

# 波長 1.9 $\mu\text{m}$ 帯高出力 Tm:YLF パルスレーザーの開発

佐藤 篤<sup>1</sup>, 石井 昌憲<sup>2</sup>

<sup>1</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>2</sup>東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Development of a High-Energy, Pulsed Tm:YLF Laser at 1.9 $\mu\text{m}$

Atsushi SATO<sup>1</sup> and Shoken ISHII<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yagiyama-kasumi-cho, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi 982-8577

<sup>2</sup>Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, Japan 191-0065

**Abstract:** An intracavity pumping scheme for a resonantly pumped Q-switched Ho:YLF laser was investigated. Tm and Ho lasers were designed by using a rate-equation model. The results of simulations indicated that 100-mJ-level Q-switched operations of the Ho:YLF laser can be expected under 1.5-J diode pumping. A side-pumped Tm:YLF rod laser was developed as an intracavity pump source of the Ho:YLF laser. Lasing in normal mode operations was achieved at room temperature.

**Key Words:** Solid-state laser, 2-micron laser, Doppler lidar

### 1. はじめに

筆者らは、数値予報精度の向上や防災・減災対策などに寄与する全球的な風の空間分布観測を目指し、将来的な衛星搭載も想定したドップラー風ライダーの研究開発を進めている<sup>1)</sup>。先行研究において、超低高度衛星搭載を目標とした要求仕様である平均出力 3.75 W の波長 2  $\mu\text{m}$  帯レーザーの動作実証に成功したが、動作温度が  $-40^{\circ}\text{C}$  以下と低いことに起因する高い消費電力が課題となっていた<sup>2)</sup>。そこで、Ho レーザーにおいて室温で高効率動作を実現するための方法として、前回のシンポジウムにおいて Tm ロッドレーザーを励起光源に用いた共振器内共鳴励起方式 Ho レーザーを提案した<sup>3)</sup>。本研究では、共振器内共鳴励起方式 Ho レーザーの設計手法の確立と 100 mJ 級 Ho レーザーの基礎設計、さらに励起用 Tm:YLF レーザーの試作を行ったので、それらの結果を報告する。

### 2. レーザー設計

Fig. 1 に共振器内共鳴励起型 Ho:YLF レーザーの構成を示す。Ho:YLF レーザーの励起光源となる Tm:YLF レーザーは、半導体レーザー(LD)による側面励起型となっている。Ho:YLF レーザーは、LD による励起はされず、Tm:YLF レーザーによる端面励起のみとなる。このとき、Tm:YLF レーザー光( $\lambda \sim 1.94 \mu\text{m}$ )は、結晶端面のダイクロイックコーティングにより構成された Tm:YLF レーザー共振器内のみを往復し、Ho:YLF 結晶を共振器内励起する。

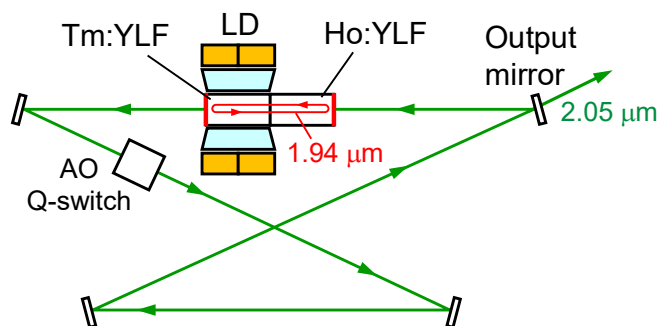


Fig. 1. Intracavity pumping configuration of the Q-switched Ho:YLF laser pumped by the diode-side-pumped Tm:YLF laser.

この励起方式の場合、Tm:YLF レーザーの出力結合は出力鏡からの透過分ではなく、Ho:YLF 結晶での吸収分となる。これは、波長依存性のある透過特性(=Ho:YLF の吸収特性<sup>4)</sup>)を持った出力鏡を用いることと等価である。Fig. 2(a)及び(b)にそれぞれ通常出力鏡を用いた場合及び共振器内励起の場合の Tm:YLF レーザーの発振しきい値を示す。いずれも波長 1905~1910 nm 付近において最も発振しきい値が低くなるが、Fig. 2(b)では、Ho:YLF 結晶の吸収特性が反映されているため、波長依存性がより顕著に現れることが確認できる。なお、これらの計算は室温条件下を仮定して行っているが、レーザー発振中に Tm:YLF 結晶が高温になる場合は、レーザー下準位イオンによるレーザー光の再吸収のため、短波長側ほど発振しきい値が上昇することが想定される。

