

青色 InGaN 半導体レーザー励起高出力 Pr ドープ YLF レーザ及び Q スイッチ動作

High Power Pr doped YLF Laser Pumped by Blue-InGaN-LDs and Q-switched Operation

飯島 功大(B4), 狩山 了介(M1), 田中 裕樹(M2)

Kodai Iijima, Ryosuke Kariyama, Hiroki Tanaka

Abstract

Pr-doped Yttrium Lithium Fluoride (YLF) crystal is expected for laser gain medium of high efficiency and visible laser. We conducted power scaling of Pr³⁺:YLF laser by using four high power InGaN-blue-LDs as pumping sources. In this work, the laser was further extended to passive or active operations with Cr⁴⁺:YAG crystal and acousto-optic modulator (AOM), respectively.

1. はじめに

プラセオジムイオン(Pr³⁺)は可視域に多くの発光遷移を持つレーザー利得媒質である。現在までに赤, オレンジ, 緑波長域において, Pr³⁺イオンをフッ化物にドープした固体レーザーの常温での安定発振が報告されている。そのため, レーザディスプレイ用の赤色光源としての応用へ期待が集まっている。Pr : YLF レーザの高出力化に関しては, 2 ω -OPSL 励起で赤, オレンジ, 緑波長において, それぞれ 2.8, 1.8, 2.9 W までの高出力が得られている[1]。さらにパルス動作については, AOM を用いた能動 Q スイッチ動作(繰り返し周波: 7.7kHz)でパルスエネルギー27 μ J, パルス幅 17 ns, ピークパワー 1.57 kW のパルスが得られ, また Cr⁴⁺:YAG を用いた受動 Q スイッチ動作で繰り返し周波数 120 kHz, パルスエネルギー3.95 μ J, パルス幅 100 ns, ピークパワー40 kW のパルスがそれぞれ得られている[2,3]。本研究では, 高額なアイソレータを用いず共振器両端からの合計4台のLDによる励起と可

飽和吸収体を挿入する集光点の形成を同時に達成するために Z 型共振器と 2 つのレーザー利得媒質を用いた。さらに, 同レーザー共振器において音響光学変調器(AOM)を用いた能動 Q スイッチ動作, および CW 発振動作も行った。

2. 実験セットアップ

Fig. 1 に本実験セットアップの示す。

レーザー媒質である 2 つの Pr³⁺ : YLF はいずれも結晶長 5 mm, ドープ濃度 0.5 at%, ノンコート結晶であり (AC material 社製), Z 型共振器の両端部に設置されている。励起光源は Pr³⁺ : YLF 結晶の各偏光の吸収ピークに合わせた発振中心波長 445, 442 nm の InGaN 半導体レーザー (日亜化学製) である。結晶が吸収ピークを持つ波長で発振させる為, 各 LD は空冷ペルチェによって冷却し, 温度制御する。エミッタサイズは 1 \times 30 μ m, 拡がり角 45.9 \times 13.9 $^\circ$, 最大出力は 3.5 W で, 全励起吸収パワーの最大値は 7.8 W である。LD から出射された光は, 非球面レンズでコリメートされ, f=-20, 100 のシリンドリカルレンズ対によってビーム径を 5 倍に拡張された後にレンズによって結晶端面から 1 mm の場所に集光される。なお, 集光スポットでの励起ビーム径は水平, 鉛直方向にそれぞれ 50 \times 30 μ m, モードマッチング効率は 77%であると算出される。共振器を構成するミラーは 2 つのエンドミラーは平面鏡で, うち一つが 10 %透過の半透過鏡, 折り返し鏡は曲率半径 75 mm で各発振波長に対して高反射率となっている。

