

# 超低高度衛星搭載ドップラー風ライダーのための Tm, Ho:YLF MOPA の研究開発

青木 誠<sup>1</sup>, 佐藤 篤<sup>2,1</sup>, 石井 昌憲<sup>1</sup>, 中川 勝広<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>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 conductively cooled Tm,Ho:YLF MOPA for spaceborne lidar application

Makoto AOKI<sup>1</sup>, Atsushi SATO<sup>2,1</sup>, Shoken ISHII<sup>1</sup>, and Katsuhiro NAKAGAWA<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The realization of three-dimensional global wind profile measurements provides significant benefits, such as improvement in the precision of numerical weather forecasts, understanding the causes of climate change, and optimization of airplane flight paths. 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. NICT is conducting feasibility studies of conductively cooled, Q-switched 2- $\mu\text{m}$  Tm,Ho:YLF lasers to meet a requirement for a spaceborne CDWL. In recent years, the energy extraction efficiency from Tm,Ho:YLF lasers has improved dramatically by optimizing the laser rod parameters and the resonator design. In this study, we report on a Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier (MOPA) which meets a specification of a spaceborne CDWL transmitter. A single-frequency, output energy of 132 mJ with a pulse width of 127 ns was achieved at 30 Hz and a cooling temperature of -38 °C.

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

### 1. はじめに

近年, 世界中で猛暑, 集中豪雨, 竜巻といった極端な気象現象が頻発している. このような極端現象に強い社会を実現するためには, 局地的の気象監視システムに加えて, 全地球規模で長期的に気候変動を観測・監視するシステムの構築が必要である. 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. また, 最近では, 経済的な応用の一つとして, 航空機航路最適化への利用も提案されている<sup>1)</sup>.

情報通信機構 (NICT) では, 衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダー (Coherent Doppler Wind Lidar: CDWL) の実現に向けて, その要素技術である光送信機の研究開発を進めている. 開発中の光送信機は, 超低高度衛星搭載 CDWL 光送信機の要求出力を満たす平均出力 3.75 W (パルスエネルギー 125 mJ, 繰り返し周波数 30 Hz) の伝導冷却型単一波長 Tm,Ho:YLF レーザーである<sup>2)</sup>. 2017 年度には, 高温動作と 100mJ 級の高出力動作を両立するために改良したレーザーヘッドを用いて, Double-pass Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構成して, -38 °C のレーザー

ロッド冷却温度にて, 単一波長で 3.14 W の平均出力動作を達成した<sup>3)</sup>. 本研究では, 超低高度衛星搭載 CDWL の要求出力を満たす光送信機の実現するために取り組んでいる Tm,Ho:YLF MOPA の高出力動作化について報告する.

### 2. Tm, Ho:YLF MOPA の研究開発

Fig.1 に NICT で開発を進めている Tm,Ho:YLF MOPA の構成を示す. MOPA は, 共振器長 3.86 m のリング共振器と Single-pass 増幅器によって構成されている<sup>3)</sup>. 本研究では, MOPA の更なる高出力化を図るために, レーザー媒質のパラメータの最適化を中心に研究開発を進めた.

#### 2.1 Ho ドープ率の最適化

改良型レーザーヘッド (直径 4 mm, 長さ 33 mm の Tm(4%),Ho(0.4%):YLF 結晶を使用) は, 従来の 44 mm のレーザーロッドを使用したヘッドと比べて<sup>4)</sup>, 高密度な励起を行うことにより, 高出力動作および高温動作化を実現した<sup>5)</sup>. その一方で, Ho ドープ率の最適化に関しての課題が残っており, 強励起時に Ho 基底準位の枯渇 (Ground state depletion: GSD) により, Q スイッチ発振時のスロープ効率が低下する問題を抱えていた. この問題を解決するためには, 高密度励起化および Ho ド

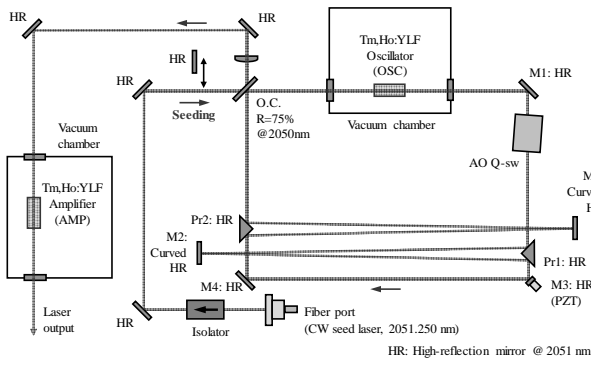


Fig. 1 Configuration of the injection-seeded, Q-switched Tm,Ho:YLF MOPA.

