

オゾン観測用ライダーに用いる紫外レーザーの開発 (2)

Development of an UV laser for measurement of ozone profiles in the upper troposphere (2)

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) laser based on a quasi-phase-matching sum-frequency generation(QPM-SFG) device and a QPM-SHG device are effectively generated by a 1064nm. Nd:YAG laser injection-seeded by a fiber laser. In this paper, characteristics of injection-seeding affecting to the whole conversion efficiency are studied by computer calculation and experiment.

1. はじめに

地球温暖化気体の一つであるオゾン、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。オゾン濃度観測のための技術として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が挙げられる。オゾン分子は200~300nm帯に強い吸収線を持つため、DIALによるオゾン観測のためには強力な紫外レーザーが必要となる。これまでオゾン観測DIALに用いられてきたレーザー光源としてはエキシマレーザーや色素レーザー、誘導ラマンレーザーなどが挙げられるがこれらの光源はメンテナンスの面から遠隔地での無人オゾン観測には適していないと考えられる。本研究では無人観測に適したレーザー光源としてメンテナンスの不要な全固体紫外レーザーを検討した。

2. QPM-SFG法の提案

非線形光学(NLO: non-linear optics)結晶であるQPM-SFGデバイスを用いた全固体紫外レーザーとしてFig.1のレーザーシステムを検討した。on波長には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317nmのon波長は波長1572nmと波長1064nmのレーザー光をQPM-SFGデバイスに入射し、その後SHG(SHG: second harmonic generation)デバイスに入射することで得ることができる。波長355nmのoff波長は波長1064nmのTHG(THG: third harmonic generation)デバイスに入射することで発振できる。

波長変換に用いる非線形光学結晶として、SFGデバイスにはMg:SLTを、SHG, THGデバイスにはLBOを選択した。主な非線形光学結晶のパラメータをFig. 2に示す。QPMデバイスはBPMデバイスに比べ利用できる非線形光学定数の値が高くビーム品質も安定しているという利点

がある。しかしながら、300nm帯の紫外領域では結晶の波長吸収端に近くなってしまい、結晶の光損傷可能性が高くなる。よって紫外光を発生させるSHG, THGデバイスに関しては、吸収端の短いLBO結晶を選択した。

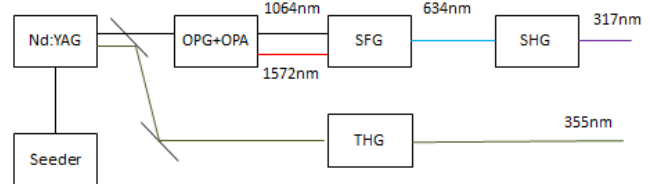


Fig.1 Configuration of UV wavelength converters with QPM-devices

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
Mg:SLT	QPM	16	0.26~4.5
BBO	BPM	2	0.189~3.5
LBO	BPM	0.81	0.155~3.2
KTP	BPM	2.4	0.35~35

3. 計算結果

SFG, SHG, OPG+OPAデバイスにおける出力光強度の理論式を次式に示す。

$$I_{sfgout}(z) = \frac{8\pi^2 d_{eff}^2}{\epsilon_0 c \lambda^3 n_1 n_2 n_3} I_1(0) I_2(0) z^2 \frac{\sin^2(\frac{\Delta kz}{2})}{(\frac{\Delta kz}{2})^2} \dots (3)$$

$$I_{shgout}(z) = I_1(0) \tanh^2(\kappa z) \dots (4)$$

$$\kappa = \frac{2\mu_0 \omega^2 d_{eff}^2}{c n_1^2 n_2} I_1(0) \dots (5)$$

$$I_{signal}(z) = I_{signal}(0) \cosh^2 gz \dots (6)$$

$$g = \sqrt{\frac{2\mu_0 \omega_{signal} \omega_{signal} 2d_{eff}^2}{c n_{signal} n_{idler} n_{pump}}} I_{pump} \dots (7)$$

ここで d_{eff} は各結晶の非線形光学定数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 c は光速、 z は結晶長、 λ は波長、 ω は角周波数、 n は屈折率、 Δk は波数不整合を表す。上記の式を用いて励起光が単一モードの場合と、多モードの場合に関して計算機によるFig. 1の構成における出力計算を行った。on波長における結果をFig. 2に示す。インジェクションシーディングによる励起光の単一モード化をしない場合、発振スペクトルの広がりによる波数不整合により、変換効率が15%程度低下してしまうことが確認できる。

