

Cr:YAG可飽和吸収体を用いた受動Q-スイッチPr:YLFレーザーの理論解析

Modeling of passively Q-switched Pr:YLF laser using a Cr:YAG saturable absorber

舩田 賢輔(B4)

Kensuke Masuda

Abstract

We demonstrated pulse laser operation of a 3.7mm-long Pr³⁺:YLF doped laser at 639nm wavelength pumped by InGaN laser diodes (444 nm) using a Cr:YAG saturable absorber[1]. We modeled the passively-Q-switched Pr:YLF laser and fitted to the experimental results. We estimated Cr:YAG ground-state absorption cross section at $5.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ and excited-state absorption cross section at $4.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. We optimized the laser setup on output coupler, Cr:YAG initial transmittance and cavity length on the model.

1. はじめに

可視光レーザーはディスプレイ、バイオイメージング、フォトプリンティングといった分野で重要な技術として注目されている。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系半導体レーザーにより直接励起が可能である。Pr³⁺:YLFレーザーでは、レッド、オレンジ、グリーン帯域でのCW発振および、AOMによるQスイッチ動作とSHGの発生に成功している。[2]本研究では、Cr:YAG可飽和吸収体の可視域におけるQスイッチ動作が初めて成功したことを受け[1]、Cr:YAG可飽和吸収体を用いた受動Qスイッチ

Pr:YLFレーザーを理論モデル化し、時間解析を行うことで可視域におけるCr:YAGの吸収断面積を推定するとともに、レーザー装置の最適化を検討する。また波長522nm帯でのQスイッチ動作を検討する。

2. 実験：受動Qスイッチ実験

結晶厚3.7mm、濃度0.5atm.%のPr:YLFを使用した。Fig.1にPr:YLFレーザー受動Qスイッチ実験のセットアップを示す。励起源は最大出力3.5WのInGaN LD(Nichia Co.)2台をPBSを用いて重畳しPr:YLFに入射した。ビームクオリティはそれぞれ $M^2=1.50$ (接合面に対し垂直)、 13.0 (接合面に対し平行)であった。励起レーザーを $f=3.1\text{mm}$ のレンズでコリメートし、 $f=100\text{mm}$ と 20mm のシリンドリカルレンズを用いて $f=75\text{mm}$ のレンズで集光した。その時のスポット径を計測するために焦点距離の長い $f=200\text{mm}$ のレンズで絞り、CMOSイメージセンサでビーム径を計測しその値を用いて $f=75\text{mm}$ で集光した時のビーム径を換算した。その結果ビーム径は水平方向に $19.7\mu\text{m}$ 、鉛直方向に $10.5\mu\text{m}$ となった。入射側に639nmHRミラーを使用した。折り返し鏡は639nmHRミラーを折り返し角 40° に設置し、出力鏡は透過率 $T=4\%$ ミラーを使用した。その結果、最大平均パワー219mW、最短パルス幅105ns、最高繰り返し周波数151kHz、最大ピークパワー15Wを達成した。

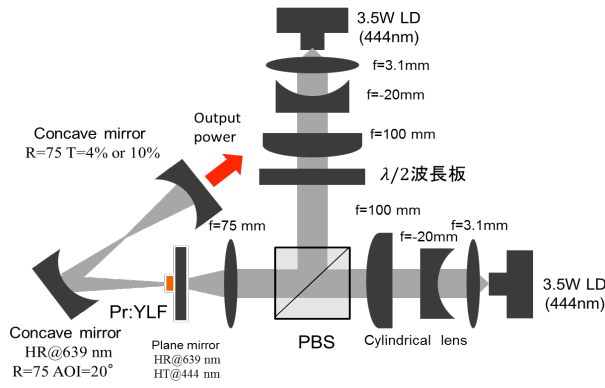


Fig.1 Experimental setups of passively-Q-switched Pr:YLF laser

励起出力を大きくすると Fig.2 に示すような Q スイッチモード同期が発生した。測定フォトダイオードは 300MHz、測定オシロスコープは 1GHz のものを使用した。このことから Cr:YAG のエネルギー準位は Fig.3 に示すような中間準位での吸収を経由する遷移をとることが推測された。

