

DEFEKTY RADIACYJNE W KRYSZTAŁACH Nd:YAG I ICH WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE I CHARAKTERYSTYKI GENERACYJNE LASERA

Sławomir Maksymilian Kaczmarek¹, Mirosław Kwaśny¹, Tadeusz Łukasiewicz^{2,3}, Zbigniew Moroz⁴, Krzysztof Kopczyński¹, Ryszard Piramidowicz⁵, Jolanta Wojtkowska⁵, Stanisław Warchoń⁶, Krzysztof Stępka¹, Andrei Matkovskii⁷

Badano wpływ napromieniowania kwantami gamma (⁶⁰Co, 1,25 MeV) w temperaturze pokojowej (300 K) i ciekłego azotu (77 K) oraz warunków wygrzewania w atmosferze utleniającej i redukującej na właściwości optyczne kryształów Nd:Y₃Al₅O₁₂. Określono wpływ wielkości dawki na wartość energii wyjściowej lasera Nd:Y₃Al₅O₁₂. Badano również strukturę defektową w kryształach Nd:Y₃Al₅O₁₂ poddanych działaniu strumienia protonów o dawkach od 5×10^{12} do 10^{16} cm⁻² i elektronów o dawce 5×10^{16} cm⁻². Dla protonów i kwantów gamma określono wpływ wielkości dawki na wartość dodatkowej absorpcji.

1. WSTĘP

Badania wpływu promieniowania jonizującego na pracę laserów stałokrystalicznych ważne są ze względu na możliwość ich wykorzystania w przestrzeni kosmicznej. Na orbicie okołoziemskiej dawki ekspozycyjne osiągają w ciągu kilku lat wartość ponad 100 krad (10^3 Gy), zaś w przypadku pracy w przestrzeniach pozaziemskich są o kilka rzędów większe. Oddzielnym i równie ważnym zagadnieniem jest znajomość zachowania się układów laserowych w warunkach po wybuchu jądrowym.

¹Instytut Optoelektroniki WAT, Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa

²Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

³Instytut Fizyki Technicznej WAT, Kaliskiego 2, 01-489 Warszawa

⁴Instytut Problemów Jądrowych, 05-400 Świerk

⁵Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki PW, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

⁶Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Dorodna 16, 03-195 Warszawa

⁷Instytut Materiałów, Stryiska 202, Lwów 290031, Ukraina

Jednocześnie znany jest korzystny wpływ promieniowania jonizującego na charakterystyki pracy laserów po naświetleniu ich elementów aktywnych kwantami gamma dawką ok. 10^5 Gy. Dotyczy to laserów wykorzystujących kryształy $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) zawierające domieszki Cr, Tm, Ho (CTH:YAG) oraz Er (Er:YAG) [1, 2]. W przypadku lasera Nd: $Y_3Al_5O_{12}$ (Nd:YAG) wysoka dawka promieniowania reaktorowego (neutrony, elektrony) powoduje wyraźny spadek sprawności różniczkowej lasera, aż do całkowitego zerwania generacji [3]. Małe dawki rzędu 10 Gy kwantów gamma lub 10^{11} elektronów/cm² mogą podnieść o ~17 % energię wyjściową lasera [4]. Autorzy pracy [4] sugerują, że pole radiacji dopompuje jony Nd³⁺, a ponadto, obok tworzenia się defektów obniżających sprawność generacji, w elemencie aktywnym mogą powstawać centra barwne (CB), których energia rekombinacji pod działaniem promieniowania pompy przekazywana jest jonom aktywnym. Promieniowanie jonizujące usuwa słabo związane defekty powstające podczas wytwarzania i obróbki materiałów laserowych. Obserwowany wyższy wzrost energii wyjściowej lasera Nd:YAG w wyniku naświetlania małymi dawkami elektronów tłumaczy się bardziej skutecznym usuwaniem defektów strukturalnych.

W pracy [5] zbadano wpływ naświetlania kwantami gamma i wysokoenergetycznymi protonami (30-50 MeV) na właściwości generacyjne kryształów Nd:YAG i Nd: LiYF₄ (Nd: YLF), pompowanych wzdłużnie diodami laserowymi, emitującymi promieniowanie o długości fali $\lambda=800$ nm. Stwierdzono, że oba rodzaje promieniowania wytwarzają te same CB, które obniżają energię wyjściową laserów na skutek wewnętrznej absorpcji promieniowania, emitowanego na długości fali generacji. Ponadto, dla stosowanych dawek 10^3 Gy, wpływ CB, polegający na obniżeniu sprawności różniczkowej lasera, obserwowano tylko w przypadku pompowania ciągłego. Nie obserwowano zmian sprawności różniczkowej laserów Nd:YAG i Nd:YLF w przypadku pompowania impulsowego.

W pracy [6], w wyniku napromieniowania, uzyskano poprawę charakterystyk generacyjnych silnie zdefektowanych kryształów Nd:SrLaGa₃O₇ (Nd:SLGO). Fakt ten próbuje się tłumaczyć przesunięciem krawędzi absorpcji w kryształ Nd:SLGO o około 100-200 nm pod wpływem naświetlania, co podnosi sprawność przekazywania energii od pompy do centrów aktywnych (mniejsze straty optyczne z powodu absorpcji ultrafioletu).

Poprawę charakterystyk generacyjnych kryształów Nd:Gd₃Ga₅O₁₂ (Nd:GGG) o około 20% po naświetleniu dawką promieniowania gamma 10^5 Gy obserwowali autorzy pracy [7]. Efekt ten jest prawdopodobnie wynikiem obniżenia się, w wyniku napromieniowania, stopnia zdefektowania kryształu („leczenie” defektów wzrostowych).

Badania wpływu promieniowania jonizującego na kryształ Nd:YAG, prezentowane w pracach [4, 5], wykonywano w temperaturze pokojowej. W pracy [8] stwierdzono, że intensywność dodatkowego pochłaniania w kryształach YAG zależy od temperatury, w której wykonuje się naświetlanie. Jeśli w przedziale temperatur 25-300 °C największe pochłanianie występuje dla dawki 10^4 Gy, to w przypadku

temperatury naświetlania powyżej 300°C to samo pochłanianie obserwuje się dla dawki 10^3 Gy. Pełne odtworzenie wyjściowej gęstości optycznej kryształu uzyskuje się po wygrzaniu go w 400°C.

W pracy [9] badano dodatkowe pasma absorpcyjne (DPA) w niskich temperaturach (do 77 K), stwierdzając wzrost wartości DPA wraz ze zmniejszeniem temperatury, w której prowadzono naświetlanie. W oparciu o przeprowadzoną analizę temperaturowej zależności intensywności podstawowych pasm pochłaniania, autorzy tej pracy stwierdzili również, że procesy powstawania i anihilacji CB w kryształach Nd:YAG zachodzą z udziałem co najmniej dwóch elektronowych centrów wychwytu, z których jednym są jony Fe^{3+} .

W pracy [10] opisano możliwe defekty powstające w kryształach YAG po naświetleniu ich kwantami gamma, po wcześniejszym wygrzaniu w atmosferze utleniającej i redukującej. Są one widoczne w widmie absorpcyjnym kryształu YAG poprzez DPA dla $\lambda_1=310$ nm, $\lambda_2=240-260$ nm i $\lambda_3=407$ nm. Badania elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR) tych kryształów wykazały, że pasma λ_1 i λ_2 związane są odpowiednio z jonami Fe^{2+} i Fe^{3+} . Ponadto w paśmie λ_2 stwierdzono występowanie pod-pasma $\lambda_{23}=258$ nm, związanego z jonami Fe^{2+} oraz pod-pasm $\lambda_{21}=246$ nm i $\lambda_{22}=261$ nm, związanych z jonami Fe^{3+} . W przypadku kryształu wygrzanego w atmosferze utleniającej, pasmo λ_3 powiązane z obecnością centrów dziurowych O^- , powstałych w wyniku foto-emisji elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa oraz wakansów tlenowych, V_o . W przypadku kryształu wygrzanego w atmosferze redukcyjnej, pasmo λ_3 związane z centrami F, czyli dwoma elektronami zlokalizowanymi w wakansie tlenowym.

W celu uniknięcia zmian właściwości optycznych kryształów po napromieniowaniu, kryształy Nd:YAG domieszkuje się jonami Cr^{3+} [5] lub Ce^{3+} [11], które, przy odpowiedniej koncentracji, mogą obniżyć wrażliwość kryształów YAG na promieniowanie jonizujące.

W prezentowanej pracy zbadano wpływ wysokich dawek promieniowania gamma w zakresie 10^2-10^7 Gy oraz naświetlania elektronami i protonami o energiach 300 keV, 1 MeV (dawki do 5×10^{16} cm^{-2}) i 26 MeV (dawki $10^{12}-10^{16}$ cm^{-2}), odpowiednio, na stopień i rodzaj zdefektowania kryształów Nd:YAG. Badano także wpływ naświetlania, a następnie wygrzewania, na strukturę kryształów oraz wykonano pomiary charakterystyk generacyjnych kryształów Nd:YAG wygrzanych w atmosferze utleniającej (powietrze) i redukcyjnej (N_2+H_2) i następnie naświetlonych kwantami gamma.

