

半球型共振器連続波 Yb:YAG レーザーの高効率化

小林 亮[†], 片岡 俊二[†], 青柳 優宇^{††}, 柴田 真志^{††}, 前田 隼哉^{††}, 川戸 栄^{†††}

[†]福井大学工学研究科 電気・電子工学専攻 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1

^{††}福井大学工学部 電気・電子工学科

^{†††}福井大学学術研究院工学系部門

河仲 準二^{††††}

^{††††}大阪大学レーザー科学研究所

はじめに

超短パルスレーザーの応用分野の開拓のために、装置の小型化と高効率化を安価に行うことは課題の一つとされている。例えば、短共振器のモード同期レーザーの効率を安価に向上できれば、周波数コム光源の単位モードあたりのパワーの増大が容易となり、測定精度の向上を安価に実現できる。小型レーザーの高効率化を実現するための基礎的なデータを入手するために、本研究では半球型共振器連続波レーザーの高効率化を目指す。そのために、効率面で優れた特性を持つレーザー媒質として注目されている Yb:YAG 結晶を用いた。理論解析から得たモード体積とビーム重なり最適条件を元にレーザーを試作し、入出力特性を計測することで、試作したレーザーの光-光変換効率を評価した。

光-光変換効率

光-光変換効率 η_{oo} は、励起パワーに対してどれだけ出力パワーを取り出せるかを表したものである。 η_{oo} は次の式で表される。

$$\eta_{oo} = \frac{P_{out}}{P_p} = \eta_a \eta_p \eta_q \eta_c \frac{S}{F} \quad (1)$$

P_{out} 、 P_p はそれぞれ出力パワー、励起パワーであり、 η_a は吸収効率、 η_p は励起量子効率、 η_q は原子量子効率、 η_c は結合効率、 S はレーザー光子指数、 F は励起光子指数である。[1] また、発振閾値を P_{th} とすれば、

$$P_{th} = \frac{h\nu_p \frac{V_{eff}}{l}}{2\eta_a f \sigma_{eff} \tau} (L_i + T + 2N_1^0 \sigma_{eff} l) \quad (2)$$

となる。 $h\nu_p$ は励起エネルギー、 V_{eff} がモード体積、 l は結晶の長さ、 f はレーザーの上準位と下準位のボルツマン分布、 σ_{eff} は誘導放出断面積、 τ は蛍光寿命、 L_i は共振器内部損失、 T は出力鏡透過率、 N_1^0 は励起されていないときのレーザー下準位の反転分布密度である。また、 P_{out} は次の近似式で示される。

$$P_{out} \sim \eta_s (P_p - P_{th}) \quad (3)$$

(3) 式から高効率化のためには発振閾値の低減が必要となる。発振閾値の低減のため、励起光のモード体積が最小になるようなビーム径に対して、レーザー光のビーム径を調整することが重要である。また Yb:YAG 結晶のような準四準位レーザー媒質は、レーザーの下準位に原子の分布があり、それに起因する下準位吸収損失がある。本研究では、高密度励起による高利得化で下準位吸収損失の効率への影響を低減し、高効率化を目指す。

実験条件

図 1 に本研究で使用した半球型共振器を示す。

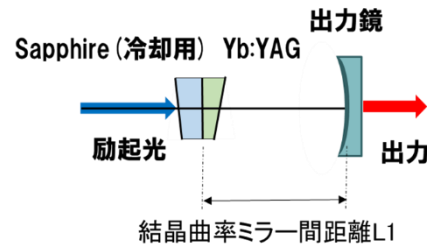


図 1 本研究で使用した半球型共振器

共振器の設計のため、理論解析から光-光変換効率が最大となるような条件を解析した。励起光源としては Ti:sapphire レーザーを使用し、励起光のビーム品質 M^2 は実測値から光学台に対して、垂直方向で 1.2、水平方向で 1.1 である。励起光の最小スポット半径は実測値から垂直方向で $10.9 \mu\text{m}$ 、水平方向で $9.7 \mu\text{m}$ である。最大励起パワーは 0.75 W 、最大集光強度は 217 kW/cm^2 、励起波長はレーザー上準位に直接励起でき、高効率化が望める 968 nm とした。

本研究で用いた Yb:YAG 結晶は冷却効率を向上させるために Sapphire 結晶が接着されており、ドープ濃度は 20at.%、5 mm 角で厚さ 1 mm の結晶を使用した。結晶の吸収効率は 96%、結晶の温度は 20°C とし

た。出力鏡は直径がハーフインチで、曲率半径 50 mm、透過率 2%、4.5%、5%の 3 種類を使用した。

理論解析から、励起光に対してレーザー光を最適化することで光-光変換効率は最大励起パワー0.75 W、出力鏡透過率 5%、発振波長 1050 nm のときに最大で 78.8%が見込めると分かった。またその時の結晶曲率ミラー間距離は 49.64 mm であり、そのときの垂直方向のレーザー光ビーム半径 14.3 μm 、水平方向のレーザー光ビーム半径 13.7 μm が見込めることが分かった。

