

# -80～-40°Cの温度帯における Tm,Ho:YLF レーザの 小信号利得測定

Small-signal gain measurements of a Tm,Ho:YLF laser in the temperature range from -80 to -40°C

佐藤 篤<sup>1,2</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>, 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

The temporal behavior of the small-signal gain of a Tm,Ho:YLF laser was measured in the temperature range from -80 to -40°C. The gain increased as the temperature of the laser rod was decreased because of the quasi-four-level nature of this laser crystal. A maximum gain of 4.5 was observed for  $\pi$  polarization at -81°C. A rate equation model was used to simulate the energy transfer between the Tm  $^3F_4$  and Ho  $^5I_7$  manifolds. During the 1-ms pump pulse, the observed gain is in good agreement with the calculated value. However, the observed gain reached the maximum after the peak of the calculated gain, and its peak value was higher than the theoretical prediction.

## 1. はじめに

近年、超低高度衛星技術の進展により、100mJ 級レーザ送信機を用いたドップラー風ライダーの実現可能性が高まってきており、現在、情報通信研究機構(NICT)では、そのレーザ送信機として 125mJ×30Hz の Tm,Ho:YLF レーザの開発を進めている<sup>1)</sup>。目下の課題として、システム全体の電力消費量の低減が必要であり、この対策として、現行のレーザシステム(-80°C)よりも高温(-40°C付近)で動作が可能なレーザシステムの検討を行っている。この温度帯では、Tm,Ho:YLF レーザは準4準位レーザとして動作するため、レーザ下準位イオンによるレーザ光の再吸収が起こることが知られているが、この他に Tm-Ho 間のエネルギー移譲も温度に依存するため、動作温度の変更を伴うレーザシステムの再設計では、これらに関連するパラメータを検討し直す必要がある。小信号利得は、Tm-Ho 間エネルギー移譲と再吸収の両方の情報を含んでおり、この時間的変化を観測することは、励起過程における Tm,Ho イオンの振る舞いを把握する上で重要な手掛かりとなる。そこで、本研究では、-80～-40°Cの温度帯での Tm,Ho:YLF レーザの小信号利得を測定し、レート方程式モデルによる計算結果と比較検討を行ったので報告する。

## 2. レート方程式

Fig.1 は、Tm,Ho:YLF レーザのエネルギー移譲過程を示す。Tm イオンは、波長 792nm の光により  $^3H_4$  準位に励起され、クロス緩和過程を経て  $^3F_4$  準位へと緩和し、その後、レーザ上準位である Ho  $^5I_7$  準位へエネルギーが移譲される。このとき、 $^3F_4$  準位(②)– $^5I_7$  準位(⑦)間では、Tm→Ho 移譲と Ho→Tm 移譲が同時に起こっており、その時間的変化は、次のレート方程式で表される<sup>2)</sup>。

$$\frac{dN_2}{dt} = W_p - \frac{N_2}{\tau_2} - p_{28}C_{Ho}N_S N_2 + p_{71}C_{Tm}N_S N_7 + (p_{28} - p_{71})N_2 N_7, \quad (1)$$

$$\frac{dN_7}{dt} = -\frac{N_7}{\tau_7} + p_{28}C_{Ho}N_S N_2 - p_{71}C_{Tm}N_S N_7 - (p_{28} - p_{71})N_2 N_7, \quad (2)$$

ここで、 $W_p$  は励起レート、 $N_2$  及び  $N_7$  はそれぞれ Tm  $^3F_4$  準位(②)及び Ho  $^5I_7$  準位(⑦)のイオン密度、 $C_{Ho}$  及び  $C_{Tm}$  はそれぞれ Ho 及び Tm のドーピング率、 $N_S$  は  $Y^{3+}$  密度、 $\tau_2$  及び  $\tau_7$  はそれぞれ Tm  $^3F_4$  準位(②)及び Ho  $^5I_7$  準位(⑦)の寿命、 $p_{28}$  及び  $p_{71}$  はそれぞれ Tm→Ho 及び Ho→Tm 移譲におけるエネルギー移譲パラメータを示す。これらの式から  $N_7$  を求めることにより、小信号利得係数は次式で求められる。

$$g_o = \sigma_e \left( \left( 1 + \frac{f_l}{f_u} \right) N_7 - \frac{f_l}{f_u} C_{Ho} N_S \right), \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_e$ は実効的な誘導放出断面積、 $f_l$ 及び $f_u$ はレーザ下準位及び上準位の熱的占有率を示す。

