



Impulsowy wzmacniacz włóknowy w konfiguracji MOFPA pompowany diodą laserową

JACEK ŚWIDERSKI, ANDRZEJ ZAJĄC, ZDZISŁAW JANKIEWICZ*,
MAREK SKÓRCZAKOWSKI, PIOTR KONIECZNY

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2
*Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych,
01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133

Streszczenie. W artykule przedstawiono numeryczny model wzmacniacza włóknowego pracującego w reżimie wzmacniania impulsów promieniowania o nanosekundowych czasach trwania. W oparciu o zaprezentowany opis matematyczny wzmacniacza opracowany został program komputerowy pozwalający na symulację pracy układu. W celu sprawdzenia poprawności działania opracowanego programu komputerowego dokonano praktycznej realizacji impulsowego wzmacniacza włóknowego, zbudowanego w oparciu o dwupłaszczyznowe włókno typu Large Mode Area (LMA) domieszkowane iterbem. Na wyjściu układu uzyskano impulsy nanosekundowe o mocy szczytowej 11 kW. Układ pracował ze sprawnością 30% przy częstotliwości w zakresie od 10 kHz do 40 kHz.

Słowa kluczowe: wzmacniacze włóknowe dużej mocy, włókno aktywne typu „double-clad”, generacja impulsowa

Symbole UKD: 621.375

1. Wstęp

Minęło już przeszło 40 lat od zaobserwowania akcji laserowej w aktywnych włóknach światłowodowych, jednakże dopiero w ostatnich dwóch dekadach układy te zaczęto rozpatrywać jako atrakcyjne źródła promieniowania koherentnego. Trzy lata po uruchomieniu pierwszego lasera przez Maimana, Snitzer w 1963 roku otrzymał generację promieniowania laserowego dla włókna ze szkła kwarcowego domieszkowanego jonami neodymu [1]. Tu należy jednak podkreślić, iż pierwsze lasery włóknowe były mało wydajne i nie znajdowały szerszych zastosowań.

Dopiero koniec lat osiemdziesiątych przyniósł początek prawdziwego rozkwitu laserów i wzmacniaczy włóknowych. Było to spowodowane postępowaniem w dziedzinie technologii wytwarzania niskostratnych włókien światłowodowych oraz laserów półprzewodnikowych stosowanych jako pompy optyczne. Przełomowe znaczenie miała konstrukcja dwupłaszczowego włókna aktywnego, zwanego z języka angielskiego „double-clad” [2]. Konstrukcja ta w połączeniu z istnieniem wysokowydajnych diod laserowych zagwarantowała powstanie laserów i wzmacniaczy włóknowych dużej mocy.

Włókno „double-clad” różni się od włókna konwencjonalnego (jednopłaszczowego) tym, że posiada dodatkowy płaszcz zewnętrzny. Rdzeń włókna domieszkowany jest jonami aktywnymi i otoczony jest warstwą płaszcza wewnętrznego, do którego wprowadza się promieniowanie pompujące matryc półprzewodnikowych diod laserowych. Dzięki obecności dodatkowej warstwy zewnętrznej o niższym współczynniku załamania promieniowanie pompujące może propagować się wzdłuż włókna w płaszczu wewnętrznym i jednocześnie pompować domieszkę czynną rdzenia. Takie rozwiązanie zapewnia szczególnie interesujące możliwości w dziedzinie laserów i wzmacniaczy ciała stałego. Z jednej strony ośrodek aktywny w postaci włókna zapewnia emisję w podstawowym modzie poprzecznym (średnice rdzenia rzędu 5-15 μm , apertura numeryczna rzędu 0,06-0,15), z drugiej zaś strony pozwala łatwo wprowadzić do rdzenia poprzez wewnętrzny płaszcz (średnice rzędu 400 μm , apertura numeryczna rzędu 0,3-0,6) dużą moc promieniowania (o niskiej jakości) diod pompujących. W ten prosty koncepcyjnie sposób można zbudować prawie idealny laser/wzmacniacz charakteryzujący się doskonałą izolacją od wpływu otoczenia (stabilnością parametrów generowanego promieniowania), bardzo dużą rozciągłością ośrodka czynnego (bardzo dużym wzmocnieniem), korzystną relacją powierzchni do objętości ośrodka czynnego (brakiem konieczności chłodzenia wodą). Układ taki jest bardziej niezawodny niż klasyczne konstrukcje, ma prawie idealny rozkład poprzeczny wiązki, wysoką moc wyjściową oraz dużą sprawność (zbliżoną do wartości teoretycznej, wyznaczonej przez stosunek energii kwantów generacji i pompy). Szczególnie godne podkreślenia jest duże wzmocnienie, jakie można uzyskać we włóknach aktywnych. Pozwala to bowiem budować wzmacniacze sygnałów optycznych o średnich mocach wyjściowych rzędu kilkudziesięciu lub nawet kilkuset watów. Jeśli weźmie się pod uwagę, że wzmacniany sygnał może być wytworzony w generatorze (np. diodowo pompowanym impulsowym laserze objętościowym), a następnie wprowadzony do silnie pompowanego włókna aktywnego i wzmocniony, to możliwość budowy układów dużej mocy o zadanych parametrach czasowych (np. krótkie i superkrótkie impulsy) lub widmowych (praca jednoczesotliwościowa) staje się bardzo realna i przynajmniej koncepcyjnie prosta. Techniki generacji laserowej pozwalające kształtować widmo i czas trwania impulsów są od dawna znane i opanowane. Zwykle jednak generatory laserowe o zadanych parametrach mają niską moc średnią. W tej sytuacji wykorzystanie

włókna aktywnego jako wzmacniacza promieniowania o zadanych charakterystykach czasowych wydaje się bardzo korzystną alternatywą.

2. Koncepcja impulsowego układu MOFPA

Przy generacji monoimpulsów promieniowania występują zjawiska ograniczające możliwość wykorzystania do tego celu laserów włóknowych. Do zjawisk tych należy zaliczyć przede wszystkim wzmocnioną emisję spontaniczną (ASE — *Amplified Spontaneous Emission*), powodującą wyświecenie się ośrodka aktywnego zanim nastąpi wyłączenie strat dodatkowych i generacja impulsu. Przy innych geometriach materiału aktywnego, gdy ośrodki czynne są znacznie krótsze, zjawisko to nie występuje tak drastycznie. Stosunkowo małe pole powierzchni przekroju poprzecznego aktywnego rdzenia sprzyja przekroczeniu gęstości mocy, przy której pojawiają się niekorzystne zjawiska nieliniowe (m.in. wymuszone rozproszenie Ramana, wymuszone rozpraszanie Brillouina oraz samomodulacja fazy) pogarszające sprawność działania układu oraz powodujące deformacje widma promieniowania wyjściowego. Ponadto przy generacji impulsów o dużych mocach szczytowych istnieje duże prawdopodobieństwo uszkodzenia powierzchni czoł światłowodu aktywnego na skutek przekroczenia granicznej gęstości mocy na jednostkę powierzchni materiału czynnego.

Trudności związane z wyświecaniem się włóknowego ośrodka czynnego oraz ograniczoną możliwością generacji impulsów o krótkim czasie trwania (wynikającym z dużej długości rezonatora lasera włóknowego) można obejść. Do wytwarzania impulsów promieniowania włókna czynne należy wykorzystywać nie jako generatory, lecz jako wzmacniacze [3-5]. Rozwiązanie takie ma wiele zalet, spośród których najważniejszymi są:

- częstotliwość powtarzania oraz czas trwania impulsów promieniowania mogą być dobrane w generatorze zadającym, niezależnie od konstrukcji samego wzmacniacza,
- we wzmacniaczu nie ma potrzeby osiągnięcia wysokich współczynników wzmocnienia, co ogranicza ASE,
- we wzmacniaczu przestaje działać podstawowe ograniczenie na długość użytego włókna, co pozwala osiągać stosunkowo wysokie energie i moce szczytowe wzmacnianych impulsów, przy czym czas trwania impulsów wyjściowych określony jest już w samym generatorze zadającym i nie jest zdeterminowany długością użytego do budowy wzmacniacza włókna.

Oczywiście pozostaje ograniczenie związane z dopuszczalną gęstością mocy wiązki propagującego się we włóknie promieniowania, niemniej jednak wzmacniacze włóknowe stanowią konkurencyjne rozwiązanie dla impulsowych laserów włóknowych.

Układy realizujące przedstawioną powyżej koncepcję noszą nazwę układów MOFPA (ang. *Master Oscillator Fiber Power Amplifier*). Zbudowane są z generatora

zadającego impulsy promieniowania oraz ze wzmacniacza tych impulsów. Generatorem zadającym może być dowolny impulsowy laser ciała stałego (np. laser dyskowy, mikrolaser), natomiast rolę ośrodka wzmacniającego pełni tutaj włókno aktywne. W układach dużej mocy jest to w większości przypadków włókno dwupłaszczone, o konstrukcji dostosowanej do poziomu wymaganych mocy wzmacnianego promieniowania.

Układy MOFPA możemy podzielić na wiele grup, np. pod względem rodzaju wzmacnianego promieniowania, zastosowań użytkowych, poziomu mocy wyjściowej. Możemy tutaj wyróżnić układy ciągłego działania (CW) oraz układy impulsowe wzmacniające impulsy o różnym czasie trwania i różnej częstotliwości repetycji.

W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry sygnałów wzmocnionych w układach MOFPA. Zestawienie to dotyczy wyłącznie układów dużej mocy, gdzie w większości przypadków stosowano włókna dwupłaszczone domieszkowane iterbem. Należy tu również podkreślić, że w celu osiągnięcia wysokiego poziomu mocy wyjściowej często stosuje się układy MOFPA o kilku stopniach wzmocnienia, stosownie do potrzeb.

