

GaN 系半導体レーザ励起緑色 Pr:YLF レーザの Q スイッチ発振

The actively Q-switched Pr:YLF green laser pumped by GaN diode lasers

阿部 亮(M1),小城 絢一郎(D3),根本寛之(M2)

R. Abe ,J. Kojou and H. Nemoto

Abstract

We demonstrate Q-switched Pr:YLF laser at 522 nm pumped by GaN laser diodes for aiming at second harmonic pulse generation at 261 nm with a BBO crystal.

1.はじめに

近年,ディスプレイやバイオイメージングといった分野で可視光域のコヒーレント光や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, Fig.1 に示すように青色から赤色にかけて多数の光学遷移があり, GaN 系半導体レーザを用いた直接励起が可能である. Fig.1 に Pr³⁺ のエネルギー準位図を示す. 既に我々は, Pr³⁺:YLF レーザでは, 緑, オレンジ, 赤色帯での CW 発振がスロープ効率 35-50 %で実現し, 赤色, 橙色, 緑色の CW 発振や赤色, 橙色の AO-Q-switch 発振を報告している. また, 共振器内第二高調波発生(SHG)を基本波長 639 nm において高効率に実現している[1].

我々は, 高出力の励起用 GaN-LD を用い, これまで行われてない緑色の波長帯における音響光学素子を用いた Q スイッチ発振を目指した.

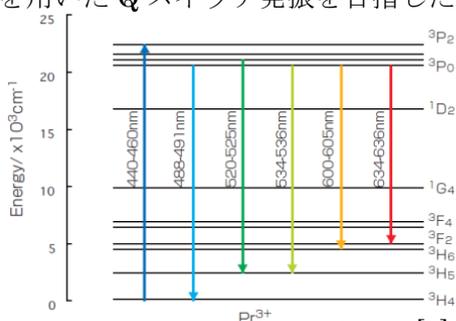


Fig.1 Energy level diagram of Pr³⁺ ion [1]

2.実験および結果

最初に緑色 Pr³⁺:YLF レーザの CW 発振の実験を行った. Fig. 2 に Pr³⁺:YLF レーザの CW 発振の実験セットアップを示す.

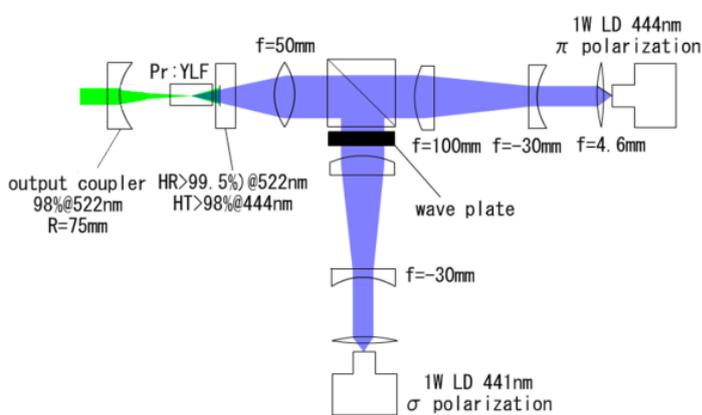


Fig.2 Experimental set up of CW Pr³⁺:YLF Laser

2つの日亜化学社製の GaN-LD を用い, 一つ目の LD は π 偏光で波長 444 nm の LD 光を非球面レンズ f=4.6mm で平行光線にし, シリンドリカルレンズ対 f=-30 mm および f=100mm でビームシェイピングを行った後, PBS によりもう一方の LD 光と光路を合わせた. 二つ目の LD は σ 偏光で波長 444 nm の半導体レーザ光である. 非球面レンズ f=4.6 mm で平行光線にし, シリンドリカルレンズ対 f=-30 mm および f=100mm でビームシェイピングを行った後, 半波長板で偏光方向を変えて PBS に入射している. 2つの半導体レーザ光を集光レンズ f=50 mm で結晶の端面に集光した. 共振器は HR>99.5 %@522 nm, HT>98 %@444 nm の平面鏡 および R=98 %@522 nm の凹面鏡 (R=75 mm) で

構成した. Fig. 3 に共振器モードの計算結果を示す.

