

## 波長 1.3 $\mu\text{m}$ 帯高出力 Nd:YAG レーザにおける モード競合の抑制

Suppression of mode competition in a high-energy Nd:YAG laser operating at 1.3 $\mu\text{m}$

寺崎知広<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>

Tomohiro Terasaki<sup>1</sup>, Atsushi Sato<sup>1</sup>, Kazuhiro Asai<sup>1</sup>, Shoken Ishii<sup>2</sup>, Kohei Mizutani<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>NICT

### Abstract

There are two laser transitions in Nd:YAG, i.e. 1319nm and 1338nm, between  $^4F_{3/2}$ - $^4I_{13/2}$ . Since each cross section of stimulated emissions for these transitions is close to other, a suppression of mode competitions must be carefully made.

In this paper, we describe experimental results of the suppression for the mode competition achieved by using two birefringent filters. As a result, an output energy of 48mJ was obtained for a pump energy of  $\approx 1000\text{mJ}$ .

### 1. はじめに

植物が持つクロロフィルの吸収スペクトル<sup>[1]</sup>と波長が一致する、波長 450nm 及び 660nm で発振するレーザーは、植生環境情報の観測を行う際の光源として利用できる。このうち、波長 660nm の光は、波長 1319nm で 4 準位動作させた Nd:YAG レーザ光の第 2 高調波発生によって得られるため、基本波に準 3 準位動作の Nd ドープレーザーを必要とする波長 450nm に比べ、高出力化・高効率化に有利である。しかしながら、Nd:YAG は、波長 1.3 $\mu\text{m}$  帯に 2 つのレーザー遷移を持っており、波長 1319nm 及び 1338nm の同時発振が起こりやすい。本研究では、波長 1.3 $\mu\text{m}$  帯伝導冷却型 Nd:YAG レーザを試作し<sup>[2],[3]</sup>、高出力パルス発振時におけるモード競合の抑制について実験的に検討したので報告する。

### 2. エネルギー遷移過程

Fig.1 は Nd:YAG のエネルギー準位図を示す。波長 808nm によって  $^4F_{5/2}$  へ励起された Nd イオンは、非放射遷移によってレーザー上準位  $^4F_{3/2}$  に緩和し、各レーザー遷移によって発振する。Fig.1 に示されるように、波長 1319nm と 1338nm は非常に近いレーザー下準位を持っている。また、式(1)はサイドポンプ型の 4 準位動作レーザーの発振閾値を示す。

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p w_p^2 (L+T)}{2\eta_p \eta_a \sigma \tau \left( 1 - \exp\left(-2 \frac{w_p^2}{w_l^2}\right) \right)} \quad (1)$$

ここで、 $h$  はプランク定数、 $\nu_p$  は励起光の周波数、 $\eta_p$  は励起光の量子効率、 $\eta_a$  は励起光の吸収率、 $\sigma$  は誘導放出断面積、 $\tau$  はレーザー上準位寿命、 $L$  は共振器損失、 $T$  は出力鏡の透過率、 $w_p$  は励起領域の半径、 $w_l$  はレーザービームの半径である。式(1)より、共振器の構成が同じ条件であるとすれば、発振閾値は誘導放出断面積  $\sigma$  に反比例することが分かる。Table 1 は、Nd:YAG の代表的なレーザー遷移及び誘導放出断面積を示す。

