

FALOWODOWE STRUKTURY LASEROWE Yb, Nd:YAG/YAG

Jerzy Sarnecki¹, Krzysztof Kopczyński²

Warstwy falowodowe Yb, Nd:YAG/YAG domieszkowane w szerokim przedziale koncentracji jonami Nd³⁺ i Yb³⁺ otrzymano w procesie epitaksji z fazy ciekłej. W pracy przedstawiono widma emisji warstw przy pobudzeniu diodami laserowymi emitującymi promieniowanie o długości fali 810 nm oraz 975 nm. Niezależnie od długości fali pompującej zaobserwowano emisję linii 1030 nm charakterystycznej dla jonów iterbu oraz fluorescencję w zakresie niebieskim w wyniku oddziaływań kooperatywnych między jonami iterbu.

1.WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie laserami Yb:YAG generującymi promieniowanie o długości fali około 1030 nm odpowiadające pasmu absorpcji jonów prazeodymu dla przejścia $^3H_4 \rightarrow ^1G_4$. Lasery planarne Yb:YAG pobudzane diodami półprzewodnikowymi (970 nm) mogą stać się wydajnym źródłem pompowania dla wzmacniaczy włóknowych domieszkowanych jonami Pr³⁺ (PDFA – włókno ZBLAN) wzmacniających linię generacji 1330 nm.

Prowadzone są intensywne prace związane z zastosowaniem laserów ciała stałego, a w szczególności laserów Yb:YAG, do pobudzania PDFA. Z uwagi na wysoką stabilność pracy i uzyskiwane moce wyjściowe prace te są jednym z kierunków badań zmierzających do poprawienia charakterystyk pracy włóknowych wzmacniaczy prazeodymowych.

Selektywne pompowanie diodowe lasera Yb:YAG wymaga stosowania stosunkowo drogich diod laserowych InGaAs. Rozwiązaniem alternatywnym może

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, 01-919 Warszawa, ul. Wólczyńska 133
e-mail: sarnecki@sp.itme.edu.pl

² Instytut Optoelektroniki WAT, 01-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,
e-mail: kkopczyn@wat.waw.pl

okazać się dodatkowe domieszkowanie granatu Yb:YAG jonami neodymu [1]. Utworzenie struktury falowodowej Yb, Nd:YAG/YAG umożliwia pompowanie standardowymi diodami laserowymi AlGaAs (810 nm). Następuje wtedy wzbudzenie jonów Nd^{3+} do poziomu ${}^4\text{F}_{5/2}$, a następnie poprzez bezpromienisty transfer energii wzbudzenie jonów Yb^{3+} do poziomu ${}^2\text{F}_{5/2}$. W efekcie można uzyskać generację na długości fali 1030 nm związaną z przejściem jonów iterbu do poziomu ${}^2\text{F}_{7/2}$.

W procesie epitaksji z fazy ciekłej (LPE) możliwy jest wzrost warstw laserowych RE^{3+} :YAG domieszkowanych aktywnymi jonami z grupy lantanowców ($\text{RE}^{3+} = \text{Nd}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ czy Tm^{3+}) o doskonałej perfekcji strukturalnej i wysokiej jakości optycznej [2-7]. Parametry spektroskopowe i generacyjne warstw laserowych RE^{3+} :YAG otrzymanych metodą LPE są porównywalne z parametrami najwyższej jakości monokryształów granatów otrzymanych metodą Czochralskiego.

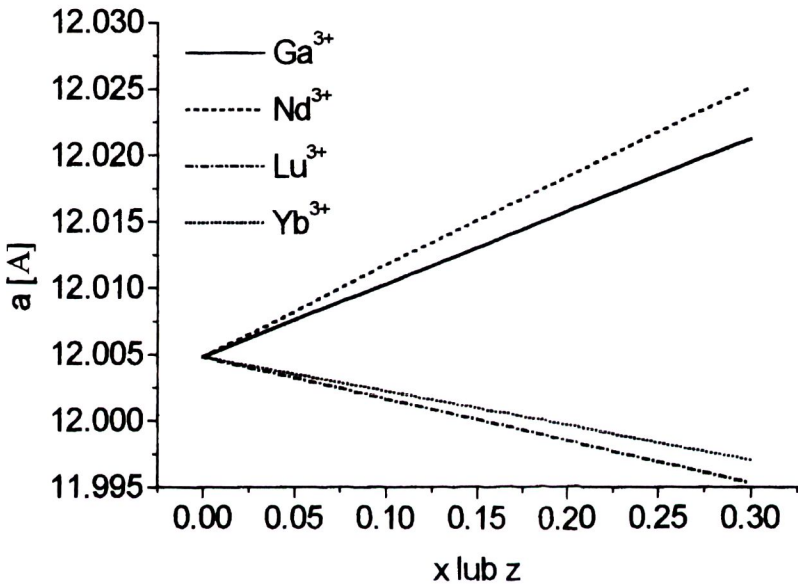
Wytworzenie cienkowarstwowego falowodu RE^{3+} :YAG wymaga wzrostu wartości współczynnika załamania warstwy w stosunku do współczynnika załamania podłoża YAG o $\sim \Delta n = 10^{-2}$ (dla $\lambda \approx 1000$ nm). Efekt ten można uzyskać poprzez częściowe podstawienie jonów Al^{3+} przez jony Ga^{3+} i ograniczenie równoczesnego wzrostu stałej sieci warstwy RE^{3+} :YAG jonami Lu^{3+} . Technologię wzrostu epitaksjalnych struktur falowodowych Nd:YAG/YAG i Yb:YAG/YAG oraz pomiary ich własności strukturalnych, spektroskopowych i laserowych przedstawiono w pracach [8-11].

Możliwości, jakie stwarza dodatkowe domieszkowanie jonami Yb^{3+} układu jonów neodymu w matrycy YAG oraz zalety planarnych laserów falowodowych uzasadniają podjęcie w ITME prac związanych z epitaksją z fazy ciekłej struktur falowodowych Yb, Nd:YAG/YAG. Otrzymano warstwy falowodowe z różnymi koncentracjami odpowiednio jonów Yb (do 15 at %) i Nd (do 3 at %) i wynikającymi z nich stosunkami koncentracji jonów Yb/Nd w zakresie od 0,5 do 5.