実験結果

設計結果をもとに共振器を作成した。まず結晶-曲率ミラー間距離を変化させ、最大励起パワー0.75 W、出力鏡透過率 5%のときにレーザー光出力が最大になるように共振器の最適化を行い、そのときの励起光とレーザー光の入出力特性を測定した。実験結果と理論計算を図 2 に示す。

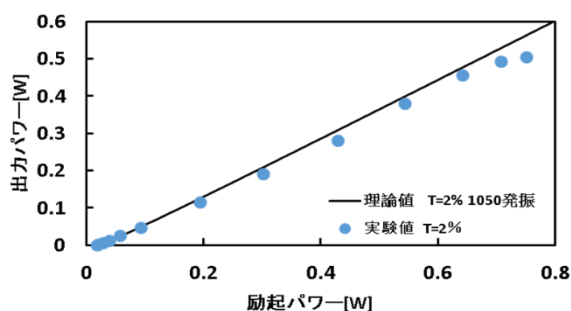


図 2(a) レーザーの入出力特性 $T=2\%$

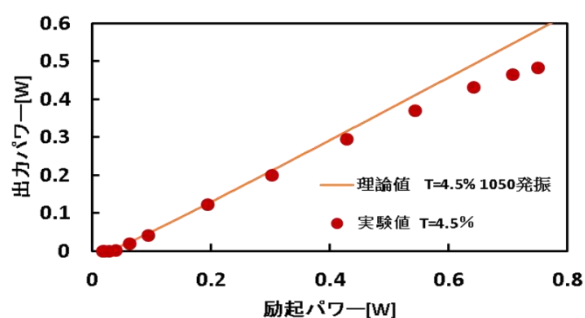


図 2(b) レーザーの入出力特性 $T=4.5\%$

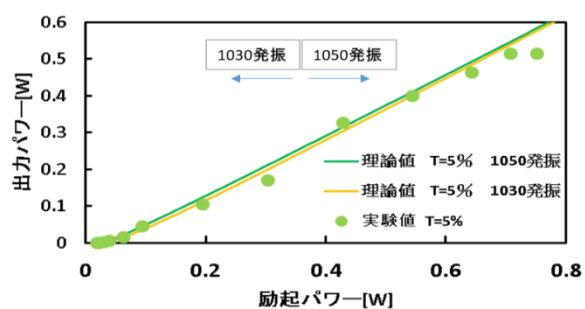


図 2(c) レーザーの入出力特性 $T=5\%$

実験から最大出力が得られたのは、 $T=2\%$ のとき最大出力 510 mW、 $T=4.5\%$ のとき最大出力 484mW、 $T=5\%$ のとき最大出力 516 mW が得られた。 $T=2\%$ のとき、レーザー光発振波長は 1050 nm であり、最大励起パワーに対する光-光変換効率は 67.3%であった。 $T=4.5\%$ のとき、レーザー光発振波長は 1050 nm であり、最大励起パワーに対する光-光変換効率は 64.5%であった。 $T=5\%$ のとき、レーザー光発振波長は励起パワーが低いときは 1030 nm、励起パワーが高いときは 1050 nm であり、最大励起パワーに対する光-光変換効率は 68.7%であった。また、実験で最大の効率が得られたのは、 $T=5\%$ のときで光-光変換効率 76.1%だった。これは過去に我々が達成した Ti:sapphire レーザー励起 V 型共振器連続波 Yb:YAG レーザーの効率に迫る結果である。[2]最大励起パワーのときに効率が最大となるように設計したが、図 2 のように励起パワーが低い時は理論値とほぼ一致しているのに対して、励起パワーが高い時に出力が上がらず理論値からずれていることが分かる。今後はこの原因を調査するため励起波長 940 nm での実験結果と比較を行いたい。

まとめ

本研究では、半球型共振器連続波レーザーの高効率化を目指し、実験と理論解析を行った。理論解析から、 $T=5\%$ 、最大励起パワー0.75 W のときに最大で光-光変換効率 78.8%が得られた。実験から $T=5\%$ 、励起パワー0.43 W のときに最大で光-光変換効率 76.1%が得られた。理論解析では最大励起パワーのときに最大の効率が得られたが、実験では励起パワーが高くなるにつれ、理論値と実験値がずれてレーザーの出力が上がらなかった。今後は励起波長を 940 nm に変えたときの結果と比較し、高出力化につなげていくが必要になる。

参考文献

- [1] W. P. Risk. "Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses," J. Opt. Soc. Am. B/Vol.5, No.7/July 1988.
- [2] Shinichi Matubara, Tsutomu Ueda, Sakae Kawato, and Takao Kobayashi, "Highly Efficient Continuous-Wave Laser Oscillation in Microchip Yb:YAG at Room Temperature", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 46, No. 7, 2007, pp. L132–L134.