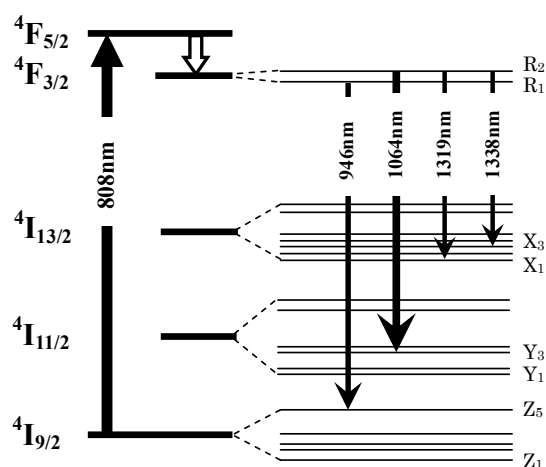


Fig.1. Energy level diagram of Nd:YAG

Table 1. Typical transitions in Nd:YAG<sup>[4]</sup>

Wavelength (nm)	Transition	Cross section $\sigma$ ( $10^{-20}\text{cm}^2$ )
946	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}, (R_1 \rightarrow Z_5)$	0.05
1064	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}, (R_2 \rightarrow Y_3)$	28
1319	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}, (R_2 \rightarrow X_1)$	9.5
1338	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}, (R_2 \rightarrow X_3)$	10

Table 1 より、波長 1064nm は波長 1319nm 及び 1338nm に比べ約 3 倍も発振閾値が低く、発振が起こりやすいことが分かる。また、波長 1319nm と 1338nm を比較すると、誘導放出断面積にはほとんど違いがない。このことから波長 1.3 $\mu\text{m}$  帯におけるモード競合が起こりやすいことが明らかである。また、式(1)を用いた解析の結果、出力鏡の透過率が波長 1064nm に対して 99%、波長 1319nm に対して 37% でほぼ同等の発振閾値になることが分かった。そのため、波長 1319nm の発振閾値が波長 1064nm の発振閾値を下回るためには、共振器内オプティクス波長 1064nm に対する透過率を限りなく 100% に近づける必要があり、波長 1.3 $\mu\text{m}$  帯での波長選択には、エタロンを用いることが出来ないことが分かった。そこで、複屈折フィルタ(Birefringent Filter)を利用した波長選択法に注目し、実験を行った。

### 3. 実験結果

Fig.2.は試作したレーザの構成図を示す。レーザ結晶として直径3mm、長さ10mm、Ndドープ率0.6 at.%のNd:YAG結晶を用い、励起用LDとして中心波長808nm、ピークパワー1000Wの10段スタック型QCW LDを2個ずつ側面3方向から結晶を励起するように配置した。また、結晶側面は、水冷型の銅製ヒートシンクにより伝導冷却されている。レーザ共振器は、2枚のダイクロミックミラーと、平面出力鏡(R=82% @1050nm-1350nm)からなるファブリペロー型とした。複屈折フィルタは、厚さ1mmと2mmのものを2枚重ね合わせ、光軸に対してブリュースター角で挿入し、またダイクロミックミラーは2枚とも1064nmに対してARコーティング、1320nmに対してHRコーティングが施されている。

Fig.3.は複屈折フィルタによる波長選択実験の結果を示す。複屈折フィルタは偏光子ホルダーに組み込み、手で回転させ、各回転角における発振スペクトルの変化及び出力を測定した。発振スペクトルはLBO結晶を用いて発生させた可視領域の第2高調波を光スペクトラムアナライザーでモニタし、その後基本波の波長に換算した。実験は、結晶の冷却水温度18°C、LDの冷却水温度42°C、繰り返し周波数5Hz、励起エネルギー1001mJにおいて行った。厚さ1mm及び2mmの複屈折フィルタをそれぞれ1枚だけ使用した実験では、完全にモード競合を抑制することはできなかったが、2枚を重ね合わせて使用することにより、波長1319nmまたは波長1338nmの一方のみを選択的に発振させられることが確認できた。

Fig.4.は波長1319nmでの入出力特性を示す。実験は、複屈折フィルタの回転角を波長1319nmのみの発振スペクトルになった位置(Fig.3の86°の位置)で固定して行った。データの取得は、励起エネルギーのみを変化させ、その他のパラメータはFig.3.のデータ取得時と同様とした。実験の結果、結晶の冷却水温度18°C、LDの冷却水温度42°C、繰り返し周波数5Hz、励起エネルギー≈1000mJのとき、ノーマル発振出力48mJが得られた。

