

可視域レーザ用可飽和吸収体の探査と受動 Q スイッチ Pr³⁺:YLF レーザ

Exploration of Saturable Absorber to Generate the Q-switched and Mode-locked Pulses in Visible Region and Passively Q-switched Pr³⁺:YLF Laser with Cr⁴⁺:YAG Saturable Absorber

阿部 亮(M1), 小城 絢一郎(D3)

Ryo Abe and Junichiro Kojou

Abstract

We explore saturable absorber to generate the Q-switched and mode-locked laser pulses in the visible region using Pr³⁺ laser. We experimentally prove that a Cr⁴⁺:YAG crystal exhibits saturable absorption in 639, 607, and 521 nm. We demonstrate repetitive Q-switches of a continuously diode-laser pumped Pr³⁺-doped crystal using the Cr⁴⁺:YAG saturable absorber at visible wavelengths for the first time.

1. はじめに

近年、ディスプレイ、医療、バイオイメージングといった多岐にわたる分野で可視光域の波長で短いパルス幅を持った全固体レーザが注目されている。Pr³⁺をドープしたフッ化物材料は、青色から赤色にかけて多数の光学遷移があり、InGaN 系半導体レーザにより直接励起が可能である。Pr³⁺:YLF レーザでは、緑、オレンジ、赤色帯でのレーザ発振がスロープ効率 35-50 % で実現され、励起用 InGaN-LD の高出力に伴いレーザ出力はサブワット級に向上している。これまで我々は Pr³⁺:YLF レーザの音響光学素子を用いた Q スイッチ動作と 2 倍波発生を基本波長 639 nm においてすでに実現している[1].

可視域における受動 Q スイッチ動作には、可飽和吸収体が必要である。これまで用いられてきた可飽和吸収体の例として、色素、SESAM, Cr⁴⁺:YAG, 半導体微粒子含有ガラス、グラフェンやカーボンナ

ノチューブが挙げられるが、可視域で用いられたのは、Ar イオンレーザ励起レーザにおいて半導体微粒子含有有色ガラスフィルタがモード同期に用いられた報告のみである。

今回、Cr⁴⁺イオンの吸収遷移(Fig.1) [2]に着目し、赤色、オレンジ色においても可飽和吸収特性が存在することをはじめて明らかにし、波長 639 nm, 607 nm での受動 Q スイッチ動作にも成功した。レーザ実験に先立ち、Cr⁴⁺:YAG 結晶の可飽和吸収特性を Pr³⁺:YLF レーザパルスを用いた Z-scan 計測で検証を行った。吸収遷移は、1 μm 帯の可飽和吸収に用いられる ³B₁(³A₂)→³A₂(³T₁)ではなく、³B₁(³A₂)→³E(³T₁)の寄与となる。また、半導体微粒子含有有色ガラスフィルタによる赤色 Q スイッチレーザについても報告する。

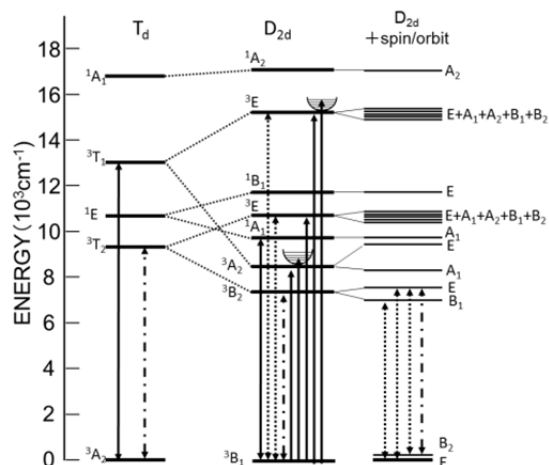


Fig.1 Energy level diagram of Cr⁴⁺ ions residing in the tetrahedrally coordinated D site of YAG [2]

2. 実験および結果

A. 可飽和吸収特性計測実験および結果

受動 Q スイッチレーザ発振実験に先立ち、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 結晶の可飽和吸収特性を $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザパルスを用いた Z-scan 計測で検証を行った。Fig.2 に Z-scan 法による $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 結晶の可飽和吸収特性計測の実験セットアップを示す。

