

# OTRZYMYWANIE MONOKRYSTAŁÓW YAG:Er<sup>3+</sup> DO ZASTOSOWAŃ LASEROWYCH

Zygmunt Frukacz <sup>1)</sup>, Zygmunt Mierczyk <sup>2)</sup>

## STRUKTURA GRANATU, SYNTEZA I DOMIESZKOWANIE KRYSTAŁU

Granat jest związkem o ogólnym wzorze cząsteczki  $C_3A_2D_3O_{12}$ , gdzie C,A i D - kationy (metale, krzem), O - tlen. Granat krystalizuje w układzie regularnym, grupa punktowa  $m\bar{3}m$  i posiada charakterystyczną strukturę, zwaną strukturą granatu [1]. Komórka elementarna zawiera 8 cząstek elementarnych, czyli 160 atomów. Aniony tlenowe  $O^{2-}$  rozłożone są w ten sposób, że tworzą się między nimi trzy rodzaje luk (centrów):

- 1) centra {c}, dodekaedry - dwunastościany powstałe przez odkształcenie sześciangu i załamanie jego ścian wzdłuż przekątnych. Posiadają 8 wierzchołków (jony  $O^{2-}$ ) i dwanaście ścian (trójkąty różnoboczne), liczba koordynacyjna 8,
- 2) centra [a], oktaedry - ośmiościany utworzone z trójkątów równoramiennych, liczba koordynacyjna 6,
- 3) centra (d), tetraedry - czworościany utworzone z trójkątów równoramiennych, liczba koordynacyjna 4,

W komórce elementarnej znajdują się: 24 centra {c}, 16 centrów [a], 24 centra (d) oraz 96 jonów  $O^{2-}$ .

---

1) Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych  
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

2) Instytut Elektroniki Kwantowej WAT  
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa



Granaty występujące w przyrodzie różnią się składem od granatów produkowanych do zastosowań w elektronice, głównie w technice laserowej.

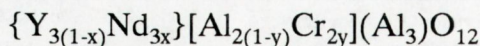
W granatach naturalnych centra {c} obsadzone są przez jony  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  rzadziej  $\text{Mn}^{2+}$ , centra [a] obsadzone są przez  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  lub  $\text{Cr}^{3+}$ , centra (d) - przez  $\text{Si}^{4+}$ .

Atomy poszczególnych grup mogą też występować w kryształach jednocześnie we właściwych dla siebie centrach. Przykładem granatów naturalnych są minerały, np. grossular  $\{\text{Ca}_3\}[\text{Al}_2](\text{Si}_3)\text{O}_{12}$ , znany w zapisie mineralogicznym jako  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  lub stechiometrycznym  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  i pirop  $\{\text{Mg}_{1,6}\text{Fe}_{1,2}\text{Ca}_{0,2}\}[\text{Al}_2](\text{Si}_3)\text{O}_{12}$ .

Duża ilość kombinacji rozmieszczenia atomów oraz oczywista możliwość zanieczyszczeń śladowymi ilościami innych niż wymienione pierwiastków, głównie atomami metali przejściowych, powoduje wielką różnorodność barw i własności optycznych granatów naturalnych.

Granaty syntetyczne produkowane w laboratoriach charakteryzują się ściśle kontrolowanym składem oraz w zależności od ich przeznaczenia odpowiednim doбором kationów. W skład ogromnej większości produkowanych współcześnie granatów wchodzi wyłącznie trójwartościowe jony następujących pierwiastków: w centrach {c} - Y, Fe, Gd oraz pozostałe lantanowce w postaci domieszek, w centrach [a] - Al, Ga, Cr, Sc, w centrach (d) - Al, Ga. O takim rozdziale atomów na poszczególne centra decydują ich promienie jonowe. Największe jony zajmują centra {c}, mniejsze odpowiednio [a] i (d).

Znajomość struktury granatu i miejsc zajmowanych w tej strukturze przez atomy poszczególnych pierwiastków, pozwala nam na prawidłowe przeprowadzenie syntezy i domieszkowania monokryształów. Jeżeli na przykład chcemy uzyskać granat itrowo-glinowy  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  lub  $\{\text{Y}_3\}[\text{Al}_2](\text{Al}_3)\text{O}_{12}$ , domieszkowany neodymem o koncentracji  $p_1\%$  atomowych i chromem o koncentracji  $p_2\%$  atomowych to pamiętając, że neodym podstawia itr w centrach {c}, a chrom podstawia glin w centrach [a], prowadzimy syntezę tak, aby w wyniku uzyskać związek o wzorze cząsteczkowym:



gdzie:  $p_1 = x \cdot 100 \%$  at.,  $p_2 = y \cdot 100 \%$  at.

Podane tu określenie procentu atomowego domieszki jest powszechnie przyjęte w technologii granatów.