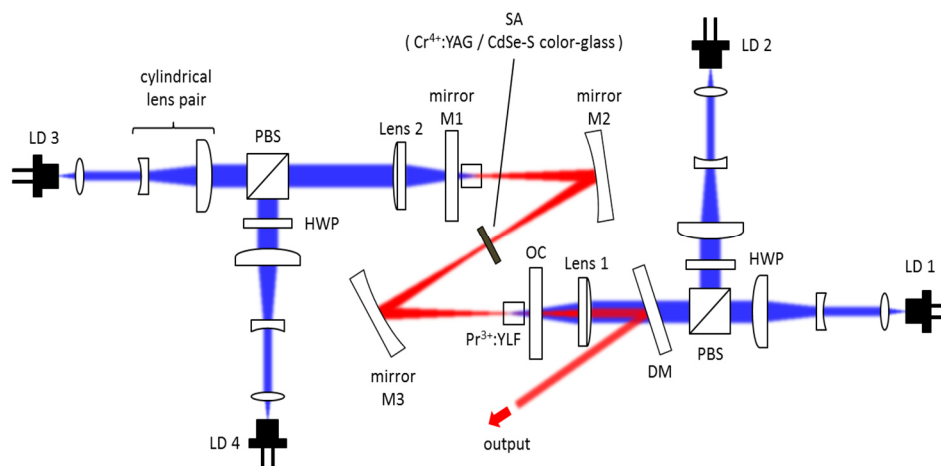


Fig. 1 Experimental setup of passive Q-switch operation by Cr⁴⁺:YAG

なお、この共振器はエンドミラーを交換する事で発振波長を 640 nm と 607 nm に変えられる。中心集光点に可飽和吸収体として Cr⁴⁺:YAG を挿入することで受動 Q スイッチ動作を行った。

3. 受動 Q スイッチ動作

共振器の中心集光点に可飽和吸収体として Cr⁴⁺:YAG を挿入した時に得られた受動 Q スイッチ動作について報告する。この時用いた Cr⁴⁺:YAG は厚さ 2.4 mm、初期透過率 91%、変調度 3.4% のノンコート結晶 (Scientific Material Inc.社製) である。共振器モード計算から、Cr⁴⁺:YAG 挿入点でのビーム径は 50×90 μm であると推定される。Pr:YLF 結晶における集光点でのビーム径が 30×40 μm であるのに対して、中心集光点でのビーム径が大きくなっているのは、非点収差が存在している事に起因する。この受動 Q スイッチ動作では、最大励起吸収時において平均出力 1.35 W、繰り返し周波数 305 kHz、パルス幅 117 ns、ピークパワー 37.8 W の Q スイッチパルス列を得る事が出来た (Fig. 2)。この時のモードマッチングは 77% であると算出される。Fig. 2 の 2 つのグラフからは理論値と実験値との間に高い整合性が確かめられた。また、先行研究に対して、閾値に対する励起光のパワーに

比例して増加する繰り返し周波数の増大とそれに伴う平均出力の増加も確認することができた[3]。先述したように、本共振器では可飽和吸収体挿入位置において非点収差が存在している為、集光状態にまだ改善の余地がある。今後より飽和強度の大きい可飽和吸収体による受動 Q スイッチ動作を本共振器において試みる事を考えた場合、折り返し角度を浅くして非点収差を補償するような共振器設計をすることが求められる。