Zestawienie przedstawione w tabeli 1 uwzględnia zarówno układy MOFPA o pracy ciągłej, jak i typowe układy impulsowe (z zakresu nanosekund, pikosekund i femtosekund). Układy te oferują bardzo duże możliwości — pozwalają np. wzmocnić promieniowanie CW nawet do 2 kW. Szczególnie interesujące są układy wzmacniające promieniowanie impulsowe z zakresu fs. Do wzmacniania impulsów o femtosekundowym czasie trwania i o energii ok. 1 nJ nie można stosować typowych układów MOFPA. Spowodowane jest to silnymi efektami nieliniowymi wynikającymi z dużej gęstości mocy wzmacnianego impulsu w obszarze rdzenia włókna. Jako alternatywa stosowane są tu tzw. układy CPA (ang. *Chirped Pulse Amplification*), w których impuls promieniowania najpierw jest poszerzany i jednocześnie „chirpowany”, następnie wzmacniany w ośrodku aktywnym, a na koniec kompresowany przy pomocy np. specjalnego zestawu siatek dyfrakcyjnych o dyspersji anomalnej. W układach tego typu uzyskano ciąg impulsów o mocy średniej 131 W przy częstotliwości repetycji 73 MHz. Czas trwania wzmocnionych impulsów wynosił 220 fs. Odpowiadało to rekordowej mocy szczytowej impulsu 8,2 MW.

Pomimo tak dużych możliwości włóknowych układów CPA, nie będą tu one analizowane. Rozważania zawężone zostaną do analizy impulsowych wzmacniaczy włóknowych dla impulsów o czasie trwania z zakresu nanosekund.

Układem dostarczającym rekordowych parametrów wyjściowych w tym reżimie czasowym jest konstrukcja zaproponowana przez Limperta. W układzie tym generator zadający (laser dyskowy) generował ciąg impulsów o mocy średniej rzędu kilku watów. Ośrodkiem wzmacniającym było włókno o długości 25 m ($\phi_r = 30 \mu\text{m}$, $NA_r = 0,06$, $\phi_{pl} = 400 \mu\text{m}$, kształt płaszczka — litera „D”, $NA_{pl} = 0,38$, Yb^{3+} : 500 ppm). Włókno to pompowane było jednostronnie od czoła diodą laserową o mocy 140 W ($\lambda_g = 976 \text{ nm}$). Na wyjściu układu, dla częstotliwości repetycji 50 kHz, uzyskano 100 W mocy średniej. Energia wzmocnionego impulsu wynosiła 2 mJ. Dla częstotliwości repetycji

TABELA 1

Zestawienie parametrów promieniowania wzmocnionego w wybranych układach MOFPA pracujących w różnych reżimach

Lp.	P_{wy}	E_i	f_r	t_i	P_{sz}	sprawność [%]	λ [nm]	rok przypis
1.	> 25 W	410 nJ	62 MHz	110 fs	3,7 MW	79	1055	2004 [6]
2.	2.7 W	27 mJ	100 Hz	50 ns	0,54 MW	brak danych	1064	2004 [7]
3.	25 W	50 μ J	500 kHz	25 ps	2 MW	brak danych	1055	2004 [8]
4.	250 W	-	-	-	-	59 (całkowita)	1076	2004 [9]
5.	100 W	2 mJ	50 kHz	kilkaset ns	brak danych	brak danych	1064	2002 [10]
6.	97 W	2 μ J	47 MHz	10 ps	200 kW	71	1030	2005 [11]
7.	321 W	0,32 μ J	1 GHz	20 ps	16 kW	78	1060	2005 [12]
8.	150 W	-	-	-	-	33	1563	2005 [13]
9.	1,96 kW	-	-	-	-	brak danych	1075	2005 [14]
10.	131 W	1,8 μ J	73 MHz	220 fs	8,2 MW	75	1040	2005 [15]

P_{wy} — moc wyjściowa, E_i — energia impulsu, f_r — częstotliwość repetycji, t_i — czas trwania impulsu, P_{sz} — moc szczytowa impulsu, λ — długość fali

3 kHz uzyskano impulsy wyjściowe o energii 4 mJ. Parametr jakości wiązki wynosił $M^2 = 1,1$, przy czym włókno zwinięte było w zwój o średnicy ok. 10 cm.

3. Model numeryczny wzmacniacza impulsów w konfiguracji MOFPA

Podstawowym parametrem wzmacniacza jest wzmocnienie wyrażane jako stosunek sygnału na wyjściu wzmacniacza do sygnału podawanego na jego wejście.

Aby możliwe było określenie optymalnego wzmocnienia dla konkretnego rozwiązania układowego wzmacniacza, konieczne jest przeprowadzenie analizy wpływu poszczególnych parametrów ośrodka wzmacniającego z uwzględnieniem zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi wzmacniania. Można do tego zagadnienia podchodzić w dwojaki sposób: rozwiązując numerycznie układ równań opisujących proces wzmacniania sygnału [16-18] bądź opisać układ za pomocą najprostszych równań analitycznych [19, 20]. Pierwsza metoda wiąże się z trudną (ale oferującą dobrą dokładność) procedurą numerycznego rozwiązania odpowiedniego zestawu równań różniczkowych cząstkowych, co wymaga zastosowania komputera o odpowiedniej mocy obliczeniowej. Druga metoda nie wymaga zaangażowania szybkiego komputera, gdyż posługujemy się tutaj uproszczonymi wyrażeniami analitycznymi opisującymi podstawowe zjawiska procesu wzmacniania — podejście takie, pomimo mniejszej dokładności, daje niejednokrotnie wystarczające informacje o podstawowych parametrach wzmacniacza.

W niniejszym opracowaniu zaprezentowany zostanie numeryczny model wzmacniacza włóknowego zbudowanego w oparciu o włókno aktywne „double-clad”. Rozpatrywane będzie włókno typu LMA domieszkowane jonami iterbu Yb^{3+} .

3.1. Założenia modelu

Rozpatrywany wzmacniacz włóknowy składa się z odcinka światłowodu aktywnego o długości l_w . Rdzeń włókna zapewniający propagację sygnału wzmacnianego o długości fali λ_s (podawanego na wejście wzmacniacza), domieszkowany jest trójwartościowymi jonami iterbu o koncentracji N_0 rozłożonymi równomiernie w całej objętości. Promieniowanie pompy o mocy P_p i długości fali λ_p wprowadzane jest do płaszcza wewnętrznego (o kształcie zapewniającym jednorodny rozkład promieniowania pompy) z jednej strony włókna ($z = 0$) i propaguje się wzdłuż włókna. Ułamek mocy pompy propagującej się w obszarze rdzenia jest reprezentowany przez współczynnik dopasowania Γ_p (całkę przekrywania pola modu pompy z polem aktywnego rdzenia), który liczbowo w przybliżeniu możemy wyrazić jako stosunek pola powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia do pola powierzchni przekroju poprzecznego płaszcza wewnętrznego. Wzmacniane promieniowanie (propagujące się w kierunku dodatnim lub ujemnym w stosunku do kierunku propagacji pompy) rozchodzi się w głównej mierze w obszarze rdzenia. Jednak część tego promieniowania propagować się będzie także poza rdzeniem i z tego względu wprowadza się odpowiedni współczynnik dopasowania sygnału Γ_s (całka przekrycia pola modu sygnału wzmacnianego z polem aktywnego rdzenia). Współczynnik Γ_s może przybierać wartości od 0 (brak przekrycia) do 1 (pełne przekrycie). Wprowadzenie do analizy współczynników dopasowania Γ_p i Γ_s wynika z budowy włókna dwupłaszczowego, zaś ich szczegółowy opis został przedstawiony w [21-23]. W prowadzonej analizie przyjęto, iż Γ_p będzie odpowiadać stosunkowi pola powierzchni

przekroju poprzecznego rdzenia do pola powierzchni przekroju poprzecznego płaszcza wewnętrznego, zaś Γ_s będzie zawierać się w przedziale 0,75-0,9. W modelu uwzględnione zostały również straty rozproszeniowe promieniowania dla długości fali sygnału wzmacnianego i długości fali promieniowania pompy.

Konstruując model numeryczny wzmacniacza włóknowego MOFPA, przyjęto dodatkowe założenia upraszczające:

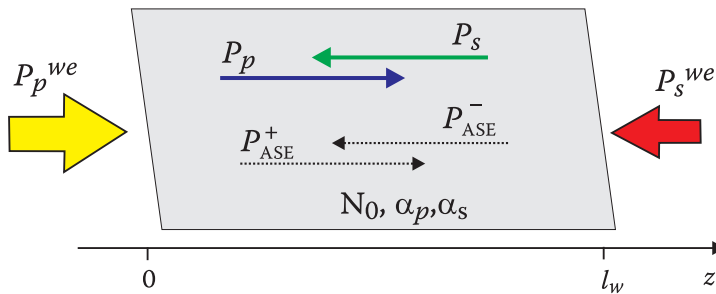
1. Wszystkie jony aktywne w każdym punkcie aktywnego rdzenia mają taki sam przekrój czynny, co jest równoznaczne z założeniem jednorodnego poszerzenia linii emisji.
2. Model nie uwzględnia efektów polaryzacji promieniowania oraz nie uwzględnia interakcji pomiędzy sąsiednimi jonami (klasterowania domieszki czynnej).
3. Występują tylko efekty jednokwantowe. Przekroje czynne ośrodka aktywnego przyjmują stałą wartość, niezależną od natężenia propagującego się we włóknie sygnału.
4. Strumienie fotonów propagujące się we włóknie oraz inwersja obsadzeń nie zależą od współrzędnych poprzecznych, są jednorodne.
5. Ze względu na strukturę poziomów energetycznych iterbu, nie występuje tutaj zjawisko absorpcji ze stanów wzbudzonych ESA zarówno na długości fali promieniowania pompy i długości fali sygnału wzmacnianego.
6. Założono, że wzmacniacz będzie pracował przy niewysokich mocach pompy, niepowodujących uzyskania warunków krytycznych do wystąpienia zjawisk nieliniowych, stąd też nie będą one uwzględniane w prowadzonej analizie numerycznej.
7. W analizie przyjęto, iż wzmacniana wiązka promieniowania będzie jednomodowa.

