

オゾン・水蒸気 DIAL 用近赤外全固体レーザー Near infrared all solid Laser for ozone and water vapor DIAL

長澤親生⁽¹⁾、増子浩平⁽¹⁾、永井智広⁽²⁾
Chikao Nagasawa⁽¹⁾, Kohei Masuko⁽¹⁾, Tomohiro Nagai⁽²⁾

(1)都立大院・工
Department of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University

(2)気象研究所
Meteorological Research Institute

ABSTRACT

We have developed an advanced airborne differential absorption lidar (DIAL) for measurement of water vapor distribution in the atmosphere. It is shown that the LD pumped Nd:YAG microchip laser with the double cavity is useful as a seed laser of a water vapor DIAL at 946 nm wavelength. Single longitudinal mode oscillations of the double cavity microchip laser are confirmed experimentally at wavelengths corresponding to candidates of on/off lines for the water vapor DIAL around 946 nm wavelength. When the microchip laser with the double cavity oscillates with the single longitudinal mode, it can obtain more output power than that with the single cavity.

1.はじめに

従来、水蒸気 DIAL の光源として、波長可変な固体レーザーである Alexandrite(720-730nm)や Ti:sapphire(810-820nm)が用いられてきた。これらの固体レーザーはコンパクトでかつ機械的強度に優れ、発振を得るのが容易であるというメリットがある。しかし将来的に、全地球規模での観測手段となり得る衛星搭載 DIAL のためには、わずかな水蒸気密度を測定できる高い測定感度と、よりコンパクトで高い電源効率を併せ持つ光源の開発が求められている。強い水蒸気吸収線を持つ 940nm 帯の波長域と、Nd:YAG の 946nm が重なることに着目した LD 励起の Nd:YAG を用いた 946nm 帯水蒸気 DIAL が推奨されているが^[1]、我々はそのシード光源として、波長可変である複合共振器型の Nd:YAG マイクロチップレーザーを提案、製作し、シード光源としての有用性について実験的評価を行った。

また、946nm の 3 倍波である 315nm の付近にはブロードに広がるオゾンの吸収線が存在する。これを ON ラインとし、YAG の主要な発振波長である 1064nm の 3 倍波である 355nm を OFF ラインとしたオゾン DIAL の可能性を検討する目的で、オゾン DIAL の測定誤差シミュレーションも併せて行った。

2.シード光

DIAL の送信ビームには高出力のパルスレーザーを用いるが、一般に励起が強く、利得が高いため、利得幅内に多数の縦モードが許容され、不安定な多モード発振状態となる。光注入同期法の一つであるインジェクションシーディングは、低出力で単一モードのマスターレーザー(シード光)により、高出力 Q スイッチ動作のパルスレーザーを単一モード化し、高安定化を実現する有効な方法である。我々は水蒸気 DIAL のシード光源として、単一モード発振かつ 946nm 付近での波長可変を得られる、複合共振器型マイクロチップレーザーを提案する。

3.Nd:YAG マイクロチップレーザー

マイクロチップレーザーは厚さ 1mm 程度の結晶に直接反射膜を蒸着し、結晶自体で共振器を構成したものである。共振器長が短いため、共振器長で決まる利得幅内に許容される縦モードの本数が少なくなり、単一モード発振を容易にする。複合共振器型はマイクロチップレーザーから僅かに間隔を設け(200 μm 程度)、外部鏡を設置する共振器構成であり、マイクロチップ - 外部鏡間のエアギャップはエタロンの役割を果たす為、波長選択性を高める。またピエゾ素子でエアギャップ間隔を微小変化させることで波長可変性が得られる。複合共振器型マイクロチップレ

ザーの写真を Fig.1 に、構成図を Fig.2 にそれぞれ示す。

LD(808nm)からの励起光は集光系を通して結晶表面に集光される。結晶は 1.4% ドープの Nd:YAG で直径 3mm、厚さ 2mm である。結晶表面には 946nm に対して高反射、YAG の他の発振波長である 1064nm、1320nm に対して高透過の膜が蒸着してある。エアギャップ間隔は外部鏡に取り付けた piezo 素子に電圧を加えて変化させる(0.08 $\mu\text{m/V}$)。

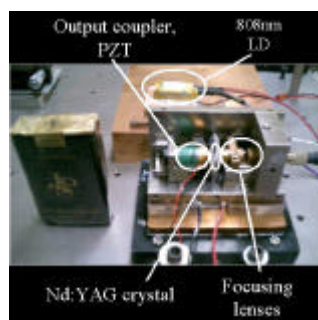


Fig.1 Photograph of the Nd:YAG microchip laser with the double cavity.

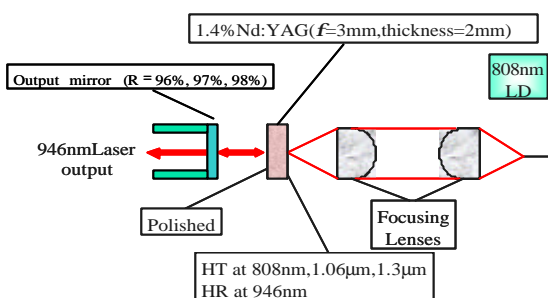


Fig.2 The experimental scheme of the Nd:YAG microchip laser with the double cavity.