2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

2.1 BADANIA SPEKTROSKOPOWE

Badaniom poddano kryształy Nd:YAG oraz kryształy nie domieszkowane otrzymane w ITME metodą Czochralskiego z tygli irydowych w atmosferze N_2 . Zawartość jonów Nd^{3+} w próbkach wynosiła 1% at.

Do pomiarów zmian właściwości optycznych kryształów Nd:YAG pod wpływem promieniowania jonizującego przygotowano płasko-równoległe próbki, obustronnie polerowane, o grubościach od 0,5 do 3 mm, cięte prostopadle do osi wzrostu, w płaszczyźnie (111). Przed i po kolejnym procesie oddziaływania z promieniowaniem lub termicznym wygrzewaniu, za pomocą spektrofotometrów: LAMBDA-2 PERKIN-ELMER, ACTA VII BECKMAN oraz FTIR 1725 PERKIN-ELMER, mierzono transmisję próbek, obliczając następnie DPA z zależności:

$$\Delta K = \frac{1}{d} \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$

gdzie: ΔK - dodatkowa absorpcja, d - grubość próbki, T_1 , T_2 - transmisje próbki przed i po naświetleniu lub wygrzaniu.

Do badań luminescencji, w w/w płytkach polerowano trzecią powierzchnię, prostopadłą do dwóch wypolerowanych wcześniej. W próbkach naświetlonych kwantami gamma mierzono luminescencję w obszarze 700-2000 nm i porównywano ją z luminescencją kryształu nie naświetlanego. Badania przeprowadzano w IMIO Politechniki Warszawskiej.

Do badań termoluminescencji (TL), przygotowano próbki nie polerowane, o grubości <1 mm i średnicy do 6 mm. Pomiaru termoluminescencji kryształów nie naświetlonych, jak i naświetlanych kwantami γ , dokonywano w zakresie temperatur od 70-400°C za pomocą karuzelowego analizatora WAWA-TLD RA'95, zainstalowanego w ICHTJ Warszawa.

Próbki kryształów YAG i Nd:YAG badano również po upływie roku od naświetlenia.

2.2 NAŚWIETLANIA KRYSZTAŁÓW PROMIENIOWANIEM JONIZUJĄCYM

W przypadku kryształów nie napromieniowanych i wygrzanych w atmosferze utleniającej badano wpływ promieniowania UV lampy ksenonowej na rodzaj generowanych CB. Jako źródło UV stosowano impulsową, ksenonową lampę wyładowczą oraz lampę o mocy 150W, dającą ciągłe widmo emisji. W przypadku widma ciągłego UV czas naświetlania wynosił 1min.

Naświetlania kwantami gamma prowadzono w komorze jonizacyjnej ze źródłem ^{60}Co o wydajności około 1,5 Gy/s (zależy ona od pory roku) w ICHTJ (Warszawa), IEA (Świerk) oraz RPE Carat (Lwów). Napromieniowanie protonami o energii 26 MeV przeprowadzono w cyklotronie C-30 w IPJ (Świerk), zaś napromieniowanie elektronami o energii 300 keV i 1 MeV w akceleratorze van de Graaffa w ICHTJ Warszawa. Dawka kwantów gamma zmieniała się od 10^2 do 10^7 Gy, dawka protonów od 5×10^{12} do 10^{16} cm^{-2} oraz elektronów od 10^{14} do 5×10^{16} cm^{-2} . Efekty nad-progowe obserwowano przy następujących dawkach: dla protonów - 10^{14} cm^{-2} (26MeV), a dla

elektronów - $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (1 MeV) (w kryształach pojawiają się wtedy defekty przemieszczenia - pary Frenkla).

Po każdym naświetlaniu kryształów YAG, Nd:YAG i Nd,Ce:YAG protonami, mierzono ich radioaktywność oraz analizowano widmo emitowanego przez nie promieniowania gamma. Badaniom optycznym poddawano je dopiero po osiągnięciu poziomu radioaktywności (mocy dawki) rzędu $3 \mu\text{Sv/godz}$. Dopuszczalna (przy 40-godzinnym tygodniu pracy, przez 50 tygodni w roku) moc dawki wynosi $25 \mu\text{Sv/godz}$.

Stwierdzono, że głównym źródłem radioaktywności próbek YAG, Ce,Nd:YAG i Nd:YAG po naświetleniu ich protonami dawką 10^{13} cm^{-2} , są izotopy radioaktywne ^{88}Zr oraz ^{89}Zr , wzbudzone w tych materiałach w wyniku reakcji jądrowych: $Y(p, n)$ i $Y(p, 2n)$. Izotopy te rozpadają się w wyniku przemiany β^+ . W kryształach Nd:YAG, poddanych naświetleniu protonami dawką 10^{13} cm^{-2} , zaobserwowano następujące (najsilniejsze) linie gamma:

1. $E=511 \text{ keV}$; linia anihilacyjna pozytonów
2. $E=910 \text{ keV}$ linia z rozpadu ^{89}Zr ; półokres rozpadu ~ 80 godzin,
3. $E=394 \text{ keV}$ linia z rozpadu ^{88}Zr ; półokres rozpadu 83,4 dni.

W poniższej tabeli pokazano typy zachodzących reakcji jądrowych, energie emitowanych linii gamma oraz okresy połowicznego rozpadu w kryształach Nd:YAG naświetlonych protonami dawką 10^{16} cm^{-2} . Widać, że przy tej wartości dawki, w kryształach tym pojawiają się również izotopy ^{89}Y oraz ^{143}Pm o większej wartości okresu połowicznego rozpadu, niż izotopy Zr.

Tabela 1. Energia emitowanych linii gamma, reakcje jądrowe i okresy połowicznego rozpadu dla kryształu Nd:YAG naświetlanego protonami dawką 10^{16} cm^{-2} .

| E_γ (keV) | Reakcja | $T_{1/2}$ (dni) |
|------------------|--|-----------------|
| | $^{89}_{39}\text{Y} (p, pn) ^{88}_{39}\text{Y}$ | 106,6 |
| 814(1836-1022) | | |
| 898 | | |
| 1836 | | |
| 2734 (pik sumy) | | |
| | $^{89}_{39}\text{Y} (p, 2n) ^{88}_{40}\text{Zr}$ | 83,4 |
| 393 | | |
| | $^{143}_{60}\text{Nd} (p, n) ^{143}_{61}\text{Pm}$ | 265 |
| 742 | | |

Próbki naświetlano zarówno bezpośrednio po procesie wzrostu, jak i po wygrzewaniu w temperaturach 1400°C (atmosfera utleniająca) oraz 1200°C (atmosfera redukcyjna N_2+H_2).

2.3 WYGRZEWANIE KRYSZTAŁÓW

Zastosowano trzy rodzaje obróbki termicznej: odprężanie termiczne - polegające na wygrzaniu badanych próbek w temperaturze 400°C przez około 3 h w powietrzu, wygrzewanie w atmosferze utleniającej - polegające na wygrzaniu próbek w temperaturze 1400°C przez 3h w powietrzu oraz wygrzewanie w atmosferze redukcyjnej - polegające na wygrzaniu próbek w atmosferze mieszaniny wodoru i azotu etapami (0,5 h) w okresie 1,5 h w temperaturze 1200°C. Odprężanie termiczne miało na celu usunięcie popromiennych centrów barwnych, pozostałe sposoby miały na celu zmienić strukturę defektową kryształu. Wszystkie próby wygrzewania prowadzono w ITME Warszawa.

2.4 BADANIA GENERACYJNE

Pręt Nd:YAG o długości $L=45,63$ mm i średnicy $\Phi=4$ mm naświetlano kwantami gamma i wygrzewano, a następnie badano w laserze Nd:YAG, w warunkach generacji swobodnej. Pręt ten nie miał na swoich czołach pokryć antyrefleksyjnych (AR) i w układzie lasera, w naturalny sposób chłodzony był powietrzem. Ponadto, badaniu poddano pręt Ce, Nd:YAG (0,05 at. %Ce i 1 at. % Nd), bez pokryć AR, o wymiarach: $L=55$ mm, $\Phi=4$ mm, który naświetlano kwantami gamma bezpośrednio po procesie wzrostu.

Do badań energii wyjściowej tych laserów wykorzystano płasko-równoległy rezonator o długości 21 cm. Pręt umieszczony był wewnątrz elipsoidalnego reflektora, wykonanego z mosiądzu pokrytego złotem. Transmisja zwierciadła wyjściowego wynosiła 36,6 % dla $\lambda=1,06$ μm .

Pompę stanowiła łukowa lampa ksenonowa o średnicy 4 mm oraz zasilacz z baterią kondensatorów o pojemności 2×25 μF , dający energię pompy od 7 do 50 J. Czas trwania impulsu pompy wynosił około 300 μs . Do detekcji promieniowania lasera służył czujnik piroelektryczny. Energię impulsów laserowych mierzono przy pomocy radiometru Gen-Tec z głowicą pomiarową ED-500.

