

Tlenek grafenu jako pasywny modulator dobroci w laserze na ceramice Nd:YAG

Dariusz Podniesiński, Krzysztof Librant, Anna Kozłowska, Magdalena Nakielska, Ludwika Lipińska

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
e-mail: dariusz.podniesinski@itme.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawione zostały wyniki eksperymentów generacyjnych, w układzie lasera na ceramice Nd:YAG z pasywnym modulatorem dobroci zbudowanym na bazie tlenku grafenu. Opisano sposób przygotowania próbek tlenku grafenu na podłożu płytek szkła SiO₂, zbudowane stanowisko lasera oraz sposób przeprowadzenia pomiarów. Badany tlenek grafenu, wytworzony w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych, wykazał właściwości nasycalnego absorbera. Zastosowanie tlenku grafenu o transmitancji w zakresie 80 ÷ 86 % pozwoliło uzyskać na wyjściu lasera generację impulsową o częstotliwości w zakresie 54 ÷ 250 kHz. Zarejestrowana maksymalna średnia moc wyjściowa lasera wyniosła $P_{sr} = 330$ mW.

Słowa kluczowe: grafen, tlenek grafenu, laser na ciele stałym, nasycalny absorber

Graphene oxide as passively Q - switched modulator for ceramic Nd:YAG laser

Abstract: This paper presents the results of generation experiments in the setup of a ceramic Nd:YAG laser with graphene oxide as a passive Q - switched modulator. The preparation method of graphene oxide samples on the surface of SiO₂ glass, the arrangement of the laser setup and the measurement method are also described. The studied graphene oxide produced at the Institute of Electronic Materials Technology showed the properties of a saturable absorber. The application of graphene oxide with transmittance in the range of (80 - 86) % allowed the pulse laser operation in the frequency range of (54 - 250) kHz. The maximum recorded average output power of the laser was $P_{av} = 330$ mW.

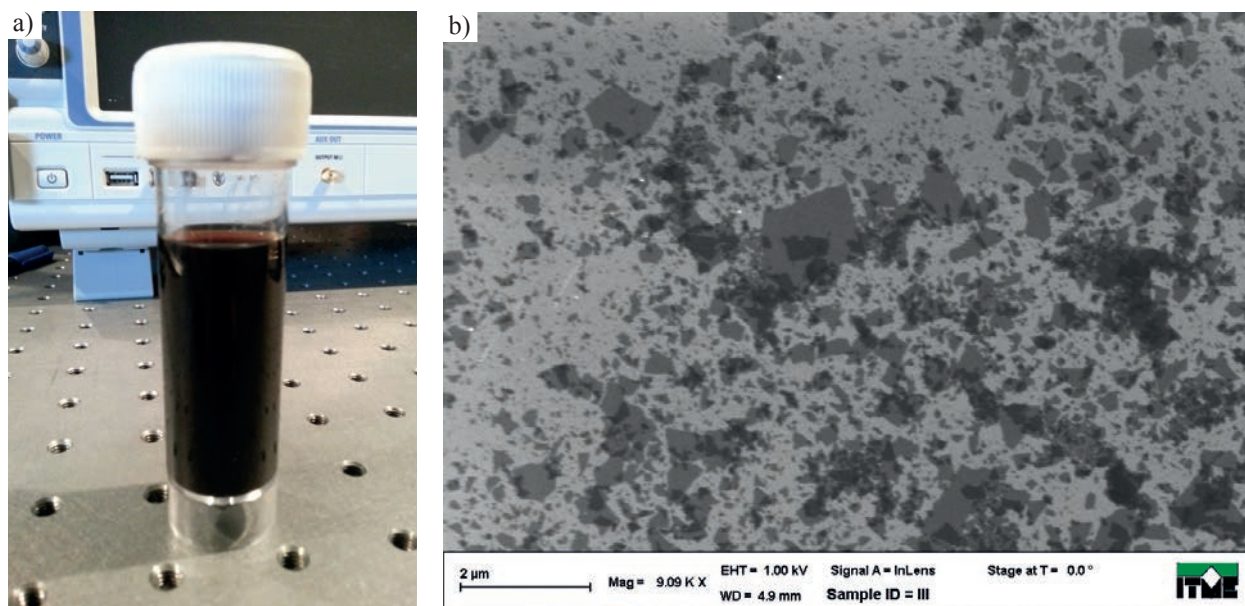
Key words: graphene, graphene oxide, solid state laser, saturable absorber

1. Wstęp

W ostatnim dziesięcioleciu szczególne miejsce w zakresie poszukiwań i badań nowych materiałów do zastosowań technicznych zajmuje grafen będący czystą formą węgla. Jego charakterystyczne właściwości wyróżniają go spośród innych dostępnych materiałów. Podstawowymi zaletami grafenu jest jego dwuwymiarowa struktura wewnętrzna utworzona z heksagonalnych powiązań atomów węgla o grubości pojedynczego atomu oraz zerowa wartość przerwy energetycznej. Transmitancja pojedynczej warstwy grafenu wynosi $T = 97,7$ % w szerokim zakresie spektralnym od nadfioletu do dalekiej podczerwieni. Te osobliwe cechy powodują, że możliwości aplikacyjne grafenu mają bardzo szeroki zakres zastosowań w elektronice, chemii przemysłowej, medycynie i wojsku. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych będąc jednym z nielicznych na świecie producentów grafenu współpracuje z wieloma ośrodkami naukowymi [1] oraz sam prowadzi badania w celu określenia jego właściwości oraz zastosowań użytkowych. Jednym z wielu możliwych zastosowań grafenu jest wykorzystanie go jako absorbera nasycalnego w układach pasywnego modulatora dobroci w laserach światłowodowych [2] oraz laserach na ciele stałym [3 - 4]. Aktualnie w technice laserowej w celu uzyskania pracy impulsowej stosowane są rozwiązania komercyjne oparte na modulatorach aktywnych i pasywnych montowanych wewnątrz rezonatorów, których bazowymi

