

CO₂ 鉛直分布観測用 DIAL のための 1.6 μ m OPO レーザの開発
Development of 1.6 μ m OPO laser for the transmitter of CO₂ DIAL

首都大学東京 ○境澤 大亮、長澤 親生、阿保 真、柴田 泰邦
気象研究所 永井 智広、中里 真久、酒井 哲

Tokyo Metropolitan University ○D. Sakaizawa, C. Nagasawa, M. Abo, Y. Shibata
Meteorological Research Institute T. Nagai, M. Nakazato, T. Sakai

Abstract: We have developed the differential absorption lidar (DIAL) for the vertical profile of carbon dioxide. The optical parametric oscillator using a 3 mm thick periodically poled MgO doped LiTaO₃ (PPMgLT) device with 30.9 μ m period achieved a 1.6 μ m single-mode oscillation. The optical parametric oscillator realized an output of 21 mJ for signal waves with a 29.5% slope efficiency at 78 mJ pumping of a Q-switched Nd:YAG laser.

1 はじめに

19世紀末以降、大気中の二酸化炭素濃度は高い上昇率を示し、現在では全球平均値で 379ppm に達している。人為起源の二酸化炭素は主要な温室効果ガスと考えられている気体であり、地表面で得られた二酸化炭素観測値は、将来の全球濃度や気候変動の理解の為に用いられている。この観測値は赤外分光計により高精度で得られており、既に観測所のネットワークが形成されている。

一方、地表面の計測値と同時に二酸化炭素の鉛直分布の重要性も指摘されている。二酸化炭素の鉛直分布計測は鉄塔観測、定期航空旅客機に搭載した機材により行われているが鉄塔観測で得られる値は高度 200m 程度までであり、旅客機に搭載した観測機では航空機の離着陸時以外でデータの取得が困難など観測頻度が十分とはいえないことから、二酸化炭素の鉛直分布観測に対して差分吸収ライダーを用いた測定手法に注目が集まっている。

1.6 μ m 帯の波長では半導体技術の進歩により検出感度の高い受光素子が利用可能となってきている⁵。一方で 2.0 μ m 帯のシステムとは異なり、二酸化炭素の吸収波長内で動作する高出力パルスレーザの報告は見受けられない。我々は 1.6 μ m 帯で動作するパルスレーザを用いた二酸化炭素観測用の差分吸収ライダーの開発を行っている。本稿では、二酸化炭素濃度の高度分布観測のため送信システムに用いるレーザについて報告する。

2 1.6 μ m 帯高出力パルスレーザ

これまで二酸化炭素観測用差分吸収ライダーとして開発が進められてきた波長 2.0 μ m 帯のシステムとは異なり、波長 1.6 μ m 近傍で定常的に出力が得られる LD 励起固体レーザは報告されておらず、1.6 μ m 帯のシステム開発の障害要因となっている。この波長域では波長チューニング幅が大きな光パラメトリック発振器 (OPO) による光源が期待されるもののレーザの横モードや熱負荷による不安定性が問題となっている。

近年非線形波長変換において目覚ましい成果が得られている擬似位相整合デバイスはそれまで利用されてきたバルク型と比べ、高い非線形光学定数を有すること、ウォークオフがない等の利点がある。特に酸化マグネシウム (MgO) を添加した分極反転二オブ酸リチウム (MgO doped periodically poled LiNbO₃: PPMgLN) や分極反転タンタル酸リチウム (MgO doped periodically