Tak bogaty materiał badawczy umożliwił określenie progowych koncentracji jonów Nd^{3+} i Yb^{3+} dla jakich, przy pobudzeniu diodą 810 nm, zaczyna się emisja linii 1030 nm jonu Yb^{3+} , przy jednoczesnej emisji linii 1060 nm jonu Nd^{3+} , oraz wzajemnych koncentracji jonów dla których występuje gaszenie luminescencji jonów Nd^{3+} i wyłączna luminescencja promieniowania 1030 nm w wyniku przejścia ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ jonów Yb^{3+} . W strukturach falowodowych o wyższej koncentracji jonów Yb^{3+} , niezależnie od długości fali diody pompującej zaobserwowano również emisję promieniowania niebieskiego w wyniku kooperatywnego oddziaływania jonów iterbu.

2. STRUKTURA FALOWODOWA Yb, Nd:YAG/YAG

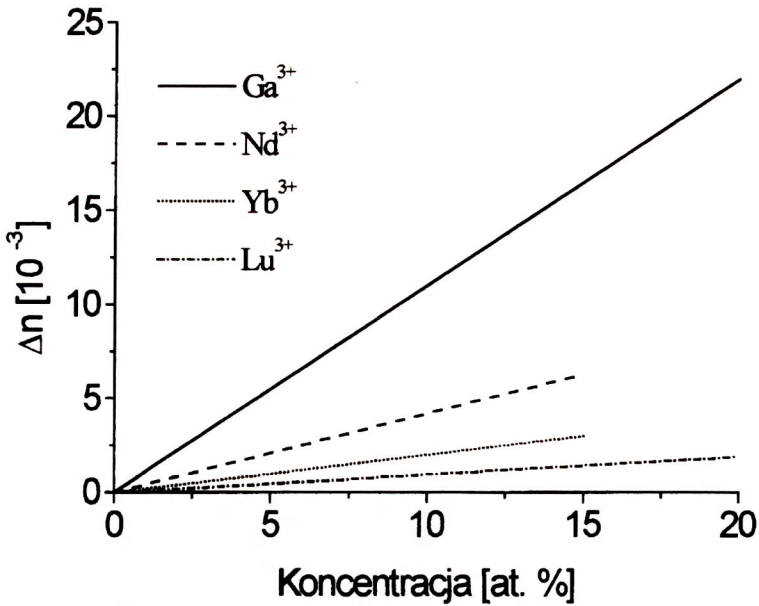
Wytworzenie aktywnego falowodu epitaksjalnego RE:YAG wymaga wzrostu wartości współczynnika załamania warstwy n_F w stosunku do współczynnika załamania podłoża n_S o $\sim 10^{-2}$ ($\lambda \approx 1000$ nm). Efekt ten można uzyskać przez częściowe podstawienie jonów Al^{3+} w pozycjach oktaedrycznych przez jony Ga^{3+} . Obecność jonów Ga^{3+} w warstwie YAG prowadzi do jednoczesnego wzrostu wartości stałej sieci warstwy. Wzrost stałej sieci warstwy należy skompensować obojętnymi jonami Lu^{3+} o mniejszym promieniu jonowym niż promień podstawianych przez nie w pozycjach dodekaedrycznych jonów Y^{3+} , tak aby niedopasowanie stałych sieci warstwy a_F i podłoża a_S sprowadzić do bezpiecznego przy heteroepitaksji granatów zakresu $-0,02 \text{ \AA} \leq \Delta a = a_S - a_F \leq + 0,01 \text{ \AA}$ [12].



Rys.1. Stała sieci granatu $Y_{3-x}RE_xAl_{5-z}Ga_zO_{12}$.

Fig. 1. Lattice constant of $Y_{3-x}RE_xAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ garnet.

Liniową zmianę stałej sieci granatu YAG w funkcji koncentracji jonów Nd^{3+} , Yb^{3+} , Lu^{3+} i Ga^{3+} przedstawia rys. 1. Do obliczeń przyjęto wartości promieni poszczególnych jonów zamieszczone w pracy [13]. Wyniki badań zmian wartości współczynnika załamania $\Delta n = n_F - n_{YAG}$ dla warstw YAG ($\lambda = 633$ nm) w zależności od koncentracji niektórych jonów domieszkowych zestawiono na rys. 2 posługując się wynikami pomiarów przedstawionymi w pracy [14].



Rys. 2. Zależność $\Delta n = n_F - n_{YAG}$ od koncentracji i rodzaju domieszki.

Fig. 2. Film substrate refractive index difference versus dopant concentration.

3. EPITAKSJA WARSTW FALOWODOWYCH Yb,Nd:YAG Z FAZY CIEKLEJ

Wzrost warstw granatów w procesie epitaksji z fazy ciekłej zachodzi z przechłodzonego roztworu wysokotemperaturowego. Fazę granatu np. $Y_3Al_5O_{12}$ tworzą tlenki Al_2O_3 i Y_2O_3 rozpuszczone w topniku $PbO - B_2O_3$. Proces epitaksji odbywa się warunkach izotermicznych metodą zanurzeniową z poziomo mocowanym podłożem obracającym się ruchem rewersyjnym.

Procesy epitaksji warstw granatów przeprowadzono w stanowisku LPE zaprojektowanym, skonstruowanym i uruchomionym w trakcie prac związanych z projektem zamawianym KBN PBZ-023-10, którego fragmentem było *Opracowanie technologii i charakteryzacja cienkowarstwowych struktur Nd:YAG/YAG*. Przebieg procesu epitaksji z fazy ciekłej warstw granatów, założenia konstrukcyjne laboratoryjnego stanowiska do epitaksji wraz z opisem jego działania zostały przedstawione we wcześniejszych publikacjach [15-16].

