

# SENSYBILIZACJA WŁAŚCIWOŚCI LASEROWYCH KRYSTAŁU CTH:YAG PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM

Sławomir H. Kaczmarek<sup>1</sup>, Waldemar Żendzian<sup>1</sup>, Tadeusz Łukasiewicz<sup>2,3</sup>,  
Krzysztof Stępka<sup>1</sup>, Zbigniew Moroz<sup>4</sup>, Stanisław Warchol<sup>2,5</sup>

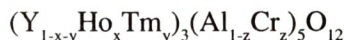
W pracy przedstawiono wyniki badań spektroskopowych próbek oraz charakterystyki energetyczne lasera Cr:Tm:Ho:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, dla układu generacji swobodnej, którego element aktywny poddano kolejnym procesom oddziaływania (naświetlanie kwantami  $\gamma$ , wygrzewanie). Określono mechanizmy powodujące zmianę właściwości laserowych badanego kryształu. Stwierdzono możliwość polepszenia właściwości optycznych i generacyjnych kryształów wygrzewanych i naświetlonych promieniowaniem  $\gamma$ . Uzyskano obniżenie progu generacji lasera (po wygrzaniu pręta) i wzrost sprawności pompowania (po naświetleniu go kwantami  $\gamma$ ) w wyniku procesu sensybilizacji aktywnych jonów Ho<sup>3+</sup>.

## 1. WSTĘP

Praca laserów na ciele stałym w różnego typu polach radiacyjnych (np.: promieniowanie kosmiczne, protonowe) stwarza potrzebę zbadania zmian jakie zachodzą pod wpływem promieniowania jonizującego w materiałach stosowanych na elementy aktywne. Możliwy jest także pozytywny wpływ promieniowania jonizującego na charakterystyki generacyjne materiałów laserowych stwierdzony w pracach [1-6].

Kryształ (CTH:YAG) Cr:Tm:Ho:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> znajduje szerokie zastosowanie w laserach na ciele stałym, które generują promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni (2,11  $\mu$ m).

Skład domeny kryształu CTH:YAG otrzymywanego metodą Czochralskiego z tygla irydowego można wyrazić formułą [8]:



gdzie:  $x=0,0036$ ,  $y=0,057$ ,  $z=0,01$ .

<sup>1</sup> Instytut Optoelektroniki WAT, ul.Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa

<sup>2</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul.Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

<sup>3</sup> Instytut Fizyki Technicznej WAT, ul.Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa

<sup>4</sup> Instytut Problemów Jądrowych, 05-400 Świerk

<sup>5</sup> Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, ul.Dorodna 16, 03-195 Warszawa



niu promieniowaniem jonizującym, były omawiane w [2-5]. Pod wpływem promieniowania UV i  $\gamma$ , indukowane są w kryształach CTH:YAG centra barwne, które wychwytyją wzbudzenia elektronowe pochodzące od ksenonowej lampy pompującej.

W pracy [9] przedstawiono wyniki badań spektroskopowych kryształów CTH:YAG oraz charakterystyki energetyczne prętów laserowych do generacji swobodnej w układzie lasera z naturalnym chłodzeniem pręta. Dokonano pomiaru widma współczynnika absorpcji w obszarze 250-6200 nm. Stwierdzono występowanie centrów barwnych indukowanych promieniowaniem lampy pompującej, mających maksima dla długości fal odpowiadających przejściom  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$  (430 nm) i  ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$  (600 nm) w jonach  $Cr^{3+}$  oraz  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_2$ ,  ${}^3F_4$  (680 nm) i  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$  (780 nm) w jonach  $Tm^{3+}$ .

Stwierdzono, że powstałe pod wpływem promieniowania lampy ksenonowej centra barwne, są bardzo niestabilne i zanikają w temperaturze pokojowej. Szybkość relaksacji indukowanych centrów wynosiła 1%/1000 s.

Dokonano pomiaru charakterystyk energetycznych kilku prętów do transmisji zwierciadeł wyjściowych 20 i 49%. Określono wartości progowej generacji  $E_{pr} = 80$  J, 115 J, 135 J, 140 J.

W pracach [3-4] stwierdzono niestabilność generacji lasera CTH:YAG, którego element aktywny wygrzano w wysokiej temperaturze (1400 °C), przed naświetleniem dawką kwantów  $\gamma$  równą  $5 \times 10^4$  Gy. Wartość energii wyjściowej, najpierw mniejsza niż przed wygrzaniem, zwiększała się wraz ze wzrostem ilości impulsów, do wartości sprzed naświetlenia.

