



Wzmacniacz światłowodowy z diodowym generatorem zadającym impulsy promieniowania o nanosekundowym czasie trwania

JACEK ŚWIDERSKI, ANDRZEJ ZAJĄC, MAREK SKÓRCZAKOWSKI

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono opracowany układ laserowy w konfiguracji MOFPA (Master Oscillator Fiber Power Amplifier). Jako generator zadający wykorzystano jednomodową impulsową diodę laserową generującą promieniowanie o długości fali 1060 nm. Jako ośrodek wzmacniający zastosowano włókno dwupłaszczyznowe typu Large Mode Area domieszkowane jonami iterbu, pompowane promieniowaniem o długości fali 978 nm. Opracowany układ laserowy generował ciąg impulsów o czasie trwania od 11 do 200 ns przy częstotliwości repetycji do 500 kHz, regulowanych niezależnie od wzmocnienia układu. W zależności od czasu trwania impulsu oraz częstotliwości repetycji dla maksymalnej mocy pompy wprowadzonej do włókna aktywnego impulsy wejściowe uległy wzmocnieniu od kilkuset do przeszło tysiąca razy.

Słowa kluczowe: wzmacniacz światłowodowy, aktywne włókno dwupłaszczyznowe, generacja impulsowa

Symbole UKD: 621.375.826

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, obróbka materiałów). Obecnie ten obszar zastosowań jest jeszcze zdominowany przez lasery ciała stałego o modulowanej dobroci generujące promieniowanie o długości fali 1064 nm lub jej harmonicznym. Układy MOFPA (*Master Oscillator Fiber Power*

Amplifier) wykorzystujące jako generator zadający (impulsy nanosekundowe) półprzewodnikowe diody laserowe oraz jako medium wzmacniające włókna aktywne typu „double-clad” stanowią wysoce konkurencyjną alternatywę dla ww. konwencjonalnych laserów ciała stałego, zapewniając większą elastyczność (czas trwania impulsów i częstotliwość repetycji jest dobierana niezależnie od parametrów samego ośrodka wzmacniającego), niezawodność oraz mniejsze koszty produkcji [1-3].

Kluczową rolę odgrywa tu zastosowanie, jako ośrodka wzmacniającego, włókna aktywnego typu dwupłaszczyznowego charakteryzującego się między innymi:

- bardzo dużym wzmocnieniem skutkującym niskim progiem generacji,
- wysoką sprawnością generacji wynikającą z bardzo efektywnego pompowania diodowego,
- brakiem konieczności chłodzenia ośrodka aktywnego w zakresie mocy generowanych rzędu kilkudziesięciu watów (głównie ze względu na korzystną relację powierzchni ośrodka do jego objętości),
- stabilnością wynikającą z izolacji ośrodka aktywnego od otoczenia,
- doskonałą jakością wiązki — parametr M^2 praktycznie jest równy jedności.

Zalety te pozwalają na to, aby włókna aktywne stanowiły ośrodki laserujące przede wszystkim laserów ciągłego działania i wzmacniaczy światłowodowych krótkich impulsów.

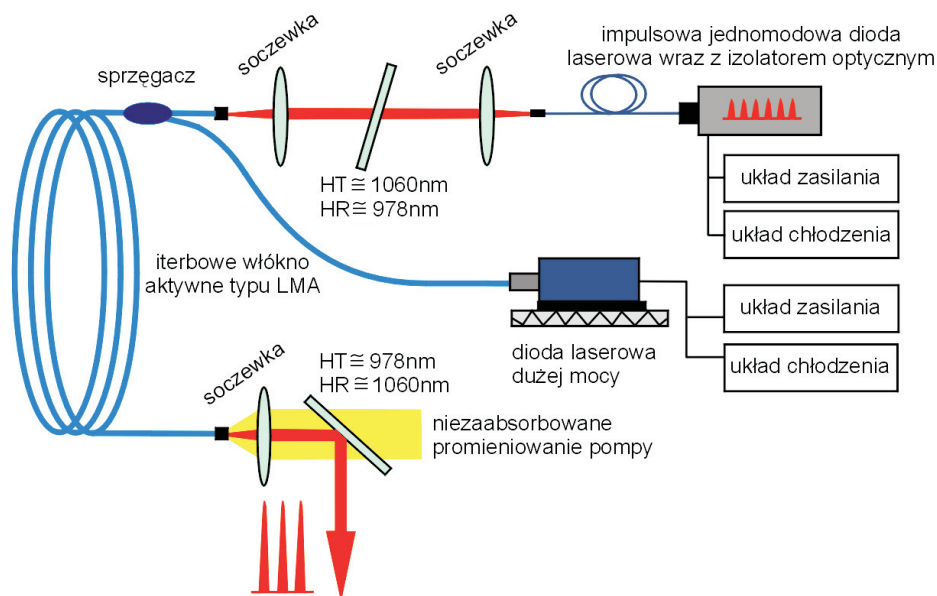
Bardzo interesującym rozwiązaniem układowym jest zastosowanie jako generatora zadającego impulsy promieniowania podawane na wejście wzmacniacza (zamiast impulsowego lasera ciała stałego) impulsowej jednomodowej diody laserowej pracującej w zakresie widmowym 1060 nm. Sprawność tego typu generatorów jest znacznie większa niż sprawność laserów ciała stałego DPSSLs (*Diode-Pumped Solid-State Lasers*), co w konsekwencji skutkuje podniesieniem całkowitej sprawności układu MOFPA. Jest faktem oczywistym, że ma to kluczowy wpływ na cenę finalnego produktu, co z kolei ma istotne znaczenie przy potencjalnych wdrożeniach.

2. Koncepcja wzmacniacza światłowodowego

Układ impulsowego wzmacniacza włóknowego zrealizowano zgodnie z koncepcją przedstawioną na rysunku 1.

W układzie przedstawionym na powyższym rysunku można wyróżnić kilka podstawowych elementów:

- generator zadający impulsy promieniowania,
- włókno aktywne,
- dioda pompująca wzmacniacz,
- układy optomechaniczne obejmujące układy wprowadzania i separacji wiązek laserowych.



Rys. 1. Schemat wzmacniacza włóknowego (przyjęte rozwiązanie układowe)

2.1. Charakterystyka włókna aktywnego

Jako ośrodek wzmacniający zastosowane zostały włókna aktywne (domieszkowane iterbem) typu Large Mode Area (LMA) wyprodukowane przez firmę NUFERN. W tej odmianie aktywnych włókien powiększona została średnica rdzenia przy jednoczesnej redukcji różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszczki wewnętrznej (w porównaniu do zwykłego jednomodowego włókna „double-clad”). Dzięki temu zabiegowi włókna typu LMA zapewniają:

- powiększenie ilości jonów domieszki czynnej na jednostkę długości i co za tym idzie zwiększenie zdolności ośrodka aktywnego do gromadzenia energii,
- obniżenie wartości apertury numerycznej ($NA < 0,1$), co prowadzi do mniejszego kąta rozbieżności generowanej wiązki,
- włókna te domieszkowane są w taki sposób, że w trakcie ich pompowania w rdzeniu aktywnym powstaje zmienny, zależny od odległości od osi światłowodu, współczynnik wzmocnienia ośrodka czynnego. Dzięki temu wiązka promieniowania na wyjściu włókna jest jednomodowa.

