

# Pr<sup>3+</sup>ドープ YAIO<sub>3</sub> 酸化物結晶を用いた可視レーザー発振特性

Characteristics of visible lasing with Pr<sup>3+</sup>-doped oxide crystal YAIO<sub>3</sub>

藤田 将吾 (M1)

Shogo Fujita

## Abstract

We demonstrated continuous-wave operation of a Pr<sup>3+</sup>:YAP laser pumped by blue InGaN laser diodes (LDs) or fiber-coupled LDs. With single-emitter blue-LD-pumping, we obtained the maximum output power of 1230 mW at 747 nm.

## 1. はじめに

プラセオジウムイオン(Pr<sup>3+</sup>)ドープ結晶は可視域に多くの発光遷移を持ち、高効率な可視レーザーに用いる利得媒質として注目されてきた[1]。フッ化物材料は酸化物材料と比べフォノンエネルギーが小さく、非輻射遷移が小さいため利得が高く、レーザー発振が容易であるため、これまで、主に Pr<sup>3+</sup>ドープ結晶の室温における連続波発振が報告されているのは、フッ化物母材を用いた場合である。特に、LiYF<sub>4</sub> (YLF)はσ偏光動作時の熱レンズ効果が小さいために母材結晶として最も用いられており、我々は既に波長 640 nm 及び 607 nm においてそれぞれ出力 6.7 W, 3.7 W の連続波動作を達成している[2]。

この高出力化の背景には、励起源に用いる InGaN 半導体レーザーの高出力化があるが、一方で問題となるのが、フッ化物材料の低い熱伝導率である。低い熱伝導率により結晶内に蓄積した熱は、応力を大きくし、熱破壊が生じやすくなる。そのため、さらなる高出力化には励起モード径を大きくして熱負荷を小さくする、もしくは熱伝導率が高くかつ機械強度の高い材料を用いることが求められる。我々が注目する酸化物材料は、フォノンエネルギーが大

きく、非輻射遷移の確率が高いために、レーザー発振閾値が上昇するが、熱伝導率が高いために、強励起での使用が可能となる。既に酸化物材料では、YAIO<sub>3</sub>(YAP) と SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> を母材とした Pr<sup>3+</sup>ドープ結晶を用いた室温におけるレーザー発振が報告されている [3,4]。特に、YAP は酸化物材料の中でもフォノンエネルギーが比較的小さく(550 cm<sup>-1</sup>)、室温発振が容易で、747, 720, 662 nm において室温発振が達成されている。今回、我々は出力約 5 W の InGaN 半導体レーザー及びファイバー結合型 LD を励起源に使い、Pr<sup>3+</sup>:YAP レーザーの高出力化を 747, 662, 621 nm で行った。

## 2. Pr<sup>3+</sup>:YAP レーザーの連続波発振実験

まず、単一エミッタ型 InGaN 青色 LD2 台を励起源に用いた Pr<sup>3+</sup>:YAP レーザーを Fig. 1 に示す実験系で実現した。

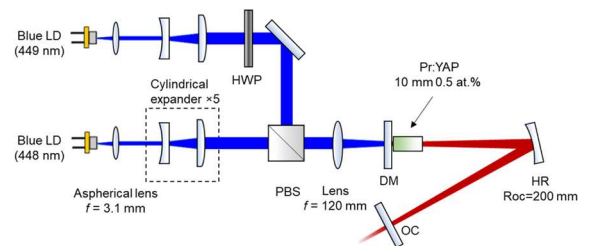


Fig. 1 Experimental setup of Pr<sup>3+</sup>:YAP laser pumped by single-emitter InGaN blue LDs.

