

# 低温領域における Tm,Ho:YLF レーザーの温度特性

青木 誠<sup>1</sup>, 佐藤 篤<sup>2,1</sup>, 石井 昌憲<sup>1</sup>, 大塚 涼平<sup>3,1</sup>, 水谷 耕平<sup>1</sup>, 落合 啓<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)

<sup>3</sup>首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Temperature-dependent lasing properties of a conductively cooled Tm,Ho:YLF laser at low temperature

Makoto AOKI<sup>1</sup>, Atsushi SATO<sup>2,1</sup>, Shoken ISHII<sup>1</sup>, Ryouhei OTSUKA<sup>3,1</sup>, Kohei MIZUTANI<sup>1</sup>, and Satoshi OCHIAI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NICT, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

<sup>2</sup> Tohoku Inst. of Tech., 35-1 Yagiyama-Kasumi, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-8577

<sup>3</sup> Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

NICT is conducting research and development on a coherent wind Doppler lidar (CDWL) for satellite-based observations of wind at the global scale. A conductively cooled, Q-switched Tm,Ho:YLF laser with an eye-safe wavelength of 2.05  $\mu\text{m}$  is suitable for use as a transmitter in a space-borne CDWL and NICT has been developing that kind of laser system toward the realization of the space-borne CDWL. We are conducting the feasibility studies of a MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)-configured 2  $\mu\text{m}$  Tm,Ho:YLF laser operating at the laser rod temperature higher than  $-40^\circ\text{C}$  to meet a laser power requirement of space-borne CDWL, which is average laser power of 3.75 W (0.125 J/pulse, 30 Hz). We developed a laser head module with a lower threshold pump energy compared with our previous systems to use for oscillator and amplifier of the MOPA system. In this study, we investigated a temperature-dependent lasing properties of the newly developed laser head module at low temperature.

**Key Words:** Solid-state laser, Q-switched laser, Tm,Ho:YLF, Coherent Doppler wind lidar, CDWL

### 1. はじめに

情報通信機構(NICT)では、世界初の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、その要素技術の研究開発を行っている。衛星搭載 CDWL の送信機としては、アイセーフかつ高出力が期待できる 2  $\mu\text{m}$  帯のレーザーが望視されており<sup>1)</sup>、これまでに NICT では、パルスエネルギー 80 mJ、繰り返し周波数 (PRF) 30 Hz で動作する 2  $\mu\text{m}$  帯の LD 励起伝導冷却レーザーの開発<sup>2)</sup>、開発したレーザーを用いた航空機搭載型および可搬型の CDWL システムの研究開発に成功している。超低高度軌道衛星 (~220 km) から風観測を行う場合、2  $\mu\text{m}$  帯のレーザーにおいては、平均出力 3.75 W (パルスエネルギー 125 mJ, PRF が 30 Hz) の性能が要求されており<sup>3)</sup>、NICT で開発が行われたレーザーよりも、高効率なシステムが必要になる。

NICT は、2  $\mu\text{m}$  帯のレーザーの更なる高出力化および低消費電力化のために、ペルチェ冷却での効率的な冷却が期待できる、高温 ( $-40\sim-30^\circ\text{C}$ ) 領域で動作可能なレーザーヘッドモジュールを発振器および増幅器に用いた MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) システムを検討してい

る。その実現性を検討するために、従来のシステム<sup>2)</sup>をベースとし、励起密度の最適化を図った<sup>4)</sup>レーザーヘッドモジュールの開発を行い、実証研究を進めている。

本研究では、新たに開発した Tm,Ho:YLF レーザーヘッドモジュールの  $-90\sim-30^\circ\text{C}$  の温度帯での動作特性を報告する。

### 2. 実験の構成および内容

Fig.1 に実験に使用した 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 枚の全反射鏡および反射率 74% の出力鏡により構成し、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 (Q-sw) を挿入した。補償用レンズの焦点距離は、シミュレーションおよび実験において最適値であると確かめられた 1.5 m としている。レーザーロッドは、直径 4 mm、長さ 33 mm の 4%Tm, 0.4%Ho: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

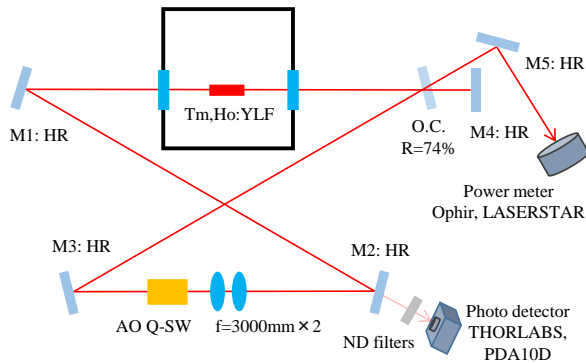


Fig. 1. Schematic of the Tm,Ho:YLF ring resonator.