elementami są aktywne materiały optyczne wykazujące cechy absorberów nasycalnych. Najczęściej stosowanymi materiałami bazowymi w aktywnych modulatorach dobroci rezonatora (wymagającymi sterowania parametrami z zewnątrz) są: KDP, ADP, LiNbO₃, LiTaO₃, TiO₂ wykorzystywane do zmiany polaryzacji pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. W przeciwieństwie do modulatorów aktywnych rozwiązania pasywne nie wymagają dodatkowych urządzeń sterujących. Wynika to z właściwości optycznych materiału aktywnego i aktualnej gęstości mocy dostarczonej do rezonatora. Najczęściej stosowanymi materiałami bazowymi w modulatorach pasywnych są: Cr⁴⁺:YAG, Cr⁴⁺:GSGG, V³⁺:YAG, Co²⁺:MgAl₂O₄. Przedstawione w artykule rozwiązania wykorzystują materiały o charakterze objętościowym i każdy z nich operuje w ograniczonym zakresie długości fal. Absorber nasycalny na bazie grafenu jest elementem dwuwymiarowym i teoretycznie możliwy jest do nałożenia bezpośrednio na zwierciadło wyjściowym lub na powierzchni materiału aktywnego lasera na ciele stałym. Może być on również nakładany na płytkę płasko - równoległą wstawianą w tor optyczny rezonatora. W systemach laserów światłowodowych pracujących w układach pierścieniowych, grafen nakładany jest na czoło światłowodu zakończonego najczęściej złączem typu SMA905 lub FC/PC.

Inspiracją do podjęcia tego tematu były publikacje grupy chińskich badaczy [4 - 6] z ostatnich dwóch lat, w których przedstawiono wyniki eksperymentów



Rys. 1. Tlenek grafenu wyprodukowany w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w procesie zmodyfikowanej metody Hummersa: a) postać płynna tlenku grafenu, b) fotografia SEM płatków tlenku grafenu.

Fig. 1. Graphene oxide obtained at the Institute of Electronic Materials Technology using the modified Hummers method: a) the liquid form, b) flakes of graphene oxide (SEM).

z tlenkiem grafenu w układach laserów na ciele stałym. W Polsce prowadzono dotychczas prace nad niskoenergetycznym zastosowaniem grafenu i tlenku grafenu w układach laserów światłowodowych (np. Politechnika Wroclawska). W opisanych poniżej badaniach wybranych właściwości grafenu autorzy skupili się na możliwości zastosowania tlenku grafenu GO (*graphene oxide*), jako pasywnego modulatora dobroci w układzie lasera na ceramice Nd:YAG generującego promieniowanie o długości fali $\lambda = 1064$ nm. Celem niniejszej pracy było uzyskanie impulsowej generacji lasera z pasywną modulacją dobroci rezonatora, bez stawiania określonych wymagań dla parametrów energetycznych wyjściowego promieniowania lasera.

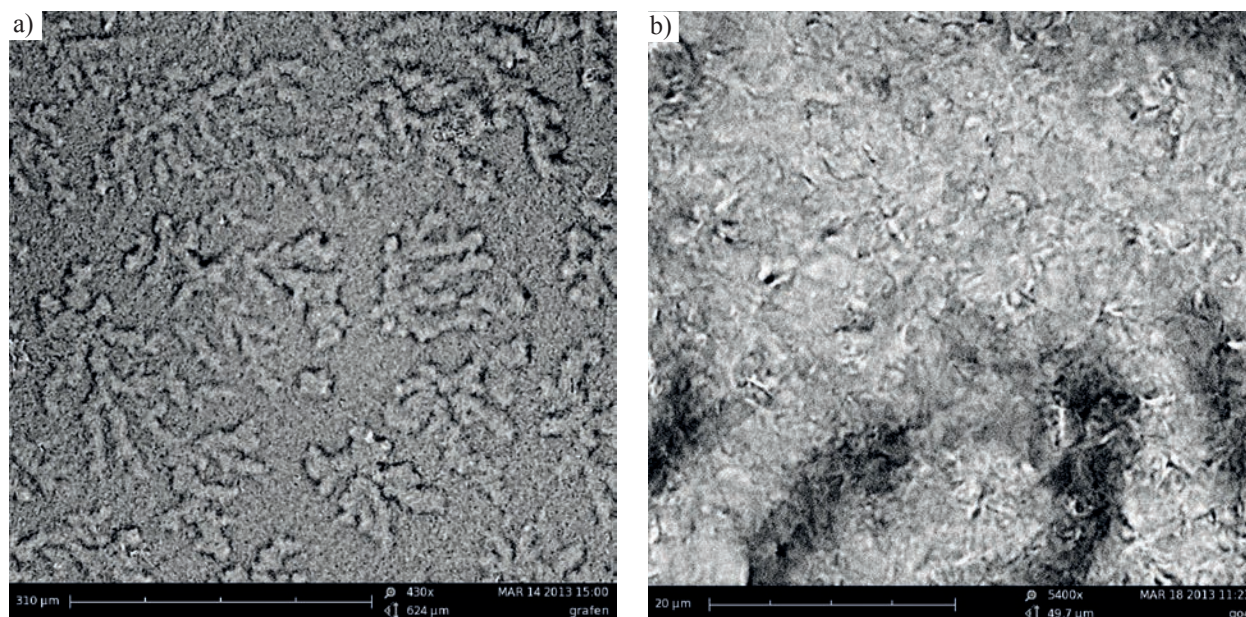
2. Przygotowanie materiału badawczego.

Analizując nieliczne doniesienia literaturowe dotyczące przygotowania tlenku grafenu do zastosowania go w układzie pasywnego modulatora dobroci laserów na ciele stałym można przyjąć, że stosowane są różne metody mające na celu otrzymanie jednorodnej warstwy GO. Do stabilizacji położenia płatków tlenku grafenu w nakładanych warstwach wykorzystuje się najczęściej substancje: alkohol poliwinylowy PVA (*Polyvinyl Alcohol*) [4], poli-metakrylan metylu PMMA (*Polymethyl Methacrylate*) [5], oraz dodecylosiarczan sodu SDS (*Sodium Dodecyl Sulfate*) [6]. Nakładanie warstw tlenku grafenu na szklane podłoża jest długotrwałe, wymaga stosowania specjalistycznych procedur chemicznych i przyrządów takich jak wirówki i suszarki z możliwością kontroli przebiegu procesu.