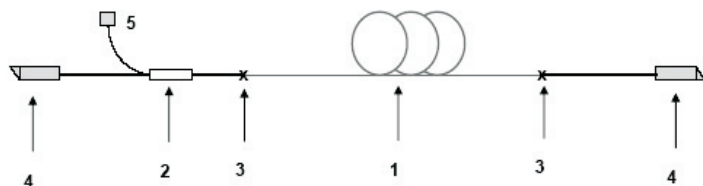
Biorąc pod uwagę powyżej wymienione zalety włókna typu LMA, można stwierdzić, iż zastosowanie tego włókna w układzie MOFPA jako medium wzmac-

niającego jest rozwiązaniem optymalnym. Parametry tego włókna zestawione zostały w tabeli 1.

TABELA 1
Parametry włókna „double-clad” typu LMA domieszkowanego jonami iterbu

Średnica rdzenia	20±2 μm
NA rdzeń-płaszcz wewnętrzny	0,06±0,01
Średnica płaszcz wewnętrzny	400±15 μm
NA płaszcz wewnętrzny — płaszcz zewnętrzny	0,46
Kształt płaszcz wewnętrzny	ośmiokąt
Absorpcja ≅ 915 nm	0,55±0,10 dB/m
Absorpcja ≅ 975 nm	1,7 dB/m

Scharakteryzowane w tabeli 1 włókno aktywne zostało dodatkowo wyposażone (poprzez przyspawanie) w sprzęgacz światłowodowy 2 × 1 (za pomocą którego do włókna doprowadzane było promieniowanie pompujące) oraz dwa odcinki światłowodów pasywnych (dopasowanych gabarytami do włókna aktywnego) z końcami ściętymi pod kątem 82 stopni do osi włókna (w celu odsprężenia układu). Rozwiązanie to przedstawione jest na rysunku 2. Taka konstrukcja modułu włóknowego w sposób znaczący (dzięki zastosowaniu sprzęgacza optycznego) ułatwiła budowę całego układu wzmacniającego MOFPA, eliminując kłopotliwe wprowadzanie promieniowania pompy do włókna aktywnego od strony czoła włókna i tym samym eliminując liczbę komponentów składowych (optycznych i mechanicznych) całego układu. Ponadto rozwiązanie takie sprawia, że wprowadzanie promieniowania pompy do włókna jest bardziej efektywne. W przypadku zastosowania sprzęgacza



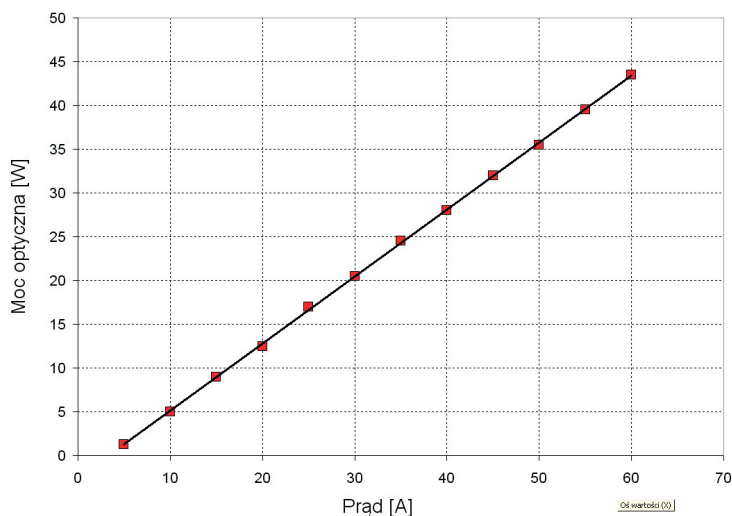
Rys. 2. Szkic modułu włóknowego przeznaczonego do wzmacniania sygnału optycznego: 1 — włókno aktywne domieszkowane jonami iterbu LMA-YDF-20/400; 2 — sprzęgacz światłowodowy 2 × 1 LMA-GDF-20/400 z 1 m odcinkiem światłowodu pasywnego o średnicy rdzenia 400 μm i NA = 0,22; 3 — spawy włókna (20 μm rdzeń i 400 μm płaszcz); 4 — końce światłowodu ścięte pod kątem 82 stopni do osi włókna, oprawione w złącza SMA-905; 5 — koniec światłowodu ścięty prostopadłe do osi włókna, oprawiony w złącze SMA-905

sprawność sprzężenia sięga 95%, zaś w przypadku wprowadzania promieniowania od czoła włókna — ok. 80%. Należy tu jeszcze podkreślić, że w takiej konfiguracji sygnał wzmacniany będzie się propagował współbieżnie z promieniowaniem pompy. Jest to mniej korzystne rozwiązanie z punktu widzenia odbioru energii zgromadzonej w ośrodku aktywnym, jednakże przy takim rozwiązaniu istnieje znacznie mniejsze niebezpieczeństwo uszkodzenia izolatora optycznego oraz generatora zadającego niezaabsorbowanym promieniowaniem pompy.

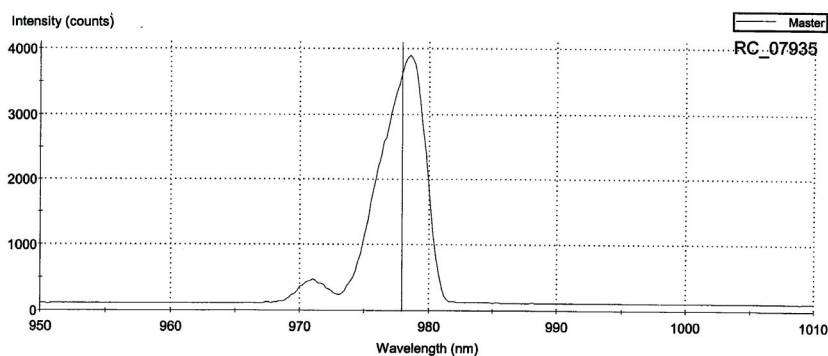
2.2. Charakterystyka diody laserowej pompującej wzmacniacz

W układzie wzmacniacza włóknowego, zaprezentowanego na rysunku 1 jako źródło pompujące użyto półprzewodnikowej diody laserowej z wyjściem światłowodowym JOLD-45-CPXF.1L (S/N: RC_07935) firmy JENOPTIK Laserdiode GmbH. Dioda laserowa generowała 43,7 W mocy ciągłej (rys. 3). Centralna długość fali (dla temperatury pracy 25°C) wynosiła 977,9 nm (rys. 4). Szerokość widma generacji wynosiła $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 4,1$ nm.

Dioda wyposażona była w 1,5 m odcinek światłowodu transmisyjnego cechującego się średnicą rdzenia 400 μm i aperturą numeryczną $\text{NA} = 0,22$.



