

オゾン観測用ライダーに用いる全固体紫外レーザーの開発

Development of an all solid-state UV laser for measurement of ozone profiles in the upper troposphere

熊澤陽介、柴田泰邦、長澤親生

Yosuke Kumazawa, Yasukuni Shibata and Chikao Nagasawa

首都大学東京 システムデザイン研究科

Tokyo Metropolitan University

Abstract:

The configuration of an all solid-state laser for differential absorption lidar(DIAL) measurements of ozone profiles in the upper troposphere is considered. An ultra-violet(UV) setup based on a quasi-phase-matching sum-frequency generation(QPM-SFG) device and a QPM-SHG device are effectively coupled to a diode pumped Nd:YAG laser operating at 1064nm. In this paper, this system is evaluated by comparing with other transmitter lasers of conventional UV DIAL systems.

1. はじめに

地球温暖化気体の一つであるオゾンは、赤道成層圏で生成され極域へ移送されているが、対流圏との混合も考えられる赤道対流圏に近い領域での分布や挙動は観測例に乏しく不明な点が多い。これまでレーザーを用いたリモートセンシングシステムである DIAL は、地表から成層圏までのオゾン濃度プロファイルの観測に利用されてきた。DIAL では測定分子が強く吸収する ON 波長と弱く吸収する OFF 波長の 2 波長のレーザー光を大気中に照射しその受信光の差分から測定分子の濃度分布を算出する。オゾン分子は 300nm の波長帯に DIAL に適した吸収線を持つため、DIAL 測定のためには高出力な紫外線レーザーを必要とする。これまで、オゾン DIAL に用いられたレーザー送信系としては、エキシマレーザーや色素レーザーや誘導ラマンレーザーなどが実用化されてきた。しかしながら、これらは、メンテナンスの面から遠隔地での無人測定オゾン DIAL には適していないと考えられている。

本研究では赤道域での無人観測を目的とした上部対流圏オゾン濃度分布測定用 DIAL の送信レーザーのために、メンテナンスの容易な QPM デバイスを用いた全固体紫外レーザーを検討した。ラマン分光法を用いた波長変換や、Birefringence Phase Matching(BPM)デバイスを使用した波長変換など従来の手法と比較検討することによりその有用性を示す。

2. QPM-SFG 法の提案

QPM-SFG デバイスを用いた紫外全固体レーザーとして Fig.1 のような構成を提案する。on 波長、off 波長ともに先行研究によって開発された CO₂ 測定 DIAL のレーザー送信部である Nd:YAG レーザーを励起光とした OPG+OPA システムによって発振される波長 1572nm の光を用いる。波長 289nm の on 波長は波長 1572nm の光と波長 1064nm の光の第三高調波(THG)を QPM-SFG デバイスに入射することで得ることができる。波長 317nm の off 波長は波長 1572nm の光と波長 1064nm の光の基本波を QPM-SFG デバイスに入射し得られた波長 634nm の光の第二高調波(SHG)を発生させることで得ることができる。

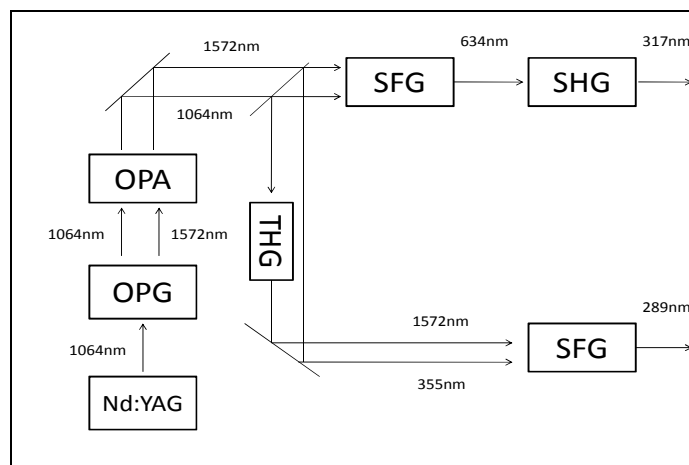


Fig.1 Configuration of UV wavelength converters with QPM-devices

波長変換デバイスに用いる非線形光学結晶としては QPM デバイスの中から Mg:SLT を選択した。主な QPM、BPM デバイスの結晶パラメータを Table.1 に示す[1]。QPM デバイスは作製する際に分極反転構造を作る必要があるが BPM デバイスに比べ非線形光学定数の値が数倍高く、ウォークオフ角がないためビーム品質が良好であるなどの利点がある。その中でも代表的な QPM デバイスである LN 結晶は非線形光学定数の値が高く、様々な装置に使用されているが高出力レーザーを入射する場合、高次高調波によって結晶が損傷してしまうという報告も出ている[2]。Mg を付加させた Mg:SLT 結晶は非線形光学定数の値は LN 結晶よりも低い、波長透過域が広く高次高調波による影響も少ないと考えられる。