Znaczne polepszenie charakterystyki generacyjnej (4 razy wyższa sprawność różniczkowa) uzyskano dla pręta bez poprzedniego wygrzewania naświetlonego promieniami  $\gamma$  o dawce  $5 \times 10^4$  Gy [5]. Przedyskutowano mechanizm sensybilizacji możliwy dzięki napromienianiu kryształów kwantami  $\gamma$ . Stwierdzono, że w nie wygrzonym kryształ istnieje duża koncentracja defektów wzrostowych obniżających sprawność lasera. Po naświetleniu kwantami  $\gamma$ , defekty te zmieniają swój stan ładunkowy i tworzą centra barwne, wspomagające przekazywanie energii do jonów holmu. W wyniku tego procesu charakterystyki generacyjne lasera ulegają poprawie.

W pracy [6], na podstawie zmierzonych charakterystyk luminescencji i dodatkowej absorpcji, stwierdzono wzrost sprawności wymiany energii między jonami  $Cr^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  oraz  $Ho^{3+}$ , w wyniku wzrostu koncentracji jonów  $Cr^{3+}$  po naświetleniu kryształu CTH:YAG kwantami  $\gamma$  (efekt zmiany stanu ładunkowego  $Cr^{4+} \rightarrow Cr^{3+}$ ) dawką  $10^5$  Gy.

## 2. WARUNKI EKSPERYMENTU

### 2.1. BADANIA SPEKTROSKOPOWE

Do badań wykorzystano kryształy otrzymane w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych metodą Czochralskiego w atmosferze  $N_2$  z tygli irydowych .

Badania spektroskopowe przeprowadzono dla płytki o grubości 0,77 mm, (obustronnie polerowanej), wyciętej z kryształu CTH:YAG prostopadle do osi wzrostu w płaszczyźnie (111). Do badań wykorzystano spektrofotometr LAMBDA-2 firmy PERKIN-ELMER.

W celu wyznaczenia zależności współczynnika dodatkowej absorpcji badanych monokryształów od długości fali, przeprowadzono badania transmisji próbek, przed i po kolejnym akcie oddziaływania: napromieniowaniu kwantami  $\gamma$  lub termicznym wygrzewaniu, w zakresie widmowym od 190 do 1100 nm. Następnie obliczono dodatkową absorpcję z zależności [4]:

$$\Delta\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} [1/cm] , \quad (1)$$

gdzie: d - grubość próbki badanej,

$T_1$ ,  $T_2$  - transmisje próbki przed i po naświetleniu lub wygrzaniu.

## 2.2 NAŚWIETLANIA KRYZSTAŁÓW PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM

Dla kryształu poddanego kolejnym procesom oddziaływania (wygrzewanie, naświetlanie kwantami  $\gamma$ ), badano wpływ promieniowania UV lampy ksenonowej na generowane centra barwne. Do badań wykorzystano źródło impulsowe (ksenonowa lampa wyładowcza). Próbkę naświetlano 10 impulsami o energii 90 J w odstępie czasowym 15 s.

Naświetlania kwantami  $\gamma$  prowadzono w komorze jonizacyjnej ze źródłem  $^{60}\text{Co}$  o wydajności 1,7 Gy/s w Instytut Chemii i Technik Jądrowych Warszawa. Dawka kwantów  $\gamma$  zmieniała się od  $10^5$  do  $10^6$  Gy.

## 2.3 WYGRZEWANIE KRYZSTAŁÓW

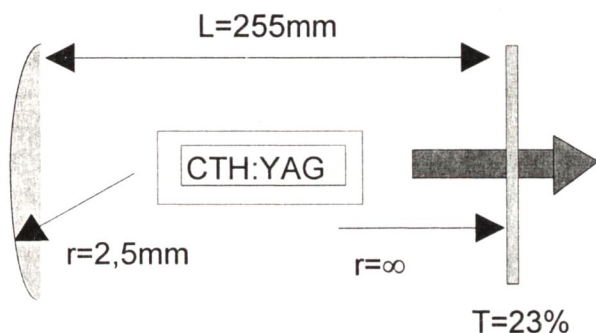
Próbkę do badań spektroskopowych naświetlano zarówno przed wygrzewaniem i po wygrzewaniu w temperaturach 400 °C i 1400 °C w atmosferze utleniającej. Badany pręt był poddawany wygrzaniu w temperaturach 800 °C, 1400 °C oraz 400 °C.