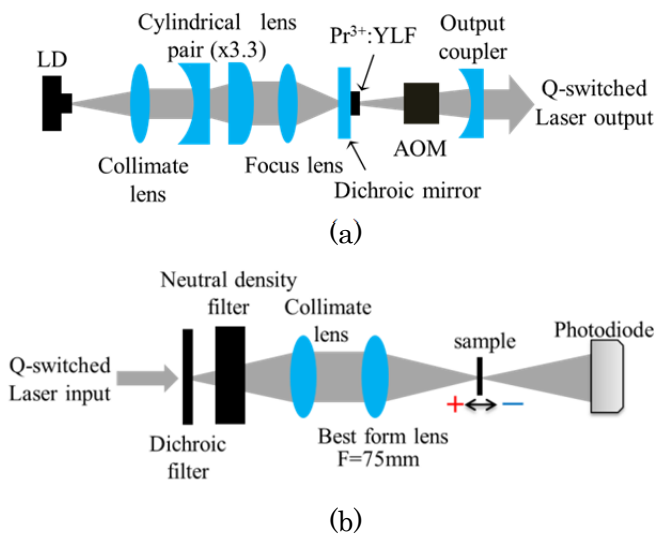


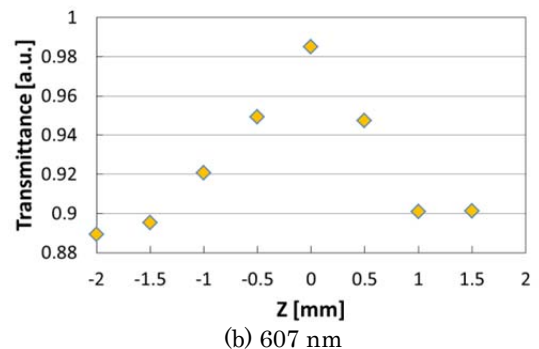
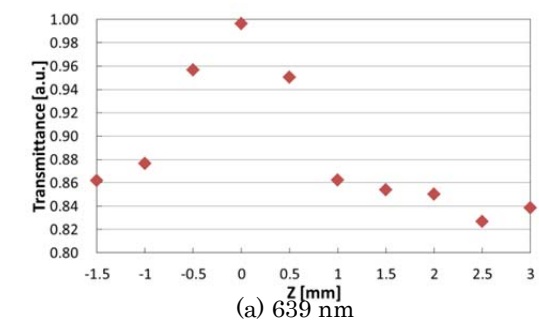
Fig.2 Experimental set up of Z-scan method

(a): The laser source, an actively Q-switched $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ laser (b): The Z-scan experimental apparatus

Z-scan 法で用いたレーザのポンプ光は最大出力パワー 1 W, 発振波長 444~447nm の InGaN 系半導体レーザである。半導体レーザの水平方向の広がり角は 12.3° , 垂直方向の広がり角は 40.9° である。ペルチェ素子による温度コントロールを行い、水冷により動作させている。レーザ結晶は結晶長 3.7mm, プラセオジウムを 0.5at.% ドープ, C 軸と並行にカットされた YLF 結晶を使用している。 π 偏光で励起したときの吸収率は約 90% である。結晶に AR コートを施している。励起源の InGaN 系半導体レーザ光を非球面レンズ $f=4.6\text{mm}$ でコリメートし, シリンドリカルレンズ対 $f=-30\text{mm}, f=100$

でビームシェイプを行った後, $f=50\text{mm}$ のレンズで結晶に集光し照射した。共振器は M1 平面鏡

($\text{HR}>99.7\% @ 639\text{nm}$) と M2 ($R=90\% @ 639\text{nm}$) 曲率半径 $R=75\text{mm}$ の凹面鏡を用いた。共振器の中に音響光学素子を挿入した。能動 Q スイッチ $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザは, 繰り返し周波数 11.1 kHz. (パルス幅: 639, 607 nm は 25 ns, 521 nm は 130 ns) である。出射されたレーザのエネルギーは ND 可変フィルタによって調整を行っている。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ は, 88% の透過率である ($@633\text{nm}$). 厚さは 1.323 mm, 結晶軸は (1 0 0), 直径 4 mm であり BBAR コート (600~640nm) を施してある。サンプルに照射したレーザエネルギー, および, 焦点でのエネルギーは, それぞれ 639 nm : 照射レーザエネルギー $3.60\ \mu\text{J}$ (焦点フルエンス $24.7\ \text{J}/\text{cm}^2$), 607 nm : $1.32\ \mu\text{J}$ ($9.96\ \text{J}/\text{cm}^2$), 521 nm : $0.41\ \mu\text{J}$ ($4.26\ \text{J}/\text{cm}^2$) である。得られた結果を Fig. 3 に示す。縦軸は透過率変化を示す。ここでは, 639, 607, and 521 nm においての可飽和吸収特性が示されている。また, 波長 639nm での $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 非線形透過率の振る舞いを示す (Fig. 4)。