## YAG:Er JAKO MATERIAŁ LASEROWY

Granat itrowo-glinowy domieszkowany erbem  $\{Y_{3-x}Er_x\}[Al_2](Al_3)O_{12}$  lub  $Y_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$  zajmuje bardzo ważne miejsce wśród aktywnych materiałów laserowych. Współczynnik podziału erbu w YAG:Er  $k_{Er} = 1$ , co oznacza, że do kryształu może być wprowadzony erb w ilości od 0% do 100% at. ( $0 \leq x \leq 3$ ), bez wystąpienia deformacji sieci krystalicznej i gradientu rozkładu domieszki. Posiada on wszystkie cechy fizyczne wymagane od materiałów laserowych: mały współczynnik rozszerzalności termicznej  $\approx 6.9 \times 10^{-6} K^{-1}$ , duży współczynnik przewodnictwa ciepła  $\approx 13 W/mk$ , brak aktywności optycznej matrycy (YAG), dużą twardość - 8,5 wg Mohs'a i odporność chemiczną. W obszarze widzialnym posiada bogate widmo absorpcji (Rys. 2), co umożliwia dużą sprawność pompowania optycznego elementu laserowego.

Laser z kryształem YAG:Er został zbudowany stosunkowo dawno, bo już w 1974r [2]. Uzyskano akcję laserową o długości fali emisji  $2.94 \mu m$ . Obecnie wiadomo, że można też uzyskiwać na jonach erbu emisję o długości fali  $1.54 \mu m$ , lecz takie lasery buduje się rzadko i raczej na szkle erbowym a nie YAG:Er. Wtedy też zostało wyjaśnione, że w przeciwieństwie do innych kryształów laserowych, gdzie koncentracja domieszki jest mała (rzędu 1% at.), koncentracja erbu musi być duża: 30% i więcej.

Przez wiele lat laser yagowo-erbowy nie wywoływał większego zainteresowania. Dopiero w końcu lat 80-tych zastosowania w medycynie spowodowały wielką jego popularność i dalszy rozwój prac nad technologią tego granatu.

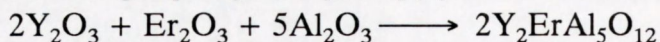
## OTRZYMYWANIE MONOKRYSTAŁU YAG:Er

Prowadzono prace nad opanowaniem technologii wytwarzania monokryształów o do wykonania prętów laserowych mogących mieć praktyczne zastosowanie w technice laserowej.

Biorąc pod uwagę warunki technologiczne, wymagania techniczne i koszty, zdecydowano się na kryształ o koncentracji 33% at. erbu, czyli o składzie cząsteczki  $Y_2ErAl_5O_{12}$ , długości 90 mm i średnicy  $16 \div 18$  mm.



Jako materiał wyjściowy użyte zostały tlenki:  $Y_2O_3(5N)$ ,  $Al_2O_3(4N)$ ,  $Er_2O_3(4N)$ . Tlenki te po wysuszeniu i dokładnym odważeniu zostały zmieszane w proporcjach wynikających z równania stechiometrycznego:



Po starannym wymieszaniu w specjalnym mieszadle, przygotowany wsad był zagęszczany przez prasowanie go w pastylki i topiony w tyglu irydowym w atmosferze azotu.

Krystalizację prowadzono metodą Czochralskiego, przy użyciu urządzenia MSR-2 typu Malvern, produkcji angielskiej. Stosowano tygiel irydowy produkcji ZSRR, spawany, o średnicy 50 mm, wysokości 50 mm i grubości ścianki i dna 1.5 mm. Obudowę izolacyjną tygla wykonano z ceramiki alundowej (rura, płytki) oraz granulowanej ceramiki cyrkonowej stabilizowanej hafnem ( $ZrO_2:HfO_2$ ), która wypełniała przestrzeń pomiędzy tygłem, rurą i podstawką alundową.

Rosnący kryształ (nad tygłem) ekranowano cylindrem z blachy irydowej rozciętym wzdłuż tworzącej (tzw. dogrzewacz bierny). Dogrzewacz z kolei znajdował się w podwójnej osłonie z rur alundowych. Z góry, układ ekranów zamykano pokrywką alundową z otworem, przez który wprowadzano zarodek w uchwycie z rurki alundowej. Zarodek - walec  $\phi$  4 mm i długości ok. 60 mm wykonano z czystego monokryształu YAG zorientowanego w kierunku [111].

Podobnie jak układ cieplny, parametry wyciągania kryształu dobrano na podstawie doświadczeń z kryształem YAG:Nd i były następujące: obroty kryształu -  $30 \text{ min}^{-1}$ , prędkość wyciągania - 1.8 mm/h, co po uwzględnieniu obniżania się poziomu cieczy w tyglu dawało prędkość liniową wzrostu kryształu ponad 2 mm/h.