Procesy wygrzewania podzielić można na dwa typy: odprężanie termiczne i wygrzewanie w atmosferze utleniającej w wysokiej temperaturze. Odprężanie termiczne polegało na wygrzaniu naświetlonej wcześniej próbki w temperaturze 400 °C lub 800 °C przez około 3 h w powietrzu. Wygrzewanie w atmosferze utleniającej polegało na wygrzaniu próbki i pręta w temperaturze 1400 °C przez 3 h w powietrzu. Proces odprężania termicznego prowadzono w celu usunięcia popromiennych centrów barwnych. Wygrzewanie w wysokiej temperaturze miało na celu zmianę struktury defektowej kryształu. Próbki wygrzewano w piecach oporowych według ustalonego programu zmian temperatury.

## 2.4. BADANIA GENERACYJNE

Badania generacyjne przeprowadzono dla pręta CTH:YAG o długości  $l = 67,3$  mm i średnicy  $\phi = 4$  mm, który poddano następującym procesom: naświetleniu kwantów  $\gamma$  dawką równą  $10^5$  Gy, następnie wygrzaniu w temperaturze  $800$  °C w powietrzu przez 3 godziny, po wygrzaniu w temperaturze  $1400$  °C w powietrzu w ciągu 3 godzin, naświetleniu dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy oraz wygrzaniu tego samego pręta w temperaturze  $400$  °C przez 3 godziny w powietrzu.

Do pomiarów charakterystyk generacyjnych zastosowano zasilacz laserowy firmy ANALOG MODULS. Pręt umieszczono w głowicy "Kwantron K-1041" z odbijaczem refleksyjnym i chłodzeniem wodnym. Pomiarów prowadzono pompując pręt impulsami lampy pompującej o czasie trwania impulsu  $\tau_p = 700$  ms i częstotliwości  $f_i = 1$  Hz. Układ rezonatora zastosowanego do pomiarów przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Układ rezonatora do badania pręta CTH:YAG. Pręt CTH: YAG chłodzony wodą.

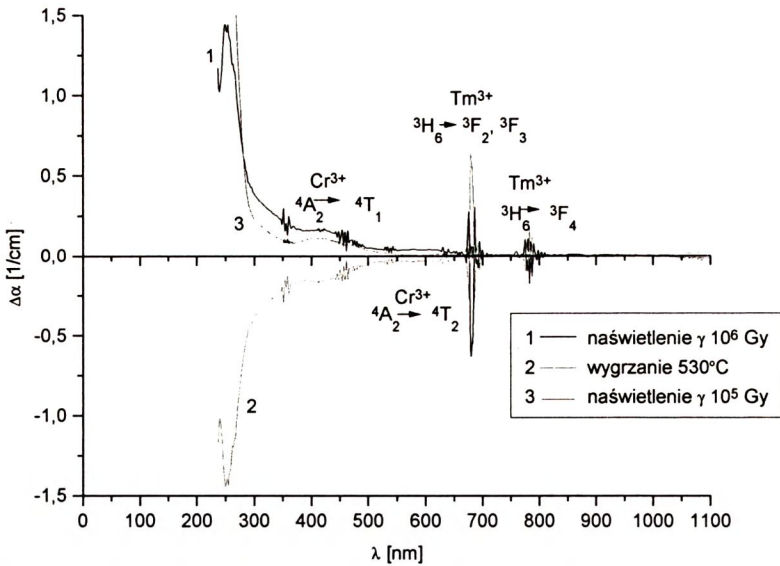
Fig. 2. Configuration of resonator used for investigation of water cooled CTH:YAG rods.

## 3. WYNIKI POMIARÓW

### 3.1. WYNIKI BADAŃ SPEKTROSKOPOWYCH

Próbkę kryształu bezpośrednio po procesie wzrostu napromieniowano kwantami  $\gamma$  dawką  $10^6$  Gy, a następnie wygrzano w  $400$  °C, po czym poddano kolejnemu napromieniowaniu kwantami  $\gamma$ , tym razem dawką  $10^5$  Gy. Następnie przeprowadzono wygrzewanie w powietrzu w temperaturze  $1400$  °C i przeprowadzono kolejne naświetlenie dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy, tę samą próbkę poddano naświetleniu 10 impulsami lampy ksenonowej o energii  $90$  J w odstępie  $15$  s. Procesy te wykonano w celu ustalenia wpływu szeregu kolejnych impulsów zawierających promieniowanie UV na zmianę właściwości absorpcyjnych kryształu.