Rys. 3. Charakterystyka mocy wyjściowej diody JOLD-45-CPXF.1L w funkcji prądu zasilającego



Rys. 4. Widmo emisji diody JOLD-45-CPXF.1L dla temperatury pracy 25°C

2.3. Charakterystyka generatora zadającego impulsy promieniowania

Jako źródło impulsowego promieniowania podawanego na wejście wzmacniacza użyto jednodowej diody półprzewodnikowej PSL10-1064-0-1-2-1 (produkcji Multiwave Photonics, SA) generującej w zakresie 1 mikrona. Dioda ta wyposażona była w izolator optyczny. Szczegółowa charakterystyka parametrów optycznych tego generatora przedstawiona została w tabeli 2.

TABELA 2

Zestawienie parametrów diody laserowej PSL10-1064-0-1-2-1

Parametr	Wartość zmierzona
Centralna długość fali generacji λ_g	1063,91 nm
Dokładność pomiaru długości fali $\Delta\lambda_g$	0,1 nm
Szerokość widma generacji (dla 3 dB)	0,52 nm
Szerokość widma generacji (dla 10 dB)	1,01 nm
Minimalny czas trwania impulsu	8,3 ns
Maksymalny czas trwania impulsu	260 ns
Minimalna częstotliwość repetycji	1 Hz
Maksymalna częstotliwość repetycji	1 MHz
Czas narastania zbocza impulsu	6,2 ns
Czas opadania zbocza impulsu	4,1 ns

Generator ten pracuje jako elektryczno-optyczny konwerter sygnału o szerokości pasma ok. 175 MHz. Oznacza to, że każdy elektryczny sygnał wejściowy jest przekształcany na odpowiednik w postaci wyjściowego sygnału optycznego w granicach ww. pasma, pozwalając tym samym na formowanie kształtu impulsów wyjściowych. Jest to o tyle wygodne, że jeżeli przykładowo wiemy, że na wyjściu danego wzmacniacza pojawia się zniekształcenie wzmacnionych impulsów powodowane nasyceniem wzmacnienia lub innymi efektami, to wówczas wejściowe impulsy elektryczne mogą być dopasowane *a priori* w celu kompensacji tych zniekształceń.

Generator dodatkowo wyposażony został, jako część integralna modułu, w układy elektroniczne pozwalające na kontrolę napięcia polaryzacji (bias) oraz temperatury. Cały układ zasilany był napięciem DC o wartości 7,5 V — zużycie mocy przy temperaturze pracy 25°C nie przekraczało 3 W.

Do generatora diodowego, w celu regulacji częstotliwości repetycji i czasu trwania impulsów dołączany był generator sygnałowy (wejście 50 Ω, zakres amplitudy: 0-2 V). Wartość znamionowa mocy szczytowej wyjściowych impulsów optycznych było osiągnięta przy maksymalnej wartości amplitudy wejściowych impulsów elektrycznych (2 V). Zmniejszenie amplitudy impulsów elektrycznych pociągało za sobą zmniejszenie mocy szczytowej impulsów optycznych — była to zależność liniowa.

Opisywany generator diodowy wyposażony był w odcinek światłowodu pasywnego PM980 o parametrach zestawionych w tabeli 3.

TABELA 3

Zestawienie parametrów światłowodu pasywnego PM980

Parametr	Wartość znamionowa
Średnica pola modu	$6,6 \pm 1,0 \mu\text{m} \cong 980 \text{ nm}$
Apertura numeryczna	0,1
Tłumienność	3 dB/km
Średnica płaszczka	$125 \pm 1 \mu\text{m}$
Średnica pokrycia	$225 \pm 15 \mu\text{m}$

Światłowód ten wykonany był w wersji PM (Polarization Maintaining) — typ Panda — utrzymujący polaryzację. Współczynnik wygaszania polaryzacji PER (Polarization Extinction Ratio) wynosił > 22 dB. Koniec światłowodu oprawiony był w złącze FC/APC minimalizujące odbicia wsteczne.

2.4. Charakterystyka układów optycznych formowania wiązki laserowej

Układy optomechaniczne obejmują układy wprowadzania i separacji wiązek laserowych. Są one konieczne do sprawnego i prostego w obsłudze wprowadzania/ /wyprowadzania wiązki promieniowania z generatora zadającego do rdzenia światłowodu aktywnego oraz separacji wiązki laserowej i wiązki niezaabsorbowanego promieniowania pompy na wyjściu układu. W skład takich układów wchodzi: zespół manipulatorów mechanicznych o dość dużej liczbie stopni swobody, układy optyczne kolimujące i ogniskujące wiązkę światła, zwierciadła dichroiczne.

Układ optomechaniczny służący do wyprowadzenia wiązki wzmacnianej zbudowany był na bazie optyki asferycznej. Rozwiązanie takie jest skuteczne i najtańsze. W eksperymencie wejściowy układ wprowadzania składał się z dwóch soczewek asferycznych firmy Kodak scharakteryzowanych w tabeli 4 oraz zwierciadła dichroicznego ($HT \cong 064 \text{ nm}$, $HR \cong 976 \text{ nm}$) usytuowanego pomiędzy soczewkami. Soczewki oddalone były od siebie o ok. 4 cm.

TABELA 4

Parametry soczewek użytych do budowy układu wprowadzania wiązki promieniowania wzmacnianego

	Soczewka wyjściowa Kodak A397	Soczewka wejściowa Kodak A390
długość fali, dla której soczewka jest skorygowana	670 nm	655 nm
apertura numeryczna	0,3	0,53
materiał	BK7	BK7
apertura	6,59 mm	4,89 mm
ogniskowa	11 mm	4,6 mm

Układ taki pozwalał na skupienie wiązki wprowadzanej na czole włókna aktywnego do średnicy ok. 17 μm przy zachowaniu apertury numerycznej poniżej wartości 0,06 (poniżej wartości apertury numerycznej rdzenia aktywnego włókna). Za soczewką wyjściową usytuowany był koniec włókna aktywnego — umieszczony w precyzyjnym uchwycie mechanicznym umożliwiającym przesuw jego czoła w kierunku x,y,z. Uchwyt ten wyposażony był w dwie śruby z przesuwem różnicowym (w kierunku x,y) umożliwiające przesunięcie z dokładnością poniżej 100 nm.