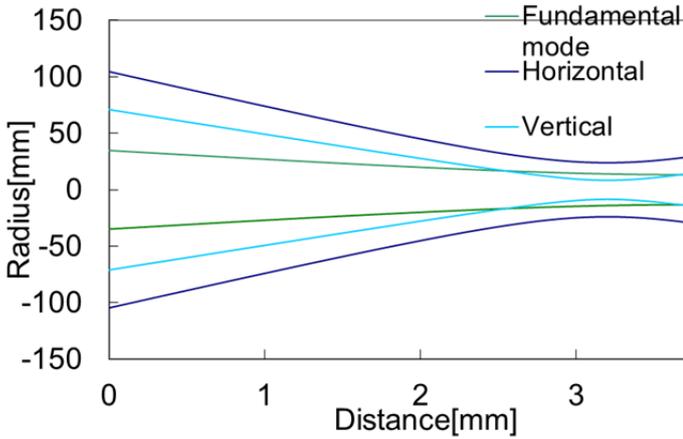


Fig.3 The calculated resonator mode and pump beam profile

次に, Pr:YLF 緑レーザの出力特性を以下の Fig. 4 に示す.

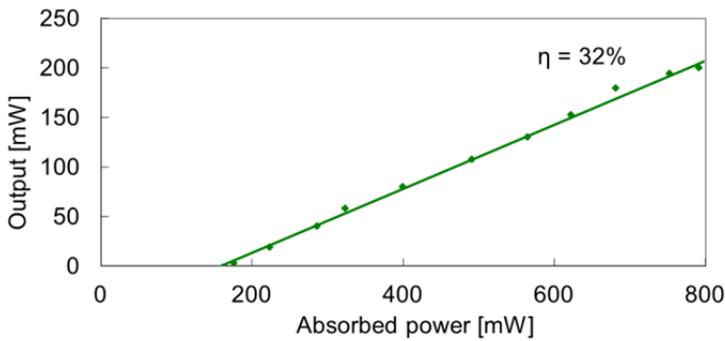


Fig. 4 Plots of the cw output power at 522 nm as a function of absorbed pump power.

出力特性をみると傾きが一定であり, スロープ効率 32%を達成している.

次に, 我々は音響光学素子(以下 AOM)を用いて Pr:YLF レーザを Q スイッチ動作させた. その時の実験セットアップを Fig. 5 に示す. Fig. 2 と同じセットアップを使用し共振器の中に音響光学素子を挿入した. 使用した AOM は, 200MHz の正弦波で動作している. AOM の開口部にはフロントガラスが用いられており, 400-700nm で AR コートされているが緑色の損失は 2%程度ある. AOM にフ

ァンクションジェネレータから電気パルスを送り ON/OFF を切り替えている. Pr の蛍光寿命が約 40 μ s であることから, AOM の ON の時間は 2 倍の 80 μ s とし, OFF の時間を 10 μ s で動作させた. 繰り返し周波数 11kHz である. AOM を挿入した時の閾値は 252mW であった.

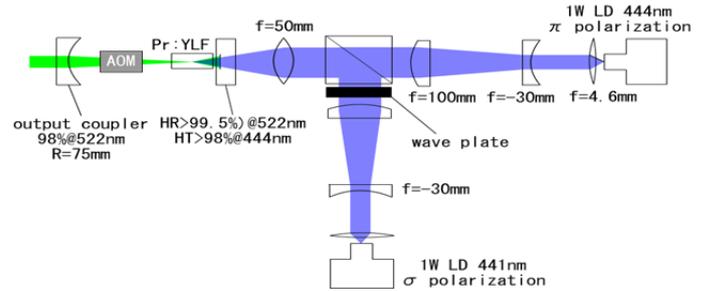


Fig. 5 Experimental setup of AO Q-switched of Pr:YLF laser at 522 nm

結果が AO-Q スイッチパルス幅の理論計算と一致するかを計算した. パルス幅は以下の式で求めることができる.

$$\tau_p \approx \frac{U_{out}}{P_p} = \frac{r\eta(r)}{r-1-\ln r} \times \tau_c$$

十分に励起されているとパルス幅は共振器寿命 τ_c に近づく. η は抽出効率を表している. 4 準位レーザでは 2^* は 1 である.

$$\eta \equiv \frac{\text{Q-switched output energy}}{\text{initial inversion energy}} = \frac{U_{out}}{U_{initial}} = \frac{N_i - N_f}{2^* N_i}$$

τ_c は共振器寿命を表し, r は励起パワーを閾値パワーで割った値である.

$$\tau_c = \frac{2nl}{c(2ald - \ln R_1 R_2)} \approx \frac{2nl}{c(L_i + T)}$$

式を使ってパルス幅を計算し, 実験結果と比較したものを Fig. 6 に示す. ここで, 励起パワーを閾値パワーで割った値(r)を横軸とし, ピークパワー特性, パルス幅をそれぞれ縦軸にした. 実験結果と理