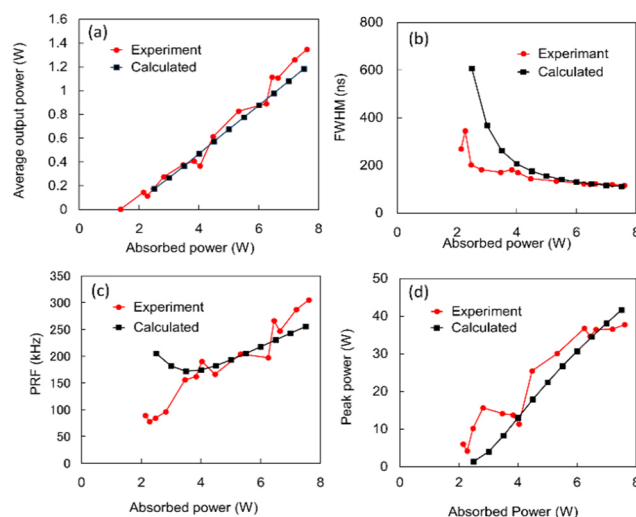


Fig. 2 Experimental results of passive Q-switch operation with Cr⁴⁺:YAG at 640 nm. (a) Average output power. (b) Pulse width (FWHM). (c) Pulse repetition rate. (d) Peak power.

4. 能動 Q スイッチ動作

音響光学変調器(AOM)を Q スイッチ素子として共振器内に挿入した時に得られた能動 Q スイッチ動作について報告する。この実験で用いた AOM は、最大回折効率 80 %、RF 周波数 200 MHz、無反射コート(Flint Glass, Intra Action Corp.)である。プラセオジムの上準位寿命は 38 μs であるので、十分な反転分布を蓄えるために AOM の ON - OFF 時間が 190 μs -10 μs となるように動作させた。このため、得られる Q スイッチパルスの繰り返し周波数は 5 kHz で一定となる。結晶の吸収パワーに対する平均出力、パルス幅、ピークパワーの特性を Fig. 3 にそれぞれ示す。最大励起吸収時に得られた Q スイッチパルスは、パルスエネルギー 201 μJ 、パルス幅 29 ns、ピークパワー 6.8 kW であった。モードマッチング効率は 76 % であると思積られる。先行研究に対してパルス幅の増加が見受けられるが、これは Z 型共振器を採用した事による共振器長の増大が主な原因であると考えられる [2]。

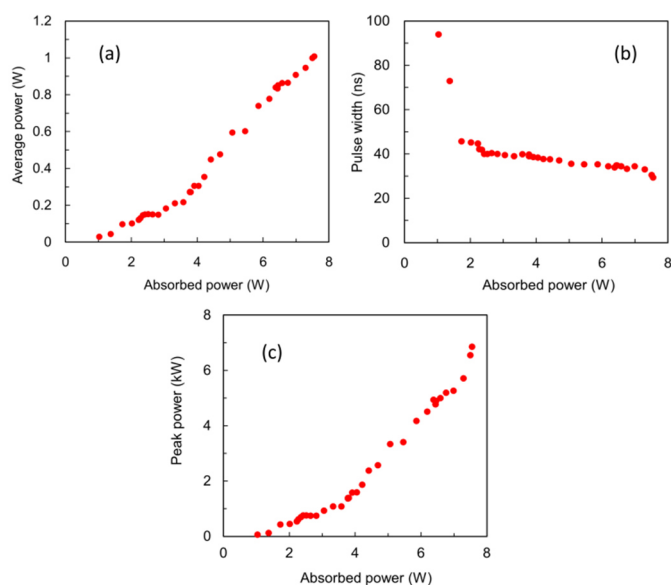


Fig. 3 Experimental results of active Q-switch operation with AOM at 640 nm. (a) Average output power. (b) Pulse width (FWHM). (c) Peak power.

5. CW 発振動作

CW 動作について報告する。640 nm での発振を選択した際に得られた出力特性を Fig. 4 に示す。Fig. 4 に示すように、本実験では最大励起吸収時に透過率 10 % のアウトプットカップラーを用いて 2.93 W という高出力を記録する事が出来た。我々の知る限り、この出力は現在報告されている 640 nm の固体レーザーの世界最大出力である。発振閾値とスロープ効率はそれぞれ 470 mW, 40.9 % となっている。この時 M^2 は水平方向 : 1.43, 鉛直方向 : 1.08 であると計測され、固体レーザーの特徴の一つである高いビームクオリティが確かめられた。また、OC 透過率を 20 % にした場合では、発振閾値が 910 mW にまで上昇したものの、最大励起吸収時に 2.83 W という高出力を 45 % という高い変換効率で得る事が出来た。今後も励起 LD の高出力化や長波長化が発展すれば更なる高出力化が期待できるがその場合、吸収パワーの増大に伴いより適切な冷却が求められる。現在我々は結晶ホルダーを水冷する方式で結晶の冷却を行い、十分な冷却効果を得ているが、これから励起光源の高出力化が進み冷却が追いつかなくなるような場合、ディスクレーザーなどへの展望も有効になると考えられる。また、実験結果に対するシミュレーション結果から本共振器の内部損失は 3.5 % であると思積もられた。

