten obszar zastosowań jest jeszcze zdominowany przez konwencjonalne lasery ciała stałego o modulowanej dobroci pracujące na długości fali 1064 nm lub jej harmonicznym. Modulacja dobroci rezonatora lasera umożliwia

pracę impulsową oraz pozwala kontrolować częstotliwość repetycji generowanego ciągu impulsów, jak również ich moc szczytową — poprzez odpowiednie dobranie prędkości pompowania oraz częstotliwości przełączania strat dodatkowych rezonatora. Parametrem trudnym do kontroli pozostaje czas trwania generowanego impulsu — zdeterminowany konstrukcją samego rezonatora lasera. Problem ten nie występuje w układach MOPFA (*Master Oscillator Power Fiber Amplifier*) [2]. W konstrukcji tej proponuje się użycie impulsowej jednomodowej diody laserowej pełniącej rolę generatora zadającego impulsy promieniowania kształtowane za pomocą elektronicznego sterownika. Czas trwania takich impulsów może być regulowany w sposób płynny w przedziale od kilku ns do kilkuset ns z częstotliwością repetycji dochodzącą nawet do 1 MHz. Natomiast architektura ośrodka wzmacniającego (włókna aktywnego) pozwala na uzyskanie doskonałej jakości wiązki laserowej — z powodu zamknięcia modu laserowego wewnątrz konstrukcji światłowodu aktywnego. Mod laserowy wszystkich innych laserów ciała stałego zależy od wzajemnego przekrycia objętości wzbudzonego ośrodka i objętości modu laserowego. Ponadto, zmiany mocy pompy lub energii ekstrakcji skutkują różnym obciążeniem cieplnym ośrodka laserowego, powodując zmiany ogniskowej soczewki termicznej ośrodka czynnego, co w rezultacie może wpływać na zmianę parametrów generowanego promieniowania. W tej sytuacji zastąpienie laserów z Q-modulacją wysokosprawnymi układami MOPFA wydaje się idealnym rozwiązaniem.

## 2. Opis układu

Układy MOPFA zrealizowano zgodnie z koncepcją przedstawioną na rysunku 1.

Jako źródła promieniowania podawanego na wejście wzmacniacza użyto jednomodowej diody półprzewodnikowej PSL10 generującej impulsy promieniowania o długości fali 1064 nm z przedziału 8,5-250 ns przy częstotliwości repetycji do 500 kHz. Generator ten pracował jako elektryczno-optyczny konwerter sygnału o szerokości pasma ok. 175 MHz. Oznacza to, że każdy elektryczny sygnał wejściowy był przekształcany na odpowiednik w postaci wyjściowego sygnału optycznego w granicach ww. pasma, pozwalając tym samym na formowanie kształtu impulsów wyjściowych. Generator ten dodatkowo wyposażony został w układy elektroniczne pozwalające na kontrolę napięcia polaryzacji (bias) oraz temperatury. Cały układ zasilany był napięciem DC o wartości 7,5 V i sterowany za pomocą generatora impulsów (SRS DG 535). Promieniowanie to po przejściu przez układ izolatora światłowodowego (OFR, IO-J-1064) oraz układ formowania wiązki (soczewka S3 i S2) wprowadzane było do rdzenia włókna aktywnego domieszkowanego iterbem (średnica rdzenia — 8  $\mu\text{m}$ , NA rdzeń-płaszcz wew. — 0,11, wymiary płaszczka wew. —  $180 \times 240 \mu\text{m}^2$ , NA płaszcz wew.-płaszcz zewn. — 0,45). Włókno to pompowane było od czoła promieniowaniem o długości fali 976 nm generowanym przez diodę laserową



Rys. 1. Schemat wzmacniacza włóknowego w wersji dwukaskadowej

ciągłego działania (moc max. 45 W, wyjście światłowodowe:  $\varphi = 400 \mu\text{m}$ , 0,22 NA). Celem pierwszego stopnia wzmocnienia było wzmocnienie sygnału zadanego do poziomu odpowiadającego mocy/energii nasycenia ośrodka aktywnego stanowiącego kolejny stopień mocy. Promieniowanie po wzmocnieniu i przejściu przez izolator optyczny oraz układ formowania wiązki laserowej (soczewka S4 i S5) wprowadzane było do włókna aktywnego typu Large Mode Area, domieszkowanego jonami Yb (średnica rdzenia — 20  $\mu\text{m}$ , NA rdzeń–płaszcz wew. — 0,6, średnica płaszcz wew. — 400  $\mu\text{m}^2$  (ośmiokąt), NA płaszcz wew.–płaszcz zewn. — 0,46).

