

BADANIA ABSORPCJI W KRYSZTAŁACH NIOBIANU LITU DOMIESZKOWANEGO ERBEM

Izabela Pracka, Marek Świrkowicz, Barbara Surma, Małgorzata Możdżonek

Niobian litu domieszkowany pierwiastkami ziem rzadkich łączy w sobie własności laserowe z elektrooptycznymi i nieliniowymi.

Monokryształy niobianu litu domieszkowane Er^{3+} w ilości 0,1 i 03,% at otrzymano metodą Czochralskiego. Kryształy wyciągano w kierunku "z" i "y". Otrzymano monokryształy o średnicy 80 mm i długości do 90 mm o dobrej jakości optycznej, regularne bez defektów makroskopowych. Polaryzowano je w oddzielnym procesie.

Badano widma absorpcji tych kryształów w zakresie $30\,000\text{ cm}^{-1}$ - 2000 cm^{-1} w temperaturze 15-300 K.

1. WPROWADZENIE

Niobian litu jest ferroelektrykiem o najwyższej temperaturze Curie wśród znanych materiałów. Wykazuje także dobre właściwości piezoelektryczne, piroelektryczne, akustooptyczne oraz elektrooptyczne. Te ostatnie własności predysponują go do zastosowań w optoelektronice i optyce nieliniowej. Do tej pory najpopularniejszymi zastosowaniami niobianu litu były filtry pośredniej częstotliwości z falą powierzchniową, stosowane w telewizji oraz modulatory elektrooptyczne stosowane w technice laserowej [1- 4]. Szybki rozwój techniki laserowej powoduje konieczność poszukiwania nowych materiałów i ciągłego doskonalenia techniki wytwarzania monokryształów, stosowanych w tej dziedzinie.

W latach 1990-1995 wzrosło ponownie zainteresowanie monokryształami niobianu litu, czystymi, domieszkowanymi MgO i pierwiastkami ziem rzadkich [5-8]. Niobian litu domieszkowany pierwiastkami ziem rzadkich posiada własności laserujące. Ponieważ posiada również własności elektrooptyczne może więc służyć jednocześnie jako modulator i laser. Konstrukcje takich elementów planarnych opisano w kilku publikacjach [9-11].

Domieszkę erbu lub innego pierwiastka aktywnego wprowadzono do płytek z niobianu litu na drodze implantacji i dyfuzji. Procesy te są jednak bardzo czaso-

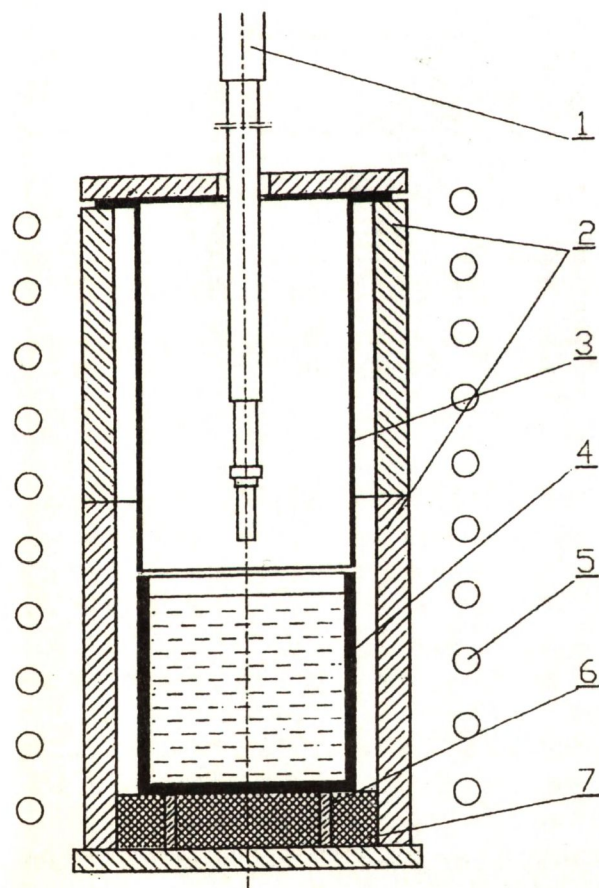
chłonne (trwają od 45 do 80 godz.).

W niniejszej pracy domieszka erbu wprowadzana była bezpośrednio do roztopu, z którego metodą Czochralskiego wyciągano monokryształy.

Jednorodne monokryształy otrzymuje się nie ze składu stechiometrycznego, lecz topiącego się kongruentnie składu - Nb_2O_5 51,4% : Li_2O 48,6% mol [12], a więc z niedoborem litu. Wprowadzenie domieszki trójwartościowej (Er^{3+} , Tm^{3+}), która lokowałaby się w lukach litowych, powinno doprowadzić do poprawienia równowagi energetycznej i strukturalnej monokryształów.