### 3. 実験結果及び考察

Fig.2は、小信号利得測定の実験セットアップを示す。レーザヘッドは、直径 4mm、長さ 44mm の 4%Tm,0.4%Ho:YLF ロッドを用いた側面励起方式となっている。プローブ光源には、波長 2051nm で動作する連続発振 Tm,Ho:YLF レーザを用い、入射光パワーは 18mW とした。プローブビームは、レーザロッド内で直径 1.1mm 以下になるように集光されており、ロッド中心軸上の励起部分のみを通過する。プローブ光の偏光は、 $\pi$  偏光入射となるように $\lambda/2$  波長板により回転させた。Fig.3 は、励起エネルギー1.67J、励起パルス幅 1ms のときの小信号利得の測定結果と上述のモデルによる計算結果を示す。計算パラメータは、実験条件に合わせたが、 $p_{28}$  及び  $p_{71}$  は入手が困難であるため、NASA のグループによる測定値<sup>2)</sup>からの外挿により仮定した。レーザロッド冷却用の冷媒温度が $-81^{\circ}\text{C}$ のとき、小信号利得は励起開始から 1.6ms 付近で最大となり、その値は 4.5 であった。また、ロッド温度の上昇に伴い小信号利得は減少していき、 $-36^{\circ}\text{C}$ では、利得は 2.3 まで低下した。これらの実験結果を計算結果と比較すると、励起中においては両者はよく一致したが、励起終了後( $> 1\text{ms}$ )は、測定された利得の方が計算値よりも遅く最大値に達し、またその最大値も高いことが確認された。これは、本モデルで考慮していない要因が影響していると推察されるため、今後さらに検討を進めていく予定である。

### 4. おわりに

本研究では、 $-80 \sim -40^{\circ}\text{C}$ の温度帯での Tm,Ho:YLF レーザの小信号利得の測定を行い、レート方程式モデルによる計算値との比較を行った。その結果、励起中の振る舞いは、実験値と計算値がよく一致したが、励起終了後は本モデルでは考慮していない現象の影響が実験データに表れていることがわかった。今後、ポンププローブ法による Ho 上準位イオン密度測定の結果とも比較し、測定データの検証を行うと共に、レーザ設計へ反映させる。

### 参考文献

- 1) A. Sato *et al.*, Proc. SPIE **9262**, 926215 (2014).
- 2) B. M. Walsh *et al.*, J. Lumin. **90**, 39 (2000).

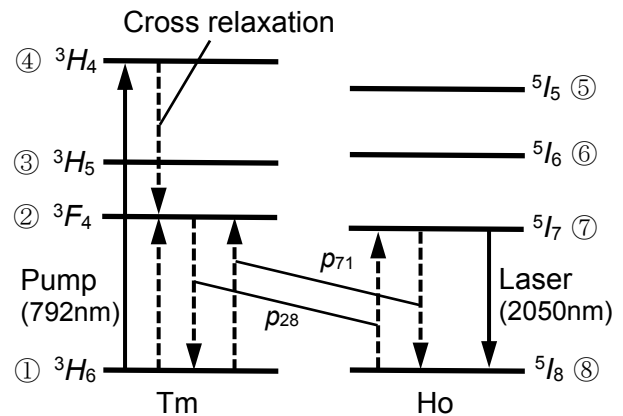


Fig.1 Energy-level diagram.

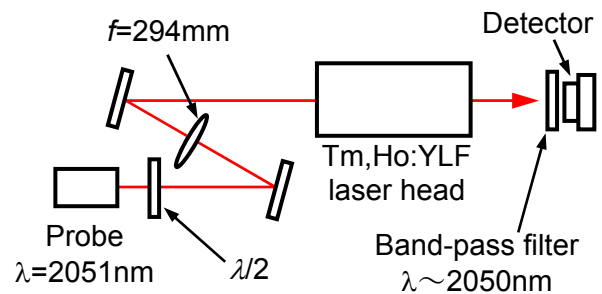


Fig.2 Experimental setup.

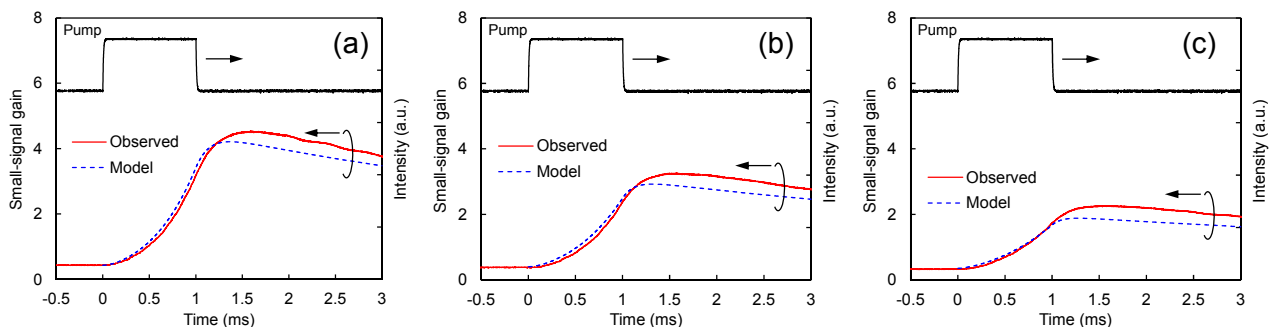


Fig. 3 Observed and calculated small-signal gains of the Tm,Ho:YLF laser at (a)  $-81^{\circ}\text{C}$ , (b)  $-46^{\circ}\text{C}$ , and (c)  $-36^{\circ}\text{C}$ .