

衛星搭載ドップラー風ライダーのための 6W級伝導冷却型 Tm, Ho:YLF MOPA の研究開発

青木 誠¹, 佐藤 篤², 石井 昌憲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 6-watt-class conductively cooled Tm,Ho:YLF MOPA for spaceborne Doppler wind lidar

Makoto AOKI¹, Atsushi SATO², and Shoken ISHII¹

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: NICT has been developing a conductively cooled, Q-switched 2- μm Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier (MOPA) to meet a requirement for a spaceborne CDWL. The MOPA system comprises a compact and stable 3.86-m-long ring resonator and a X-shaped double-pass amplifier. By changing settings of a Q-switch control unit for the MOPA system, pulse operation mode changes from single-pulse mode to double-pulse mode which is capable of efficient laser operation. Maximum pulse energies of 157 and 210 mJ, corresponding to output powers of 4.71 and 6.30 W, for single-pulse and double-pulse operations were achieved at a pulse repetition frequency of 30 Hz.

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

1. はじめに

情報通信研究機構 (NICT) では、将来の衛星からの全世界規模での風観測を目的として、衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダー (CDWL: Coherent Doppler Wind Lidar) の主要技術である光送信機およびその関連技術の研究開発を実施している。特に NICT 第 4 期中長期計画 (2016-2020 年度) では、超低高度衛星 (2017 年打ち上げ、現在実証試験中) の後継機への搭載を目指して、CDWL の光送信機の開発を進めている。

光送信機の諸元は、石井らによって参考文献 1) にまとめられている。世界気象機関に要求されている風観測精度を満たすためには、平均出力 3.75 W (パルスエネルギー 125 mJ, パルス繰り返し周波数 (PRF) 30 Hz) かつ 100 ns 以上の長パルス幅の単一波長パルスレーザーが必要とされる。この要求仕様を達成するために、高密度励起型の励起モジュール開発、レーザーロッドのパラメータ最適化を中心とした研究開発を実施し、2018 年度には要求出力を満たす平均出力 3.96 W (パルスエネルギー 132 mJ, PRF 30 Hz, パルス幅 127 ns) のシングルパス Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier (MOPA) の開発に成功した 2)。

衛星搭載の実現性を向上させるためには、要求出力に加えて、高効率動作化 (システム全体の消費電力の低減) および小型・安定動作化等も重要な課題となっている。本研究では、システム全体の消費電力を低減するために、ダブルパス構成の

増幅器とダブルパルス方式の発振手法を導入して Tm,Ho:YLF MOPA の発振効率を改善した。

2. ダブルパス Tm, Ho:YLF MOPA

Fig. 1 にダブルパス構成の Tm,Ho:YLF MOPA の実験系を示す。MOPA は、共振器長 3.86 m の小型リング共振器²⁾と X 形のダブルパス増幅器によって構成されている。発振器の励起モジュールには、レーザーロッドのパラメータ最適化の結果、最も良い発振特性が得られた直径 4.0 mm, 長さ 22 mm の Tm(4.0%),Ho(0.7%):YLF ロッドを使用した。発振器から出力されたレーザーパルスは、増幅器の励

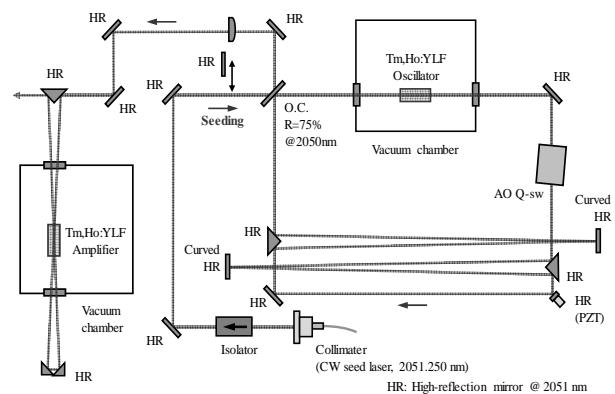


Fig. 1 Configuration of the injection-seeded, Q-switched Tm,Ho:YLF MOPA.

起領域とのマッチング効率を上げるために平凸レンズによって緩やかに集光された後、2個のプリズムミラーと増幅器用の励起モジュール（直径4.0 mm、長さ33 mmのTm(4.0%),Ho(0.4%):YLFロッドを使用）から構成されるX形のダブルパス増幅器を通り最終的な出力として取り出される。

Fig. 2にダブルパス構成のTm,Ho:YLF MOPAのQスイッチ発振時のレーザ発振特性を示す。レーザの動作温度とPRFは、シングルパス構成のTm,Ho:YLF MOPA実験時と同様に-40℃と30 Hzとした。増幅器を2回通すことによって増幅器モジュールからのエネルギー抽出効率が大幅に改善したので、以前よりも低い約3 Jのトータル励起エネルギーで125 mJのパルスエネルギー、139 nsのパルス幅が得られた。125 mJ動作時におけるビーム品質 M^2 は、ナイフエッジ法による測定の結果、水平および垂直方向ともに $M^2 < 1.15$ であることが確かめられた。最大励起時には、平均出力4.71 W（パルスエネルギー157 mJ、パルス幅102 ns）が得られた。