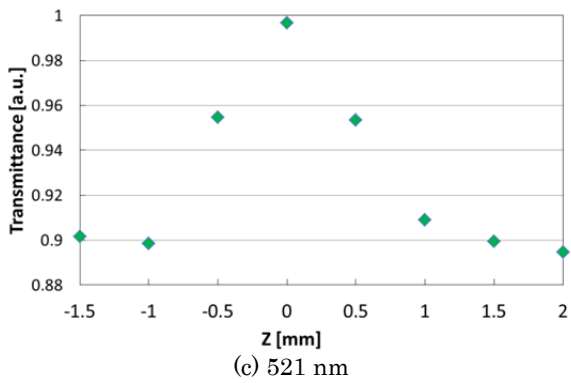


Fig. 3 Plots of z-scan measurements at 639, 607 and 521 nm using actively Q-switched Pr³⁺:YLF laser pulses.

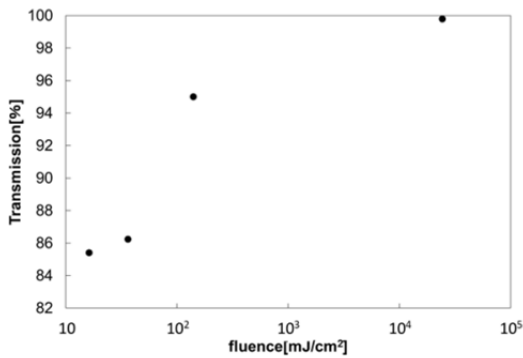


Fig.4 Nonlinear transmission behaviors of monoCr⁴⁺:YAG crystal at 639 nm.

また、Cr⁴⁺:YAG の励起状態の緩和寿命計測を行った。実験セットアップを Fig.5 に示す。用いた AOQ-Pr:YLF レーザは、波長 639 nm、FWHM=55.0 ns.パルスあたりのエネルギー 4.20 μJ/pulse (繰り返し周波数: 10.0 kHz) である。

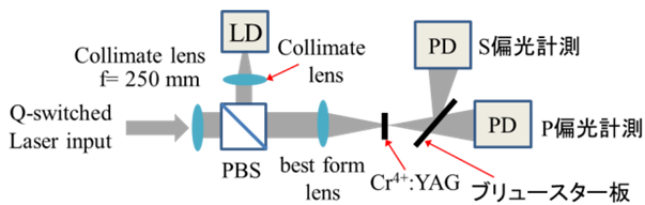
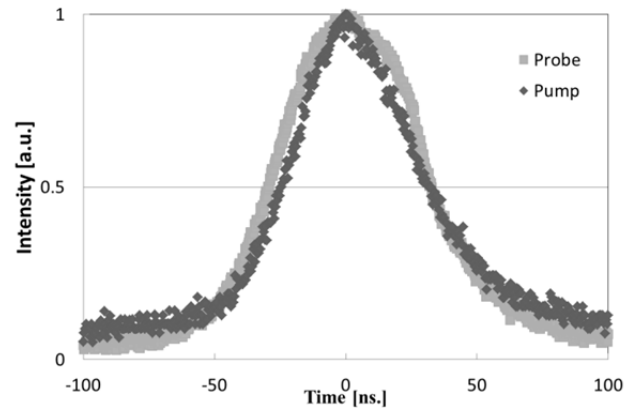
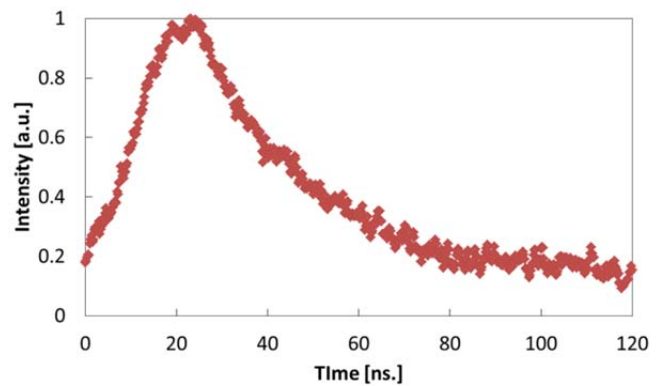


Fig.5 Experimental set-up of excited-state lifetime at 639 nm



(a)