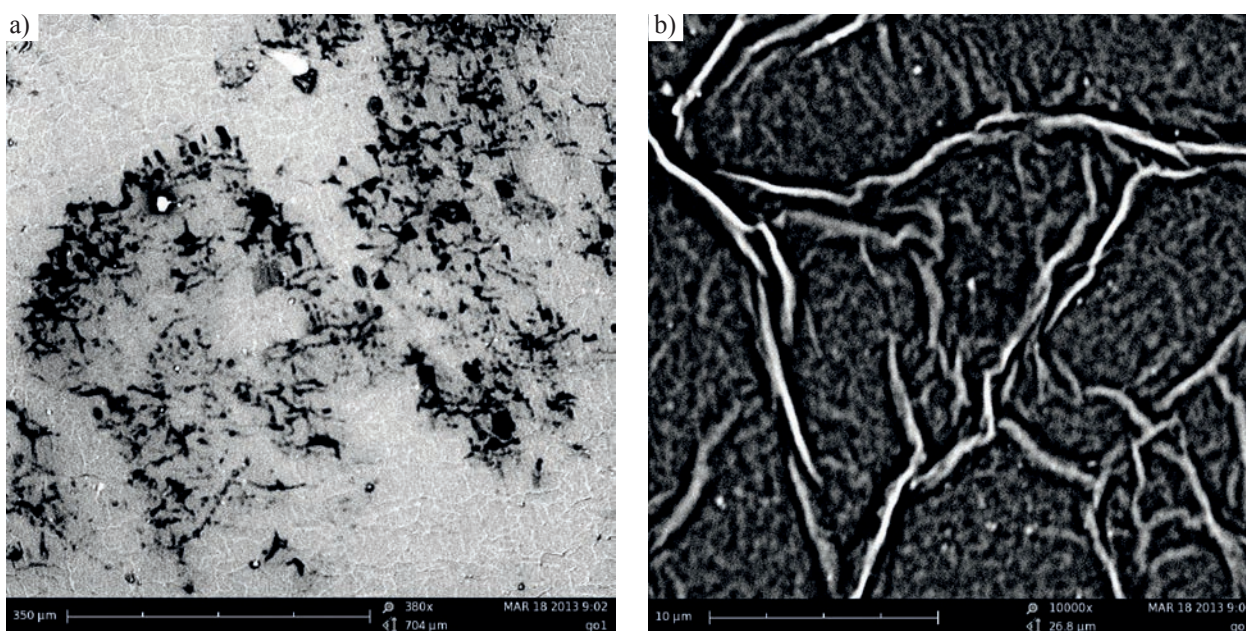
Ze względu na występujące ograniczenia techniczne postanowiono opracować własną metodę szybkiego przygotowania próbek absorbera nasycalnego na podłożu szkła kwarcowego. W tym celu zastosowano tlenek grafenu (Rys. 1) otrzymany wcześniej w procesie zmodyfikowanej metody Hummersa [7 - 9].

Gęsty roztwór tlenku grafenu został rozcieńczony: w pierwszym przypadku w acetonie cz.d.a. C_3H_6O – 58,08 g/mol, w drugim przypadku w alkoholu 2 - propanol cz.d.a. C_3H_8O – 60,10 g/mol. Przy wykonywaniu pierwszych próbek nie zwracano uwagi na określoną wartość procentową transmitancji otrzymywanych warstw a wymagana była ich przejrzystość wzrokowa. Istotna była jedynie jednorodność rozkładu tlenku grafenu na powierzchni szkła kwarcowego. Rozcieńczony tlenek grafenu po ujedynoliceniu rozkładu gęstości w wirówce ultradźwiękowej, w czasie 20 minut został rozprowadzony równomiernie na powierzchni odtłuszczonego szkła i poddany odparowaniu w temperaturze pokojowej. Obserwacje mikroskopowe (mikroskop elektronowy SEM PHENON Prox II gen.) otrzymanych warstw wykazały, że efekty stosowania obu rozpuszczalników znacznie różnią się między sobą. Na Rys. 2 przedstawione jest zdjęcie próbki warstwy tlenku grafenu rozcieńczonego w acetonie cz.d.a. C_3H_6O – 58,08 g/mol.

Zastosowanie acetonu jako rozpuszczalnika spowodowało silne miejscowe agregacje płatków tlenku grafenu na powierzchni szkła SiO_2 o kształtach zbliżonych do płatków śniegu, natomiast alkohol (Rys. 3) przyczynił się do bardziej regularnego rozkładu płatków w postaci linii tworzących sieć wypełnioną jednolitą warstwą tlenku grafenu. Do dalszych badań przyjęto roztwór tlenku grafenu w alkoholu 2 - propanol cz.d.a. C_3H_8O –



Rys. 2. Topografia tlenku grafenu rozpuszczonego w acetonie na płytce szkła SiO₂: a) powiększenie x 430, b) powiększenie x 5400.
Fig. 2. Topography of graphene oxide dissolved in acetone (C₃H₆O) on a SiO₂ glass plate: a) magnification of 430 x, b) magnification of 5400 x.



Rys. 3. Topografia tlenku grafenu rozpuszczonego w spirytusie metylowym na płytce szkła SiO₂: a) powiększenie x 380, b) powiększenie x 10000.
Fig. 3. Topography of graphene oxide dissolved in 2-propanol alcohol (C₃H₈O) on a SiO₂ glass plate: a) magnification of 380 x, b) magnification of 10000 x.

