

Laser na szkłe fosforanowym domieszkowanym erbem, iterbem i chromem

Dariusz Podnieński, Magdalena Nakielska, Anna Kozłowska, Ryszard Stępień, Dariusz Pysz

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

Streszczenie: W artykule przedstawione zostały wyniki pomiarów wytworzonego w ITME szkła fosforanowego domieszkowanego jonami erbu, iterbu oraz chromu. Wykonano pomiary transmitancyjne, spektroskopowe oraz badania generacji. Uzyskano generację laserową w zakresie długości fali $\lambda \sim 1540$ nm o wyjściowej mocy średniej równej $P_{sr} = 48,5$ mW. Szkło może być przeznaczone do zastosowań w układach laserów na ciele stałym pompowanych lampami wyładowcowymi lub diodami laserowymi.

Słowa kluczowe: laser na szkłe erbowym, szkło fosforanowe

Erbium, ytterbium and chromium doped phosphate glass laser

Abstract: The article presents the results of the measurements of phosphate glass doped with ions of erbium, ytterbium and chromium, produced in ITME. The transmittance and spectroscopic measurements as well as generation tests have been performed. Laser generation at wavelength $\lambda \sim 1540$ nm with average output power $P_{av} = 48.5$ mW has been obtained. The tested glass can be applied to flash or diode pumped solid - state laser systems.

Key words: erbium laser glass, phosphate glass

1. Wprowadzenie

Szkła domieszkowane jonami Er^{3+} są atrakcyjnymi materiałami aktywnymi laserów generujących promieniowanie z zakresu długości fal $\lambda = (1,5 \div 1,6)$ μm , umownie nazywanego „bezpiecznym dla wzroku”. Zainteresowanie laserami z tego zakresu spektralnego wynika ze specyficznych właściwości propagacyjnych promieniowania w różnych ośrodkach pozwalających na zastosowanie w: telekomunikacji, technice zdalnych pomiarów, medycynie i w wojsku.

W początkowych badaniach generacyjnych stosowano krzemianowe szkła erbowe [1]. Ze względu na ich stosunkowo małą efektywność podjęto intensywne badania nad innymi matrycami szklanymi domieszkowanych erbem (tellurowe, fluorowo - fosforanowe, fosforanowe, boranowe itp.) uwzględniających optymalizację parametrów charakterystyk generacyjnych i zwiększenie wytrzymałości termiczno - mechanicznej. Szkła tellurowe domieszkowane erbem charakteryzują się szerokim pasmem emisyjnym, długimi czasami życia na poziomach wzbudzonych, niską stabilnością temperaturową oraz wysokimi kosztami wytwarzania [2]. Szkła fluorowo - fosforanowe są idealnym materiałem dielektrycznym dla wzmacniaczy światłowodowych dzięki możliwości stosowania silnego domieszkowania erbem. Matryce tego typu pozwalają również na stosowanie innych domieszek jonów ziem rzadkich przy zachowaniu niskiego poziomu energii fononów oraz stabilności termicznej i chemicznej. Dodatkowo charakteryzują się one szerokim pasmem

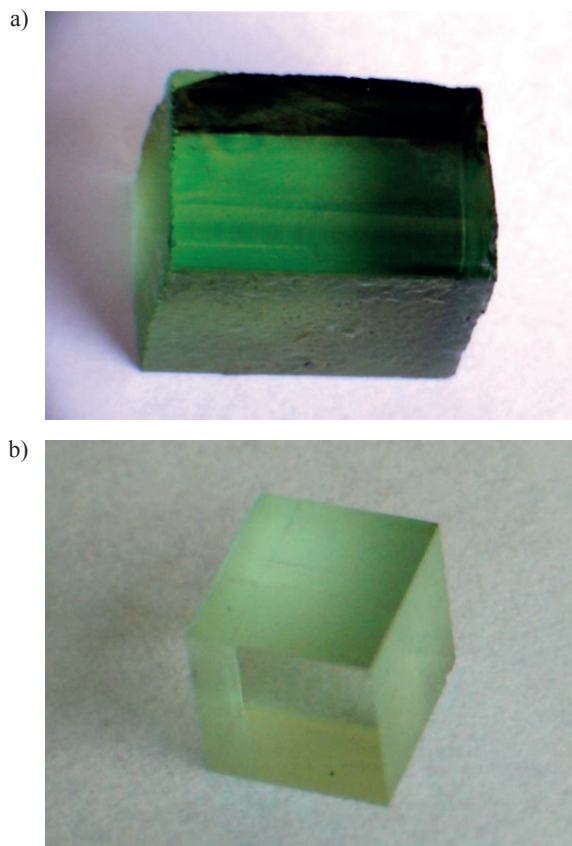
emisyjnym przy wysokim współczynniku wzmocnienia i niskim współczynniku up - konwersji [3]. Szkła fosforanowe pozwalają w stosunku do innych matryc na otrzymanie większych energii wyjściowych przy dłuższych czasach generowanych impulsów laserowych [4]. Inną grupą matryc są szkła boranowe z domieszką erbu [5], które ze względu na niski stopień sprawności kwantowej nie mają większego zastosowania w technice laserowej. W matrycach szkieł domieszkowanych erbem wykorzystuje się przejścia laserowe między poziomami $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ w układzie trójpoziomowym. Bezpośrednie pompowanie jonów erbu jest mało efektywne ze względu na ich słabe pasma absorpcji. Optymalna koncentracja jonów erbu mieści się w przedziale $1-10 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} . Dalsze zwiększanie stężenia erbu prowadzi do wzrostu udziału oddziaływań międzyjonowych i tworzenia się klastrow powodujących spadek intensywności emisji, co bezpośrednio przekłada się na wzrost wartości prądu progowego generacji laserowej. Z tego powodu podstawowym zagadnieniem technologicznym jest określenie optymalnego składu samej matrycy szklanej oraz koncentracji jonów erbu. Wzrost efektywności pompowania szkieł domieszkowanych erbem osiąga się przez stosowanie jonów sensybilizujących (iterb, chrom). Najefektywniejszym sposobem zwiększenia absorpcji i sprawności pompowania jest współdomieszkowanie szkieł jonami iterbu Yb^{3+} , które mają silne pasmo absorpcji o szerokości 1200 cm^{-1} w zakresie spektralnym $900 - 1030$ nm i kilkakrotnie większy absorpcyjny przekrój czynny dla promieniowania pompy. Generację promieniowania laserowego na długości fali $1,54$ μm uzyskano po raz pierwszy na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku stosując

