

高スペクトル分解ライダー用 Nd:YAG レーザーの開発 その 3

青木 誠¹, 神 慶孝²

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

²国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Development of multimode Nd:YAG laser for high spectral resolution lidar system, Part 3

Makoto AOKI¹ and Yoshitaka JIN²

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

²NIES, 16-2 Onogawa, Tukuba, Ibaraki 305-8506

Abstract: This study describes a multi-longitudinal-mode, single-transverse-mode Nd:YAG laser with long pulse width for multimode high spectral resolution lidar (MM-HSRL). The laser comprises a master oscillator, a power amplifier, and harmonic generation modules. This paper introduces the development status of the Nd:YAG master oscillator power amplifier (MOPA) and harmonic generation modules for the MM-HSRL system.

Key Words: Nd:YAG laser, Nd:YAG MOPA, multimode high spectral resolution lidar, MM-HSRL

1. はじめに

国立環境研究所 (NIES) と情報通信研究機構 (NICT) は、(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費の委託課題の一つとして、PM2.5 などの大気微粒子 (エアロゾル) の濃度を定量的かつ連続的に計測できる次世代型エアロゾルライダーの開発を進めている「研究課題名: 大気モニタリングネットワーク用低コスト高スペクトル分解ライダーの開発, 研究期間: 令和 2 年度~令和 4 年度」。開発しているライダーは、現在国立環境研究所が東アジアにネットワーク展開している従来型ライダー手法とは異なり、エアロゾルの光学的な濃度 (消散係数) を高精度に測定できる高スペクトル分解ライダー (HSRL) であり¹⁾、将来的には自動連続観測システムとして多地点に展開することを見据えて、低コストで簡易的な装置を目指して開発を進めている²⁻⁵⁾。

NICT は HSRL のレーザー光源の開発を担当し、3 年間の研究開発期間で HSRL 観測に適した小型で安価な LD 励起のマルチ縦モード Nd:YAG 主発振器出力増幅器 (Master Oscillator Power Amplifier: MOPA) を開発する予定である。本発表では 3 年間の委託研究期間で開発した Nd:YAG MOPA を紹介する。

2. 3 波長 Nd:YAG MOPA の開発

開発した 3 波長 Nd:YAG MOPA は主発振器、増幅器、波長変換素子により構成される。令和 2 年度には主発振器の設計及び開発を実施して、200 mW の励起 (パルスエネルギー 2 mJ, パルス繰り返し周波数 100 Hz) に対して、30 mW (0.3 mJ, 100 Hz, パルス幅 12 ns, 安定度 $\pm 1\%$ /day 以下) の計画通りの性能が得られることを確認した³⁾。令和 3 年度以降は Nd:YAG MOPA の完成を目指して、増幅器及び第二・第三高調波の発生機構の開発を進めた⁵⁾。委託研究の最終年度である令和 4 年度には、Nd:YAG MOPA の完成を目指して、レーザーのインテグレーションを実施した。

図 1 に開発した主発振器モジュール、増幅器モジュール、波長変換モジュールを用いて構成した 3 波長 Nd:YAG MOPA を示す。当初の研究計画では増幅器モジュールを 2 個用いるシステムを検討していた

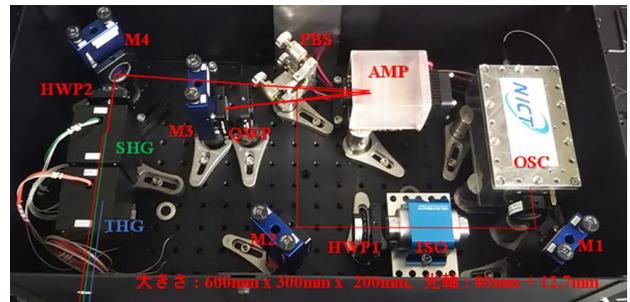


Fig. 1. Schematic diagram of Nd:YAG MOPA for the MM-HSRL. (M1~M4: HR mirror, ISO: Optical isolator, OSC: Master oscillator, AMP: Power amplifier, PBS: Polarizing beam splitter, QWP: quarter-wave plate, HWP1~HWP4: Half-wave plate, SHG: Second harmonic generation module, THG: Third harmonic generation module.)