Włókno to pompowane było z wykorzystaniem sprzęgacza światłowodowego  $2 \times 1$ . Jako pompę użyto diody laserowej generującej max. 45 W mocy ciągłej ( $\lambda = 976$  nm) wyposażonej w światłowód transmisyjny ( $\varphi = 400$   $\mu\text{m}$ , 0,22 NA). Sygnał po wzmocnieniu kolimowany był za pomocą soczewki S6 (EFL = 7,5 mm, 0,3 NA). Celem separacji wiązki wzmocnionej od wiązki niezaabsorbowanego promieniowania pompy użyto zwierciadła dichroicznego (HT @ 976 nm, HR @ 1060 nm) usytuowanego pod kątem 45 stopni.

### 3. Wyniki pomiarów

W układzie wzmacniacza światłowodowego w konfiguracji MOPFA (rys. 1) dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych, czasowych i widmowych wzmoczonego promieniowania. Pomiaru charakterystyk energetycznych dokonano dla trzech wartości częstotliwości repetycji (500 kHz, 100 kHz i 50 kHz) oraz kilku wartości czasu trwania impulsu (z przedziału 8,5-250 ns). Wybrane wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunkach 2-3.

Pomiary zaczęto przeprowadzać, zaczynając od rejestracji osiągniętych parametrów układu pracującego przy najwyższych stosowanych wartościach częstotliwości repetycji (od 500 kHz w dół) oraz najdłuższych czasach trwania impulsów wzmacnianych (od 250 ns w dół dla danej częstotliwości). Maksymalna stosowana wartość mocy pompy wprowadzonej do drugiej kaskady układu MOPFA wynosiła 37,6 W. Aby nie obciążać nadmiernie pompującej diody laserowej, nie pracowano przy wyższych mocach. Dla częstotliwości 50 kHz dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych i czasowych (tylko dla impulsów o czasie trwania 250 ns, 100 ns i 50 ns). Przy próbie przeprowadzenia dalszych pomiarów nastąpiło uszkodzenie włókna aktywnego, co spowodowało, że badania były niemożliwe.

Diodowy generator impulsów pozwalał na uzyskanie na jego wyjściu mocy średniej w zakresie do ok. 28 mW, w zależności od reżimu pracy. Dla porównania rozpatrzmy dwa skrajne przypadki: (1) dla częstotliwości repetycji 500 kHz i czasu trwania 250 ns uzyskano moc średnią generowanych impulsów wynoszącą 28,18 mW, co odpowiadało energii impulsu 56,4 nJ i mocy szczytowej 0,23 W; dla częstotliwości repetycji 10 kHz i tego samego czasu trwania impulsu moc średnia wynosiła 1,73 mW, co odpowiadało energii impulsu 188 nJ i mocy szczytowej 0,75 W; (2) dla częstotliwości repetycji 500 kHz i najkrótszego czasu trwania impulsu 8,5 ns uzyskano moc średnią generowanych impulsów wynoszącą 2,87 mW, co odpowiadało energii impulsu 5,7 nJ i mocy szczytowej 0,67 W; dla częstotliwości repetycji 10 kHz i tego samego czasu trwania impulsu moc średnia wynosiła 0,29 mW, co odpowiadało energii impulsu 29 nJ i mocy szczytowej 3,4 W.