szkło fosforanowe współdomieszkowane jonami erbu i iterbu [6]. Dzięki swoim właściwościom spektralnym, optycznym i termicznym mogło być ono stosowane w układach laserów na ciele stałym. W oparciu o szkła fosforanowe możliwa jest budowa laserów generujących promieniowanie w reżimie: impulsowym (*q-cw*), ciągłego działania (*cw*) oraz impulsowym z wykorzystaniem modulatorów pasywnych i aktywnych pozwalającym na zawężenie szerokości impulsów wyjściowych. Niekwestionowanym liderem opracowanych matryc szklanych współdomieszkowanych jonami erbu i iterbu pozostaje firma KIGRE ze swoimi flagowymi produktami QX/QE serii (-Er, -7, -7s) [7]. Komercyjnie dostępne szkła fosforanowe tej firmy domieszkowane erbem są wykazywane w bardzo wielu publikacjach naukowych jako materiały bazowe lub referencyjne. Przykładami szkieł fosforanowych domieszkowanych jonami erbu i iterbu innych producentów są matryce typu IOG-1 wytworzone w firmie SCHOTT [8] oraz matryce typu SELG (*Strong Erbium Laser Glass*) oraz szkła o podwyższonej koncentracji jonów iterbu (*concentrated glass*) opracowane w Laser Materials and Technology Research Center General Physics Institute w Moskwie [9].

Jednym z wielu wytwarzanych materiałów aktywnych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych są szkła do zastosowań w laserach światłowodowych oraz laserach ciała stałego. Uruchomienie na terenie Instytutu laboratoryjnego stanowiska do badań generacyjnych w układzie lasera ciała stałego z pompowaniem za pomocą diody laserowej umożliwia samodzielne przeprowadzenie jakościowych testów materiałów aktywnych. Wyniki pierwszego eksperymentu z cyklu podjętych badań zostały przedstawione poniżej. Badaniom poddano szkło fosforanowe domieszkowane jonami erbu, iterbu oraz chromu, które w swoim pierwotnym zamyśle projektowane było do zastosowania w laserach pompowanych lampami błyskowymi. Celem podjętych działań było określenie podstawowych własności optycznych badanego szkła oraz możliwości uzyskania generacji laserowej na długości fali bliskiej $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ przy pompowaniu diodą laserową.

2. Laserowy materiał aktywny

Niedomieszkowaną matrycę ze szkła fosforanowego syntezowano w układzie tlenkowym $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO-PbO-K}_2\text{O}$ stosując odpowiednio stężenia składników 63 - 13,5 - 9 - 10 - 4,5% mas. Dla uzyskania aktywnego materiału laserowego, powyższą matrycę domieszkowano tlenkami Er_2O_3 , Yb_2O_3 i Cr_2O_3 w stężeniu odpowiednio 0,5% mas., 23% mas. i 0,04% mas. Wytopione szkło o wysokiej jakości optycznej, przeznaczone do badań, nazwano ELG (*Erbium Laser Glass*). Partię szkła wytworzonego w Zakładzie Szkieł ITME dostarczono w postaci bryły o wymiarze $\sim 20 \times 22 \times 40 \text{ mm}$ przedstawionej na Rys. 1. Z materiału wycięto szereg próbek o wymiarach $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}$. Przeprowadzona wstępna ocena wzrokowa przeznaczona