Istnieje również możliwość, że niobian litu domieszkowany pierwiastkami ziem rzadkich stanie się przydatnym materiałem do różnych zastosowań w technice laserowej, szczególnie w układach miniaturowych.

2. OPIS EKSPERYMENTU



Monokryształy niobianu litu domieszkowane erbem w postaci Er_2O_3 uzyskano metodą Czochralskiego poprzez wyciąganie z roztopu na zorientowanym zarodku. Stosowano urządzenie typu CGS-2 wyprodukowane w Polsce przez firmę SPEXON. Urządzenie posiada komputerowo sterowany układ automatycznej regulacji średnicy, w którym zmiany wagi rosnącego monokryształu rejestruje czujnik tensometryczny. Zestaw do krystalizacji składa się z tygla i dogrzewacza, wykonanych z platyny o czystości 3N oraz z osłon ceramicznych stanowiących izolację cieplną (rys.1). W urzą-

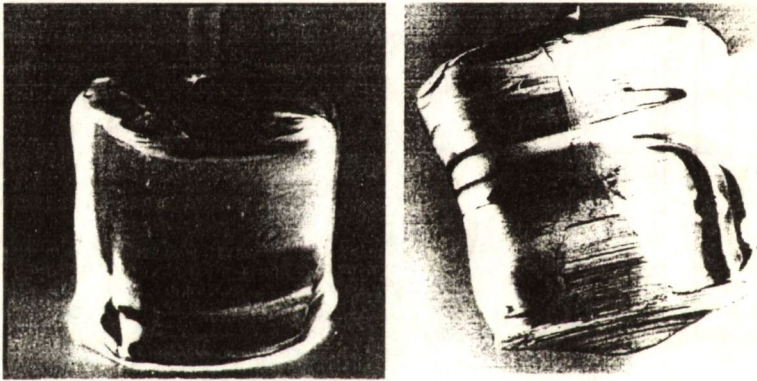
Rys. 1. Schemat układu grzejnego.

1) Pręt z zarodkiem, 2) osłony ceramiczne, 3) dogrzewacz, 4) tygiel, 5) wzбудnik, 6) podstawka ceramiczna, 7) wata ceramiczna Kaowool.

dzeniu stosuje się grzanie indukcyjne (generator Stanelco o mocy wyjściowej 30 kW).

W czasie całego procesu wyciągania monokryształu zmiany mocy generatora w. cz. powinny być jak najmniejsze, zaś w części walcowej monokryształu nie mogą przekraczać 0,2 W/h, zasilanie generatowe przez układ stabilizacji UPS zapewnia takie warunki. Szybkość wzrostu monokryształów wynosiła ~ 2 mm/h, szybkość obrotowa 5 obrotów/min, a osiowy gradient temperatury nad cieczą wynosił ~ 10 deg/cm. Wzrost monokryształów odbywał się w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym.

Otrzymano monokryształy orientacji Y i Z o średnicy 70 - 80 mm i długości do 90 mm, wadze do 1800 g, z zawartością erbu $1,88 \times 10^{19}$ i $5,65 \times 10^{19}$ atomów/cm³ (0,1 i 0,3% atomowych) [13, 14]. Monokryształy przedstawione są na rys. 2. Otrzymane monokryształy były wolne od defektów makroskopowych i miały zabarwienie jasnorożowe (ciemniejsze w przypadku większej koncentracji erbu). Polaryzację monokryształów przeprowadzono w oddzielnym procesie według sposobu podanego w patencie P-272663 [15]. Kierunek pola elektrycznego był zgodny z osią polarną "c", gęstość prądu wynosiła 1,5mA/cm², a temperatura około 1160°C. Polaryzację prowadzono w atmosferze tlenu.



Rys. 2. Monokryształy niobianu litu domieszkowane erbem.

Domieszka erbu nie miała widocznego wpływu na temperaturę Curie. Obserwowano jedynie niewielki spadek temperatury Curie ze zwiększeniem koncentracji erbu. Nie obserwowano zmiany zabarwienia wzdłuż osi "c" monokryształów, a również nie obserwowano zjawiska elektrodyfuzji w czasie polaryzacji.

Przeprowadzono badania koncentracji wprowadzonej domieszki za pomocą mikroskopy rentgenowskiej. Stwierdzono, że w granicach błęd pomiarowego, erb rozłożony jest w kryształach równomiernie, a jego koncentracja jest zgodna z ilością domieszki dodaną do materiału wsadowego. Współczynnik segregacji erbu w niobianie litu oceniono jako bliski jedności ($k \approx 1$).