3. REZULTATY I DYSKUSJA.

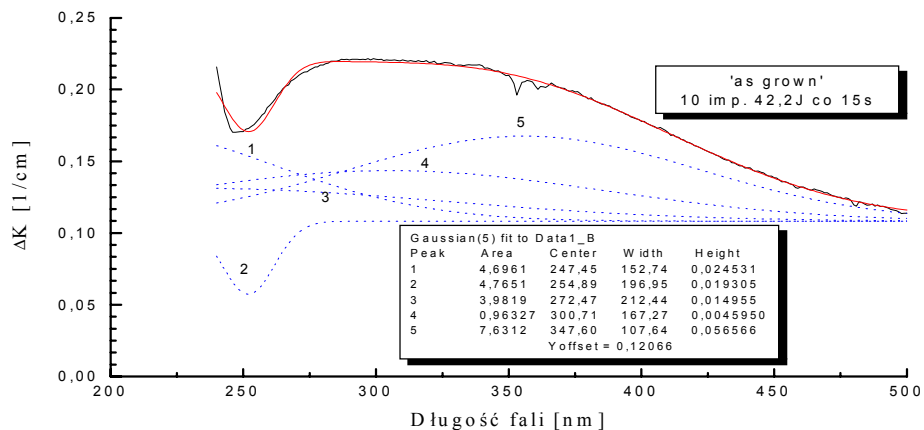
3.1 BADANIA OPTYCZNE

Pomiarowi transmisji, luminescencji i termoluminescencji przed i po wygrzaniu i naświetleniu kwantami gamma, elektronami i protonami poddano trzynaście próbek (oznaczonych Y1...Y13) o grubości ~ 3 mm i średnicy ~ 16 mm, wyciętych z tego samego monokryształu Nd:YAG oraz kilka próbek o grubościach 1 mm oraz 1,8 mm i średnicy 4 mm wyciętych z innego kryształu. Dawki kwantów gamma, elektronów i protonów dla poszczególnych próbek były następujące: 10^2 Gy - Y9, 10^3 Gy - Y1, 10^4 Gy - Y2, 10^5 Gy - Y3, 10^6 Gy - Y4, 10^7 Gy - Y5, 5×10^{12} , $3,5 \times 10^{13}$ i $1,35 \times 10^{14}$ protonów/ cm^2 - Y8, 10^{15} elektronów/ cm^2 - Y6, 10^{16} elektronów/ cm^2 - Y7.

Każdorazowo po wygrzaniu, naświetleniu i pomiarze energii generacji, badano również transmisję pręta o długości $L=45,63$ mm. Badania wpływu promieniowania UV prowadzono naświetlając próbki 10 impulsami lampy ksenonowej (wykorzystywanej do pompowania lasera Nd:YAG) o energii 42,2 J, w odstępie 15 s, w rezonatorze lasera. Pomiar transmisji wykonywano bezpośrednio po naświetlaniach.

3.1.1 KRYSZTAŁY NAŚWIETLANE BEZPOŚREDNIO PO PROCESIE WZROSTU.

Wynik oddziaływania promieniowania UV na próbkę kryształu Nd:YAG o grubości ~ 3 mm ilustruje Rys. 1. Widoczne są trzy wyraźne DPA przy długościach fali ~ 260 nm, 280 nm oraz 345 nm. Obecność ich potwierdzono numerycznie poprzez dopasowanie za pomocą pięciu rozkładów Gaussa (wynik dopasowania w tabeli na rysunku). Pasma to rozciąga się na widzialny obszar widma DPA, aż do 700 nm i w temperaturze pokojowej szybko zanika (czas zaniku kilka minut). W wyniku naświetlenia tej samej próbki źródłem UV o rozkładzie ciągłym uzyskano podobne DPA. Pierwsze ekstremum na Rys. 1 (260nm) odpowiada zmianie wartościowości jonów żelaza Fe^{3+} , drugie (280 nm) związane jest z jonami żelaza Fe^{2+} , zaś trzecie (345 nm) z centrum typu F [12].



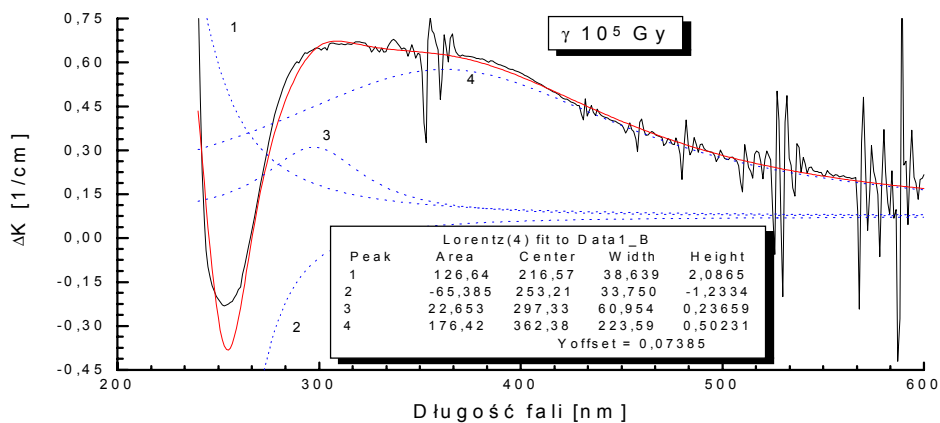
Rys. 1. DPA w płytce Nd:YAG ($d\sim 3$ mm) po naświetleniu lampą ksenonową - 10 impulsami o energii 42.2 J w odstępie 15 s w rezonatorze lasera.

Fig. 1. AA bands in Nd:YAG plate ($d\sim 3$ mm) after UV irradiation with a xenon pump lamp inside a laser resonator (10 pulses with energy of 42.2 J and time interval equal to 15 sec).

Oprócz DPA, w kryształach Nd:YAG obserwowane są także CB [12] o krótkim czasie życia (czas zaniku 10^{-3} s). Czas życia tych CB, jak również ich intensywność, nie wpływają znacząco na pracę lasera. Centra te są przyczyną braku powtarzalności charakterystyk generacyjnych lasera, absorbując energię pochodzącą z kolejnych impulsów pompy.

Wynik oddziaływania kwantów γ na próbkę Nd:YAG o grubości $d=1.9$ mm ilustruje Rys. 2. Widać, podobnie jak w przypadku oddziaływania UV, (z uwzględnieniem dopasowania Lorentza) co najmniej trzy CB, z maksimami dla: 253 nm, 297 nm oraz 360 nm.

Charakterystyki optyczne kryształu (widma absorpcyjne) wracają do stanu sprzed naświetlenia po wygrzaniu kryształu w temperaturze 400°C przez okres 3 godzin.



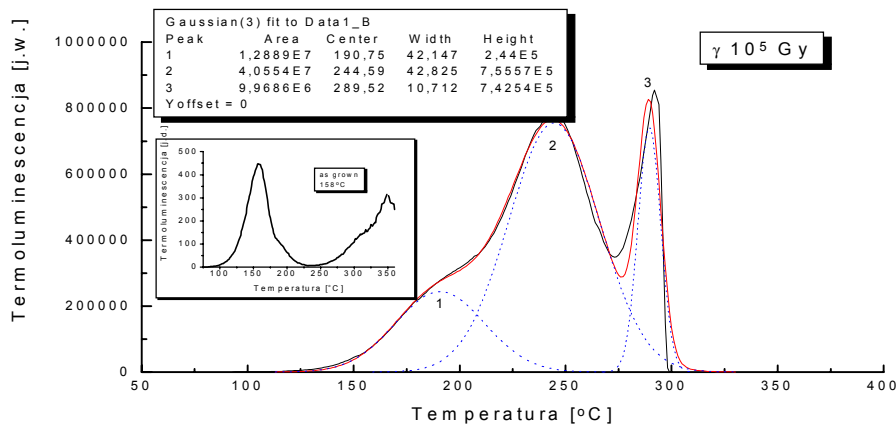
Rys. 2. Widmo DPA dla kryształu Nd:YAG ($d=1.9$ mm) po naświetleniu kwantami gamma (źródło ^{60}Co) dawką 10^5 Gy. Widoczne są co najmniej trzy CB.

Fig. 2. AA band in Nd:YAG plate ($d=1.9\text{mm}$) after gamma irradiation with a dose of 10^5 Gy. One can see at least three colour centers.

Rozciągłość tego pasma jest większa, niż w przypadku oddziaływania UV i przekracza $1,06 \mu\text{m}$. Interpretacja centrów jest podobna jak dla naświetlania UV, chociaż położenie na skali długości fal jest nieco różne. Rozbieżność tę można wyjaśnić zmiennymi warunkami procesu wzrostu. Próbkę w przypadku obu pomiarów pochodziły z dwóch różnych kryształów.

Na Rys. 2 widać jeszcze jedną różnicę w porównaniu z efektami naświetlania UV. Jest nią wartość DPA dla długości fali 253 nm równa $-0,37 \text{ cm}^{-1}$. Wartość ta świadczy o tym, że w wyniku oddziaływania kwantów γ , duża ilość obecnych w kryształach jonów Fe^{3+} (większa, aniżeli w przypadku oddziaływania UV) uległa redukcji do Fe^{2+} . O ile w przypadku oddziaływania UV wartość DPA dla 280 nm (Fe^{2+}) była równa $\sim 0,23 \text{ cm}^{-1}$, to w przypadku kwantów gamma wartość DPA dla 297 nm jest około trzykrotnie większa i wynosi $0,73 \text{ cm}^{-1}$.