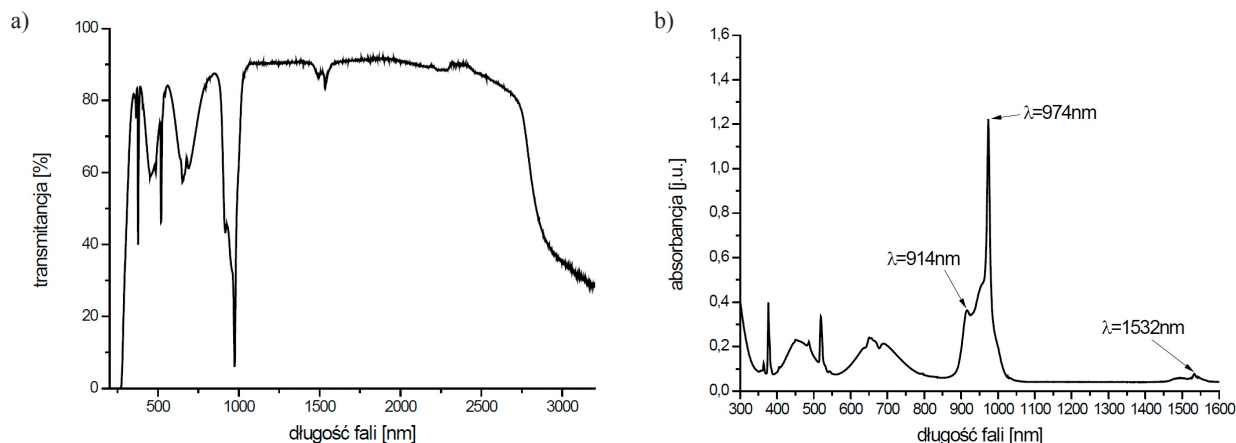
Rys. 1. Fotografia badanego szkła ELG: a) bryła szkła po wytopie, b) przykładowa próbka szkła ELG o wymiarach $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}$ przygotowana do badań.

Fig. 1. A photograph of the tested ELG glass: a) body of the glass melt, b) exemplary ELG glass sample measuring $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}$ prepared for the test.

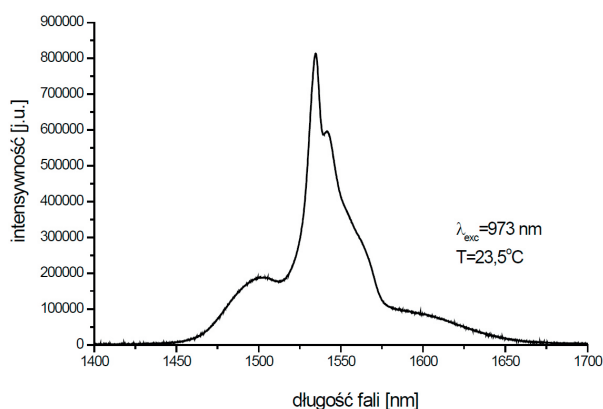
nych do badań próbek szkła fosforanowego wykazała, że w zakresie światła widzialnego charakteryzowały się one bardzo dużą przezroczystością. W badanym materiale nie stwierdzono występowania wtrąceń stałych ani gazowych. Próbki szkła poddane zostały obróbce polersko - szlifierskiej z wykorzystaniem urządzenia MPSR 300S firmy GMNi, w wyniku czego powierzchniom czołowym o wymiarach $4 \times 4 \text{ mm}$ nadano cechy płasko - równoległości.

3. Badania transmitancyjne i fluorescencyjne

Dla badanych próbek szkła fosforanowego ELG przeprowadzono pomiary transmitancji i absorbancji w zakresie spektralnym $\lambda = (400 \div 3000) \text{ nm}$ z wykorzystaniem spektrometru typu CARY firmy VARIAN. Wyznaczone charakterystyki zostały przedstawione na Rys. 2. W pełnym zakresie widmowym spektrometru wartość zmierzonej transmitancji badanych próbek szkła ELG wyniosła $\sim 90\%$. Istotna różnica wartości transmitancji w stosunku do wartości średniej rejestrowana jest w zakresie długości fali $\lambda = (900 \div 1000) \text{ nm}$. Jak widać na Rys. 2a zmiana poziomu transmitancji związana jest



Rys. 2. Charakterystyki transmitancji (a) i absorpcji (b) szkła ELG o grubości 5 mm.
Fig. 2. Transmittance (a) and absorbance (b) characteristics of the 5 mm thick ELG glass.



Rys. 3. Charakterystyka widma fluorescencji próbki szkła ELG przy ekspozycji promieniowaniem laserowym o długości fali $\lambda = 973$ nm.
Fig. 3. Characteristics of the fluorescence spectra of the ELG glass sample when exposed to laser radiation with the wavelength of $\lambda = 973$ nm.

bezpośrednio z wysoką wartością absorpcji wynikającą ze składu chemicznego badanego szkła. Przyjęte wartości stężenia Er_2O_3 decydującego składnika umożliwiającego generację promieniowania w okolicy $\lambda = 1540$ nm, w połączeniu z sensybilizatorem Yb_2O_3 pozwoliły na wytworzenie matrycy fosforanowej o właściwościach optycznych porównywalnych z matrycą szkła QE/Er firmy KIRGE. Opracowana matryca szkła fosforanowego ELG przeznaczona była do zastosowań w laserach na ciele stałym pompowanych lampami błyskowymi. Z tego powodu poza domieszkami jonów erbu i iterbu zastosowano jony chromu mające na celu poszerzenie pasma absorpcji w zakresie widzialnym i ultrafioletu. Efekt ten pokazany jest na Rys. 2b, na którym widoczne są szerokie pasma absorpcji w zakresie widzialnym z maksimum dla długości fali $\lambda = 377$ nm i $\lambda = 520$ nm.