用いる利得媒質は 0.5 at.%, 結晶長 10 mm の Pr<sup>3+</sup>:YAP である。励起波長は、Pr<sup>3+</sup>:YAP の c 軸及び a 軸の吸収ピークにそれぞれ対応する 448 nm, 449 nm で、最大で 6.3 W 吸収される。結晶中における励起モード径は~20×70 μm<sup>2</sup> (vertical × horizontal)

である。今回の発振波長は 621, 662, 747 nm であり、得られた出力特性を Fig. 2 にまとめる。

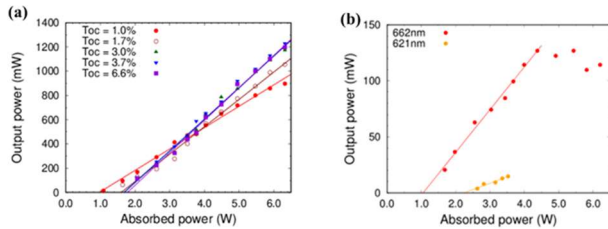


Fig. 2 Output characteristics of Pr<sup>3+</sup>:YAP laser pumped by single-emitter InGaN blue LDs at 747 nm (a), 621 and 662 nm (b)

Pr<sup>3+</sup>:YAP で最も利得が高い波長は 747 nm であるが、出力鏡の透過率が 3.7% のとき、最大出力 1230 mW が得られた。この波長では、特に熱負荷による出力現象は見られず、さらなる高出力化が可能であると考えられる。特に、この深赤波長帯では、Pr<sup>3+</sup>:YLF は低いストークス効率 (62%) であり、かつ  $\pi$  偏光発振であることにより負の熱レンズ効果が大きいことから、強励起動作に限界があり、高出力化には Pr<sup>3+</sup>:YAP が有効であると考えられる。

一方、621 及び 662 nm では吸収パワーが約 3.5 W 以上となると出力の上昇が見られなくなった。これはこの 2 つの波長帯での低い利得が原因とみられ、強励起下で顕著となる熱レンズ収差による損失の影響が大きいと考えられる。また、今回の実験では励起が最大の状態で共振器長を変化させ、出力が最大値になるように最適化したところ、結晶中にお

ける共振器モード径は ~60  $\mu\text{m}$  と計算された (熱レンズ効果はないと仮定した場合)。小さい共振器モード径はモードマッチング効率を低下させるが、閾値を低くし、かつ熱レンズ収差によるビームのひずみ、損失を低くするため、利得の低い結晶及び波長では最適となる。

今回、利得の高い 747nm ではさらに励起源をファイバー結合型 LD とし、連続波動作の出力特性を計測した。最大吸収パワーは 12.1 W、結晶中における励起モード径は ~160  $\mu\text{m}$  で、単一エミッタ型 LD と異なり、円形ビームである。この出力特性を Fig. 3 にまとめる。

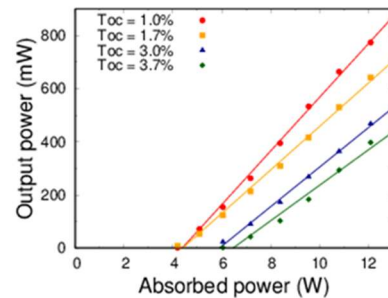


Fig. 3 Output characteristics of Pr<sup>3+</sup>:YAP laser at 747 nm pumped by fiber-coupled blue LD

出力鏡の透過率が 1.0% のとき、最大出力 778 mW、スロープ効率 10.1% となった。Table 1 から分かるように、単一エミッタ型 LD 励起を比較してスロープ効率が低くなっている。これは、ファイバー結合型 LD のビームプロファイルがトップハット型であることが原因である。トップハット型の励起ビームの

Table 1 Summarized output characteristics of Pr<sup>3+</sup>:YAP laser

Pump source	$\lambda_l$ (nm)	621	662	747				
Single-emitter LD ( $P_{abs}=6.3$ W)	$T_{oc}$ (%)	2.1	2.9	1.0	1.7	3.0	3.7	6.7
	$P_{max}$ (mW)	15	129	897	1056	1173	1230	1197
	$\eta_{sl}$ (%)	1.1	3.9	17.6	22.5	26.1	26.7	26.7
	$M^2$	$1.2 \times 1.3$	$1.6 \times 1.2$	$1.7 \times 5.3$				
Fiber-coupled LD ( $P_{abs}=12.1$ W)	$P_{max}$ (mW)	—	—	778	642	467	397	—
	$\eta_{sl}$ (%)	—	—	10.1	8.2	7.4	6.7	—
	$M^2$	$8.6 \times 8.1$						