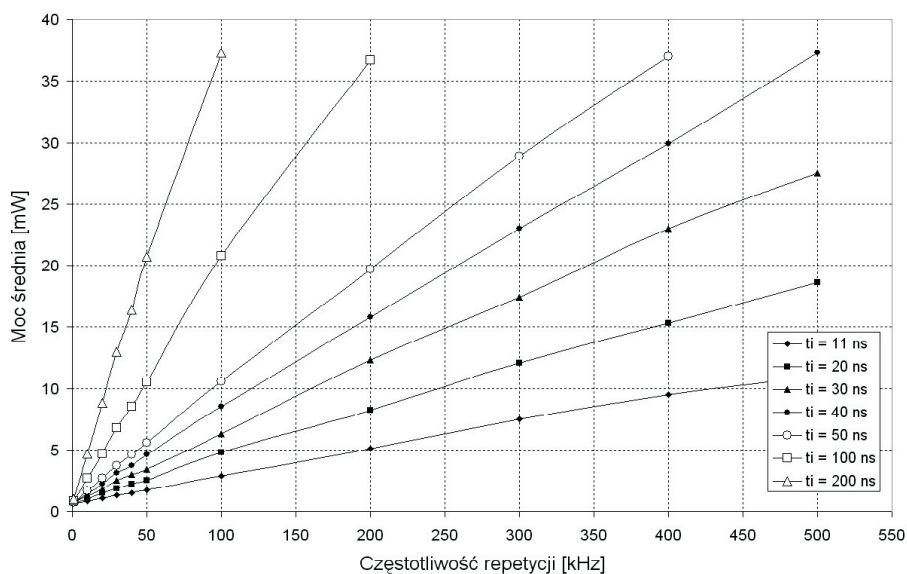
Wyjściowy układ optyczny składał się z soczewki asferycznej firmy Geltech (soczewka nr 352240, ogniskowa 8 mm, apertura numeryczna 0,5) oraz zwierciadła dichroicznego ($HT \cong 1060 \text{ nm}$, $HR \cong 976 \text{ nm}$) separującego wiązkę nieza-

absorbowanego we włóknie promieniowania pompy od wiązki promieniowania wzmacnionego.

Scharakteryzowane powyżej układy cechowały się prostotą wykonania, zaś ich konstrukcja podyktowana była dostępnością elementów składowych. Oferowały one dobre sprzężenie pomiędzy światłowodem aktywnym a wiązką promieniowania wzmacnianego.

3. Wyniki badań laboratoryjnych

Prowadząc badania generacji laserowej w opracowanym układzie MOFPA, w pierwszej kolejności dokonano pomiaru mocy średniej generowanych impulsów w funkcji częstotliwości repetycji, dla kilku różnych wartości czasu trwania generowanych impulsów. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyka czasowo-energetyczna diodowego modułu impulsowego PSL10-1064-0-1-2-1

Pomiaru mocy średniej promieniowania laserowego w funkcji częstotliwości repetycji (w zakresie od 1 kHz do 500 kHz) dokonano dla siedmiu wartości czasu trwania generowanych impulsów: 11, 20, 30, 40, 50, 100 i 200 ns. Czas trwania najkrótszego wygenerowanego impulsu wynosił ok. 11 ns. Układ umożliwił co prawda generację impulsów poniżej 10 ns, jednakże zastosowany w eksperymencie

generator impulsowy (PGP-7) nie pozwalał na uzyskanie impulsów poniżej tej wartości.

Jak widać z charakterystyki zaprezentowanej na rysunku 5, wraz ze wzrostem częstotliwości repetycji rośnie moc średnia generowanego promieniowania i poziom tej mocy jest większy dla impulsów o coraz to dłuższym czasie trwania. Generator diodowy był tak sterowany, aby nie przekraczać wartości współczynnika wypełnienia (DC — *Duty Cycle*) powyżej wartości 2% (ograniczenie układowe), co determinowało możliwość generacji impulsów o dłuższym czasie trwania przy wyższych częstotliwościach. Z zaprezentowanej charakterystyki można określić energię w impulsie — dane te zestawiono w tabeli 5.

TABELA 5

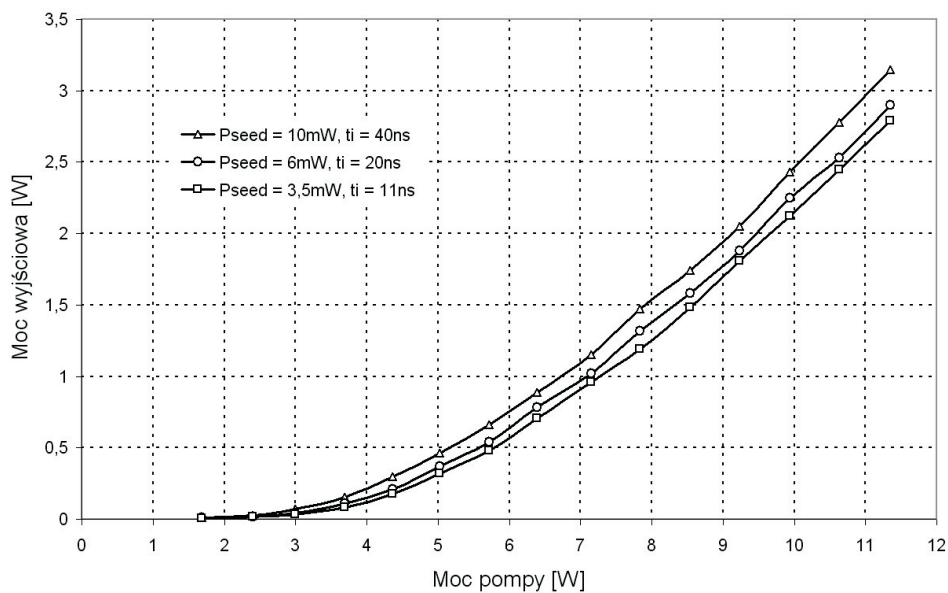
Zestawienie wartości energii generowanych impulsów

		Czas trwania impulsu [ns]						
		11	20	30	40	50	100	200
Częstotliwość repetycji [kHz]	1	670 nJ	690 nJ	710 nJ	730 nJ	750 nJ	850 nJ	1,05 μ J
	10	86 nJ	105 nJ	125 nJ	145 nJ	170 nJ	270 nJ	470 nJ
	20	55 nJ	75 nJ	90 nJ	110 nJ	135 nJ	235 nJ	440 nJ
	30	44 nJ	61 nJ	83 nJ	103 nJ	123 nJ	226 nJ	433 nJ
	40	38 nJ	56 nJ	75 nJ	93 nJ	115 nJ	212 nJ	422 nJ
	50	35 nJ	50 nJ	68 nJ	92 nJ	112 nJ	210 nJ	414 nJ
	100	29 nJ	48 nJ	63 nJ	85 nJ	106 nJ	208 nJ	383 nJ
	200	25 nJ	41 nJ	61 nJ	79 nJ	98 nJ	183 nJ	—
	300	25 nJ	40 nJ	58 nJ	76 nJ	96 nJ	—	—
	400	23 nJ	38 nJ	57 nJ	74 nJ	92 nJ	—	—
500	22 nJ	37 nJ	55 nJ	74 nJ	—	—	—	