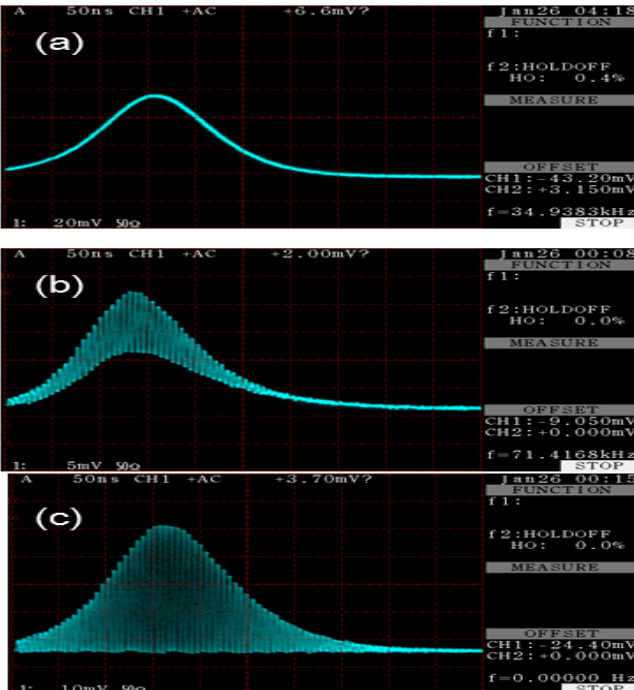


Fig.2 Q-switched mode-lock pulse (a:吸収パワー1.3 W、b:同 2 W、c:同 4 W)

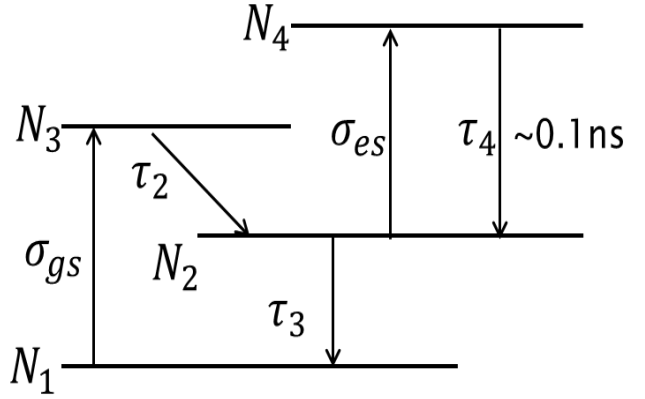


Fig.3 Estimated Cr:YAG energy level diagram

3. 受動 Q スイッチモデリング

以下に Cr:YAG を用いた受動 Q スイッチ Pr:YLF レーザの理論モデルを示す。

共振器内光子密度

$$\frac{d\phi}{dt} = \left\{ \frac{c\sigma_{st}l}{l_c}(N_u - N_l) - \gamma \frac{c\sigma_{gs}l_s}{l_c} \left(N_1 + \frac{\sigma_{es}}{\sigma_{gs}} N_2 - N_3 \right) - \frac{c}{2l_c} \left(\ln \frac{1}{R} + L \right) \right\} \phi + \xi \frac{N_u}{\tau_f}$$

レーザー上準位分布密度

$$\frac{dN_u}{dt} = \left(-c\sigma_{st}\phi - \frac{1}{\tau_f} \right) N_u + \frac{N_g}{N_{g0}} \frac{\eta P_{in}}{h\nu}$$

レーザー下準位分布密度

$$\frac{dN_l}{dt} = \left(c\sigma_{st}\phi + \frac{1}{\tau_f} \right) N_u - \frac{N_l}{\tau_l}$$

レーザー基底準位分布密度

$$\frac{dN_g}{dt} = -\frac{N_g}{N_{g0}} \frac{\eta P_{in}}{h\nu} + \frac{N_l}{\tau_l}$$

可飽和吸収体基底準位分布密度

$$\frac{dN_1}{dt} = -c\sigma_{gs}(N_1 - N_3)\phi + \frac{N_2}{\tau_3}$$

可飽和吸収体中間準位分布密度

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_2} - \frac{N_2}{\tau_3} - \gamma c\sigma_{es}N_2\phi + \frac{N_4}{\tau_4}$$