TABELA 1

Zestawienie wartości parametrów wzmacnionych impulsów dla mocy pompy 37,6 W  
( $P_{sr}$  — wyjściowa moc średnia,  $E_i$  — energia impulsu,  $P_{sz}$  — moc szczytowa impulsu)

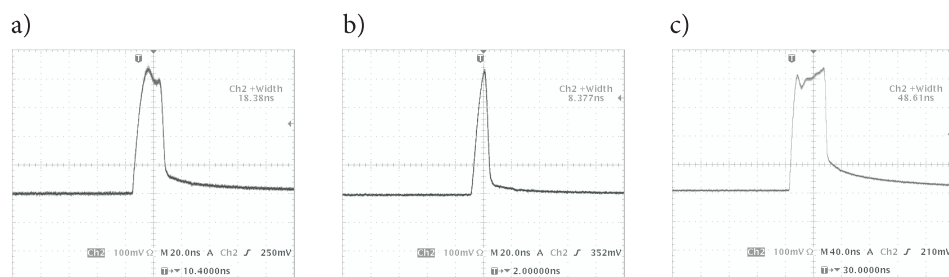
		500 kHz	100 kHz	50 kHz
250 ns	$P_{sr}$ [W]	22,01	20,90	19,00
	$E_i$ [ $\mu$ J]	44,02	209,00	380,00
	$P_{sz}$ [W]	176,08	836,00	1 520,00
100 ns	$P_{sr}$ [W]	21,30	20,45	18,40
	$E_i$ [ $\mu$ J]	42,60	204,50	368,00
	$P_{sz}$ [W]	426,00	2045,	8 680,00
50 ns	$P_{sr}$ [W]	20,63	19,98	17,82
	$E_i$ [ $\mu$ J]	41,26	199,80	356,40
	$P_{sz}$ [W]	825,20	3 396,00	7 128,00
20 ns	$P_{sr}$ [W]	20,40	19,70	–
	$E_i$ [ $\mu$ J]	40,80	197,00	–
	$P_{sz}$ [W]	2 040,00	9 850,00	–
8,5 ns	$P_{sr}$ [W]	20,14	19,38	–
	$E_i$ [ $\mu$ J]	40,28	193,80	–
	$P_{sz}$ [W]	4 738,82	22 800,00	–

Moc nasycenia ośrodka aktywnego pierwszej kaskady układu MOPFA wynosiła ok. 50 mW, zatem poziom mocy średnich generowanych przez impulsową diodę laserową nie był wystarczający do optymalnej pracy tego stopnia wzmacnienia — zwłaszcza przy generacji najkrótszych impulsów i pracy przy najniższych wartościach częstotliwości repetycji. Promieniowanie po przejściu pierwszego stopnia wzmacnienia wzmacniane było do poziomu odpowiadającego szacunkowej mocy nasycenia ośrodka aktywnego drugiej kaskady (0,3-0,4 W). Poziom osiąganą mocy wyjściowej po pierwszej kaskadzie determinowany był ponadto obecnością wzmacnionej emisji satanicznej ASE obserwowanej w postaci poszerzania się widma generacji. Obecność sygnału ASE w wiązce wzmacnianej determinowała poziom mocy wyjściowej pierwszego stopnia wzmacnienia. Dla impulsów najkrótszych generowanych przy niższych wartościach częstotliwości repetycji poziom mocy średniej po pierwszej kaskadzie był nawet do kilku razy niższy w stosunku do mocy nasycenia ośrodka aktywnego drugiej kaskady — stąd też osiągnane wartości sprawności dla tych przypadków były niższe.

Dla przypadku, gdy moc sygnału podawanego na wejście drugiej kaskady wynosiła 0,4 W, dla mocy pompy wprowadzonej do włókna 37,6 W i częstotliwości repetycji 500 kHz uzyskano wyjściową moc średnią 22,01 W dla impulsów o czasie trwania 250 ns oraz 20,14 dla impulsów o czasie trwania 8,5 ns. Analogicznych pomiarów dokonano dla częstotliwości repetycji 100 kHz oraz 50 kHz. Uzyskane wartości parametrów wzmocnionych impulsów zestawiono w tabeli 1. Tutaj dla porównania przy 50 kHz i impulsach o czasie trwania 250 ns uzyskano 19 W mocy średniej, co odpowiadało mocy szczytowej 1,52 kW, natomiast dla impulsów o czasie trwania 50 ns uzyskano 17,2 W mocy średniej (moc szczytowa impulsu – 7,13 kW). Dla częstotliwości pracy 100 kHz i impulsów o czasie trwania 8,5 ns uzyskano moc szczytową w impulsie wynoszącą 22,8 kW.