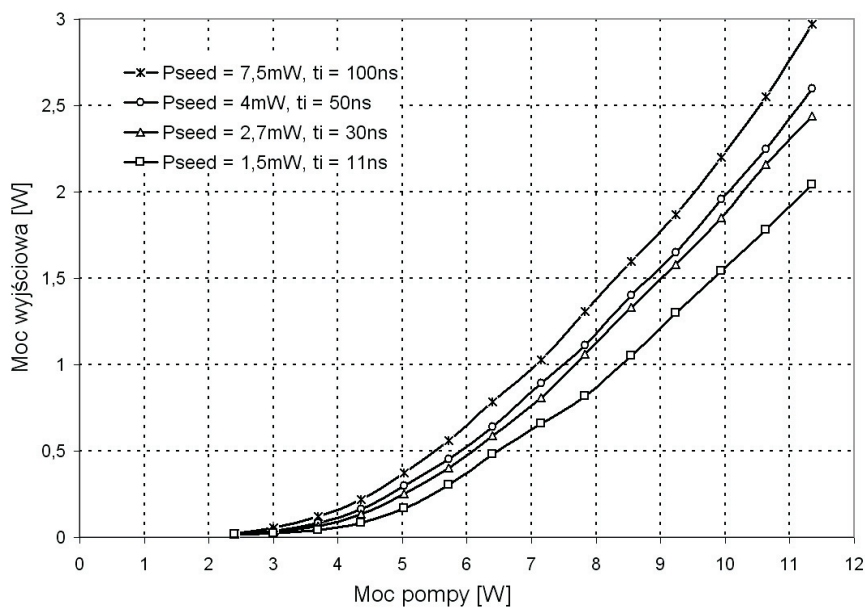
W układzie diodowego wzmacniacza MOFPA dokonano pomiaru charakterystyk czasowo-energetycznych wzmocnionego promieniowania. Pomiaru dokonano dla trzech wartości częstotliwości repetycji (500 kHz, 100 kHz i 50 kHz) oraz kilku wartości czasu trwania wzmocnianych impulsów (z przedziału 11-200 ns). Dokonano również pomiaru charakterystyk widmowych dla różnych wartości mocy pompującej wzmacniacz. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunkach 6-12.

Sprawność wprowadzania promieniowania z diodowego generatora zadającego do włókna aktywnego była na poziomie ok. 60%.

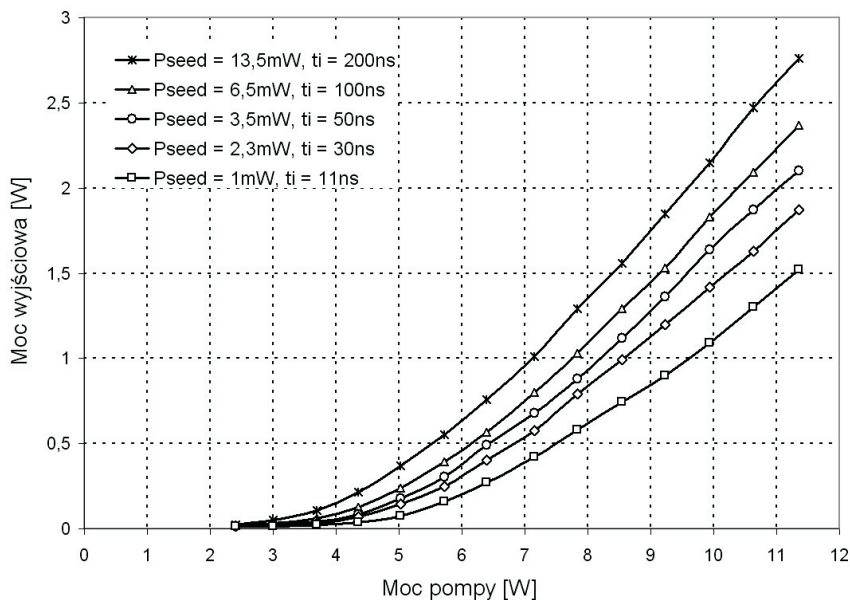
Na rysunkach 6-8 przedstawione zostały zależności średniej mocy wyjściowej wzmocnionych impulsów w funkcji mocy pompy dostarczonej do włókna aktywnego dla trzech wartości częstotliwości repetycji (500 kHz, 100 kHz i 50 kHz) oraz kilku wartości czasu trwania impulsów wzmocnianych. Charakter zmian krzywych na wszystkich wykresach jest bardzo podobny — wraz ze wzrostem mocy pompy rośnie moc wyjściowa sygnału wzmocnionego, przy czym poziom tej mocy zależy od mocy średniej sygnału podawanego na wejście wzmacniacza



Rys. 6. Charakterystyka wyjściowej mocy średniej wzmacnionych impulsów w funkcji mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza dla kilku wartości czasu trwania impulsu (częstotliwość repetycji — 500 kHz)



Rys. 7. Charakterystyka wyjściowej mocy średniej wzmacnionych impulsów w funkcji mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza dla kilku wartości czasu trwania impulsu (częstotliwość repetycji — 100 kHz)



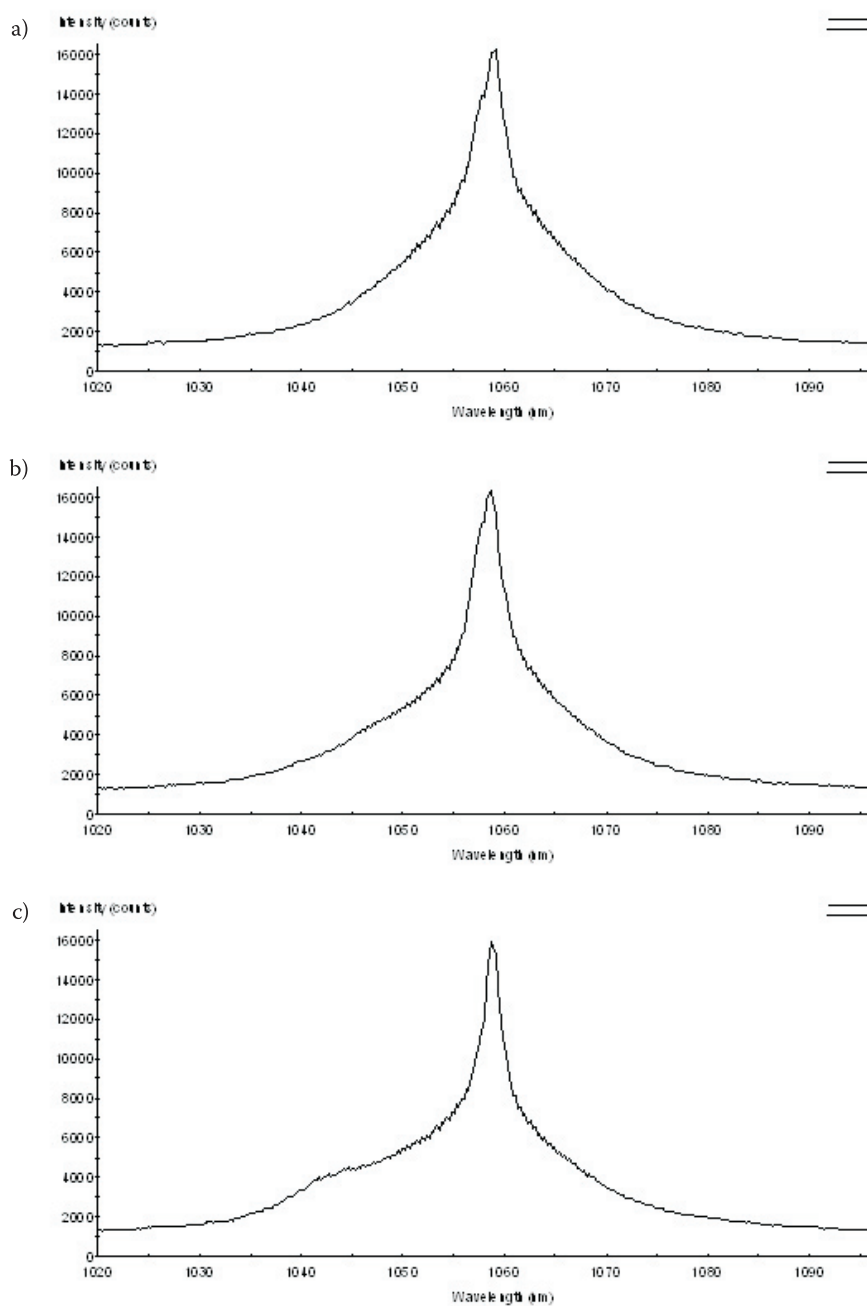
Rys. 8. Charakterystyka wyjściowej mocy średniej wzmacnionych impulsów w funkcji mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza dla kilku wartości czasu trwania impulsu (częstotliwość repetycji — 50 kHz)

