

伝導冷却型 Tm,Ho:YLF リングレーザーの 高平均出力 Q スイッチ動作特性

佐藤 篤^{1,2}, 青木 誠², 石井 昌憲², 大塚 涼平^{3,2}, 水谷 耕平², 落合 啓²

¹東北工業大学 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

²情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

³首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

High-average-power, Q-switched-mode performance of a conductively cooled Tm,Ho:YLF ring laser

Atsushi SATO^{1,2}, Makoto AOKI², Shoken ISHII², Ryouhei OTSUKA^{3,2}, Kohei MIZUTANI²,
and Satoshi OCHIAI²

¹ *Tohoku Inst. of Tech., 35-1 Yagiyama-Kasumi, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-8577*

² *NICT, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795*

³ *Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065*

A conductively cooled, Q-switched Tm,Ho:YLF ring laser is suitable for use as a transmitter in a space-borne wind Doppler lidar. Although we have developed a 100-mJ-class Tm,Ho:YLF laser oscillator cooled down to -80 °C in previous works, further improvement in the average power is required for our purpose. In this study, a lower threshold pump energy and a higher average output power, compared with our previous systems, were achieved by increasing the pumping density. As a result, a Q-switched pulse energy of 104 mJ was obtained at a pulse repetition frequency of 70 Hz, corresponding to an average power of 7.28 W. To the best of our knowledge, this is the highest average output power reported for a 100-mJ-class Q-switched 2 μm laser oscillator using a conductively cooled laser head. When the laser was operated at 50 Hz, the maximum pulse energy reached 125 mJ.

Key Words: Solid-state laser, Q-switched laser, Doppler LIDAR, Wind LIDAR

1. はじめに

近年、気象予測精度の向上などの目的から全球的な風の空間分布情報の観測が必要とされており、そのためのセンサーとして、波長 2μm 帯レーザーを光送信機に用いたドップラー風ライダーの開発が国内外の研究機関において進められている^{1,2)}。情報通信機構(NICT)では、超低高度軌道衛星(~220km)への搭載を目指し、高出力 Tm,Ho:YLF レーザーの開発を進めてきており、その目標出力は Q スイッチパルスエネルギー125mJ、繰り返し周波数 30Hz(平均出力 3.75W)である。この出力を伝導冷却型レーザーで実現するため、高い排熱能力を有する側面励起型レーザーヘッドを開発し、-80°Cにおいて平均出力 2.4W 以上を得ている³⁾。本研究では、基礎実験ならびに動作解析⁴⁾に基づく励起密度の最適化の結果、平均出力の大幅な改善に成功したので報告する。

2. レーザー設計

従来のシステム⁵⁾をベースとし、さらに低しきい値化を図るため、レーザーロッド長の適正化に

よる励起密度の最適化を行った。従来より使用してきたレーザーロッドは、直径 4mm、長さ 44mm の 4%Tm,0.4%Ho:YLF 結晶であり、これよりも高密度な励起を実現するため、長さ 22mm 及び 33mm のレーザーロッドについて検討した。Fig.1 に長さが異なる 3 種類のレーザーロッドにおける Q スイッチ動作特性の理論解析結果を示す。レーザーロッド温度は-80°C、出力鏡反射率は 75%と

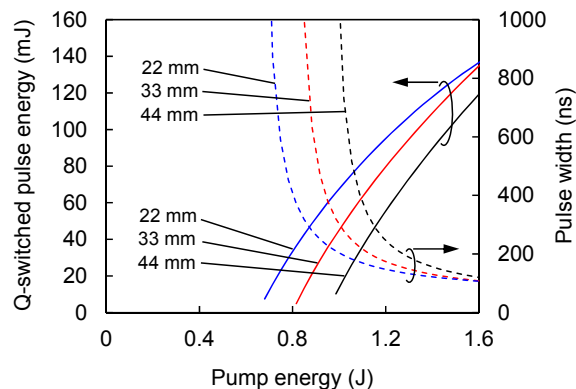


Fig. 1. Calculated pulse energies and pulse widths of the Q-switched Tm,Ho:YLF ring laser as a function of pump energy.

した。その他の条件は、後述する実験条件と一致させた。動作解析の結果、レーザーロッド長を短くすることにより励起密度が高められ、発振しきい値が低下することが確かめられた。しかしながら、長さ 22mm の場合、強励起時に Ho 基底準位の枯渇(GSD)により Tm→Ho 遷移効率が低下し、長さ 33mm のレーザーロッドと同程度しか出力が取り出せないことがわかった。レーザーロッド側面における排熱面積確保の観点からも、最適なレーザーロッド長は 33mm であると結論付けられた。