poled LiTaO₃: PPMgLT) といったデバイスは実効的な非線形定数が高く、比較的長い結晶も作成可能であることから高効率化に有利である。

擬似位相整合デバイスは高効率、高出力が期待される非線形光学結晶であるが、これまで結晶厚みが 1mm 程度のものしか入手することが出来ず、高出力励起時に素子の損傷閾値による出力制限やフォトリフラクティブダメージによる反転分極へのダメージなどの問題が指摘されていた。フォトリフラクティブダメージについては結晶に酸化マグネシウムを添加することでその影響を低減することが可能であり、結晶の厚みについても現在は作成方法の改善により 5mm(PPMgLN) や 3mm(PPMgLT) といった結晶も入手可能となっている。これら 2 つのデバイス、PPMgLN と PPMgLT では LN の方が大きな非線形光学定数を有しており開口 5mm \times 5mm のデバイスを用いた高効率、高出力動作が報告されている⁶。PPMgLT について高出力動作での実証はまだなされていないが結晶の熱伝導度は PPMgLT の方が高く (PPMgLN:4.6、PPMgLT:8.4) 長時間高出力で運用する際、結晶にかかる熱負荷の軽減には優れていると考えられる。一方、結晶に作成される分極反転構造の良否は結晶の抗電界の値により両者で大きな差が出ている。その指標となる分極反転比率 (反転幅/反転周期) を見ると PPMgLN の結晶上面 (+Z) と下面 (-Z) は 0.8 と 0.2 と理想値 (0.5) とは異なり、0.5 に近い値を示すのはデバイス中心部の 3mm 程度である。一方 PPMgLT は 3mm 角の開口を有し、上面と下面で 0.49, 0.51 と極めて 0.5 に近い分極反転比率が得られている。

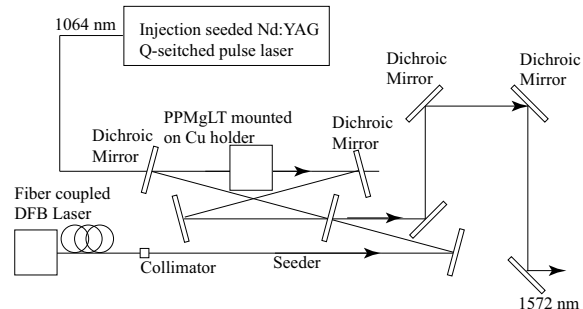


Fig.1 Schematic diagram of the 1.6 μ m PPMgLT OPO laser of the DIAL transmitter for the vertical distribution of CO₂.

3 OPO 発振実験

3.1 -実験構成-

予備実験として繰返し数 30Hz で動作可能なフラッシュランプ励起 Q-switchNd:YAG レーザを励起源とする OPO を構成した。励起パルスのビームクオリティは実験を行った出力範囲内でほぼ $M^2 \leq 1.2$ が得られている。励起パルスを入力は結晶端面の損傷閾値に関する情報が不足していたため 80mJ 程度に抑えて行った。このときの励起パルス時間幅は 35ns 程度に広がっている。

Fig.1 に予備実験の構成を示す。フラッシュランプ励起 Nd:YAG で構成した主発振器の狭帯域出力を外部に設置したアンプで増幅し励起パルスを生成する。その後、PPMgLT の結晶軸に対して励起パルスの偏光方向を波長板で調整後、ダイクロイックミラー (1064nm $T=95\%$) を介して PPMgLT を励起する。銅製のマウントに PPMgLT を設置し、ペルチェを用いてマウントの温度を 40°C から 80°C の任意の値で一定に保つことが可能である。入出力特性取得時のマウント温度は 40°C 付近に設定した。PPMgLT 結晶は開口 3mm×3mm で分極反転周期 30.9 μm のものを共振器長 80cm のリング型共振器内に配置した。リング型共振器はシグナル光のみに共振する SRO(Singly Resonance Oscillator) である。OPO からシグナル光 (1570nm 帯)、アイドラ光 (3300nm) が発生し、ダイクロイックミラーを用いてシグナル光のみを取り出す。またリング型共振器内には共振器外部から、単一波長で出力が得られる DFB レーザを注入しパルスレーザの波長同調を行った。

3.2 -OPO 出力特性-

Fig.2 に取得したシグナル光の入出力特性を示す。励起光パルス 78.1mJ のときシグナル波長 (1572nm) の出力は 21.6mJ が得られた。波長変換のスロープ効率率は 29.5% である。このとき出力の飽和は現れず、1 時間近く出力を観測した後で結晶端面や内部に損傷は起きなかったことから、より高エネルギーでの励起も可能であると考えられる。

