

# Tm,Ho:YLF レーザーにおける Q スイッチパルス出力の 温度及び励起強度依存性

Dependence of a Q-switched pulse energy on temperature and pumping intensity  
in a Tm,Ho:YLF laser

佐藤 篤<sup>1,2</sup>, 三宅良宜<sup>1</sup>, 浅井和弘<sup>1</sup>, 石井昌憲<sup>2</sup>, 水谷耕平<sup>2</sup>, 落合 啓<sup>2</sup>  
Atsushi Sato<sup>1,2</sup>, Yoshiki Miyake<sup>1</sup>, Kazuhiro Asai<sup>1</sup>, Shoken Ishii<sup>2</sup>, Kohei Mizutani<sup>2</sup>, and Satoshi Ochiai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北工業大学, <sup>2</sup>情報通信研究機構

<sup>1</sup>Tohoku Institute of Technology, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology

## Abstract

A Tm,Ho:YLF laser is a promising candidate for coherent Doppler lidar applications because its favorable lasing properties and reliability. In this laser, the laser efficiency increases with decreasing the temperature because the lower temperature can not only reduce ground-state reabsorption but also increase the energy-transfer efficiency from Tm to Ho. However, there is a trade-off between the laser efficiency and the power consumption of the cooling system. In order to maximize an output pulse energy of this laser system, a Tm-Ho transfer efficiency is a key parameter since it depends on both temperature and pumping intensity. In this study, a ground-state Ho density, which is related to the Tm-Ho transfer efficiency, was measured with a side-pumped Tm,Ho:LLF laser, which is an isomorph of Tm,Ho:YLF, by using a pump-probe technique at 640 nm.

## 1. はじめに

風向風速の空間分布の観測は、気象予測精度の向上や気候モデルの改良などに必要とされており、現在、情報通信研究機構(NICT)や気象庁気象研究所(MRI)、宇宙航空開発研究機構(JAXA)などが中心となり、全球的な風ベクトル観測を目指し、衛星搭載型コヒーレントドップラーライダー(CDL)の開発や観測システムシミュレーション実験(OSSE)によるインパクト検証が進められている<sup>1)</sup>。CDL に用いる光送信機用レーザーとしては、その発振波長や光学的・物理的性質ならびに NICT におけるこれまでの開発実績などから波長 2 $\mu$ m 帯で発振する Tm,Ho:YLF レーザーが有望である。NICT では、Q スイッチパルス出力 125mJ $\times$ 30Hz の Tm,Ho:YLF レーザー送信機を開発を進めているが、現行のシステムでは、レーザー結晶温度が $-80^{\circ}\text{C}$ と低温であるため、その冷却器だけで約 200W の電力を消費する。これは、レーザー発振器の電力消費量の2倍以上に相当する。レーザー結晶の温度を高めることは、発振効率の低下を引き起こすが、冷却器の消費電力の低減につながる。このことは、システム全体で見た場合には、必ずしもレーザー結晶を可能な限り低温にすればよいわけではなく、結晶温度に最適値が存在することを意味する。しかしながら、Tm,Ho コドープ結晶を用いた Q スイッチレーザーは、Tm-Ho イオン間の複雑なエネルギー遷移過程のため結晶温度の最適化が難しい。Q スイッチパルス出力への影響が大

きい Tm-Ho 遷移効率は、結晶温度を高めると低下してしまいが、励起密度を高めることによっても低下する。これは、冷却器の消費電力を抑えるために結晶温度を高めた場合、レーザー下準位イオンによる再吸収損失の増加を補うために励起密度を高める必要があるが、このとき Tm-Ho 遷移効率は低下することを意味する。励起強度依存性も考慮した結晶温度の最適化は、レート方程式モデルを用いた解析によって可能であるが、エネルギー遷移に関するパラメータが多くモデルが複雑な Tm,Ho コドープレーザーでは、特に Tm-Ho 遷移効率の実測値による裏付けが正確な解析を行う上で不可欠である。そこで、本研究では、ポンププローブ法による Tm-Ho 遷移効率の直接測定手法について検討し、その基礎実験を行ったので報告する。

## 2. Tm-Ho 遷移効率

Fig.1 は、Tm,Ho:YLF レーザーのエネルギー遷移過程を示す。波長 792nm の光で励起された Tm イオンは、クロス緩和過程を経て、 $^3F_4$  準位(準位②)へと励起される。その後、Ho  $^5I_7$  準位(準位⑦)へエネルギーが移譲されるが、その際、準位②-⑧間及び準位⑦-①間でエネルギーのやりとりが行われ、数百 $\mu$ s 後に準熱平衡状態となる。このときのエネルギー遷移レートをそれぞれ  $p_{28}$  及び  $p_{71}$  とし、平衡定数として  $\Theta(T) = p_{71}/p_{28}$  を定義すると、励起強度依存性を考慮に入れた Tm-Ho 遷移効率  $f_{\text{Ho}}$  は、式(1)及び(2)で与えられる<sup>2)</sup>。

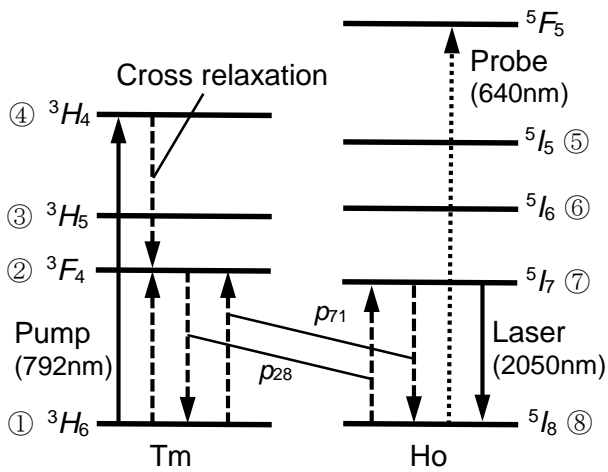


Fig.1 Energy-level diagram.