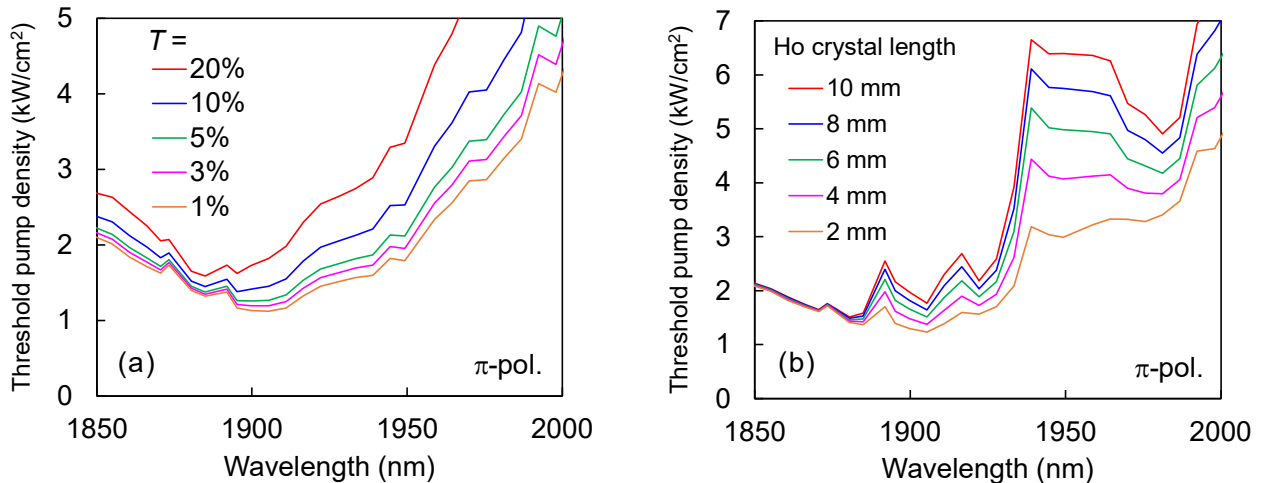


Fig. 2. Calculated threshold pump densities of the Tm:YLF laser for the  $\pi$  polarization. (a) Conventional laser with an output mirror; (b) Intracavity pumped laser with a Ho:YLF crystal.

以上の計算結果に基づき、Tm:YLF 結晶の仕様を直径 3 mm、長さ 8 mm、Tm ドープ率 6%とし、ノーマル発振出力のシミュレーションを行った。シミュレーションには、準 4 準位レーザーを仮定したレート方程式<sup>5)</sup>を用いた。Fig. 3 に出力結合に対する出力エネルギーの計算結果を示す。前述したように、横軸の出力結合は Ho:YLF 結晶での吸収率に相当する。Fig. 3 より、最適出力結合は 5~10%であり、また例えば 200 mJ 以上の出力を得るためには 1.5 J の励起エネルギーが必要であることがわかった。一方、Ho:YLF 結晶のドープ率や長さは、Tm:YLF レーザーの最適出力結合に相当する吸収量になるように選ばばよい。ただし、Q スイッチ動作では、レーザー下準位イオンが励起により枯渇しないように最適条件よりも Ho ドープ率を高め、あるいは結晶長を長めに設計する必要がある。そこで、直径 3 mm、長さ 7.5 mm、Ho ドープ率 0.5%を実用上の最適設計値と仮定し、Ho:YLF レーザーの Q スイッチパルス出力を計算した。Fig. 4 にシミ

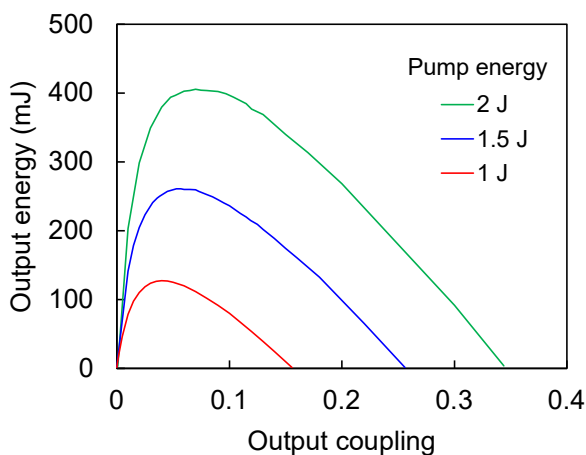


Fig. 3. Calculated output energy of the normal-mode Tm:YLF laser as a function of output coupling.

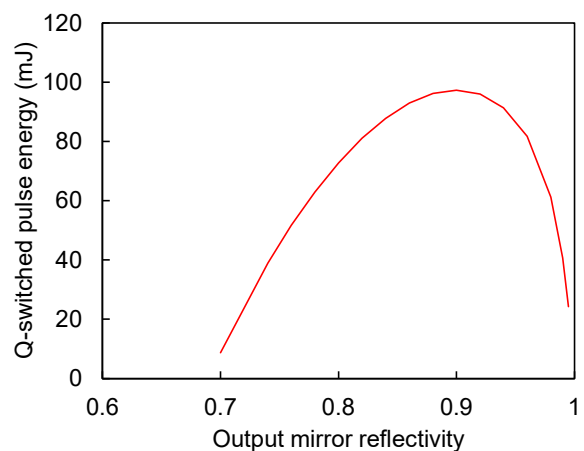


Fig. 4. Calculated pulse energy of the intracavity pumped Q-switched Ho:YLF laser as a function of output mirror reflectivity.

