

航空機搭載DIAL用Ti:サファイアレーザの開発

Injection-Seeded Ti:Sapphire Laser for the airborne water vapor differential absorption LIDAR

今城 正雄¹, 庄司 康浩¹, 柳澤 隆行¹, 平野 嘉仁¹, 笠原 久美雄¹,
内野 修², 永井 智弘³, 長澤 親生⁴Masao Imaki¹, Yasuhiro Shoji¹, Takayuki Yanagisawa¹, Yoshihito Hirano¹, Kumio Kasahara¹,
Osamu Uchino², Tomohiro Nagai³ and Chikao Nagasawa⁴¹三菱電機(株), ²気象庁, ³気象研究所, ⁴東京都立大¹ Mitsubishi Electric Corporation, ² Japan Meteorological Agency,³ Meteorological Research Institute, ⁴ Tokyo Metropolitan University

Abstract: We have developed a three wavelengths injection seeder and a injection-seeded Ti:Sapphire laser for airborne differential absorption LIDAR (DIAL). The Ti:Sapphire laser is pumped by the SHG of the Nd:YLF laser and obtained the single-frequency operation by the injection seeding. The injection seeder is tuned to a strong absorption line, a weak absorption line of water vapor and an off line, and switched the output wavelength with polarization optical switch. The stability of the wavelength locked to a strong absorption line is $\pm 0.008\text{pm}$ and the extinction ratio of polarization optical switch is about 25dB. The single-frequency operation suppressed the other longitudinal mode more than 30dB is achieved by the injection seeding when the difference between the resonance frequency of the oscillator and the frequency of seeder is less than 20MHz.

1. はじめに

DIAL (Differential Absorption Lidar: 差分吸収ライダー) は, 大気成分分子の吸収線に同調した波長 (ON波長) と同調していない波長 (OFF波長) のレーザ光を大気中に送信し, それぞれの波長のミー散乱光の差分をとることにより, 特定の分子の分布を測定するセンサであり, 特に, オゾンや水蒸気などの大気微量成分や汚染気体の濃度分布の測定に有効である. 我々は, これまで, 航空機搭載水蒸気DIALの開発を進めてきた. 水蒸気DIALでは, 水蒸気の吸収線はスペクトル幅が狭いため, 波長幅の狭いレーザと高精度の波長制御が必要である. また, 航空機搭載においては, 一台のレーザ装置でON波長とOFF波長のレーザを交互に送信するため, 高速の波長切り替えと高繰り返しが必要される. 今回, 高繰り返し発振が可能なTi:サファイアレーザと, 吸収線に同調した2つの波長 (ON1波長, ON2波長) および吸収線に同調していない波長 (OFF波長) の3つの波長を高速に切り替え可能なインジェクション・シーダを開発したので, その構成とインジェクション・シーディング法によるTi:サファイアレーザの単一縦モード化について述べる.

2. Ti:サファイアレーザの構成

Fig.1にTi:サファイアレーザの構成を示す. 非水冷伝導冷却方式を用いたNd:YLFレーザのQ-SW発振より得られた1053nmの基本波を, 2台のKTPにより527nmのレーザ光に波長変換し, Ti:サファイアの端面に入射することにより励起を行っている. 波長変換では, 1台目のKTPで変換されなかった基本波を2段目のKTPで再度波長変換することにより, 高い変換効率を確保している. 共振器は, 4枚のミラーからなるリング型で, 出力結合用の波長板及び偏光子, 発振波長を水蒸気の吸収線に同調させるための共振器長制御素子, アイソレータ, および共振モード調整用のテレスコープにより構成している. 出力結合用の偏光子を用いて共振器内にシーダ光を注入することにより, シーダ光の損失が少なく効率の良いインジェクション・シーディングを可能にしている.

3. インジェクション・シーダ

Fig.2に, インジェクション・シーダの構成図を示す. 光源として, 3つの波長それぞれに, 単一縦モード発振のAlGaAs半導体レーザ(LD)を使用し, 温度安定度 0.01°C 以下, バイアス(平均)電流安定度 $10\mu\text{A}$ 以下に制御することにより, 安定化を図っている. ON1波長およびON2波長用LDには, 注入電流の変調により周波数変調を与えており, 光音響セル(PAセル)の出力信号を変調周波数で同期検波して得られる信号(水蒸気吸収線の1次微分波形)を基準信号としたPID制御により, 発振中心波長を水蒸気吸収線に同調させている. 3つのLD出力は, LiNbO_3 と偏光子を用いた偏光スイッチによりTi:サファイア共振器へ出力し, 要求される高速な波長切り替えを可能にしている.