Maksimum absorpcji dla szkła ELG występuje dla długości fali $\lambda = 974$ nm. Obliczona wartość współczynnika absorpcji promieniowania lasera pompującego dla długości fali $\lambda = 974$ nm wynosi $\lambda = 5 \text{ cm}^{-1}$. Przyjęcie tej

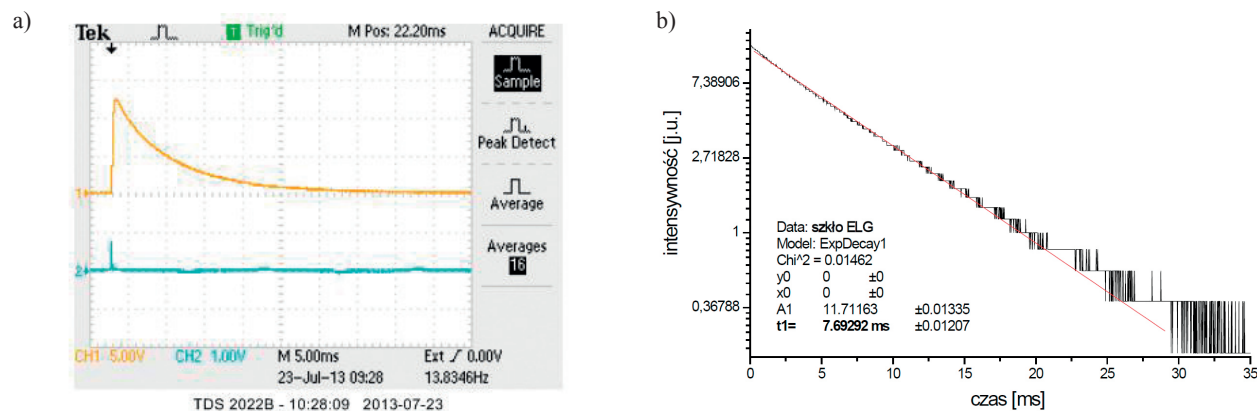
długości fali dla lasera pompującego powinno gwarantować optymalny transfer energii pompy i maksymalną sprawność układu laserowego.

Pomiary fluorescencyjne przeprowadzono z wykorzystaniem spektrometru typu SpectraPro 2300i firmy ACTON we współpracy z układem Lock-in Amplifier SR830 firmy Stanford Research Systems sterowanym z poziomu komputera PC.

Ze względu na oczekiwaną emisyjną długość fali badanego materiału bliską $\lambda = 1535$ nm pomiary ograniczono do zakresu $\lambda = 1400 \div 1700$ nm. Pomiary charakterystyki widma fluorescencji zrealizowano z rozdzielczością $\Delta\tau = 0,2$ nm. Jako źródło pobudzające badane próbki zastosowano laser półprzewodnikowy typu FLD97510K firmy IPG z wyjściem światłowodowym o maksymalnej mocy wyjściowej $P = 10$ W generujący promieniowanie o długości fali $\lambda = 973$ nm. Zarejestrowaną charakterystykę widma fluorescencji szkła ELG przedstawiono na Rys. 3.

Analiza przebiegu zmian kształtu uzyskanej charakterystyki fluorescencji szkła ELG pod wpływem ekspozycji promieniowaniem o długości fali $\lambda = 973$ nm, wykazała występowanie szerokiego pasma zawierające się w zakresie $\lambda = (1450 - 1650)$ nm. Spowodowane jest to efektem Starka wywołanym lokalnym polem elektrycznym powodującym rozszczepienie górnego poziomu laserowego $^4I_{13/2}$ na czternaście podpoziomów, a dolnego poziomu laserowego $^4I_{15/2}$ na szesnaście podpoziomów. Wszystkie przejścia pomiędzy powstałymi w ten sposób poziomami są niejednorodnie poszerzone powodując nakładanie się na siebie poszczególnych widm, dając w efekcie jedno szerokie widmo ciągłe o zróżnicowanej amplitudzie z maksimum dla długości fali $\lambda = 1532$ nm.

Pomiary czasu życia na poziomach wzbudzonych badanego szkła ELG dokonano metodą bezpośrednią z wykorzystaniem wzbudzenia impulsowego. W metodzie tej badany ośrodek wzbudzany jest impulsem promieniowania o czasie opadania znacznie krótszym od czasu τ życia na poziomie wzbudzonym. Zastosowany detektor G6122 (Hamamatsu), po ustaleniu napięcia polaryzacji



Rys. 4. Czas życia na poziomach wzbudzonych szkła ELG: a) oscylogram (kolor żółty - sygnał z detektora, kolor niebieski – sygnał impulsu laserowego), b) zanik fluorescencji w postaci logarytmicznej.

Fig. 4. The lifetime of the excited levels of ELG glass: a) waveform (yellow- signal from the detector, blue - laser pulse signal), b) fluorescence decay in logarithmic form.

przekazywał proporcjonalne wielkości elektryczne impulsów do wejścia oscyloskopu cyfrowego TDS2022B firmy Tektronix. Na ekranie oscyloskopu w czasie rzeczywistym rejestrowano przebiegi impulsów sterujących lasera półprzewodnikowego oraz przebiegi odpowiedzi detektora na impulsy optyczne. Zarejestrowane przebiegi po automatycznym przeredagowaniu na postać cyfrową były eksportowane do komputera PC. Na Rys. 4 pokazane zostały przykłady rejestracji przebiegów zmian sygnałów optycznych na ekranie oscyloskopu oraz wynik zastosowanego aparatu numerycznego wyznaczającego czas życia na poziomach wzbudzonych badanej próbki.

Uzyskane wyniki pomiarowe zależności intensywności fluorescencji (I) w funkcji czasu (t) aproksymowano numerycznie funkcją:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

gdzie: I_0 - intensywność początkowa, τ - stała czasowa.

