

# Cr<sup>4+</sup>ドープ Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> を可飽和吸収体として用いた受動 Q スイッチ 及び Q スイッチモードロック 639-nm Pr<sup>3+</sup>ドープ LiYF<sub>4</sub> レーザ

## Cr<sup>4+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> as a Saturable Absorber for a Q-Switched and Mode-Locked 639-nm Pr<sup>3+</sup>-doped LiYF<sub>4</sub> laser

阿部 亮(M2),小城 絢一郎(共研),舩田 賢輔(B4),桜井 暁(B4)

Ryo Abe, Junichiro Kojou, Kensuke Masuda, Akira Sakurai

### Abstract

We experimentally prove that a Cr<sup>4+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) crystal exhibits saturable absorption in visible wavelengths at 639, 607, and 521 nm. From z-scan measurements, the saturation energies measured using laser pulse widths of 25 and 66 ns at 639 nm are estimated to ~11.5 and 21.2 mJ/cm<sup>2</sup>, respectively. Therefore, the absorption response time will be shorter than these pulse widths. Using the Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber, we demonstrate for the first time, to the best of our knowledge, the passive Q-switched and the Q-switched mode-lock Pr<sup>3+</sup>-doped LiYF<sub>4</sub> (YLF) lasers at 639 nm pumped by an InGaN diode laser.

### 1. はじめに

Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶は優れた可飽和吸収体である。光学的、熱的、機械的に優れた特性を持ち、1- $\mu$ m 帯において受動 Q スイッチ・モードロックパルスレーザーを発振させる媒質としてとても有益である。我々は、これまで 946 nm までしか用いられて来なかった Cr<sup>4+</sup>イオンの吸収遷移に着目した。吸収遷移は、1- $\mu$ m 帯において用いられる  $^3B_1(^3A_2) \rightarrow ^3A_2(^3T_1)$ ではなく、 $^3B_1(^3A_2) \rightarrow ^3E(^3T_1)$ の寄与となる[1]。この赤色における波長帯での吸収遷移や可飽和吸収特性を用いたレーザーは示されてこなかった。

Pr<sup>3+</sup>をドープしたフッ化物材料は、可視域にかけて多くの光学遷移があり、InGaN 系半導体レーザーにより直接励起が可能である[2]。すでに、Pr<sup>3+</sup>:YLF 結晶を用いて 720, 697, 640, 607, 522 nm の波長帯におけるレーザー発振実現し、スローブ効率 35-50 %で達成されている [3-6]。同様に、Pr<sup>3+</sup>ドープフッ化物ファイバも可視域の多くの波長帯において実現されている[7]。一方で、可視波長帯域における受動 Q スイッチレーザーは強く求められている。我々は、受動 Q スイッチレーザー実験に先立ち、Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶の可飽和吸収特性を Pr<sup>3+</sup>:YLF レーザーパルスを用いた z-scan 法によって 639, 607 および 521 nm において可飽和吸収特性を初めて示した。その後、Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶を用いた Q スイッチモードロック 639-nm Pr<sup>3+</sup>:YLF レーザを初めて実現した。

### 2. 実験 1 : Z-scan 法

実験に用いた Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶(Scientific Materials Inc.製)は、直径 4 mm 厚さ 1.3 mm で AR コートを 600-640 nm の帯域において施している。線形透過率は 633 nm において 88.5%である。計測に用いたレーザーは音響光学素子を用いた Q スイッチ Pr<sup>3+</sup>:YLF レーザである[7]。波長は、639, 607, 522 nm であり、半値全幅(FWHM)はそれぞれ 26, 25, 130 ns である(パルスエネルギーは、3.6, 1.3, 0.41  $\mu$ J)。それぞれの繰り返し周波数は、11 kHz となっている。波長 639 nm における集光点でのスポット径は ABCD 行列における計算を行ったところ 10.2  $\mu$ m であり、この時の M<sup>2</sup> は~2.5 となっている。焦点では、

639, 607, 522 nm はそれぞれ 93, 37, and 16 mJ/cm<sup>2</sup> となっている. ここから、それぞれの波長から飽和吸収が 3 つの波長帯において確認できた. さらに 639 nm の波長において.FWHM を 66 ns 及び 25 ns に変化させて計測を行ったところ 21.2 と 11.5 mJ/cm<sup>2</sup> となり飽和エネルギーが異なる結果を得た(Fig. 1). 1 μm の波長帯において、基底準位吸収断面積( $\sigma$ )は、 $3.6 \times 10^{-19}$  から  $5 \times 10^{-18}$  cm<sup>2</sup>. と報告されている[8]. パルス幅によって飽和エネルギーが異なるのは、ピークパワーに依存するため上準位寿命が短いことを示唆し、<sup>3</sup>E(<sup>3</sup>T<sub>1</sub>)から中間準位への速い緩和と比較的速い中間準位寿命が予想される.