Przy ustalaniu prędkości obrotów, które mają zasadniczy wpływ na kształt frontu krystalizacji, a więc i na jakość kryształu przyjęto, że własności hydrodynamiczne ciekłego YAG:Er są zbliżone do ciekłego YAG:Nd. Nie jest to ścisłe, ale przy istnieniu znacznej tolerancji w doborze obrotów dla YAG-ów, błąd nie mógł być duży. Przy 30 obr./min. front krystalizacji był prawidłowo wypukły. Należy tu zwrócić uwagę, że monokryształy granatu itrowo-glinowego wyciągane w kierunku krystalograficznym [111], aby były dobrej jakości muszą być wbrew ogólnym zasadom wyciągane przy wypukłym, a nie płaskim froncie krystalizacji. Pociąga to za sobą tworzenie się wzdłuż osi kryształu charakterystycznego niepożądanego rdzenia (obszar fasetowy), lecz pozostała część kryształu jest



dużo lepszej jakości niż kryształu wyciąganego przy płaskim froncie krystalizacji.

Prędkość wyciągania 1.8 mm/h była wybrana z nadmierną ostrożnością. Mogła być nawet dwukrotnie większa, podczas gdy dla YAG:Nd prędkość ta nie może przekroczyć 1 mm/h. Dzieje się tak wskutek tego, że promienie jonowe  $\text{Er}^{3+}$  i  $\text{Y}^{3+}$  są w przybliżeniu równe i oba jony wbudowują się w centra {c} jednakowo łatwo. Natomiast promień jonowy  $\text{Nd}^{3+}$  jest dużo większy od promienia jonowego itru i jony neodymu dużo trudniej wbudowują się do kryształu. Zjawisko to ilościowo opisuje się za pomocą współczynników podziału, które są liczbami wyrażającymi stosunek koncentracji domieszki w kryształach do jej koncentracji w cieczy. Jak wiadomo dla omawianych kryształów współczynniki te wynoszą:  $k_{\text{Nd}} = 0.18$ ,  $k_{\text{Er}} = 1$ .

W miarę wzrostu kryształu koncentracja domieszki o współczynniku podziału mniejszym od jedności będzie rosła w fazie ciekłej, szczególnie silnie w obszarze przyległym do frontu krystalizacji. Wystąpi zjawisko przechłodzenia (constitutional supercooling), które może spowodować defekty kryształu, jak zapęcherzenie czy wady struktury.

Przy powolnym prowadzeniu krystalizacji, obszary podwyższonej koncentracji mogą być likwidowane przez prądy konwekcyjne, w cieczy lub drogą dyfuzji. W granacie yagowo-erbowym te negatywne zjawiska nie wystąpią i prędkość krystalizacji nie będzie przez nie ograniczana. Możliwe jest zastosowanie większej prędkości wyciągania, co jednak powoduje konieczność modyfikacji, "odcieplania" dogrzewacza, w celu umożliwienia szybszego odprowadzania ciepła i zapewnienia właściwego gradientu temperatury w obszarze frontu krystalizacji.

## KRYSZTAŁY I PRĘTY LASEROWE

Przeprowadzono trzy procesy krystalizacji, z których uzyskano trzy kryształy: jeden o średnicy 20 mm i długości 50 mm i dwa o średnicy  $16 \div 17$  mm i długości 90 mm. Z dwu dłuższych kryształów wykonano pręty laserowe (Tabela 1).



Tabela 1. Zestawienie parametrów prętów laserowych YAG:Er.

Kryształ nr	Pręt		
	Symbol	Wymiary [mm] średnica × długość	Energia progowa generacji [J]
2	E 21	5 × 79	126
	E 22	4 × 79	-
	E 23	3 × 79	-
3	E 31	5 × 85	82
	E 32	5 × 85	100
	E 33	4 × 84	86

Kryształ nr 1 wyciągany był we wstępnie dobranym niezupełnie prawidłowym układzie cieplnym. Kryształ wykazywał nadmierną skłonność do pogrubiania się. Proces został przerwany.

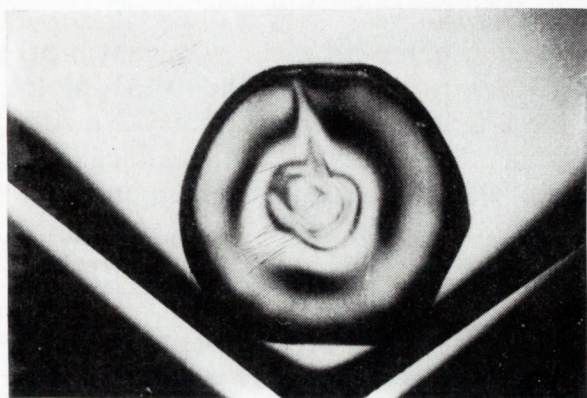
Kryształ nr 2 - podczas prawidłowo przebiegającego procesu nastąpiło zakłócenie w zasilaniu elektrycznym, co pociągnęło za sobą zmianę warunków termicznych wzrostu kryształu i niewielkie lecz wyraźne jego pocienienie w części środkowej.