ープ率の増減によるトレードオフを考慮した上で、適切な Ho ドープ率を選択する必要があった。そのため、ロッド長 22 mm のロッドを用いて、改良型ヘッドよりも高密度励起化しつつ、効率的な Q スイッチ発振特性を得るために、レーザーレート方程式を用いたシミュレーションによる最適な Ho ドープ率の検討を行った。シミュレーションで最も良い結果が得られた 22 mm, Ho: 0.7% のロッドに加えて、Ho: 0.4 および 1.0% のロッドについても実験を行い、33 mm, Ho: 0.4% の改良型ヘッドの発振特性と比較した (Fig. 2)。22 mm, Ho: 0.7% のヘッドは、シミュレーション結果に従い、高密度励起による低閾値化と Ho ドープ率の増加によるスロープ効率の改善を両立した。そのため、ターゲットとしている励起エネルギー (1.45 J) 以上の領域で、比較したロッドの中で最も良い発振特性が得られた。

## 2.2 増幅器実験

最も良い性能が得られた 22 mm, Ho: 0.7% のロッドを増幅器用のレーザーヘッドに使用して、Single-pass MOPA 構成による発振器出力の増幅実験を行った。増幅実験を実施した段階では、用意できる 22 mm ロッド用のレーザーヘッドは一組だけだったので、発振器には、従来の 33 mm, Ho: 0.4% のロッドを使用したレーザーヘッドを用いた。Fig. 3 に Tm,Ho:YLF MOPA のパルスエネルギーとパルス幅の発振器励起エネルギー依存性を示す。発振器の波長は、狭線幅な固体シードレーザーを光注入同期することで、風観測に適した 2051.250nm に安定化した。発振器および増幅器の励起エネルギーが、それぞれ 1.92 および 1.90 J に対して、3.96 W (パルスエネルギー 132 mJ, 繰り返し周波数 30 Hz, パルス幅 127 ns) の平均出力が得られた。-80 °C のレーザーロッド冷却温度で、発振器単体で 100 mJ 級のパルスエネルギーを達成したときは、Q スイッチ発振のショートパルス化 (< 100 ns) が問題となっていた<sup>5)</sup>。本研究では、MOPA を採用したことにより、Q スイッチ発振のロングパルス化にも成功している。

## 3. まとめ

Tm,Ho:YLF MOPA の高出力動作化を図るために、レーザーロッドパラメータの最適化を中心と

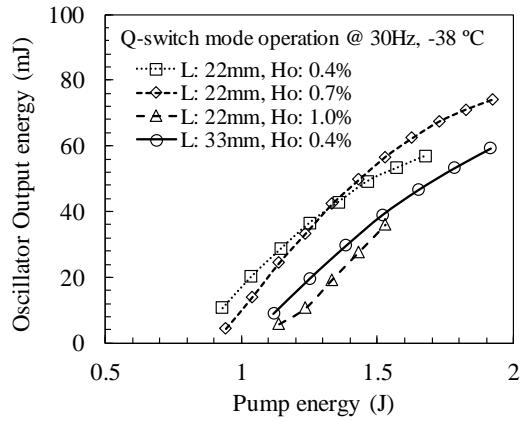


Fig. 2 Output energies of the Q-switched Tm,Ho:YLF laser oscillators with different laser rod parameters.

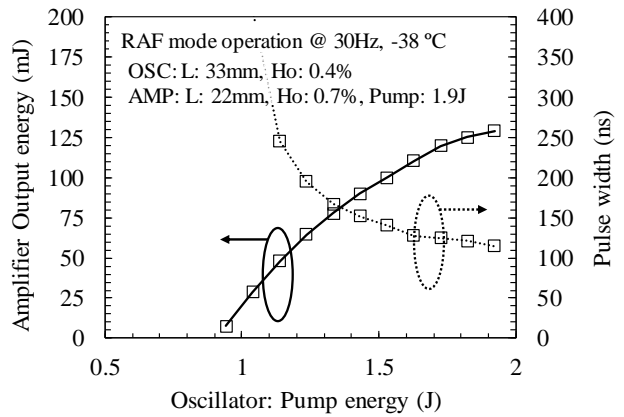


Fig. 3 Pulse energy and pulse width of the injection-seeded, Q-switched Tm,Ho:YLF MOPA.

した研究開発を実施し、超低高度搭載 CDWL の要求出力 (125 mJ, 30Hz) を満たす光送信機の開発に成功した。現在の Single-pass Tm,Ho:YLF MOPA の Wall-plug 効率は 1.3% である。今後は、Double-pass MOPA を採用し、シングルパルス発振よりも効率的な発振が可能なマルチパルス発振に切り替えることで、Wall-plug 効率の改善を進める。また、開発を進めている Tm,Ho:YLF MOPA を、衛星搭載を想定して試作した筐体に組み込み、長期動作・耐振動衝撃・耐環境性能評価などの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-Booster 2017: <https://s-booster.jp/2017/index.html>.
- 2) S. Ishii, et al.: J. Meteor. Soc. Japan **95** (2017) 301.
- 3) 青木 誠 他: 第 35 回レーザーセンシングシンポジウム, D-1 (2017) 82.
- 4) K. Mizutani, et al.: Appl. Opt. **54** (2015) 7865.
- 5) A. Sato, et al.: IEEE Photo. Tech. Lett. **29** (2016) 134.