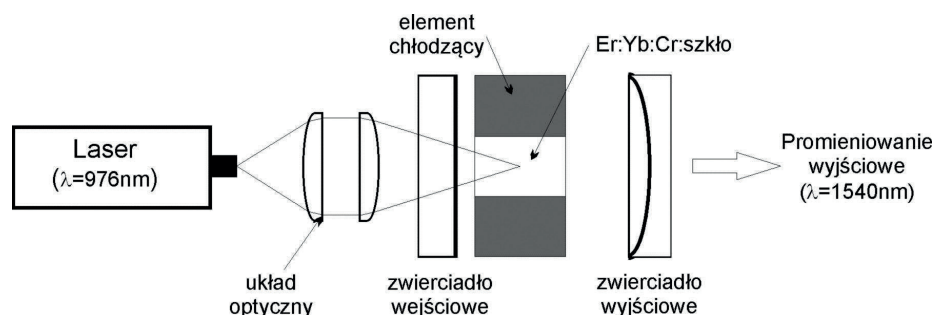
Stała czasowa τ (czas zaniku fluorescencji) odpowiada czasowi, po którym intensywność fluorescencji I osiągnie wartość I_0/e .

W wyniku przeprowadzenia procesu obliczeniowego ustalono wartość czasu życia na poziomach wzbudzonych szkła ELG równą $\tau = 7,69$ ms. Jest to wartość porównywalna z danymi literaturowymi dla

tego typu szkieł (równa wartości dla szkła QE-7 firmy KIRGE). Występujące różnice wartości rzędu setnych milisekundy, związane są bezpośrednio ze stopniem domieszkowania matrycy szkła fosforanowego jonami erbu i iterbu. Doświadczenia własne podczas optymalizacji procesu technologicznego wytopu szkła ELG w ITME wykazały, że wzrost czasu życia fluorescencji jonu erbu następuje do wartości stężenia Er_2O_3 równego 0,5% mas. osiągając wartość $\tau = 4,5$ ms. Dalsze zwiększenie stężenia Er_2O_3 powodowało zmniejszanie czasu życia. Wzrost czasu życia fluorescencji jonu iterbu w wyniku wzrostu stężenia Yb_2O_3 następował do wartości 30% mas., przy czym powyżej wartości 15% mas. jego zmiany były minimalne osiągając wartość $\tau = 5$ ms.

4. Badania generacji

Weryfikację przydatności wytworzonych aktywnych materiałów do zastosowań laserowych zrealizowano poprzez poddanie ich eksperymentom generacyjnym w klasycznym układzie rezonatora ze zwierciadłami zewnętrznymi z pompowaniem wzdłużnym. Schemat funkcjonalny stanowiska laboratoryjnego do eksperymentów generacyjnych ze szkłem ELG zademonstrowano na Rys. 5. Układ rezonatora laserowego o długości $l = 50$ mm



Rys. 5. Schemat funkcjonalny układu laboratoryjnego do eksperymentów generacyjnych ze szkłem ELG.

Fig. 5. Functional diagram of the laboratory set-up for generative experiments with ELG glass.



Rys. 6. Przykłady uszkodzeń próbek szkła ELG w eksperymentach generacyjnych.
Fig. 6. Examples of damage to ELG glass samples done in generative experiments.

tworzą dwa zwierciadła laserowe o średnicy 1” zamocowane w stolikach XYZ oraz materiał aktywny. Płaskie dichroiczne zwierciadło wejściowe transmituje długość fali pompującej $\lambda = 978 \text{ nm}$ HT > 99% i odbija długość fali $\lambda = 1535 \text{ nm}$ HR > 99%. Dichroiczne zwierciadło wyjściowe o kształcie płasko - wklęsłym i ogniskowej $f = 50 \text{ mm}$ transmituje długość fali $\lambda = 1535 \text{ nm}$ HT < 3% i odbija długość fali $\lambda = 978 \text{ nm}$ HR > 99%. Materiał aktywny układu laserowego bez warstw antyrefleksyjnych zamocowano w specjalnej głowicy dopasowanej do kształtu badanej próbki w sposób pozwalający na ustawienie jej w osi optycznej układu laserowego. Jako źródło promieniowania pompującego zastosowano laser półprzewodnikowy z wyjściem światłowodowym o mocy $P = 20 \text{ W}$ firmy IPG typu FLD97520K. W eksperymentach stosowano zasilacz pracujący w trybie impulsowym (*q-cw*). Wymagana stabilna temperatura materiału aktywnego oraz lasera pompującego utrzymywana była za pomocą chłodziarek termoelektrycznych TEC.

Zasadnicze eksperymenty generacyjne rozpoczęto po ustaleniu maksymalnych wartości parametrów energetycznych i czasowych dla lasera pompującego w odniesieniu do badanego szkła ELG. Na podstawie badań o charakterze niszczącym określono zakres dopuszczalnych zmian czasów trwania impulsów, częstotliwość repetycji oraz wartości prądu lasera pompującego. Maksymalne czasy trwania impulsów lasera pompującego przyjęto w zakresie $t_i = (1 \div 10) \text{ ms}$ przy ograniczeniu repetycji do wartości $f = 25 \text{ Hz}$ oraz prądach zasilacza ograniczonych dopuszczalną wartością średniej mocy lasera poniżej $P_{sr} = 0,55 \text{ W}$. Średnica plamki promieniowania pompującego skupiona we wnętrzu materiału aktywnego wynosiła $\sim \phi = 100 \mu\text{m}$. Przekraczanie ustalonych maksymalnych wartości parametrów sterujących powodowały negatywne efekty w postaci uszkodzeń mechanicznych próbek szkła ELG (Rys. 6). Mechaniczne uszkodzenia struktury szkła powstawały na skutek absorpcji promieniowania pompującego o zbyt dużych wartościach mocy i gwałtownym punktowym wydzielaniem się ciepła powodującym indukowanie naprężeń wewnętrznych.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów w laboratoryjnym układzie laserowym pokazanym na Rys. 5, uzyskana została generacja promieniowania $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$. Charakterystykę mocy wyjściowej w funkcji śred-