Przyjęcie powyższych założeń ułatwia określenie zestawu równań opisujących pracę układu MOFPA.

3.2. Analiza pracy impulsowego układu MOFPA

Po założeniu, że włókno aktywne ma oba końce zeszlifowane pod kątem zapewniającym odsprężenie układu (eliminacja odbić od powierzchni czołowych), w ośrodku wzmacniającym będą się propagować cztery wiązki promieniowania: sygnał pompy, sygnał wzmacniany oraz dwie wiązki wzmocnionej emisji spontanicznej propagujące się w przeciwnych kierunkach. Sytuację tę ilustruje rysunek 1.

Zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi na rysunku 1, sygnał wejściowy (wzmacniany) będzie się propagował w kierunku przeciwnym do kierunku propagacji sygnału pompującego. Obydwie wiązki (pompująca i wzmacniana) wprowadzane są do światłowodu z odpowiednią sprawnością wprowadzania η_{wpr} która dla konkretnego układu może zostać wyznaczona eksperymentalnie. Można

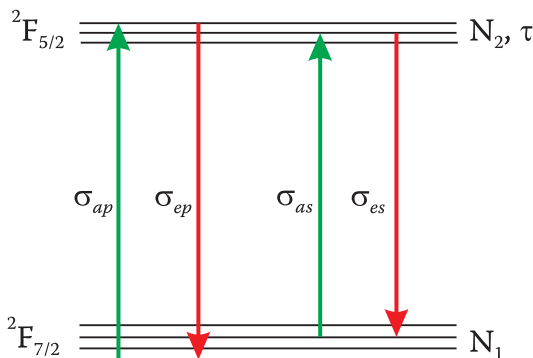


Rys. 1. Uproszczony model wzmacniacza włóknowego. P_p — moc promieniowania pompy propagującego się we włóknie, P_s — moc sygnału wzmacnianego propagującego się we włóknie, P_p^{we} — moc promieniowania pompy na wejściu włókna, P_s^{we} — moc sygnału wzmacnianego na wejściu włókna, P_{ASE}^+ — moc sygnału wzmocnionej emisji spontanicznej w kierunku dodatnim (+) i ujemnym (-) osi, N_0 — koncentracja domieszki czynnej, α_p — straty rozproszeniowe na długości fali promieniowania pompy, α_s — straty rozproszeniowe na długości fali sygnału wzmacnianego

zatem zapisać: $P_p = \eta_{wpr}^p P_p^{we}$ oraz $P_s = \eta_{wpr}^s P_s^{we}$. Ośrodek aktywny będzie się charakteryzował określoną koncentracją jonów domieszki czynnej N_0 oraz pewnymi stratami rozproszeniowymi występującymi na długości fali promieniowania pompy α_p i długości fali sygnału wzmacnianego α_s .

Gdy wyznacza się inwersję obsadzeń ośrodka aktywnego, należy uwzględnić spektroskopię jonów iterbu Yb^{3+} w szkle. Prezentowany model zakłada jednorodne poszerzenie linii i faktem jest, iż w przypadku jonów Yb^{3+} w osnowie szkła jest to dominujące zjawisko (choć występują tutaj elementy poszerzenia niejednorodnego). Czas termalizacji obsadzeń podpoziomów poziomów $^2F_{7/2}$ i $^2F_{5/2}$ jonu iterbu jest wyjątkowo szybki i może być rozpatrywany jako natychmiastowy [24]. Podobnie można przyjąć za stałą temperaturę włókna — domieszka iterbu charakteryzuje się małym defektem kwantowym, zaś sama konstrukcja wzmacniacza cechuje się dużym polem powierzchni do objętości materiału czynnego, co skutecznie ułatwia odprowadzanie ciepła. Dlatego też absorpcyjny i emisyjny przekrój czynny, zależne od rozkładu cząstek w podpoziomach, zgodnie z prawem Boltzmana, są rozpatrywane jako stałe, niezależne od poziomu mocy pompy i poziomu mocy (energii) sygnału wzmacnianego. Jeśli weźmie się pod uwagę powyższe stwierdzenia, przy modelowaniu procesu wzmacniania w iterbowych włóknach aktywnych, uzasadnione jest zastosowanie dwupoziomowego schematu kwantowego ośrodka wzmacniającego (rys. 2).

Obsadzenie poziomów $^2F_{7/2}$ i $^2F_{5/2}$ zostało oznaczone odpowiednio jako N_1 i N_2 . Całkowita koncentracja jonów aktywnych ośrodka wynosi $N_0 = N_1 + N_2$. Poziom wzbudzony N_2 charakteryzuje się czasem fluorescencji τ .


 Rys. 2. Schemat poziomów energetycznych jonu Yb^{3+} w szkle

Zgodnie z powyższą dyskusją, wzmacniacz włóknowy może zostać opisany następującym zestawem równań różniczkowych:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2(z,t)}{dt} = & \frac{\Gamma_p Pp(z,t)}{h\nu_p A_r} [\sigma_{ap} N_1(z,t) - \sigma_{ep} N_2(z,t)] + \\ & + \frac{\Gamma_s Ps(z,t)}{h\nu_s A_r} [\sigma_{as} N_1(z,t) - \sigma_{es} N_2(z,t)] - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \\ & + \frac{\Gamma_s [P_{ASE}^+(z,t) + P_{ASE}^-(z,t)]}{h\nu_s A_r} [\sigma_{as} N_1(z,t) - \sigma_{es} N_2(z,t)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Pp(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V_s} \frac{\partial Pp(z,t)}{\partial t} = & -\Gamma_p Pp(z,t) [\sigma_{ap} N_1(z,t) - \sigma_{ep} N_2(z,t)] - \\ & -\alpha_p Pp(z,t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial Ps(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V_s} \frac{\partial Ps(z,t)}{\partial t} = \Gamma_s Ps(z,t) [\sigma_{es} N_2(z,t) - \sigma_{as} N_1(z,t)] - \alpha_s Ps(z,t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{\partial P_{ASE}^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{V_s} \frac{\partial P_{ASE}^\pm(z,t)}{\partial t} = & \Gamma_s P_{ASE}^\pm(z,t) [\sigma_{es} N_2(z,t) - \sigma_{as} N_1(z,t)] - \\ & -\alpha_s P_{ASE}^\pm(z,t) + 2\sigma_{es} N_2(z,t) h\nu_{ASE} \Delta\nu_{ASE} \end{aligned} \quad (4)$$

Opis poszczególnych parametrów i zmiennych występujących w powyższych równaniach został przedstawiony w tabeli 2.

Równanie (1) opisuje ewolucję w czasie obsadzenia poziomego wzbudzonego N_2 . Uwzględnia ono człon związany z pompowaniem, z wysyceniem ośrodka wzmacniającego oraz człon opisujący wpływ ASE na obsadzenie poziomego N_2 .

Równanie (2) opisuje zmiany promieniowania pompy wzdłuż włókna. Założono, że rozkład promieniowania pompy jest równomierny w całej objętości rdzenia. W praktyce dobrze zaprojektowany światłowód dwupłaszczowy powinien wykazywać zasadniczo jednorodną absorpcję wzdłuż długości włókna — na skutek mieszania się modów w wyniku zastosowania specjalnej geometrii płaszcza wewnętrznego. Przy takim podejściu równanie to wystarczająco dobrze opisuje ewolucję sygnału pompy wzdłuż włókna.

TABELA 2

Definicja parametrów występujących w programie do analizy numerycznej układu MOFPA

Parametr	Definicja parametru	Jednost.
N_2	koncentracja jonów iterbu Yb^{3+} na poziomie wzbudzonym	m^{-3}
P_p	moc sygnału pompy	W
P_s	moc sygnału wzmacnianego	W
P_{ASE}^+	moc sygnału ASE propagującego się w kierunku dodatnim „+”	W
P_{ASE}^-	moc sygnału ASE propagującego się w kierunku ujemnym „-”	W
σ_{ap}	absorpcyjny przekrój czynny na długości fali pompy	m^2
σ_{ep}	emisyjny przekrój czynny na długości fali pompy	m^2
σ_{as}	absorpcyjny przekrój czynny na długości fali sygnału wzmacnianego	m^2
σ_{es}	emisyjny przekrój czynny na długości fali sygnału wzmacnianego	m^2
Γ_s	całka przekrywania pola modu sygnału wzmacnianego z polem aktywnego rdzenia	-
Γ_p	całka przekrywania pola modu sygnału pompy z polem aktywnego rdzenia	-
h	stała Plancka ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js)	Js
ν_p	częstotliwość fali promieniowania pompy	Hz
ν	częstotliwość fali promieniowania wzmacnianego	Hz
τ	czas życia cząstek na poziomie wzbudzonym N_2	s
A_r	pole powierzchni przekroju poprzecznego aktywnego rdzenia światłowodu	m^2
ν_{ASE}	częstotliwość sygnału ASE	Hz
$\Delta\nu_{ASE}$	przedział częstotliwości sygnału ASE	Hz
V	$V = c/n$, prędkość fali świetlnej w ośrodku wzmacniającym	Ms^{-1}
α_s	współczynnik strat na długości fali sygnału wzmacnianego	m^{-1}
α_p	współczynnik strat na długości fali promieniowania pompy	m^{-1}

Równanie (3) opisuje zmiany w czasie i przestrzeni sygnału wzmacnianego wzdłuż włókna. Wyrażenie to występuje ze znakiem „-”, co oznacza, że sygnał propaguje się w kierunku przeciwnym do kierunku propagacji promieniowania pompy. W równaniu uwzględniono straty występujące dla długości fali sygnału wzmacnianego.

