

# 波長 0.64 $\mu\text{m}$ 帯での Tm,Ho:LLF レーザにおける Ho 上準位イオン密度測定

Measurement of population densities of the Ho upper manifold in a Tm,Ho:LLF laser at 0.64  $\mu\text{m}$ .

草刈星貴<sup>1</sup>, 佐藤篤<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>

Toshiki Kusakari<sup>1</sup>, Atsushi Sato<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>東北工業大学大学院, <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

In a Tm,Ho:LLF laser with a 6-mm-long doped region, the population density of the Ho upper laser manifold was measured by using a pump-probe technique at 0.64  $\mu\text{m}$ . Because an excited-state absorption from the Ho upper laser manifold was observed at a probe wavelength of 640.5 nm, the probe laser diode was temperature-tuned to 637.5 nm. When the pump energy was 1074 mJ, 60% of the Ho ions were excited to the upper laser manifold.

## 1.はじめに

波長 2 $\mu\text{m}$  帯 Tm,Ho コドープレーザーは風観測用ライダーなどへの応用が期待されているが<sup>1)</sup>, エネルギー遷移過程が複雑であることから、特に Tm-Ho 間のエネルギー移譲を正確に把握することが難しい。この問題に対し、NASA の研究グループは、波長 543.5nm の He-Ne レーザを用いたポンププローブ法により Ho 上準位イオン密度を測定している<sup>2)</sup>。しかしながら、この先行研究において用いられている波長 0.54 $\mu\text{m}$  帯では、光源の入手の難しさから吸収ピーク付近でのポンププローブ測定ができないため、この測定方法の適用は 100mJ 級レーザーに用いられるような長いレーザーロッド(~40mm)に限定される。そこで本研究では、レーザーロッド長が 10mm 以下になるような比較的小型のレーザーに対して適用可能な Ho 上準位イオン密度測定法として、強い吸収が利用しやすい波長 0.64 $\mu\text{m}$  帯でのポンププローブ測定について実験的に検討を行った。

## 2.測定原理

Fig.1 は、Tm,Ho:LLF レーザのエネルギー遷移過程を示す。このレーザーでは、励起( $^3\text{H}_6$ - $^3\text{H}_4$  準位間)及び発振( $^5\text{I}_7$ - $^5\text{I}_8$  準位間)の過程以外にも、 $^5\text{I}_5$  準位へのアップコンバージョンなどが起こることも知られている。しかしながら、 $^5\text{I}_7$  より上位の準位の寿命は数十 $\mu\text{s}$  であり<sup>3)</sup>、一般的な励起パルス幅( $\geq 1\text{ms}$ )よりも十分短いため、励起パルス終了時点では、近似的に全ての Ho イオンは  $^5\text{I}_7$  準位か  $^5\text{I}_8$  準位のいずれかに分布していると考えることができる。Tm-Ho 遷移効率  $f_{\text{Ho}}$  は、Tm  $^3\text{F}_4$  準位密度 ( $N_2$ ) 及び Ho  $^5\text{I}_7$  準位密度 ( $N_7$ ) を用いて式(1)で

定義されるが、準熱平衡状態では Tm $\rightarrow$ Ho 及び Ho $\rightarrow$ Tm の遷移パラメータ  $P_{28}$  及び  $P_{71}$  の比で定義される熱平衡定数  $\Theta = P_{71}/P_{28}$ 、Ho  $^5\text{I}_8$  準位密度 ( $N_8$ ) を用いて表すこともできる<sup>4)</sup>。

$$f_{\text{Ho}} = \frac{N_7}{N_2 + N_7} = \frac{\Theta(N_{\text{Ho}} - N_8) + N_8}{\Theta(N_{\text{Ho}} - N_8) + \Theta N_{\text{Tm}}} \quad (1)$$