Dla określenia stosunków stężeń molowych poszczególnych tlenków w składzie wyjściowym oraz zależności temperaturowo - fazowych w złożonym układzie topnik faza granatu przyjęto współczynniki molowe R_i zaproponowane przez Blanka i Nielsena w pracy [12]. Współczynniki te w przypadku epitaksji warstw $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ mają postać:

$$R_1 = \frac{[Al_2O_3]}{[Y_2O_3 + Nd_2O_3 + Lu_2O_3 + Yb_2O_3]}$$

$$R_2 = \frac{[Al_2O_3]}{[Ga_2O_3]}$$

$$R_3 = \frac{[PbO]}{B_2O_3}$$

$$R_5 = \frac{[Y_2O_3]}{[Nd_2O_3 + Lu_2O_3 + Yb_2O_3]}$$

$$R_4 = \frac{[Y_2O_3 + Nd_2O_3 + Yb_2O_3 + Lu_2O_3 + Al_2O_3 + Ga_2O_3]}{[Y_2O_3 + Nd_2O_3 + Yb_2O_3 + Lu_2O_3 + Al_2O_3 + Ga_2O_3 + PbO + B_2O_3]}$$

R_4 określa *rozpuszczalność* tlenków tworzących fazę granatu tj. Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Nd_2O_3 , Lu_2O_3 , Al_2O_3 i Ga_2O_3 w topniku $PbO + B_2O_3$.

Przy epitaksji warstw granatów opisanych wzorem $Y_{3-x-y-t}Nd_xYb_yLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ z zastosowaniem topnika $PbO - B_2O_3$ należy uwzględnić różne proporcje poszczególnych jonów w warstwie i wyjściowym składzie. Różnica ta spowodowana jest różnymi od jedności wartościami współczynnika podziału (segregacji) poszczególnych jonów ziem rzadkich i galu. Problem ten omówiony został w pracy [16], w której przedstawiono oszacowane z pomiarów dyfraktometrycznych struktur epitaksjalnych YAG współczynniki podziału dla domieszkowych jonów Nd, Lu, Yb i Ga.

Wartości współczynników podziału posłużyły do wyliczenia składów wyjściowych przy wzroście warstw $(YNdYbLu)_3(AlGa)_5O_{12}$, które w zamierzeniu są warstwami falowodowymi o określonej koncentracji jonów aktywnych iterbu i neodymu.

Zestawienie współczynników molowych określających składy wyjściowe i wyznaczone z pomiarów dyfraktometrycznych koncentracje jonów Nd i Yb zawiera tab. 1.

Dla ustalonych parametrów procesu epitaksji otrzymano warstwy falowodowe ze stałą koncentracją jonów Lu^{3+} (~30 at.% , $t \approx 0,9$) i Ga^{3+} (~14 at.% , $z \approx 0,7$), a zmienną Nd^{3+} i Yb^{3+} odpowiednio w zakresie: 1 at.% - 3 at.% (Nd^{3+}) i 0,5 at.% -15 at.% (Yb^{3+}). Dla takiego poziomu domieszkowania warstw YAG jonami Ga^{3+} różnica współczynników załamania warstwy i podłoża wynosi ~ 0.015 [9].

W celu ograniczenia domieszkowania warstw YAG jonami Pb^{2+} z topnika stosowano temperatury wzrostu warstw powyżej 950°. Jony Pb^{2+} wchodząc w połączenia dodekaedryczne powodują, oprócz zwiększenia stałej sieci warstwy, istotny wzrost niepożądanego absorpcji. W przypadku epitaksji warstw $Y_3A_5O_{12}$, korzystniej niż dla $Y_3Fe_5O_{12}$, nie obserwowano domieszkowania warstw jonami Pb^{2+} dla temperatur wzrostu powyżej 950 °C [17].

Tabela 1. Współczynniki molowe R_i przy epitaksji warstw granatów $Y_{3-x}Nd_xAl_5O_{12}$ (skład 1), $Y_{3-x-t}Nd_xLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ (skład 2) i $Y_{3-x-y-t}Nd_xYb_yLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ (skład 3-9).

Table 1. Mole coefficients R_i for epitaxy of garnet layers $Y_{3-x}Nd_xAl_5O_{12}$ (composition 1), $Y_{3-x-t}Nd_xLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ (composition 2) and $Y_{3-x-y-t}Nd_xYb_yLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ (composition 3-9).

No	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	x	y
1	5.0	-	12.0	0.0275	-	0.03	-
2	4.41	2.887	12.0	0.0324	3.41	0.03	-
3	4.12	2.887	12.0	0.0324	3.35	0.03	0.015
4	4.00	2.887	12.0	0.0324	3.28	0.03	0.03
5	4.04	2.887	12.0	0.0325	2.65	0.03	0.09
6	3.99	2.887	12.0	0.0326	2.93	0.03	0.15
7	3.61	2.887	12,0	0.0325	2.07	0.09	0.09
8	3.59	2.887	12,0	0.0326	1.96	0.09	0.15
9	3.37	2.887	12,0	0.0335	1.70	0.09	0.45

Procesy epitaksji przeprowadzono dla przechłódzeń nie przekraczających 20° C. Na podłożach YAG o średnicy 20 mm i orientacji <111> otrzymano warstwy o grubościach w zakresie od 1 µm do 40 µm.

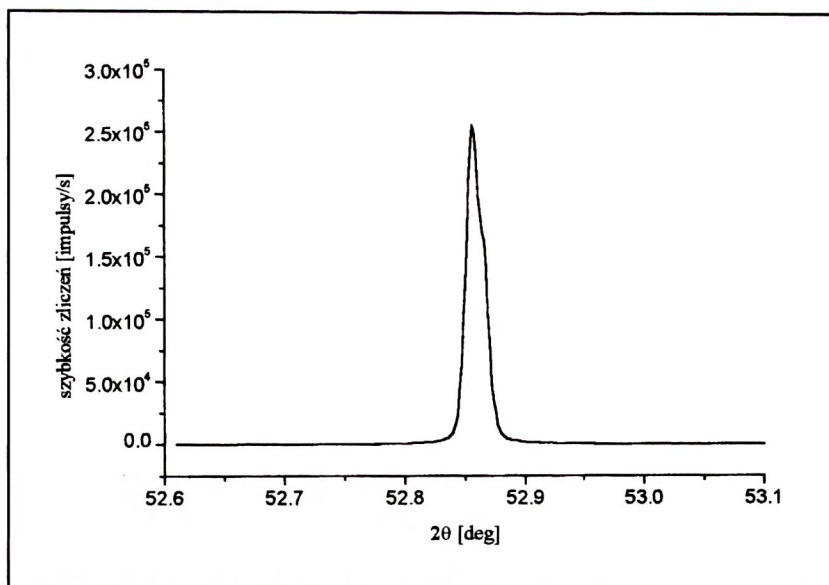
4. BADANIA STRUKTUR FALOWODOWYCH

Epitaksjalne struktury falowodowe Yb,Nd:YAG/YAG zostały scharakteryzowane z wykorzystaniem wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD) oraz badań spektroskopowych i generacyjnych.