Kryształ nr 3 - proces krystalizacji przebiegał prawidłowo, zgodnie z programem.

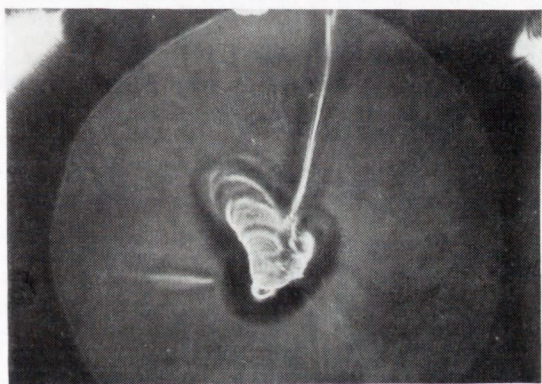
Czas wyciągania kryształu nr 2 i nr 3 wynosił 45 godz., czas studzenia - 10 godz.

W celu określenia jakości i jednorodności optycznej kryształów i prętów poddano je różnym badaniom. Rys. 1a przedstawia zdjęcie monokryształu Nr 2 w układzie polaryskopu kołowego z widocznymi izochromami rzędów połówkowych (wykonano także zdjęcia izochrom rzędów całkowitych). Analiza obrazów izochrom rzędów połówkowych i izochrom rzędów całkowitych wykazuje, że różnica naprężeń głównych (radialnego i stycznego) jest równa zeru w obszarze ścianki rdzenia, osiąga maksimum w okolicy izochromy rzędu pierwszego, a następnie maleje monotonicznie do zera, w kierunku poboczniczy kryształu. Radialny rozkład naprężeń jest przyczyną radialnej zmiany współczynnika załamania światła w kryształach. Poza tym zdjęcia nie wykazują innych niejednorodno-

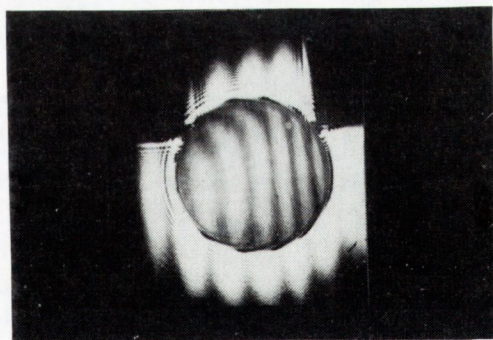




**a**



**b**



**c**

Rys. 1

- a - Obraz polaryskopowy kryształu YAG:Er.
- b - Zdjęcie monokryształu YAG:Er wykonane metodą cieniową.
- c - Interferogram pręta laserowego E 21.



ści optycznych (zdjęcia wykonał i ich interpretację podał A. Bajor w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych ITME).

Rys. 1b jest zdjęciem monokryształu wykonanym przez K. Kopczyńskiego w Instytucie Elektroniki Kwantowej WAT metodą cieniową w świetle lasera He-Ne o mocy wyjściowej 15 mW. Na zdjęciu widać poza zaburzonym obszarem rdzenia białe pasemka biegnące od rdzenia do powierzchni kryształu. Odzwierciedlają one niejednorodności optyczne w kryształach, nie widoczne na elastogramach, których natury nie udało się na razie ustalić. Stwierdzono tylko, że obraz tych zaburzeń był bardzo podobny i identycznie zorientowany we wszystkich trzech kryształach.

Porównując zdjęcia z Rys. 1a i Rys. 1b tego samego kryształu łatwo stwierdzić, że zdjęcie K. Kopczyńskiego zawiera więcej i bardziej precyzyjnych informacji o stanie zaburzeń optycznych w kryształach. Na podstawie tej metody zostały wycięte pręty laserowe z obszarów kryształów pozbawionych niejednorodności widocznych na Rys. 1b. Tym sposobem nie można było jednak wyeliminować z prętów niejednorodności optycznych wywołanych naprężeniami kryształu.

Rys. 1c przedstawia zdjęcie interferogramu pręta laserowego nr E 21 wykonane przez W. Chabrosa w Instytucie Optyki Stosowanej. Interferogram wykazuje ugięcie i poszerzenie prążków narastające w kierunku średnicy pręta. Może to być spowodowane wypukłością powierzchni czołowych pręta, jak również radialną zmianą współczynnika załamania światła w kryształach. Pręt został wycięty z obszaru pomiędzy rdzeniem a pobocznica i jego średnica jest częścią promienia kryształu. Płaskość powierzchni wynosi  $\lambda/6$  dla długości fali 632.8 nm, mieści się w normie na pręty laserowe i nie powinna wywoływać tak znacznego efektu interferencyjnego.