W wyniku oddziaływania kwantów  $\gamma$  na badaną próbkę powstają dodatkowe pasma absorpcji (DPA), widoczne na Rys. 3. Uzyskano DPA na krótkofalowej krawędzi absorpcji, związane z jonami żelaza ( $252$  nm i  $313$  nm)  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Fe}^{2+}$ , pasmo



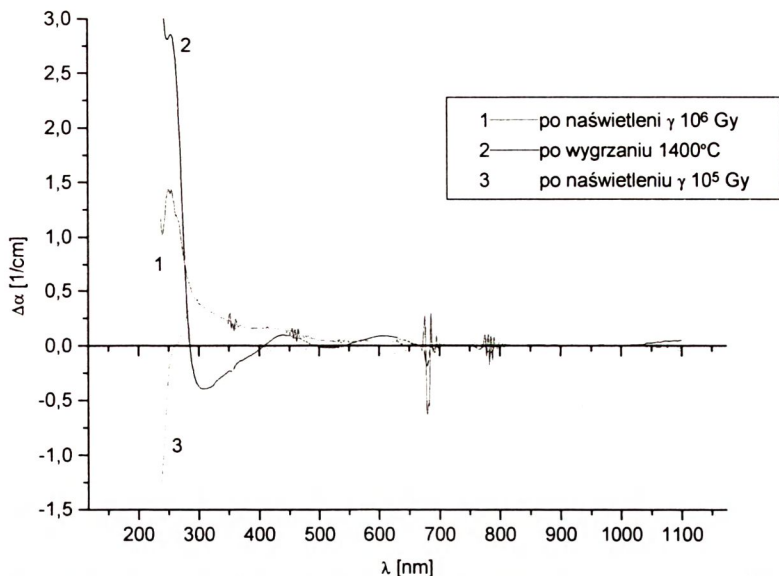
**Rys. 3.** Zależność dodatkowej absorpcji kryształu CTH:YAG od długości fali w kolejnych procesach oddziaływania: naświetlenie dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^6$  Gy (krzywa 1), wygrzanie w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  (krzywa 2) oraz naświetlenie dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy (krzywa 3).

**Fig. 3.** Dependents of additional absorption on wave length for irradiated and annealed CTH:YAG crystals: 1) curve for irradiated with gamma quanta doze  $10^6$  Gy, 2) curve for annealed in temperature  $400^\circ\text{C}$ , 3) curve for irradiated gamma quanta doze  $10^5$  Gy.

położone w pobliżu 385 nm, związane z wakansami tlenowymi  $V_O$  i dziurami  $O^-$  oraz pasma w pobliżu 430 nm, 600 nm, 680 nm i 780 nm odpowiadające przejściom:  $^4A_2 \rightarrow ^4T_1$  (430 nm) i  $^4A_2 \rightarrow ^4T_2$  (600 nm) w jonach  $\text{Cr}^{3+}$  oraz  $^3H_6 \rightarrow ^3F_2, ^3F_3$  (680 nm) i  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$  (780 nm) w jonach  $\text{Tm}^{3+}$  [8]. Wygrzewanie w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  prowadzi do całkowitego usunięcia poradiacyjnych centrów barwnych, co obrazuje krzywa 2, będąca prawie lustrzanym odbiciem krzywej 1, określającej reakcję kryształu “as grown” na naświetlenie kwantami  $\gamma$  o dawce  $10^6$  Gy.

Intensywność DPA zależy od dawki promieniowania  $\gamma$ , co ilustrują krzywe 1 i 3. W pasmie 430 nm intensywność DPA wynosi 0,2 [1/cm] dla  $10^6$  Gy i 0,15 [1/cm] dla  $10^5$  Gy.

Wygrzewanie kryształu w wysokiej temperaturze,  $1400^\circ\text{C}$ , prowadzi do zmian w widmie dodatkowej absorpcji (krzywa 2 na Rys. 4). Wzrost DPA z maksimum dla  $\lambda = 258$  nm odpowiada, jak sugerują autorzy pracy [6] wzrostowi koncentracji jonów żelaza  $\text{Fe}^{3+}$ . W pasmie 313 nm nastąpiło obniżenie absorpcji, najprawdopodobniej w wyniku zmniejszenia koncentracji jonów  $\text{Fe}^{2+}$ . Wzrost absorpcji w pobliżu 430 i 600 nm odpowiada wzrostowi koncentracji jonów  $\text{Cr}^{3+}$  [6]. Kolejne naświetlenie dawką

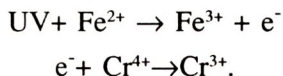


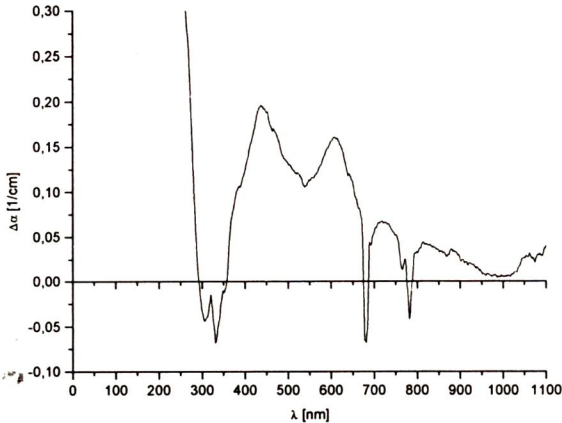
**Rys. 4.** Dodatkowa absorpcja kryształu CTH:YAG, wygrzanego w wysokiej temperaturze, 1400 °C (krzywa 2), naświetlonego następnie dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy (krzywa 3), w odniesieniu do pierwszego naświetlania kryształu “as grown” dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^6$  Gy.