(co wiąże się bezpośrednio z różnymi czasami trwania impulsów przy zadanej częstotliwości repetycji).

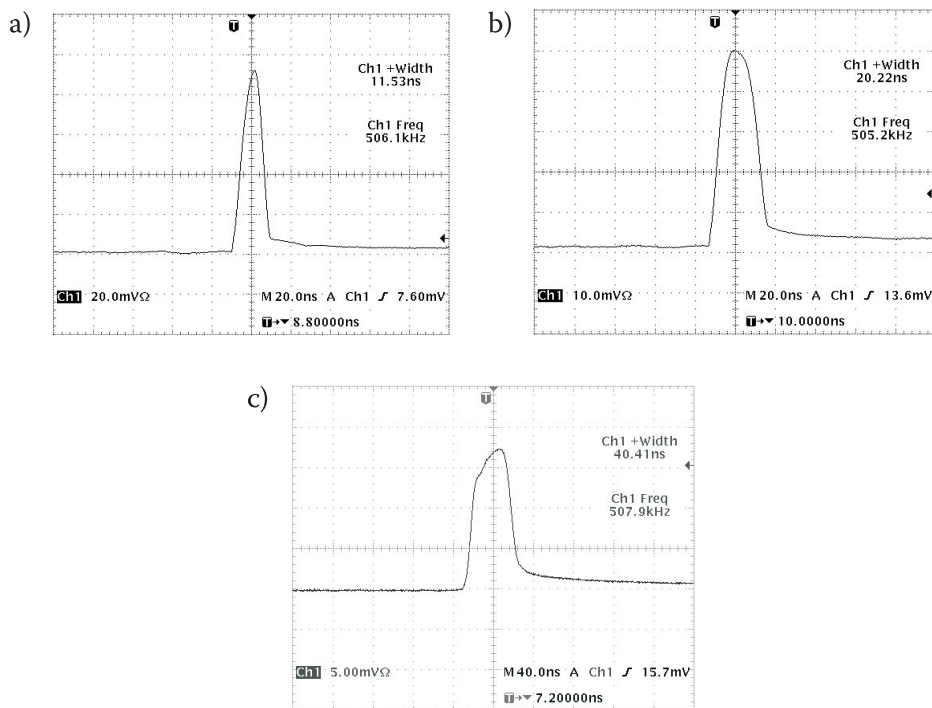
Dla częstotliwości 500 kHz dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych dla trzech wartości czasu trwania impulsów wzmacnianych 40 ns, 20 ns i 11 ns. Energia tychże impulsów wynosiła odpowiednio 20 nJ, 12 nJ i 7 nJ. Po wzmacnieniu, dla maksymalnej wartości mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza, impulsy te charakteryzowały się odpowiednio energiami: 6,3 μ J (wzrost energii o 315 razy), 5,8 μ J (wzrost energii o 483 razy), 5,6 μ J (wzrost energii o 797 razy).

Dla częstotliwości 100 kHz dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych dla czterech wartości czasu trwania impulsów wzmacnianych 100 ns, 50 ns, 30 ns i 11 ns. Energia tychże impulsów wynosiła odpowiednio 75 nJ, 40 nJ, 27 nJ i 15 nJ. Po wzmacnieniu, dla maksymalnej wartości mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza, impulsy te charakteryzowały się odpowiednio energiami: 29,7 μ J (wzrost energii o 396 razy), 26 μ J (wzrost energii o 650 razy), 24,4 μ J (wzrost energii o 903 razy) oraz 20,4 μ J (wzrost energii o 1360 razy).

Dla częstotliwości 50 kHz dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych dla pięciu wartości czasu trwania impulsów wzmacnianych 200 ns, 100 ns, 50 ns, 30 ns i 11 ns. Energia tych impulsów wynosiła odpowiednio 270 nJ, 130 nJ, 70 nJ, 46 nJ i 20 nJ. Po wzmacnieniu, dla maksymalnej wartości mocy pompy dostarczonej do wzmacniacza, impulsy te charakteryzowały się odpowiednio energiami:



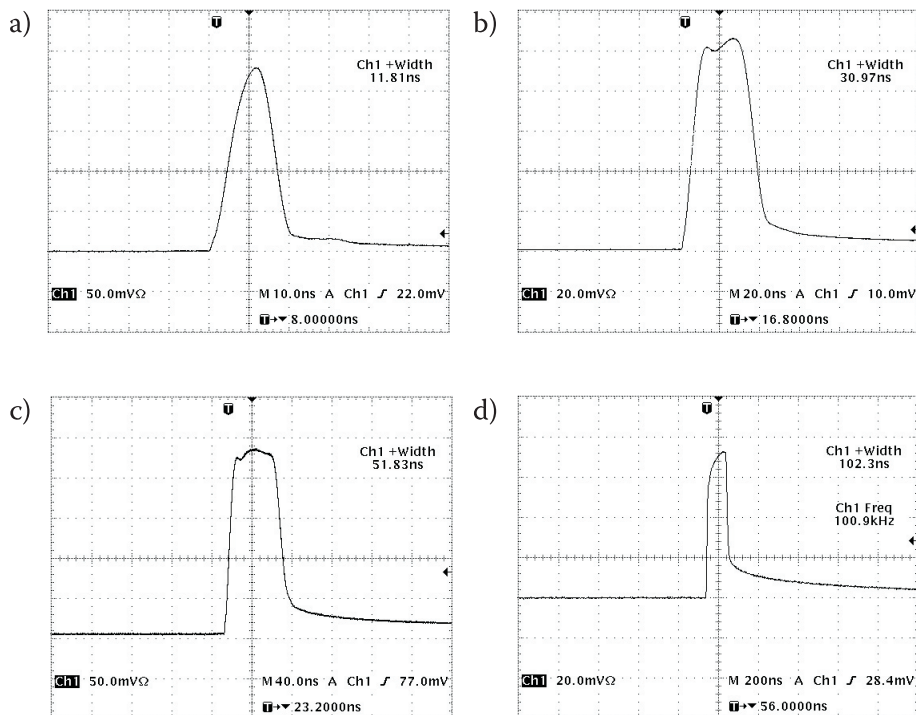
Rys. 9. Widmo sygnału wzmacnionego dla częstotliwości repetycji 50 kHz i czasu trwania impulsu 11 ns dla mocy pompy 4,4 W (a), 7,8 W (b) oraz 11,4 W (c)