4 実験結果

Fig.3 に単純マイクロチップ及び複合共振器型の入出力特性を示す。複合共振器は外部鏡反射率 97%、エアギャップ間隔は 190 μm とした。グラフから、単純マイクロチップの場合スロープ効率は 30% と高いが、単一縦モードは 0.4mW 以下までしか維持していない。対して、複合共振器型の場合スロープ効率は単純マイクロに劣るものの、単一縦モードを 20.5mW まで維持し、単純マイクロより遥かに高い単一縦モード出力を得られた。

Fig.4 に 946nm 付近の水蒸気吸収線と、複合共振器型マイクロチップの発振波長を示す。エアギャップ間隔は 190 μm から微小変化させ発振が確認された波長をプロットした。図から、946nm 付近で最も吸収の強い 946.0nm の他に、ON2line で示すような比較的密度の高い水蒸気分布の測定に適した波長や、OFFline 候補となるいくつかの波長の発振を確認した。

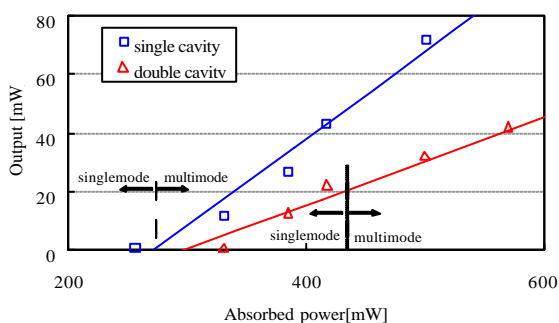


Fig.3 Characteristics of single longitudinal mode oscillations of the single cavity microchip laser and the double cavity microchip lasers

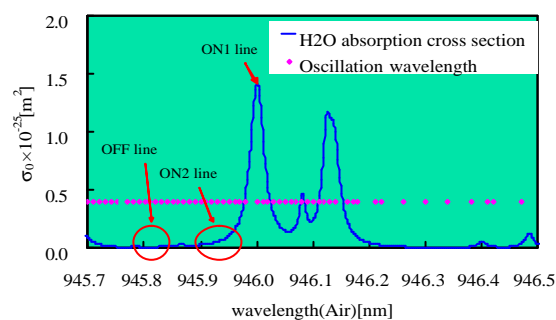


Fig.4 Laser oscillation lines (dots) measured experimentally and absorption lines of water vapor at around 946nm

5. オゾン DIAL

紫外領域のレーザーを用いたDIALは、対流圏、成層圏のオゾンの非常に優れた観測手法である。成層圏の観測では高度 50 km 付近までの濃度分布が比較的精度良く求められる点に大きな特徴がある。また、ゾンデによる観測の到達高度は 30km 付近が限界である。ところが、フロンガスによるオゾン破壊は 40 km 付近で顕著に起こると予想され、ライダー観測が注目されている。オゾンDIALでは 280-310 nm の波長が用いられ、エキシマーレーザーやYAGレーザーの第四高調波の誘導ラマン散乱、色素レーザーの第二高調波などが光源として用いられているが、今回得られた 946nm の 3 倍波である 315nm 付近にもオゾンの吸収線が存在する。この波長を ON ラインとするオゾン DIAL の実用性を検討するため、オゾン DIAL の測定誤差シミュレーションを行った。

6. ライダー方程式

距離 R からの吸収波長・非吸収波長における受信光子数 P_{ON} 、 P_{OFF} は一般にライダー方程式と呼ばれる次の式で表される。

$$P_{on} = \frac{(E/h\nu)AMbhQ}{R^2} \frac{c\Delta t}{2} \exp(-2 \int_0^R (a_a + a_g) dR) \quad \dots(1)$$

$$P_{off} = \frac{(E/h\nu)AMbhQ}{R^2} \frac{c\Delta t}{2} \exp(-2 \int_0^R a_a dR) \quad \dots(2)$$

ここで、E はパルスのエネルギー、h はプランク定数、 ν はレーザーの周波数、A は受信鏡面積、M は積算回数、 b は大気の後方散乱係数、 h はディテクタの量子効率、Q は光学系の全効率、c は光速、 t はゲート時間、 a は吸収を含む大気の消散係数、 g は対象気体の吸収による消散係数をそれぞれ表す。(1)式、(2)式より、距離 R1 - R2 間を分解能とする平均気体濃度 n は、

$$n = \frac{1}{2\Delta s |R2 - R1|} \ln \left(\frac{P_{on}(R1)P_{off}(R2)}{P_{on}(R2)P_{off}(R1)} \right) \quad \dots(3)$$