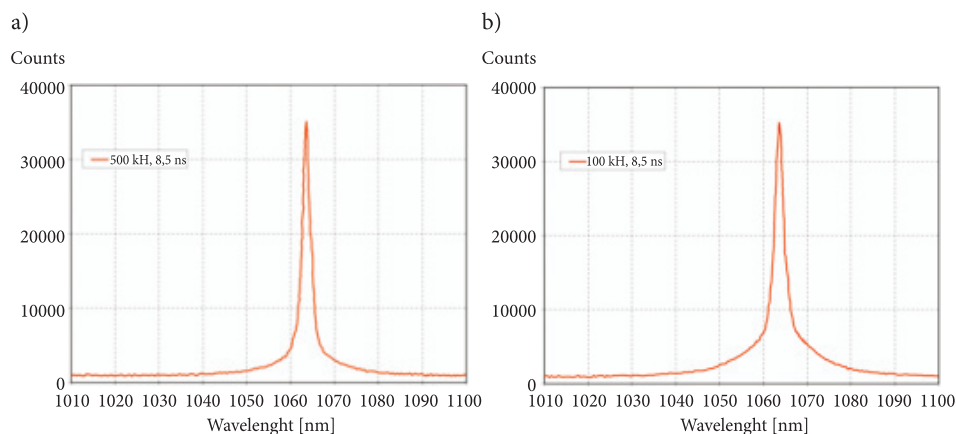
Dla rozpatrywanych reżimów pracy układu MOPFA dokonano oszacowania sprawności różniczkowej drugiego stopnia wzmacniającego. Wartość tej sprawności wyrażonej jako stosunek mocy sygnału wzmocnionego do mocy pompy wprowadzonej do ośrodka aktywnego wynosiła od 67,0% (dla 500 kHz, 250 ns) do 58% (dla 50 kHz, 50 ns). Poziom osiągniętej sprawności uwarunkowany był (co zostało podkreślone wcześniej) poziomem mocy promieniowania wprowadzanego do drugiego stopnia wzmocnienia. Teoretycznie przy zachowaniu stałej mocy średniej wzmocnionych impulsów przez pierwszą kaskadę w funkcji zmian czasu trwania impulsu oraz częstotliwości repetycji sprawność ta utrzymywałaby się na stałym poziomie.

Wybrane oscylogramy wzmocnionych impulsów przedstawiono na rysunku 2, natomiast na rysunku 3 przedstawione zostały wybrane charakterystyki spektroskopowe.



Rys. 2. Wybrane oscylogramy impulsów wzmocnionych dla maksymalnej mocy pompy 37,6 W:  
a) 500 kHz, 20 ns; b) 100 kHz, 8,5 ns; c) 50 kHz, 50 ns

W stosowanym zakresie zmian częstotliwości repetycji, czasu trwania impulsów oraz mocy wyjściowej nie stwierdzono wydłużenia czasu trwania wzmocnionych impulsów. Również niezmiennym pozostał kształt impulsów wzmocnionych w stosunku do kształtu impulsów bezpośrednio generowanych przez diodowy generator zadający.