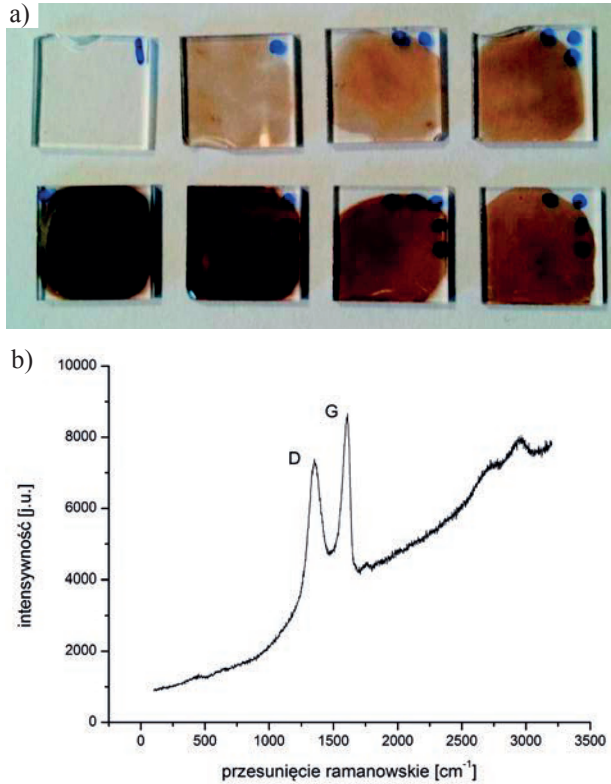
60,10 g/mol, na bazie którego wykonano zestaw próbek o różnych transmitancjach. Na Rys. 4a. przedstawione są wykonane próbki tlenku grafenu na podłożach szkła kwarcowego o wymiarach 10 x 10 x 1 mm, które dla porządku zostały ponumerowane metodą kropek. Pierwsza próbka oznaczona jest pojedynczą kreską i określa próbkę referencyjną podłoża ze szkła kwarcowego bez warstwy tlenku grafenu. Na Rys. 4b przedstawiono przykładowe widmo ramanowskie (dla próbki K2) z charakterystycznymi pikami amplitudowymi: **D** z przesunięciem ramanowskim wynoszącym 1350 cm⁻¹ oraz **G** z przesunięciem

ramanowskim wynoszącym 1585 cm⁻¹ potwierdzającymi obecność tlenku grafenu na podłożu szkła kwarcowego. Pomiaru charakterystyki dokonano za pomocą spektrometru typu InVia Raman Microscope firmy RENISHAW. Zbiorcza charakterystyka transmitancji wykonanych próbek przedstawiona jest na Rys. 5. Pomiaru transmitancji wykonano za pomocą spektrometru typu CARY firmy VARIAN. Wykonane próbki z tlenkiem grafenu różnią się między sobą transmitancjami.

Zmierzona transmitancja poszczególnych próbek dla długości fali $\lambda = 1064$ nm wynosiła: K1 \rightarrow T = 86,38 %,

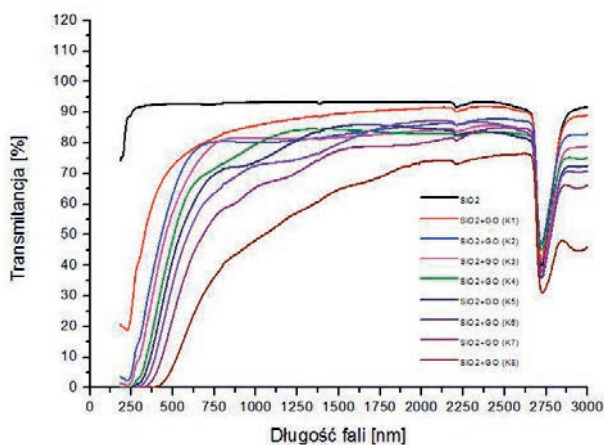
K2 → $T = 80,15\%$, K3 → $T = 81,48\%$, K4 → $T = 81,21\%$,
K5 → $T = 75,29\%$, K6 → $T = 73,21\%$, K7 → $T = 66,92\%$,
K8 → $T = 50,43\%$ podłoże ze szkła SiO₂ → $T = 93,22\%$.

Po weryfikacji optycznej do dalszych badań zakwalifikowano próbki K1, K2 i K3.



Rys. 4. Zestaw próbek tlenku grafenu na podłożu szkła SiO₂ przeznaczonych do badań generacyjnych (a) oraz przykładowe widmo ramanowskie dla próbki K2 (b).

Fig. 4. A set of graphene oxide samples on the surface of SiO₂ glass designed for generation experiments (a) and an exemplary Raman spectrum for sample K2 (b).



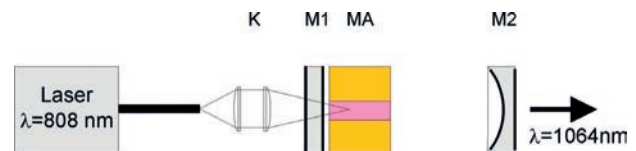
Rys. 5. Transmitancja tlenku grafenu na podłożu szkła SiO₂ dla próbek K1 - K8 i referencyjnej próbki szklanej SiO₂.

Fig. 5. The transmittance of graphene oxide on the surface of SiO₂ glass for samples K1 - K8 and a reference SiO₂ glass sample.

3. Stanowisko laserowe

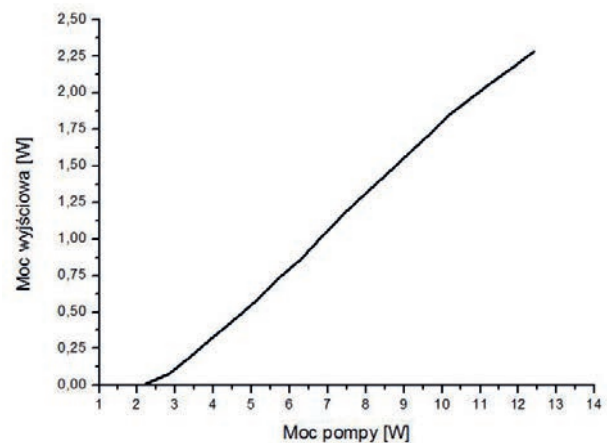
Na potrzebę eksperymentów generacyjnych z próbkami tlenku grafenu zbudowano stanowisko laboratoryjne lasera na ciele stałym z pompowaniem wzdłużnym. Schemat ideowy stanowiska laserowego przedstawiony został na Rys. 6.

