

# 2 $\mu$ m コヒーレントドップラー風ライダーの送信機効率の改善

青木 誠<sup>1</sup>, 大塚 涼平<sup>2,1</sup>, 石井 昌憲<sup>1</sup>, 水谷 耕平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>情報通信研究機構 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

<sup>2</sup>首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Improvement of laser performance for 2- $\mu$ m coherent Doppler wind lidar

Makoto AOKI<sup>1</sup>, Ryohei OTSUKA<sup>2,1</sup>, Shoken ISHII<sup>1</sup>, Kohei MIZUTANI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

<sup>2</sup> Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

**Abstract:** National Institute of Information and Communications Technology (NICT) is conducting research and development on a coherent wind Doppler lidar (CDWL) for satellite-based observations of wind at the global scale. A conductively cooled, Q-switched Tm,Ho:YLF laser with an eye-safe wavelength of 2.05  $\mu$ m is suitable for use as a transmitter in a space-borne CDWL. NICT has been developing a 2- $\mu$ m coherent Doppler wind lidar and a new laser module toward the realization of the space-borne CDWL.

**Key Words:** coherent, Doppler wind lidar, Tm,Ho:TLF laser, laser oscillator model, solid-state laser

### 1. はじめに

風は気象・気候分野において、最も重要な要素の一つである。全地球規模での風の空間分布データの高精度観測は、数値予報の精度向上、気象予測モデルの高度化などに寄与し、近年、日本のみならず世界各地で頻発する重大な気象災害に対して、強い社会の構築にも貢献するものである。レーザーを使ったアクティブリモートセンサーであるライダー (lidar: Light detection and ranging) は、大気中へレーザー光を送信して、大気中のエアロゾルや分子からの後方散乱光を測定することで、様々な気候・気象パラメータの空間分布観測を可能とする装置である。その中でも、ドップラー風ライダーは、風に乗って移動する散乱体からの後方散乱光の周波数ドップラーシフトを測定することによって、風を高時間・高空間分解能で測定するライダーである。

情報通信研究機構 (NICT) では、将来の衛星からの全世界規模での風観測を目標として、アイセーフかつ高パルスエネルギー化が可能な 2 $\mu$ m 帯のレーザーを送信機としたコヒーレントドップラー風ライダー (CDWL: Coherent Doppler wind lidar) を開発している。航空機搭載型および地上設置・可搬型の CDWL はすでに開発され稼働している。また、2016 年度から、基礎実験ならびに動作解析に基づいて最適化された改良型レーザーヘッドを使用して、レーザーの高出力動作化および高効率動作化の研究を進めている。

本研究では、レーザー発振器の性能モデルを使用して、稼働中の CDWL の性能評価ならびに性能向上、開発中の送信機の性能評価を実施した。

### 2. レーザー発振器の性能モデル

地上設置型 CDWL の送信光源には、NICT で開発された側面レーザーダイオード (LD) 励起型の Tm,Ho:YLF レーザーを用いている<sup>1)</sup>。レーザーロッドは、直径 4 mm、長さ 44 mm の Tm(4%),Ho(0.4%):YLF 結晶であり、側面の約 70% が高い熱伝達係数を持つ

インジウム薄膜をバッファとして銅製のヒートシンクに接触しており、それによって高い排熱効率を実現している。改良型のレーザーモジュールは、基本的な構成は現行モデルと同じだが、高密度励起化して再吸収に打ち勝つために、より短いロッド (=33 mm) を採用している<sup>2)</sup>。

レーザー発振器の性能モデルを使用して、現行の発振器の性能を評価を行い、今後の効率改善および改良型モジュールの性能評価のための指標とした。Tm,Ho:YLF レーザーは準四準位レーザーであるが、レーザーロッドを -80 $^{\circ}$ C まで冷却して使用する場合、レーザー下準位の熱的占有率が低下して、四準位レーザー動作に近づく。本研究では、計算を簡略化するため、四準位レーザーであると仮定して計算を進めた。四準位レーザーの入出力特性は、次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$P_{out} = \sigma_s(P_{in} - P_{th}), \quad (1)$$