Pręty wykonane z kryształu nr 2 (Tabela 1.) są złej jakości. Wykazuje to charakterystyka energetyczna pręta E 21 (Rys. 4) oraz nie przedstawione tu charakterystyki prętów E 22 i E 23. Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że przyczyną niskiej jakości laserowej prętów jest zła jakość optyczna kryształu spowodowana występującymi w kryształach naprężeniami. Stosunkowo duże naprężenia w kryształach nr 2 zostały niewątpliwie spowodowane wspomnianymi wyżej zakłóceniami jego wzrostu. Naprężenia i ich skutki można stosunkowo łatwo usunąć poprzez wygrzewanie kryształu (pręta) w wysokiej temperaturze - odprężanie. Doświadczenie takie w artykule nie zostało przedstawione.



## BADANIA SPEKTROSKOPOWE I LASEROWE

W celu wyznaczenia zależności współczynnika absorpcji badanych monokryształów od długości fali, przeprowadzono badania transmisji próbek w zakresie widmowym 200 ÷ 1100 nm na spektrofotometrze LAMBDA-2 firmy PERKIN-ELMER, w zakresie 1100 ÷ 1400 nm na spektrofotometrze BECKMAN ACTA MVII, natomiast w zakresie 1400 nm do 2500 nm na fourierowskim spektrofotometrze FTIR 1725 firmy PERKIN-ELMER.

Z pomiarów transmisji tych próbek obliczano współczynnik absorpcji  $\alpha(\lambda)$ , uwzględniając wielokrotne odbicia promieniowania wewnątrz próbki:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T_r(\lambda)}$$

gdzie:

$$T_r = \frac{-(1 - r_f)^2 + \sqrt{(1 - r_f)^4 + 4r_f^2 T^2}}{2Tr_f^2}$$

$r_f$  - fresnelowski współczynnik odbicia

$$r_f = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

$n$  - współczynnik załamania,

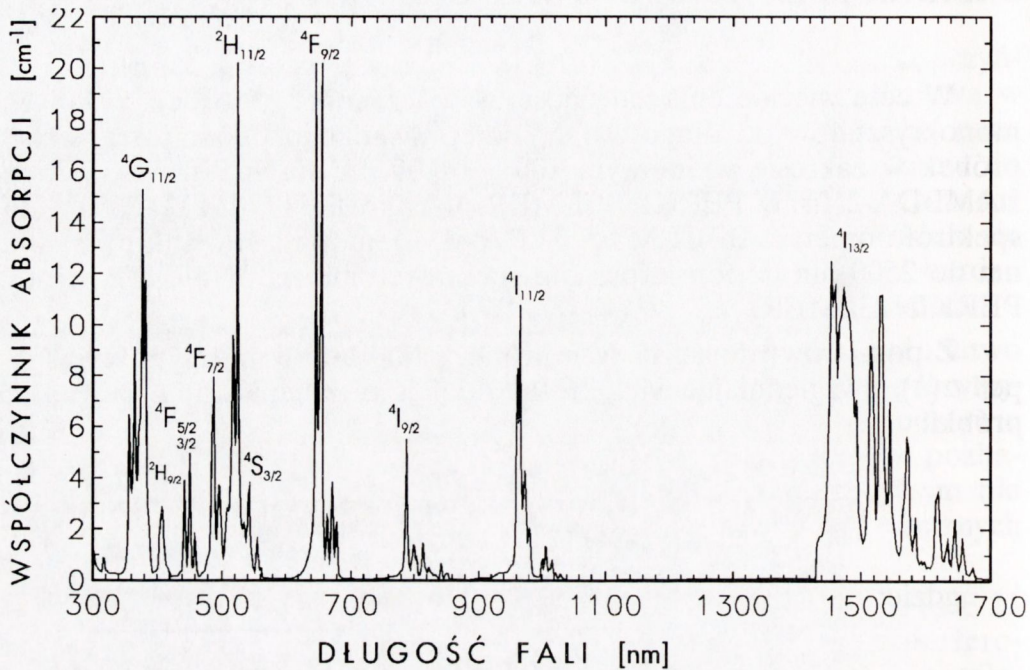
$T(\lambda)$  - zmierzona wartość transmisji próbki,

$d$  - grubość próbki.

Uzyskane widmo absorpcji przedstawione jest na Rys. 2. Na Rys. 3 pokazany jest układ dwunastu pierwszych poziomów energetycznych jonu  $\text{Er}^{3+}$  w granacie itrowo-glinowym [2], które tworzą widmo absorpcyjne kryształu w podczerwieni i świetle widzialnym, aż do granicy z nadfioletem. Jak widać widmo to jest bogate a poszczególne prążki rozszczepione, co jest skutkiem starkowskiego rozszczepienia poziomów energetycznych w polu krystalicznym granatu.

