

伝導冷却型 Tm, Ho:YLF MOPA システムの研究開発

青木 誠¹, 佐藤 篤^{2,1}, 石井 昌憲¹, 水谷 耕平¹, 落合 啓¹, 久保田 実¹

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

²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)

Development of a conductively cooled Tm,Ho:YLF MOPA system

Makoto AOKI¹, Atsushi SATO^{2,1}, Shoken ISHII¹, Kohei MIZUTANI¹, Satoshi OCHIAI¹, and Minoru KUBOTA¹

¹ National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

² Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yaginuma-Kasumi, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-8577

Abstract: The spaceborne coherent Doppler wind lidar (CDWL) is considered as the most powerful technique for providing accurate tropospheric wind profiles with high spatial and temporal resolutions. The critical issue is the development of a space-qualified laser transmitter with eye-safe wavelength, high pulse energy, and single frequency. We are conducting the feasibility studies of conductively cooled diode-pumped 2- μm lasers to meet a requirement for a spaceborne CDWL. Recently, we has demonstrated a Q-switched Tm,Ho:YLF laser oscillator cooled to -80°C with the highest average output power among 100-mJ-class Q-switched 2- μm laser oscillators using a newly developed laser module. In this study, we report on a Tm,Ho:YLF MOPA system with a compact laser resonator and double-pass amplifier configuration. A single-frequency, injection-seeded, Q-switched pulse energy of 105 mJ was achieved at a pulse repetition frequency of 30 Hz and a rod temperature of -38°C .

Key Words: conduction cooling, solid-state laser, master oscillator power amplifier, coherent, Doppler wind lidar

1. はじめに

風は、大気の状態を決める最も基本的な気象要素の一つである。風の3次元分布を地球規模で正確に把握することは、天気予報精度の向上や気候モデルの改良のために非常に重要であると考えられている。情報通信機構(NICT)では、世界初の風向風速計測を可能とする衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダー(CDWL)の実現に向けて、その要素技術である送信機の研究開発を進めている。開発を進めている送信機は、伝導冷却型の100 mJ級 Tm,Ho:YLF レーザーである。2016年度には、基礎実験ならびに動作解析に基づいて最適化された改良型レーザーヘッドを用いて、 -80°C のレーザーロッド冷却温度動作にて、超高度衛星搭載 CDWL 送信機の目標出力 3.75 W (パルスエネルギー 125 mJ, 繰り返し周波数 30 Hz)¹⁾を大きく上回る平均出力 7.28 および 6.25 W (104 mJ, 70 Hz および 125 mJ, 50 Hz) の Q スイッチ動作を実証している²⁾。現在では、ループヒートパイプによる効率的な冷却やペルチェ素子による温度制御が期待できる -40°C 付近の温度帯を一つのターゲットとして、高温動作化(冷却による消費電力の低電力化)と 100 mJ 級の高出力動作の両立を目指して研究開発を進めている。

本研究では、発振器単体での高温動作化実験の結果および発振器と増幅器を組み合わせた MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成での高出力動作実験の結果について報告する。

2. 実験の構成

Fig.1 に実験に使用した Tm,Ho:YLF MOPA の構成を示す。発振器および増幅器のレーザーモジュールに用いたレーザーロッドは、直径 4 mm, 長

さ 33 mm の Tm(4%),Ho(0.4%):YLF 結晶であり、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いる。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)と石英の導光板から構成されている。LD の波長は、Tm に効率よく吸収される 792 nm 付近にヒートシンクによって伝導冷却されており、ヒートシンクは水冷チラーで冷却・温度制御されている。レーザーロッドは、冷媒液が循環する銅製ヒートシンクにより伝導冷却されており、その冷却温度は、超低温バスサーキュレーター(ULT-95)または冷却水循環装置(CA-1115C)によって制御されている。光共振器は、長方形のリング共振器をベースとして、プリズムを用いた折返し機構を用いることで、従来の 3.86 m の共振器長²⁾を保ったままの小型化に成功している。出力鏡の反射率は 75% であり、インジェクションシーディングによる発振波長制御ならびに単一方向発振を行うために、裏面からシード光が注入されている。シーディングを行わない場合は、単一方向発振を行うために、出力

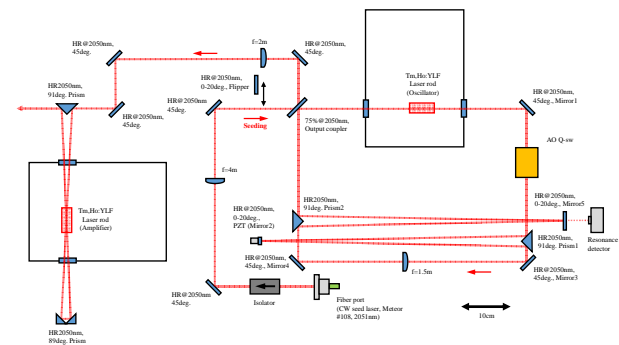


Fig. 1. Schematic diagram of Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier.