W układzie zastosowana została ceramika komercyjna firmy Konoshima w postaci pręta YAG domieszkowanego 1 % at. neodymu, o wymiarach $\phi 3 \times 5$ mm. Ceramika (MA) z powierzchnią boczną owinięta folią indową została zamocowana w profilowanym uchwycie miedzianym pokrytym cienką warstwą złota. Uchwyt umożliwił utrzymywanie stałej temperatury ceramiki dzięki zastosowanemu modułowi Peltiera, sterowanego przez układ kontroli temperatury na podstawie pomiaru rezystancji termistora NTC 10 k Ω zamocowanego blisko materiału aktywnego. Rezonator lasera zbudowany był z płasko-równoległego dichroicznego zwierciadła wejściowego (M1) o średnicy 1" i charakterystyce transmitancyjnej dla długości fali $\lambda = 808$ nm $T = 99,5\%$ oraz dla $\lambda = 1064$ nm $T = 0,02\%$. Na wyjściu zastosowano płasko-wklęsłe zwierciadło dichroiczne M2 o średnicy 1" i ogniskowej $f = -50$ mm oraz charakterystyce transmitancji dla długości fali $\lambda = 1064$ nm $T = 3\%$ i $\lambda = 808$ nm $T = 0,5\%$. Jako pompę zastosowano diodę laserową Spectra Physics typu



Rys. 6. Schemat ideowy lasera na ceramice Nd:YAG: K- zespolony układ soczewek, M1- zwierciadło wejściowe, MA- ceramika Nd:YAG w uchwycie mocującym, M2- zwierciadło wyjściowe.

Fig. 6. Schematic diagram of the laser on Nd:YAG ceramics: K - combined system of focusing lenses, M1 - input mirror, MA - Nd:YAG ceramics in a mounting block, M2 - output mirror.



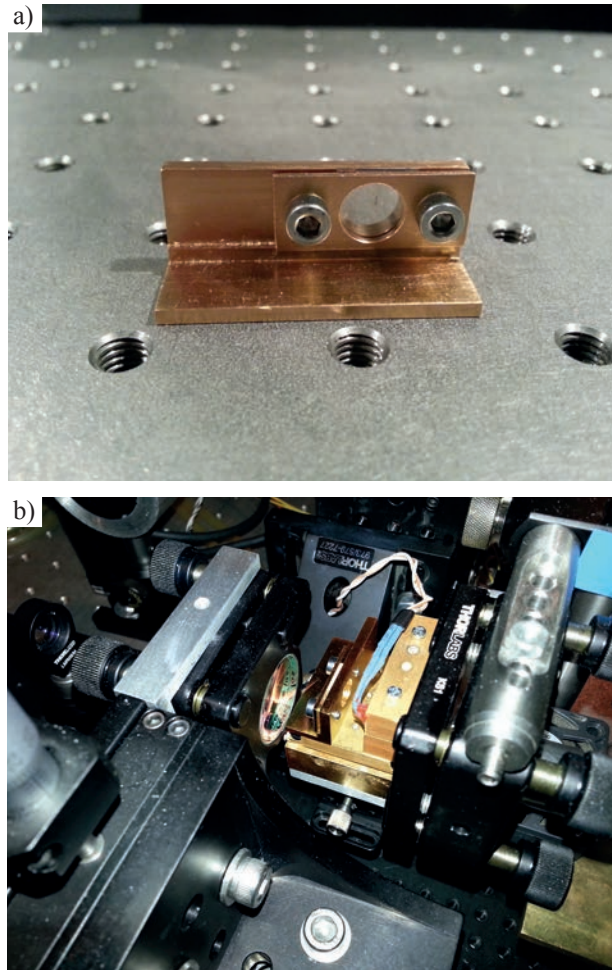
Rys. 7. Charakterystyka mocy wyjściowej w funkcji mocy pompy lasera na ceramice Nd:YAG.

Fig. 7. Output power versus pump power for the ceramic Nd:YAG laser.

0129 - 4350 z wyjściem światłowodowym o maksymalnej mocy wyjściowej $P = 15$ W dla długości fali $\lambda = 808$ nm pracującą w trybie działania ciągłego (cw) wraz z układem zasilania i stabilizacji temperatury. Promieniowanie diody laserowej doprowadzono do materiału aktywnego poprzez zespolony układ soczewek firmy Spectra Physics z wejściem światłowodowym pozwalającym na uzyskanie plamki o średnicy $\phi = 200$ μm . Charakterystykę mocy wyjściowej w funkcji mocy pompy zbudowanego lasera na ceramice Nd:YAG przedstawiono na Rys. 7. Dla mocy pompy 13 W uzyskano wyjściową moc lasera Nd:YAG na długości fali $\lambda = 1064$ nm o wartości $P = 2,23$ W.

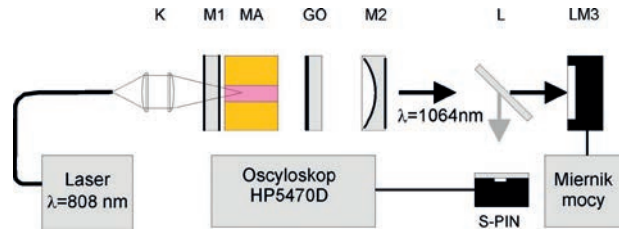
4. Eksperymenty generacyjne

Przygotowane próbki z warstwami tlenku grafenu na podłożu szkła SiO_2 zamocowano w specjalnych uchwytach pozwalających na wstawienie ich w tor optyczny rezonatora Rys. 8.



Rys. 8. Rezonator lasera na ceramice Nd:YAG: a) uchwyt z próbką tlenku grafenu, b) uchwyt z próbką tlenku grafenu w rezonatorze lasera.

Fig. 8. The laser resonator on Nd:YAG ceramics: a) a mounting block with a graphene oxide sample, b) a mounting block with a graphene oxide sample in the laser resonator.



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe lasera na ceramice Nd:YAG z tlenkiem grafenu jako nieliniowym absorberem. K - zespolony układ soczewek, M1 - zwierciadło wejściowe, MA - ceramika Nd:YAG w uchwycie mocującym, GO - próbka tlenku grafenu, M2 - zwierciadło wyjściowe, L - zwierciadło całkowicie odbijające (przy pomiarze charakterystyk amplitudowych), LM3 - sonda miernika mocy promieniowania laserowego, S-PIN - detektor. **Fig. 9.** Experimental setup for the laser on Nd:YAG ceramics with graphene oxide as a nonlinear absorber. K - combined system of focusing lenses, M1 - input mirror, MA - Nd:YAG ceramics in a mounting block, GO - graphene oxide sample, L - fully reflective mirror (for measuring the amplitude characteristics), LM3 - probe of a laser radiation sensor, S-PIN detector, M2 - output mirror.