Table.1 Parameters of QPM and BPM devices

Material	P.M. type	NLO Coefficients (pm/V)@1064nm	Transparency Range (μ m)
LN	QPM	25	0.33~4.5
KTP	QPM	15	0.35~3.5
LT	QPM	14	0.28~4.5
Mg:SLT	QPM	16	0.26~4.5
BBO	BPM	2	0.189~3.5
LBO	BPM	0.81	0.155~3.2
BIBO	BPM	3.3	0.28~2.5

3. 誘導ラマンレーザー法との比較

Nd:YAG レーザーなど高出力なパルス発振が可能な固体レーザーを励起光とした紫外線光への波長変換手法として誘導ラマン散乱によるラマン分光法を利用する手法がある[3]。その概要図を Fig.2 に示す。この手法では波長 1064nm の Nd:YAG レーザーから波長 266nm の第 4 高調波を発生させ、その光を CO₂ ガスが充満したラマンセルに入射することで 276nm, 287nm, 299nm の 3 波長の光を発生させている。QPM-SFG デバイスによる波長変換手法と比べると、on, off 波長を同時に発振させることができる、3 波長の中から on, off 波長を選択できるという利点があるが波長チューニングができないという欠点がある。QPM デバイスを使用した場合、温度調整による波長可変調整ができるため DIAL としての最適波長への同調が可能である。

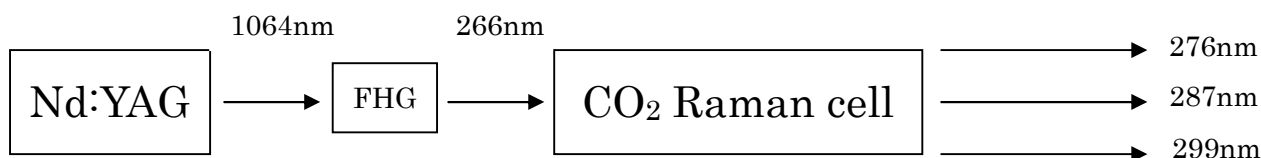


Fig.2 Configuration of UV wavelength converters with a CO₂ Raman cell

誘導ラマンレーザー (Fig.2)と QPM-SFG デバイスを利用したレーザー(Fig.1)のパラメータの比較を Table.2 に示す。DIAL によるオゾン分子濃度測定ではオゾンの吸収スペクトルが 300nm 帯付近で非常になだらかなため、on 波長と off 波長の差は大きい方が差分が取りやすく精度がたかくなる。また、パルスの繰り返し周波数については高いほど風や雲などの天候の変化による影響を受けにくいと考えられる。on,off 波長差、繰り返し周波数に関しては QPM-SFG デバイスを利用したレーザーの方が DIAL には適しているが、発振出力は低い。ただしパルス幅が異なるため、単位時間当たりのエネルギーでは上回っている。

Table.2 Laser parameters of the stimulated Raman laser and the QPM-device laser

	Raman cell	QPM-device
Output wavelength(nm)	276,287,299	289,317
Pulse repetition rate(Hz)	10	500
Pulse duration(ns)	4-6	10
Beam diameter(mm)	40	2.8
Output pulse energy(mJ)	13(@276nm,287nm),5(@299nm)	7(calculation)

4. RISTRA(OPO+SFG)法との比較

BPM デバイスを用いたオゾン DIAL 用の全固体レーザーとして、宇宙や上空からの DIAL によるオゾン観測を目的とした Optical Parametric Oscillator(OPO)デバイスと SFG デバイスを組み合わせた Rotated Image Singly Resonant Twisted Rectangle(RISTRA)デバイスを用いる手法が NASA の研究機関から報告されている[4]。RISTRA を用いた紫外全固体レーザーの基本的な機器構成を Fig.3 に示す。4つのミラーに囲まれた部分が RISTRA デバイスである。ここでは波長 1064nm の Nd:YAG レーザー光から第二高調波を発生させ、単一モードの DFB レーザーと和周波発生をさせることで紫外線光を得ている。OPO デバイスには KTP クリスタルを、SFG デバイスには type2 の BBO クリスタルを使用している。どちらも BPM により位相整合させている。DFB レーザーの波長を 803nm または 731.5nm にすることにより on 波長である 308nm、off 波長である 320nm の光を発振させるという構成になっている。ただし、DIAL においては on 波長、off 波長の 2 波長を同時、もしくは短い間隔で発振させなくてはならないため Fig.3 のような機器を 2 つ用意する必要がある。QPM-SFG デバイスを利用したレーザーでは一つの機器構成で on,off 両方の波長を出力することが可能である。