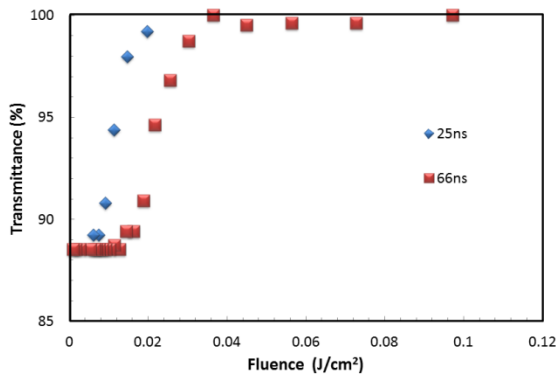


Fig. 1 Plots of transmittance of a Cr<sub>4+</sub>:YAG crystal as a function of laser fluence at crystal center in z-scan measurement. Laser pulse widths are 25 and 66 ns for triangle and circle plots, respectively.

### 3. 実験 2 : ポンププローブ法

ポンププローブ法により上準位寿命の中間準位への速い緩和と比較的速い中間準位寿命を計測した(Fig.2). 実験に用いたポンプ光は FWHM 20 ns, パルスエネルギー 3.90 mJ, 焦点において 101 mJ/cm<sup>2</sup> となり、繰り返し周波数は 7.7 kHz である. 以下に実験系を示す. 結果を以下に示す(Fig.3). これより、時定数を求めた. 51 ns. 268ns. となり、<sup>3</sup>E(<sup>3</sup>T<sub>1</sub>) 準位か

ら中間準位への速い緩和と比較的速い中間準位寿命が得られた.

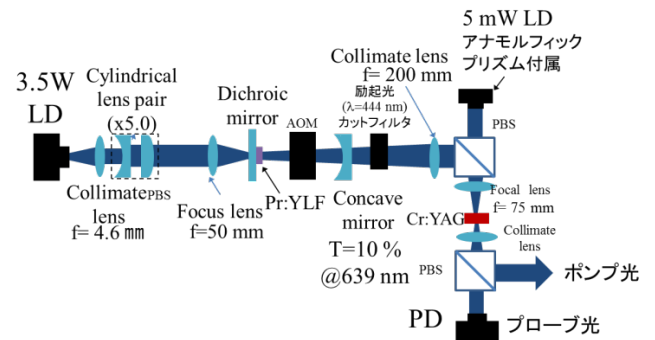


Fig. 2 Schematic of experimental setup of pump-probe method

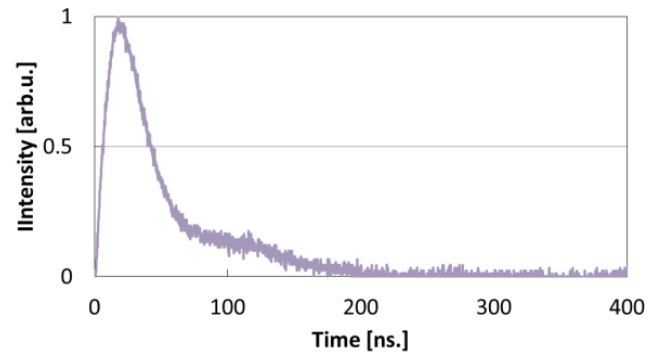


Fig. 3 Result of response time of a Cr<sub>4+</sub>:YAG crystal at 639 nm

### 4. 実験 3 : Q スイッチ及び Q スイッチモードロックレーザ実験

受動 Q スイッチ実験では V 字共振器を構成し 2 つの 3.5 W InGaN LD(日亜化学社製, 出力波長 444 nm)を用い、PBS による重畳励起を 3.7-mm の Pr<sup>3+</sup>:YLF 結晶(Pr<sup>3+</sup> 0.5 at.%)に対し行った.LD の M<sup>2</sup>は 1.50(fast axis) x 13.0(slow axis)である. それぞれ f=3.1 mm のレンズでコリメートし、f=100 mm と 20 mm のシリンドリカルレンズを用いて f=75 mm のレンズで集光した. 入射側に HR(>99.7% at 639-nm)平面鏡を使用した. 折り返し鏡は HR(>99.7% at 639-nm)凹面鏡を折り返し角

40° に設置し、出力鏡は 639-nm において透過率 T=10 %の凹面鏡を使用した。

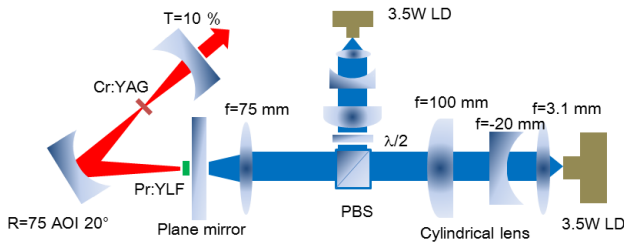


Fig. 4 Schematic of experimental setup of passive Q-switch and Q-switched mode-lock Pr<sup>3+</sup>:YLF laser.