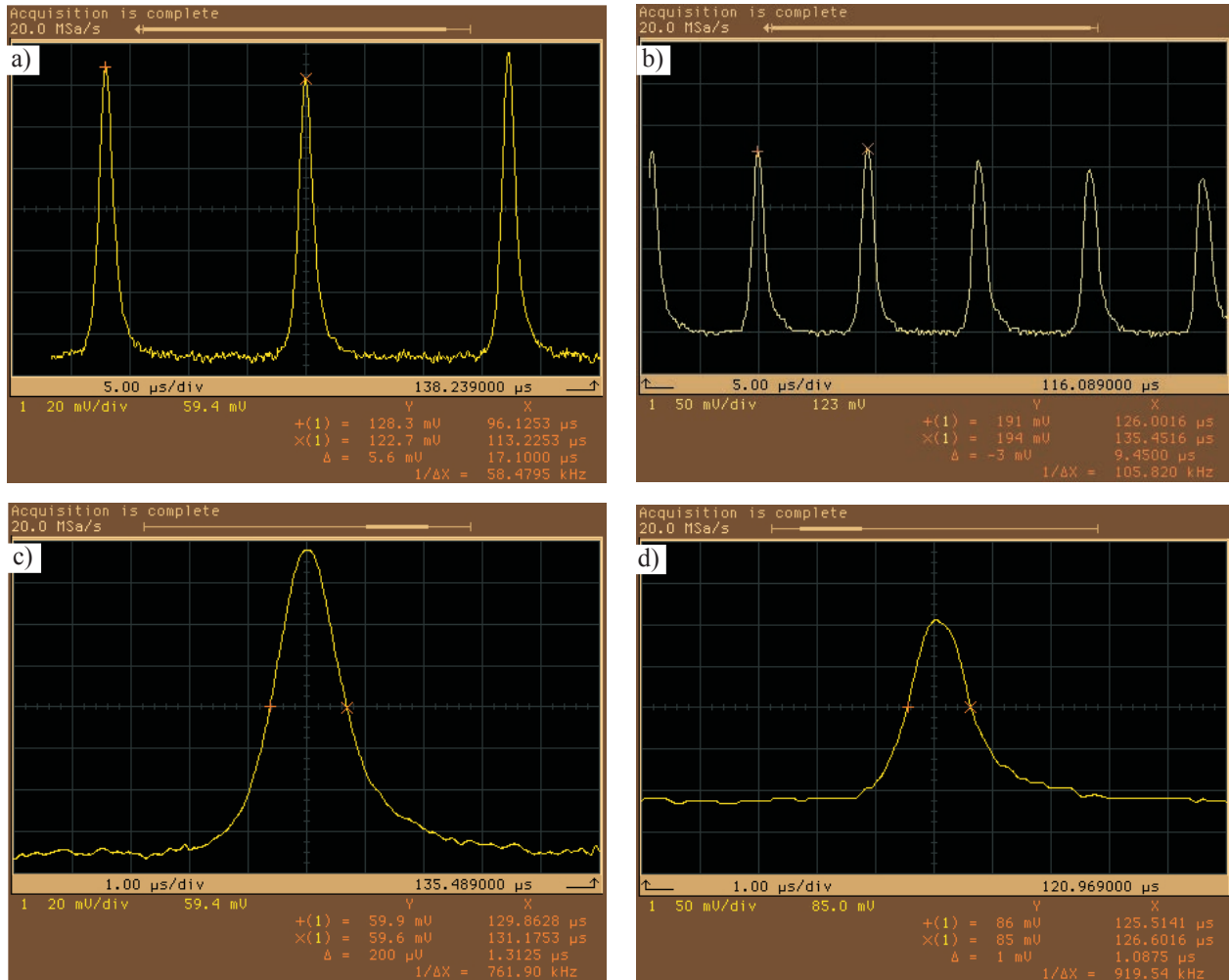
W eksperymentach generacyjnych z próbkami tlenku grafenu przeprowadzono pomiary wyjściowej mocy średniej z wykorzystaniem miernika mocy promieniowania laserowego FieldMaster wraz z sondą LM3 firmy Coherent oraz pomiary charakterystyk amplitudowych z wykorzystaniem detektora S-PIN firmy Hamamatsu i cyfrowego oscyloskopu HP54720D. Schemat ideowy układu stanowiska pomiarowego przedstawiono na Rys. 9.

5. Wyniki badań

Eksperymenty z próbkami tlenku grafenu przeprowadzone były w celu określenia możliwości uzyskania w układzie lasera na ciele stałym pracującym w trybie ciągłym, samoistnej generacji impulsowej. Badaniu poddano wybrane trzy próbki K1, K2 i K3 o transmisjach $T > 80$ %. Realizacja eksperymentów przebiegała dwuetapowo. Etap pierwszy polegał na uzyskaniu generacji impulsowej oraz rejestracji charakterystyk amplitudowych z określeniem czasu trwania i częstotliwości impulsów. Etap drugi polegał na pomiarze średniej mocy wyjściowej i porównaniu jej z mocą lasera w trybie działania ciągłego.

5.1. Etap pierwszy

Każdą próbkę tlenku grafenu wstawiano kolejno do rezonatora lasera między pręt ceramiki Nd:YAG a zwierciadło wyjściowe. Na zewnątrz lasera w torze osi optycznej ustawiono spolaryzowany napięciem ujemnym szybki fotodetektor typu S-PIN z filtrem ND, którego wyjście podłączono do oscyloskopu cyfrowego o paśmie 500 MHz i impedancji wejściowej 50 Ω . Obserwowano zmiany rejestrowanego sygnału optycznego w funkcji



Rys. 10. Przykładowe oscylogramy sygnałów wyjściowych lasera na ceramice Nd:YAG zarejestrowane z próbką tlenku grafenu K1. a) najniższa częstotliwość impulsów $f = 54 \text{ kHz}$, b) najwyższa częstotliwość impulsów $f = 105 \text{ kHz}$, c) najdłuższy czas trwania impulsów $t_i = 1,3125 \text{ } \mu\text{s}$, d) najkrótszy czas trwania impulsów $t_i = 1,0875 \text{ } \mu\text{s}$.