Ostatnie równanie (4) opisuje propagację sygnału ASE w kierunku dodatnim „+” i ujemnym „-”. Poziom ASE w danym punkcie włókna, dla danej chwili czasu, wynosi:

$$P_{ASE}(z,t) = P_{ASE}^+(z,t) + P_{ASE}^-(z,t). \quad (5)$$

Duża długość włókna oraz wysokie wzmocnienie uzyskiwane w układzie prowadzą do sytuacji, w której ASE nie może zostać pominięte, zwłaszcza jeżeli poziom sygnału podawanego na wejście wzmacniacza nie jest duży (nie wysycił wzmocnienia ośrodka). Emisja wymuszona w każdym punkcie włókna będzie stymulowała emisję fotonów wchodzących w skład sygnału ASE proporcjonalnie do iloczynu emisyjnego przekroju czynnego σ_{es} oraz ilości cząstek wzbudzonych N_2 . Ponadto zakładamy, że ASE propaguje się tylko w rdzeniu i w związku z tym w równaniu na ASE zastosowano tę samą całkę przekrywania Γ_s , co w przypadku sygnału wzmacnianego.

Dokładne rozwiązanie równań (1-4) możliwe jest przy użyciu metod numerycznych. Ich rozwiązanie pozwala na określenie charakterystyk czasowo-energetycznych wzmacnianego promieniowania.

3.3. Opis programu komputerowego symulującego pracę układu MOFPA

Na podstawie równań (1-4) opracowany został program komputerowy modelujący pracę impulsowego wzmacniacza włóknowego w konfiguracji MOFPA. Podstawą prowadzonych kalkulacji był następujący zestaw danych: $\lambda_p = 920$ nm, $\lambda_s = 1080$ nm, $\sigma_{ap} = 6 \times 10^{-21}$ cm², $\sigma_{ep} = 2,5 \times 10^{-22}$ cm², $\sigma_{as} = 1,4 \times 10^{-23}$ cm², $\sigma_{es} = 2,1 \times 10^{-21}$ cm², $\alpha_s = 5 \times 10^{-5}$ cm⁻¹, $\alpha_p = 3 \times 10^{-5}$ cm⁻¹, $\tau = 1$ ms, $\lambda_{ASE} = 1060$ nm, $\Delta\lambda_{ASE} = 40$ nm, $\Gamma_s = 0,75$, $\Gamma_p = 0,014$. W prowadzonej analizie założono, że aktywne włókno charakteryzuje się rdzeniem o średnicy 45 μ m i koncentracji domieszki (Yb⁺³) na poziomie $N_0 = 4,5 \times 10^{19}$ cm⁻³ oraz płaszczem wewnętrznym o średnicy 400 μ m (kształt litery „D”). Długość włókna wynosiła 10 m. Parametry ośrodka wzmacniającego przyjęte do symulacji komputerowej wynikały z faktu użycia takiego właśnie włókna w eksperymencie.

Opracowany program komputerowy składa się z trzech głównych modułów:

- interfejsu użytkownika,
- modułu wprowadzania danych i ustawień programu,
- modułu obliczeniowego i przedstawienia danych.

Interfejs programu pozwala na szybką zmianę wszystkich zadeklarowanych zmiennych. Użytkownik może edytować parametry impulsu podawanego na wejścia wzmacniacza (czas, energia) oraz zmieniać poziom mocy promieniowania pompującego wzmacniacz. W oknie dialogowym można bezpośrednio obserwować kształt impulsu po wzmocnieniu oraz obsadzenie poziomu wzbudzonego N_2 ośrodka aktywnego w chwili początkowej i w chwili końcowej procesu wzmocnienia. Program, dla zadeklarowanych parametrów wejściowych, wylicza m.in.: energię zgromadzoną w ośrodku aktywnym, energię traconą na skutek zjawiska ASE, energię i moc szczytową wzmocnionego impulsu. Ponadto umożliwia zapis wyników obliczeń do pliku.

Program komputerowy symulujący pracę wzmacniacza MOFPA napisany został w środowisku Borland C++ Builder 4.0 i dostosowany jest do pracy na platformach Windows 98, Milenium oraz XP. W programie zastosowano procedury doboru kroku całkowania mające na celu ustabilizowanie rozwiązania równań różniczkowych cząstkowych. Porównanie wyników uzyskanych na drodze symulacji komputerowej z wynikami badań laboratoryjnych przedstawiono w pkt. 6 niniejszego opracowania.

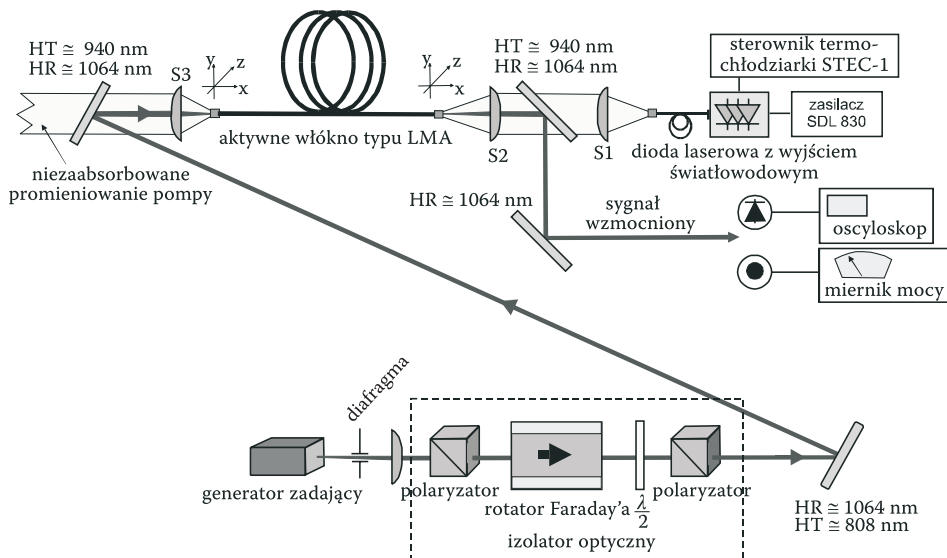
4. Praktyczna realizacja impulsowego układu MOFPA

Impulsowy układ MOFPA zrealizowano zgodnie z koncepcją przedstawioną na rysunku 3. Układ ten składał się z następujących głównych bloków:

- generatora zadającego impulsy promieniowania laserowego,
- izolatora optycznego,
- wzmacniacza włóknowego z diodą pompującą,
- układów sprzęgania i separacji wiązki pompującej i wiązki wzmacnianej.

Jako generator zadający wykorzystano laser zbudowany w technice pompowania diodowego. Był to impulsowy laser Nd:YVO pracujący w układzie z aktywną modulacją dobroci rezonatora realizowaną za pomocą komórki akustooptycznej. Laser ten pracował z częstotliwością repetycji do 40 kHz. Przy maksymalnym prądzie zasilania generował ciąg impulsów o czasie trwania od ok. 30 ns (dla 40 kHz) do ok. 10 ns (dla 10 kHz). Odpowiadało to mocy średniej 3,5 W i energii impulsu 85 μ J (dla 40 kHz) oraz mocy średniej 2,5 W i energii impulsu 250 μ J (dla 10 kHz).

Ośrodkiem wzmacniającym układu MOFPA było aktywne włókno dwupłaszczyznowe domieszkowane jonami iterbu Yb^{+3} , wyprodukowane przez francuską firmę HIGHWAVE Optical Technologies. Włókno to klasyfikowało się w kategorii włókna Large Mode Area (LMA) i charakteryzowało się parametrami zestawionymi w tabeli 3. We włóknie LMA powiększona została średnica rdzenia przy jednoczesnej redukcji różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszcza wewnętrznego.



Rys. 3. Schemat impulsowego układu MOFPA

Włókna takie zapewniają pracę w modzie podstawowym oraz podnoszą wartość mocy, przy której zaczynają występować zjawiska nieliniowe oraz samo uszkodzenie czoła włókna. Redukują również zjawisko wzmacnionej emisji spontanicznej.

TABELA 3

Zestawienie parametrów iterbowego włókna aktywnego

Średnica rdzenia	$45 \pm 2 \mu\text{m}$
Średnica płaszczki wewnętrznej	$\phi 400 \pm 10 \mu\text{m}$
Kształt płaszczki wewnętrznej	litera D
NA rdzeń-płaszczki wewnętrznej	$0,06 \pm 0,01$
NA płaszczki wewn.-płaszczki zewnętrznej	0,48
Absorpcja $\approx 975 \text{ nm}$	5 dB/m
Absorpcja $\approx 915 \text{ nm}$	2 dB/m
Absorpcja $\approx 940 \text{ nm}$	1,15 dB/m (zmierzona)
Długość włókna	10 m
Straty na długości fali 1100 nm	< 25 dB/km
Średnica płaszczki zewnętrznej	$480 \pm 15 \mu\text{m}$

Układy wzmacniaczy i laserów zbudowane w oparciu o aktywne włókna światłowodowe charakteryzują się dużym wzmocnieniem, dlatego też nawet niewielkie

odbicia od powierzchni czołowych końców światłowodu mogą powodować tak silne sprzężenia zwrotne, że możliwa jest generacja laserowa. Aby zapobiec takiej sytuacji, końce światłowodu należy obciąć pod odpowiednim kątem tak, aby promieniowanie odbite na granicy ośrodków nie miało możliwości propagacji powrotnej w światłowodzie. W opracowanym układzie MOFPA końce włókna zostały obcięte pod kątem 78° do osi włókna a następnie precyzyjnie wypolerowane i oprawione w złącza SMA-905 (kompatybilne z zastosowanymi układami mechanicznymi).