ここで、 $P_{in}$  は励起光入力パワー、 $P_{th}$  は発振閾値、 $\sigma_s$  はスロープ効率である。 $P_{out}$  と  $P_{in}$  の比は、Wall-plug 効率と呼ばれている。また、単一方向発振リングレーザー発振器の場合  $\sigma_s$  および  $P_{th}$  は、それぞれ下記の式で表すことができる。

$$\sigma_s = \eta T / (-\ln R + \delta), \quad (2)$$

$$P_{th} = (-\ln R + \delta) h \nu A / \eta \tau_f \sigma, \quad (3)$$

ここで、 $\eta$  はレーザーのシステム効率、 $T$  および  $R$  は出力鏡の透過率および反射率、 $\delta$  は出力鏡の損失を含まない共振器の損失、 $h$  はプランク定数、 $\nu$  は発振波長、 $A$  はレーザー媒質の断面積、 $\tau_f$  はレーザー上準位の寿命、 $\sigma$  は誘導放出断面積である。システム効率は、細分された効率の積となっており、下記の式で表すことができる。

$$\eta = \eta_p \eta_t \eta_a \eta_s \eta_Q \eta_B \eta_E. \quad (4)$$

発振器の性能評価には、式(1)-(4)の中のパラメータを用いる。特にシステム効率  $\eta$  は、発振閾値とスロープ効率に直結するパラメータであるので、このパラメータを詳しく評価した。LD の励起効率

( $\eta_P=0.37$ ), 励起光学系の効率 ( $\eta_i=0.93$ ), 共振器モードとのマッチング効率 ( $\eta_B=0.83$ ) については, 実験によって測定を行った. 励起光の吸収効率 ( $\eta_a=0.91$ ) については, 光線追跡法を用いて計算した. ストークス因子 ( $\eta_s=0.39$ ) については, 励起波長と発振波長から計算可能である.  $\eta_Q$  はレーザー上準位へのエネルギー遷移効率を表している. コドープレーザーである Tm,Ho:YLF の場合, Tm の  $^3H_4$  準位に励起された Tm イオンが, クロス緩和を経て Tm の  $^3F_4$  準位に移り, 最終的に Ho の  $^5I_7$  準位 (レーザー上準位) の Ho イオンにエネルギー移譲される.  $^3H_4$  準位に励起された 1 つの Tm イオンが  $^3F_4$  準位に緩和する際に, そのエネルギーによって基底準位から Tm イオンを  $^3F_4$  準位に励起することがある. そのため, この効率は 1 を超える. クロス緩和の効率は Tm と Ho のドープ率に依存する. 本研究では, 文献値 (=1.5) を使用した<sup>4,5)</sup>. Tm から Ho へのエネルギー遷移効率 (=0.86) は, ドープ率, ボルツマン分布, シュタルク準位および結晶の温度から計算した<sup>6)</sup>. ノーマル発振に対する Q スイッチ発振の抽出効率 ( $\eta_E$ ) は, レーザーロッドを  $-80^\circ\text{C}$  まで冷却して使用する場合, ほぼ 1 に近い値を取ることが実験によって確かめられている<sup>7)</sup>. そのため, 本研究ではこの効率を 1 とした. その結果, 全体のシステム効率 0.13 が得られた.

図 1 に, CDWL の送信機の入出力特性を示す. 現行の CDWL の送信機は, パルスエネルギー 80 mJ, 繰り返し周波数 30 Hz, 縦横シングルモードの状態で使用されているが, 本研究では, 送信機効率を正確に評価するために, ロッド内の発熱および前の励起の残余エネルギーの影響を最小限に抑えることができる 1 Hz 動作で評価を行った. フィッティングして各種パラメータを求めた結果, 発振閾値 1.14 J, 光-光スロープ効率 20%, 電気-光スロープ効率 6.8% が得られた. また, 最大励起時の電気-光変換効率は 1.8% だった.

