

共鳴励起型 Ho:YLF レーザーにおける共振器内励起方式の検討

佐藤 篤¹, 石井 昌憲²

¹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)

²東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Investigation of an Intracavity Pumping Scheme for a Resonantly Pumped Ho:YLF Laser

Atsushi SATO¹ and Shoken ISHII²

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

²Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, Japan 191-0065

Abstract: An intracavity pumping scheme for a resonantly pumped Ho:YLF laser was proposed. In this pumping scheme, the Ho:YLF laser is end-pumped inside the side-pumped Tm:YLF laser cavity. This laser has several advantages including high cross-relaxation efficiency, efficient Tm-Ho energy transfer, minimal heating, and high beam quality. The side-pumped Tm:YLF laser was developed as a pump source of the Ho:YLF laser. In preliminary experiments, the laser produced an output energy higher than 60 mJ in normal-mode operation.

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

1. はじめに

Ho ドープ結晶を用いた波長 $2\mu\text{m}$ 帯固体レーザーは、風、二酸化炭素や水蒸気を測定対象としたコヒーレントライダー用光源として用いられている^{1,2)}。Ho レーザーの励起方式及び発振方式には、いくつかの選択肢があり、用途に応じて決定される。高パルスエネルギー動作には、多段スタック型の励起用半導体レーザー(LD)が必要になることから、サイドポンプ構成で高い励起光吸収率が得られる Tm,Ho コドープ結晶を用いたレーザーが適している。ただし、この構成では、室温動作が可能な高い励起密度を得ることは難しく、低温での動作が必要になる場合が多い³⁾。これに対し、近年、利用されることが多くなった Tm ファイバーレーザーによる Ho 上準位共鳴励起型レーザーは、エンドポンプ構成となるため、低い励起パワーでも高密度励起が可能である。従って、高パルスエネルギー動作には向いていないが、室温動作は比較的容易である⁴⁾。しかしながら、励起光源である Tm レーザー自体が LD 励起型レーザーであることから、レーザー出力を得るまでに 2 回の励起及び発振過程が含まれている。本研究では、Tm レーザー共振器内での Ho 結晶の共鳴励起方式を提案し、その Q スイッチパルス動作への適用について検討する。また、Ho レーザーの励起に用いる Tm:YLF レーザーの開発状況について報告する。

2. 動作原理及びレーザーの構成例

Fig.1 に共鳴励起型 Ho レーザーのエネルギー遷移過程を示す。Ho の励起波長は $1.94\mu\text{m}$ 付近であるが、この波長帯の LD はまだ高出力化や高効率化が進んでおらず、励起光源には Tm ファイバーレーザーや Tm

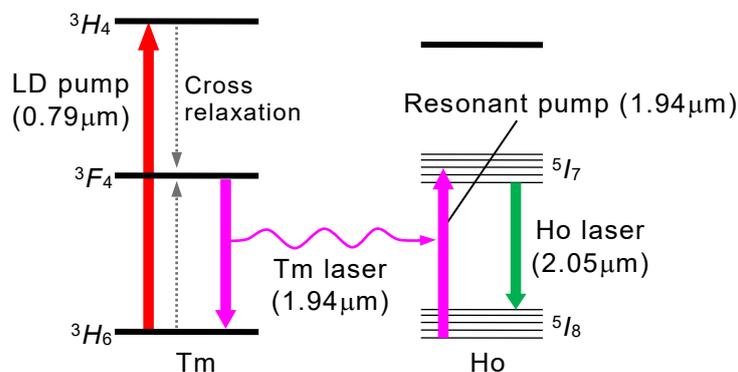


Fig.1. Energy-level diagram of a resonantly pumped Ho laser.

結晶を用いたレーザーが用いられることが多い。本研究では、Tm:YLF レーザーの利用を想定している。Tm レーザーは、波長 $0.79\mu\text{m}$ 付近の LD により励起され、クロス緩和過程の後、波長 $1.94\mu\text{m}$ 付近で発振する。後述する Tm,Ho コドープレーザーでは、 $\text{Tm } ^3F_4$ 準位と $\text{Ho } ^5I_7$ 準位の間で準熱平衡状態が形成されることにより Tm イオンから Ho イオンへのエネルギー移譲が行われる。しかしながら、Ho イオンをドープすることによって $\text{Tm } ^3H_4$ 準位から Ho イオンへのエネルギー流出が起こってしまうため、Tm シングルドープレーザーではクロス緩和過程が量子効率をほぼ 2 倍に高めるのに対し、コドープレーザーでのその効果は 1.6 倍程度に止まる⁵⁾。Fig.2 に Tm,Ho コドープレーザー及び共鳴励起レーザーの構成例を示す。励起方法の違いを明確に示すために、Q スイッチなどの光学素子は省略し、共振器は単純なファブリーペロー型としている。Fig.2(a)に示されるように、コドープレーザーは最も構成がシンプルであり、励起と発振の過程は 1 回ずつしか含まれない。しかしながら、前述のクロス緩和効率の低下の問題や室温付近での Tm-Ho 遷移効率の低下の問題⁶⁾などが生じる。Fig.2(b)に示される一般的な Tm レーザー励起型 Ho レーザーは、Ho レーザー部での効率は良いが、一度、Tm レーザーを発振させなければいけないため、全体の効率には Tm レーザーの発振効率や Ho 結晶での吸収効率も含まれることになる。これに対し、Fig.2(c)に示されるように、本研究で提案する共振器内での共鳴励起方式では、Tm レーザーの出力結合がそのまま Ho レーザーの励起入力となるため効率が良く、コドープレーザーで見られる効率低下要因も生じない。また、波長 $1.94\mu\text{m}$ 帯は水蒸気の吸収線の影響を受けるが、Tm 結晶と Ho 結晶を接合し、その両端面に波長 $1.94\mu\text{m}$ に対して全反射(HR)、波長 $2.05\mu\text{m}$ に対して無反射(AR)のコーティングを施すことにより、水蒸気の吸収線の影響を受けずに Tm レーザーの発振ならびに Ho 結晶の励起が可能である。さらに、エネルギー遷移の高効率化により結晶からの発熱そのものを低減できること、排熱面となる結晶側面の面積を大きく取れることも本方式のメリットである。