次に励起出力を 40mJ に固定し結晶温度に対するシグナル波長を観測した。その結果は Fig.3 に示すとおり、温度 40° から 80°C まで温度を変化させ、1572nm から 1584nm までの波長チューニングを確認した。図には同時に二酸化炭素の吸収断面積も示した。

OPO 出力のシグナル光をレンズで集光し、焦点前後のビーム径の値からビームクオリティを測定した。Fig.4 にレンズで集光したときのビーム径を示す。測定の結果、シグナル光出力が約 10mJ の時、ビームクオリティ $M^2 \leq 1.3$ を確認した。

4 まとめ

二酸化炭素鉛直分布観測用差分吸収ライダーの送信部として PPMgLT 結晶を用いた OPO を作成し 21.6mJ のシグナル光出力を確認した。これらの結果から現在二酸化炭素観測用の 1.6 μm 差分吸収ライダー送信システムを構築している。OPO 励起用にはフラッシュランプ励起ではなく、繰返し数 200Hz で動作可能な LD 励起モジュールを使用し高繰返しでシグナル光の取り出しを行う予定

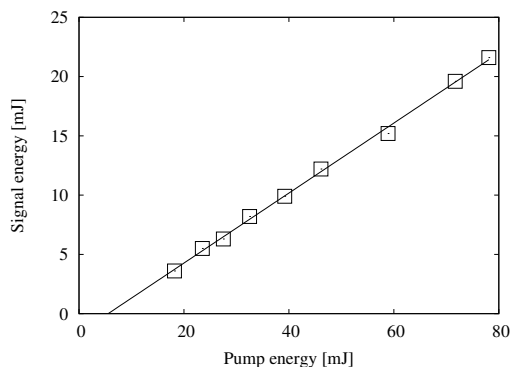


Fig.2 Input-output characteristics of the PPMgLT OPO

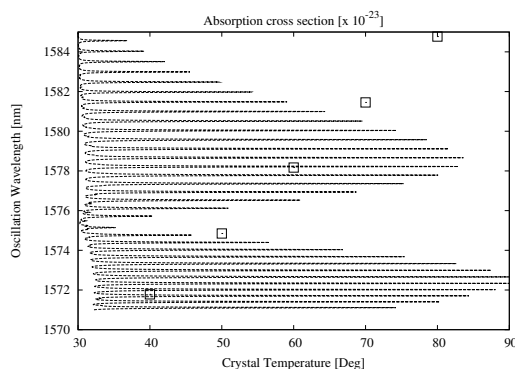


Fig.3 Crystal temperature vs. oscillation wavelength

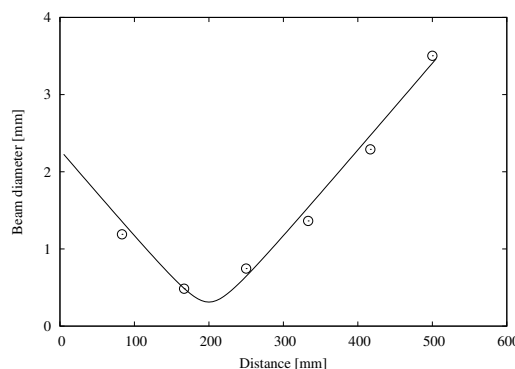


Fig.4 Signal beam quality of PPMgLT OPO

である。

参考文献

- [1] G. J. Koch *et al.*: Appl. Opt **43** (2006) 5092
- [2] D. Bruneau *et al.*: Appl. Opt. **45** (2006) 4898
- [3] F. Gibert *et al.*: Appl. Opt. **45** (2006) 4448
- [4] T. F. Refaat *et al.* Opt Eng. **43** (2004) 1647
- [5] G. Ribordy *et al.*: J. Modern Opt. **15** (2004) 1381
- [6] J. Saikawa *et al.*: Opt. Lett. **31** (2006) 3149
- [7] D. Sakaizawa *et al.*: Proc. 23th ILRC **Part I** (2006) 535