可飽和吸収体基底準位吸収励起準位分布密度

$$\frac{dN_3}{dt} = \gamma\sigma_{gs}(N_1 - N_3)\phi - \frac{N_3}{\tau_2}$$

可飽和吸収体中間準位吸収励起準位分布密度

$$\frac{dN_4}{dt} = \gamma\sigma_{es}N_2\phi - \frac{N_4}{\tau_4}$$

このモデルで用いたパラメータは以下のとおりである。

c :光速 $3.0 \times 10^{10} \text{ cm}$, σ_{st} :Pr:YLF 誘導放出断面積 $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ (波長 639 nm), l :Pr:YLF 結晶長 0.37 cm , Pr:YLF 誘導放出断面積 $0.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ (波長 522 nm)
 lc :共振器長 22.5 cm , ls :Cr:YAG 結晶長 0.13 cm , τ_f :Pr:YLF 蛍光寿命 $3.6 \times 10^{-5} \text{ s}$, σ_{gs} :Cr:YAG 基底準位吸収断面積, σ_{es} :Cr:YAG 励起準位吸収断面積, R :出力鏡反射率, L :共振器内部損失 0.04 , ξ :自然放出からの寄与 $2.8 \times 10^{-5} \eta$:原子量子効率 $444/639$, P_{in} :LD 入射パワー/励起モード体積, h :プランク定数, ν :LD 周波数
 N_{g0} :Pr:YLF 初期基底準位分布 $7.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, τ_l :Pr:YLF 下準位寿命 0.1 ns , τ_2 :Cr:YAG 基底準位吸収励起準位寿命 3.4 ns , τ_3 :Cr:YAG 中間準位寿命 0.1 ns , τ_4 :励起準位吸収励起準位寿命 0.1 ns , γ :Pr:YLF と Cr:YAG のスポットサイズ比 0.49

このモデルを用いて、Cr:YAG 基底準位吸収断面積 σ_{gs} 並びに Cr:YAG 励起準位吸収断面積 σ_{es} を実験結果に近くなるように見積もった結果、 σ_{gs} と σ_{es} をそれぞれ $5.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 、 $4.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ としたとき実験結果と最も近づいた。Fig.4, Fig.5, Fig.6 に実験結果とシミュレーション結果の比較を示す。それぞれ緑が実験結果、赤のプロットがシミュレーション結果である。パルス幅が若干実験結果よりも短いものの、繰り返し周波数とピークパワーはシミュレーションと実験でよく一致している。

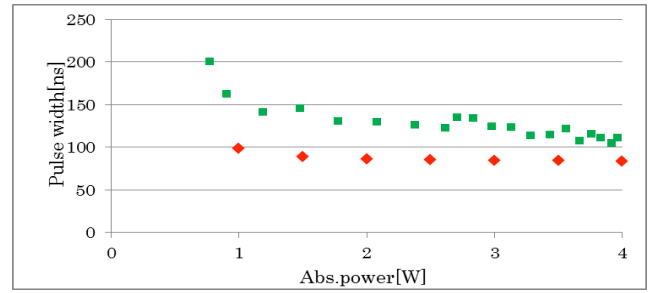


Fig.4 Plots of pulse width of experimental results and simulation

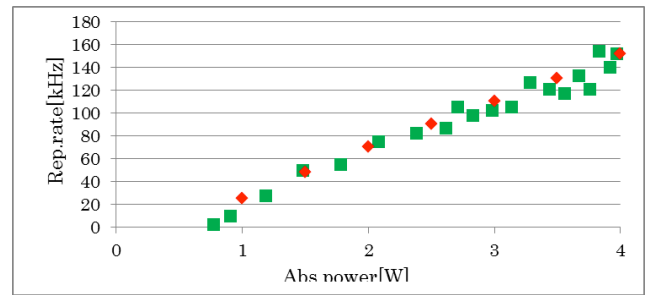


Fig.5 Plots of repetition rate of experimental results and simulation

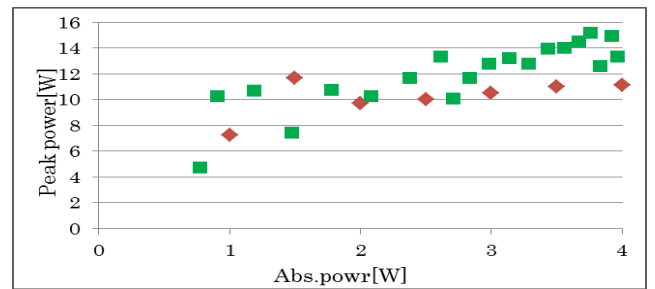


Fig.6 Plots of peak power of experimental results and simulation

4. 最適化と緑色 Q スイッチ動作の検討

出力鏡、Cr:YAG 初期透過率、共振器長についてモデル上で最適化を検討した。結果を Fig.7, Fig.8, Fig.9 に示す。吸収パワーを 4 W としたとき、取り出し鏡透過率 4% , Cr:YAG 初期透過率 61% , 共振器長 7.5 cm としたとき最大のピークパワーを得られると推測した。

