

# 2 $\mu\text{m}$ 帯コヒーレントライダーの要素技術開発 その2

青木 誠, 岩井 宏徳

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

## Development of elemental technologies for 2.05- $\mu\text{m}$ coherent lidar system, Part 2

Makoto AOKI and Hironori IWAI

NICT, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

Abstract: NICT has been developing a 2.05- $\mu\text{m}$  coherent differential absorption lidar (DIAL) for simultaneous water-vapor and wind measurements. The lidar mainly comprises 2.05- $\mu\text{m}$  Tm,Ho:YLF seed lasers, a wavelength control unit, and a 2.05- $\mu\text{m}$  Ho:YLF pulse laser end-pumped by a 1.94-micron Tm: fiber laser. This paper introduces the development status of the seed laser the high-power Ho:YLF pulse laser for the 2.05- $\mu\text{m}$  coherent DIAL system.

Key Words: Tm,Ho:YLF laser, Ho:YLF laser, coherent lidar, DIAL

### 1. はじめに

情報通信研究機構 (NICT) では, ゲリラ豪雨や竜巻等に代表される極端気象の早期捕捉や発達メカニズムの解明に貢献する, 風, 水蒸気, 降水等を高時間空間分解能で観測するリモートセンシング技術の研究開発を行っている. 2019 年からは, これまでに開発を行ってきた波長 2 $\mu\text{m}$  帯のコヒーレントドップラーライダーと CO<sub>2</sub> 差分吸収ライダー (CO<sub>2</sub>DIAL) の基盤技術を生かして, コヒーレント方式の水蒸気差分吸収ライダー (H<sub>2</sub>ODIAL) の開発を開始した. H<sub>2</sub>ODIAL は, 主に波長 2 $\mu\text{m}$  帯の単一波長 CW シードレーザー, シードレーザーの波長を観測に適した波長に制御する波長制御装置, 波長制御したシードレーザーを光注入同期光源とする高出力パルスレーザーから構成される. 本稿では H<sub>2</sub>ODIAL の光送信機の主要部品であるシードレーザーと高出力パルスレーザーの開発状況について述べる.

### 2. 2 $\mu\text{m}$ 帯のシードレーザーの開発

H<sub>2</sub>ODIAL の光送信機には, 高パルスエネルギー, 高繰り返し周波数, 単一波長, 狭線幅・高安定, 広い波長掃引幅および高い操作性などといった性能が要求される. これらの要求を満たすために, 低出力な狭線幅・高安定な単一波長レーザー (シードレーザー) を高出力パルスレーザーに光注入同期して, パルスレーザーの発振モードの選択及び波長安定化を行っている. 従来は市販の 2 $\mu\text{m}$  帯の単一波長 CW レーザーを購入してシードレーザーとして利用していたが, このレーザーは非常に高価で入手性も悪いため, 2020 年度からは NICT 内製の波長可変な単一波長 CW レーザーの開発を進めている.

開発を進めているシードレーザーは, 低コスト化と安定化を主眼として, レーザー媒質である Tm,Ho:YLF 結晶, 発振波長選択のためのエタロン素子, ピエゾ素子に取り付けられた出力鏡から構成されるシンプルな LD 端面励起の固体レーザーとした. 図 1 に試作したシードレーザーのフリーランニング状態での波長の時間変化を示す. エタロン素子の厚さや傾き等のパラメータ, ピエゾ素子の印加電圧を変化させることで発振波長の選択が可能である. 本測定では CO<sub>2</sub> の R28 吸収線 (2051.515 nm) 付近の波長を選択した. 単一波長発振状態でのレーザー出力は, シーディング及びヘテロダイン検波に用いる上

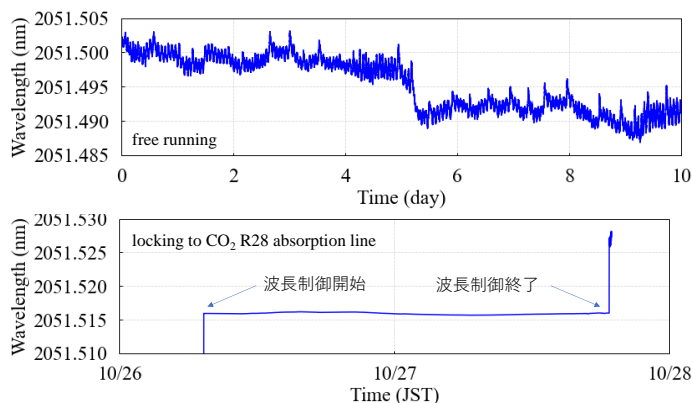


Fig. 1. Long-term wavelength fluctuation for free running and locking modes with reference to the CO<sub>2</sub> R28 absorption line.