Rozszczepienie starkowskie jest pokazane schematycznie na Rys. 3 dla dwóch poziomów biorących udział w przejściu laserowym przy długości fali 2.94  $\mu\text{m}$ . Na wykresie widma absorpcji zostały zidentyfikowane





Rys. 2  
Krzywa absorpcji monokryształu YAG:Er<sup>3+</sup>.

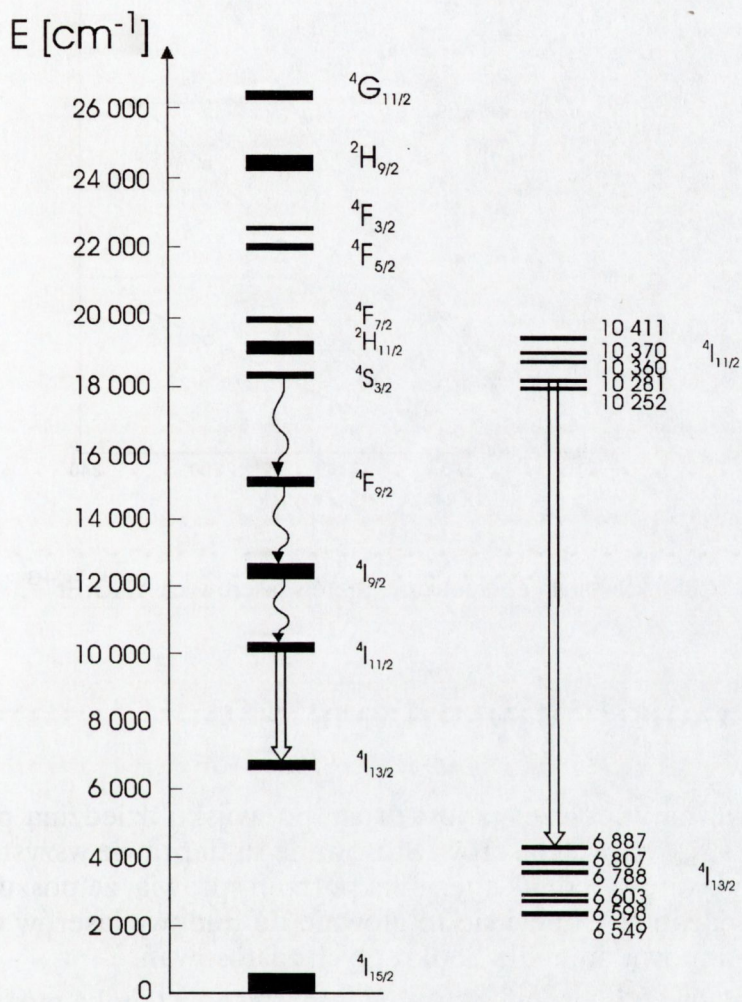
przejścia wzbudzenia z poziomu podstawowego na dany poziom bez uwzględnienia rozszczepień starkowskich.

Widmo absorpcyjne nie wykazuje obecności prążków innych niż pochodzących od Er<sup>3+</sup>. Emisja laserowa następuje z przejścia  ${}^4I_{11/2} \longrightarrow {}^4I_{13/2}$  po bezpromienistej relaksacji z wyższych poziomów na metastabilny poziom  ${}^4I_{11/2}$ .

Pomiary energetycznych charakterystyk laserowych, wykonane zostały na czterech prętach "as grown" bez powłok antyrefleksyjnych. Pomiary wykonali J.Szydłak i W.Żendzian w Instytucie Optoelektroniki WAT [3]. Uzyskane wyniki przedstawione są na Rys. 4 oraz w Tabeli 1.

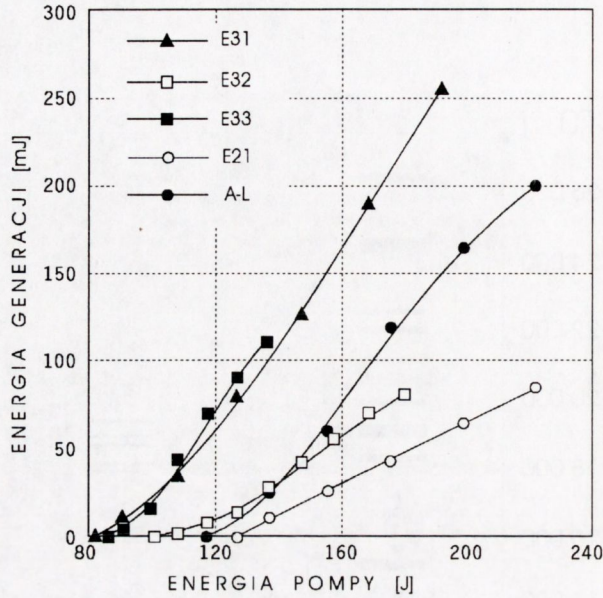
Charakterystyka pręta oznaczonego A-L została wykonana w tych samych warunkach co pozostałe pręty a pochodzi od pręta o wymiarach  $\phi$  5x80 mm zakupionego w amerykańskiej firmie Airtron - Litton.