Metodą badań konoskopowych zmierzono kontrast optyczny, który wynosił nie

mniej niż 200 : 1, a miejscami uzyskano kontrast powyżej 700 : 1. Świadczy to o potencjalnej możliwości zastosowania niobianu litu domieszkowanego erbem na modulatory elektrooptyczne. Przeprowadzono badania optyczne i stwierdzono, że niobian litu domieszkowany erbem posiada możliwość generacji promieniowania laserowego o długości fali 1520 μm , a więc tzw. "bezpiecznego" dla wzroku obszaru spektralnego.

Badania widm absorpcyjnych przeprowadzono w zakresie widzialnym 30000-12000 cm^{-1} , w zakresie bliskiej podczerwieni 12000-2000 cm^{-1} oraz w zakresie średniej i dalszej podczerwieni 4500-2000 cm^{-1} .

Pomiary absorpcyjne wykonano w temperaturze 300K-15K przy użyciu spektrofotometru IFS 130v firmy Brüker, wyposażonego w przystawkę do światła widzialnego. Próbkę chłodzono w zamkniętym układzie chłodzącym typu Heliplex Air Products.

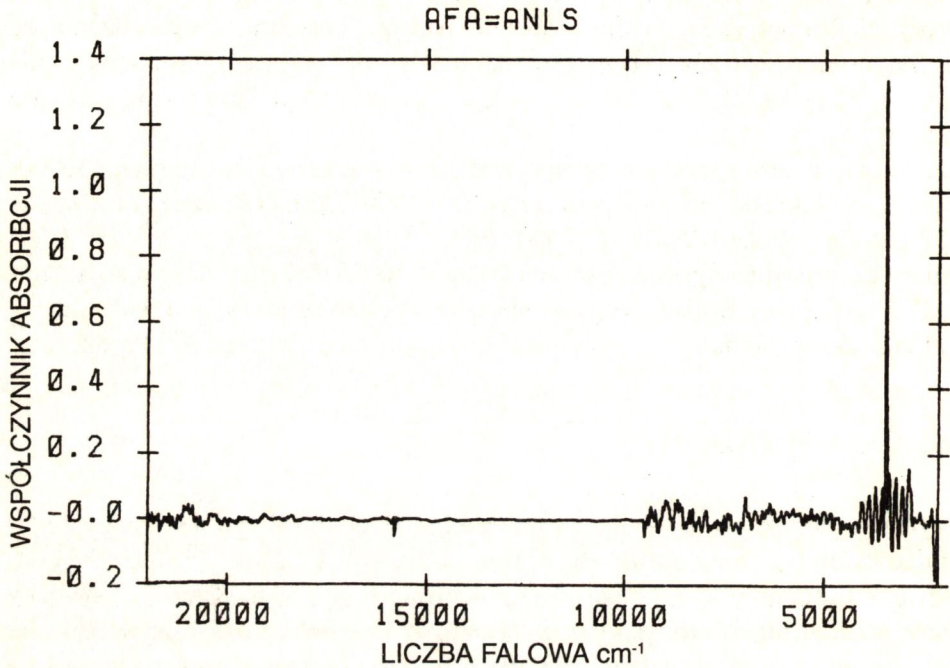
3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Otrzymano monokryształy niobianu litu metodą Czochralskiego o średnicy do 80 mm i długości do 90 mm z zawartością erbu $1,88 \times 10^{19}$ i $5,65 \times 10^{19}$ atomów/ cm^3 , bez wad makroskopowych, z jednorodnie rozłożoną domieszką. Kontrast optyczny zmierzony w elementach wyciętych z otrzymanych kryształów osiągnął wartość do 700:1, co świadczy o dobrej jakości optycznej kryształów i możliwości zastosowań w modulatorach elektrooptycznych.

Wiadomo, że główną przyczyną obniżenia odporności na uszkodzenia laserowe jest obecność luk w sieci krystalicznej [16]. Obniżenie ich koncentracji w przypadku niobianu litu o składzie topiącym się kongruentnie, wymagałoby wprowadzenia do kryształu dodatkowej ilości litu lub wprowadzenia innej domieszki, która lokowałaby się w miejscach luk litowych. Taką domieszką jest np. magnez, który wbudowuje się w węzły Li^+ [16]. Wyniki naszych badań wskazują, że taką rolę mogą spełniać również jony Er^{3+} .