ここで、 $N_{\text{Tm}}$  及び  $N_{\text{Ho}}$  は、それぞれ全 Tm イオン密度及び全 Ho イオン密度である。本研究では、ポンププローブ実験で得られた Ho 基底準位イオン密度から、Ho 上準位イオン密度を求め、さらに式(1)を用いて、 $f_{\text{Ho}}$  の推定を行った。

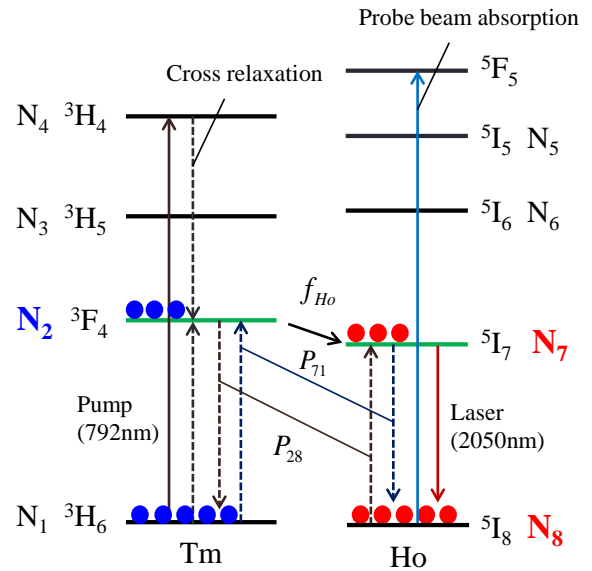


Fig.1 Energy-level diagram for Tm,Ho:LLF.

## 3.実験方法

Fig.2 は、Tm ドープ率 5%、Ho ドープ率 0.5%、の Tm,Ho:LLF 結晶の吸収スペクトルを示す。測定の結果、Tm,Ho:LLF は  $\pi$  偏光の入射光に対し、波

長 638nm 付近に  $^5I_8 \rightarrow ^5F_5$  準位間の吸収に対応する強い吸収ピークを有することが確認された。Fig.3 は、ポンププローブ実験の構成を示す。プローブ光源には、波長 637~640nm 付近で温度同調が可能な半導体レーザを用いた。レーザーヘッドは、ドープ部長さ 6mm の 5%Tm,0.5%Ho:LLF ロッドを 3 方向から側面励起する構造となっている。レーザーロッド用銅製ヒートシンクの冷却水温度は 6°C とした。励起用半導体レーザ(LD)はパルス幅 1.5ms、繰り返し周波数 5Hz、パルスエネルギー1074mJ で動作させた。プローブ光は、 $\lambda/2$  波長板とポラライザーを使用し、 $\pi$  偏光で結晶に入射させた。プローブ光透過強度の時間変化は、Si パワーメーター(response < 1 $\mu$ s)で測定した。

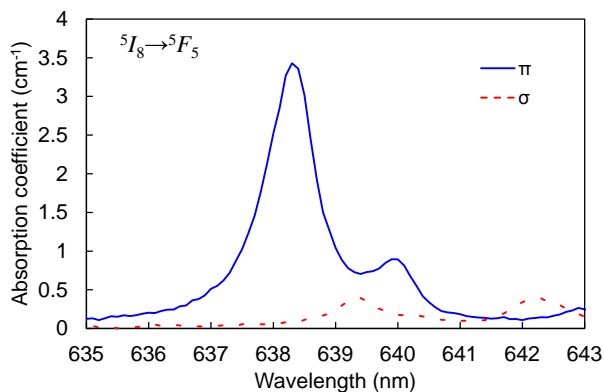


Fig.2 Absorption spectra of 5%Tm,0.5%Ho:LLF.