Źródłem promieniowania pompującego domieszkę czynną włókna LMA była dioda laserowa dużej mocy HLU25F400-940P wyposażona w światłowód transmisyjny o średnicy rdzenia $400\ \mu\text{m}$ i aperturze numerycznej $NA = 0,22$. Dioda ta generowała 25 W mocy ciągłej dla fali o długości $940\ \text{nm}$.

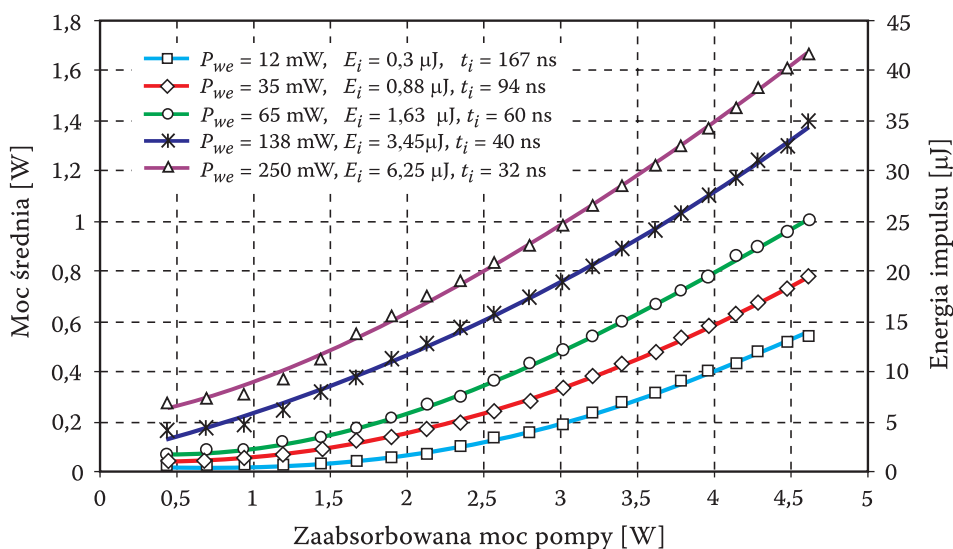
Układ optomechaniczny służący do sprzężenia wiązki promieniowania pompy z aktywnym włóknom oraz jednocześnie do wyprowadzenia wiązki wzmocnionej zbudowany był na bazie optyki asferycznej. W eksperymencie zastosowano układ składający się z soczewki S1 (Geltech 350110) o ogniskowej $6,24\ \text{mm}$, soczewki S2 (Geltech 350340) o ogniskowej $4\ \text{mm}$ oraz zwierciadła dichroicznego ($HT \cong 40\ \text{nm}$, $HR \cong 1064\ \text{nm}$) (rys. 3). Soczewki S1 i S2 oddalone były od siebie o ok. $4\ \text{cm}$. Po między soczewkami usytuowane było zwierciadło dichroiczne skrócone pod kątem (70°) umożliwiające wyprowadzenie wiązki wzmocnionej na zewnątrz wzmacniacza. Układ taki pozwalał na skupienie wiązki pompującej na czole włókna aktywnego do średnicy $256\ \mu\text{m}$ przy zachowaniu apertury numerycznej poniżej wartości $0,35$ (poniżej wartości apertury numerycznej płaszcz wewnętrzny zastosowanego włókna). Część mechaniczna układu optomechanicznego sprzężona była z włóknom za pomocą gniazda dopasowanego do złącza SMA-905 i wyposażona była w śruby mikrometryczne pozwalające na poprzeczny i podłużny przesuw czoła światłowodu aktywnego z dużą precyzją. Drugi układ optomechaniczny składał się z uchwyty mechanicznego pozwalającego na przesuw końca światłowodu aktywnego w osi x , y , z . Za uchwytem umieszczona była soczewka sferyczna S3 (skupiająca promieniowanie podawane na wejście wzmacniacza) o ogniskowej $60\ \text{mm}$. Za soczewką S3 znajdowało się zwierciadło dichroiczne ($HT \cong 940\ \text{nm}$, $HR \cong 1064\ \text{nm}$) separujące wiązkę niezaabsorbowanego we włóknie promieniowania pompy od wiązki promieniowania podawanego na wejście wzmacniacza.

W układach generator-wzmacniacz, gdy wzmocnienie toru jest duże, konieczne jest stosowanie izolacji optycznej. Zapobiega ono wzbudzeniu się całego układu MOFPA przed wypracowaniem przez generator właściwych charakterystyk promieniowania. Rozwiązanie takie jest niezbędne również z powodu możliwości uszkodzenia generatora przez promieniowanie odbite od czoła światłowodu aktywnego lub od zwierciadeł. Izolator zapobiega sprzęganiu się toru generator-wzmacniacz. Zastosowany w opracowanym układzie MOFPA izolator optyczny składał się z dwóch identycznych polaryzatorów Glana, rotatora Faraday'a (Liton Airton Synoptics) oraz płytki półfalowej.

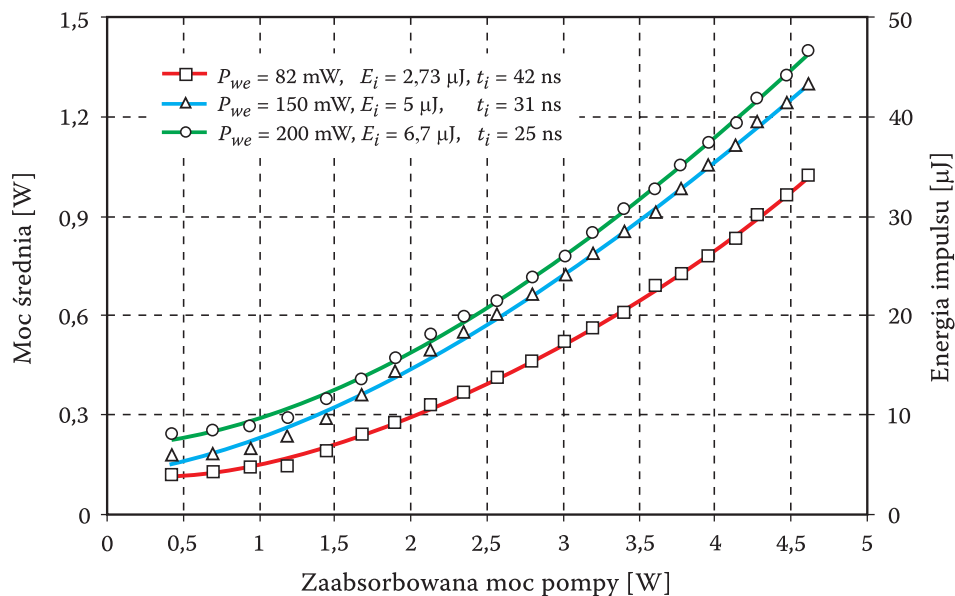
5. Wyniki badań laboratoryjnych

W opracowanym układzie MOFPA pomierzono charakterystyki czasowo-energetyczne wzmocnionego promieniowania oraz określono wzmocnienie układu dla różnych reżimów pracy (różnej częstotliwości repetycji, różnych czasów trwania oraz różnej energii impulsów wzmacnianych). Pomimo tego, że dioda pompująca wzmacniacz generowała 25 W mocy ciągłej, pracowano przy niższych wartościach mocy. Maksymalna moc pompy za światłowodem transmisyjnym wynosiła 9 W. Po uwzględnieniu transmisji układu wprowadzania promieniowania pompy (82,7%) oraz sprawności wprowadzania wiązki pompującej (ok. 65%), do włókna LMA można było wprowadzić ok. 5 W promieniowania pompy. Na 10 m zastosowanego odcinka włókna aktywnego przeszło 90% tej mocy było absorbowane przez domieszkę czynną rdzenia.

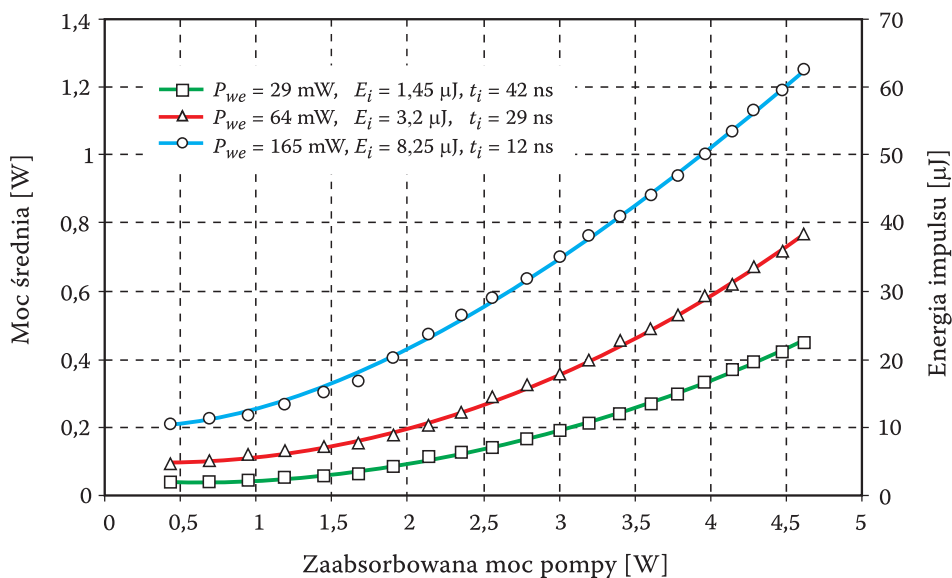
Wyniki badań laboratoryjnych przedstawione zostały na rysunkach 4-7.