Dla niobianu litu niedomieszkowanego o składzie kongruentnym obserwuje się występowanie silnego pasma absorpcyjnego przy 3484 cm^{-1} , za które odpowiedzialne są jony OH^- (rys. 3). Jony OH^- pojawiają się w niobianie litu w sposób naturalny poprzez dyfuzję wodoru do kryształu w procesie jego wzrostu i leżą w płaszczyźnie tlenowej, prostopadłej do osi optycznej kryształu, w miejscach luk litowych. Wprowadzenie domieszki Mg powoduje zmniejszenie intensywności pików OH^- . Jon Mg^{2+} wbudowany w miejsce Li^+ stanowi centrum o ładunku dodatnim i będzie konkurencyjny dla centrum OH^- wbudowanego w miejsce O^{2-} , czyli posiadającego również ładunek dodatni, to znaczy, że Mg^{2+} będzie odpychać jony OH^- . Gdy jednak koncentracja Mg przekroczy tzw. wartość progową ($\approx 4,6$ at % dla składu topiącego się kongruentnie) zmieniają się w sposób zasadniczy własności optyczne kryształu. Na krzywej absorpcji pojawia się pik przy 3535 cm^{-1} związany z kompleksem Mg - OH

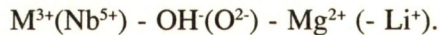
(Mg^{2+} zaczyna się wbudowywać w pozycję Nb^{5+}), [17].



Rys. 3. Widmo absorpcyjne czystego niobianu litu z widocznym pikiem związanym z jonami OH^- .

Okazało się, że lepsze własności optyczne niobianu litu można uzyskać stosując podwójne domieszkowanie $Mg^{2+} + Fe^{3+}$, Cr^{3+} , Ti^{3+} [18, 19].

Po wprowadzeniu domieszki pierwiastka trójwartościowego (M^{3+}) tworzą się defekty neutralne



Obecność tych defektów związana jest z pojawieniem się w widmie absorpcyjnym piku leżącego przy $3504 - 3507 \text{ cm}^{-1}$ dla Cr^{3+} i Fe^{3+} oraz przy 3522 cm^{-1} dla Nd^{3+} [19].

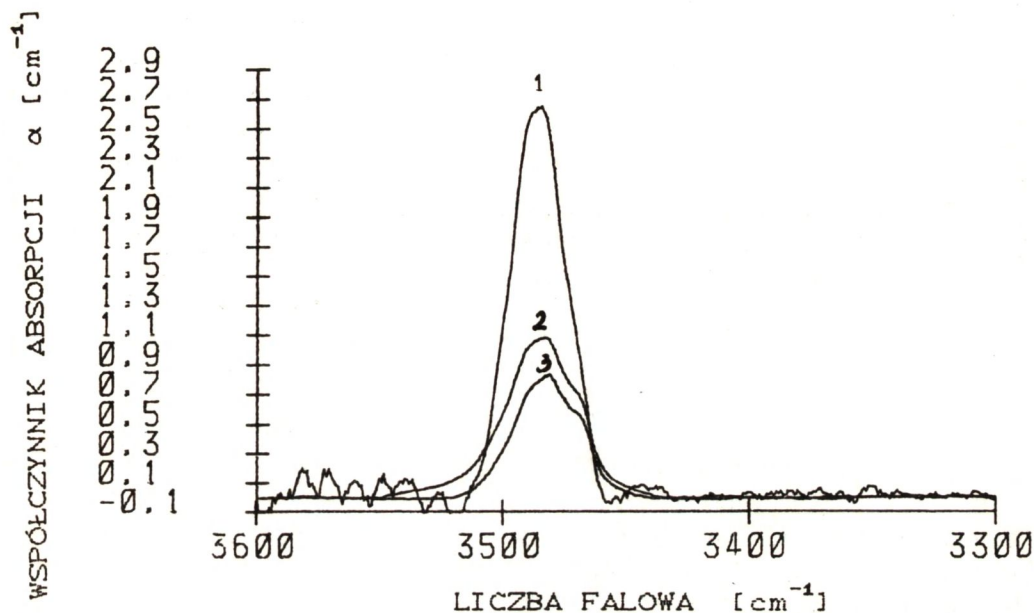
Intensywność tego piku może być wykorzystana do oceny koncentracji N jonów metali trójwartościowych, zgodnie z zależnością z pracy [19]

$$N = 1,8 \times 10^{19} \times \alpha [\text{cm}^{-1}],$$

gdzie: α = współczynnik absorpcji linii związanej z defektem $M^{3+} - OH^- - Mg^{2+}$.

Brak piku dodatkowego w części widma niższego energetycznie, niż 3484 cm^{-1} (charakterystycznego dla OH^-) świadczy o braku defektów związanych z kompleksem $M^{3+} - OH^- - Mg^{2+}$ w kryształach domieszkowanych magnezem, co wskazuje, że obsadzone są tylko położenia litowe.

Na rys. 4 przedstawione jest widmo absorpcyjne jonu OH⁻ dla próbek niobianu litu niedomieszkowanego oraz domieszkowanego erbem o koncentracji 0,1 i 0,3 at% (krzywe nr 1, 2 i 3 odpowiednio).



