

2 μm 帯コヒーレントライダーの要素技術開発 その3

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- μm coherent lidar system, Part 3

Makoto AOKI and Hironori IWAI

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

Abstract: NICT has been developing a 2.05- μm coherent differential absorption lidar (DIAL) for simultaneous water-vapor and wind measurements. The lidar mainly comprises 2.05- μm Tm,Ho:YLF seed lasers, a wavelength control unit, and a 2.05- μm Ho:YLF pulse laser end-pumped by a 1.94-micron Tm: fiber laser. This paper introduces the development status of the seed laser and the Ho:YLF pulse laser for the 2.05- μm 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 μm 帯のコヒーレントドップラーライダーと CO₂ 差分吸収ライダー (CO₂DIAL) 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 (H₂ODIAL) の開発を開始した。H₂ODIAL は、主に波長 2 μm 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 H₂ODIAL 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 μm 帯のシードレーザーの開発

H₂ODIAL 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 μm 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 にプロトタイプシードレーザーの写真を示す。筐体には低熱膨張材料であるスーパーインバー合金を用いており、それにより高安定な動作を実現した。シードレーザーは、エタロンの厚さや傾き等のパラメータ、出力鏡に取り付けられたピエゾの印加電圧を変化させることで 2050.0 nm から 2051.5 nm の範囲で発振波長の選択が可能である。今回は、大気吸収率が低い 2051.250 nm にシードレーザーの波長を制御してコヒーレントドップラーライダー観測を行った。

図 2 に試作したシードレーザーを使用したライダーの観測結果の一例を示す。ライダーの光送信機には、パルスエネルギー 50 mJ、繰り返し周波数 (PRF) 30 Hz で動作する 2

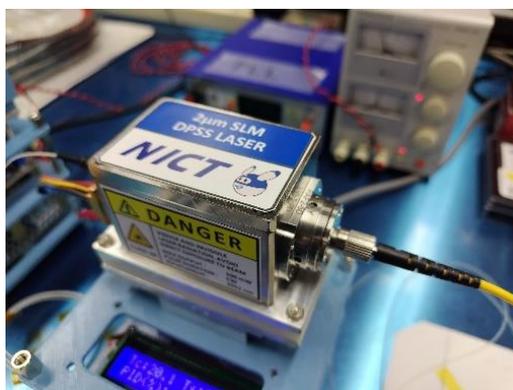


Fig. 1. Prototype of 2- μm seed laser.

μm 帯の LD 励起伝導冷却型の Tm,Ho:YLF パルスレーザーを用いた。このパルスレーザーに NICT で内製した $2\mu\text{m}$ 帯のシードレーザーを光注入同期して発振波長の制御を行った。寒色系がライダーに近づくドップラー速度を表しており、前線の接近に伴う雲底高度の低下や前線通過時の降雨時の雨滴の落下等がドップラーライダーによって捉えられていることがわかる。シードレーザーの動作は非常に安定しており、この実験を開始した 2023 年 1 月から現在に至るまで半年以上の連続運用に成功している。今後は観測データの蓄積を進めると共に、その測定結果の検証（他のセンサーとの比較など）を進めていく予定である。

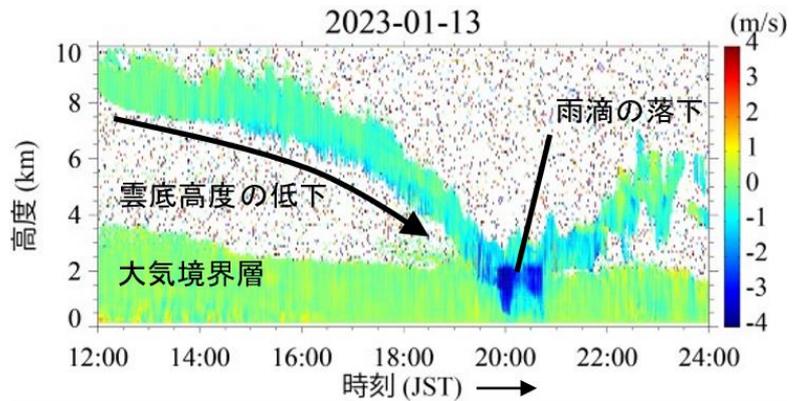


Fig. 2. Time-height profile of vertical wind velocity measured with the coherent Doppler lidar using our 2- μm seed laser.

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、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いる¹⁻²⁾。最近ではより遠くまで高精度に測定するために、レーザーの高出力化を重点的に実施している³⁾。

図 3 に現在の Ho:YLF レーザー発振器の入出力特性を、表 1 にこれまでの Ho:YLF レーザー出力との比較結果を示す。励起にはランダム偏光で最大平均出力 100 W の Tm ファイバーレーザーを用いている。これまでの研究では、端面励起した励起パワーの一部が、レーザー媒質に吸収されずにいたが、最近ではレーザー媒質を複数個用いることにより、励起光の吸収効率を向上させることに成功した。その結果、従来よりも高いパルスエネルギーと高い繰返し周波数の両立 (33.5 mJ, 600 Hz) 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 レーザー発振器と同様の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、今後は開発した Ho:YLF MOPA による長距離風観測試験及び水蒸気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。

4. まとめ

NICT では波長 $2\mu\text{m}$ 帯の H₂O DIAL 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 H₂O DIAL の開発を進める。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K04978 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) K. Mizutani et al.: Opt. Lett. **43** (2018) 202.
- 2) 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) pp. 34-35.
- 3) 青木 誠, 岩井 宏徳: 第 40 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2022) pp. 66-67.

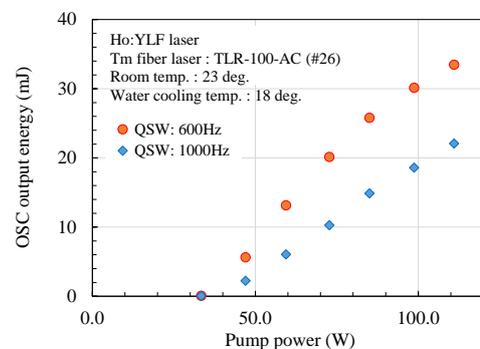


Fig. 3. Output performance of Ho:YLF laser.

Table 1. Performance of Ho:YLF lasers.

Ho:YLF laser	This study		Ref. 1	Ref. 2	Ref. 3
PRF (Hz)	600	1000	300	300	300
Energy (mJ)	33.5	22.1	17.3	18.4	33.1
Power (W)	20.1	22.1	5.19	5.52	9.93
Width (ns)	131	233	200	-	150