ここで、 Δs は吸収波長と非吸収波長の差分吸収断面積である。DIAL の測定精度の要因のうち、信号強度に起因する統計誤差は次の式で求められる。

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2\Delta s n |R1 - R2|} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[\frac{(P_{ij} + B_{ij})F + D}{P_{ij}^2} \right] \right\}^{1/2} \quad \dots(4)$$

ここで、F はディテクタの雑音指数であり、D はダークカウント、B は背景光雑音の大きさ(フォトン数)で次の式で表される。

$$B = \frac{L}{hv} \frac{r}{p} \left(\frac{q}{2} \right)^2 AwQh\Delta t \exp(-2t) \quad \dots(5)$$

ここで、L は太陽放射、 r は地表の反射率(アルベド)、 θ は受信視野角、 τ は干渉フィルタのスプレトル幅、 h は大気の光学的厚さをそれぞれ表す。シミュレーションに用いたパラメータはそれぞれ、 $E = 100$ [mJ]、 $A = 1/4$ [m²]、 $M = 3000$ 、 $b = 0.3$ 、 $Q = 0.8$ 、 $F = 6 \times 10^{-12}$ 、 $D = 2.4 \times 10^{-22}$ 、水平分解能 3[km]、垂直分解能 1[km]とした。

7.測定誤差シミュレーション

シミュレーションは高度 10km を飛行する航空機搭載 DIAL を仮定して行った。大気モデルは US 標準^[5]を使用し、オゾンモデルは HITRAN データベースより用いた(Fig.5)。

Fig.6 にオゾン DIAL の測定誤差シミュレーション結果を示す。

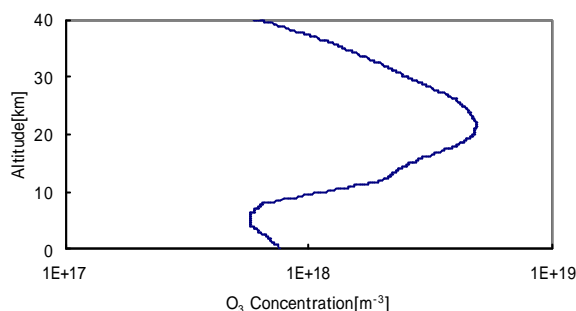


Fig.5 O₃ concentration model

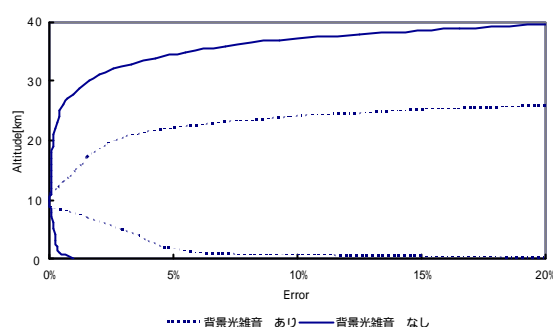


Fig.6 Measurement error simulation for ozone DIAL

Fig.6 より、背景光雑音がある場合、高度 20km 付近で測定誤差が 10% を超えているのに対し、背景光雑音が無い場合は高度 40km 付近まで測定誤差 10% 以下の精度となっている。背景雑音が測定精度を大きく低下させる原因となっており、太陽放射の無い夜間の測定を想定した場合は高度 40km 付近まで十分な測定精度が得られることが分かった。

8.まとめ

コンパクトで高効率の水蒸気 DIAL のシード光として、946nm 複合共振器型 Nd:YAG マイクロチップレーザーを提案した。実験から、20.5mW の単一縦モード出力、946nm 付近での発振と波長可変性を確認し、シード光として有用であることが分かった。次に Nd:YAG の 946nm と 1064nm の 3 倍波である 315nm と 355nm の 2 波長を用いたオゾン DIAL の実用性を検討するため、測定誤差シミュレーションを行った。結果から、夜間使用した場合は高度 40km 付近まで 10% 以下の測定精度が得られ、315nm はオゾン DIAL の送信ビームとして実用的であるといえる。また、非線形光学結晶を通した後に発生する、946nm、315nm の 2 波長からなる出力光を利用した水蒸気、オゾンの同時観測 DIAL システムの可能性もあり、水蒸気・オゾン DIAL 共に、LD 励起の Nd:YAG は有力な光源となり得ることを確認した。

引用文献

1. Bruneau, B., T. et al., Injection-seeded pulsed alexandrite laser for differential absorption lidar application, *Appl. Opt.*, Vol.33, No.18, 3941-3950, 1994.
2. Uchino, O. et al., Diode-pumped solid state laser for spaceborne water vapor DIAL, *SPIE*, Vol.2581,154-160, 1995.
3. Ismail, S. et al., LASE measurements of aerosol and water vapor profiles during TARFOX, *J. Geophys. Res.*, Vol.105, No.D, 9903-9916, 2000.
4. Anthony L., et al., Diode-laser-pumped tunable 896-939.5-nm neodymium-doped fiber laser with 43-mW output power, *Appl. Opt.*, Vol.37, No.15, 3276-3281, 1998.
5. "U.S. Standard Atmosphere", U.S. Government Printing Office.1976.