

# 高スペクトル分解ライダー用 Nd:YAG レーザーの開発

青木 誠<sup>1</sup>, 神 慶孝<sup>2</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>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

Makoto AOKI<sup>1</sup> and Yoshitaka JIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NICT, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

<sup>2</sup>NIES, 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 two-stage power amplifier, and harmonic generation modules. An oscillator output energy of 0.3 mJ with a pulse width of 12 ns was obtained at a pulse repetition rate of 100 Hz. The specifications of the developed oscillator meet a requirement for the master oscillator of the MM-HSRL.

**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、PM<sub>2.5</sub> 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、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。

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。本発表では令和 2 年度に実施した Nd:YAG 主発振器の開発状況を述べる。

### 2. 研究内容

表 1 に開発予定のレーザーの諸元を示す。マルチ縦モードのレーザーを用いた HSRL (MM-HSRL) 観測<sup>1)</sup> で高い観測精度を得るためには、レーザーの各モードの周波数スペクトル幅が狭く (時間パルス幅が長く)、縦モードのピーク周波数が安定かつ干渉計の自由スペクトル領域と一致する必要がある。レーザーの縦モードのピーク周波数間隔は、レーザーの共振器長によって決定される。本研究では、縦モードのピーク周波数と HSRL に最適化された干渉計の自由スペクトル領域を一致させるため、100 mm の光学的距離を持つレーザー共振器を設計した。共振器長と時間パルス幅には比例関係があり、共振器長が短いレーザーの場合は時間パルス幅が短くなる。また、レーザーのパルスエネルギーと時間パルス幅には反比例の関係があり、パルスエネルギーを大きくするとパルス幅は短くなる。HSRL 観測に適した長パルス幅と短い共振器長を両立させるために、長パルス幅を持つレーザー主発振器出力を増幅器を用いて観測に必要なパルスエネルギーまで増幅する MOPA 方式のレーザーを採用した。

Table 1. Laser specifications for the MM-HSRL.

レーザーの仕様	
Laser system	Diode-pumped, MOPA, multimode, Nd:YAG laser
Laser energy	> 20 mJ@1064 nm (5 mJ@532 nm, 0.5 mJ@355 nm) ※ conversion efficiency > 30% と仮定
Repetition rate	100 Hz
Laser mode spacing	1.5 GHz
Resonator length	100 mm
Spectral width	< 100 MHz (for each longitudinal mode)
Pulse width	> 4.4 ns
Stability	< ± 3 % (Power), < 100 MHz (Frequency drift)
Beam divergence	< 0.5 mrad (full angle for 86% energy)

令和2年度では主発振器の設計及び開発を実施した。主発振器は低コスト化と安定化を主眼として、主にレーザー媒質である Nd:YAG 結晶、Q スイッチ素子、ポラライザー、出力鏡から構成されるシンプルな LD 端面励起レーザーとした。Q スイッチ素子については、能動的及び受動的な素子を検討し、長パルス化の観点とパルス発生タイミングの制御性の観点から、能動的な Q スイッチ素子である Acousto-Optic (AO) Q スイッチ素子を選択した。出力鏡は、共振器の安定条件を満たすために適切な曲率を持たせる必要があるが、本研究では、低コスト化及び曲率パラメータの最適化と反射率の最適化を独立して考えるために、反射率の最適化については複数種類 (80, 90, 95 %) の反射率を持つ平面出力鏡を調達し、共振モードの最適化に関しては共振器内に様々な焦点距離を持つ平凸レンズを挿入することで実施した。

### 3. 研究結果

図1に試作した主発振器のプロトタイプを示す。各光学素子は金属筐体内の適切な位置に再現性が良く設置できるように設計を行った。Nd:YAG 媒質と AO Q スイッチ素子は、熱的な負荷が大きいので、レーザーを安定化させるためにペルチェ素子を用いて動作温度をコントロールする。出力鏡は高安定な上方操作型フレクチャーミラーマウントに収められており、このマウントを調整することでレーザー出力の調整を行う。

図2に Nd:YAG 主発振器レーザーの出力パルスエネルギーとパルス幅の出力鏡反射率依存性を示す。横軸は励起用 LD の入力パルスエネルギーであり、入力が大きくなると出力パルスエネルギーが大きくなり、パルス幅が短くなることがわかる。発振閾値は反射率が高くなるほど低下するが、最大励起時 (3 mJ 程度) に得られるエネルギーはほとんど変わらなかった。HSRL 観測で高い観測精度を得るためには、レーザーのパルス幅が長い必要があるが、反射率が高いほどパルス幅が長くなることから反射率が高い出力鏡が有利であることがわかった。ただし、反射率を上げすぎると光学素子のダメージを引き起こしやすくなるため、長期安定動作を実現するために、反射率 90 % 前後のミラーを用いることとした。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。

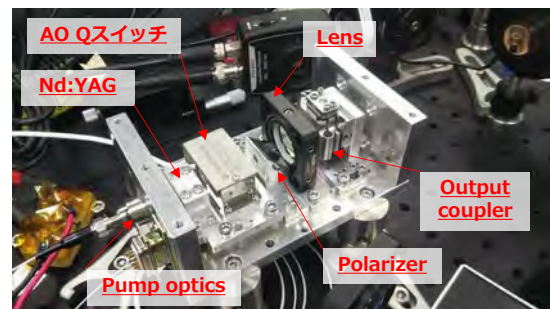


Fig. 1. Prototype of Nd:YAG oscillator.

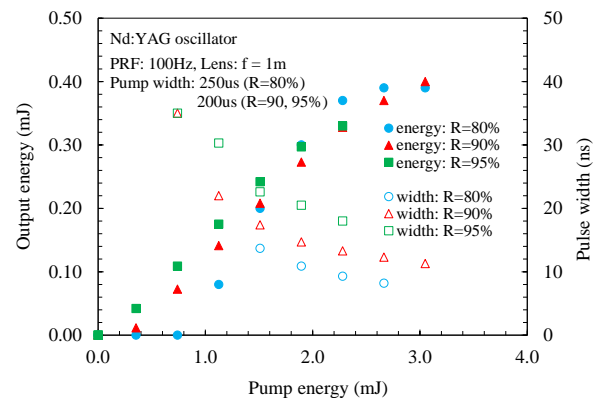


Fig. 2. Output performance of Nd:YAG oscillator.

### 4. まとめ

MM-HSRL に適したマルチ縦モード Nd:YAG MOPA の主発振器の開発状況を述べた。昨年度に実施した Nd:YAG 主発振器の開発に関しては、計画通りの性能が得られることを確認した。現在は Nd:YAG MOPA の完成を目指して、増幅器のシミュレーション及び設計、第二・第三高調波の発生機構の検討を進めている。今後は Nd:YAG MOPA を完成させて NIES で開発が進められている干渉計及び HSRL システムに組み込み、MM-HSRL 観測試験を進める予定である。

### 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.