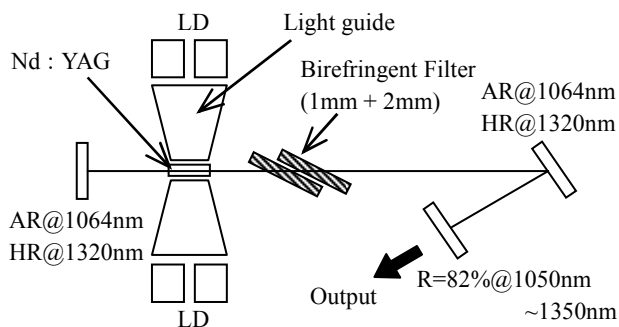


Fig.2. Experimental setup of the 1.3μm Nd:YAG laser

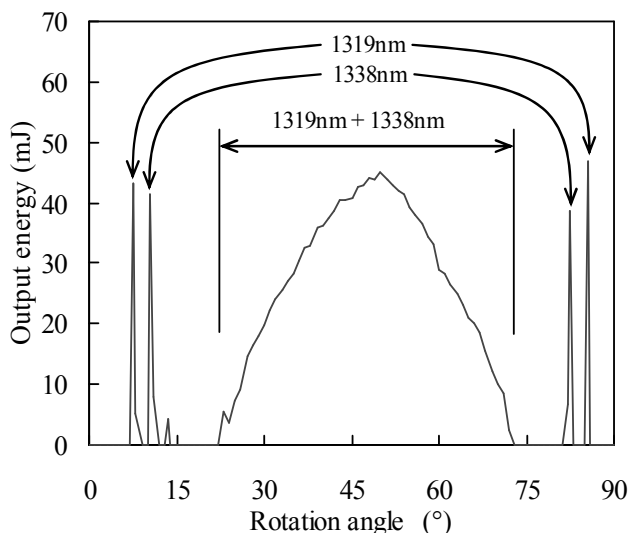


Fig.3. Wavelength selection versus rotation angle of birefringent filters in the Nd:YAG laser

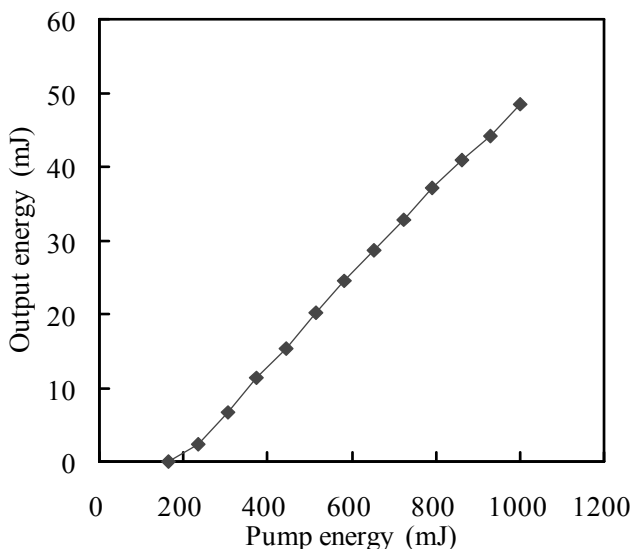


Fig.4. Output energy versus pump energy for the Nd:YAG laser at 1319nm

### 4. おわりに

本研究では、波長選択素子として複屈折フィルタを共振器内に挿入することによりNd:YAGレーザにおいて、波長1319nmでの高出力パルス発振を達成した。今後、さらに改良を重ね、高効率化・高出力化を進めていく。

### 参考文献

- [1]日本光合成研究会, “光合成事典”, 学会出版センター (2003)
- [2]寺崎他, 第63回応用物理学会東北支部, 4pB09 (2008).
- [3]A. Sato *et al.*, Proc. SPIE, **7153**, pp.715316-1-8 (2008).
- [4]W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 6th ed., (Springer, 2006).