3. Tm, Ho:YLF MOPAのダブルパルス化

Tm,Ho:YLFレーザを強励起下で使用すると、Tm (3F_4 準位)とHo (5I_7 準位:レーザ上準位)間のエネルギー遷移効率が低下するため、Qスイッチ発振後の 3F_4 準位には、多くのエネルギーが残留する。残留したエネルギーは、レーザ発振後に上準位密度が低下した 5I_7 準位に移譲される。このとき移譲されるエネルギーが多ければ、再び反転分布が形成される。従来のシングルパルス方式では、この残留エネルギーを次の励起エネルギーに上乗せして利用するのみであったが、本研究では1回の励起に対してQスイッチ発振を2回行うダブルパルス方式を用いて、Tm,Ho:YLF MOPAの発振効率改善を図った。

Fig. 3にダブルパルス方式のTm,Ho:YLF MOPAのパルスエネルギーとパルス幅の励起エネルギー依存性を示す。実験系はFig. 1のダブルパス構成のTm,Ho:YLF MOPAを使用し、レーザの動作温度とPRFは-40℃と30 Hzとした。ダブルパルス方式時のパルスエネルギーは、1発目と2発目のパルスエネルギーの合計値であり、パルスエネ

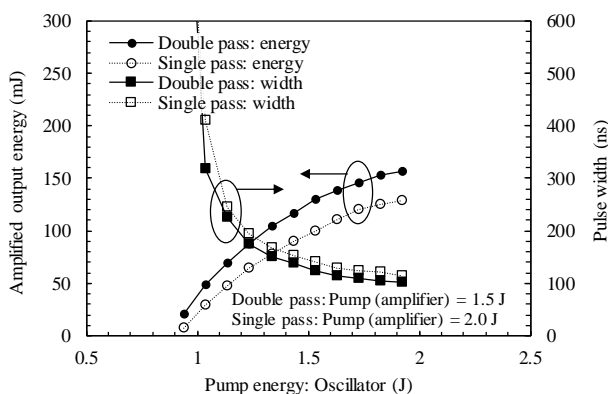


Fig. 2 Pulse energy and pulse width of the injection-seeded, Q-switched, double-pass Tm,Ho:YLF MOPA.

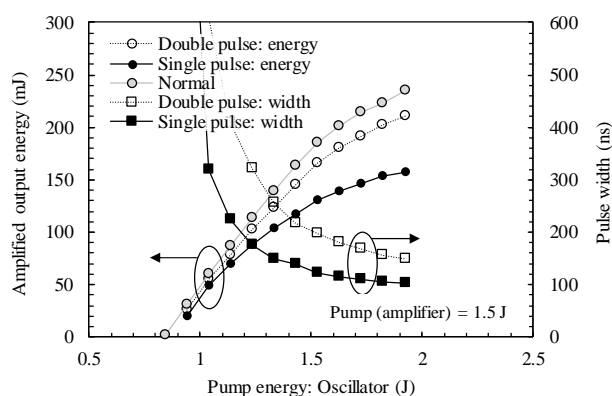


Fig. 3 Pulse energy and pulse width of the injection-seeded, Q-switched, double-pulse Tm,Ho:YLF MOPA.

ルギーの前後比率が等分になるように、Qスイッチ発振および励起のタイミングを調整した。また、両パルスともにインジェクションシーディングによる波長制御を行った。強励起時ほどTm-Ho間のエネルギー遷移効率が低下するため、ダブルパルス方式が優位になった。最大励起エネルギー時には、105 mJ/pulseに相当する6.3 Wの平均出力が得られた。この出力は、NASAの研究グループが開発を試みている2.5 W (=250 mJ×10 Hz)の伝導冷却型Tm,Ho:LLFレーザを越えるものであり、CDWLの性能指数（パルスエネルギー× $\sqrt{\text{PRF}}$ ）の面から見ても、これを凌駕している。パルスエネルギーを2分割するために、シングルパルス方式時より長パルス化が容易であり、最大励起時でも150 ns程度の長パルスを実現した。発振効率はシングルパルス方式時と比べて1.3倍であり、ノーマル発振時と比べても約10%の出力低下に抑えられた。水平および垂直方向ともに $M^2 < 1.20$ であり、ダブルパルス動作時においても高いビーム品質を持つことが確かめられた。

4. まとめ

ダブルパス構成の増幅器とダブルパルス方式の発振手法を導入してTm,Ho:YLF MOPAの発振効率を改善した。開発したTm,Ho:YLF MOPAは、風観測以外にも、各パルスをoff波長とon波長に利用したCO₂やH₂Oの差分吸収観測への応用も期待できる。今後は、開発を進めているTm,Ho:YLF MOPAを、試作した高安定管体に組み込み、各種試験を進める予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり御助言を頂いた浜松ホトニクス株式会社の福岡大岳氏に感謝致します。

参考文献

- 1) S. Ishii, et al.: J. Meteor. Soc. Japan **95** (2017) 301.
- 2) 青木 誠 他: 36th LSS, D01 (2018) 98.
- 3) A. Sato, et al.: IEEE Photo. Tech. Lett. **29** (2016) 134.
- 4) U. N. Singh et al.: Opt. Mater. Express **5** (2015) 827.