Rys. 4. Widmo jonów OH⁻ w LiNbO₃ w temperaturze 300 K:

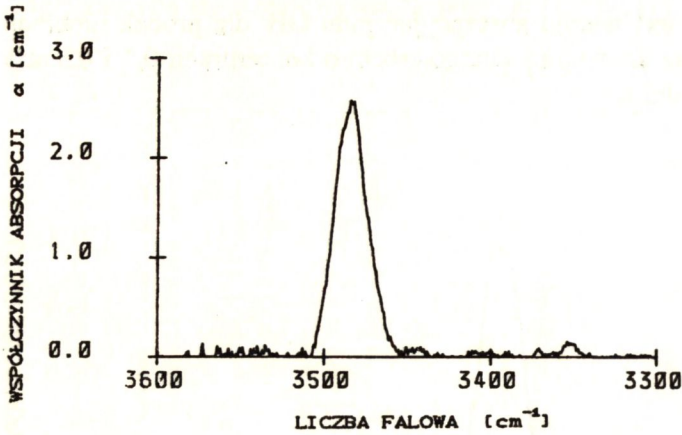
- 1-LiNbO₃ niedomieszkowany,
- 2-LiNbO₃ z domieszką Er 0,1 at%,
- 3-LiNbO₃ z domieszką erbu 0,3 at%.

Jak widać we wszystkich przypadkach występuje pik leżący przy 3484 cm⁻¹, czyli charakterystyczny dla jonów OH⁻ w niobianie litu. W materiale domieszkowanym erbem obserwuje się obniżenie piku (zmniejszenie współczynnika absorpcji) przy zwiększonej koncentracji domieszki, co świadczy o zmniejszaniu się koncentracji jonów OH⁻. Można więc przypuszczać, że obecność jonów erbu wpływa hamująco na generację jonów OH⁻. Świadczy to, że jony erbu również wbudowują się w miejsca litu i stanowią konkurencję dla tworzenia się jonów OH⁻.

Na rys. 5 przedstawione jest widmo absorpcyjne jonu OH⁻ dla próbki LiNbO₃ domieszkowanej erbem i magnezem (poniżej wartości progowej). Nie obserwujemy pojawienia się piku związanego z defektem M³⁺ - OH⁻ - Mg²⁺, czyli nie obserwujemy lokowania się domieszki w miejscu Nb [17].

Widmo przedstawione na rys. 5 można rozłożyć na dwa piki leżące przy 3484 cm⁻¹ i 3468 cm⁻¹, co pokazane jest na rys. 6.

Analizując kształt piku OH⁻ w oparciu o wyniki pracy [20], można zauważyć, że



Rys.5. Widmo jonu OH⁻ dla próbki LiNbO₃ z domieszką Er i Mg.

$$N_{\text{OH}^-} = 3 \times 10^{18} \times \alpha$$

- N_{OH^-} - koncentracja jonów OH⁻,
 α - współczynnik absorpcji.

Dla niobianu litu niedomieszkowanego

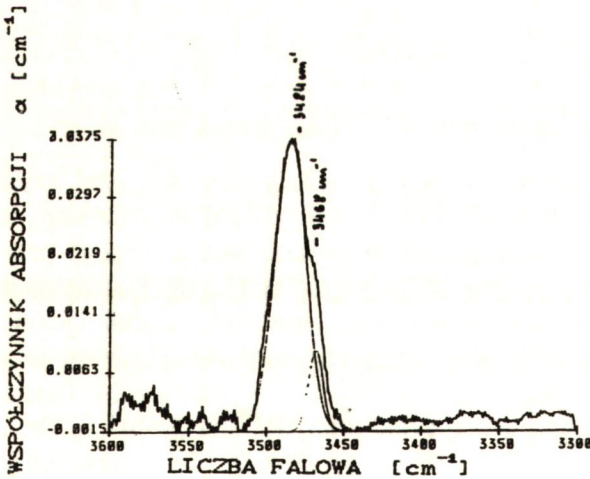
dla niobianu litu z koncentracją domieszki Er³⁺ - 0,1 at %

dla koncentracji domieszki Er³⁺ - 0,3 at %

$$N_{\text{OH}^-} = 7,9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3},$$

$$N_{\text{OH}^-} = 3,2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3},$$

$$N_{\text{OH}^-} = 2,46 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}.$$