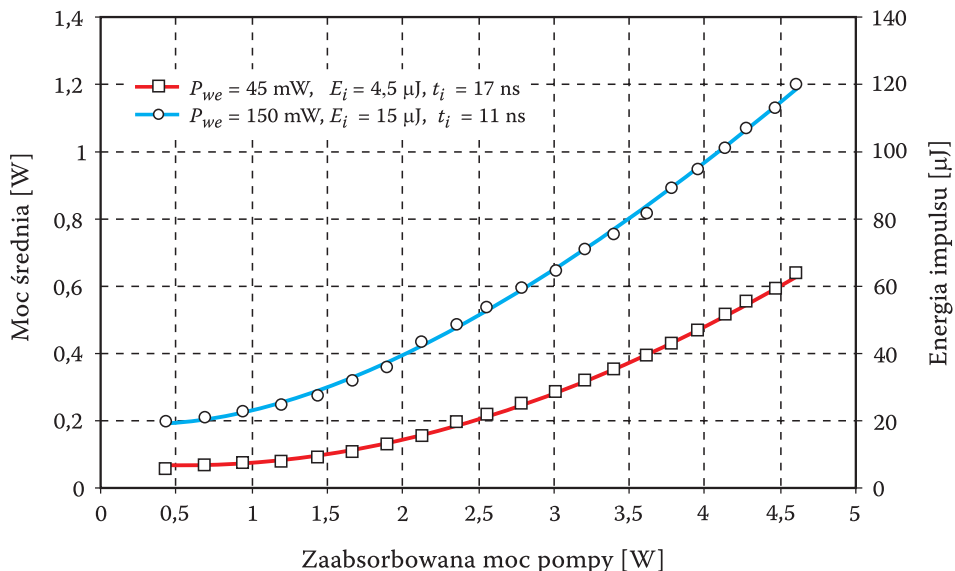
Rys. 4. Moc średnia oraz energia wzmocnionych impulsów w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla przypadku lasera Nd:YVO jako generatora zadającego. Częstotliwość repetycji sygnału wzmacnianego — 40 kHz



Rys. 5. Moc średnia oraz energia wzmacnionych impulsów w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla przypadku lasera Nd:YVO jako generatora zadającego. Częstotliwość repetycji sygnału wzmacnianego — 30 kHz



Rys. 6. Moc średnia oraz energia wzmacnionych impulsów w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla przypadku lasera Nd:YVO jako generatora zadającego. Częstotliwość repetycji sygnału wzmacnianego — 20 kHz



Rys. 7. Moc średnia oraz energia wzmocnionych impulsów w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla przypadku lasera Nd:YVO jako generatora zadającego. Częstotliwość repetycji sygnału wzmacnianego — 10 kHz

Lasery Nd:YVO, w zależności od mocy wzbudzenia oraz częstotliwości repetycji, umożliwiały generację impulsów o czasie trwania od ok. 200 ns do ok. 10 ns oraz mocy średniej rzędu kilku watów. Na wejście wzmacniacza podawane były impulsy o energii rzędu od kilku do kilkunastu μJ. Włókno aktywne pompowane było od strony przeciwnej w stosunku do wejścia impulsów zadawanych. Maksymalna moc promieniowania pompy zaabsorbowanego we włóknie wynosiła 4,61 W.

Na rysunkach 4-7 przedstawiono zależność średniej mocy wyjściowej oraz energii wzmocnionych impulsów w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla różnych wartości energii i czasu trwania impulsów wejściowych (zadawanych). Pomiarów dokonano dla czterech wartości częstotliwości repetycji: 10, 20, 30 i 40 kHz. Kształt otrzymanych charakterystyk wyjściowych wzmacniacza dla różnych częstotliwości repetycji i różnych poziomów mocy sygnału wejściowego był bardzo podobny. Wraz ze wzrostem zaabsorbowanej mocy pompy rosła energia wzmocnionych impulsów i wzrost ten przybierał charakter zbliżony do linii prostej. Charakterystykę parametrów wzmocnionych impulsów (dla maksymalnej wartości mocy promieniowania pompy zaabsorbowanego przez domieszkę aktywną włókna LMA) zestawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Zastawienie uzyskanych wyników dla impulsowego układu MOFPA. Zestawienie dla maksymalnej zaabsorbowanej mocy pompy 4,61 W

Częstot. repet.	Sygnał na wejściu			Sygnał na wyjściu					
	P_{we} [mW]	E_i [μJ]	t_i [ns]	P_{wy} [W]	E_i [μJ]	t_i [ns]	P_{sz} [kW]	η_w [%]	P_{wy}/P_{we}
40 kHz	12	0,3	167	0,55	13,75	166	0,08	11,7	45,8
	35	0,875	94	0,78	19,5	95	0,21	16,2	22,3
	65	1,625	60	1,01	25,25	60	0,42	20,5	15,5
	138	3,45	40	1,4	35	40	0,88	27,4	10,2
30 kHz	250	6,25	32	1,67	41,75	32	1,31	30,8	6,7
	82	2,73	42	1,02	34	42	0,81	20,4	12,5
	150	5	31	1,3	43,3	30	1,4	25	8,7
20 kHz	200	6,7	25	1,4	46,7	25	1,87	26	7
	29	1,45	42	0,45	22,5	42	0,54	9,1	15,5
	64	3,2	29	0,77	38,5	30	1,33	15,3	12
10 kHz	165	8,25	12	1,25	62,5	12	5,21	23,5	7,6
	45	4,5	17	0,64	64	16	3,77	12,9	14,2
	150	15	11	1,2	120	11	10,91	22,8	8

Z zestawienia danych zawartych w powyższej tabeli widać, że impulsy wejściowe o mniejszej energii ulegały większemu wzmocnieniu. Przykładowo impulsy o energii 0,3 μJ i czasie trwania 167 ns (dla 40 kHz) zostały wzmocnione przeszło 45-krotnie. Wzrost poziomu energii impulsów wejściowych powodował wzrost energii impulsów wyjściowych, ale jednocześnie impulsy te ulegały mniejszemu wzmocnieniu — wzmacniacz wchodził w nasycenie. Przykładowo, dla impulsu wejściowego o energii 50 razy większej (15 μJ) i częstotliwości repetycji 10 kHz uzyskano 8-krotne wzmocnienie sygnału (120 μJ). W tym przypadku moc szczytowa wzmocnionych impulsów wynosiła 10,91 kW. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż czas trwania impulsów wzmocnionych był taki sam jak czas trwania impulsów przed wzmocnieniem. Potwierdza to zatem tezę, iż włókna aktywne doskonale nadają się do wzmacniania impulsów o odpowiednio ukształtowanych charakterystykach czasowych. Stosując generator impulsów promieniowania o krótkich czasach trwania (pojedyncze ns), można uzyskać na wyjściu wzmacniacza MOFPA impulsy o identycznych charakterystykach czasowych i wysokiej energii, zależnej od mocy pompy dostarczonej do włókna. W przeprowadzonym eksperymencie włókno aktywne pobudzone było tylko kilkoma watami mocy pompy. Gdyby stosowano

silniejsze źródła promieniowania pompującego (o mocy rzędu kilkudziesięciu W), uzyskano by impulsy o znacznie wyższej energii.

Sprawność układu MOFPA (η_w) można zdefiniować następującą zależnością:

$$\eta_w = \frac{P_s^{wy} - P_s^{we}}{P_{abs}}, \quad (6)$$

gdzie: P_s^{we} i P_s^{wy} oznaczają odpowiednio średnią moc sygnału podawanego na wejście wzmacniacza oraz średnią moc sygnału na jego wyjściu.
 P_{abs} oznacza zaabsorbowaną moc promieniowania pompy.

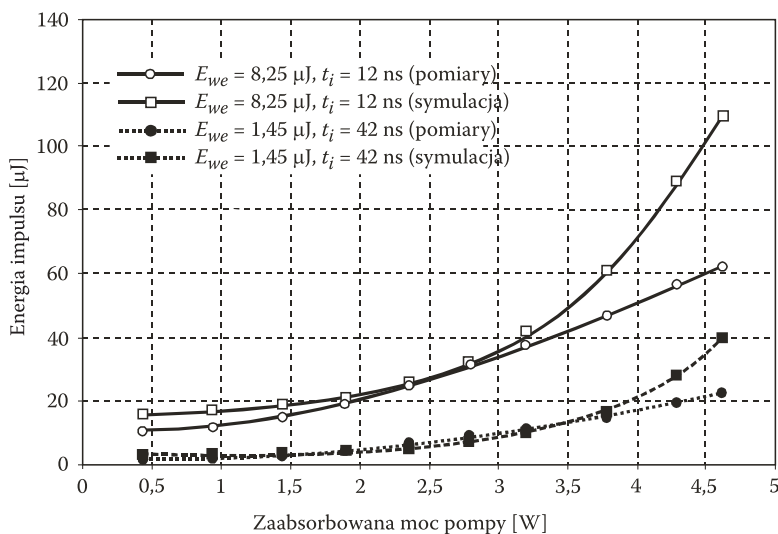
Dla danego sygnału wejściowego i danej mocy zaabsorbowanego promieniowania pompy oraz gdy wzmacniacz pracuje w stanie nasycenia, sprawność η_w jest stała. Jeśli weźmie się pod uwagę stosunek długości fali promieniowania pompy (940 nm) oraz długości fali promieniowania wzmacnianego sygnału (1064 nm), teoretyczna maksymalna wartość sprawności wzmacniacza wynosi 88%. Wartości uzyskanych sprawności pracy opracowanego wzmacniacza MOFPA (dla maksymalnej zaabsorbowanej mocy pompy 4,61 W) zamieszczono w tabeli 4. Sprawność ta wynosiła od ok. 10% do ok. 30% i silnie zależała od poziomu sygnału podawanego na wejście wzmacniacza. Dla niskich wartości sygnałów zadawanych sprawność ta była niska (np. dla 29 mW mocy średniej i częstotliwości repetycji 20 kHz uzyskano sprawność 9,1%). Dla sygnałów zadawanych o większej mocy średniej sprawność wzmacniacza rosła (np. dla 250 mW mocy wejściowej i częstotliwości repetycji 40 kHz wynosiła 30,8%). Różnica ta wynikała z faktu, iż słabszy sygnał wejściowy ulega silnemu wzmocnieniu, odbierając z ośrodka wzmacniającego mało energii zgromadzonej (stąd mniejsza sprawność); natomiast silniejszy sygnał wejściowy odbiera z ośrodka wzmacniającego dużo energii, ulegając mniejszemu wzmocnieniu i towarzyszył temu wzrost sprawności pracy układu. Najlepszym rozwiązaniem jest sytuacja, kiedy wzmacniacz pracuje w stanie bliskim nasycenia, tzn. gdy impuls wzmacniany odbiera w całości energię zgromadzoną we wzmacniaczu — wówczas sprawność takiego układu jest najwyższa. Osiągnięta w trakcie eksperymentu niewysoka wartość sprawności wzmacniacza (max. na poziomie 30%) mogła wynikać z obecności dużych strat rozproszeniowych promieniowania dla długości fali sygnału wzmacnianego.

6. Porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji komputerowej

Dla skonstruowanego impulsowego układu MOFPA dokonano sprawdzenia zgodności wyników uzyskanych za pomocą opracowanego programu komputero-

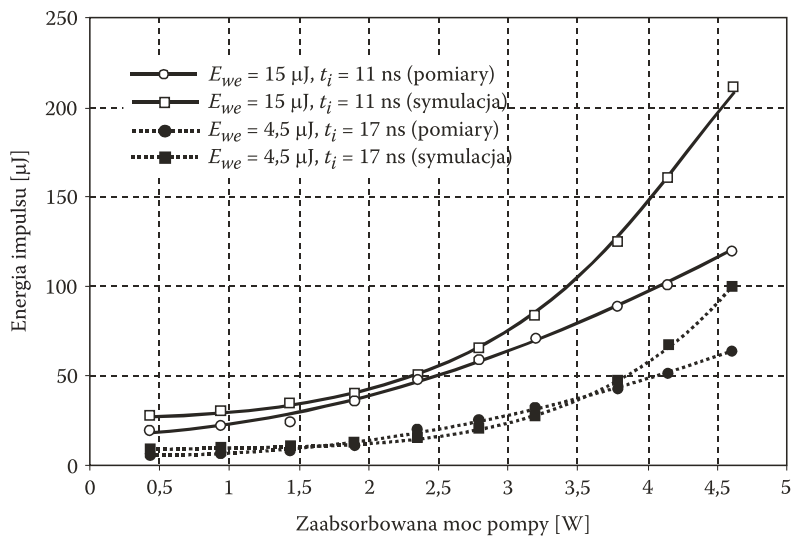
wego z wynikami pomiarów laboratoryjnych. W symulacji wykorzystano parametry odpowiadające (z dużym przybliżeniem) warunkom pracy układu rzeczywistego. Analizę prowadzono przy założeniu, że czas impulsu wzmacnianego jest dużo krótszy od czasu życia poziomu metastabilnego ośrodka czynnego wzmacniacza (ok. 1 ms dla Yb^{3+}) oraz że na impuls propagujący się we włóknie działają jedynie straty rozproszeniowe samego włókna. W analizie nie brano pod uwagę rozkładu przestrzennego wiązki pompującej oraz rozkładu modowego wiązki wzmacnianej. Ponadto w analizie zastosowano wartości przekrojów czynnych dla promieniowania pompy o długości fali 920 nm. W opracowanym układzie dysponowano diodą laserową generującą promieniowanie o długości fali ok. 937 nm.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono zależność energii impulsu po wzmocnieniu w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy dla kilku różnych wartości czasu trwania i energii impulsów podawanych na wejście wzmacniacza. Na zaprezentowanych charakterystykach wykreślone zostały krzywe energetyczne uzyskane z pomiarów oraz krzywe uzyskane na podstawie symulacji komputerowej.



Rys. 8. Charakterystyka zależności energii wzmocnionego impulsu w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy — porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami symulacji komputerowej. Dane dla częstotliwości pracy układu 20 kHz

Z zaprezentowanych powyżej wykresów widać, iż dane uzyskane na drodze symulacji komputerowej są zgodne z danymi pomiarów laboratoryjnych tylko w pewnym przedziale zmienności zaabsorbowanej mocy pompy, zależnym od wielkości energii impulsu podawanego na wejście wzmacniacza. Dla mniejszych



Rys. 9. Charakterystyka zależności energii wzmacnionego impulsu w funkcji zaabsorbowanej mocy pompy — porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami symulacji komputerowej. Dane dla częstotliwości pracy układu 10 kHz

wartości energii impulsów zadawanych wyniki symulacji i pomiarów zachowują dobrą zgodność do wyższego poziomu mocy pompy. Dla analizowanych przypadków — dla energii impulsu do ok. 5 μJ (przy zaabsorbowanej mocy pompy do ok. 3,75 W) można przyjąć, iż wyniki obliczeń numerycznych są zgodne z wynikami badań eksperymentalnych. Powyżej 3,75 W mocy pompy zauważalna jest już znaczna różnica w poziomach energii wyjściowej wzmacnianych impulsów. Dla zaabsorbowanej mocy pompy 4,6 W rozbieżność ta sięga ok. 70%. Podobny charakter zmian można zauważyć przy wzmacnianiu impulsów o nieco większej energii (w analizowanym przypadku impulsy o energii 8,25 μJ i 15 μJ), z tą różnicą, że dla tego przypadku zgodność symulacji komputerowej z wynikami badań laboratoryjnych obowiązuje dla niższej wartości zaabsorbowanej mocy pompy — i tak na przykład dla energii impulsów wejściowych rzędu 15 μJ zgodność wyników symulacji komputerowej z wynikami pomiarów była zachowana dla mocy pompy do ok. 3 W. W tym przypadku dla mocy pompy 4,6 W rozbieżność wyników sięgała nawet 80%. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, iż rozbieżność wyników uzyskanych z symulacji i tych wynikających z pomiarów wzrasta wraz ze wzrostem mocy promieniowania pompującego wzmacniacz. Przyczyną rozbieżności prezentowanych wyników mogło być zjawisko klasterowania domieszki czynnej, blokujące inwersję obsadzeń domieszki ośrodka wzmacniającego oraz powodujące obniżenie sprawności działania układu. W normalnych warunkach, gdy domieszka nie jest sklasterowana, atomy absorbując promieniowanie pompujące przechodzą w stan

wzbudzony, umożliwiając generację/wzmacnianie promieniowania laserowego. Natomiast w przypadku sklasterowania atomów domieszki czynnej zaabsorbowane kwanty promieniowania pompy wprawdzie powodują przejścia atomów w stan wzbudzony, ale jednocześnie zachodzą szybkie procesy relaksacyjne pomiędzy atomami klasteru, przez co atomy te nie biorą udziału w procesie emisji wymuszonej. Zjawisko klasterowania domieszki czynnej jest na tyle niekorzystne, że przy dużej jego skali światłowód aktywny może absorbować promieniowanie pompy, nie będzie zaś generował promieniowania laserowego. Zjawisko to zaczyna odgrywać znaczącą rolę zwłaszcza przy większych mocach promieniowania pompującego wzmacniacz. Ponadto, przy wyższych mocach promieniowania pompującego obecność sygnału wzmocnionej emisji spontanicznej mogła być większa niż ta oszacowana za pomocą opracowanego programu komputerowego. Powyżej określonego poziomu mocy pompy wzrost sygnału ASE mógł być nieliniowy. To tłumaczyłoby rozbieżności wyników zaprezentowanych na rysunkach 8 i 9.

Problem przebadania zgodności opracowanego modelu teoretycznego wzmacniacza MOFPA z układami rzeczywistymi jest zagadnieniem otwartym przy zastosowaniu kilku różnych włókien aktywnych. Należy tu zaznaczyć, iż technika produkcji aktywnych włókien światłowodowych nie jest jeszcze na tyle opanowana, aby gwarantowała uzyskanie włókien o idealnych parametrach (brak klasterów, małe straty rozproszeniowe itp.). Najlepsze rezultaty, prezentowane przez przodujące w tej dziedzinie ośrodki na świecie, dotyczą układów zbudowanych w oparciu o włókna wyselekcjonowane, charakteryzujące się najlepszymi parametrami.

W opracowanym impulsowym układzie MOFPA zastosowano jeden odcinek włókna aktywnego typu LMA i tylko dla tego przypadku dokonano sprawdzenia zgodności opracowanego modelu z wynikami badań laboratoryjnych. Można przyjąć, iż dla opracowanego układu MOFPA zgodność wyników symulacji komputerowej z wynikami pomiarów jest dobra dla niskich poziomów zaabsorbowanej mocy pompy. W przypadku zastosowania włókien lepszych technologicznie jest bardzo prawdopodobne, iż opracowany model wzmacniacza włóknowego jest poprawny w całym zakresie zmian mocy promieniowania pompy.