$$\frac{N_7}{C_{Ho}} = \frac{N_2}{C_{Tm}} \frac{1}{\Theta(T) + (1-\Theta(T)) \frac{N_2}{C_{Tm}}} \quad (1)$$

$$f_{Ho} = \frac{1}{1 + N_2/N_7} \quad (2)$$

ここで、 $N_7$  及び  $N_2$  はそれぞれ Ho  $5I_7$  準位(準位⑦) 及び Tm  $3F_4$  準位(準位②)のイオン密度、 $C_{Ho}$  及び  $C_{Tm}$  はそれぞれ Ho 及び Tm のドーブ密度、 $T$  は温度を示す。 $\Theta(T)$  の値は、文献 2)において明らかにされているため、全 Ho イオン数のうち  $5I_7$  準位に励起されている Ho イオンの割合  $N_7/C_{Ho}$  を測定することにより、 $f_{Ho}$  を決定することができる。

### 3. 実験方法

本研究では、Ho の基底準位( $5I_8$ )イオンによる吸収量の励起強度依存性をポンププローブ法により測定した。予備実験は、可視域における吸収スペクトルが Tm,Ho:YLF とほぼ一致する Tm,Ho:LLF を用いて行った。使用した Tm,Ho:LLF レーザーヘッドは、室温動作用に設計された長さ 6mm のドーブ領域をもつ 5%Tm,0.5%Ho:LLF ロッドを用いた側面励起型構成となっている<sup>3)</sup>。Fig.2 は、波長 640nm 付近における長さ 6mm の Tm,Ho:LLF の透過特性を示す。波長 640nm 付近には、 $5I_8 \rightarrow 5I_5$  準位間に相当する吸収帯があり、この波長帯において、測定に都合のよい吸収率 50%程度のプローブ波長として  $\pi$  偏光における 640nm を選んだ。プローブ光源は、波長 640nm のシングルエミッター半導体レーザーであり、集光光学系によりビーム整形されレーザーロッド内では直径 320 $\mu$ m となっている。これは励起領域の直径よりも小さいため、プローブ光は励起領域のみを通過している。

### 4. 実験結果

Fig.3 は、励起強度を変化させながら測定した透過プローブ光の時間波形を示す。励起パルス幅は 1.5ms とした。励起エネルギーを 482mJ から

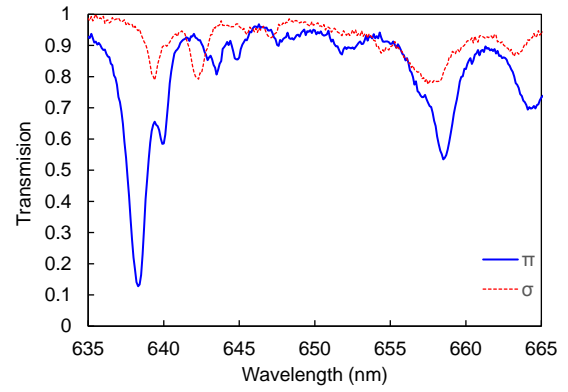


Fig.2 Transmission spectrum of Tm,Ho:LLF.

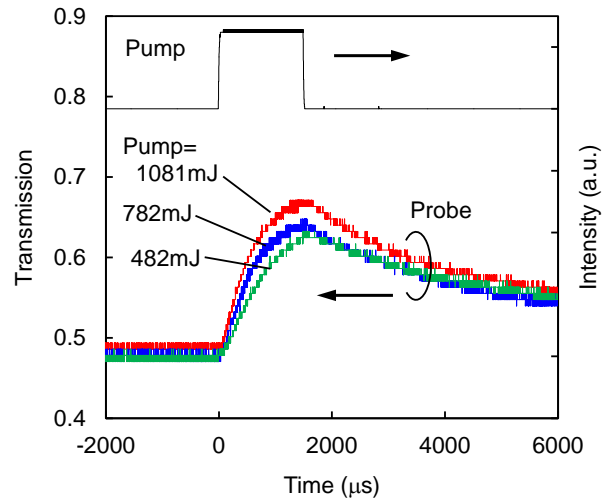


Fig.3 Pulse shapes of the pump light and the transmitted probe beam.

1081mJ まで増加させたとき、プローブ光の透過率は、62.5%から 66.3%に増加することが確認された。これは、励起に伴う Ho 基底準位( $5I_8$ )イオンの減少により、Tm-Ho 遷移効率が低下したためである。しかしながら、測定された透過率は、計算値よりもやや低かった。これは、 $3F_4$  準位に励起された Tm イオンによる励起状態吸収(ESA)の可能性があり、現在、原因の特定を進めている。今後、ESA の影響が少ない 637nm 付近のプローブ光での実験を行う予定である。

### 4. おわりに

本研究では、Tm,Ho:YLF レーザーにおける Tm-Ho 遷移効率の測定を目指し、可視域でのポンププローブ法による Ho 基底準位イオン密度測定の基礎実験を行った。その結果、励起による Ho 基底準位イオン密度の変化が確認された。

### 参考文献

- 1) ドップラーライダーによる宇宙からの風観測を考える検討会，衛星搭載ドップラーライダーによる風観測実施計画書 (2012)。
- 2) B. M. Walsh *et al.*, *J. Lumin.* **75**, 89 (1997)。
- 3) A. Sato *et al.*, *Appl. Opt.* **51**, 1236 (2012)。