場合、利得媒質内での共振器モードは励起モードよりも 20%程度小さくしなければ熱レンズ収差の影響が大きく、効率の低下が顕著となる。一方、共振器モードが小さくなるとモードマッチング効率も減少し、スロープ効率の低下につながる。また、出力鏡の透過率を増加させた場合にスロープ効率が伸びないという現象が見られた。これは、Pr<sup>3+</sup>:YLFでも同様に現象が見られており、高い反転分布密度による何らかの Pr<sup>3+</sup>特有の何らかの損失の存在が考えられるが、これにはさらなる研究が必要である。

### 3. Pump-probe 法による熱レンズ効果観測

今回のレーザ発振実験では励起パワーの変化に応じて最適な共振器長が変わることを確認した。これは、熱レンズ効果により利得媒質内での共振器モード径が変化することが原因であり、熱レンズ効果の小さい Pr<sup>3+</sup>:YLF ではほとんど見られない現象である。実際にどのようなレンズ効果が生じているか確認するため、単一エミッタ型 LD1 台（モード径 ~20×70 μm）で励起された Pr<sup>3+</sup>:YLF 及び Pr<sup>3+</sup>:YAP 結晶に HeNe レーザを入射させ、その透過ビームのビームプロファイルを観測した。

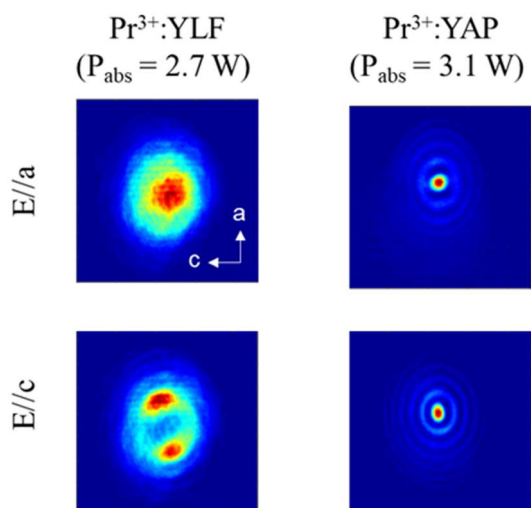


Fig. 4 Transmitted HeNe laser beam profile undergone thermal lens in end-pumped gain medium

Fig.4 に示すように、Pr<sup>3+</sup>:YLF は  $\sigma$  偏光 (E//a) に対しては殆どビーム形状の変化が見られなかったのに対し、 $\pi$  偏光 (E//c) に対しては特に励起ビームが絞られている a 軸方向に強い負の熱レンズ効果が見られた。一方、Pr<sup>3+</sup>:YAP の場合は E//a、E//c の両方の場合で強いビームの収束が見られ、正の熱レンズ効果が発生していると考えられる。今後は、このレンズ効果の焦点距離をシミュレーション及び実験で求め、定量的に考察を行っていく。

### 4. まとめ

今回我々は、単一エミッタ型 LD 及びファイバー結合型 LD を励起源に用いた Pr<sup>3+</sup>:YAP レーザを実現し、波長 747 nm で最大 1230 m, スロープ効率 26.7% の連続波動作を実現した。今後、さらなる高出力に向けて、特に LD 端面励起で問題となる強励起下での熱レンズ効果に関する詳細な研究を行う。

### References

- [1] C. Kränkel, D.-T. Marzahl, F. Moglia, G. Huber, and P. W. Metz, "Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rareearth doped lasers," *Laser Photon. Rev.* **21**, 1–21 (2016).
- [2] H. Tanaka, S. Fujita, and F. Kannari, "High-power visibly emitting Pr<sup>3+</sup>:YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes," *Appl. Opt.* **57**(21), 5923–5928 (2018).
- [3] M. Fechner, F. Reichert, N. O. Hansen, K. Petermann, and G. Huber, "Crystal growth, spectroscopy, and diode pumped laser performance of Pr, Mg: SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>," *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **102**(4), 731–735 (2011).
- [4] M. Fibrich, H. Jelínková, J. Šulc, K. Nejezchleb, and V. Škoda, "Visible cw laser emission of GaN-diode pumped Pr: YAlO<sub>3</sub> crystal," *Appl. Phys. B* **97**(2), 363–367 (2009).