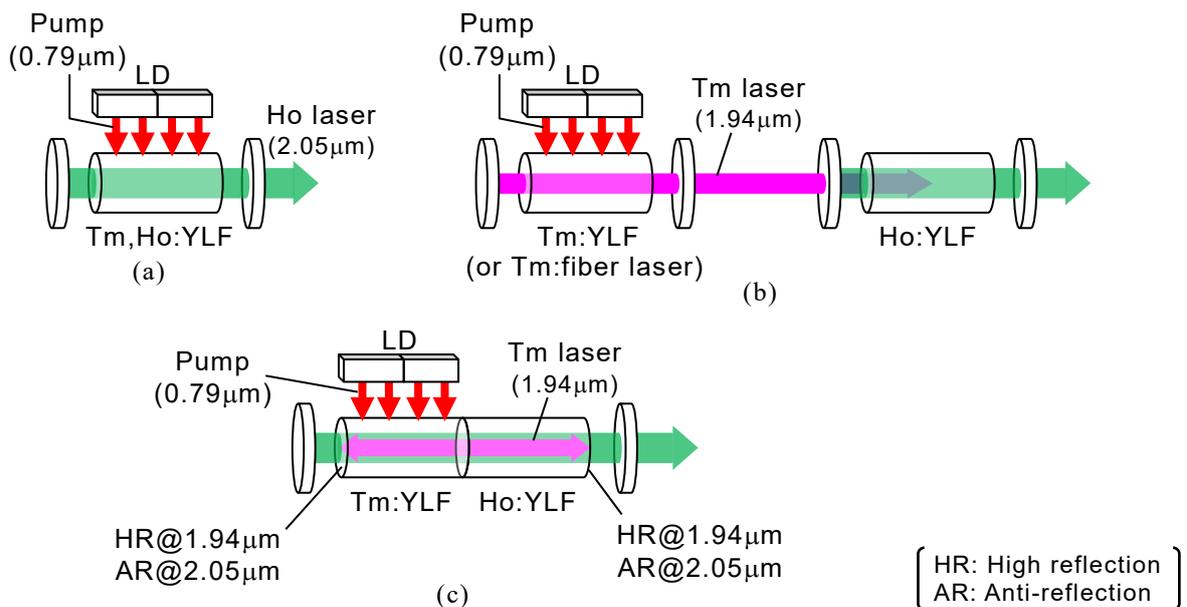


Fig.2. Comparison of the different pumping schemes. (a) Tm,Ho-codoped laser. (b) Conventional Tm-laser-pumped Ho laser. (c) Intracavity-pumped Ho laser (This work).

3. 励起用 Tm:YLF レーザーの開発

レーザー開発は、Ho レーザーの励起光源となる Tm:YLF レーザーの試作から着手した。Fig.3 に予備実験のために構築した側面励起型 Tm:YLF レーザーの構成を示す。結晶には、Tm ドープ率 4 at.% の Tm:YLF を使用した。結晶長は 2.7mm であり、結晶端面はノンコートでブリースターカットされている。結晶温度は、結晶の上下面を固定している銅製ヒートシンクの冷却水温度により調整した。励起光源には、中心波長 792nm の 2 段スタック型 LD を 2 個使い、励起方式は、結晶両側からの側面励起型とした。励起光は、ロッドレンズで軸方向をコリメートした後、焦点距離 25.4mm のレンズで結晶内に集光した。光共振器は、反射率 89% の出力鏡及び平面全反射鏡からなるファブリーペロー型とした。この場合、出力結合は 11% となるが、共振器内励起型 Ho レーザーの設計では、この Tm レーザー共振器からの取り出し分を Ho 結晶での吸収率と考える。Fig.4 にノーマル発振時の入出力特性を示す。実験は、結晶温度 15°C 、繰り返し周波