**Fig. 4.** Additional absorption in annealed and irradiated CTH:YAG crystals: 1 curve for irradiated with gamma quanta dose  $10^6$  Gy, 2 curve for annealed in temp.1400 °C. 3 curve for annealed in 1400 °C next irradiated with gamma quanta dose  $10^5$  Gy CTH:YAG crystals.

kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy (krzywa 3 Rys. 4) spowodowało spadek absorpcji w obszarze 258 nm, wzrost absorpcji w obszarze 313 nm oraz spadek absorpcji dla pasm z maksimum dla 430 i 600 nm. Wartości bezwzględne dodatkowej absorpcji w wyżej wymienionych pasmach są porównywalne z wartościami uzyskanymi po wygrzaniu w 1400 °C, posiadają jednak przeciwny znak, co wiązać należy ze spadkiem koncentracji jonów  $\text{Cr}^{3+}$  po naświetleniu kwantami  $\gamma$  kryształu wygrzanego w atmosferze utleniającej.

Skutek oddziaływania promieniowania UV na badany kryształ, wcześniej wygrany i napromieniowany, przedstawiono na Rys. 5. Widoczne są liczne DPA, szczególnie w pobliżu 430 i 600 nm. Pasma te odpowiadają w zasadzie DPA otrzymanym po naświetleniu kwantami  $\gamma$  kryształu nie wygrzewanego, co świadczy o tym, że promieniowanie UV zmienia wartościowość uzyskanych wcześniej, w wyniku utleniania, jonów  $\text{Cr}^{4+}$  do postaci  $\text{Cr}^{3+}$ ; można przyjąć, że zachodzi oddziaływanie:





**Rys. 5.** Dodatkowa absorpcja kryształu CTH:YAG poddanego naświetlaniu promieniowaniem UV, po wcześniejszym wygrzaniu w 1400 °C i naświetleniu kwantami  $\gamma$  dawką  $10^5$  Gy.

**Fig. 5.** Additional absorption in CTH:YAG crystal, first annealed in temp. 1400 °C, next irradiated with gamma quanta dose  $10^5$  Gy and exposed UV radiation.

Oznacza to, że UV jonizuje jony żelaza, a powstałe elektrony wychwytywane są przez czterowartościowe jony chromu.

### 3.2. WYNIKI BADAŃ GENERACYJNYCH

Badania generacyjne obejmowały pomiar wartości energii wyjściowej lasera w funkcji energii promieniowania pompującego. Określono energie progowe generacji i sprawności różniczkowe procesu pompowania dla pręta CTH:YAG.

Na Rys. 6 przedstawiono wpływ promieniowania  $\gamma$  i wygrzewania w atmosferze utleniającej na właściwości laserowe kryształu CTH:YAG. Otrzymano cztery charakterystyki generacyjne dla pręta laserowego CTH:YAG. Po wygrzaniu w 800 °C otrzymano zmniejszenie wartości energii progowej  $\sim 20$  J w stosunku do energii progowej kryształu nie wygrzewanego, naświetlonego dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy. Kolejne wygrzanie w 1400 °C i naświetlenie dawką kwantów  $\gamma$   $10^5$  Gy spowodowało wzrost energii progowej do wartości 134 J oraz wzrost sprawności różniczkowej do 0,169 %. Wygrzanie w temperaturze 400 °C spowodowało odprężenie paradiacyjnych centrów barwnych i obniżenie sprawności różniczkowej lasera.

### 4. DYSKUSJA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Promieniowanie jonizujące (UV,  $\gamma$ ) powoduje powstanie w kryształach CTH:YAG centrów barwnych obserwowanych w obszarze długości fal 250-710 nm. Maksima w widmie absorpcyjnym występują przy długościach fal: 258 nm, 313 nm, 385 nm, 430 nm i 600 nm. Ze wzrostem dawki promieniowania  $\gamma$ , intensywność DPA też rośnie (Rys. 3). Zgodnie z wynikami pracy [8], pasma przy 430 nm i 600 nm związane są z defektami sieci, spowodowanymi przez jony  $\text{Cr}^{3+}$  podstawione w sieci YAG.