が、受光部に Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を導入したことにより、レーザー出力に対する要求が下がったので、計画を変更して1段増幅のシステムで開発を進めた。これにより、装置をより小型化して低コスト化することに成功した。

主発振器レーザー出力は、戻り光対策用のアイソレータを通過した後、1/2波長板によって偏光方向をs偏光に調整されて、増幅器モジュールに入射する。増幅パスは、増幅用のレーザーロッド内に蓄積されたエネルギーを効率的に利用するために4パス構成としており、偏光ビームスプリッター(PBS)と1/4波長板を使用してレーザーの偏光を利用することでこれを実現した。増幅器モジュールによって増幅された主発振器のレーザー光は、1/2波長板によって偏光方向を調整された後、波長変換部によって、532 nmと355 nmのレーザー光に波長変換される。第二高調波発生には波長変換効率が高く取り回しが容易なType-II KTP結晶を、第三高調波発生には入手性が高く優れた光学特性を持つType-II LBO結晶を採用した。これらの非線形光学結晶は温度調節機能を備えた専用の気密筐体に設置されており、レーザー光の非線形光学結晶への偏光、入射角度と温調を組み合わせ、波長変換効率の調整を行うことが可能である。また、レーザーの安定動作化のために、光学系全体は600 mm×300 mm×200 mmの可搬型レーザー筐体内に収められている。レーザーを構成する発振器等には、温度調整機能が付加されており、動作環境温度が変動したとしても、長期の連続観測に耐えることが可能である。

図2に開発した3波長Nd:YAG MOPAの入出力特性を示す。増幅器に入力する主発振器レーザーは、0.2 mJ (0.2 20 mW, 100 Hz, パルス幅 23 ns)とした。第3高調波出力が最大になるように調整を行った後、ハーモニックビームスプリッターを用いて、基本波(1064 nm)、第二高調波(532 nm)、第三高調波(355 nm)を分離して出力測定を行った。最大励起である24 mJのときには、2.03 mJの基本波出力、0.881 mJの第二高調波出力、0.303 mJの第三高調波出力が得られた。また、増幅後のレーザーパルス幅は、HSRLの観測に適した20 ns以上の長パルス幅(狭スペクトル幅)を保ったままのレーザー増幅が実現した。得られた各波長のパルスエネルギーは当初想定していた値(5 mJ@1064 nm, 532 nm, 0.5 mJ@355 nm)よりも低い値であったが、受信系にMPPCを導入したことにより、レーザー出力に対する要求が下がったので、観測仕様を満たすことが可能である。

3. まとめ

MM-HSRLに適したマルチ縦モードNd:YAG MOPAの増幅器や波長変換部の開発状況を述べた。当初の研究計画のタスクを全て遂行し、設定した研究目標を達成することができた。開発したNd:YAG MOPAを用いた高スペクトル分解ライダーを構築し、測定データを1時間毎に自動解析してエアロゾル消散係数および種類別エアロゾル濃度を出力するシステムの開発にも成功している。

謝辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20205R01)により実施した。また、本研究の実施にあたりご支援及びご助言をいただいた、同研究課題のプログラムオフィサーである環境再生保全機構の西川雅高氏、アドバイザーである東京都立大学の阿保真氏、東北工業大学の佐藤篤氏、気象研究所の酒井哲氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Y. Jin et al.: Appl. Opt. 56 (2017) 5990.
- 2) 神 慶孝, 青木 誠: 第39回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2021) pp. 25-28.
- 3) 青木 誠, 神 慶孝: 第39回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2021) pp. 29-30.
- 4) 神 慶孝, 青木 誠: 第40回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2022) pp. 36-37.
- 5) 青木 誠, 神 慶孝: 第40回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2022) pp. 38-41.

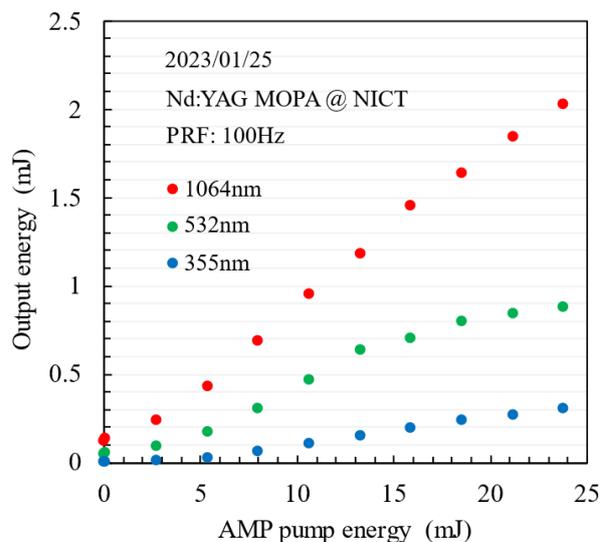


Fig. 2. Output energy of Nd:YAG MOPA.