4.1. Pomiary XRD

Metoda wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej posłużyła do oceny jakości strukturalnej warstw oraz wyznaczenia względnego niedopasowania stałych sieci warstwy a_F i podłoża a_S . Względne niedopasowanie zdefiniowane jako: $\Delta a/a_S = (a_S - a_F)/a_S$ umożliwia wyliczenie różnicy stałych sieci Δa dla warstw z różnymi koncentracjami jonów Nd^{3+}, Yb^{3+} . Niedopasowanie stałych sieci podłoża YAG i warstwy informuje o wpływie domieszkowania na stałą sieci warstwy.

Przy domieszkowaniu warstw YAG jonami Nd^{3+} wartość stałej sieci rośnie. W warstwach $Y_{3-x}Nd_xAl_5O_{12}$ (skład 1) dla koncentracji jonów Nd^{3+} ok. 1 at. % wartości stałej sieci podłoża i warstwy są zbliżone ($\Delta a \gg 0$) ponieważ stała sieci podłoża YAG jest większa niż warstwy epitaksjalnej YAG [2,16]. Wprowadzenie w miejsce jonów Y^{3+} jonów Lu^{3+} i Yb^{3+} obniża wartość stałej sieci granatu (rys. 1).



Rys. 3. Dyfraktogram struktury $Y_{2.97-y}Nd_{0.03}Lu_yAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ (skład 2).

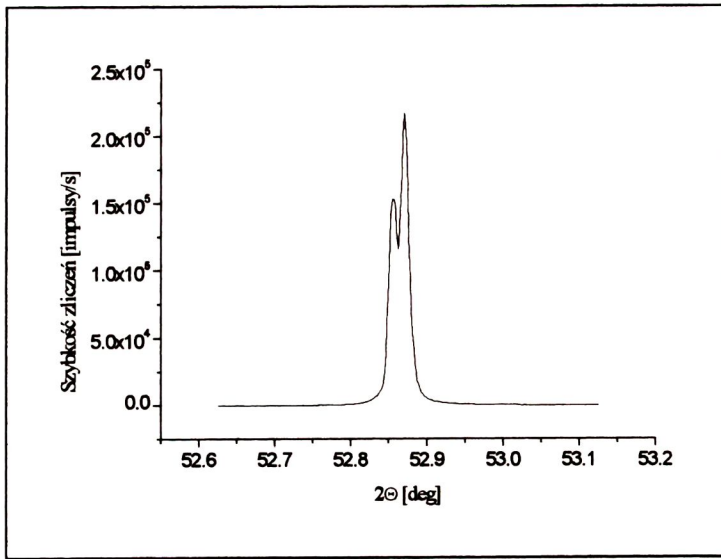
Fig. 3. XRD pattern of $Y_{2.97-y}Nd_{0.03}Lu_yAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ structure (melt 2).

Składem wyjściowym do epitaksji warstw $Y_{3-x-y-t}Nd_xYb_yLu_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}$ był skład nr 2, z którego otrzymano struktury falowodowe $Y_{2.97-y}Nd_{0.03}Lu_yAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ o wartości stałych sieci podłoża i warstwy na tyle zbliżonych, że zarejestrowany został jeden pik dyfrakcyjny przedstawiony na rys. 3 [16].

Częściowe podstawienie w miejsce jonów Y^{3+} jonów Yb^{3+} powoduje zmniejszenie stałej sieci. Dyfraktogramy struktur falowodowych otrzymanych ze składów wyjściowych nr 6 i 9 ilustrują rys. 4. i rys. 5.

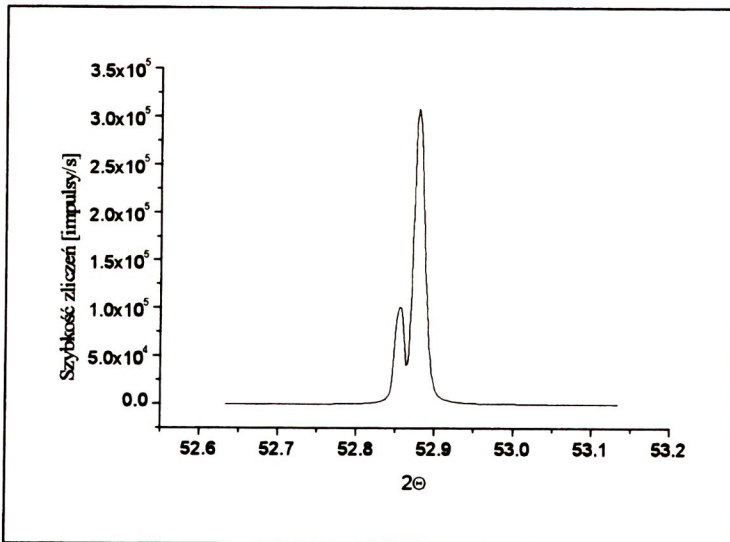
Pik odpowiadający mniejszej wartości 2θ pochodzi od podłoża i pokazuje, że stała sieci podłoża YAG jest większa od stałej sieci warstwy. Odległość kątowa pików dyfrakcyjnych $\Delta\theta_{444} = \theta_S - \theta_F$ wynosi ok. $-27''$ ($\Delta a/a_S = 2,64 \times 10^{-4}$) co odpowiada $\Delta a = 3,1 \times 10^{-3} \text{ \AA}$.

Trzykrotne zwiększenie koncentracji tlenków Nd_2O_3 i Yb_2O_3 w składzie wyjściowym nieznacznie przesunęło względem siebie piki pochodzące od podłoża i warstwy dając w efekcie $\Delta\theta_{444} = -41''$ ($\Delta a/a_S = 4,03 \times 10^{-4}$) a niedopasowanie $\Delta a = 4,8 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ – rys. 5. Niedopasowanie stałych sieci warstwy falowodowej i podłoża YAG mieściło się w zakresie $-0,02 \text{ \AA} \leq \Delta a = a_S - a_F \leq +0,01 \text{ \AA}$, dla którego nie zaobserwowano przy epitaksji granatów wzrostu fasetowego.