Pozostałe defekty, to charakterystyczne defekty dla sieci kryształu YAG, m.in. jony żelaza  $Fe^{3+}$  (258 nm), jony żelaza  $Fe^{2+}$  (313 nm), czy wakanse tlenowe  $V_o$  i dziury  $O^-$  (385 nm) dla kryształu wygrzanego w atmosferze utleniającej (dla kryształu wygrzanego w atmosferze redukcyjnej - centra typu F).

DPA widoczne przy 430 nm i 600 nm świadczą o wzroście po naświetleniu kwantami  $\gamma$ . Pod działaniem kwantów  $\gamma$  pojawiają się elektrony komptonowskie, które następnie wychwytywane są przez centra  $Cr^{4+}$  redukujące się do  $Cr^{3+}$ .

Wyrzucanie kryształu ma, jak przekonali się autorzy pracy [3], ogromny wpływ na zachowanie się lasera CTH:YAG naświetlonego kwantami  $\gamma$ . W układzie lasera chłodzonego w naturalny sposób powietrzem, energia wyjściowa pręta naświetlonego kwantami  $\gamma$  po wcześniejszym wygrzaniu w powietrzu, najpierw wyraźnie spadała, by po kolejnym impulsie wzrosnąć do wartości przed naświetleniem.

Wytłumaczenie tego zjawiska można znaleźć na Rys. 4 i Rys. 5. Po wygrzaniu próbki kryształu, uprzednio naświetlonej dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^6$  Gy, w atmosferze powietrza w temperaturze  $1400^\circ C$  przez 3 godziny, obserwuje się w kryształach przejście:  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  oraz  $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{4+}$ . Wartość DPA po wygrzaniu kryształu naświetlonego dawką  $10^6$  Gy wskazuje, że w kryształach tym przed wygrzaniem obecne były również jony  $Cr^{2+}$  (wartość DPA po naświetleniu kryształu "as grown" i wygrzaniu kryształu naświetlonego jest taka sama), w ilości co najmniej równej  $Cr^{4+}$ . Ponowne naświetlenie kryształu wygrzanego dawką kwantów  $\gamma$  równą  $10^5$  Gy, prowadzi do spadku koncentracji jonów  $Cr^{3+}$ . Prawdopodobnie, pod wpływem kwantów  $\gamma$ , zachodzi wtedy przejście:  $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{2+}$ . Wzrost koncentracji  $Cr^{3+}$  następuje dopiero po pobudzeniu takiego kryształu promieniowaniem UV, co pokazuje Rys. 5, gdzie podano wynik naświetlenia próbki CTH:YAG promieniowaniem lampy ksenonowej po uprzednim wygrzaniu i naświetleniu jej kwantami  $\gamma$ . To wyjaśnia, dlaczego kolejny impuls promieniowania pompującego, podnosząc koncentrację jonów  $Cr^{3+}$ , podnosi wartość energii wyjściowej lasera.

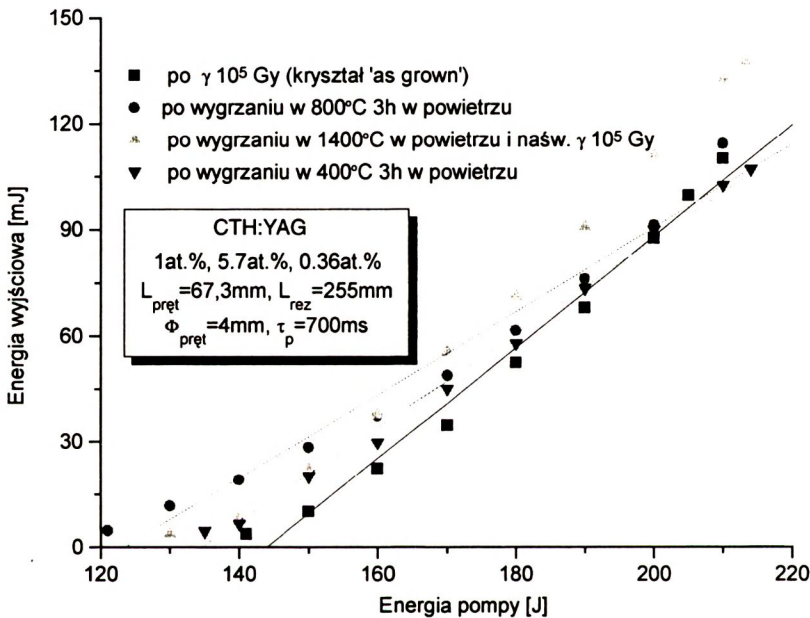
Nagrzewanie się pręta CTH:YAG w przypadku pracy pręta w układzie lasera chłodzonego naturalnie powietrzem, sprzyja procesowi szybkiej relaksacji centrów barwnych i zmiany koncentracji jonów chromu. Jak widać z Rys. 6, w pręcie chłodzonym wodą, procesy relaksacji zachodzą bardzo wolno i nie mają wpływu na pracę lasera (praca stabilna). Jak widać z rysunku laser z prętem naświetlonym jako "as grown" (krzywa 1 - charakterystyka uzyskana po 6 miesiącach od naświetlenia) ma wyższą sprawność różniczkową od lasera z tym samym prętem po wygrzaniu w temperaturze  $800^\circ C$  (krzywa 2). W drugim przypadku próg jest niższy, co można tłumaczyć zmniejszeniem się ilości defektów punktowych po wygrzaniu w temperaturze  $800^\circ C$ .