Widmo TL kryształu Nd:YAG o grubości ~ 1 mm przedstawiono na Rys. 3. Widać, że maksimum TL kryształu nie naświetlonego (wstawka) występuje dla dwóch temperatur, 158°C oraz temperatury nieco powyżej 350°C . W widmie TL kryształu naświetlonego kwantami γ występuje, poza dwoma już opisanymi, także trzecie maksimum. Przesunięcie krzywej wynika ze zmiany grubości mierzonej próbki oraz czasu - dwa tygodnie, jaki upłynął od chwili naświetlenia do chwili pomiaru. Powyżej 300°C wynik pomiaru jest obarczony dużym błędem ze względu na zbyt dużą czułość fotopowielacza dla zaabsorbowanej w próbce dawki promieniowania. Z pomiarów tych wynika, że w kryształach po naświetleniu występują co najmniej trzy rodzaje defektów. Związane są one z defektami kryształu powstałymi w czasie jego wzrostu, a



Rys. 3. Widmo TL kryształu Nd:YAG o grubości 1.8 mm po naświetleniu kwantami gamma o dawce 10^3 Gy. Wstawka ilustruje widmo TL dla kryształu bezpośrednio po procesie wzrostu, zaś tabela w ramce zawiera parametry dopasowania przy pomocy trzech rozkładów Gaussa.

Fig. 3. TL spectrum of Nd:YAG crystal with a thickness of 1.8 mm after gamma irradiation with a dose of 10^3 Gy. TL of as grown crystals is shown inside small picture. Table presents fitting parameters with the use of three Gauss distributions.

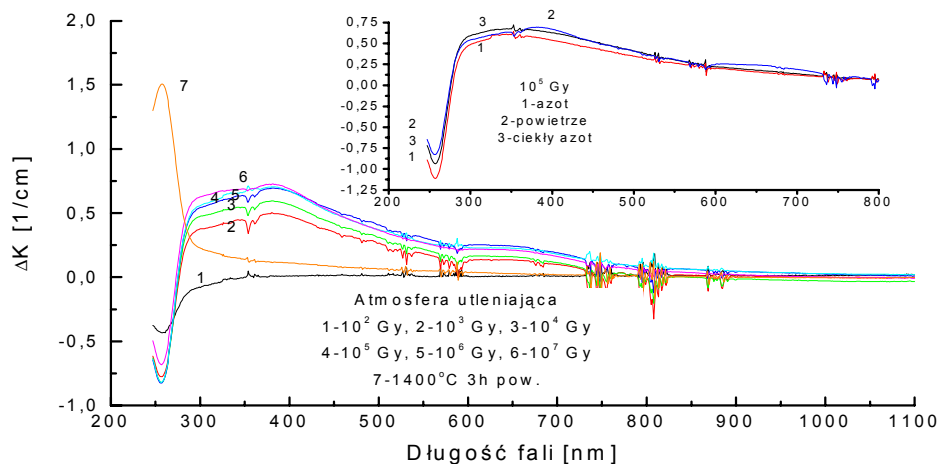
także nowymi, powstałymi w wyniku zmiany wartościowości aktywnych optycznie jonów występujących w sieci kryształu Nd:YAG (Fe^{3+}). Usunięcie tych defektów (radiacyjnych) jest możliwe poprzez wygrzanie kryształu w temperaturze około 400°C .

3.1.2. KRYSZTAŁY WYGRZEWANE W ATMOSFERZE UTLENIAJĄCEJ

Wszystkie próbki wygrzane w temperaturze 1400°C pochodziły z jednego kryształu. Próbki te naświetlano różnymi dawkami kwantów γ (10^2 - 10^7 Gy), protonów

(5×10^{12} - 10^{16} cm⁻²) i elektronów (5×10^{16} cm⁻²), określając zmianę ich transmisji i luminescencji po napromieniowaniu.

Po wygrzaniu kryształów obserwuje się wzrost ich absorpcji w obszarze obejmującym krótkofalową krawędź absorpcji. Wyniki badań obejmujących wygrzewania w 1400°C i naświetlania próbek kryształu Nd:YAG kwantami γ ilustruje Rys. 4. Z rysunku tego widać, że po wygrzaniu kryształu Nd:YAG w temperaturze 1400°C, w obszarze UV (256 nm) pojawia się DPA, świadczące o zmianie wartościowości występujących w kryształach jonów Fe²⁺ do Fe³⁺ (nie występuje DPA z maksimum przy ~300 nm oraz drugie, z maksimum dla ~360 nm). Po naświetleniu takiego kryształu kwantami gamma o różnej dawce, zarejestrowany wcześniej kształt



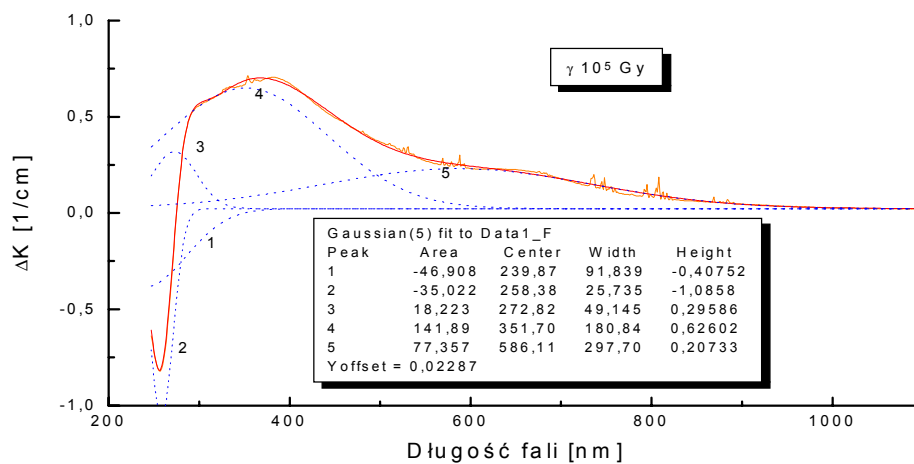
Rys. 4. DPA po wygrzaniu kryształu Y2 (d=3mm) w 1400°C przez 3 godziny (krzywa 7) oraz po naświetleniu wygrzanych kryształów różnymi dawkami kwantów γ . Wstawka ilustruje DPA po γ 10⁵ Gy w azocie-1, powietrzu-2 w 300 K i w ciekłym azocie-3 (77 K).

Fig. 4. AA bands after annealing of Y2 sample (d=3mm) at 1400°C for 3h in air (curve 7) and after γ -irradiation of annealed crystals. Small picture describe AA after g-exposure in air, nitrogen (300K) and liquid nitrogen.

DPA (dla kryształu nie wygrzanego) powtarza się z dwoma wyjątkami. Otóż, jak widać to na Rys. 5, intensywność DPA dla ~351 nm jest wyższa, niż dla 273 nm. Centrum to, jak sugerują autorzy pracy [12], związane jest z dziurowymi centrami O⁻ oraz wakansami tlenowymi V_o. Ponadto pojawia się dodatkowe centrum widoczne przy 586 nm, którego nie było w widmie DPA kryształu bezpośrednio po procesie wzrostu. Autorzy pracy [13] wiążą je z centrami F⁺. Charakterystykę optyczną kryształu wygrzanego, naświetlonego następnie kwantami gamma, przywraca wygrzanie go w temperaturze 400°C przez ok. 3 godziny.

Zmianę maksymalnej wartości DPA dla długości fal: 258, 273, 352 oraz 586 nm w funkcji dawki kwantów γ przedstawia Rys. 6. Widać wysycenie zmian DPA, mające miejsce dla dawki 10^6 Gy.

DPA dla kryształów Nd:YAG uprzednio wygrzanych w 1400°C w powietrzu, naświetlanych protonami i elektronami przedstawia Rys. 7. Kształt DPA zbliżony jest do kształtu DPA w przypadku kryształów naświetlanych γ po uprzednim wygrzaniu w atmosferze utleniającej. Ze wzrostem dawki maleje wartość DPA centrum związanego ze zmianą wartościowości jonów Fe^{3+} , ale rośnie też wartość DPA dla centrum O \cdot . Od dawki rzędu 10^{14} protonów/ cm^2 i 10^{16} elektronów/ cm^2 pojawiają się efekty związane z jonizacją i zderzeniami sprężystymi dla protonów (obszary amorficzne) oraz efekty oddziaływania nad-progowego (tworzenie defektów Frenkla)



dla elektronów.

Rys. 5. DPA po naświetleniu kwantami γ dawką 10^5 Gy, wygrzanego uprzednio w atmosferze utleniającej kryształu Y6. Na rysunku uwzględniono wyniki numerycznego dopasowania Gaussa (5 rozkładów). Tabela w ramce zawiera parametry dopasowania.