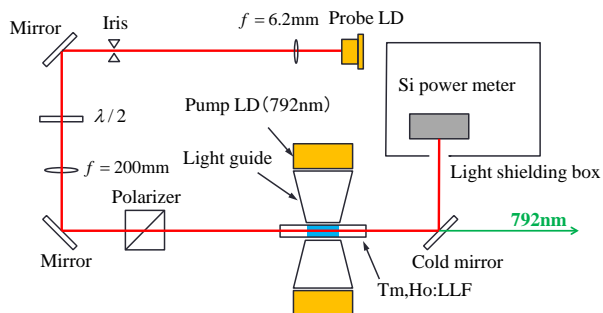


Fig.3 Experimental setup for pump-probe measurements.

#### 4.実験結果

Fig.4 は、プローブ光透過率の時間変化を示す。プローブ波長 637.5nm のとき、励起強度の増加と共にプローブ光の吸収が弱くなり透過率が増加した。一方、波長 640.5nm では励起強度の増加に伴いプローブ光透過率が低下する現象が見られた。これは、Ho 上準位からの励起状態吸収(ESA)が原因と考えられ、この ESA 波長は文献値と一致していることを確認した<sup>5)</sup>。Fig.5 は、Ho イオンの上準位への励起割合( $N_7/N_{Ho}$ )と、Tm-Ho 遷移効

率  $f_{Ho}$  を示す。 $N_7/N_{Ho}$  は、励起エネルギー181mJ のとき 35%、1074mJ のとき 60%であった。このとき、式(1)より求めた Tm-Ho 遷移効率、励起エネルギー181mJ のとき 50%であったのに対し、励起エネルギー1074mJ では 39%にまで減少していることが確認された。

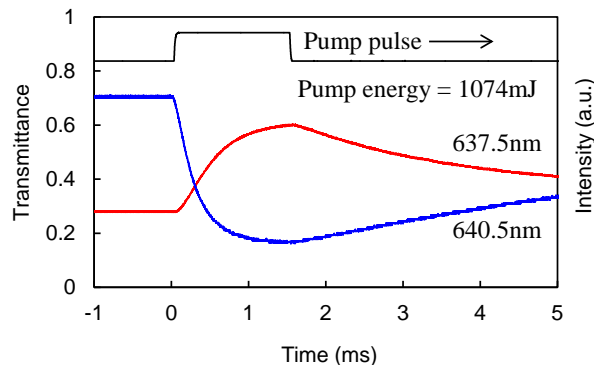


Fig.4 Measured transmittance of the probe beam at different probe wavelengths.

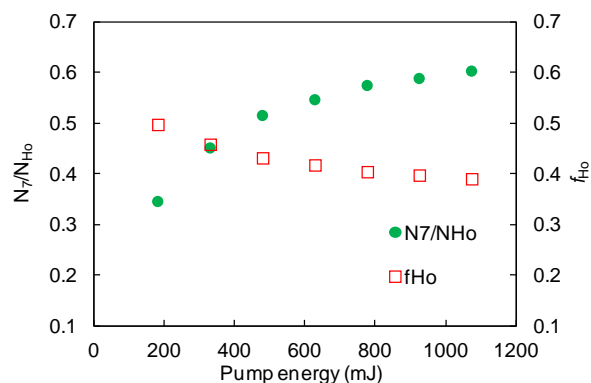


Fig.5 Relative population of the Ho upper manifold and Tm-Ho transfer efficiency as a function of pump energy.

#### 5.おわりに

本研究では、波長 0.64 $\mu$ m 帯光源を用いたポンププローブ法により、Tm, Ho:LLF レーザにおける Ho 上準位イオン密度の測定を行った。プローブ光波長を 637nm 付近で選択することにより Ho 基底準位イオン密度を測定することが可能であることを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) A. Sato *et al.*, Proc. SPIE., **9262**, 926215 (2014).
- 2) Y. Bai *et al.*, Opt. Lett., **37**, 2562 (2012).
- 3) D. Bruneau *et al.*, Appl. Opt., **37**, 8046 (1998).
- 4) B. M. Walsh *et al.*, J. Lumin., **75**, 89 (1997).
- 5) F. Reichert *et al.*, Opt. Mater. Express., **5**, 88 (2015).