Ten sam pręt poddany wygrzaniu w temperaturze  $1400^\circ C$  i naświetlony dawką kwantów  $\gamma$   $10^5$  Gy (krzywa 3), ma sprawność różniczkową największą (0,17 %), ale próg generacji nieco wyższy niż po wygrzaniu kryształu w  $800^\circ C$ . Jest to rezultat wystąpienia w tej temperaturze zjawiska zwanego potocznie trawieniem termicznym obserwowanym w przypadku badanego pręta na wypolerowanych powierzchniach

czołowych na powierzchni bocznej, co obniża ich przezroczystość. Po wygrzaniu powierzchnie czołowe polerowano, przywracając je do stanu pierwotnego, natomiast powierzchnie boczne nie były regenerowane i tym można tłumaczyć przesunięcie progu generacji.

Wygrzanie tego pręta w temperaturze 400 °C (krzywa 4) obniżyło tylko jego sprawność różniczkową, czego należało się spodziewać, ponieważ w temperaturze tej centra barwne ulegają zniszczeniu.

Naświetlanie promieniowaniem jonizującym może prowadzić więc do poprawy charakterystyk generacyjnych lasera CTH:YAG poprzez wykorzystanie istniejących w kryształach defektów wzrostowych (indukowana radiacyjnie sensybilizacja). Korzystne jest również wygrzanie pręta w atmosferze utleniającej, w celu usunięcia części defektów punktowych pozostałych po procesie wzrostu, a następnie naświetleniu kwantami  $\gamma$ . Aby uniknąć konieczności ponownej obróbki pobocznic pręta,



**Rys. 6.** Charakterystyki generacyjne pręta CTH:YAG dla generacji swobodnej w układzie lasera z prętem chłodzonym wodą, czas wygrzewania 3h.

**Fig. 6.** Generation characteristic of CTH:YAF rod for free generation in configuration of laser water cooled rod, time annealed 3h.

wygrzewanie to, najlepiej przeprowadzać dla kryształu bezpośrednio po procesie wzrostu (przed wycięciem z niego prętów).

Pręt “as grown” poddany naświetleniu kwantami  $\gamma$  charakteryzuje się wysoką energią progową (krzywa 1, Rys. 6). Obniżenie energii progowej uzyskuje się po wygrzaniu pręta w temperaturach 800 °C i 1400 °C. (krzywe 2 i 3, Rys. 6). Dalsza

poprawa własności laserowych pręta uzyskiwana jest w wyniku jego naświetlenia dawką kwantów  $\gamma$  rzędu  $10^5$  Gy.

## 5. WNIOSKI

Po naświetleniu kryształów CTH:YAG promieniowaniem jonizującym UV lub kwantami  $\gamma$ , w widmie absorpcji powstają dodatkowe pasma, których intensywność zależy od dawki promieniowania, a kształt głównie od tego, czy kryształy były wcześniej wygrzewane i w jakiej atmosferze.

Największe zmiany obserwuje się w obszarze krótkofalowej krawędzi absorpcji, dla 258 nm, 313 nm, 385 nm oraz dla długości fal odpowiadających przejściom  $^4A_2 \rightarrow ^4T_1$  (430 nm) i  $^4A_2 \rightarrow ^4T_2$  (600 nm) w jonach  $Cr^{3+}$  oraz  $^3H_6 \rightarrow ^3F_2$ ,  $^3F_4$  (680 nm) i  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$  (780 nm) w jonach  $Tm^{3+}$ .

W przypadku pierwszych dwóch pików mamy do czynienia z defektem w postaci jonów żelaza  $Fe^{3+}$  i  $Fe^{2+}$ , kolejny pik odpowiada wakansom tlenowym i dziurom O<sup>-</sup>, kolejne dwa pasma absorpcji wynikają z mechanizmu zmiany wartościowości  $Cr^{3+}$ .