Fig. 5. AA bands in previously annealed in oxidizing atmosphere Y6 sample after γ -irradiation with a dose of 10^5 Gy. In the figure numerical results of Gaussian fitting (5 distributions) are presented. Table in the frame show fitting parameters.

Rys. 8 przedstawia zależność wartości DPA od dawki protonów dla tych samych długości fal, co uprzednio (Rys. 6) dla kwantów γ . Widać obszar dawek, gdzie dominują efekty przeładowania (do 10^{14} cm^{-2}), obszar przejściowy (spadek DPA), gdzie nakładają się efekty przeładowania, jonizacji i oddziaływania sprężystego oraz obszar dawek charakterystyczny dla defektów przemieszczeń ($>10^{14}$ cm^{-2}).

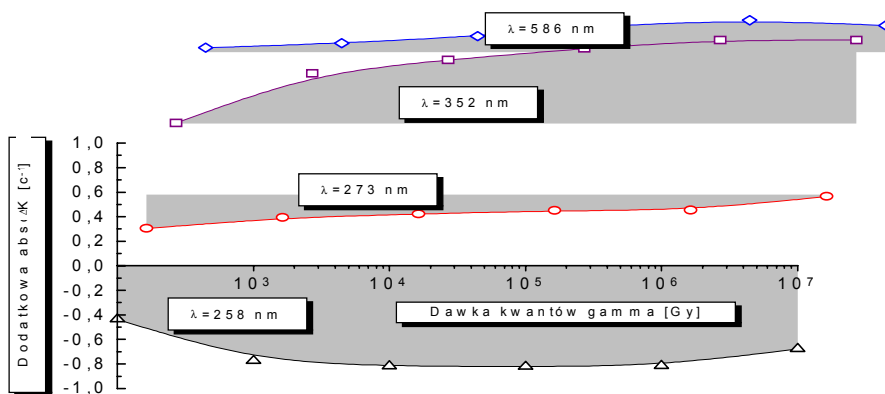
Rys. 9 przedstawia widma luminescencji kryształu Nd:YAG przed i po naświetleniu kwantami γ dawką 10^7 Gy. Widać zanik przejść

niskoenergetycznych (1,34 i 1,44 μm), wynikający z poszerzenia poziomów energetycznych leżących bliżej poziomu wzbudzonego.

3.1.3. KRYSZTAŁY WYGRZEWANE W ATMOSFERZE REDUKUJĄCEJ (MIESZANINA N_2 i H_2)

Wyrzewanie prowadzono w temperaturze 1200°C przez 1.5 godziny. Charakterystyki optyczne tych kryształów (DPA) niczym nie różnią się od kryształów bezpośrednio po procesie wzrostu (wyciąganych w atmosferze N_2) (Rys. 2).

Widać to również wyraźnie na Rys.10, gdzie przedstawiono DPA po kolejnych procesach: wygrzaniu próbki Y1 w 1400°C przez 3h w powietrzu, naświetleniu kwantami γ dawką 10^3 Gy, wygrzaniu w temperaturze 1200°C w wodorze, kolejno trzy razy po 0,5h, i ponownie naświetleniu kwantami γ dawką 10^3 Gy.



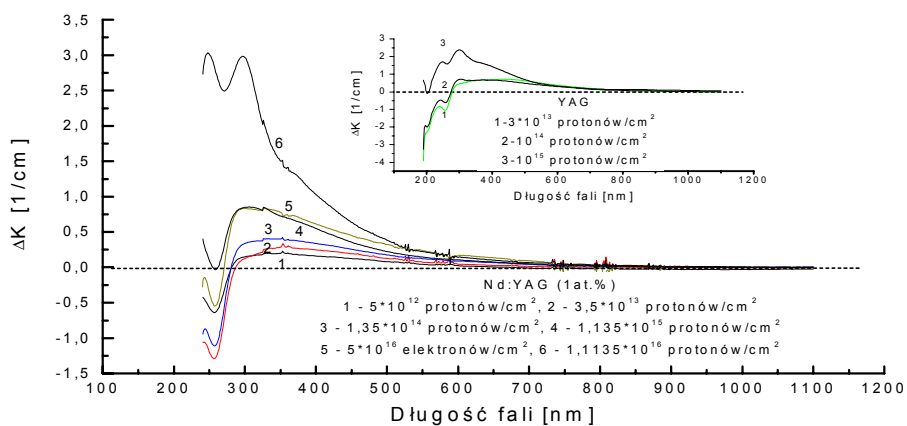
Rys. 6. Zmiany wartości DPA w funkcji dawki dla kryształów Nd:YAG wygrzanych w 1400°C w powietrzu i napromieniowanych kwantami γ dla czterech wartości λ .

Fig. 6. Changes in AA band of annealed and next γ -irradiated Nd:YAG crystals as a dose function for four values of wavelength.

Wyrzwanie kryształu Nd:YAG w temperaturze 1400°C w powietrzu prowadzi do utlenienia jonów żelaza do postaci Fe^{3+} . Naświetlenie kryształu wygrzanego w powietrzu powoduje wprowadzenie do jego struktury opisanych wcześniej defektów radiacyjnych. Wyrzwanie tego kryształu w wodorze, usuwa część tych defektów, ale jak widać z rysunku, czas 1,5h jest zbyt krótki, aby nastąpiła zmiana wartościowości (redukcja) wszystkich jonów Fe^{3+} . Po naświetleniu kryształu wygrzanego w wodorze, pojawiają się DPA charakterystyczne dla kryształów naświetlonych kwantami γ po poprzednim wygrzaniu w atmosferze redukującej.

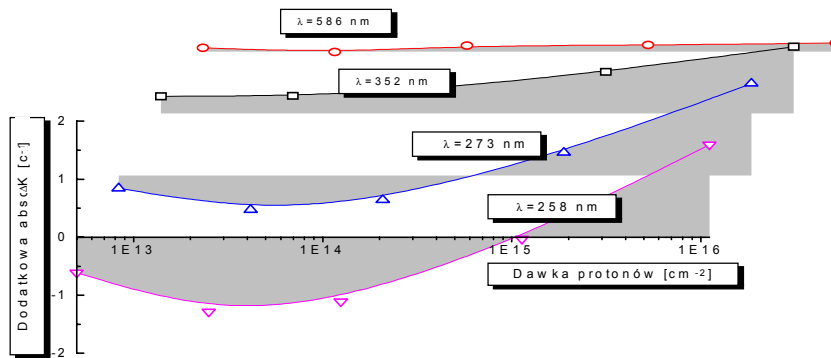
3.2 BADANIA GENERACYJNE

Pręt o długości $L=45,63$ mm i średnicy $\Phi=4$ mm wygrzewano najpierw w atmosferze utleniającej (1400°C 3h), następnie naświetlono kwantami γ dawką 10^5 Gy, wygrzewano w temperaturze 400°C (usunięcie centów barwnych), ponownie naświetlano kwantami γ dawką 10^3 Gy, wygrzewano w atmosferze redukującej (1200°C -1h w N_2+H_2), ponownie naświetlano kwantami γ dawką 10^5 Gy i wygrzewano w temperaturze 400°C w powietrzu. Po każdym z tych procesów badano zmiany transmisji pręta, ponadto, zmiany te obserwowano po procesie generacji swobodnej. Wyniki tych pomiarów zilustrowano na Rys. 11. Krzywa 1 ilustruje absorpcję kryształu Nd:YAG, pozostałe krzywe dodatkową absorpcję po naświetleniu kwantami γ : 2- 10^5 Gy i 3 - 10^3 Gy. Widać, że po naświetleniu kryształu dawką 10^3 Gy, po kilkunastu impulsach pompy, wartości DPA maleją do poziomu charakterystycznego dla kilkunastu Gy (krzywe 3 i 4), a ponadto, w wyniku oddziaływania UV pompy, część jonów Nd^{3+} zmienia wartościowość. Krzywa 5 ilustruje różnicę pomiędzy absorpcją pręta zmierzoną po procesie generacji swobodnej i po wygrzaniu. Opisane wyżej zmiany, zachodzące w badanym pręcie Nd:YAG, odzwierciedlają charakterystyki generacyjne tego pręta, przedstawione na Rys. 12.



Rys. 7. DPA dla kryształu Y8 wygrzanego w 1400°C i naświetlonego protonami dawkami: $1-5 \cdot 10^{12}$, $2-3,5 \cdot 10^{13}$, $3-1,35 \cdot 10^{14}$, $1,135 \cdot 10^{15}$ oraz $1,1135 \cdot 10^{16}$ cm⁻² oraz kryształu Y10 naświetlonego elektronami dawką $5 \cdot 10^{16}$ cm⁻². Wstawka dotyczy kryształu YAG naświetlonego protonami dawkami: $1-3 \cdot 10^{13}$, $2-10^{14}$ oraz $3-10^{15}$ cm⁻².
Fig. 7. AA bands of Y8 sample previously annealed at 1400°C and then irradiated by protons with doses: $1-5 \cdot 10^{12}$, $2-3,5 \cdot 10^{13}$, $3-1,35 \cdot 10^{14}$, $1,135 \cdot 10^{15}$ and $1,1135 \cdot 10^{16}$ cm⁻² and Y10 sample irradiated by electrons with a dose of $5 \cdot 10^{16}$ cm⁻². Small picture show AA of YAG crystal irradiated by protons with doses of: $1-3 \cdot 10^{13}$, $2-10^{14}$ and $3-10^{15}$ cm⁻².