で十分な 30 mW 以上の値が得られた。フリーランニング時には 10 日間以上に渡って単一波長動作を実現したが、外乱（特に環境温度変動）により波長が数 10 $\mu\text{m}$  程度変動することがわかった。H<sub>2</sub>ODIAL の測定パイアスを $\pm 5\%$ 以下に抑えるためには、波長の変動を $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下に抑える必要がある<sup>1)</sup>。そのため、PDH法を用いて CO<sub>2</sub> の吸収線にシードレーザーの発振波長を制御する実験を実施して、NICT 内製のシードレーザーの発振波長の変動を $\pm 0.25\mu\text{m/day}$ 以下に抑えることに成功した。今後は、低熱膨張材料を用いたレーザー筐体を開発して、更に高安定かつ波長可変なシードレーザーの実現を目指す。

### 3. 2 $\mu\text{m}$ 帯の Ho:YLF パルスレーザーの開発

NICT では、波長 2 $\mu\text{m}$  帯のライダーの光送信機として、高パルスエネルギーが期待できる LD 側面励起の冷却型固体レーザー (Tm,Ho:YLF レーザー) の研究を進めてきた。その一方で、水谷らが中心となり、より効率的な観測を目指して、医療用や加工用として低価格化及び普及化が進んでいる Tm ファイバーレーザーを励起光源とする端面励起 Ho:YLF レーザーの開発を進めてきた<sup>2)</sup>。このレーザーは、常温で効率的な高繰返し周波数・高平均出力動作が可能であり（その一方で、Tm,Ho:YLF レーザーほどの高パルスエネルギー動作は難しい）、使いやすく効率的な H<sub>2</sub>ODIAL を構築できる可能性がある。そのため、地上用 H<sub>2</sub>ODIAL 用の光源として、本格的に同レーザーの研究開発を開始した。2020 年度には、より高出力化を目指して、最大出力 100 W の Tm ファイバーレーザーを 2 台調達（これまでは 50 W 出力の製品を使用）した。

図 2 と表 1 に Ho:YLF パルスレーザーの実験結果を示す。昨年度の報告<sup>3)</sup>では、ランダム偏光で 100 W の Tm ファイバーレーザーを、偏光ビームスプリッターで s 偏光成分 (50 W) と p 偏光成分 (50 W) に分けて、p 偏光成分を励起源に使用して Ho:YLF レーザー発振器を励振させていたが（残りの 50 W は Ho:YLF レーザー増幅器に使用予定だった）、最近ではランダム偏光 100 W すべてのパワーを Ho:YLF レーザー発振器の励起に用いて実験を進めている。100 W で励起するために、Tm ファイバーレーザーの励起モードや Ho:YLF レーザー共振器モードの再設計を行い、その結果、従来よりも高いパルスエネルギー (33.1 mJ, 300 Hz, 出力安定度 $\pm 1.1\%/h$ 以下) や高い平均出力動作 (20.1 W, 3 kHz) を実現した。

今後は更なる高出力化のために、今回開発した Ho:YLF レーザー発振器と、最大出力 100 W の Tm ファイバーレーザー励起 Ho:YLF レーザー増幅器を組み合わせた、Ho:YLF master oscillator power amplifier (MOPA) を開発する予定である。また、今年度中に開発した Ho:YLF MOPA による長距離風観測試験を実施して、高出力 Ho:YLF MOPA の技術実証を行う予定である。

### 5. まとめ

NICT では波長 2 $\mu\text{m}$  帯の H<sub>2</sub>ODIAL の開発を進めている。今後は、波長制御した NICT 内製のシードレーザーと Ho:YLF パルスレーザーを組み合わせ、高精度かつ長期運用可能な H<sub>2</sub>ODIAL の開発を進める。

### 6. 参考文献

- 1) M. Aoki and H. Iwai: Appl.Opt. **60** (2021) 4259.
- 2) K. Mizutani et al.: Opt. Lett. **43** (2018) 202.
- 3) 青木 誠, 岩井 宏徳: 第 39 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2021) p. 66.

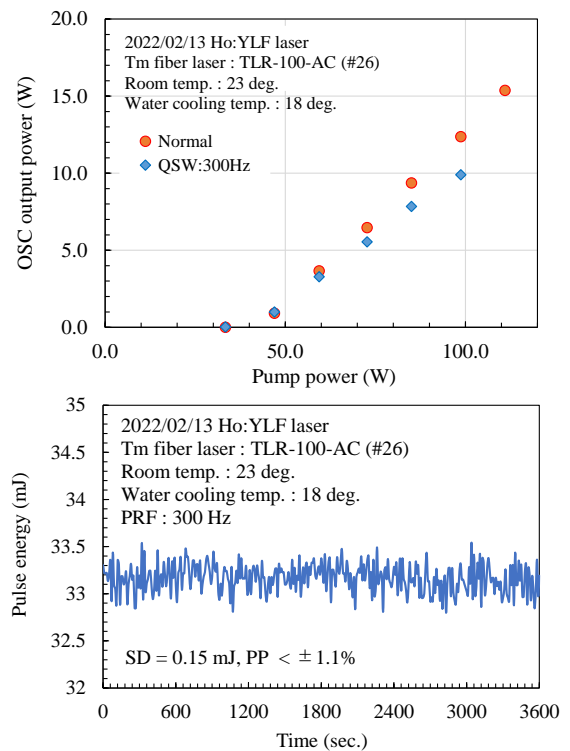


Fig. 2. Output performance of Ho:YLF laser.

Table 1. Performance of Q-switched Ho:YLF laser.

Ho:YLF laser	This study			Ref. 2	Ref. 3
PRF (Hz)	300	1000	3000	300	300
Energy (mJ)	33.1	15.7	6.7	17.3	18.4
Power (W)	9.93	15.7	20.1	5.19	5.52
Width (ns)	150	160	500	200	-