Fig.3に, シーダ光出力波長 (ON1波長) の安定度 (ロックインアンプ出力) を示す. PID制御によるサーボONの時の波長安定度は約 $\pm 0.008\text{pm}$ (Peak-to-Peak)となり, 水蒸気の吸収線幅約 10pm に比べて十分小さく, 良好な波長安定度が得られている. Fig.4に, 偏光スイッチによる波長切り替え後のON1波長のシーダ光の出力スペクトルを示す. ON1波長に対するON2波長の消光比は約25dBが得られており, 切り替えによる他の波長の混入は十分抑制できている.

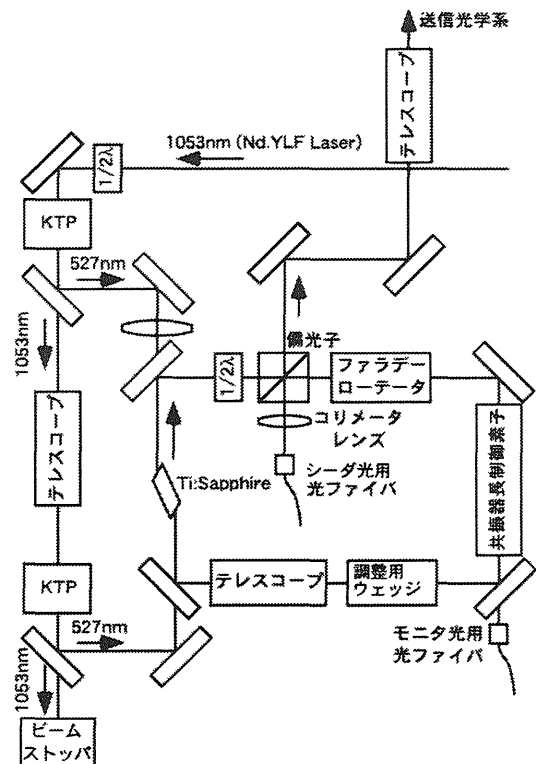


Fig. 1 Block diagram of injection-seeded Ti:Sapphire laser.

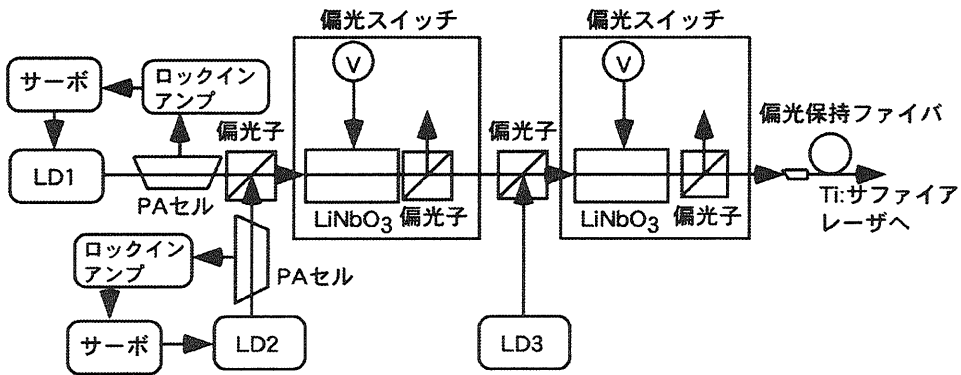


Fig. 2 Block diagram of three wavelengths injection seeder.

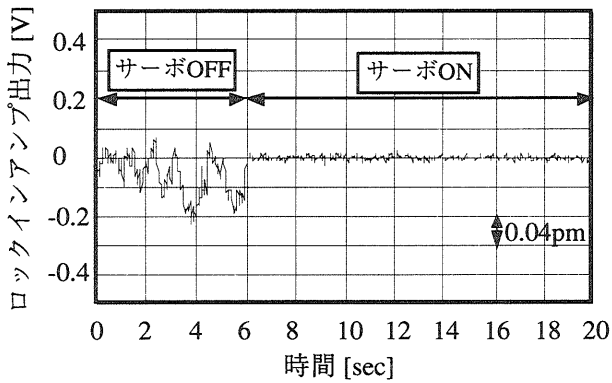


Fig. 3 Stability of the wavelength of the Injection seeder.