論計算がよく一致していることがわかる。

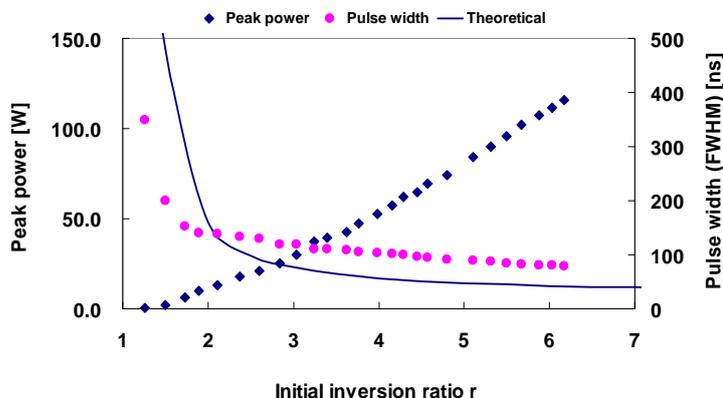


Fig. 6 Peak power (522nm) and Pulse width obtained by Q-switching as a function of r.

次に、共振器内 SHG 発生を試みた。共振器内 SHG 発生に必要なセットアップを Fig. 7 に示す。第二高調波発生に使用する非線形結晶は 261nm に高い透過率を持つ BBO 結晶を用いる。BBO 結晶は高効率に第二高調波を発生させることができる。

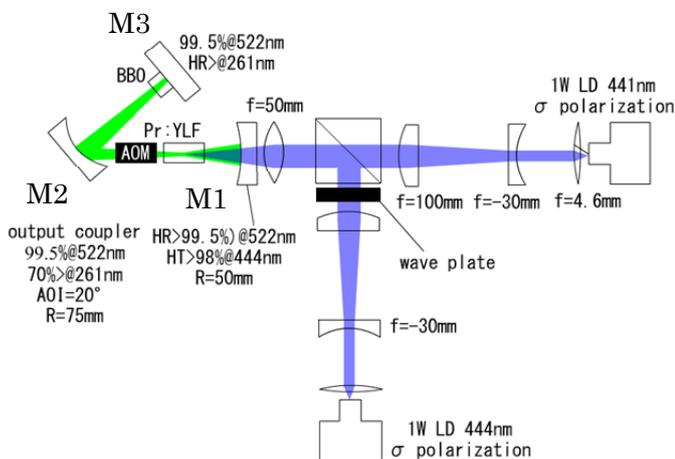


Fig. 7 The setup of SHG Pr:YLF laser

M1 ミラーは R>99.5% @ 522nm, HT>98% @ 444nm 曲率半径 50mm の凹面鏡を使用。M2 ミラーは HR>99.5% @ 522nm, HT>70% @ 261nm AOI=20° 曲率半径 75mm の凹面鏡を使用。M3 は HR>99.5% @ 522nm & 320nm のミラーを使用。折り返しの M2 ミラーで第二高調波を取り出すことにより、レーザ

結晶に第二高調波を入射させないようにしている。この V 型共振器にすると AOM を挿入していない状態で発振値が 400mW 程度に上昇する。これは共振器内モードが楕円型になり、モードマッチングが悪くなるためと考えられる。このため現在の励起パワーでは、V 型共振器による AO-Q スイッチ動作が出来ておらず内部 SHG 発生は行えていない。解決法として折り返し鏡の入射角を 11°程度にすることであり、この時の閾値は 300mW 程度となる。その他の改善方法としては、高出力の励起用 GaN-LD をより重畳することやより透過率の高い AOM を用いることが必要となる。励起パワーを増加させた場合、YLF 結晶の熱負荷を減らすために結晶を冷却することなどがあげられる。

3.まとめ

我々は、これまで行われてない緑色の波長帯においての音響光学素子を用いた Q スイッチ発振に成功した。また、BBO を用いた共振器内 SHG 発生を試みた。SHG を発生させる V 型共振器は、AOM を挿入していない状態で発振値が 400mW 程度に上昇した。そのため V 型共振器による AO-Q スイッチ動作および内部 SHG 発生は現在できていない。

今後、高出力の励起用 GaN-LD をより重畳することやより透過率の高い AOM を用いること、YLF 結晶の熱による影響を減らすために結晶を冷却することといった対策を施すことにより共振器内 SHG 発生が実現可能と考えられる。

References

- [1] J. Kojou, Applied Optics vol.51 (2012)
- [2] 渡辺洋次郎 慶應義塾大学理工学研究科修士論文(2010)