Rys. 4. Dyfraktogram struktury falowodowej $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ – koncentracja jonów Nd^{3+} ~1 at % ($x = 0,03$) i Yb^{3+} ~ 5 at.% ($t \approx 0,15$)

Fig. 4. XRD pattern of $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ waveguide structure – concentration of Nd^{3+} ions ~ 1 at % ($x = 0,03$) and Yb^{3+} ~ 5 at.% ($t \approx 0,15$)



Rys. 5. Dyfraktogram struktury falowodowej $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ – koncentracja jonów Nd^{3+} ~3 at % ($x = 0,09$) i Yb^{3+} ~ 15 at.% ($t \gg 0,45$)

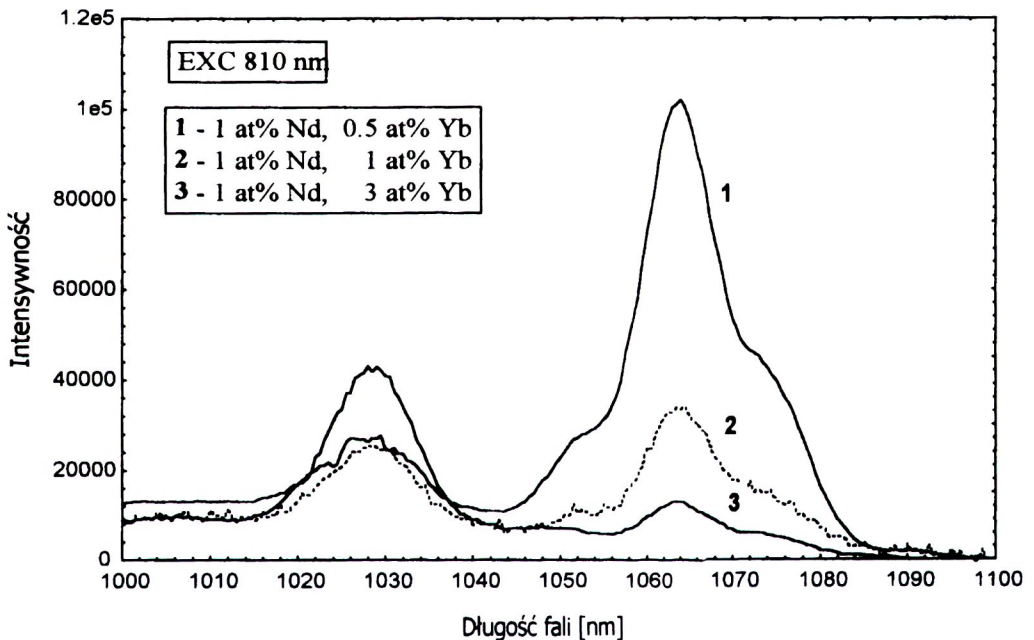
Fig. 5. XRD pattern of $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ waveguide structure – concentration of Nd^{3+} ions ~ 3 at % ($x = 0,09$) and Yb^{3+} ~ 15 at.% ($t \gg 0,45$)

4.2. Pomiary spektroskopowe i generacyjne

Laser Yb:YAG o długości fali generacji 1030 nm (przejście ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ jonów Yb^{3+}) może być wydajnym źródłem pompowania wzmacniaczy włóknowych domieszkowanych jonami Pr^{3+} (PDFA – włókno ZBLAN). Długość fali 1030 nm jest zbliżona do szerokiej linii silnej absorpcji jonu $Pr^{3+} \sim 1017$ nm.

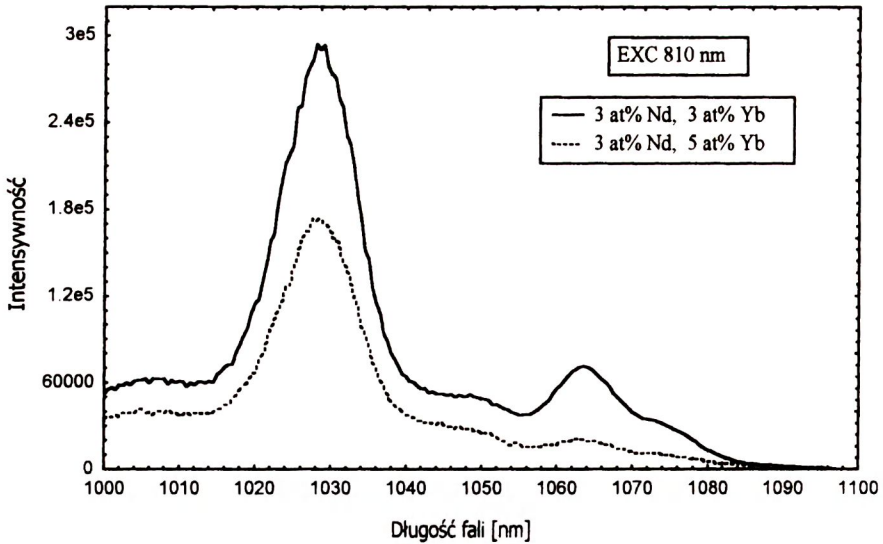
W strukturze falowodowej $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yAl_{5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ pobudzenie ośrodka standardowymi diodami AlGaAs 810 nm prowadzi do wzbudzenia poziomu ${}^4F_{5/2}$ jonów Nd^{3+} . Z poziomu tego zachodzić może typowa dla jonów Nd^{3+} w YAG luminescencja w zakresie $\lambda = 1064$ nm (${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) lub bezpromienisty transfer energii do jonu Yb^{3+} i wzbudzenie poziomu ${}^2F_{5/2}$. W efekcie obserwuje się jednoczesną luminescencję promieniowania 1030 nm odpowiadającego przejściu ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ w jonach Yb^{3+} .

Widma luminescencji struktur Nd,Yb:YAG pobudzanych diodą laserową 810 nm w temperaturze pokojowej przedstawiono na rys. 6-7.



Rys. 6. Widma luminescencji warstw Nd,Yb:YAG dla różnych koncentracji jonów Nd^{3+} i Yb^{3+} mierzone w temperaturze pokojowej.