Jak widać, naświetlanie kwantami γ powoduje generalnie pogorszenie charakterystyk generacyjnych lasera Nd:YAG i to tym większe, im większą zastosowano dawkę (spada sprawność różniczkowa lasera). Spadek ten zależy od warunków chłodzenia pręta (woda lub powietrze). W przypadku chłodzenia pręta powietrzem, po około 50-ciu impulsach pompy, ustala się w nim stan równowagi termicznej i charakterystyka lasera pozostaje dalej stabilna (dla dawki 10^3 Gy na poziomie określonym na Rys. 12, zaś dla dawki 10^5 Gy na poziomie określonym na Rys. 13). Na Rys. 12 pokazano charakterystyki energetyczne lasera Nd:YAG po naświetleniu kwantami γ pręta wygrzanego w powietrzu (krzywe 1, 2 oraz 3) oraz dla porównania wygrzanego w mieszaninie azotu i wodoru (krzywe 4 i 5) i naświetlonego tą samą dawką kwantów γ (10^5 Gy). Widać zdecydowanie korzystniejsze charakterystyki dla pręta wygrzanego w powietrzu.



Rys. 8. DPA w kryształe Nd:YAG w funkcji dawki protonów.

Fig. 8. AA bands in Nd:YAG crystal as a dose function of protons.

Rys. 13 pokazuje zmianę energii wyjściowej lasera Nd:YAG, którego pręt naświetlono dawką kwantów gamma 10^5 Gy w funkcji ilości impulsów o energii 25 J, generowanych w odstępach pięciu sekund przez lampę pompującą.

Stan równowagi termicznej pręta osiągnąć jest po ~ 50 impulsach pobudzających.

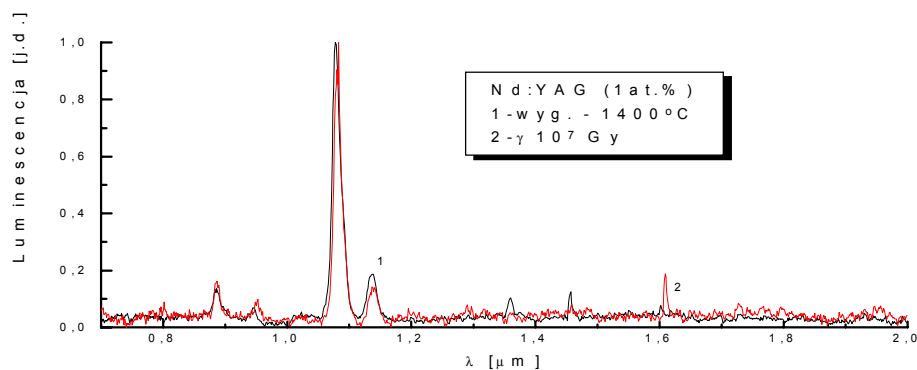
Rys. 14 przedstawia charakterystyki generacyjne dwóch prętów: Nd:YAG, opisanego wyżej oraz Ce, Nd:YAG przed (krzywa 1) i po naświetleniu kwantami gamma dawką 10^5 Gy (krzywe 2 i 3 odpowiednio). Oba pręty posiadają podobne charakterystyki generacyjne (krzywa 1): pręt Nd:YAG po wygrzaniu w wodrze i azocie, zaś pręt Ce, Nd:YAG bezpośrednio po procesie wzrostu przed naświetleniem kwantami gamma. Widać, że po naświetleniu kwantami γ , niższe energie wyjściowe uzyskuje się po naświetleniu pręta Ce, Nd:YAG. Oznaczać to może, że koncentracja ceru jest w tym kryształe zbyt mała.

Obliczyliśmy, na podstawie krzywych absorpcji, że koncentracja ceru w badanym kryształe wynosi $\sim 0,01$ at. %, i jest pięciokrotnie niższa od założonej wartości.

Zmiana energii lasera Ce, Nd:YAG, którego pręt naświetlono kwantami γ dawką 10^5 Gy w funkcji ilości impulsów o energii 25 J, nie odbiega od charakterystyki przedstawionej na Rys. 13.

3.3. DYSKUSJA

Po naświetleniu kryształu Nd:YAG UV, kwantami γ , elektronami i protonami, w widmie absorpcji, w obszarze 200-930 nm, pojawia się szerokie, dodatkowe pasmo absorpcji, którego kształt nie zależy od rodzaju promieniowania, ale od atmosfery, w której kryształ był wygrzewany. Piki absorpcji dodatkowej położone są w pobliżu 258 nm, 278 nm i 350nm (dla kryształu wygrzanego w powietrzu jeszcze w pobliżu 586 nm).



Rys. 9. Luminescencja kryształu YAG:Nd przed (1) i po napromieniowaniu (2) kwantami gamma o dawce 10^7 Gy. Widać zanik przejść dla 1,34 μm i 1,44 μm .

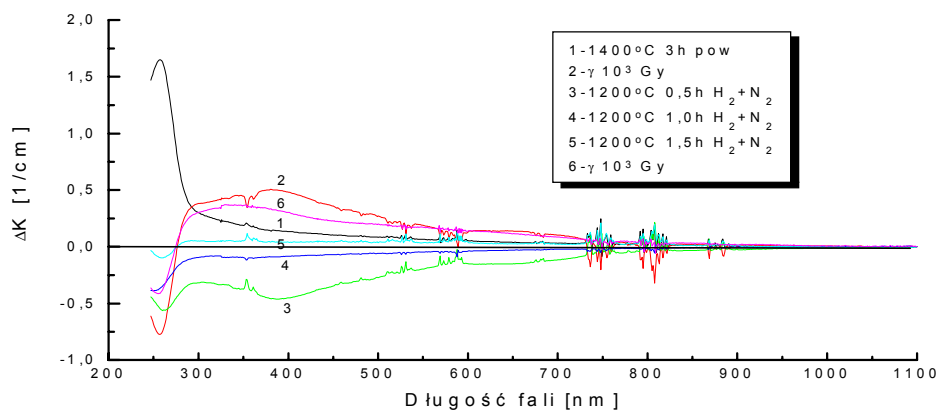
Fig. 9. Luminescence spectrum of Nd:YAG crystal before (1) and after (2) γ -irradiation with a dose of 10^7 Gy. One can see the vanishing of 1.34 and μm 1.44 μm transitions.

Widma DPA dla kryształów wygrzewanych w powietrzu (Rys. 5) i w atmosferze azotu podczas wzrostu (Rys. 2) różnią się bardzo wyraźnie. W przypadku widma przedstawionego na Rys. 5, amplituda DPA przy długości fali 278 nm jest niższa niż przy długości fali 350 nm. Widmo przedstawione na Rys. 2 charakteryzuje się natomiast wyższą amplitudą przy długości fali 278 nm niż przy 350 nm. W obu przypadkach mamy do czynienia z dwoma różnymi defektami: w przypadku kryształu wygrzanego w powietrzu są nimi dziury O^- , zlokalizowane w pobliżu defektów podsiatki kationowej oraz wakanse tlenowe V_{O} , zaś w kryształach wygrzanych w mieszaninie azotu i wodoru są nimi centra F [10].

Po wygrzaniu kryształu Nd:YAG w temperaturze 1400°C, w pobliżu krótkofalowej krawędzi absorpcji, obserwuje się wzrost wartości DPA, porównywalny ze wzrostem obserwowanym w tym kryształach po naświetleniu dawką protonów $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ oraz nieznaczny spadek tej wartości z dala od tej

krawędzi. Wygrzewanie kryształu Nd:YAG w wodorze, prowadzone przez 1,5 h w temperaturze 1200°C redukuje CB obserwowane przy 278 nm i 350 nm oraz wprowadza centra typu F. Nie jest ono wystarczające (czas wygrzewania 1,5 h) do zmiany wartościowości wszystkich jonów $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$.

Ze wzrostem dawki promieniowania kwantów γ od 10^2 - 10^7 Gy, elektronów od 10^{14} - 10^{16} cm^{-2} i protonów od 10^{12} - 10^{16} cm^{-2} , wartość DPA staje się coraz wyższa. Dla kryształów wygrzanych w powietrzu i napromieniowanych dawkami 10^6 - 10^7 Gy osiąga nasycenie na poziomie 0,75 cm^{-1} . Z oddziaływaniem nad-progowym strumienia protonów (powstawanie defektów Frenkla) mamy do czynienia przy dawce rzędu 10^{14} cm^{-2} , zaś elektronów przy dawce rzędu 10^{16} cm^{-2} .



Rys. 10. DPA dla kryształu Y1 po następujących procesach: 1-wygrzaniu w 1400°C w powietrzu, 2- naświetleniu kwantami γ dawką 10^3 Gy, 3- wygrzaniu w wodorze przez 0,5h, 4-wygrzaniu w 1200°C w wodorze przez następne pół godziny, 5-wygrzaniu w 1200°C w wodorze, łącznie przez 1,5 godziny i 6-naświetleniu kwantami γ dawką 10^3 Gy.