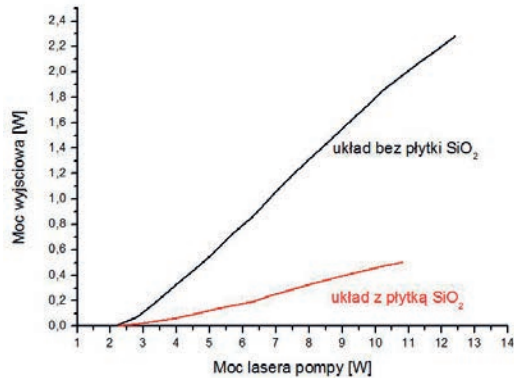
Fig. 10. Exemplary waveforms of output signals of the ceramic Nd:YAG laser recorded with the sample of graphene oxide K1. a) the lowest pulse frequency $f = 54 \text{ kHz}$, b) the highest pulse frequency $f = 105 \text{ kHz}$, c) the highest pulse duration $t_i = 1.3125 \text{ } \mu\text{s}$, d) the lowest pulse duration $t_i = 1.0875 \text{ } \mu\text{s}$.

mocy pompy. Przykładowe oscylogramy uzyskanej generacji impulsowej dla próbki K1 przedstawiono na Rys. 10. Wraz ze zmianą mocy pompy parametry rejestrowanych sygnałów ulegały zmianie. Dla próbki K1 o transmitancji początkowej $T = 86,38 \%$ zarejestrowano zmiany częstotliwości impulsów w zakresie od 54 kHz do 105 kHz , natomiast czas trwania impulsów ulegał zmianie w zakresie od $1,0875 \text{ } \mu\text{s}$ do $1,3125 \text{ } \mu\text{s}$. Dla próbki K2 o transmitancji początkowej $T = 80,15 \%$ zarejestrowano zmiany częstotliwości impulsów w zakresie od 95 kHz do 123 kHz przy zmianie czasu trwania impulsów w zakresie od 750 ns do 800 ns . Dla próbki K3 o transmitancji początkowej $T = 81,48 \%$ zarejestrowano zmiany częstotliwości impulsów w zakresie od 172 kHz do 250 kHz , natomiast czas trwania impulsów ulegał zmianie w zakresie od 450 ns do 504 ns .

5.2. Etap drugi

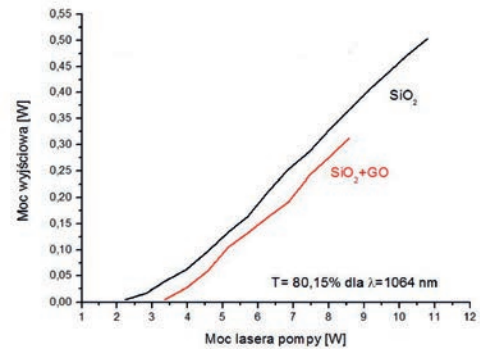
Uzyskanie generacji impulsowej lasera w pierwszym etapie uzasadniło przeprowadzenie pomiarów średniej mocy wyjściowej lasera dla badanych próbek K1, K2 i K3. W tym celu zastosowano miernik mocy promieniowania laserowego FieldMeter firmy Coherent z sondą LM3 pozwalającą na wykonywanie pomiarów do wartości $P = 3 \text{ W}$. W celu określenia wpływu płytki referencyjnej ze szkła SiO_2 wprowadzonej do układu rezonatora na parametry lasera przeprowadzono dodatkowy eksperyment generacyjny. Otrzymaną charakterystykę mocy wyjściowej w funkcji mocy pompy pokazano na Rys. 11.

Charakterystyka mocy wyjściowej z płytką referencyjną została porównana z charakterystyką lasera w układzie podstawowym. Jak widać wprowadzenie płytki referencyjnej spowodowało drastyczne obniżenie mocy wyjściowej do $P = 0,4 \text{ W}$. W dalszych eksperymentach laserowych



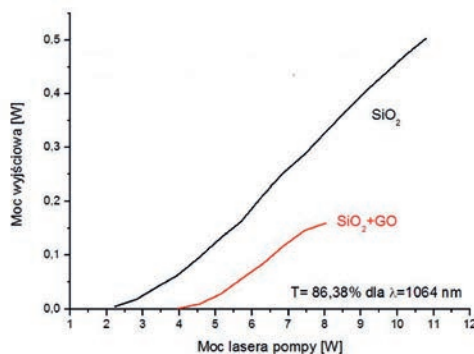
Rys. 11. Wpływ wstawienia płytki SiO_2 do układu rezonatora lasera na ceramice Nd:YAG na moc wyjściową.

Fig. 11. Effect of inserting the SiO_2 plate into the laser resonator on Nd: YAG ceramics on the output power.



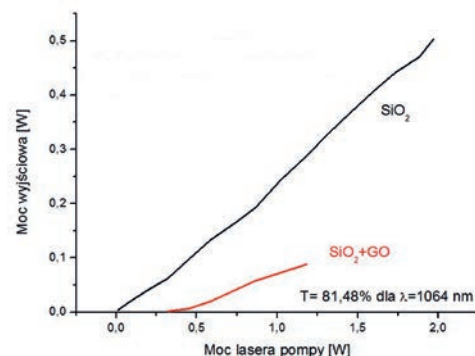
Rys. 13. Charakterystyka lasera na ceramice Nd:YAG w układzie modulacji dobroci na tlenku grafenu dla próbki K2.

Fig. 13. Characteristics of the ceramic Nd: YAG laser with a graphene oxide Q-switch system for sample K2.



Rys. 12. Charakterystyka lasera na ceramice Nd:YAG w układzie modulacji dobroci na tlenku grafenu dla próbki K1.

Fig. 12. Characteristics of the ceramic Nd: YAG laser with a graphene oxide Q-switch system for sample K1.



Rys. 14. Charakterystyka lasera na ceramice Nd:YAG w układzie modulacji dobroci na tlenku grafenu dla próbki K3.

Fig. 14. Characteristics of the ceramic Nd: YAG laser with a graphene oxide Q-switch system for sample K3.

otrzymywane wyniki odnoszono do charakterystyki z płytką referencyjną. Wyniki przeprowadzonych pomiarów wyjściowej mocy średniej w funkcji zmian mocy pompy zostały zademonstrowane na Rys. 12 - 14.