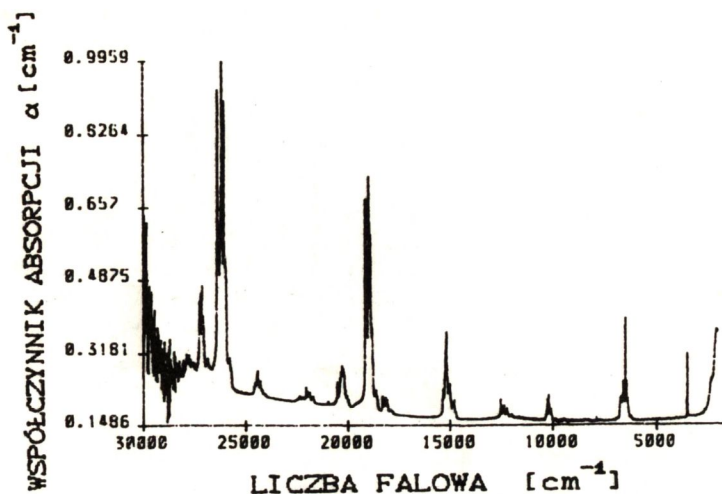


Rys. 6. Rozkład piku pochodzącego od OH⁻ dla kryształu LiNbO₃ z domieszką erbu i Mg na dwa piki gaussowskie w temperaturze 300 K.

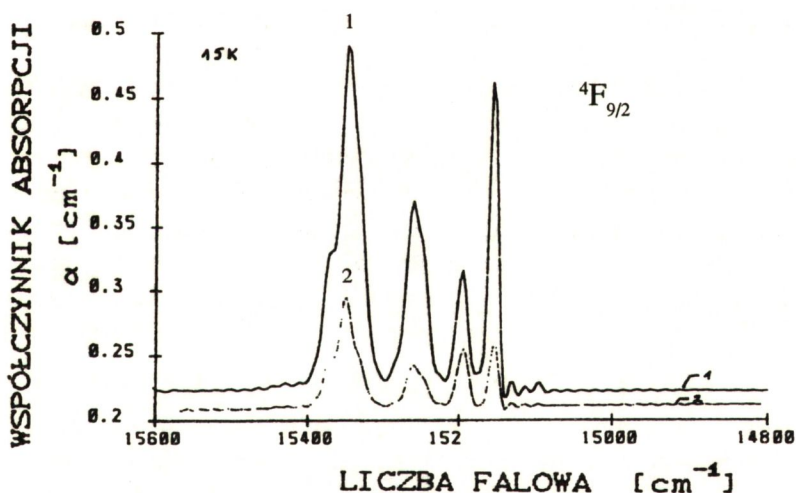
Na podstawie tych wyników można powiedzieć, że rzeczywiście jony Er³⁺ wchodzić w miejscach luk litowych i tym samym hamują powstawanie kompleksów OH⁻.

Na rys. 7 przedstawione jest widmo niobianu litu domieszkowanego Er³⁺. Zgodnie z teorią dla każdego termu swobodnego jonu Er³⁺ widoczna jest w widmie

subtelna struktura związana z obecnością podpoziomów Starka.



Rys. 7. Widmo absorpcyjne $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ - 0,3 at% w temperaturze 300 K.

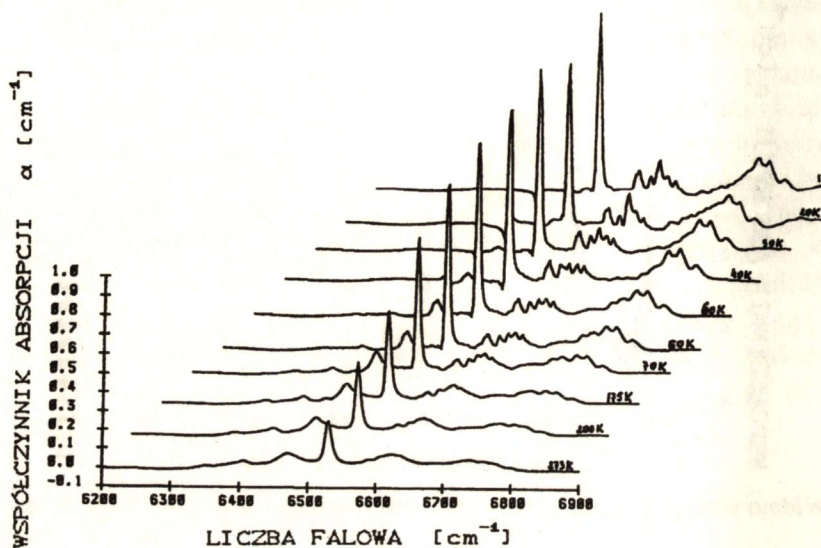


Rys. 8. Wpływ koncentracji jonów Er^{3+} w LiNbO_3 na widmo termu ${}^4F_{9/2}$.

1 - Er - 0,1 at%, 2 - Er - 0,3 at%.