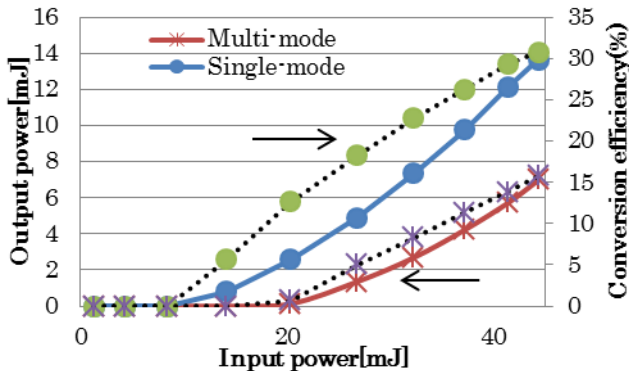


Fig. 2 Estimation of output power and conversion efficiency vs input power of transmitting laser system with single-mode or multi-mode. Output powers are showed by solid-lines and conversion efficiencies are showed by broken-lines.

4. インジェクションシーディング

オゾン観測用DIALの励起光として、高出力のQスイッチ動作でパルス発振をするNd:YAGレーザー(Continuum Surelite Laser)を用いる。レーザー共振器長が長い場合、一般的にはレーザーの縦モード間隔が短く、レーザー媒質の利得範囲内に多数の縦モードが許容され、不安定な多モード発振となる。非線形光学結晶により高効率の波長変換を行うためには発振周波数が狭帯域化された単一モード発振のレーザー光を用いる必要がある。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Seedレーザーを多モード発振するSlaveレーザーに注入することにより、高出力かつ、単一モードのレーザー光を実現することが可能である。インジェクションシーディングの実現条件は次式で表される。

$$|v_{qi} - v_i| = \frac{1}{2Q_q} \frac{|E_i|}{|E|} v_o \quad \dots (1)$$

$$Q_q = \frac{v_q}{\delta v_c} \quad \dots (2)$$

ここで、 v_{qi} はSlaveレーザーの発振周波数、 v_i はSeedレーザーの発振周波数、 Q_q は共振器の性能指数、 E_i はSeedレーザーのエネルギー、 E はSlaveレーザーのエネルギー、 v_o は共振周波数、 δv_c は共振スペクトル幅、 v_q は共振周波数を表す。本研究ではSlaveレーザーとして出力6W、波長幅30pmのNd:YAGレーザー、Seedレーザーとして出力50mW、波長幅7pmのNd:YAGファイバーレーザー

を用いてFig. 3の構成でインジェクションシーディングを行った。理論式によると、両レーザーの波長差1.26pm以内でインジェクションシーディング可能である。実験結果をFig. 4に示す。両レーザーの波長差8pm以内の場合、インジェクションシーディングによりSlaveレーザーの波長幅を、7~9pmまで狭帯域化可能なことが確認できた。

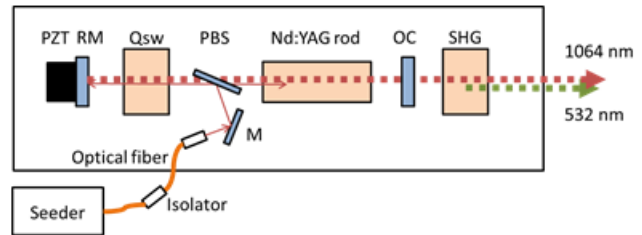


Fig. 3 Configuration of injection seeding experiment

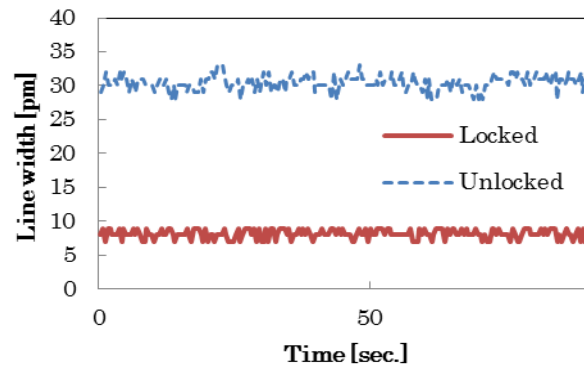


Fig. 4 Comparison of line widths of injection locked and unlocked slave lasers as function of time

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全固体紫外レーザーであるQPMデバイスを用いた紫外レーザーシステムの検討を行った。また、励起光として用いるNd:YAGレーザーにインジェクションシーディングをすることにより、全体の効率化が望めるために、最適なシーディングの条件を計算機シミュレーションと実験により調べた。今後はNLCデバイスを用いた紫外光発生に向け、実装を進める予定である。

参考文献:

- [1]黒田和男(2008)『非線形光学』コロナ社
- [2]宮澤信太郎,栗村直(2005)「分極反転デバイスの基礎と応用」
- [3]大津元一(1999)『量子エレクトロニクスの基礎』裳華房
- [4]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, No.12/APPLIED OPTICS
- [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, No.15/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"