Fig. 10. AA bands in Y1 sample after: 1-annealing at 1400°C for 3h in air, 2- γ -irradiation with a dose of 10^3 Gy, 3-annealing at 1200°C in N_2+H_2 mixture for 0.5h, 4-annealing at 1200°C in N_2+H_2 mixture for next 0.5h, 5-annealing at 1200°C in N_2+H_2 mixture for next 0.5h and 6- γ -irradiation with a dose 10^3 Gy.

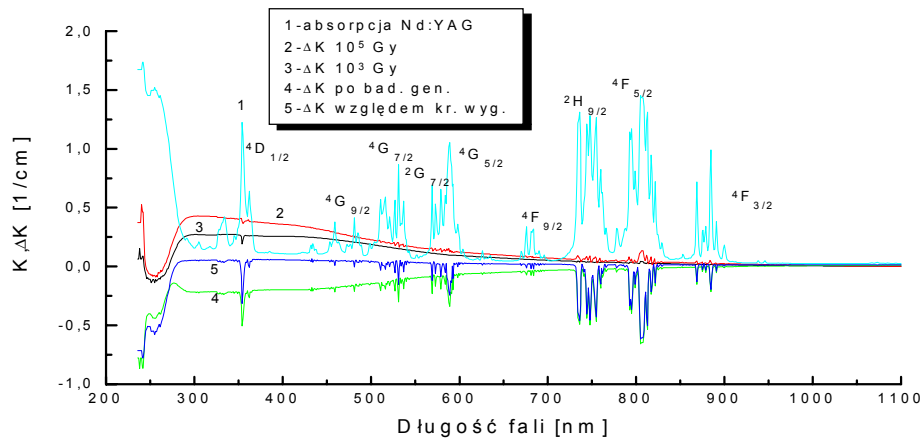
Należy zauważyć, że DPA kryształów Nd:YAG mają podobny kształt i położenie pików maksymalnej absorpcji, jak i DPA w kryształach YAG. Należy więc sądzić, że defekty odpowiadające za te pasma są charakterystyczne dla kryształów o strukturze YAG. Widać również, że intensywność DPA jest w kryształach YAG wyższa, aniżeli w kryształach Nd:YAG (rys. 7).

Położenie maksimum DPA w badanych kryształach różni się nieco od położenia opisanych w pracy [10]. Wynika to z faktu, że stosując nawet tą samą metodę wzrostu, można otrzymać kryształy różniące się od siebie niektórymi właściwościami, z powodu różnych rzeczywistych warunków wzrostu [11] (atmosfera, w jakiej

prowadzono wzrost, czystość materiałów wyjściowych użytych do krystalizacji, stabilność pracy generatora zasilającego itp.).

Jak wykazały badania przeprowadzone po upływie roku od naświetlenia kryształów YAG i Nd:YAG kwantami γ [13], ich powrót do stanu przed naświetleniem następuje w temperaturze pokojowej bardzo powoli (spadek DPA o około 10 %).

Właściwości lasera Nd:YAG po naświetleniu go kwantami γ są inne, niż lasera, którego element aktywny nie był naświetlany. Naświetlanie kwantami γ obniża sprawność różniczkową lasera. W przypadku kryształu uprzednio wygrzanego w atmosferze utleniającej i naświetlonego kwantami γ dawką 10^3 Gy oraz wygrzanego w atmosferze redukującej i naświetlonego kwantami γ dawką 10^5 Gy, obserwowano wzrost tej sprawności po kilku impulsach lampy ksenonowej. Po kolejnych impulsach lampy (~50-ciu dla dawki 10^5 Gy) energia wyjściowa lasera rośnie do poziomu, wynikającego z termicznej równowagi określonej warunkami chłodzenia.



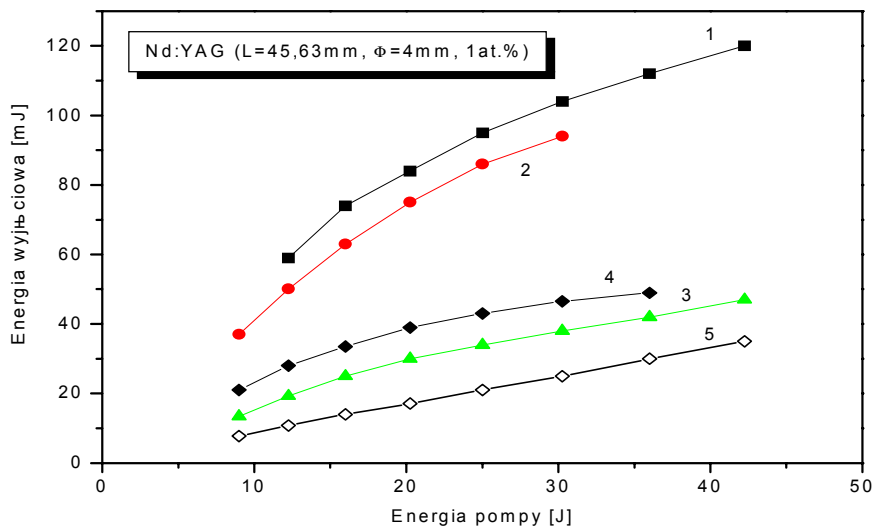
Rys. 11. Absorpcja-(1) i dodatkowa absorpcja w pręcie YAG po naświetleniu kwantami γ dawkami (2)- 10^5 i (3)- 10^3 Gy oraz (4)-UV w trakcie badań generacyjnych. Krzywa (5) ilustruje różnicę absorpcji pręta zmierzonej po procesie generacji i po wygrzaniu.

Fig. 11. Absorption-(1) and additional absorption in Nd:YAG rod after γ -irradiation with doses: (2)- 10^5 and (3)- 10^3 Gy and (4)-UV during emission investigations. Curve 5 presents difference in absorption after emission investigations and annealing process.

Charakterystyka wyjściowa lasera Ce, Nd:YAG po naświetleniu kwantami γ , przy założonej koncentracji Ce w kryształach rzędu 0,05at.%, jest gorsza od charakterystyki wyjściowej lasera Nd:YAG. Fakt ten spowodowany jest znacznie zaniżoną koncentracją ceru w kryształach w stosunku do założonej wartości i wyższym stopniem zdefektowania tego kryształu.

Wzrost energii lasera z prętem chłodzonym powietrzem występujący po kolejnych impulsach pompy jest spowodowany nagrzewaniem się pręta, co przyspiesza procesy relaksacyjne obniżające DPA.

Jak wynika z rysunku 11, CB powstałe w wyniku naświetlenia kryształu Nd:YAG kwantami γ , obejmują obszar widmowy, pokrywający się z najbardziej intensywnymi pasmami absorpcyjnymi: $^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$, $^4G_{7/2}$, $^2G_{7/2}$ i $^4G_{5/2}$. Jednak sprawność lasera Nd:YAG po naświetleniu kwantami γ spada. Może to świadczyć o tym, że w kryształach Nd:YAG, oprócz możliwego procesu sensybilizacji, w wyniku transferu energii od CB do jonów Nd^{3+} , mamy do czynienia ze wzrostem strat pasywnych na długości fali generacji [5]. Rysunek 12 potwierdza niejako ten fakt, gdyż ten sam pręt naświetlony po wygrzaniu w powietrzu daje wyższą energię niż pręt naświetlony po wygrzaniu w mieszaninie N_2+H_2 .



Rys. 12. Generacja swobodna w pręcie Nd:YAG: 1 - po wygrzaniu w $1400^{\circ}C$ w O_2 , 2 - po naświetleniu γ 10^3 Gy, 3 - po naświetleniu γ 10^5 Gy, 4 - po wygrzaniu w $1200^{\circ}C$ w N_2+H_2 i 5 - po naświetleniu γ 10^5 Gy.

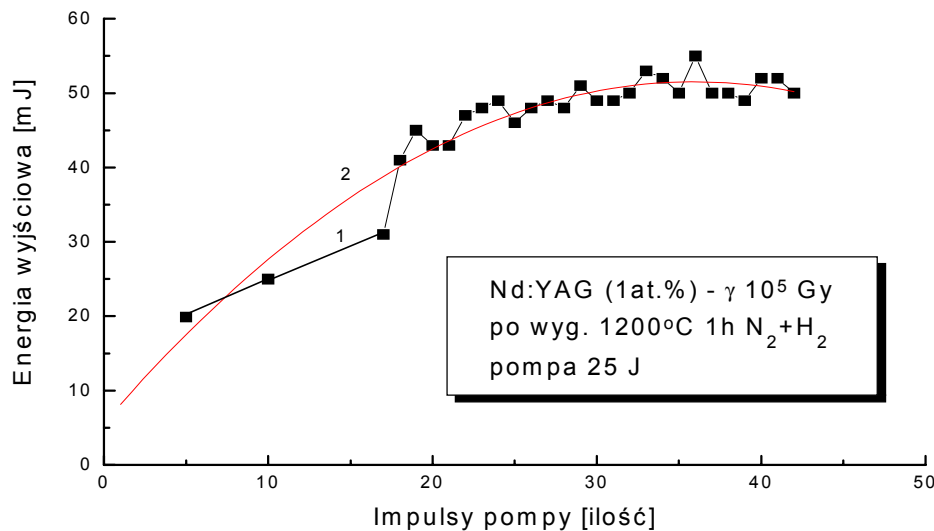
Fig. 12. Free-running laser emission from Nd:YAG: 1 - after annealing at $1400^{\circ}C$ in O_2 , 2 - after γ -irradiation with a dose of 10^3 Gy, 3 - after γ -irradiation with a dose of 10^5 Gy, 4 - after annealing at $1200^{\circ}C$ in N_2+H_2 mixture and 5 - after γ -irradiation with 10^5 Gy.