(b)

Fig.6 The result of excited-state lifetime at 639 nm,

(a): Pump laser pulse and probe laser pulse

(b):(a)Excited-state lifetime at 639 nm

以上より、波長 639 nm における Cr⁴⁺:YAG の励起状態の緩和寿命は 31.0 ns となる。また、Z-scan 法によって求めた飽和エネルギーによって飽和強度が求められ、Cr⁴⁺:YAG の飽和エネルギーは 0.68 J/cm² となった。

B.受動 Q スイッチ実験および結果

Fig.2 の下部で示した Z-scan 法にて用いたレーザの AOM を取り除き、アウトプット側のダイクロイックミラーを T=4%のミラー(R=75 mm)を用い、YLF 結晶と出力鏡の間に Cr⁴⁺:YAG を配置した (Fig.7). Q スイッチングされたパルスはデジタルオシロスコープと高速フォトダイオード(立ち上がり

時間<10 ns.) によって計測を行った. 得られた結果を Fig.8 に示す.

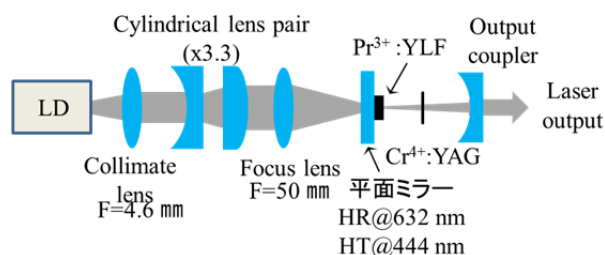


Fig.7 Experimental set-up of passively Q-switched Pr:YLF Laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber

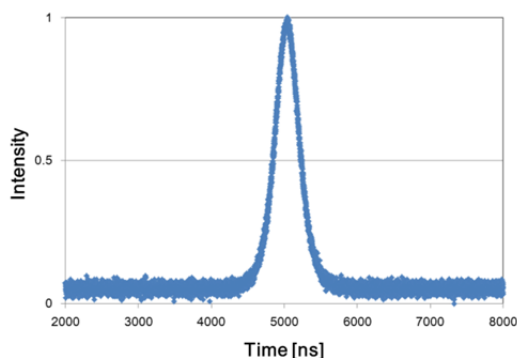


Fig.8 Result of passively Q-switched Pr³⁺:YLF laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber at 639 nm

639 nm での受動 Q スイッチレーザは励起吸収パワー 789 mW において, パルス幅(FWHM) 389 ns, パルスエネルギー 58.0 nJ, 繰り返し周波数 176 kHz, 平均パワー 9 mW, ピークパワー 219 mW の出力が得られた. 励起吸収パワーの発振閾値は 702 mW であり, Cr⁴⁺:YAG を挿入しない場合に比べて 499 mW 増加する. 607 nm での受動 Q スイッチレーザは, パルス幅(FWHM) 1800 ns, パルスエネルギー 24.0 nJ, 繰り返し周波数 105 kHz, 平均パワー 3mW の出力が得られた.

さらに, 半導体含有色ガラスを用いた受動 Q スイッチレーザの発振実験を行った. 実験セットアップは Fig.7 の Cr⁴⁺:YAG の位置に半導体含有色ガラスを挿入した. 発振した受動 Q スイッチレーザは励

起吸収パワー 787 mW において, パルス幅(FWHM) 900 ns, パルスエネルギー 0.13 μJ, 繰り返し周波数 500kHz, 平均パワー 67 mW, ピークパワー 164 mW の出力が得られた. 励起吸収パワーの発振閾値は 850mW であり, Cr⁴⁺:YAG を挿入しない場合に比べて 647 mW 増加する.

3. まとめ

これまで波長 900 nm 以上でしか用いられて来なかった Cr⁴⁺イオンの吸収遷移に着目し, 赤色, オレンジ色, 緑色においても可飽和吸収特性が存在することをはじめて明らかにした. また, 可飽和吸収体を用い, 波長 639 nm, 607 nm での受動 Q スイッチ動作にも成功した. 波長 639 nm での Cr⁴⁺:YAG 緩和寿命速度, 飽和エネルギーの計測を行った. また, 波長 639 nm での半導体微粒子含有色ガラスフィルタによる赤色 Q スイッチレーザも成功した.

References

- [1] J. Kojou, Applied Optics vol.51 (2012)
- [2] R. Feldman, Optical Materials 24, (2003).