Rys. 3. Widmo promieniowania wzmacnionego w układzie MOPFA: a) dla ciągu impulsów o czasie trwania 8,5 ns, mocy wyjściowej 22 W i częstotliwości repetycji 500 kHz; b) dla ciągu impulsów o czasie trwania 8,5 ns, mocy wyjściowej 19 W i częstotliwości repetycji 100 kHz

Pomiar charakterystyk widmowych wykazał, że centralna długość fali sygnału wzmacnionego odpowiadała centralnej długości fali sygnału przed wzmacnieniem. Podobna relacja została zachowana w dziedzinie szerokości widma promieniowania laserowego — szerokość widma oscylowała w okolicy 2 nm. W obrazie widma nie stwierdzono istotnych zmian świadczących o znacznym występowaniu wzmacnionej emisji spontanicznej w wiązce wyjściowej promieniowania wzmacnionego.

W trakcie prowadzenia pomiarów zastosowane do budowy drugiego stopnia wzmacniającego włókno aktywne uległo uszkodzeniu — nastąpiło pęknięcie wewnętrznej struktury włókna na odcinku pomiędzy sprzęgaczem światłowodowym i końcem światłowodu od strony sprzęgacza. Domniemana przyczyna tego uszkodzenia wynikała z defektu wewnętrznej struktury włókna aktywnego (powstałego w procesie jego produkcji).

## Podsumowanie

Opracowano dwukaskadowy układ *generator zadający* — *włóknowy wzmacniacz mocy* wykorzystujący jako źródło impulsów zadawanych jednomodową impulsową diodę laserową. Do budowy poszczególnych stopni wzmacnienia wykorzystano włókna dwupłaszczowe domieszkowane jonami iterbu  $\text{Yb}^{3+}$  pompowane promieniowaniem o długości fali 976 nm W układzie tym dla maksymalnej zastosowanej mocy pompy wprowadzonej do ośrodka aktywnego drugiego stopnia wzmacnienia 37,6 W uzyskano:

- dla częstotliwości repetycji 500 kHz i impulsów o czasie trwania **250 ns** uzyskano średnią moc wyjściową **22,1 W**; dla impulsów o czasie trwania

- 8,5 ns** moc średnia wynosiła **20,14 W** (energia impulsu — 40,3  $\mu$ J, moc szczytowa 4,7 kW)
- dla częstotliwości repetycji 100 kHz i impulsów o czasie trwania **250 ns** uzyskano średnią moc wyjściową **20,9 W**; dla impulsów o czasie trwania **8,5 ns** moc średnia wynosiła **19,38 W** (energia impulsu — 19,4  $\mu$ J, moc szczytowa 22,8 kW)
  - dla częstotliwości repetycji 50 kHz i impulsów o czasie trwania **250 ns** uzyskano średnią moc wyjściową **19 W**; dla impulsów o czasie trwania **50 ns** moc średnia wynosiła **17,82 W** (energia impulsu — 17,8  $\mu$ J, moc szczytowa 7,1 kW).

Dalsze skalowanie parametrów energetycznych układu było niemożliwe — z powodu uszkodzenia włókna aktywnego stanowiącego ośrodek aktywny drugiego stopnia wzmocnienia.

Artykuł wpłynął do redakcji 27.01.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] D. BELFORTE, *Markets keep getting better*, Industrial Laser Solutions, 22, 1, 2007.
- [2] J. ŚWIDERSKI, A. ZAJĄC, M. SKORCZAKOWSKI, *Pulsed ytterbium-doped Large Mode Area double-clad fiber amplifier in MOFPA configuration*, Opto-Electronics Review, 15, 2, 2007, 98-101.

J. ŚWIDERSKI, M. SKÓRCZAKOWSKI, D. DOROSZ, W. PICHOLA

#### Ytterbium-doped fiber amplifier of nanosecond pulses

**Abstract.** The modern two-cascade laser system: diode seed laser — fiber power amplifier was developed. A single-mode pigtailed DFB laser operating at the wavelength of 1064 nm was utilized as an active medium. Ytterbium-doped double-clad optical fibers pumped by laser diodes operating at the wavelength of 976 nm were used as active media. The developed laser system generated the pulses of changeable duration ranging from 8.5 ns to 250 ns at the repetition rate of 50-500 kHz. The max. average power of the output signal was 22 W.

**Keywords:** fiber amplifier, active double-clad fiber, pulse generation

**Universal Decimal Classification:** 535,8:: 621.39