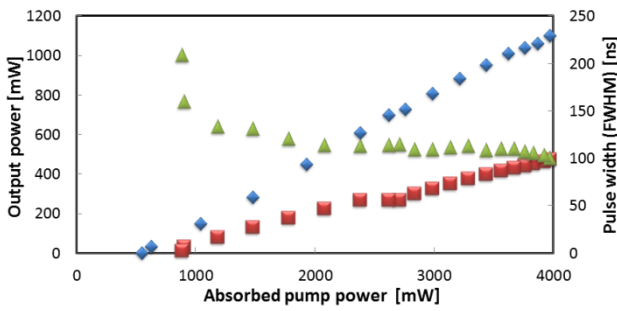


Figure 5 Plots of the output power of the Q-switched laser at 639 nm as a function of absorbed pump power.

共振器におけるビーム径は Pr<sup>3+</sup>:YLF 結晶, Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶においてそれぞれ ~28 x 66, ~41 x 92 μm である. 共振器長は, 225 mm となり, ポンプ光のビーム径は 6.6 x 14 μm である. モードマッチング効率は, η<sub>m</sub> ~ 75.5% である. 受動 Q スイッチ実験に用いた Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶は, z-scan にて用いた初期透過率 88.5% のものと同一のものである. 吸収パワー 4 W の時, 最大で平均パワー 475 mW 出力が得られた. この時のスロープ効率は, ~15% である. 繰り返し周波数は 120 kHz となり, 励起吸収パワーを高くなるに従い大きくなった. Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶を共振器内から除いた時の cw 出力 1.1 W となりスロープ効率は ~33% であった. また, Q スイッチモードロックレーザーは, 励起吸収パワーが ~2.2 W 大きい時に得られ

る.

Q スイッチモードロックレーザーパルスは高速フォトダイオード (40 GHz) 及びアナログオシロスコープ (1 GHz) で計測した.

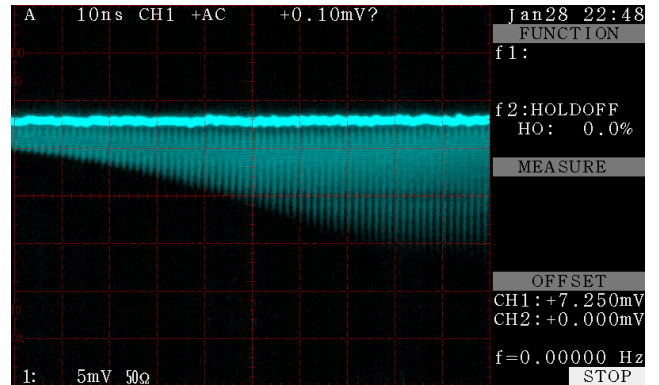


Fig. 7 Enlarged time history of Q-switched mode-lock laser pulses (reversed) measured with a fast photodiode (40 GHz) at an absorbed pump power of 4 W.

パルスの繰り返し周波数は, 667 MHz となる. これは, 共振器長に一致したものである. また, スペクトルは CW の時と比較した時 0.32 nm 拡大した.

## 5. まとめ

中間準位が存在するという可能性を示唆し, Cr<sup>4+</sup>:YAG 結晶を可飽和吸収体として用いることによって受動 Q スイッチ及び Q スイッチモードロックレーザーを得ることに成功した. 今後は, 緑色での実験を試みる.

## References

- [1] R. Feldman, Y. Shimony, and Z. Burshtein: *Opt. Mater.* **24** (2003) 333.
- [2] T. Sandrock, T. Danger, E. Heumann, G. Huber, and B. H. T. Chai, *App. Phys. B* **58** (1994) 149-151.
- [3] A. Richter, N. Pavel, E. Heumann, G. Huber, D. Parisi, A. Toncelli, M. Tonelli, A. Diening, and W. Seelert, *Opt. Express* **14** (2006)

3282-3287.

- [4] K. Hashimoto and F. Kannari, *Opt. Lett.* **32** (2007) 2493-2495.
- [5] N. O. Hansen, A. R. Bellancourt, U. Weichmann, and G. Huber: *Appl. Opt.* **49** (2010) 3864.
- [6] T. Gu'n, P. Metz, and G. Huber: *Opt. Lett.* **36** (2011) 1002.
- [7] J. Kojou, Y. Watanabe, H. Nemoto, F. Kannari *Applied Optics* vol. **51** (2012)
- [8] G. Xiao, J. H. Lim, S. Yang, E. V. Stryland, M. Bass, and L. Weichman: *IEEE J. Quantum Electron.* **35** (1999) 1086.