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。励起モジュールは、LDの波長が792 nm付近になるように、水冷チラーで伝導冷却・温度制御されている。レーザーロッドは、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おり、その冷却温度は、超低温バスサーキュレーター(ULT-95)によって-90から-30℃の温度範囲で、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の温度安定性で制御されている。本研究では、LDのパルス幅を0.6 ms、パルス繰り返し周波数を30 Hzとして、各温度でのレーザーの動作特性を測定した。

### 3. 実験結果

図2に、新たに作製したレーザーヘッドモジュールと従来のモジュール(長さ44 mm)を用いて測定したノーマルおよびQ-sw出力の温度依存性を示す。それぞれ、励起エネルギー1.45および1.58 Jをプローブとして用いた。測定条件は、LDを効率的に使用するために、パルス幅を0.6 msで使用した点(以前は1 msで励起)および熱レンズ効果の補償用レンズが異なること(長さ44 mmのロッド使用時は3 m)以外は同じである。恐らく、励起モジュールの一部に損傷が生じたことが原因で、最も高い出力エネルギーが得られていた時より(図3のデータを参照のこと)、10-20 mJ程度出力が低下してしまっているが、励起密度の最適化を図ったことにより、発振閾値が大幅に低下し、従来のモジュールに比べて高温領域でのレーザー発振が可能になったことがわかる。ノーマル発振およびQ-sw発振動作時のビーム品質は、ナイフエッジ法による測定の結果、水平方向および垂直方向共に、どの温度であっても $M2 < 1.3$ であることが確かめられた。また、高温動作時ほど、ビームの品質は良くなり、-40℃では $M2 < 1.1$ となることも確かめられた。図3に、レーザーロッド冷却温度-37.5℃での、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。ノーマル発振時に比べて、Q-sw発振時のパルスエネルギーの増加が緩やかなのは、高温動作および高密度励起したことに起因するTm-Ho遷移効率の低下が原

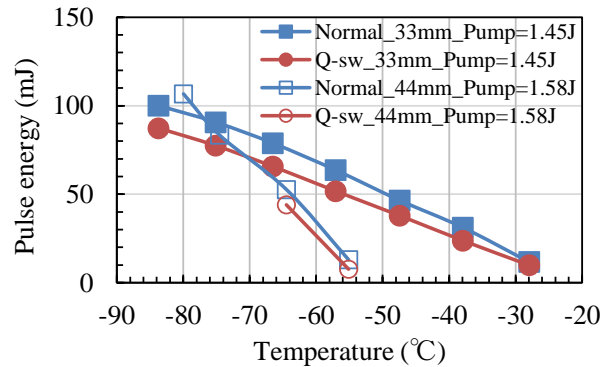


Fig. 2. Temperature-dependent output energies of the Tm,Ho:YLF laser for different rod lengths of 33 and 44 mm as a function of pump energy. The pump energies are 1.45 and 1.58 J, respectively.

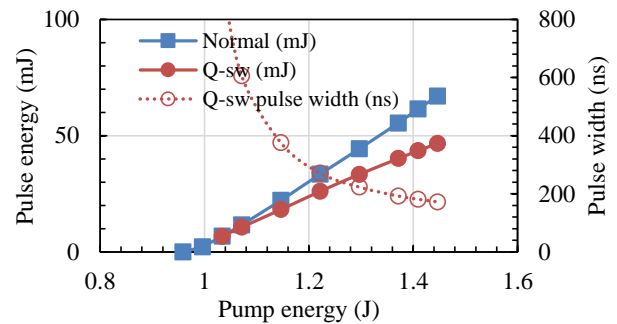


Fig. 3. Output energies and pulse width of the Tm,Ho:YLF laser as a function of pump energy at the laser rod temperature of  $-37.5^\circ\text{C}$ .

因だと考えられる。1.45 J励起時には、Q-sw出力で47 mJ(パルス幅は172 ns)を達成している。

### 4. まとめ

本研究では、従来のモジュールと比べて、高密度励起化されたレーザーヘッドモジュールの低温領域でのレーザー発振特性について報告した。発振閾値が大幅に低下したことにより、従来のモジュールに比べて高温領域(-40~-30℃)でのレーザー発振が可能となり、ロッド冷却温度-37.5℃ではQ-sw動作で47 mJ(1.45 J励起時)の出力が得られた。今後は、高温領域での更なる高効率化、共振器の小型化、およびMOPA構成での検証実験を進め、衛星搭載CDWLの仕様を満足するレーザーの開発実証を行う予定である。

### 参考文献

- 1) U. N. Singh et al.: Opt. Mater. Express **5** (2015) 827.
- 2) S. Ishii et al.: Appl. Opt. **49** (2010) 1809.
- 3) S. Ishii et al.: SOLA **12** (2016) 55.
- 4) A. Sato et al.: submitted to Opt. Lett. (2016).