Fig. 6. Luminescence spectra of the Nd,Yb:YAG at room temperature versus Nd^{3+} and Yb^{3+} ions concentration.



Rys. 7. Widma luminescencji warstw Nd,Yb:YAG dla wyższych koncentracji jonów Nd^{3+} i Yb^{3+} mierzone w temperaturze pokojowej.

Fig. 7. Luminescence spectra of the Nd,Yb:YAG at room temperature for higher Nd^{3+} and Yb^{3+} ions concentration.

Grubości warstw epitaksjalnych w badanych strukturach falowodowych mieszają się w zakresie 20 - 25 μm . Wyjątek stanowi warstwa o grubości 40 μm z koncentracją jonów Yb^{3+} i Nd^{3+} ok. 3 at.%.

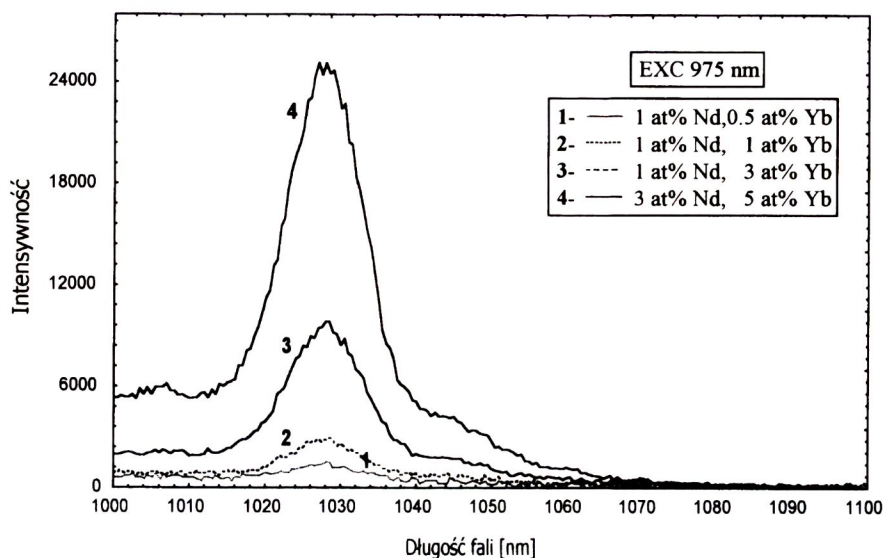
Pomiarów widm wzbudzenia dokonano korzystając z zestawu fluorymetrycznego JOBIN-YVON z monochromatorami H20-H10. Rozdzielczość aparatury pomiarowej wynosiła 0.5 nm. Próbkę wzbudzano diodą laserową SDL 2432.

Dla struktur falowodowych $\text{Y}_{3-x-y-t}\text{Nd}_x\text{Lu}_y\text{Yb}_t\text{Al}_{5-z}\text{Ga}_z\text{O}_{12}/\text{YAG}$ o stałej koncentracji jonów $\text{Nd}^{3+} \sim 1$ at.% wraz ze wzrostem koncentracji jonów Yb^{3+} od $\sim 0,5$ at.% do ~ 3 at.% wzrasta natężenie linii 1030 nm i maleje natężenie linii 1064 nm. Dla wyższych koncentracji jonów Yb (3at.% i 5 at.%) i Nd (3 at.%) efekt ten jest silniejszy.

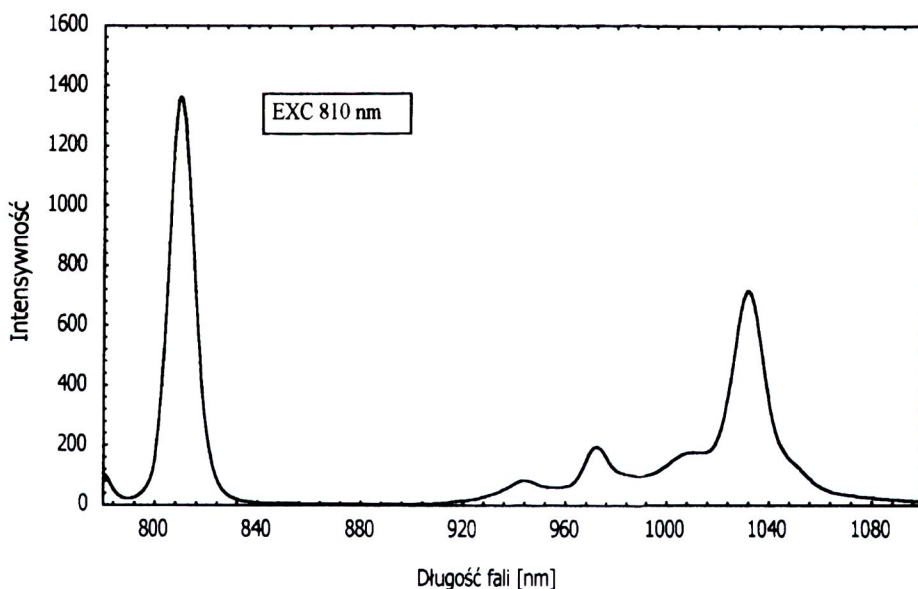
Przy pobudzaniu diodą 975 nm InGaAs, dla wszystkich koncentracji jonów itru i neodymu obserwowano wyłącznie luminescencję promieniowania o długości fali 1030 nm z poziomu ${}^2\text{F}_{5/2}$ jonów Yb^{3+} - rys. 8.

Dla pięciokrotnie większej koncentracji jonów itterbu w stosunku do koncentracji jonów neodymu w warstwach falowodowych Yb,Nd,Lu,Ga:YAG obserwowano przy pompowaniu diodą AlGaAs 810 nm jedynie luminescencję promieniowania o długości fali 1030 nm. Widmo luminescencji struktury falowodowej o koncentracji jonów Yb^{3+} (~ 15 at.%) i Nd^{3+} (~ 3 at.%) przedstawiono

na rys. 9. Na wykresie widoczne jest również widmo promieniowania diody pompującej AlGaAs 810 nm.