Wygrzewanie w temperaturze 400 °C prowadzi do usunięcia poradiacyjnych centrów barwnych podobnie jak wygrzewanie w 800 °C i dodatkowo usuwa niektóre defekty powstałe przy wzroście kryształu na co wskazuje przesunięcie progu generacji lasera. W temperaturze 1400 °C ulegają utlenieniu jony  $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{4+}$ ,  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  oraz  $Cr^{2+} \rightarrow Cr^{3+}$  których w kryształach CTH:YAG jest co najmniej tyle samo, ile jonów  $Cr^{4+}$  przed wygrzaniem.

Ponowne naświetlenie kwantami  $\gamma$  kryształu wygrzanego, powoduje przejście  $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{2+}$  w wyniku wychwytywania elektronów. Dopiero naświetlenie UV prowadzi do wzrostu koncentracji jonów  $Cr^{3+}$ .

Napromieniowanie kwantami  $\gamma$  kryształu wygrzanego w powietrzu w temperaturze 1400 °C powoduje poprawę właściwości generacyjnych lasera CTH:YAG w układzie głowicy z chłodzeniem wodnym pręta. Przyczyną tego jest wzrost koncentracji jonów  $Cr^{3+}$  biorących udział w procesie sensybilizacji aktywnych jonów  $Ho^{3+}$  (przejście  $Cr^{4+} \rightarrow Cr^{3+}$ ).

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kaczmarek S., Matkovskii A.O., Mierczyk Z., Kopczyński K., Sugak D. Yu., Frakacz Z.: Influence of UV and  $\gamma$  radiation on optical features of YAG crystals doped with Ce, Pr, Nd, Ho, Tm, Cr and Mg. Opto-Electronics Review 3-4, 1995

- [2] Kaczmarek S., Mierczyk Z., Kopczyński K., Matkovskii A.O., Sugak D. Yu., Frukacz Z.: Interaction of ionizing radiation with rare-earth doped YAG crystals. Proc. Intermolecular Interactions in Matter, 1995, 134-141
- [3] Kaczmarek S., Matkovskii A.O., Mierczyk Z., Kopczyński K., Sugak D. Yu., Durygin A.N., Frukacz Z.: Possibility of  $\gamma$ -induced sensibilization process in rare-earth doped YAG crystals. Acta Physica Polonica A, 90, 1996, 2, 285-294
- [4] Kaczmarek S., Kopczyński K., Łukasiewicz T., Frukacz Z., Piramidowicz R., Matkovskii A. O., Sugak D. Yu., Durygin A. N.: Influence of  $\gamma$ -radiation on active materials. Proc. SPIE, STL Świnoujście 11, 96
- [5] Matkovski A. O., Sugak D. Yu., Durygin A. N., Kaczmarek S., Kopczyński K., Mierczyk Z., Frukacz Z., Łukasiewicz T., Shakhov A. P.: Effect of ionizing radiation on optical and lasing properties of  $Y_3Al_5O_{12}$  single crystals doped with Nd, Er, Ho, Tm, Cr ions. Optical Materials 6, 1996, 353-358
- [6] Kaczmarek S., Kopczyński K., Łukasiewicz T., Frukacz Z., Piramidowicz R., Matkovskii A. O., Sugak D. Yu., Durygin A. N.: Influence of  $\gamma$ -radiation on active materials. Proc. SPIE, STL Świnoujście 1996, (in print)
- [7] Akhmadulin I.Sh., Migachev S.A., Mironov S.P.: Thermo- and photoinduced defects in  $Y_3Al_5O_{12}$  crystals. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B65, 1992, 270-274
- [8] Frukacz Z., Mierczyk Z.: Otrzymywanie monokryształów YAG: Er<sup>3+</sup> do zastosowań laserowych. Materiały Elektroniczne 22, 1994, 1, 69-83
- [9] Kopczyński K., Kaczmarek S., Mierczyk Z.: Badania spektroskopowe i generacyjne kryształów Cr, Tm, Ho:YAG. Biuletyn WAT 9, 1993, 3-9

## SENSIBILIZATION OF LASER PROPERTIES OF CTH:YAG CRYSTALS WITH USING IONIZING RADIATION

### Summary

Influence of gamma quanta radiation and annealing of CTH:YAG (Cr:Tm:Ho:  $Y_3Al_5O_{12}$ ) crystals on laser properties were investigated. Results of spectroscopic research and energetic characteristic of CTH:YAG are presented. It turned out possible to improve laser properties of irradiated and annealed crystals. Decreasing of generation threshold and increase of optical pumping efficiency were observed.