7. Podsumowanie

Lasery i wzmacniacze włóknowe dużej mocy stanowią w ostatnim czasie jeden z istotniejszych obszarów badań prowadzonych w obszarze techniki laserowej, pozwalają na budowę sprawnych i stabilnych źródeł promieniowania laserowego do zastosowań technologicznych, specjalnych i medycznych. Dzięki swoim zaletom (stosunkowo niski koszt, wysoka sprawność i niezawodność, możliwość generacji promieniowania o bardzo dobrej jakości, brak konieczności chłodzenia ośrodka czynnego wodą) jest to obecnie najbardziej dynamicznie rozwijająca się grupa urządzeń laserowych.

Opracowano, zestawiono i przebadano układ MOFPA, w którym generatorem zadającym był laser Nd:YVO z aktywną Q-modulacją. Układ pracował z częstotliwością repetycji do 40 kHz. Dla częstotliwości repetycji 10 kHz i maksymalnej zaabsorbowanej mocy pompy 4,61 W impulsy zadawane o energii 15 μ J i czasie trwania 11 ns wzmocniono do wartości 120 μ J, co odpowiadało mocy szczytowej 10,9 kW. Czas trwania impulsów wzmocnionych, w stosunku do impulsów zadawanych, nie uległ zmianie. Wzmacniacz pracował ze sprawnością 22,8%. Dla częstotliwości repetycji 40 kHz i zaabsorbowanej mocy pompy 4,61 W uzyskano przeszło 6-krotne wzmocnienie impulsów zadawanych (6,25 μ J, 32ns). Na wyjściu wzmacniacza uzyskano impulsy promieniowania o energii 41,7 μ J i czasie trwania 32 ns. Moc szczytowa impulsów wyjściowych wynosiła 1,3 kW. Czas trwania impulsów wzmocnionych, w stosunku do impulsów zadawanych, nie uległ zmianie. Wzmacniacz pracował ze sprawnością 30,8%.

Ponadto opracowano model numeryczny impulsowego układu MOFPA z ośrodkiem czynnym w postaci aktywnego włókna dwupłaszczowego. Wyniki symulacji komputerowych pokrywały się dobrze z wynikami badań laboratoryjnych przy niewysokich poziomach zaabsorbowanej mocy promieniowania pompującego wzmacniacz. Rozbieżność wyników przy wyższych mocach wzbudzenia mogła wynikać z występowania zjawiska klasterowania domieszki czynnej ośrodka wzmacniającego oraz z większej wartości (niż obliczona za pomocą opracowanego programu komputerowego) sygnału wzmocnionej emisji spontanicznej, powodujących obniżenie sprawności pracy opracowanego układu MOFPA.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.05.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w sierpniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] C. J. KOESTER, E. SNITZER, *Amplification in a fibre laser*, Appl. Opt., 3, 1964, 1182-1186.
- [2] H. PO, E. SNITZER, R. TUMMINELLI, L. ZENETTO, F. HAKIMI, N. M. CHO, T. HAW, *Double-clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array*, in: Proc. of Optical Fiber Communication Conference, paper PD7, Washington D.C., USA, 1989.
- [3] J. LIMPET, A. LIEM, H. ZELLMER, A. TUNNERMANN, *High-average-power millijoule fiber amplifier system*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO'2002, paper CThX3, Long Beach, USA, 2002.
- [4] A. LIEM, J. LIMPET, T. SCHREIBER, S. NOLTE, H. ZELLMER, A. TUNNERMANN, *Femtosecond fiber CPA system with high average power*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO'2002, paper CThX5, Long Beach, USA, 2002.
- [5] A. LIEM, D. NICKEL, J. LIMPET, H. ZELLMER, U. GRIEBNER, S. UNGER, A. TUNNERMANN, G. KORN, *High average power ultra-fast fiber chirped pulse amplification system*, Appl. Phys., B 71, 2000, 889-891.

- [6] A. MALINOWSKI, A. PIPER, J. H. V. PRICE, K. FURUSAWA, Y. JEONG, J. NILSSON, D. J. RICHARDSON, *Ultrashort-pulse Yb³⁺-fiber-based laser and amplifier system producing > 25-W average power*, Opt. Lett., 29, 2004, 2073-2075.
- [7] M. Y. CHEN, Y. C. CHANG, A. GALVANAUSKAS, P. MAMIDIPUDI, R. CHANGKAKOTI, P. GATCHELL, *27-mJ nanosecond pulses in M² = 6.5 beam from a coiled highly multimode Yb-doped fiber amplifier*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO'2004, paper CtuS4, Long Beach, USA, 2004.
- [8] F. ROSER, J. LIMPERT, T. SCHREIBER, H. ZELLMER, A. TUNNERMANN, *High energy ultrashort pulse fiber amplifier without CPA*, in: Proc. of EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State and Fiber Coherent Light Sources, paper TrE3, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [9] Y. A. BARANNIKOV, A. I. OUSOV, F. V. SHCHERBINA, R. I. YAGODKIN, V. P. GAPONTSEV, N. S. PLATONOV, *250 W, single-mode, CW, linearly-polarized fiber source in Yb wavelength range*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO'2004, paper CMS3, Long Beach, USA, 2004.
- [10] J. LIMPERT, S. HOFER, A. LIEM, H. ZELLMER, A. TUNNERMANN, S. KNOKE, H. VOELOCKEL, *100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier*, Appl. Phys., B 75, 2002, 477-479.
- [11] J. LIMPERT, N. DEGUIL-ROBIN, I. MANEK-HONNINGER, F. SALIN, T. SCHREIBER, A. LIEM, F. ROSER, H. ZELLMER, A. TUNNERMANN, A. COURJAUD, C. HONNINGER, E. MOTTAY, *High power picosecond fiber amplifier based on spectral compression*, Opt. Lett., 30, 2005, 714-716.
- [12] P. DUPRIEZ, A. PIPER, A. MALINOWSKI, J. K. SAHU, M. IBSEN, Y. JEONG, L. M. B. HICKEY, M. N. ZERVAS, J. NILSSON, D. J. RICHARDSON, *321 W average power, 1 GHz, 20 ps, 1060 nm pulsed fiber MOPA source*, in: Proc. of Optical Fiber Communications Conference OFC'2005, paper PDP3, Anaheim, USA, 2005.
- [13] Y. JEONG, J. K. SAHU, D. B. SOH, C. CODEMARD, J. NILSSON, *Tunable single-frequency ytterbium-sensitized erbium-doped fiber MOPA source with 150 W (51.8 dBm) of output power at 1563 nm*, in: Proc. of Optical Fiber Communications Conference OFC'2005, paper PDP1, Anaheim, USA, 2005.
- [14] V. GAPONSEV, D. GAPONTSEV, N. PLATONOV, O. OHKURIKHIN, V. FOMIN, A. MASHKIN, M. ABRAMOV, S. FERIN, *2 kW cw ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/Europe'2005, paper CJ1-1-THU, Munich, Germany, 2005.
- [15] F. ROSER, B. ORTAC, J. ROTHARD, O. SCHMIDT, T. SCHREIBER, A. LIEM, J. LIMPERT, A. TUNNERMANN, *131 W 220 fs fiber laser system*, in: Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO/Europe'2005, paper CP3-4-THU, Munich, Germany, 2005.
- [16] T. MIYAZAKI, K. INAGAKI, Y. KARASAWA, M. YOSHIDA, *Nd-doped double-clad fiber amplifier at 1.06 μm*, J. Lightwave Technol., 16, 1998, 562-566.
- [17] A. HARDY, R. ORON, *Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers*, IEEE J. Quantum Electron., 33, 1997, 307-313.
- [18] R. PASCHOTTA, J. NILSSON, A. C. TROPPER, D. C. HANNA, *Ytterbium-doped fiber amplifiers*, IEEE J. Quantum Electron., 33, 1997, 1049-1056.
- [19] C. BARNARD, P. MYSKINSKI, J. CHROSTOWSKI, M. KAVEHRAD, *Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers*, IEEE J. Quantum Electron., 30, 1994, 1817-1830.
- [20] L. XIAO, P. YANG, M. GONG, W. WEI, P. OU, *An approximate analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss*, Opt. Commun., 230, 2004, 401-410.
- [21] J. F. DIGONET, C. J. GAETA, *Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators*, Appl. Opt. 24, 1985, 333-342.

- [22] M. J. F. DIGONNET, *Theory of operation of three- and four-level fiber amplifiers and sources*, in: *Fiber Laser Sources and Amplifiers*, M. J. F. Digonnet (ed.); Proc. of SPIE 1171, 1989, 8-26.
- [23] A. BERTONI, G. C. REALI, *A model for the optimization of double-clad fiber laser operation*, *Appl. Phys.*, B 66, 1998, 547-554.
- [24] H. M. PASK, R. J. CARMAN, D. C. HANNA, A. C. TROPPER, C. J. MACKECHNIE, P. R. BARBER, J. M. DAWES, *Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region*, *IEEE J. Selected Topics Quant. Electron.* 1, 1995, 2-13.

J. ŚWIDERSKI, A. ZAJĄC, Z. JANKIEWICZ,
M. SKÓRCZAKOWSKI, P. KONIECZNY

Pulsed fiber amplifier in MOFPA configuration pumped by a laser diode

Abstract. The paper presents the numerical model of a pulsed fiber amplifier working in nanosecond range. Based on the mathematical description of the fiber amplifier, the computer program allowing us to simulate the system operation was developed. In order to verify the correctness of the computer program worked out, the pulsed fiber amplifier system based on ytterbium-doped double-clad Large Mode Area optical fiber was elaborated. Nanosecond pulses characterized by 11-kW peak power were achieved. The system worked at the efficiency of 30% and generated pulses of radiation at the repetition rate from 10 kHz to 40 kHz.

Keywords: high-power fiber amplifier, active double-clad optical fiber, pulse generation

Universal Decimal Classification: 621.375