Rys. 3  
 Układ poziomów energetycznych  $\text{Er}^{+3}$  w sieci krystalicznej wg. [2].





Rys. 4

Charakterystyki energetyczne prętów laserowych YAG:Er<sup>3+</sup>.

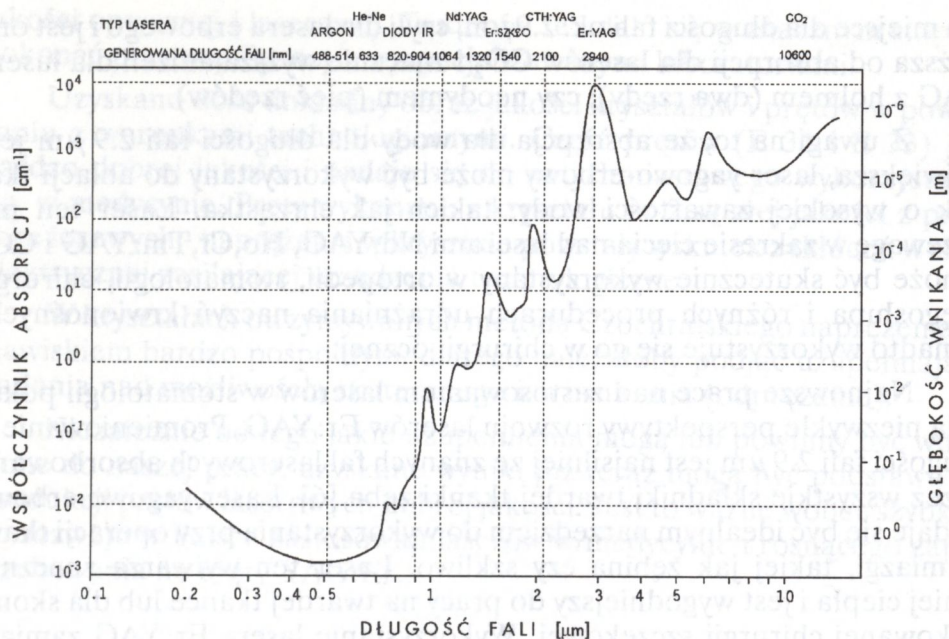
## LASERY YAG:Er<sup>3+</sup> W MEDYCYNIE

Medycyna współczesna jest drugą po wojsku dziedziną pod względem ilości stosowanych laserów. Stosowane są tu prawie wszystkie rodzaje znanych laserów, jednak specyfika potrzeb sprawia, że poszukiwane są nowe rozwiązania. Odnosi się to głównie do budowy laserów o długości fali emisji odpowiedniej dla konkretnych zastosowań.

Oddziaływanie promieniowania laserowego z tkanką można w ogólności podzielić na dwie grupy:

1. Oddziaływanie kwantów promieniowania z powłokami elektronowymi poszczególnych atomów i molekuł. Wywołuje to efekty fotowzbudzenia, fotorezonansu lub fotojonizacji i pociąga za sobą zmiany stanu i funkcjonowania komórki. Efekty te w terapii laserowej nazywane są ogólnie procesami biostymulacyjnymi. Stosowane są tu fale widzialne, aż do ultrafioletu.





Rys. 5  
Krzywa absorpcji wody wg. [4].

2. Oddziaływanie cieplne. Kwanty o mniejszej energii (promieniowanie podczerwone) wywołują w tkance głównie efekty cieplne, co powoduje w zależności od mocy jej koagulację, karbonizację lub odparowanie tkanki. Zjawiska te wykorzystywane są jako tzw. lancety laserowe w bardzo szeroko rozumianej chirurgii, od kosmetyki poprzez stomatologię, okulistykę aż do najpoważniejszych operacji organów wewnętrznych człowieka.

Sprawność lancetu laserowego zależy od tego, jak silnie jest pochłaniane promieniowanie laserowe w operowanej tkance. Silne pochłanianie umożliwia uzyskanie efektu przy mniejszej mocy przez uniknięcie niepotrzebnego naświetlania sąsiednich głębiej leżących obszarów tkanki. O pochłalności promieniowania decydują takie składniki ciała, jak woda, hemoglobina oraz różne rodzaje białka. Woda, której w organizmie jest najwięcej ma tu znaczenie decydujące.

Na Rys. 5 przedstawiono zależność współczynnika absorpcji wody w zależności od długości fali promieniowania z zaznaczonymi długościami fal różnych laserów [4,5]. Z zależności tej wynika, że najwyższa absorpcja

ma miejsce dla długości fali ok.  $2.9\ \mu\text{m}$ , czyli dla lasera erbowego i jest ona wyższa od absorpcji dla laserów  $\text{CO}_2$  i znacznie wyższa aniżeli dla lasera YAG z holmem (dwa rzędy), czy neodymem (pięć rzędów).