RISTRA デバイスを利用したレーザー(Fig.3)と QPM-SFG デバイスを利用したレーザー(Fig.1)のパラメータの比較を Table.3 に示す。波長差、繰り返し周波数ともに QPM-SFG デバイスを利用したレーザーの方が DIAL に適している。出力されるパルスエネルギーは QPM-SFG デバイスを利用したレーザーの方が低いが、パルス幅が短いため、単位時間当たりのエネルギーでは上回っている。さらに変換効率に関しては RISTRA を利用したレーザーでは 10%と報告されているが、QPM-SFG デバイスを利用したレーザーでは 22%程度になるという計算結果が得られた。

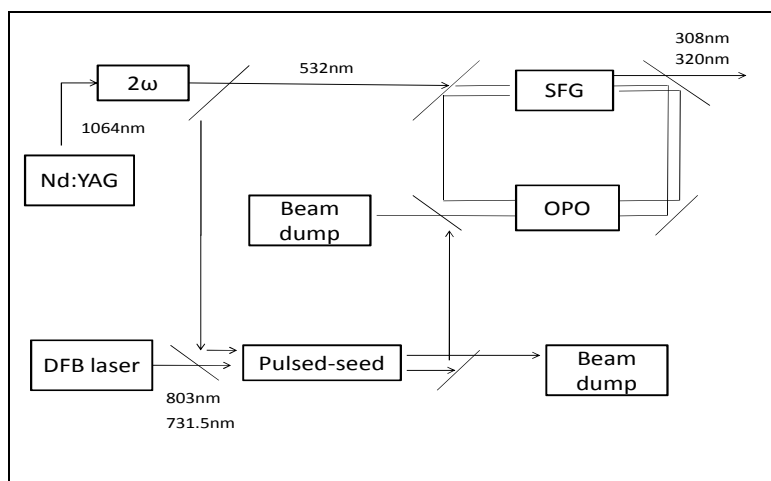


Fig.3 Configuration of UV wavelength converters with the RISTRA

Table.3 Laser parameters of the RISTR laser and the QPM-device laser

	RISTRA	QPM-device
Output wavelength(nm)	308,320	289,317
Pulse repetition rate(Hz)	50	500
Pulse duration(ns)	22	10
Output pulse energy(mJ)	10	7(calculation)
Conversion efficiency (%)	10	22(calculation)

5. まとめ

オゾン DIAL を用いて赤道域の上部対流圏のオゾン濃度分布の動きを無人観測所で観測する場合のレーザーシステムとして、メンテナンスの容易な紫外全固体レーザーである QPM デバイスを用いた紫外レーザーシステムの提案を行った。従来から用いられてきた手法との比較のために QPM デバイスを使用した高出力パルスでの和周波発生の入出力特性を計算機シミュレーションにより評価したが、今後実験的に評価することにより有用性を実証する予定である。

参考文献

- [1] 宮澤信太郎,栗村直(2005)「分極反転デバイスの基礎と応用」
- [2] Hideki Ishizuki, Takunori Taira, “High energy quasi-phase matched optical parametric oscillation using Mg-doped congruent LiTaO₃ crystal” 4 January 2010/Vol.18, No.1/OPTICS EXPRESS
- [3] Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, and Yasuo Hirose, “Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman Scattering in carbon dioxide” 20 April 2007/Vol.46, No12/APPLIED OPTICS
- [4] Narasimha S. Prasad, Upendra N. Singh, Darrell J. Armstrong, “All-solid-state UV transmitter development for ozone sensing applications” 15th Coherent Laser Radar Conference
- [5] Khaled A. Elsayed, Songsheng Chen, Larry B. Petway, Byron L. Meadows, Waverly D. Marsh, William C. Edwards, James C. Barnes, and Russell J. Deyoung “High-energy, efficient, 30-Hz ultraviolet laser sources for airborne ozone-lidar systems” 2007/Vol.41, No15/APPLIED OPTICS
- [6] Johnathan W. Hair, Craig Cleckner, Keith Murray, Dave Fratello, Chris Naftel, James Collins, Anthony Notari, Wayne Welch “Development of the Global Ozone Lidar Demonstrator (GOLD) for the Global Hawk”