### 3. 送信機効率の改善

現行の発振器効率の改善を実施した.  $\eta_s$  については励起波長と発振波長で決まる値なので改善は望めない. また, 稼働中の CDWL の発振器の場合, 冷却温度, レーザーモジュールおよび共振器の変更は行わないので,  $\eta_i$ ,  $\eta_a$ ,  $\eta_Q$ ,  $\eta_E$ ,  $\eta_B$  についても基本的に改善を望むことができない. そのため, LD の電流・励起時間・繰り返し周波数を最適化することで,  $\eta_P$  の効率改善を行った. 従来は, LD 保護の観点から閾値に比較的近い電流値で励起時間を長めにして (1 ms) 励起を行っていた. 本研究では, それを LD ドライバの限界近くの電流値 (=100 A, LD の仕様値の半分) で使用して, 励起時間を短くして励起を行った. その結果, 効率が 0.37 から 0.45 まで改善した. Tm と Ho の上準位寿命は 10 数 ms と長いので, 繰り返し周波数を上げることによって, 前の励起の残余エネルギーを使用することができる. そのため,  $\eta_Q$  を実効的に改善することができる. ただし, レーザーロッドの温度上昇によって引き起こされる問題 (熱レンズなど) と冷凍機性能のトレードオフの面から, 繰り返し周波数の増加には限界がある. 本研究では, 繰り返し周波数を 40 Hz, 90 mJ の

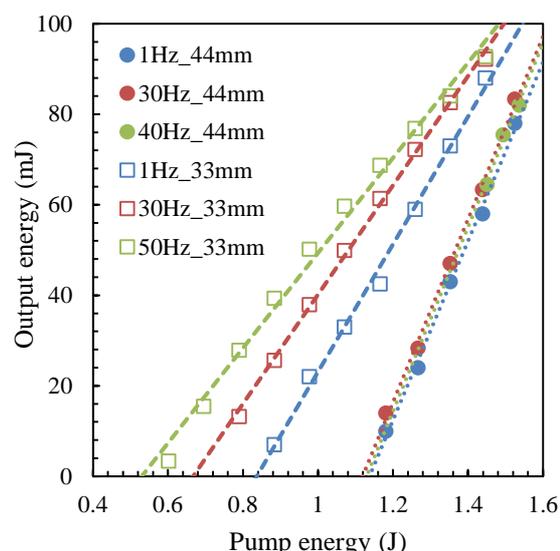


Fig. 1. Q-switched pulse energy of Tm,Ho:YLF laser as a function of pump energy at  $-80^\circ\text{C}$  and several pulse repetition frequency. The lengths of the laser rod were 44 and 33 mm, respectively.

動作まで改善することができた. CDWL の性能指数は, パルスエネルギーと繰り返し周波数の平方根の積で表すことができる. 改善前の性能指数 0.439 から 0.569 まで改善することに成功した.

改良型レーザーモジュールおよびその共振器は, 高密度励起化による発振閾値の低下に加えて, 共振器モードとのマッチング効率の最適化, 励起波長の最適化も実施されている. そのため, 繰り返し周波数の増加 (実効的な Tm-Ho 間のエネルギー遷移効率の増加) による閾値の低下も確認できる. 閾値は 1 Hz 動作で 0.84 J まで低下した. 最大励起時の電気-光変換効率は 2.8% まで改善された.

### 4. まとめ

NICT で開発された可搬型の  $2\mu\text{m}$  帯の CDWL の送信機の性能評価を実施して, その性能指数を 0.439 から 0.569 まで改善することに成功した. また, 改良型レーザーモジュールは, 発振閾値の低下によって電気-光変換効率が従来のもものと比べて, 1.8 から 2.8% に改善した. 今後は, 衛星搭載 CDWL の送信機のプロトタイプとして開発している改良型レーザーモジュールを CDWL の送信機として使用して CDWL の性能向上を目指す.

### 参考文献

- 1) K. Mizutani, et al.: Appl. Opt. **54** (2015) 7865.
- 2) A. Sato, et al.: IEEE Photo. Tech. Lett. **29** (2016) 134.
- 3) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering Sixth Revised and Updated Edition* (Springer, 2006) pp.111-125.
- 4) D. Bruneau, et al.: Appl. Opt. **37** (1998) 8406.
- 5) A. Brenie, et al., J. Phys. **50** (1989) 1463.
- 6) B. M. Walsh, et al.: J. Lumin. **90** (2000) 39.
- 7) M. Aoki, et al.: Submitted to Appl. Opt.