レーザーレター

Nd³⁺ : GGG レーザーのモード同期パルス発振特性

吉田 英次*・吉田 国雄*・山中千代衛*

阿部 光明**・藤井 義正**

(1986年 2 月13日 受理)

Mode-Locked Pulse Oscillation Characteristics of
Nd³⁺-Doped Gd₃Ga₅O₁₂ LaserHidetsugu YOSHIDA*, Kunio YOSHIDA*, Chiyoe YAMANAKA*,
Mitsuaki ABE** and Yoshimasa FUJII**

(Received February 13, 1986)

An actively mode-locked Nd:GGG oscillator has been developed. Amplitude stability, pulse width, and single pulse energy are measured with respect to their dependence on modulation depth of the active modulator and Q-switch loss. It exhibits excellent amplitude stability of less than $\pm 3\%$ and high single pulse energy of 90 μJ .

1. はじめに

Nd³⁺を添加した固体レーザー材料としては、Nd:YAG が主として使用されており、電子材料部品の溶接・半田づけ・穴あけ・トリミング・アニール、金属表面の焼入れ、レーザー核融合研究用ターゲット燃料球の加工、等々微細加工技術への応用が盛んである。固体レーザー装置はコンパクトであり、非接触及び微細加工が容易なため電子工業を中心とした方面への応用が広がりつつあり、高出力、高効率、高繰り返しレーザーの出現が期待されている。

ところで、Nd:YAG は活性イオンである Nd イオンの半径 1.12 Å が置換される Y のイオン半径 1.02 Å より大きいことから Nd の偏析係数が約 0.18 と小さく、レーザーロッドの結晶成長軸方向の Nd 濃度差が大きく、Nd 濃度を約 1.3 at.% 以上にすることが困難である。また、結晶の中央部にコアができるために大口径のレーザーロッドを得ることができない。このことから高出力化、高効率化には問題がある。

これに対して、最近 Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG) 結晶が注目をあびるようになってきた。Nd:GGG は、Ga のイオン半径 1.06 Å が Y のイオン半径よ

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘 2-6)

** 住友金属鉱山 (株) 電子材料研究所 (〒198 青梅市未広町 1-6-1)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (Yamada-oka, Suita, Osaka 565)

** Electronics Materials Laboratory Sumitomo Metal Mining CO., LTD.

Table I Physical properties of Nd:YAG and Nd:GGG crystals.

	YAG	GGG
化学式	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$
密度 (g/cm^3)	4.55	7.09
融点 ($^{\circ}\text{C}$)	1950	1750
熱伝導率 ($\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$)	0.12	0.09
発振波長 (nm)	1064	1062
誘導放出断面積 (cm^2)	6×10^{19}	$4.3 \times 10^{19(1)}$
蛍光寿命 (μs)	240 ₍₂₎	200
スペクトル幅 (cm^{-1})	6	8 ₍₃₎
屈折率 (at $1.06 \mu\text{m}$)	1.83	1.95

(1) W. F. Krupke: Opt. Com. 12, 210 (1974)

(2) Laser Program Annual Report 1977, LLNL, UCRL-500 21-77 (1977)

(3) Ref. 2)

り大きく、Ndイオンと置換しやすいため高濃度化 ($\sim 4 \text{ at.}\%$) が可能、コアのない大型結晶 $\sim 60 \text{ mm}$ を製作できる、YAG より高速育成ができる¹⁾ため YAG より安価となる、等の理由から高出力用に適していると推測される。

YAG と GGG との物質的性質を比較すると Table I のようになる。GGG の熱伝導率は、YAG より約 25% 小さいために高繰り返し動作に対しては YAG より劣ると考えられるが、スペクトル幅は YAG より約 33% 広いために YAG より短パルスの発生が可能となる。

Nd³⁺:GGG レーザーの発振実験に関してはノーマル発振特性についての報告²⁻⁴⁾のみで Q スイッチ発振に関する報告はない。本論文では、Nd³⁺:GGG による短パルスレーザー発振特性について述べる。

2. 発振器の構成

Nd:GGG 結晶を用いた強制モード同期発振器の基本構成図を Fig. 1 に示す。GGG 結晶は直径 5 mm、励起長 50 mm で両端面をブルースターカットしてあり、Nd 濃度は 2 at.% である。ロッドは金メッキした単一楕円集光筒の焦点位置に、また他方の焦点位置には内径 4 mm、ア

Fig. 1 Schematic diagram of actively mode-locked and Q-switched oscillator.

ク長 75 mm の Kr アークランプをセットし、ロッドとランプ間には、ロッドのソラリゼーションを防止するために 460 nm 以下の励起光をカットするフィルター (GG 475) を用いた。また、ロッドとランプは水冷した。モード同期方式としては、予備発振を行わせることによって安定なモード同期パルスを発生させることのできる kuizenga 方式⁵⁾を採用した。共振器は光路長が 1.5 m であり、曲率半径 6 m の全反射鏡及び反射率 85% の平面出力鏡で構成した。モード同期素子には、モード同期パルス間隔を 10 ns とし、単一パルス抽出を容易にするため変調周波数 100 MHz の超音波変調器 A.O.M. を、Q スイッチ素子にはポッケルスセル P.C. を用いた。また横モード制御用には直径 2 mm のアパーチャ、パルス幅を広げるための縦モード選択用エタロンには厚さ 5 mm の石英板を用いた。

3. モード同期発振実験

ロッド励起用の Kr アークランプには、多段 LC 回路で発生させた約 4 ms の方形波電流を流し、3.8 ms 経過した時にポッケルスセルの印加電圧を 0 にし、共振器の Q 値を急激に高くしてモード同期発振パルスを発生させた。発振器は、0.5 Hz で動作させた。

Fig. 2 に発振波形の一例を示す。Fig. 2 で (a) は予備発振波形、(b) はモード同期 Q スイッチ波形、(c) は (b) の中央部付近から抽出した単一パルス波形を示す。モード同期 Q スイッチ波形の半値幅は約 350 ns であり、この半値幅及び出力パルスエネルギーはポッケルスセルの印加電圧 (共振器の損失) に依存する。

Fig. 2 The photographs show (a) the prelude waveform, (b) an output pulsetrain and (c) a single selected pulse.