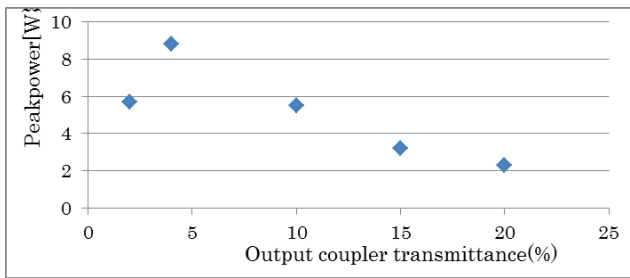


Fig.7 Plots of peak power with different output coupler transmittance

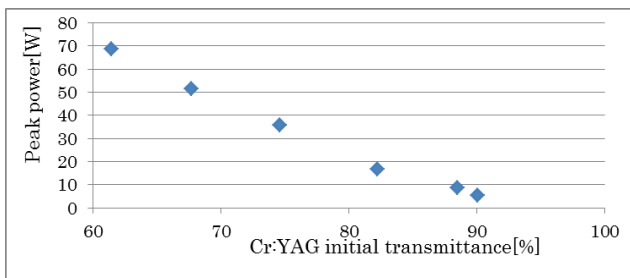


Fig.8 Plots of peak power with different Cr:YAG initial transmittance

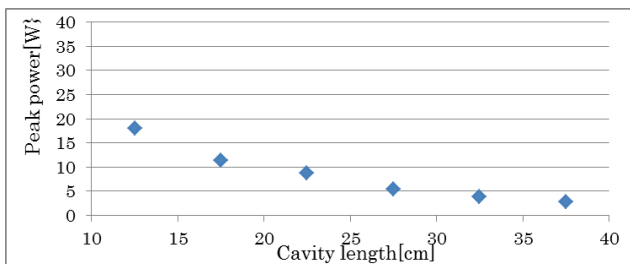


Fig.9 Plots of peak power with different cavity length

緑色Qスイッチ動作を検討するために Pr:YLF の誘導放出断面積と Cr:YAG の初期透過率を波長 522nm のものに変更しシミュレーションを行った。その結果 $\sigma_{gs}=1.1 \times 10^{-17} \text{cm}^2$, $\sigma_{es}=1.1 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ となり、吸収パワー 8.2 W になるまで励起出力を高めるか、または吸収パワー 4 W のままで初期透過率 92.1 %以上の Cr:YAG を用いることが必要であると見積もった。いずれの場合も十分な結晶冷却が必要である。

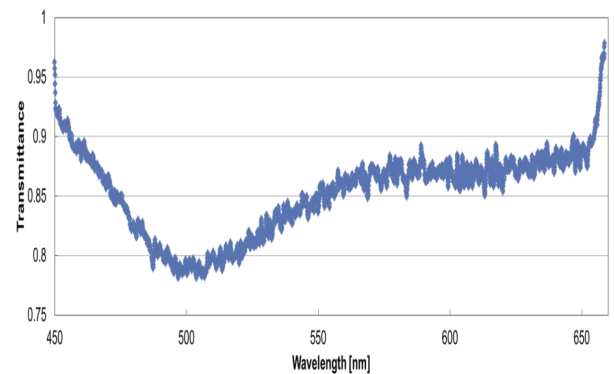


Fig.10 Cr:YAG wavelength-transmittance characteristics

5. まとめ

我々は InGaN LD を励起源に用いた Pr:YLF レーザで、可視域での Cr:YAG を用いた受動 Q スイッチ動作を、レート方程式による理論モデルによって解析し、Cr:YAG 基底準位吸収断面積を $5.1 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 、Cr:YAG 励起準位吸収断面積を $4.3 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ と見積もった。その結果を受けて最適化を検討し、取り出し鏡透過率 4%、Cr:YAG 初期透過率 61%、共振器長 7.5cm としたとき最大のピークパワーを得られると推測した。また緑色 Q スイッチ動作には吸収パワー 8.2 W または吸収パワー 4 W のままで初期透過率 92.1 %以上の Cr:YAG が必要であると見積もった。Cr:YAG 可飽和吸収体を用いることで可視域においてシンプルでコンパクトなパルスレーザとして発展が期待される。

References

- [1] R.Abe, J.Kojou, K.Masuda, and F.Kannari, Appl. Phys. Ex. 6 (2013) 032703.
- [2] J. Kojou, Y.Watanabe, H.Nemoto, F.Kannari Applied Optics vol.51 (2012)