3. 共振器構成

Fig.2 に Tm,Ho:YLF リングレーザーの共振器構成を示す。光共振器は、3 枚の全反射鏡(M1~M3)及び反射率 61% の出力鏡(OC)により構成し、単一方向発振を行うために、出力鏡の外側に逆方向発振のレーザー光を反射させる全反射鏡(M4)を置いた。共振器内には、熱レンズ効果の補償用レンズ(L1,L2)及び AO Q スイッチを挿入した。レーザーヘッドは、3 個の励起モジュールによりレーザーロッドを 3 方向から側面励起する構造になっており、各励起モジュールはレーザーロッドの長さ方向に並べて配置された 3 個の半導体レーザー(LD)と石英ライトガイドからなっている。レーザーロッドは、 -80°C のフロリナートが循環する銅製ヒートシンクにより伝導冷却されている。

4. 実験結果

レーザーロッド長を 33mm とし、従来に比べ高密度励起が可能となったレーザーヘッドを用いて Q スイッチ発振実験を行った。Fig.3 に実験結果を示す。励起用 LD の仕様の制約から、LD はパルス幅を調整しデューティー比 4.2% 以下で動作させた。繰り返し周波数 70Hz のとき、励起エネルギー 1.45J に対し、出力エネルギー 104mJ が得られた。これは、平均出力 7.28W に相当し、これまでに報告されている 100mJ 級の伝導冷却型 $2\mu\text{m}$ レーザーとしては最高出力となる⁶⁾。また、平均出力 7.28W での動作時におけるビーム品質は、ナ

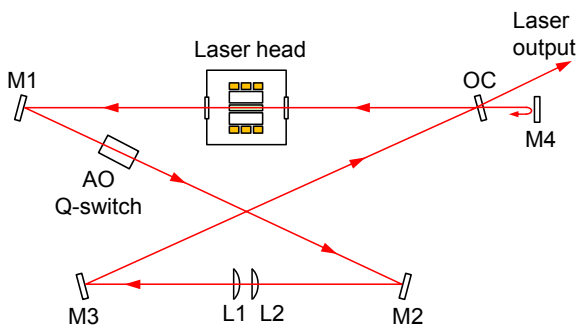


Fig. 2. Resonator configuration of the Q-switched Tm,Ho:YLF ring laser.

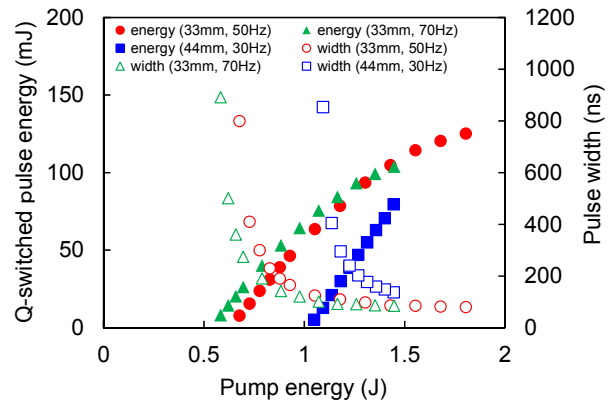


Fig. 3. Measured pulse energies and pulse widths of the Q-switched Tm,Ho:YLF laser for different rod lengths as a function of pump energy.

イフエッジ法によるビーム径測定の結果、水平方向及び垂直方向共に $M^2 \leq 1.5$ であることが確かめられた。50Hz での動作では、励起エネルギー 1.8J のとき、パルスエネルギーは 125mJ に達した。強励起時には、スロープ効率の低下が見られたが、これは GSD の影響であると考えられる。長さ 44mm のレーザーロッドを用いた従来システムにおいて出力鏡反射率 74%、繰り返し周波数 30Hz の条件下で測定した動作特性⁴⁾と比較すると、大幅な低しきい値化が達成されたことがわかる。Fig.1 に示した解析結果はいくつかの近似計算を含んでおり、また一部の条件が異なるため、完全には Fig.3 に示した実験結果と一致しないが、概ね期待通りの低しきい値化に成功した。

5. おわりに

本研究では、100mJ 級伝導冷却型 Tm,Ho:YLF レーザーの高平均出力動作のためのレーザー設計の最適化を行った。従来に比べ高密度励起化された改良型レーザーヘッドを用いて、平均出力 7W 以上の Q スイッチ動作を実証した。今後、この成果をもとに、ドップラー風ライダーの要求仕様の実現に向けたレーザー開発を進めていく。

参考文献

- 1) S. Ishii *et al.*: SOLA 12 (2016) 55.
- 2) U. N. Singh *et al.*: Opt. Mater. Express 5 (2015) 827.
- 3) S. Ishii *et al.*: Appl. Opt. 49 (2010) 1809.
- 4) A. Sato *et al.*: The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), (Busan, Korea, 24-28 August, 2015), paper 25F3-4
- 5) K. Mizutani *et al.*: Appl. Opt. 54 (2015) 7865.
- 6) A. Sato *et al.*: submitted to Opt. Lett. (2016).