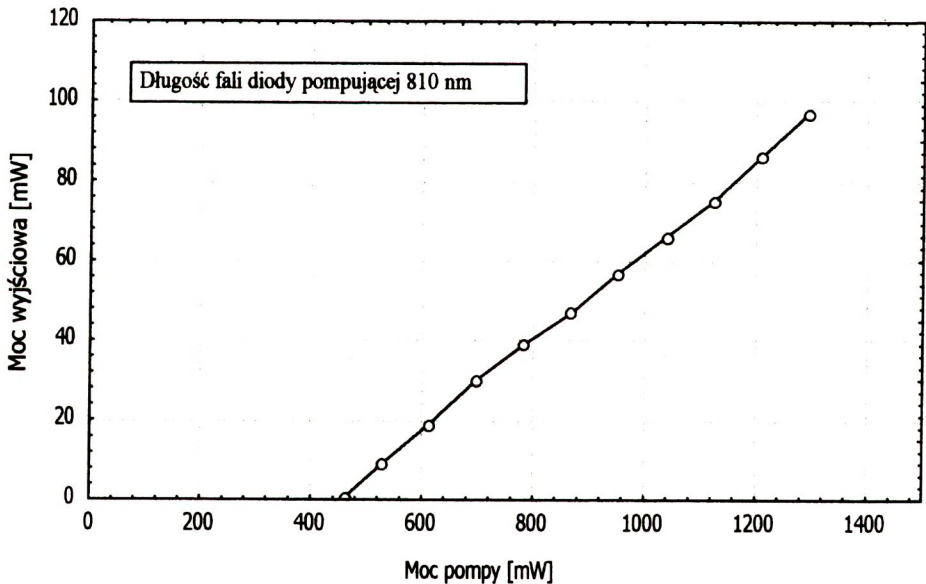
Rys. 8. Widma luminescencji w temperaturze pokojowej przy pobudzeniu diodą laserową 975 nm.
Fig. 8. Luminescence spectra at room temperature by excitation of 975 nm laser diode.



Rys. 9. Widmo luminescencji struktury $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{1-5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ ($x \approx 0,09$, $t \approx 0,45$).
Fig. 9. Emission spectra of $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_tAl_{1-5-z}Ga_zO_{12}/YAG$ structure ($x \approx 0,09$, $t \approx 0,45$).

Potwierdzona została możliwość efektywnego, bezpromienistego transferu energii między jonami neodymu (Nd) i iterbu (Yb) w falowodowej warstwie $Y_{3-x-y-t}Nd_xLu_yYb_1Al_{5-z}Ga_zO_{12}$. W rezultacie uzyskać można generację promieniowania o długości fali 1030 nm na przejściu jonów iterbu (${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$) przy pobudzaniu jonów Nd^{3+} pompą 810 nm.

Do pomiarów generacyjnych przygotowano struktury w postaci prostokątów o wymiarach 5x15 mm z wypolerowanymi i płasko-równoległymi powierzchniami czołowymi. Falowód pompowano podłużnie wiązką lasera półprzewodnikowego AlGaAs pracującego na długości fali 810 nm. Do pompowania wykorzystano diodę laserową typu SDL 2432 firmy Spectra Diode Labs z wyjściem światłowodowym i chłodziarką TEC oraz zasilacz SDL 822. Do pomiaru mocy zastosowano miernik RM 6600 z sondami pomiarowymi RKP-575 i układem odpowiednich filtrów. Badania generacyjne prowadzono w układzie rezonatora Fabry-Perota z płasko-równoległymi zwierciadłami zewnętrznymi. Z uwagi na brak pokryć cienkowarstwowych na powierzchniach czołowych badanych struktur oraz braku możliwości optymalizacji układu optycznego formowania wiązki pompującej uzyskano niskie sprawności i wysokie progi generacji. Charakterystykę mocy wyjściowej lasera falowodowego Yb,Nd:YAG w funkcji mocy promieniowania pompującego padającego na strukturę przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Moc wyjściowa lasera falowodowego Yb,Nd:YAG pompowanego diodą laserową 810 nm w funkcji mocy pompy padającej na strukturę.

Fig. 10. Output power versus incident pump power for the Yb,Nd:YAG waveguide laser pumped 810 nm laser diode.

W trakcie badań generacyjnych niezależnie od długości fali diody pompującej obserwowano luminescencję promieniowania w niebieskim zakresie widma. Niebieska luminescencja związana jest z oddziaływaniami kooperatywnymi między jonami Yb^{3+} w warstwie falowodowej. Podobną luminescencję promieniowania o długości fali ok. 484 nm w warstwach falowodowych $\text{Yb}:\text{YAG}$ pobudzanych przestrajalnym laserem Ti^{3+} : szafir (940 nm) obserwowano w pracy [11].

5. PODSUMOWANIE

W procesie epitaksji z fazy ciekłej otrzymano warstwy falowodowe YAG domieszkowane jonami neodymu i iterbu. Różnica współczynników załamania warstwy $\text{Yb,Nd}:\text{YAG}$ i podłoża YAG wynosiła $\Delta n > 0.01$. Efekt zwiększenia wartości współczynnika załamania warstwy uzyskany został przez częściowe podstawienie jonów Al^{3+} jonami Ga^{3+} z jednoczesnym skompensowaniem wzrostu stałej sieci przez domieszkowanie jonami Lu^{3+} .

Według wiedzy autorów badane struktury są pierwszymi falowodowymi strukturami epitaksjalnymi $\text{Y}_{3-x-y-t}\text{Nd}_x\text{Yb}_y\text{Lu}_t\text{Al}_{5-z}\text{Ga}_z\text{O}_{12}/\text{YAG}$ z tak szerokim przedziałem koncentracji jonów Yb^{3+} i Nd^{3+} .

Metodą wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej zmierzono względne niedopasowanie stałych sieci monokrystalicznego podłoża YAG i warstw epitaksjalnych. Badania dyfraktometryczne wykazały dobrą perfekcję strukturalną otrzymanych warstw epitaksjalnych.

We wszystkich strukturach falowodowych $\text{Y}_{3-x-y-t}\text{Nd}_x\text{Yb}_y\text{Lu}_t\text{Al}_{5-z}\text{Ga}_z\text{O}_{12} / \text{YAG}$ obserwowano emisję z poziomu ${}^2\text{F}_{5/2}$ jonów Yb^{3+} . Przy pobudzeniu struktur $\text{Yb,Nd}:\text{YAG}$ diodą laserową AlGaAs o długości fali 810 nm wzbudzenie jonów Yb^{3+} następuje poprzez bezpromienisty transfer energii ze wzbudzonego pompą poziomu ${}^4\text{F}_{5/2}$ jonów Nd^{3+} do poziomu ${}^2\text{F}_{5/2}$ jonów Yb .