4. WNIOSKI

Po naświetleniu kryształów Nd:YAG promieniowaniem jonizującym takim jak: promieniowanie UV, kwanty γ , elektrony i protony, w widmie absorpcyjnym tych kryształów powstają DPA (CB), których kształt nie zależy od rodzaju promieniowania i wielkości dawki, a jedynie od tego w jakich warunkach kryształ

był wygrzewany przed napromieniowaniem. Od wielkości dawki promieniowania zależy natomiast intensywność tych pasm.

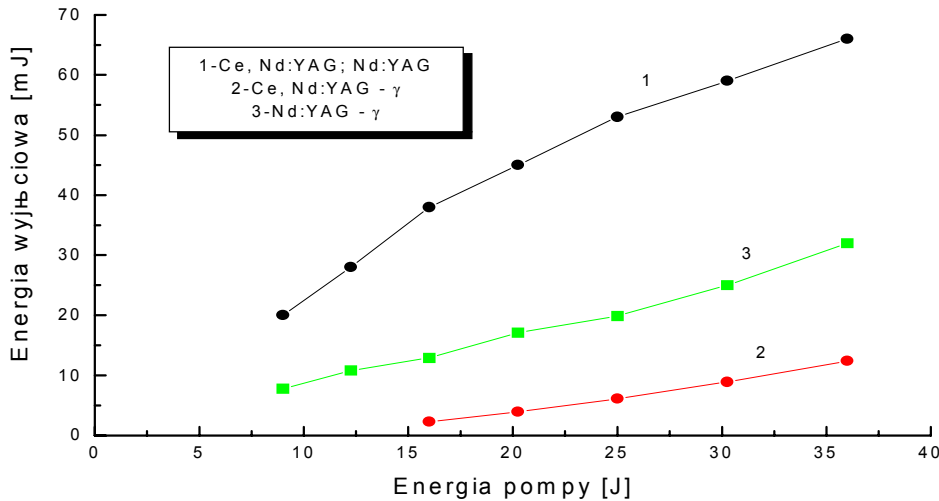
Samo wygrzewanie kryształu Nd:YAG w powietrzu (temperatury ok. 1400°C) poprawia charakterystyki optyczne kryształu, ale w obszarze poza krótkofalową krawędzią absorpcji. W pobliżu krawędzi absorpcji widoczne są zmiany porównywalne ze zmianami obserwowanymi w tym samym obszarze widma wskutek obecności defektów spowodowanych przez napromieniowanie tego kryształu protonami dawką $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. W temperaturze 1400°C, przy wygrzewaniu w powietrzu, na powierzchniach czołowych pręta i próbek płasko-równoległych zachodzą zmiany właściwości optycznych kryształu Nd:YAG i zachodzi konieczność ich ponownego polerowania po każdym procesie wygrzewania. Ponadto, w tak wysokiej temperaturze, zmianie ulega również pobocznica pręta, a więc i warunki pompowania lasera.



Rys. 13 Zmiana energii wyjściowej lasera Nd:YAG (pręt wygrzany w atmosferze redukującej i naświetlony kwantami γ dawką 10^5 Gy) dla energii pompy równej 25 J.

Fig. 13. Change in optical output of Nd:YAG laser for pump energy equal to 25 J.

Wygrzanie w temperaturze 400°C w powietrzu kryształu napromieniowanego dawkami kwantów γ do 10^7 Gy , elektronów do 10^{16} cm^{-2} i protonów do 10^{14} cm^{-2} , w pełni likwiduje indukowane przez promieniowanie CB. Pomiary TL, DPA oraz EPR [10] po napromieniowaniu, wskazują na istnienie w kryształach Nd:YAG co najmniej trzech różnych defektów. Defekty te to jony Fe^{3+} i Fe^{2+} , wakanse tlenowe V_o oraz centra typu F i F^+ , będące defektami punktowymi powstającymi w kryształach Nd:YAG w procesie wzrostu.



Rys. 14. Energia wyjściowa lasera Ce, Nd:YAG w porównaniu do Nd:YAG przed (krzywa 1) i po naświetleniu kwantami γ dawką 10^5 Gy (krzywe 2 i 3, odpowiednio).

Fig. 14. Optical output of Ce, Nd:YAG compare to Nd:YAG laser before (curve 1) and after γ -irradiation with a dose of 10^5 Gy (curves 2 and 3, respectively).

DPA pokrywają się z najbardziej intensywnymi pasmami absorpcyjnymi: $^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$, $^4G_{7/2}$, $^2G_{7/2}$ i $^4G_{5/2}$, jednak sprawność lasera Nd:YAG po naświetleniu kwantami γ spada, co może świadczyć o tym, że w kryształach tych mamy do czynienia ze wzrostem strat pasywnych na długości fali generacji [5].

Po kolejnych 50-ciu impulsach lampy działających na pręt napromieniowany kwantami γ dawką 10^5 Gy, energia wyjściowa lasera (pręt chłodzony powietrzem) rośnie do poziomu, wynikającego z termicznej równowagi trzech procesów: nagrzewania pręta impulsami lampy pompującej (absorpcja UV części promieniowania pompy), pobudzenia i generacji oraz chłodzenia pręta powietrzem.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. M. Kaczmarek, A. O. Matkovskii, Z. Mierczyk, K. Kopczyński and D. J. Sugak, *Opto-electronics Review*, No. 3/4 (1995), 74-79
- [2] A. O. Matkovskii, D. J. Sugak, A. N. Durygin, S. M. Kaczmarek, K. Kopczyński, Z. Mierczyk, Z. Frukacz, T. Łukasiewicz and A. P. Shakhov, *Optical Materials*, 6 (1996), 353-358

- [3] M. R. Biedilov, H. B. Bejsembajeva and R. P. Saidov, *Ukr. Fiz. Žurn.*, **26** (1981), 1091
- [4] M. R. Biedilov, H. B. Bejsembajeva and M. S. Sabitov, *Kwant. Elektr.*, **21** (12) (1994), 1145
- [5] T. S. Rose, M. S. Hopkins and R. A. Fields, *IEE Journal of Quantum Electronics*, vol. **31** (9) (1995), 1593
- [6] S. M. Kaczmarek, K. Kopczyński, A. O. Matkovskii, A. Pajączkowska and I. Pracka, *Proc. of SPIE*, vol. **3179**, p. 268
- [7] S. M. Kaczmarek, K. Kopczyński, T. Łukasiewicz, A. N. Durygin and I. M. Solskii, *Proc. of SPIE*, vol. **3179**, p. 263
- [8] A. J. Riabov, V. E. Krickaja and V. M. Sorokin, *Nieorg. Mater.*, **27**(10) (1991), 2172
- [9] J. S. Stelmakh, A. J. Riabov, and G. I. Pirogina, *Nieorg. Mater.*, 28(2) (1992), 400
- [10] J. Sh. Akhmadulin, S. A. Migachev and S. P. Mironov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B65** (1992), 270-274
- [11] M. K. Ashurov, E. V. Zharikov, U. V. Laptiev, *Sov. Phys. Dokl.*, **282**, 1104 (1985) (in Russian)
- [12] A.O.Matkovskii, D. J. Sugak, S. B. Ubizskii, O. I. Shpotiuk, E. A. Chernyi, N. M. Vakiv, V. A. Mokshyckii, Lvov, Svit (1994), (in Russian)
- [13] S. M. Kaczmarek, A.O. Matkovskii, Z. Mierczyk, K.Kopczyński, D. Yu. Sugak, A. N. Durygin and Z. Frukacz, *Acta Phys. Polonica A*, **90**(2), 285 (1996)

RADIATION DEFECTS IN Nd:YAG SINGLE CRYSTALS AND THEIR INFLUENCE ON OPTICAL PROPERTIES AND OPTICAL OUTPUT OF A LASER

Summary

The influence of gamma quanta irradiation (^{60}Co , 1,25MeV) on optical characteristics of Nd:YAG single crystals before and just after their thermal annealing in oxidizing and reduction atmospheres was investigated. For crystals annealed in oxidizing atmosphere the influence of dose both on the type of additional absorption

spectrum and the optical output of a laser was determined. Nd:YAG crystals were also irradiated with protons of 26 MeV energy with a dose up to 10^{16} cm^{-2} and with electrons of 1 MeV energy up to dose of 10^{16} cm^{-2} . AA bands after these types of ionizing radiation have been presented.