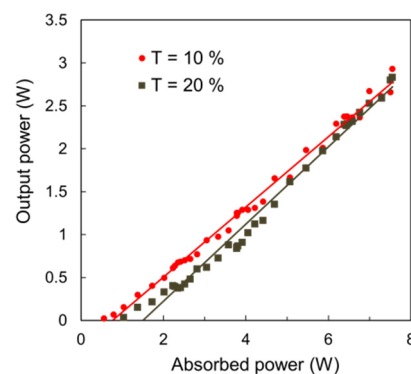


Fig. 4. Experimental results of cw oscillation at 640 nm.

一方、発振波長を 607 nm で動作した場合では最大出力が 1.5 W、発振閾値 1.7 W、スロープ効率 26 % という出力特性を M^2 で水平・鉛直方向にそれぞれ 1.05, 1.15 という非常に高いビームクオリティで得る事ができた(Fig. 5). なお, Fig. 5 のグラフにおいて出力がぶれてしまっているのは, 最大励起時でのみ共振器を最適化し, そこから励起パワーを下げるようにして測定を行っている事が原因である.

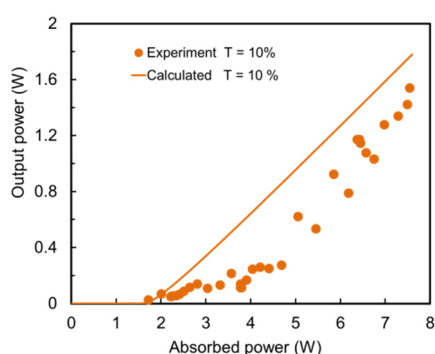


Fig. 5. Experimental results of cw oscillation at 607 nm.

6. まとめ

2個のレーザ利得媒質とZ型共振器を用いる事によって、合計で4台の高出力青色 InGaN 半導体レーザによる励起を可能にし、励起光源のスケーリングによって Cr⁴⁺:YAG を可飽和吸収体として用いた受動 Q スイッチ動作の高繰り返し周波数化や CW 動作時の高出力化を達成した。今後はこの共振器内高光強度という特徴を活かし、紫外・深紫外波長域光の高出力化や世界初となる Cr⁴⁺:YAG を用いた緑波長域での受動 Q スイッチ Pr³⁺:YLF レーザの実現を目指していきたい。

Acknowledgment

本研究を行うにあたり、高出力青色 InGaN 半導体レーザを貸与して下さった日亜化学工業株式会社様に心より感謝申し上げます。

References

- [1] P. W. Metz, F. Reichert, F. Moglia, S. Müller, D.T. Marzahl, C.Kränkel, G. Huber, "High-power red, orange, and green Pr³⁺: LiYF₄ lasers." *Opt. Lett.* **39** (11), 3193 (2014).
- [2] Kojou Junichiro, et al. "InGaN diode pumped actively Q-switched intracavity frequency doubling Pr: LiYF₄ 261 nm laser." *Applied optics* **53.10** (2014): 2030-2036.
- [3] Abe Ryo, et al. "Cr⁴⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ as a saturable absorber for a Q-switched and mode-locked 639-nm Pr³⁺-doped LiYF₄ laser." *Applied Physics Express* **6.3** (2013): 032703.