

2 μm 帯コヒーレントライダーの要素技術開発

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

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 elemental technologies 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, シードレーザ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を光注入同期光源とする高出力パルスレーザから構成される. 本稿では H₂ODIAL の要素技術開発状況について述べる.

2. 2 μm 帯の単一波長 CW シードレーザの開発

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 (シードレーザ) を高出力パルスレーザに光注入同期して, パルスレーザ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 レーザを購入してシードレーザとして利用していたが, このレーザ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 レーザの開発を進めている.

開発を進めているシードレーザは, 低コスト化と安定化を主眼として, レーザ媒質である 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とした. 図 1 に試作したシードレーザ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. 本測定では水蒸気の吸収線 (2050.532 nm) 付近の波長を選択した. 単一波長発振状態でのレーザ出力は, シーディング及びヘテロダイン検波に用いる上で十分な 30 mW 以上の値が得られた. その一方で, 長時間運用すると発振モードがホップ (1 GHz 程度, 共振器長に相当) する問題や 2 波長発振する問題が見られた. 今後はエタロン素子パラメータの最適化及び共振器長の短縮を実施してモードホップ及び 2 波長発振を抑制, 高安定なレーザ筐体を開発して長時間高安定なシードレーザの実現を目指す.

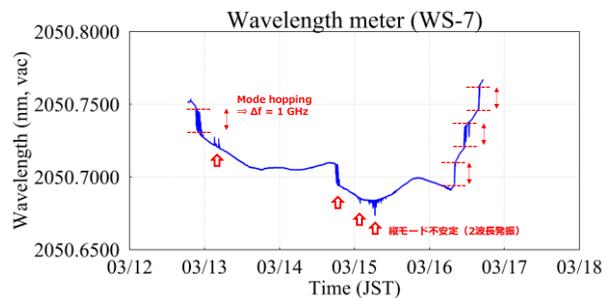


Fig. 1. Long-term laser wavelength fluctuation for free-running mode.

3. 波長制御装置の開発

シードレーザは長時間の連続運転や周囲の環境変化によって、数 pm 程度の波長ドリフトおよび波長変動を起こす。λ_{on} (吸収波長) と λ_{off} (非吸収波長) は、それぞれ H₂O 分子と CO₂ 分子の吸収断面積の波長依存性が大きい場所に位置しているため、波長変動により測定誤差が生じる。そのため、従来の波長制御システムをベースとし、より広い波長範囲で安定して波長制御可能なシステムを開発した¹⁾。従来の方式の波長制御範囲は、CO₂ ガスセルロックした基準周波数 (2050.967 nm) を中心に最大で±6.5 GHz (±0.09 nm) 程度だったので、29.725 GHz 離れた λ_{on} の波長安定化を行うことができなかったが、新しく開発したシステムでは、波長制御範囲を±30 GHz (±0.42 nm) 以上まで拡張し、λ_{on} (吸収波長) と λ_{off} を長時間安定して同時に制御することにも成功している (図 2)。この実験では NICT 内製のシードレーザではなく市販の単一波長レーザの発振波長を制御しているが、今後は NICT 内製のシードレーザを用いて波長安定化実験を実施する予定である。

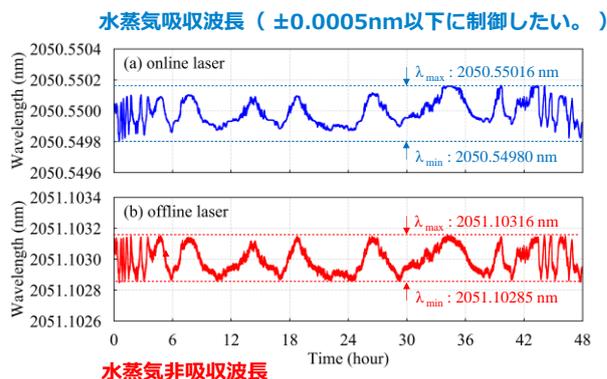


Fig. 2. Long-term laser wavelength fluctuation for wavelength locking mode.

4. 2μm 帯の常温動作型 Ho:YLF パルスレーザの開発

NICT では、波長 2μm 帯のライダーの光源として、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 (Tm,Ho:YLF レーザ) 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 ファイバーレーザを励起光源とする 端面励起 Ho:YLF レーザの開発を進めてきた²⁾。このレーザは、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 H₂ODIAL を構築できる可能性がある。そのため、地上用 H₂ODIAL 用の光源として、本格的に同レーザ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 ファイバーレーザを 2 台調達 (これまででは 50 W 出力の製品を使用) した。図 3 に、ランダム偏光で 100 W の Tm ファイバーレーザを、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発振させた Ho:YLF レーザ発振器の出力を示す (青丸)。また、比較として 50 W の Tm ファイバーレーザで励起した Ho:YLF Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) の出力を示す (橙丸)。同じ 50 W の励起でもレーザ発振器の最適化がなされているため、100 W の Tm ファイバーレーザで励起した発振器の方が、高い Q スイッチ出力 (5.52 W, 18.4 mJ, 300Hz) を得られた。今後は更なる高出力化のために、残りの s 偏光成分を Ho:YLF レーザ増幅器の励起に用いた Ho:YLF MOPA を開発する予定である。

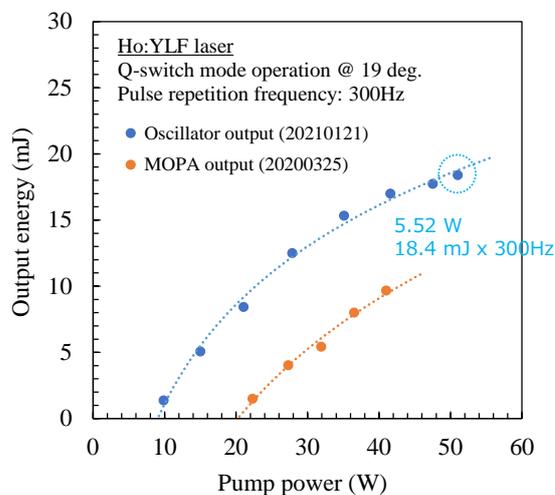


Fig. 3. Output energy of Ho:YLF laser.

5. まとめ

NICT では波長 2μm 帯の H₂ODIAL 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と常温動作の Ho:YLF MOPA を組み合わせ、高精度かつ長期運用に耐えられる H₂ODIAL 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.