

# 1.6 $\mu\text{m}$ 帯平面導波路型 Er:YAG レーザの開発

Development of 1.6 micron planar waveguide Er:YAG laser

秋野 陽介<sup>1</sup>、柳澤 隆行<sup>1</sup>、平野 嘉仁<sup>1</sup>

Yosuke Akino<sup>1</sup>, Takayuki Yanagisawa<sup>1</sup>, Yoshihito Hirano<sup>1</sup>

三菱電機(株)<sup>1</sup>

Mitsubishi Electric Corporation

## Abstract

We are developing a compact eyesafe laser for laser ranging and 3D-Imaging LADAR. We demonstrated CW operation at 1645nm using a planar waveguide Er:YAG. Maximum output power was 1.4W at 5.4W pumping power with slope efficiency of 42.7%.

## 1. はじめに

レーザによる距離計測では、距離計測の長距離化や装置の小型化、3D-LADAR<sup>(1)</sup>等の2次元距離画像測定の高フレームレート化のため、レーザ光を高出力(高ピークパワー、高繰り返し)で発生する、小型、低コスト、高信頼な光源が要求されている。さらに、野外で使用するため、目に対して安全なアイセーフ波長が要求される。この光源の実現に向けて独自の平面導波路構造を用いた受動Qスイッチレーザの開発を行っている。平面導波路構造では、利得が低い材料に対して導波路厚さ方向の高強度励起密度化により高利得が得られると共に、排熱効率が高いため、温度上昇による利得低下が課題となる三準位レーザ媒質に対して、高効率レーザ動作が可能という特長を有する。また、導波路横面方向に対して励起光、および、レーザ発振光ビーム幅を拡張できるので、パワースケーリングが容易である。Er:YAGは発振医療用として波長2.94 $\mu\text{m}$ で発振するレーザが一般的であるが、近年では、SCバンド(波長1455~1570nm)用レーザダイオードやファイバーレーザの高出力化により、これらを励起光源に用いた波長1.6 $\mu\text{m}$ 発振に関する報告が多数出されている。1.5 $\mu\text{m}$ で使用されるEr:glassと比較して、利得を発生させる最小反転率が小さく、励起波長と発振波長が近いこと、高効率なレーザ動作が期待である。そこで、レーザ媒質としてEr:YAGを用いた平面導波路型レーザの開発を行っている。今回、我々は、Er:YAGレーザのレート方程式による出力計算のモデル化と、試作した導波路型Er:YAGレーザのCW動作の特性評価を行ったので報告する。

## 2. 平面導波路型レーザの構成

図1に、平面導波路型Er:YAGレーザの構成図を示す。レーザは、励起光源である中心波長1470nmのシングルエミッタレーザダイオード(以降、LD)、結合光学系、平面導波路型Er:YAG、出力反射鏡で構成される。LDの出力は、結合光学系により、導波路厚さ方向はEr:YAG導波路素子の導波路の開口数(NA)内に入るように、導波路水平方向はビームオーバーラップを考慮してEr:YAG内で平行光になるように入射した。レーザ共振器はEr:YAG素子のS1面と出力反射鏡で構成され、波長1645nmのアイセーフレーザ光を出力する。共振器は、導波路厚さ方向は導波モード、導波路水平方向は楕円型ヒートシンクにより発生する熱レンズでビームを閉じ込める構成として、発振モードの安定化をはかった。Er:YAGのEr添加濃度は0.5at%、導波路長さは30mmとした。また、平面導波路型Er:YAGのS2面には励起波長である1470nmに対して全反射コートをし、励起光の吸収効率を確保しつつ導波路の小型化をはかった。なお、パルス動作時は出力反射鏡の代わりに部分反射コートをした可飽和吸収体を設置する。

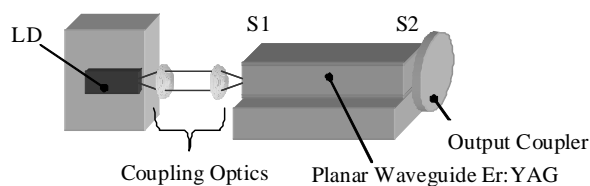


Fig. 1. Laser configuration

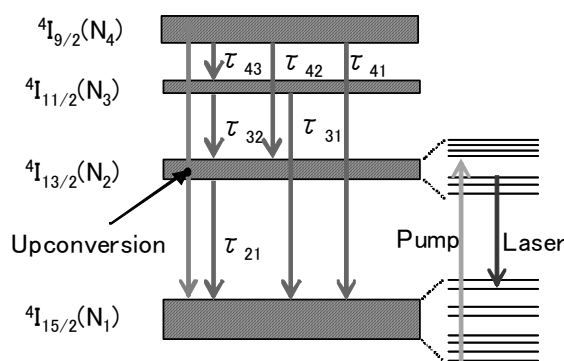


Fig2. Energy level diagram of Er:YAG

### 3. 理論計算

図 2 に計算モデルに用いた Er:YAG のエネルギー準位図を示す。アップコンバージョンはレーザ上準位  $2(^4I_{13/2})$  から  $4(^4I_{9/2})$  準位 4 およびレーザ下準位  $1(^4I_{15/2})$  にイオンが遷移し、 $4(^4I_{9/2})$  準位 4 に遷移したイオンは下準位である  $3(^4I_{11/2})$  準位 3、 $2(^4I_{13/2})$  準位 2、 $1(^4I_{15/2})$  準位 1 にそれぞれ緩和するとした。理論計算に用いたレート方程式を以下に示す。