Rys. 8 przedstawia zmianę intensywności linii dla termu ${}^4F_{9/2}$ proporcjonalną do zawartości jonów Er^{3+} . Z wykresu tego wynika, że ilość domieszki w próbce nr 1 jest mniejsza trzykrotnie niż w próbce nr 2. Jest to zgodne z ilością domieszki wprowa-

dzanej do materiału wsadowego (0,1 i 0,3 at %) oraz z wynikami otrzymanymi za pomocą mikros sondy rentgenowskiej.



Rys. 9. Widmo termu ${}^4I_{13/2}$ dla jonu Er^{3+} - 0,3 at% w $LiNbO_3$ w funkcji temperatury.

Na rys. 9 przedstawiona jest temperaturowa zmiana w subtelnej strukturze termu ${}^4I_{13/2}$. Zanikanie części niskoenergetycznej widma z obniżeniem temperatury jest konsekwencją zmian obsadzeń podpoziomów stanu podstawowego ${}^4I_{15/2}$. Natomiast subtelna struktura tego termu jest bardziej rozbudowana (obserwuje się 9 podpoziomów), niż wynikałoby to z teorii (7 podpoziomów). Na podstawie tych obserwacji można by przypuszczać, że Er wbudowuje się w różne miejsca w sieci $LiNbO_3$, tak jak to obserwuje się np. dla Nd^{3+} [7, 21]. Jednakże analiza drgań jonu OH^- (rys. 4) wskazuje na brak dodatkowego pików związanego z obecnością defektu



czyli nie potwierdza obecności Er^{3+} w miejscach Nb^{5+} w niobianie litu.

Fakt obecności dwóch różnych stanów Er^{3+} w podsieci $LiNbO_3$ stwierdzają badania EPR [13] i luminescencji [14], lecz nie wyjaśniają miejsca lokowania się jonu Er^{3+} .

Analizując strukturę sieci krystalograficznej $LiNbO_3$, wydaje się prawdopodobne, że obecność dwóch różnych stanów Er^{3+} można wiązać z wbudowywaniem go w dwa nierównorzędne położenia Li^+ w $LiNbO_3$ (trójkąty tlenowe związane z najbliższym jonem litu są obrócone względem siebie o 180°). Dla dokładnego potwierdzenia tego zagadnienia należy przeprowadzić dalsze badania, między innymi wprowadzając różne koncentracje Er^{3+} oraz podwójne domieszkowanie $Er^{3+} + Mg^{2+}$ dla koncentracji Mg powyżej i poniżej progowej.

4. WNIOSKI

Metodą Czochralskiego otrzymano dobrej jakości monokryształy LiNbO_3 o orientacji "z" i "y" domieszkowane Er^{3+} w ilości 0,1 i 0,3 atomowych %.

Zbadano widma absorpcji tych kryształów w zakresie $30000 \text{ cm}^{-1} - 2000 \text{ cm}^{-1}$. Analizując widma absorpcji związane z grupą OH⁻ podjęto próbę określenia miejsca lokowania się domieszki w sieci krystalicznej.

Z obserwacji wynika, że jony erbu w ilościach wprowadzanych lokują się w miejscach Li^+ . Być może, przy większych koncentracjach, erb będzie lokował się również w miejscach Nb^{5+} lub w położeniach międzywęzłowych. Wyjaśnienie tego zagadnienia wymaga dalszych prac.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pracka I., Janusz Cz., Świrkowicz M., Giersz W., Kaczmarek B., Czerwińska A.: Technologia otrzymywania monokryształów i płytek $\text{Y}(\text{LiNbO}_3)_{76}$. Sprawozdanie ITME 1987
- [2] Pracka I., Janusz Cz., Czerwińska A., Świrkowicz M., Giersz W., Kaczmarek B.: Technologia otrzymywania monokryształów i płytek $\text{Y} 128^\circ\text{X} (\text{LiNbO}_3)_{76}$. Sprawozdanie ITME 1988
- [3] Pracka I., Giersz W., Świrkowicz M., Weydman Z., Łuczyński Z., Wodnicki R., Bajor A.: Lithium niobate as an effective material for manufacturing of electrooptic modulators. SPIE - The International Society for Optical Engineering, Liquid and Solid State Crystals : Physics, Technology, and Applications 1845, 1993, 161-166
- [4] Pracka I., Giersz W., Świrkowicz M., Weydman Z., Łuczyński Z., Bajor A., Wodnicki R.: Monokryształy niobianu litu do zastosowań optycznych. Elektronika 1993, 7
- [5] Joyce K. Yamamoto, Keniji Kitamura, Nobuo Iyi, Shigeyuki Kimura: Priority communication Sc_2O_3 - doped LiNbO_3 grown by the float zone method. Journal of Crystal Growth 121, 1992, 522-526
- [6] Malovichko G.I., Grachev V.G., Yurchenko L.P., Proshko V.Ya, Kokanyan E.P., Gabrielyan V.T.: Improvement of LiNbO_3 microstructure by crystal growth with potassium. Phys.Stat.Sol.,133, 1992, K29
- [7] Tocho J.O., Camarillo E., Cusso F., Jaque F., Garcia-Sole J.: Optical deflection of new Nd^{3+} stites in LiNbO_3 . Solid State Communications 80, 1991, 8, 575-578
- [8] Tikizaki Eiji, Terashima K. Kimura S.: Variations in the physical properties of molten lithium niobate caused by doping with magnesium oxide. Journal of Crystal Growth 123, 1992, 121-125
- [9] Helmerid S., Arvidsson G., Webjorn J., Linnarsson M., Pihl T.: Stimulated emission in $\text{Er}:\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ waveguide laser. Electron. Lett. 27, 1991, 11
- [10] Brinkmann R., Sohler W., Suche H.: Continuous-wave erbium-diffused LiNbO_3 waveguide laser. Electronics Letters 27, 1991, 5