シミュレーション結果を示す。励起エネルギーは 200 mJ とした。この条件下において、出力鏡反射率を最適値である 90% とすることにより、Q スイッチパルス出力 100 mJ を達成できる見通しを得た。パルス幅は共振器長にほぼ比例し、4 m のリング型共振器では 275 ns となる。この場合、共振器内レーザー光強度は 78 MW/cm<sup>2</sup> であり、光学損傷しきい値以下でのレーザーの実現が期待できる。

### 3. Tm:YLF レーザーの開発

Fig. 5 に Ho レーザーの励起用として試作した Tm:YLF レーザーの外観を示す。レーザーヘッドは、3 方向からの側面励起構造とした。励起光源は、ピークパワー 600 W の 3 段スタック型 LD である。レーザーロッドは、前述のシミュレーションと同じ仕様(直径 3 mm、長さ 8 mm、Tm ドープ率 6%)とした。反射率 97% の出力鏡を用いて行ったレーザー発振試験の結果を Fig. 6 に示す。光共振器は、平面全反射鏡と凹面出力鏡からなる共振器長 100 mm のファブリーペロー型とした。励起パルス長 1 ms に対し、励起開始から 0.7 ms 経過後、スパイク状のノーマル発振パルスが確認された。目下のところ、LD ドライバーの仕様上の制限により発振しきい値付近の動作しかテストできないため、また低しきい値化のため出力結合を小さくしているため、出力エネルギーは 7 mJ 程度である。今後、励起エネルギー 1.5~2 J の動作試験に移行する予定である。

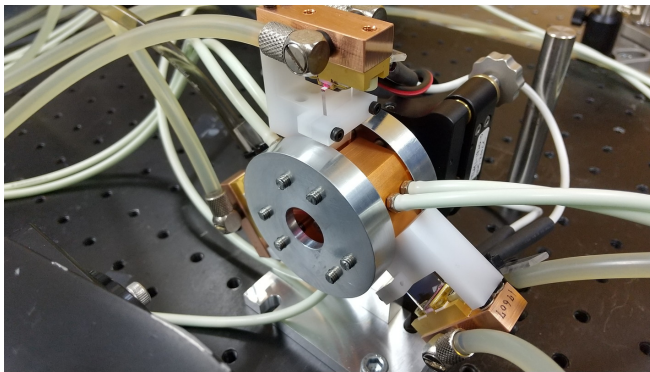


Fig. 5. Photograph of the side-pumped Tm:YLF laser.

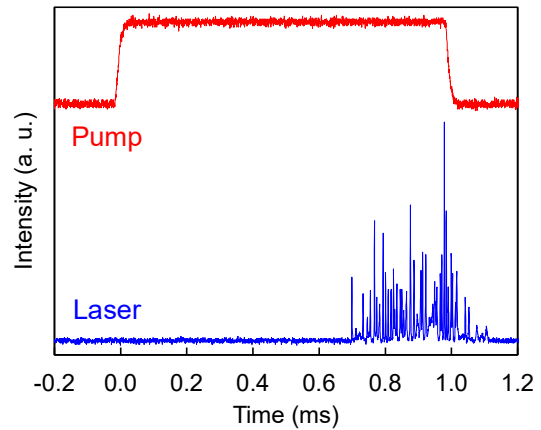


Fig. 6. Typical pulse shape of the Tm:YLF laser in normal-mode operations.

### 4. まとめ

本研究では、波長 2  $\mu\text{m}$  帯高出力パルスレーザーの高効率化を目的として開発を進めている共振器内共鳴励起型 Ho レーザーの設計手法を確立し、100 mJ 級レーザーの設計例を示した。また、シミュレーションで得られた結果に基づき、Ho レーザー励起用の側面励起型 Tm:YLF レーザーを試作し、レーザー発振を確認した。今後、高出力化を進め、室温動作が可能な 100 mJ 級 Q スイッチ Ho レーザーの実現を目指す。

### 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K04929 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) S. Ishii, P. Baron, M. Aoki, A. Sato, K. Okamoto, T. Ishibasi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh, T. Iwasaki, M. Yasui, K. Mizutani, S. Ochiai, Y. Satoh, D. Sakaizawa, R. Oki, and T. Kubota: *J. Meteor. Soc. Japan* **95** (2017) 301.
- 2) A. Sato, M. Aoki, S. Ishii, R. Otsuka, K. Mizutani, and S. Ochiai: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** (2017) 134.
- 3) 佐藤 篤, 石井昌憲: 第 39 回レーザーセンシングシンポジウム (2021) C1.
- 4) B. M. Walsh, N. P. Barnes, and B. D. Bartolo: *J. Lumin.* **90** (2000) 39.
- 5) A. Sato, K. Asai, Y. Miyake, S. Ishii, K. Mizutani, and S. Ochiai: *Proc. SPIE* **9262** (2014) 926215.