Maksymalna wartość wyjściowej mocy średniej wyniosła: dla próbki K1 $P_{sr} = 160$ mW przy mocy pompy $P = 8$ W, dla próbki K2 $P_{sr} = 330$ mW przy mocy pompy $P = 8,75$ W, dla próbki K3 $P_{sr} = 88$ mW przy mocy pompy $P = 1,2$ W.

6. Podsumowanie

W pracy podjęto próby sprawdzenia możliwości zastosowania tlenku grafenu wytwarzanego w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych jako absorbera nasycalnego w układzie lasera na ciele stałym. Uzyskane na dzień dzisiejszy wyniki eksperymentalne potwierdzają, że tlenek grafenu ma własności absorbera nieliniowego i może być wykorzystany w układach laserów na ciele stałym jako pasywny modulator dobroci. Generację impulsową promieniowania wyjściowego uzyskano dla próbek z transmitancjami początkowymi

z zakresu od $T = 80\%$ do $T = 86\%$ (dla długości fali $\lambda = 1064$ nm). Maksymalną moc średnią zarejestrowano dla próbki K2, która wyniosła $P_{sr} = 330$ mW przy mocy pompy $P = 8,75$ W (dla długości fali $\lambda = 808$ nm). Zmiana gęstości mocy promieniowania diody pompującej wpływała na własności impulsów promieniowania wyjściowego. Zmiany repetycji impulsów promieniowania wyjściowego dla próbek K1, K2 i K3 rejestrowano w zakresie od $f = 54$ kHz do $f = 250$ kHz, a czasy trwania impulsów ulegały zmianie w zakresie od $t_i = 450$ ns do $t_i = 1087,5$ ns. Na tym etapie badań nie określano zależności częstotliwości repetycji i czasów trwania impulsów w funkcji mocy lasera pompującego, jak również nie wyznaczano wartości krytycznych gęstości promieniowania laserowego dla tlenku grafenu, pozostając przy określeniu podstawowych charakterystyk mocy wyjściowej w funkcji mocy lasera pompującego.

W trakcie przygotowywania próbek tlenku grafenu na podłożu SiO_2 oraz realizacji eksperymentów laserowych wystąpiło szereg problemów, które w istotny sposób wpłynęły na osiągnięte wyniki.

Ważnym zagadnieniem wymagającym dopracowania jest metoda nakładania warstw tlenku grafenu na podłożu. Szczególnie istotne jest osiągnięcie jednorodności

rozkładu płatków tlenku grafenu na przyjętym podłożu szkła SiO₂, która musi być lepsza od uzyskanej w eksperymencie. Występująca nierównomierność rozkładu płatków grafenu na podłożu pokazana na Rys. 3 powodowała potrzebę wstępnej korekcji położenia absorbera w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi rezonatora. Optymalizacja położenia próbki do miejsca o jednorodnej gęstości w polu oddziaływania promieniowania wewnątrz rezonatora pozwalała na uzyskanie generacji laserowej.

Z tego powodu porównując charakterystyki średnich mocy wyjściowych dla przedstawionych próbek K1 ÷ K3 daje się zauważyć występujące duże różnice uzyskanych wartości. Pomimo zbliżonych do siebie charakterystyk transmisyjnych w zakresie ich wartości początkowych od $T = 80\%$ do $T = 86\%$ (dla długości fali $\lambda = 1064$ nm) i realizacji pomiarów w tych samych warunkach laboratoryjnych jedynie dla próbki K2 uzyskano charakterystykę mocy wyjściowej o przebiegu bliskim charakterystyce referencyjnej.

Znaczny wpływ na występujące zmniejszenie mocy wyjściowej lasera przy pracy z tlenkiem grafenu w stosunku do lasera bez tlenku grafenu miało zastosowanie płytek ze szkła SiO₂ bez pokryć antyrefleksyjnych dostosowanych do występującej długości fali.

W trakcie eksperymentów zauważono negatywny wpływ wzrostu gęstości promieniowania laserowego w układzie rezonatora na tlenek grafenu, który po przekroczeniu wartości krytycznej (różnej dla każdej próbki) ulegał uszkodzeniu. Na skutek nadmiernego wzrostu temperatury w polu oddziaływania promieniowania na tlenku grafenu występowało przebarwienie i ablacja punktowa powodująca trwałe zatrzymanie modulacji laserowej.

Poruszane w pracy zagadnienia stanowiąc będą przedmiot dalszych badań pozwalających na szczegółowe określenie możliwości i zakresu zastosowań tlenku grafenu w technice laserowej

Literatura

- [1] Sobon G. et al: Graphene oxide vs. Reduced graphene oxide as saturable absorbers for Er-doped passively mode-locked fiber laser, *Optics Express*, 13 aug. 2012, 17, 19463
- [2] Sobon G. et al: Chirped pulse amplification of a femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by a graphene saturable absorber, *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10, 035104
- [3] Shaojie Men et al: A graphene passively Q - switched Nd:YAG ceramic laser at 1123 nm, *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10, 035803
- [4] Man Jiang et al: Low-repetition high-energy passively Q-switched Nd:YAG solid laser based on graphene saturable absorber operating at 1064 nm, *Current Nanoscience*, 2012, 8, 60 - 63
- [5] Man Jiang et al: Graphene-based passively Q-switched diode-side-pumped Nd:YAG solid laser, *Optics Communications*, 2011, 284, 5353 - 5356
- [6] Yonggang Wang et al: Graphene oxide absorbers for Watt-Level High-Power Passive Mode-Locked Nd:GdVO₄, *Journal of Lightwave Technology*, October 15, 2012, 30, 20
- [7] Daniela C., Marcano et al: Improved synthesis of graphene oxide; ACSNANO, July 22, 2010, 4, 8, (www.acsnano.org)
- [8] Hwee Ling Poh et al: Graphenes prepared by Staudenmaier, Hofmann and Hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties, *Nanoscale*, 2012, 4, 3515 (www.rsc.org/nanoscale)
- [9] Hummers W. S., Offeman R. E.: Preparation of graphitic oxide, *J. Am. Chem. Soc.*, 1958, 80, 1339