Rys. 10. Przykładowe oscylogramy wzmacnionych impulsów o czasie trwania 11 ns (a), 20 ns (b) oraz 40 ns (c) zarejestrowane przy częstotliwości repetycji 500 kHz i mocy pompy 11,4 W

55,2 μJ (wzrost energii o 204 razy), 47,4 μJ (wzrost energii o 364 razy), 42 μJ (wzrost energii o 600 razy), 37,4 μJ (wzrost energii o 813 razy) oraz 30,4 μJ (wzrost energii o 1520 razy).

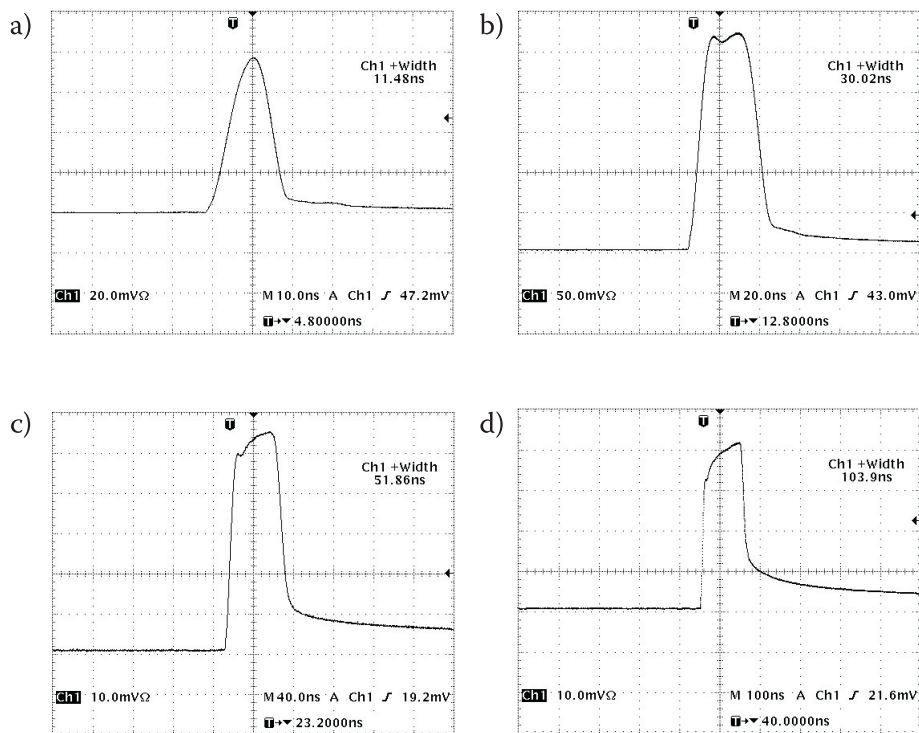
Wzmacniacz pracował ze sprawnością poniżej 30% i sprawność ta zależała od poziomu sygnału zadawanego na jego wejście. Im poziom tego sygnału był wyższy, tym i sprawność była wyższa. W zastosowanym układzie maksymalna wartość energii impulsów podawanych na wejście wzmacniacza nie przekraczała wartości 300 nJ, podczas gdy energia wysycenia dla zastosowanego włókna aktywnego wynosiła ok. 300 μJ . Oznacza to, że wzmacniacz pracował w warunkach dalekich od warunków optymalnych. Fakt ten tłumaczy również duże wzmocnienie, jakie zostało osiągnięte podczas eksperymentów. Słabszy sygnał wejściowy ulega bardzo 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



Rys. 11. Przykładowe oscylogramy wzmocnionych impulsów o czasie trwania 11 ns (a), 30 ns (b), 50 ns (c) oraz 100 ns (d) zarejestrowane przy częstotliwości repetycji 100 kHz i mocy pompy 11,4 W

energię zgromadzoną we wzmacniaczu — wówczas sprawność takiego układu jest najwyższa. W tym miejscu należy również zaznaczyć, iż sprawność układu oraz poziom energii impulsów wyjściowych mogły zostać zawyżone na skutek obecności w wiązce wyjściowej sygnału wzmocnionej emisji spontanicznej ASE (Amplified Spontaneous Emission). Sytuacji tej sprzyja silnie pompowany ośrodek wzmacniający, jakim jest włókno aktywne typu „double-clad”, zwłaszcza w warunkach dalekich od wysycenia i przy niskich częstotliwościach repetycji.

Na rysunku 9 zaprezentowano zarejestrowane widma wzmocnionego promieniowania dla częstotliwości repetycji 50 kHz, dla trzech wartości mocy pompy dostarczonej do włókna: 4,4 W, 7,8 W i 11,4 W. Pomiarów te wykonano za pomocą spektrometru HR4000 firmy Ocean Optics, Inc. Posiadane oprogramowanie do ww. spektrometru nie pozwoliło na dokładne oszacowanie wielkości sygnału wzmocnionej emisji spontanicznej. Jednak, jak można było przewidzieć, ten niepożądany szum optyczny zaczyna ujawniać się przy niższych wartościach częstotliwości repetycji — w sytuacji, kiedy odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi generowanymi impulsami jest na tyle duży, aby ASE zaczęło odgrywać istotną rolę, zaniżając tym



Rys. 12. Przykładowe oscylogramy wzmocnionych impulsów o czasie trwania 11 ns (a), 30 ns (b), 50 ns (c) oraz 100 ns (d) zarejestrowane przy częstotliwości repetycji 50 kHz i mocy pompy 11,4 W

samym rzeczywisty poziom sygnału wzmocnionego. Sytuację taką widać w szczególności na rysunku 9c (amplituda sygnału po lewej stronie od maksimum piku emisji wzrosła w sposób zauważalny). Uniknięciem tej niekorzystnej sytuacji jest praca przy wyższych częstotliwościach repetycji (ale nie we wszystkich aplikacjach może to być akceptowalne) lub zwiększenie poziomu sygnału podawanego na wejście wzmacniacza — tak aby odbierał całą energię zgromadzoną w ośrodku aktywnym.