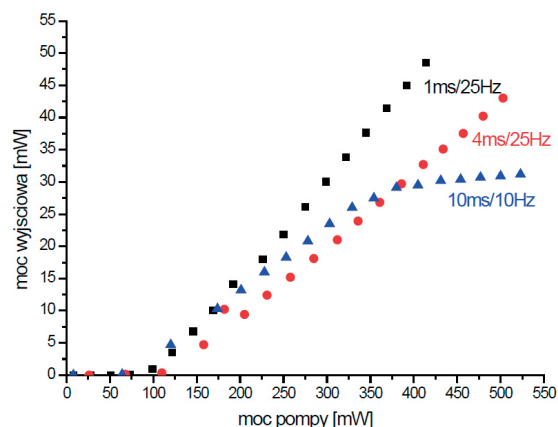
niej mocy lasera pompującego przedstawiono na Rys. 7.

Dla optymalnej długości fali lasera promieniowania pompującego $\lambda = 973 \text{ nm}$ przeprowadzono pomiary mocy wyjściowej dla trzech przypadków różniących się czasami trwania i częstotliwością repetycji impulsów pompujących. Pomiar mocy wyjściowej dla sygnałów sterujących: $t_i = 1 \text{ ms} / f = 25 \text{ Hz}$, $t_i = 4 \text{ ms} / f = 25 \text{ Hz}$ oraz $t_i = 10 \text{ ms} / f = 10 \text{ Hz}$. Maksymalną moc wyjściową zarejestrowano przy mocy pompy 414 mW o wartości 48,5 mW, dla przypadku sygnałów o czasie trwania $t_i = 1 \text{ ms}$ i repetycji 25 Hz. Uzyskana sprawność różniczkowa dla tego przypadku wyniosła $\eta_{różn.} = 14,3\%$, która określona została na podstawie zależności

$$P_{wyj.} = \eta_{różn.} (P_{pompy} - P_{prog.}),$$

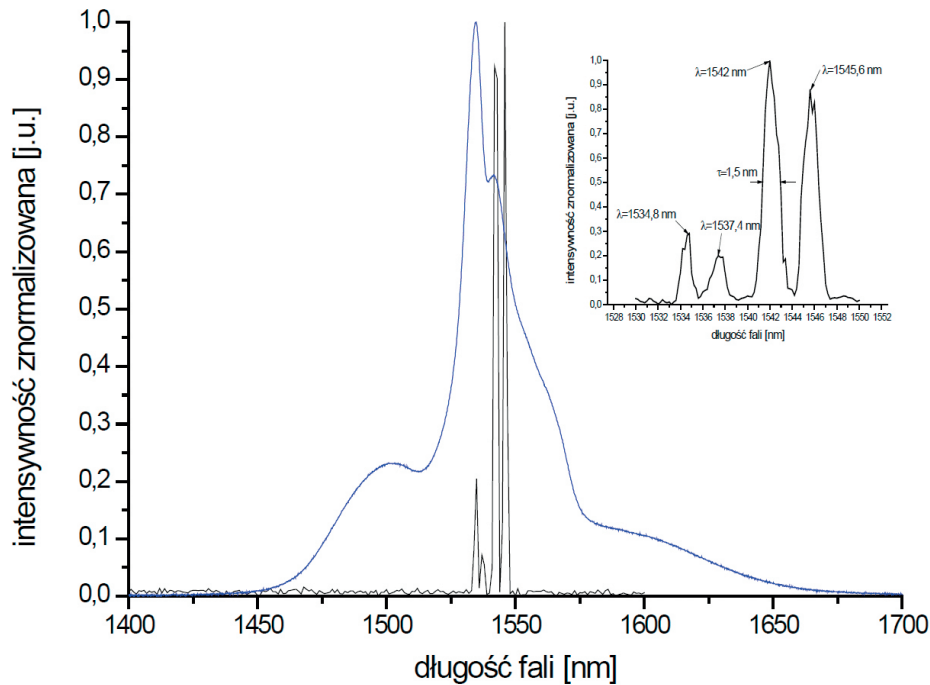
gdzie: $P_{wyj.}$ - jest maksymalną wartością mocy wyjściowej, P_{pompy} - jest maksymalną mocą lasera pompy, $P_{prog.}$ - jest wartością progową powodującą uzyskanie akcji laserowej.

W przypadku sterowania lasera pompującego impulsami $t_i = 4 \text{ ms} / f = 25 \text{ Hz}$ sprawność wynosiła $\eta_{różn.} = 10,8\%$, natomiast dla sterowania impulsami $t_i = 10 \text{ ms} / f = 10 \text{ Hz}$ sprawność wynosiła $\eta_{różn.} = 6,88\%$. W ostatnim przypadku, dla wartości mocy pompy przekraczającej $P > 350 \text{ mW}$,



Rys. 7. Moc wyjściowa w funkcji mocy pompy ($\lambda = 973 \text{ nm}$) w zależności od parametrów czasowych i częstotliwościowych impulsów sterujących.