Fig. 3 Amplitude stability of the output pulsetrain for 200 oscillations.

3.1 Qスイッチパルスの安定度

レーザー出力の安定度は、温度変化による共振器筐体や光学素子などの熱膨張による変化、共振器の機械的振動、或いはレーザー光路中の空気のみだれ等に大きく影響される。したがって、共振器は除振台に設置し、且つ空気のみだれないように金属カバーを取りつけた。ロッドとランプは、 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に温度制御した純水で冷却し、部屋の温度変動は 1°C 以下となるように制御した。また、励起用ランプには常に約300 mAのシマー電流を流すことによってパルス動作の安定化を図った。

発振器からのモード同期Qスイッチパルス波形の振幅値を立上り時間60psのバイブラナーホットチューブ (HTV R1328U) と1 GHzのオシロスコープ (Tektronix 7104) によって観測し、安定度を調べた。Fig. 3に実験結果を示す。発振パルスの振幅値変動は、2秒間隔での200回動作の場合に最大変動 $\pm 3\%$ であり、発振確率は100%であった。この安定度は、同一発振器を用いたNd:YAGによるモード同期発振の実験結果と同じであった。また、アバランシェトランジスターで駆動されるポッケルスセルと誘電体薄膜偏光子から構成されたパルス抽出器によって抽出された単一パルスの振幅安定度の測定結果をFig. 4に示す。これは50回の重ね撮りをしたもので、振幅安定度は $\pm 2\%$ 以下であった。

Fig. 4 Amplitude stability of single selected pulse.

Fig. 5 The relation between the modulation depth vs. pulsedwidth.

3.2 パルス幅制御

モード同期発振器の共振器中にエタロン板と超音波変調器を使った場合、発振器からの出力レーザー光のパルス幅は、超音波変調器の変調度とエタロン板の厚さを変化させることで制御できる⁵⁾。超音波変調器の変調度とパルス幅との関係をFig. 5に示す。共振器内にエタロン板を挿入しない場合は、パルス幅は変調度を変えることによって130～300 ps、厚さ5 mmの石英板で製作したエタロンを挿入したところ400 ps～1.1 nsのパルス幅が安定に得られた。なお、パルス幅はストリークカメラ IMACON 675 で測定した。

本実験で130 ps以下の短パルスが発生できない

Fig. 6 Typical pulse energies in a single pulse selected at the peak of the pulsetrain

かったが、これは超音波変調器が空冷のため変調度が十分に深くできなかったこと、Qスイッチ素子として使用したポッケルスセルのエタロン効果などが原因であると考えられる。

3.3 単一パルスエネルギー

モード同期発振器の出力パルス列の中央部付近から3.1で述べたパルス抽出器によって単一パルス（パルス幅130 ps）を抽出し、Qスイッチ損失に対する単一パルスエネルギーの関係を測定した。実験結果をFig. 6に示す。KD*Pを用いたポッケルスセルの $\lambda/4$ 電圧は、直流電圧印加で動作させる場合に1.6 kVであり、この $\lambda/4$ 電圧に対する印加電圧の割合（Qスイッチ損失に相当）を25%～35%の範囲で変化したところ、単一パルスエネルギーは40～90 μJ となった。このエネルギー値は、Nd:YAGを用いてモード同期発振器で得た値とほぼ同じであった。

なお、Qスイッチ損失を35%とした時には、

単一パルスエネルギーは90 μ Jとなったが、この場合は、共振器内の高反射ミラーが損傷を受けやすくなる。したがって、共振器内の光学素子のレーザー損傷を考慮すると、単一パルスエネルギー値が50 μ J以下となるようにQスイッチ損失を設定した方がよい。

4. まとめ

Nd:GGG レーザーを用いたモード同期発振器を開発し、パルス発振特性を測定したところ、Nd:YAGとほぼ同等の性能が得られた。発振特性をまとめると次のようになる。

- (1) 準CW 励起Nd:GGG モード同期レーザーからのQスイッチパルス波形の振幅値安定度は $\pm 3\%$ であった。
- (2) 発振出力パルスのパルス幅は、共振器内に厚さ5mmのエタロン板を挿入し、超音波変調器の変調度を変化させることによって130 ps $\sim$ 1.1 ns まで安定に発生できた。

- (3) ランプ励起用に SCR 制御の多段 LC 回路を採用することにより、パルス幅130 ps で最大90 μ Jの単一パルスエネルギーを得た。

Nd:GGG レーザーでは、励起用フラッシュランプの紫外光によるソラリゼーション現象が重要な問題である。現状では紫外光吸収フィルターを用いているが、GGG の冷却水として紫外光吸収溶液を用いるか、或いは GGG 結晶中にソラリゼーションを防止する元素を混入する事が必要となる。

参 考 文 献

- 1) 海野, 他: 第44回応物學術講演会予稿集 (1983) 570.
- 2) J. Geusic, H. M. Marcos and L. G. Van Uitert: Appl. Phys. Lett. **4** (1984) 182.
- 3) 本田, 他: 第27回応物関係連合講演会予稿集 (1980) 215.
- 4) 本田, 他: 第41回応物學術講演会予稿集 (1980) 220.
- 5) D. J. Kuizenga: Opt. Com. **22** (1977) 156.