数 5Hz, 励起パルス幅 5ms の条件下で行った。励起エネルギー563mJ に対し, 出力パルスエネルギー62mJ が得られた。スロープ効率は, 16.7%であった。以上の結果に基づき, 現在, より高出力のサイドポンプ型 Tm:YLF レーザーの開発を進めている。予備実験ではセーブしている繰り返し周波数は, 10~30Hz 程度まで高める予定である。Ho レーザーの共振器内励起実験に移行する際には, Tm レーザーの共振器ミラーをダイクロイックミラー(HR@1.94 μ m, AR@2.05 μ m)に置き換え, Tm レーザー共振器内に Ho 結晶を配置し, それら全体をレーザーヘッドとして Ho レーザー共振器内で増幅部として用いる。Tm レーザーの目標出力としては 100mJ を目指し, 今後, 励起用 LD の高出力化ならびにレーザー結晶の最適化により, これを実現する。

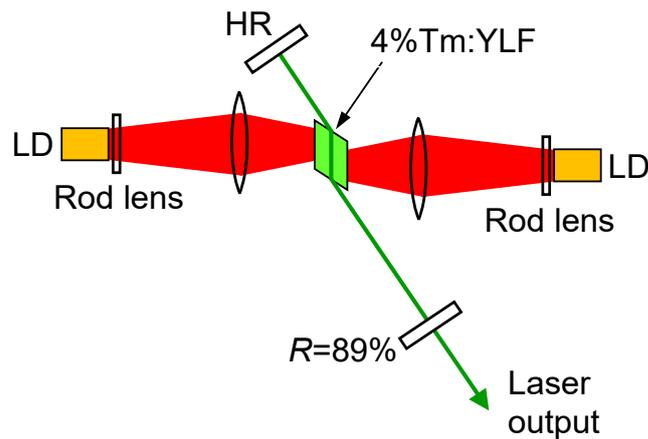


Fig.3. Resonator configuration of the Tm:YLF laser.

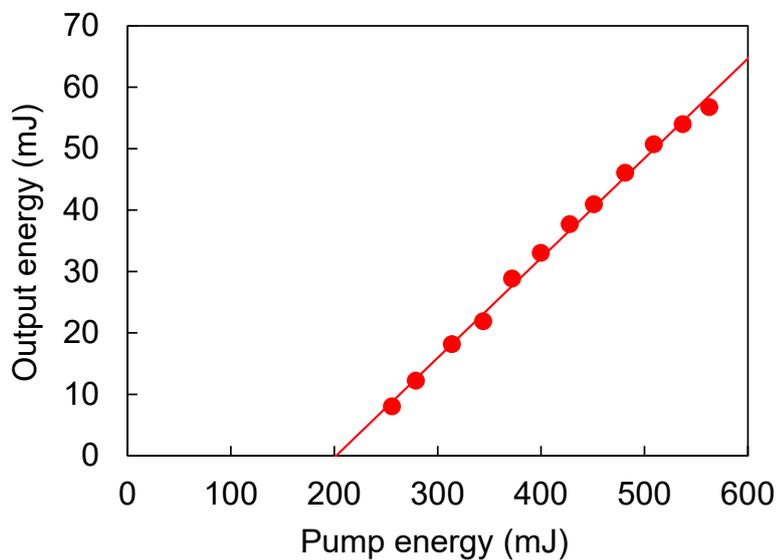


Fig.4. Output energy of the Tm:YLF laser as a function of pump energy.

4. まとめ

本研究では, 波長 2 μ m 帯 Ho レーザーの高効率化の手法として, Tm レーザー共振器内での Ho レーザーの共鳴励起方式について検討した。励起光源となる Tm:YLF レーザーを試作し, ノーマルモード出力 62mJ を得た。今後, Tm レーザーの高出力化を行った後, 共振器内励起実験に移行し, 同時に動作解析によるアプローチも進めていく。

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, K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, B. Philippe, H. Iwai, T. Aoki, T. Itabe, A. Sato, and K. Asai: *Appl. Opt.* **49** (2010) 1809.
- 2) T. F. Refaat, U. N. Singh, J. Yu, M. Petros, S. Ismail, M. J. Kavaya, and K. J. Davis: *Appl. Opt.* **54** (2015) 1387.
- 3) A. Sato, M. Aoki, S. Ishii, R. Otsuka, K. Mizutani, and S. Ochiai: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** (2017) 134.
- 4) K. Mizutani, S. Ishii, M. Aoki, H. Iwai, R. Otsuka, H. Fukuoka, T. Ishikawa, and A. Sato: *Opt. Lett.* **43** (2018) 202.
- 5) A. Brenier, J. Rubin, R. Moncorge, and C. Pedrini: *J. Phys. France* **50** (1989) 1463.
- 6) B. M. Walsh, N. P. Barnes, and B. D. Bartolo: *J. Lumin.* **90** (2000) 39.