Fig. 7. The output power versus the pump power ($\lambda = 973 \text{ nm}$) depending on the timing and frequency of the control pulses.



Rys. 8. Charakterystyka widmowa generacji promieniowania lasera w zakresie bliskim $\lambda = 1540$ nm: kolor niebieski - widmo fluorescencji, kolor czarny - widmo generacji.

Fig. 8. The spectral characteristics of the generation of laser radiation in the close range $\lambda = 1540$ nm: blue line - spectrum of fluorescence, black line - generation spectrum.

widoczne jest załamanie charakterystyki. Jest to skutek przekroczenia w materiale aktywnym progu efektów nieliniowych o charakterze termo – optycznym powodującym zmniejszenie sprawności generacji lasera. Prowadzi ono do ograniczenia efektywnego wykorzystania szkła ELG pompowanego impulsami laserowymi $t_i = 10$ ms / $f = 10$ Hz, do wartości mocy absorbowanej równej $P = 325$ mW.

W ramach eksperymentów generacyjnych przeprowadzano kontrolę widma promieniowania wyjściowego. Zarejestrowane charakterystyki widmowe w zakresie spektralnym $\lambda = (1100 \div 2300)$ nm przedstawione zostały na Rys. 8. Pomiarzy zrealizowane zostały z rozdzielczością $\Delta\tau = 0,2$ nm.

Uzyskane widmo promieniowania generacji laserowej na szkłe ELG jest silnie zawężone w stosunku do widma fluorescencji. Maksyma widma emisyjnego w stosunku do widma fluorescencji przesunięte są w kierunku fal dłuższych o $\Delta\lambda = 5$ nm. Pomiar widma emisyjnego za pomocą spektrometru o wysokiej rozdzielczości wykazał wydzielenie w tym zakresie czterech dominujących pasm ($\lambda = 1534,8$ nm, $\lambda = 1537,4$ nm, $\lambda = 1542$ nm oraz $\lambda = 1545,6$ nm.) o szerokościach połowkowych równych 1,5 nm z maksimum sygnału dla długości fali $\lambda = 1542$ nm. Jest to efekt wzmocnienia wybranych linii z rozszczepionych poziomów laserowych ${}^4I_{13/2}$ oraz ${}^4I_{15/2}$ powodujących pracę wielomodową lasera. W tym przypadku uzyskanie jednej linii możliwe jest za pomocą płytki etalonu wstawionej do układu rezonatora pomiędzy materiał aktywny a zwierciadło wyjściowe [10]. Opis tego typu zjawiska w laserze dużej mocy na ciele stałym przedstawiony jest dokładniej w pracy [11].

5. Podsumowanie

Badane szkło fosforanowe domieszkowane jonami erbu, iterbu oraz chromu wytworzone zostało w ITME z przeznaczeniem do zastosowania w laserach pompowanych lampami błyskowymi. Wytworzona matryca ze szkła fosforanowego potwierdziła prawidłowość przyjętych założeń technicznych oraz poprawną realizację procesu technologicznego wytopu. Zadaniem przeprowadzonych eksperymentów było określenie możliwości zastosowania tego typu materiału aktywnego w układach laserów pompowanych diodami laserowymi. W wyniku podjętych działań uzyskano generację promieniowania laserowego na długości fali w zakresie bliskim $\lambda = 1540$ nm. W układzie rezonatora z zewnętrznymi zwierciadłami i pompowaniem wzdłużnym diodą laserową o mocy średniej $P_{sr} = 414$ mW uzyskano moc wyjściową równą $P_{wy} = 48,5$ mW dającą sprawność różniczkową $\eta_{różn.} = 14,3\%$. Wartość tę otrzymano dla lasera pracującego w reżimie q-cw z impulsami zasilacza o czasie trwania $t_i = 1$ ms i repetycji $f = 25$ Hz.

Podczas eksperymentów generacyjnych zakres zmian mocy promieniowania lasera pompy ograniczony był właściwościami termicznymi badanego szkła ELG. W układach laserów pompowanych lampami błyskowymi efekt domieszkowania szkła tlenkiem chromu powoduje dodatkowe kumulowanie się energii cieplnej indukowanej w materiale aktywnym [12 - 13] co prowadzi do wzrostu jego temperatury zmniejszając jednocześnie wydajność fluorescencji [14]. W przypadku stosowanego pompo-

wania laserowego obserwowany efekt nie miał istotnego znaczenia co należy tłumaczyć wąskim pasmem widmowym lasera pompującego w stosunku do szerokiego pasma widmowego lampy błyskowej. Jednakże istotnym zagadnieniem jest wartość współczynników liniowej rozszerzalności termicznej α matrycy szkieł laserowych w stosunku do powszechnie stosowanych monokryształów. Duże wartości α są bezpośrednią przyczyną słabej odporności matrycy na szoki termiczne, co eliminuje je z zastosowań z dużymi mocami. W procesie technologicznym wytopu szkła ELG uzyskano współczynnik o wartości $\alpha = 89,4 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$, który w stosunku do szkła QE-7s ($\alpha = 124 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$) jest niższy i jest on porównywalny ze współczynnikiem matrycy QX/Er (poniżej $90 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$) [7].