W całym zakresie zmian częstotliwości repetycji (50-500 kHz) czas trwania impulsów wzmocnionych nie uległ zmianie w stosunku do czasu trwania impulsów podawanych na wejście wzmacniacza. 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. Przykładowe zarejestrowane obrazy oscyloskopowe dla częstotliwości repetycji 500 kHz, 100 kHz i 50 kHz

przedstawione zostały na rysunkach 10-12. Wzmacniane impulsy o dłuższych czasach trwania (powyżej 20 ns) były nieco zniekształcone, jednakże zniekształcenia te nie były spowodowane efektami występującymi podczas procesu wzmacniania. Ich kształt był identyczny w stosunku do impulsów podawanych na wejście wzmacniacza. Impulsy wejściowe (optyczne) były z kolei odpowiedzią impulsowej diody laserowej na sterujące (prostokątne) impulsy elektryczne zadane z zastosowanego generatora impulsowego PGP-7. Nie prowadzono eksperymentów z impulsami o czasie trwania dłuższym niż 200 ns (podczas pracy generatora zadającego nie przekroczono wartości współczynnika wypełnienia powyżej 2%).

W przypadku włóknowych układów wzmacniających w konfiguracji MOFPA z półprzewodnikowym generatorem zadającym, aby uzyskać wysokie energie (zakres mJ) i tym samym wysokie moce szczytowe (zakres 10 kW) w impulsie wymagane jest wzmocnienie układu na poziomie 40-50 dB. Jest to spowodowane osiąganymi, jak dotychczas, niewielkimi mocami szczytowymi impulsów „dostarczanych” przez impulsowe półprzewodnikowe diody laserowe. Spotykamy się zatem z sytuacją, gdzie w ośrodku włóknowym o bardzo dużym wzmocnieniu propagują się impulsy o energii znacznie poniżej energii wysycenia, co może powodować deformację ich kształtu — na skutek zubożenia poziomu inwersji obsadzeń w czasie trwania wzmacnianego impulsu. Zniekształcenia impulsu będą wpływać na czas trwania i moc szczytową impulsów wzmacnianych w sposób nieliniowy [4]. Ma to istotne znaczenie w tych przypadkach, gdzie czas trwania impulsu lub jego kształt odgrywają istotną rolę. Należy tu również podkreślić, że sytuacja taka wpływa na obniżenie progu energetycznego występowania zjawiska wymuszonego rozpraszania Ramana SRS (Stimulated Raman Scattering), które to zaczyna mieć istotny (niepożądany) wpływ powyżej krytycznej wartości mocy szczytowej impulsu dla danej długości ośrodka wzmacniającego (w naszym przypadku włókna aktywnego) [5]. Innymi słowy, zjawisko SRS działa jak ogranicznik mocy szczytowej impulsów generowanych na danej długości fali, efektywnie rozpraszając tę wiązkę na inne długości fali.

W opracowanym układzie MOFPA pracowano przy znacznie niższych wartościach wzmocnienia niż 50 dB i stąd też efekt zmiany kształtu impulsu nie występował.

4. Podsumowanie

Opracowano nowoczesny, na miarę XXI wieku, układ *generator zadający* — *włóknowy wzmacniacz mocy* wykorzystujący jako źródło impulsów zadawanych jednomodową impulsową diodę laserową. Układ ten pracował z częstotliwością repetycji w przedziale 50-500 kHz, generował impulsy promieniowania z przedziału 11-200 ns o maksymalnej mocy średniej (dla częstotliwości repetycji 500 kHz) wy-

noszącej 3,15 W przy 11,4 W mocy pompy wprowadzonej do włókna aktywnego. W tym przypadku sprawność układu wynosiła ok. 30%. Maksymalne wzmocnienie układu było na poziomie max. 32 dB. Powodem niewysokiej osiągniętej sprawności było małe wysycenie ośrodka aktywnego. W całym zakresie zmian częstotliwości repetycji (50-500 kHz) czas trwania impulsów wzmocnionych nie uległ zmianie w stosunku do czasu trwania impulsów podawanych na wejście wzmacniacza.

Biorąc pod uwagę dość znaczne energie wysycenia dla aktywnych włókien typu LMA (rzędu 100-400 μJ) w stosunku do energii impulsów generowanych przez obecnie dostępne jednomodowe diody impulsowe (na zakres 1 μm) wynoszące do kilkuset nJ, efektywną konstrukcją będzie dwukaskadowy wzmacniacz światłowodowy, w którym to pierwszy stopień wzmocnienia będzie wykorzystywał włókno aktywne z rdzeniem o średnicy max. 15 μm pompowane kilkoma diodami laserowymi z wyjściami światłowodowymi przyspawanymi do włókna aktywnego za pośrednictwem sprzęgacza światłowodowego (np. 6 x 1). Moc tych diod nie musi być wysoka — na poziomie kilku W. Takie rozwiązanie jest tańsze od zastosowania jednej diody pompującej o mocy będącej sumą mocy z kilku „słabszych” diod. Ponadto diody generujące promieniowanie o mocy kilku W mogą być chłodzone tylko powietrzem. Pierwszy stopień wzmacniający powinien dostarczać impulsów o energii zbliżonej do energii nasycenia ośrodka czynnego drugiego stopnia wzmacniającego (drugiej kaskady), tak aby sprawność tej drugiej kaskady była największa. W przypadku drugiego stopnia wzmacniającego można zastosować włókno o większej średnicy (w celu zwiększenia energii zgromadzonej w ośrodku), jednakże o wartości gwarantującej pracę jednomodową, gdzie parametr jakości wiązki laserowej byłby równy lub bliski jedności.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. ŚWIDERSKI, A. ZAJĄC, P. KONIECZNY, M. SKÓRCZAKOWSKI, *Q-switched Nd-doped double-clad fiber laser*, Opto-Electron. Rev., 13, 3, 2005, 29-33.
- [2] K. T. VU, A. MALINOWSKI, D. J. RICHARDSON, *Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond MOPA system*, Optics Express, 14, 23, 2006, 10966-11001.
- [3] J. CLOWES, A. GRUDININ, *The rising power in ultrafast technology*, Laser Focus World, 41, 5, 2005 (http://www.laserfocusworld.com/articles/article_display.html?id=227803).
- [4] L. M. FRANTZ, J. S. NODVIK, *Theory of pulse propagation in a laser amplifier*, J. Appl. Phys., 34, 1963, 2346-2349.
- [5] R. G. SMITH, *Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering*, Appl. Opt., 11, 1972, 2489-2494.

J. ŚWIDERSKI, A. ZAJĄC, M. SKÓRCZAKOWSKI

Fiber amplifier with a diode seed generating pulses of nanosecond duration

Abstract. The paper presents the developed laser system in MOFPA configuration (Master Oscillator Fiber Power Amplifier). A pulsed single-mode laser diode operating at the wavelength of 1060-nm was used as a seed. An ytterbium-doped double-clad Large Mode Area fiber pumped by the radiation of 978 nm played a role of an active medium. The developed laser system generated a pulse train with a duration ranging from 11 ns to 200 ns at repetition rate up to 500 kHz, regulated independently of the system gain. Depending on pulse duration and repetition rate (for maximum pump power launched into the active fiber) the output pulses have been amplified from a couple of hundred to over a thousand times.

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

Universal Decimal Classification: 621.375.826