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_p + \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} + c \cdot \phi(t) \cdot \sigma_{eff} \cdot (N_2(t) - \beta_D \cdot N_1(t)) + C_{up} \cdot N_2^2(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_p - \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} - c \cdot \phi(t) \cdot \sigma_{eff} \cdot (N_2(t) - \beta_D \cdot N_1(t)) - 2 \cdot C_{up} \cdot N_2^2(t) \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{N_4(t)}{\tau_{43}} - \frac{N_3(t)}{\tau_{31}} - \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = C_{up} \cdot N_2^2(t) - \frac{N_4(t)}{\tau_{43}} - \frac{N_4(t)}{\tau_{42}} - \frac{N_4(t)}{\tau_{41}} \quad (4)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = c \cdot \phi(t) \cdot \sigma_{eff} \cdot (N_2(t) - \beta_D \cdot N_1(t)) \cdot \frac{l}{l_{cav}} - c \cdot \phi(t) \cdot \frac{L - \ln(R)}{l_{cav}} + c_p \cdot \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} \quad (5)$$

ここで、 $N_1$  はレーザ下準位 1 のイオン密度 [ $m^3$ ]、 $N_2$  はレーザ上準位 2 のイオン密度 [ $m^3$ ]、 $N_3$  はレーザ準位 3 のイオン密度 [ $m^3$ ]、 $N_4$  はレーザ準位 4 のイオン密度 [ $m^3$ ]、 $\phi$  は光子密度 [ $m^3$ ]、 $W_p$  は励起率、 $\tau_{mn}$  は各準位間の緩和時間 [sec]、 $c$  は光速 [m/s]、 $\sigma_{eff}$  は有効誘導放出断面積 [ $m^2$ ]、 $\beta_D$  は発振サブレベル間の分配率の比、 $l$  はレーザ媒質長 [m]、 $l_{cav}$  は共振器長 [m]、 $L$  は共振器内部損失、 $R$  は出力鏡反射率、 $C_{up}$  はアップコンバージョンレート、 $C_p$  は自然放光の発振モードへの結合定数を示す。式(2)の第 4 項は、レーザ上準位 2 の Er イオン同士のアップコンバージョンによる減少の項を表わし、各イオンは、準位 4 およびレーザ下準位 1 に遷移する。

レーザ出力  $E_{out}$  は、式(1)~(5)のレート方程式の解より得られる光子密度を用いて、次式で表される。

$$E_{out} = h\nu \cdot c \cdot A \cdot \left( \frac{-\ln(R)}{2} \right) \cdot \int \phi(t) dt \quad (6)$$

ここで、 $h$  はプランク定数 [J · s]、 $\nu$  はレーザ周波数 [s] である。

### 4. 測定結果

図 2 に平面導波路型 Er:YAG レーザの構成写真を示す。レーザはシングルエミッタ励起 LD (波長 1470nm)、シリンドリカルレンズ、平面導波路型 Er:YAG 素子、出力反射鏡 (出力鏡反射率 60%) で構成し、共振器長は 30mm である。図 3 に出力鏡反射率 60% の時の入出力特性を示す。また、3 章で示したレート方程式を用いた出力計算結果を同時に示す。なお、Er:YAG のアップコンバージョンレートは文献値である  $5.0 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$  を用いた。その結果、励起 LD 出力 5.4W 時に  $1.6 \mu\text{m}$  出力 1.4W が得られ、計算結果と測定結果がほぼ一致することが分かった。この時のスロープ効率は 43%、励起光-光効率は 24% であった。励起 LD と YAG、出力鏡で合わせたレーザサイズは約 35mm であり、小型でワット級の出力が可能なアイセーフレーザ装置を実現した。

### 5. まとめ

我々は、 $1.6 \mu\text{m}$  帯で発振する平面導波路型 Er:YAG レーザの発振動作を確認し、アップコンバージョンを考慮したレート方程式を用いて出力計算を行った。その結果、励起 LD 出力 5.4W 時に  $1.6 \mu\text{m}$  出力 1.4W が得られた。この時のスロープ効率は 43%、励起光-光効率は 24% であり、出力計算結果とほぼ一致することが分かった。今後、受動 Q スイッチによるパルス動作の確認を行い、携帯型測距装置への適用をはかる予定である。

### 参考文献

- [1] 亀山 第 70 回秋季応用物理学会学術講演会予稿集 10a-T-1(2009)
- [2] Jeffrey O. White, "Resonant pumping and upconversion in  $1.6 \mu\text{m}$  Er<sup>3+</sup> lasers" Journal of Optical Society of America B, 24, 9(2007)

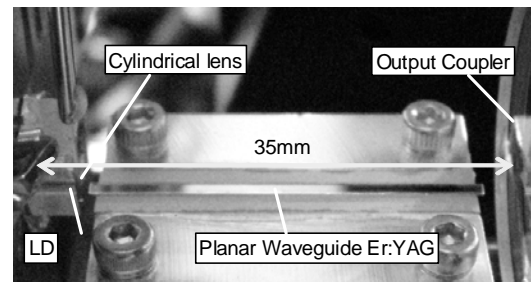


Fig.3: Planar waveguide Er:YAG laser

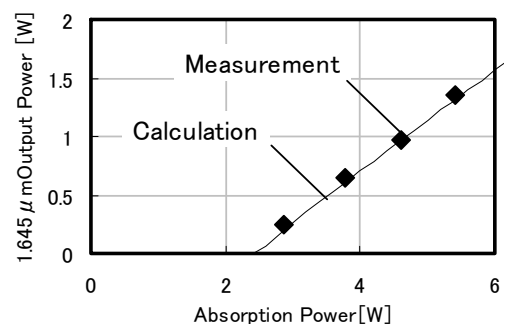


Fig.4 LD Absorption power dependence of output powers.