Występuje graniczny stosunek koncentracji jonów Yb do koncentracji jonów Nd , dla którego, przy pobudzeniu struktury promieniowaniem 810 nm, obserwuje się całkowite gaszenie luminescencji jonów Nd . W badanych strukturach występowanie luminescencji tylko jonów Yb na linii 1030 nm obserwowano dla stosunku koncentracji $\text{Yb}/\text{Nd} = 5$ dla obydwu długości promieniowania pompującego.

W badaniach uzyskano akcję laserową dla długości fali 1030 nm przy pompowaniu diodą 810 nm AlGaAs . Niska sprawność generacji laserowej związana była z brakiem pokryć cienkowarstwowych na ośrodku czynnym i braku możliwości optymalizacji układu pompującego.

Otrzymane w pracy wyniki dają podstawę do prowadzenia dalszych badań struktur falowodowych $\text{Yb, Nd}:\text{YAG}$. Planowane prace poświęcone zostaną

pomiarom czasów życia poziomów wzbudzonych jonów aktywnych, intensywności poszczególnych przejść promienistych i efektywności bezpromienistego przekazu energii między jonami neodymu i iterbu. Osobnym zagadnieniem wymagającym dalszej analizy mogą być obserwowane oddziaływania kooperative jonów Yb^{3+} przy obecności w sieci krystalicznej jonów Nd^{3+} .

PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować Pani mgr K. Mazur i Panu dr. J. Sassowi za wykonanie pomiarów dyfraktometrycznych i cenne dyskusje.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sugimoto N., Chishi Y., Katoh Y., Shimokozo M. and Sudo S.: A ytterbium–and neodymium-co-doped yttrium aluminium garnet-buried channel waveguide laser pumped at $0.81 \mu\text{m}$, *Appl.Phys.Lett.* 67 (1995) 582-584
- [2] Ferrand B, Pelenc D., Charter I. and Wyon Ch.: Growth of LPE Nd:YAG single crystal layers for waveguide laser applications, *J.Cryst. Growth*, 128 (1993) 966-969
- [3] Hanna D.C., Large A.C., Shepherd D.P., Tropper A.C., Charter I., Ferrand B. and Pelenc D.: A side-pumped Nd:YAG epitaxial waveguide laser, *Optics Comm.* 91 (1992) 229-235
- [4] Pelenc D., Chambaz B., Charter I., Ferrand B., Wyon Ch., Shepherd D.P., Hanna D.C., Large A.C., Tropper A.C.: High slope efficiency and low threshold in a diode pumped epitaxially grown Yb:YAG waveguide laser, *Optics Comm.* 115 (1993) 211-215
- [5] Ferrand B., Remeix A.: YAG:Tm laser waveguides grown by liquid phase epitaxy, *Ecole de Physique des Houches*, 13 – 23 Juin 1994, vol II, 859-864
- [6] Tropper A.C.: Crystalline waveguide lasers, CLEO Europe, Amsterdam NL, 1994, Post-deadline Papers, CMF2, 99-101
- [7] Large A.C., Hanna D.C., Shepherd D.P., Tropper A.C., Warburton T.J., Borrel C., Ferrand B., Remeix A., Thony P., Auzel F., Meichenin D.: Low threshold 1.64 mm operation of a Yb,ER:YAG waveguide laser, CLEO Europe, Amsterdam NL, 1994, CMF4, 19
- [8] Jabłoński R., Sarnecki J., Mazur K., Sass J., Skwarcz J.: ESR and X-ray diffraction measurements of Nd substituted yttrium aluminum garnet films, *J. Alloys and Compounds*, 300-301 (2000) 316-321
- [9] Sarnecki J., Malinowski M., Skwarcz J., Jabłoński R., Mazur K., Litwin D. Sass J.: Liquid phase epitaxial growth and characterization of Nd:YAG/YAG structures for thin film lasers, *Proc. SPIE* 4237 (2000) 5-10
- [10] Malinowski M., Sarnecki J., Piramidowicz R., Szczepański P. and Woliński W.: Epitaxial RE^{3+} :YAG planar waveguide lasers, *Opto-Electronics Rev.*, 9 (2001) 67-74
- [11] Malinowski M., Kaczkan M., Piramidowicz R., Frukacz Z., Sarnecki J.: Cooperative emission in Yb^{3+} :YAG planar waveguide, *J. Luminesc.* 94-95 (2001) 29-33

- [12] Blank S.L., Nielsen J.W.: The growth of magnetic garnet by liquid phase epitaxy, *J.Cryst. Growth* 17 (1972) 302-311
- [13] Shannon R.D., Prewitt C.T.: Effective ionic radii in oxides and fluorides, *Acta Cryst. B25* (1969) 925-946
- [14] Pelenc D.: These de Doctorat, Universite' de Grenoble, 1992
- [15] Sarnecki J., Skwarcz J.: Epitaksja warstw Er:YAG z fazy ciekłej, *Materiały Elektroniczne* 25 (1997) 4-17
- [16] Sarnecki J.: Wzrost z fazy ciekłej i charakteryzacja laserowych struktur falowodowych Nd:YAG/YAG, *Materiały Elektroniczne* 28 (2000) 5-24
- [17] Gualtieri D.M.: Liquid phase epitaxial growth of $Y_3(Al..Sc)_5O_{12}$ on (111)-oriented $Y_3Al_5O_{12}$ substrates, *J.Cryst. Growth*, 84 (1987) 399-402

THE Yb, Nd:YAG/YAG STRUCTURES FOR WAVEGUIDE LASERS

The thin waveguide films of Nd^{3+} and Yb^{3+} co-doped YAG were grown by means of liquid phase epitaxy. The fluorescence spectra of thin films pumped by the laser diodes at 810 nm and 975 nm are presented. Itrbium emission at 1030 nm and strong blue radiation due to cooperative emission of Yb^{3+} ions was observed independently on the excitation wavelength.