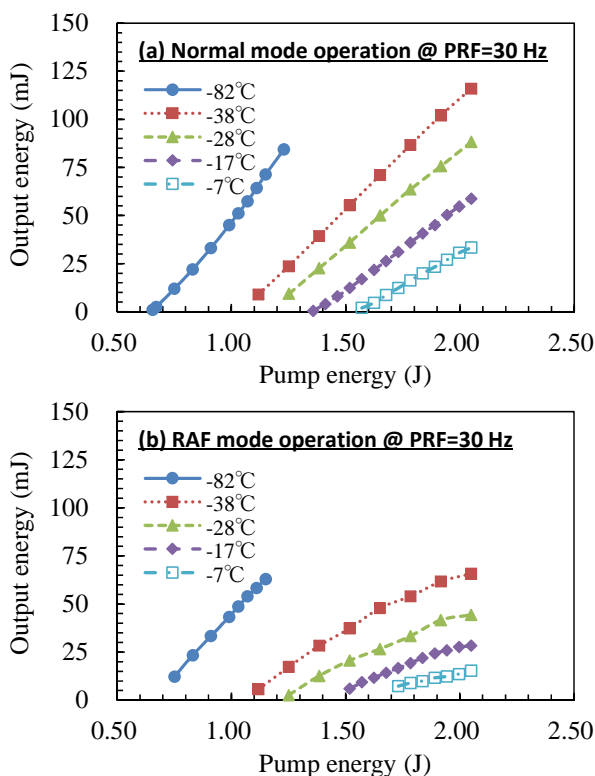


Fig. 2. Output energies of Tm,Ho:YLF laser oscillator as a function of pump energy at different rod temperature in (a) normal and (b) Q-switched mode operations.

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を置いた。共振器内には、熱レンズ効果の補償用レンズおよびAO Qスイッチを挿入した。発振器から取り出されたレーザーパルスは、レーザーモジュールと2個のプリズムミラーから構成される増幅器によってダブルパス増幅された後、最終的な出力として取り出される。

3. 実験結果および考察

レーザーロッドの冷却温度を変えて発振器のノーマルおよびQスイッチ発振の入出力特性を評価した。Qスイッチ発振時には、インジェクションシーディング (Ramp-and-fire 技術) を実施して、単一波長動作ならびに単一方向発振を実現している。Fig.2 に実験結果を示す。Tm,Ho:YLF レーザーは、準四準位レーザーであるので、レーザー下準位が、わずかに熱的に占有されている。そのため、温度上昇と共に再吸収が大きくなり、それによって発振閾値が増加する。-80°C付近では、ノーマルおよびQスイッチ発振で発振閾値が、それぞれ0.66および0.67 Jであったのに対し、ターゲットとしている-40°C付近では、発振閾値がそれぞれ1.1 J付近まで増加した。それ以上の温度でも、温度上昇と共に閾値が増加していく。-38°C・1.5 J励起時では、ノーマルおよびQスイッチ発振で、それぞれ1.66 W (55.3 mJ, 30 Hz) および1.12 W (37.3 mJ, 30 Hz) の平均出力が得られた。また、最大励起時には、Qスイッチ動作で平均出力1.97 W (65.8 mJ, 30 Hz)、パルス幅120 nsの動作を達成している。ノーマル発振に対する

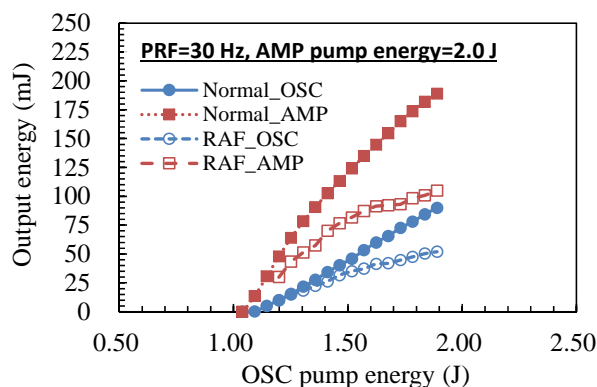


Fig. 3. Output energies of Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier as a function of pump energy for oscillator at -38°C.

Qスイッチ発振の抽出効率、発振閾値から最大励起時にかけて、100%近くから57%まで低下している。この理由は、強励起時に、Ho基底準位の枯渇 (GSD) によりTmからHoへのエネルギー遷移効率が低下するからである。

Fig. 3に、増幅器用のレーザーモジュールに2.0 Jの励起エネルギーを与えた際の、-38°CでのTm,Ho:YLF MOPAのノーマルおよび単一波長Qスイッチ発振の入出力特性を示す。増幅器への入射光量の増加に伴い、増幅率の飽和が起こっている。最大励起時には、ノーマルおよびQスイッチ発振で、それぞれ2.1および2.0の増幅率が得られている。ノーマル発振時には、発振器の最大励起時 (=1.9 J) に増幅器出力で、5.67 W (189 mJ, 30 Hz) の平均出力動作を達成した。Qスイッチ発振時には、エネルギー遷移効率の低下によるスロープ効率の低下が見られたが、135 nsのパルス幅で3.14 W (105 mJ, 30 Hz) の平均出力動作を達成した。このとき、ノーマル発振に対するQスイッチ発振の抽出効率は55%だった。

4. まとめ

衛星搭載 CDWL 送信機の基盤研究として、-40°Cのレーザーロッド冷却温度で動作する伝導冷却型の100 mJ級単一波長Tm,Ho:YLF MOPAシステムの研究開発を実施した。増幅後の出力として、ノーマル発振で5.67 W (189 mJ, 30 Hz)、単一波長Qスイッチ発振で3.14 W (105 mJ, 30 Hz) の平均出力動作を達成している。

今後は、より高い温度でのTm,Ho:YLFレーザーの高出力動作化を目指す。そのため、より短いレーザーロッドを高密度励起することで発振閾値の低下を図り、それに加えて、Hoのドープ率の最適化を実施して、Qスイッチ動作時のスロープ効率低下の改善を行う。また、マルチパルス動作によるQスイッチ発振時の効率的なエネルギー抽出技術の研究も実施する。

参考文献

- 1) S. Ishii, et al.: J. Meteor. Soc. Japan **95** (2017), <http://doi.org/10.2151/jmsj.2017-017>.
- 2) A. Sato, et al.: IEEE Photo. Tech. Lett. **29** (2016) 134.