Z uwagi na to, że absorpcja dla wody dla długości fali  $2.9\ \mu\text{m}$  jest największa, laser yagowo-erbowy może być wykorzystany do ablacji tkanek o wysokiej zawartości wody, takich jak chrząstka. Laser ten ma przewagę w zakresie cięcia nad laserami Nd:YAG, Ho, Cr, Tm:YAG i  $\text{CO}_2$  i może być skutecznie wykorzystany w ortopedii, stomatologii, chirurgii kręgosłupa i różnych procedurach udrażniania naczyń krwionośnych. Ponadto wykorzystuje się go w chirurgii ocznej.

Najnowsze prace nad zastosowaniem laserów w stomatologii pokazują niezwykle perspektywy rozwoju laserów Er:YAG. Promieniowanie o długości fali  $2.9\ \mu\text{m}$  jest najsilniej ze znanych fal laserowych absorbowane przez wszystkie składniki twardej tkanki zęba [6]. Laser yagowo-erbowy wydaje się być idealnym narzędziem do wykorzystania przy operacji tkanki miękkiej, takiej jak zębina czy szkliwo. Laser ten wytwarza znacznie mniej ciepła i jest wygodniejszy do pracy na twardej tkance lub dla skomplikowanej chirurgii szczękowej. Wykorzystanie lasera Er:YAG zamiast klasycznej wiertarki eliminuje konieczność dodatkowego chłodzenia. Ponadto wyeliminowanie dźwięku, drgań i bólu związanych z wierceniem, jest znacznym ułatwieniem zarówno dla pacjenta, jak i lekarza.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzono trzy procesy krystalizacji granatu itrowo-glinowego domieszkowanego erbem o koncentracji 33% at.

Dzięki starannemu przygotowaniu procesów, już w drugiej próbie ustalono prawidłową budowę układu cieplnego tygla i dogrzewacza oraz optymalne wartości głównych parametrów prowadzenia procesów: szybkość wyciągania i prędkość obrotową kryształu.

Zgodnie z planem uzyskano monokryształy o długości 90 mm i średnicy około 17 mm. oraz pręty o długości ok. 80 mm i średnicy 4 mm oraz 5 mm.

Otrzymanie kryształu o takich własnościach i rozmiarach było nowością w ITME, dlatego wystąpiły pewne trudności z wykonaniem badań ich



jakości optycznej i laserowej. Trudności te udało się w znacznym stopniu pokonać przy współpracy z wyspecjalizowanymi laboratoriami.

Uzyskano dość dokładny obraz jakości kryształów i prętów w powiązaniu z warunkami technologicznymi. Część prętów (E 31 i E 33) jest bardzo dobrej jakości i nadaje się do natychmiastowego wykorzystania np. w medycynie. Pręty wykonane z kryształu nr 2 są złej jakości z przyczyn losowych - naprężenia w kryształach powstały wskutek zakłóceń w sieci elektrycznej zasilającej urządzenia technologiczne.

W kryształach otrzymywanych metodą Czochralskiego naprężenia są zjawiskiem bardzo pospolitym, dlatego należałoby podjąć uzupełniające badania nad możliwością skutecznego ich usuwania (odprężanie).

Niezależnie od tego jakie uzupełnienia mogą lub powinny być wniesione do naszej pracy, uzyskane wyniki już teraz mogą być podstawą do produkcji prętów laserowych dobrej jakości. Jest to ważne wobec szybkiego rozwoju w Polsce zastosowań laserów w medycynie i rosnącego zapotrzebowania na pręty YAG:Er.

Pracę wykonano jako część grantu Nr 3 1236 91 01 finansowanego przez KBN.

Prawa autorskie do wyników pracy są zastrzeżone w umowie grantowej

Nr PB 1216/3/91, § 10.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Geller S.: Crystal chemistry of the garnets, Z.Krist., 1967,125, 1
- [2] Żarikov E.W. i in.: Inducirovannoje izlucenie jonów  $Er^{3+}$  w kryształach ittrii-aluminiowego granata na dlinie wołny  $2.94 \mu m$ , Kvantovaja Elektronika, 1, 1974 8, 1867
- [3] Frukacz Z., Kisielewski J., Szydłak J.: YAG:Er<sup>3+</sup> crystal growth for laser application, Opto-Electronics Review, 1993, 1, 21
- [4] Brinkmann U.: Lasers find use in wide range of medical procedures, LF World European E-O, Summer 1992, 15
- [5] Kwaśny M., Mierczyk Z., Graczyk A.: Fotodynamiczna metoda diagnozy i terapii nowotworów. Zjawiska fizyczne i aparatura. VII Krajowa Szkoła Optoelektroniki - Zastosowanie laserów w medycynie, Zegrze k/Warszawy 1993 T.1
- [6] Pokora L.: Lasery w stomatologii, Warszawa 1993