W wyniku przeprowadzenia szeregu eksperymentów o charakterze niszczącym określono maksymalną dopuszczalną moc średnią lasera pompy o wartości $P_{sr} = 550 \text{ mW}$.

Istotnym elementem mogącym wpłynąć na wzrost wartości uzyskanych mocy wyjściowych i sprawności generacji byłoby zastosowanie powłok antyrefleksyjnych na powierzchniach czołowych materiału aktywnego. W efekcie tego występowałyby mniejsze straty w układzie rezonatora na skutek zwielokrotnionych przejść fotonów. Z działania w tym kierunku jednak zrezygnowano ze względu na brak potrzeby optymalizacji układu laserowego. Z tego samego powodu eksperymenty przeprowadzono jedynie ze zwierciadłem wyjściowym o transmitancji $T = 3\%$. Uzyskane parametry wyjściowe promieniowania podczas generacji lasera przy sprawności przekraczającej $\eta_{różn.} = 14\%$ są satysfakcjonujące i porównywalne z wieloma wynikami literaturowymi dla innych szkieł fosforanowych o podobnym stopniu domieszkowania [15 - 18].

Na podstawie uzyskanych wyników można przyjąć, że wytworzone w ITME szkło fosforanowe typu ELG może być stosowane w układach laserów na ciele stałym pompowanych diodami laserowymi w różnych konfiguracjach, np. w postaci mikrolaserów.

6. Literatura

- [1] Snoeks E., Kik P. G., Polman A.: Concentration quenching in erbium implanted alkali silicate glasses, *Optical Materials*, 1995, 5, 159 - 167
- [2] Dai S., Yu Ch., Zhou G., Zhang J., Wang G., Hu L.: Concentration quenching in erbium-doped tellurite glasses; *Journal of Luminescence*, 2006, 117, 39 - 45
- [3] Tao Z., Jie-Ming Q., Da-Yong J., Jing-Wen L., Sheng-Chun X.: Spectroscopic properties in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fluorophosphates glass; *Chinese Physics B*, 2012, 21, 4, 043302
- [4] Rivera-Lopez F., Babu P., Jyothi L., Rodriguez-Mendoza U., Martin I. R., Jayasankar C. K., Lavin V.: Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glass used for an efficient 1,5 μm broadband gain medium, *Optical Materials*, 2012, 34, 1235 - 1240
- [5] Danger T., Huber G., Denker B. I., Galagan B. I., Sverchkov S. E.: Diode-pumped cw laser around 1.54 μm using Yb, Er-doped silico-boro-phosphate glass. Conference on Lasers and Electro-Optics. *Technical Digest Series, Opt. Soc. America*, 6, 1998, 181
- [6] Laporta P., De Silvestri S., Magni V., Svelto O.: Diode-pumped cw bulk Er:Yb:glass laser; *Optics Letters*, 1991, 16, 24 2015
- [7] www.kigre.com; katalog produktów
- [8] www.schott.com; katalog produktów
- [9] Denken B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S.: Materials and components for miniature diode-pumped 1,5 μm erbium glass lasers, *Laser Physics*, 2002, 12, 4, 697 - 701
- [10] Svelto C., Ferriaro F., Arie A., Arbore M. A., Fejer M. M.: Frequency stabilization of a novel 1,5 μm Er-Yb bulk laser to a 39 K sub-doppler line at 770.1 nm, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37, 4
- [11] Ryabtsev G. I., Bezyazychnaya T. V., Parastchuk V. V., Ryabtsev A. G., Bogdanovich M. V., Yenzhyieuski A. I., Teplyashin L. L., Kuznietsova V. V., Petrovich I. P., Krakovskii A. S., Titovez S. N.: Spectral and temporal properties of diode-pumped Er, Yb: glass laser, *Optics Communications*, 2005, 252, 301 - 306
- [12] Lester Ch., Bjarklev A., Rasmussen T., Dinesen P. G.: Modeling of Yb^{3+} -sensitized Er^{3+} -doped silica waveguide amplifiers: *J. Lightwave Technology*, 1995, 13, 740 - 743
- [13] Pedersen B., Bjarklev A., Povlsen J. H., Dybdal K., Larsen C. Ch.: The design of erbium-doped fiber amplifiers, *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9, 1105-1112
- [14] Morkel P. R. Modeling erbium/ytterbium-doped fiber amplifiers: *Optical Amplifiers and Their Applications Technical Digest; Opt. Soc. Amer.*, 1992, 17, 206 - 209
- [15] Meng F. Z., Song F., Zhang C. B., Ding X., Shang M. R., Zhang G. Y.: Laser diode pumped 1.54 μm Er:Yb:Phosphate glass continuous wave compact laser, *Chinese Physics Letter*, 2003, 20, 10, 1739
- [16] Laporta P., Longhi S., Taccheo S., Svelto O.: Single-mode cw erbium - ytterbium glass laser at 1.5 μm ; *Optics Letter*, 1993, 18, 1
- [17] Shujing L., Song C., Hong C., Teng L., Zhang X., Zhaohui W., Jianguo T.: Investigation of the roundtrip cavity loss in laser diode pumped erbium: ytterbium - phosphate glass microchip lasers, *Journal of Applied Physics*, 2007, 102, 103101
- [18] Zhuping L., Changhoung Q., Shixun D., Yasi J., lili H.: Spectra and lasing properties of Er^{3+} , Yb^{3+} : phosphate glasses; *Chinese Optics Letters*, 2003, 1, 1