- [11] Lallier E., Pocholle J.P., Papuchon M.: Integrated Nd: MgO: LiNbO₃ FM mode - locked waveguide laser. Electronics Letters 1991, 27, 11
- [12] Carruthers J.R., Peterson G.E., Grasso M., Bridenbaugh P.M.: Nonstoichiometry and crystal growth of lithium niobate. J.Appl.Phys. 42, 1971, 1846
- [13] Jabłoński R., Pracka I., Świrkowicz M., Łuczyński Z.: Growth and ESR measurements of LiNbO₃³⁺ single crystals. Optoelectronics Rev. 1994 (w druku)
- [14] Dominik-Dzik G., Gołąb S., Pracka I., Ryba-Romanowski W.: Spectroscopic properties and excited state relaxation dynamics of Er³⁺ in LiNbO₃. Appl.Phys. A58,1994, 551-555
- [15] Pracka I., Świrkowicz M., Giersz W., Janusz Cz.: Sposób otrzymywania monokrystalicznych monodomenowych wyrobów z niobianu litu o dowolnej orientacji. Patent nr 272663 z dn. 24.05.1988 r.
- [16] Polgar K., Kovačs L., Foldvari I., Cravero I.: Spectroscopic and electrical conductivity investigation of Mg doped LiNbO₃ single crystals. Solid State Comm., 59 (6), 1986, 375-379
- [17] Wang H., Wen J., Li B., Wang H.: Infrared absorption study of OH⁻ in LiNbO₃: Mg and LiNbO₃: Mg:Fe crystals. Phys.Stat.Sol.(a) 118, 1990, K47
- [18] Kovačs L., Foldvari F., Cravero K., Polgar K.: An infrared absorption band caused by OH⁻ ions in a LiNbO₃: Mg, Cr Crystal. Phys. Lett. A 133 (7,8), 1988, 433-437.
- [19] Kovačs L., Szaller Zs., Cravero I., Foldvari I., Zaldo C.: OH-related defect in LiNbO₃: Mg,M (M= Nd, Cr, Ti, Mn Crystals. J.Phys.Chem.Solida 51(5), 1990, 417-420
- [20] Kovačs L., Szalay V., Capelletti R.: Stoichiometry dependence of the OH⁻ absorption band in LiNbO₃ crystals. Solid State Commun., 52(12), 1984, 1029-1031
- [21] Bollman W., Schlothauter K., Zogal O.J.: Kristall und Technik. 11, 1976, 1327

SUMMARY

THE ABSORPTION SPECTRA OF Er³⁺ DOPED LiNbO₃ SINGLE CRYSTALS

Rare earth doped LiNbO₃ has recently attracted a great attention because of its laser properties combined with electro-optical and nonlinear ones.

In this work single crystals of LiNbO₃ doped with 0,1 and 0,3 at% of erbium (Er³⁺) of diameter up to 80 mm and length up to 90 mm were grown by the Czochralski method. The as-grown crystals were regular and free of macroscopic defects. They were poled in a separate operation.

The absorption spectra of Er³⁺ doped LiNbO₃ single crystals were studied in the spectral range 30000 - 2000 cm⁻¹ at temperatures from 15K to 300K.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ LiNbO₃ ЛЕГИРОВАННЫХ ЭРБИЕМ

LiNbO₃ легированный редкоземельными элементами привлёк большое внимание сочетанием лазерных свойств с электро-оптическими и нелинейными.

В работе представлен процесс выращивания монокристаллов LiNbO₃ легированных 0.1 и 0.3 ат % эрбия (Er³⁺). Методом Чохральского были получены кристаллы высокого качества без макроскопических дефектов.

Абсорбционные спектры, полученных кристаллов были изучены в области 30000 - 2000 см⁻¹ в диапазоне температуры от 15 К до 300 К.