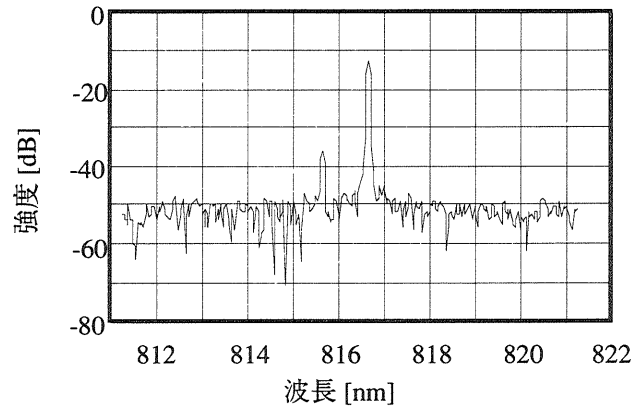


Fig. 4 Output spectrum of the injection seeder after the polarization switch.

4. Ti:サファイアレーザの単一縦モード発振

Fig.5に、インジェクション・シーディングを行った時のTi:サファイアレーザの出力波形を示す。ビート信号は、Ti:サファイアレーザの出力と、インジェクション・シーダのモニタ光を用いたヘテロダイン検波により得られたものである。また、スペクトルは、このビート信号をフーリエ変換したものである。スペクトルより、Ti:サファイアレーザはシーダ光の周波数に対して、離調周波数27MHzで発振しており、その他の縦モードによる発振は-25dB以上抑制され、単一縦モード化が達成されていることが分かる。Fig.6に、共振器長制御を行っていないときの、離調周波数とサイドモード抑圧比の測定結果および計算結果を示す。ここで、計算値は、電界に関するファンデルポール方程式を組み合わせたレート方程式より求めた。Ti:サファイアレーザは、共振器長により決まる縦モードの周波数で発振するため、離調周波数、すなわちシーダ光の周波数と共振器の縦モードの周波数の差が20MHz以下になるように共振器長を制御することにより、サイドモード抑圧比30dB以上の単一縦モード発振が得られることが分かった。現在、高繰り返し、高速波長切り替えに対応した共振器長の制御装置を開発中である。

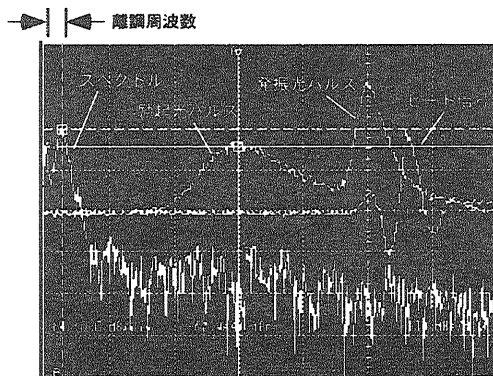


Fig. 5 Pulse shape and spectrum of Ti:Sapphire laser.

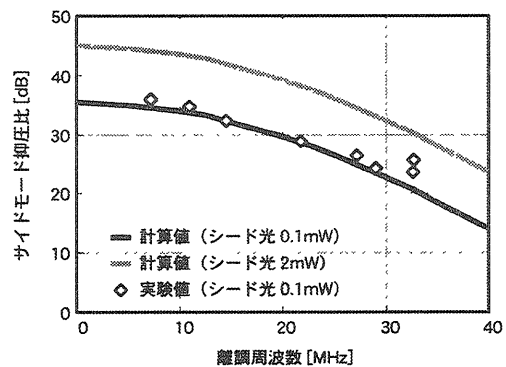


Fig. 6 Suppression ratio of the longitudinal modes.

5. まとめ

航空機DIAL用Ti:サファイアレーザの開発を行い、インジェクション・シーダの動作特性の測定とインジェクションシーディング法によるTi:サファイアレーザの単一縦モード発振の動作を実証した。インジェクション・シーダのON波長に対する波長安定度として $\pm 0.008\text{pm}$ が得られ、スイッチング時の消光比として25dBが得られた。また、インジェクション・シーダ法により、Ti:サファイアレーザの単一縦モード化を確認し、共振器の共振周波数とシーダ光の周波数の差が20MHz以下になるように共振器長制御を行うことにより、サイドモード抑圧比30dB以上の単一縦モード発振が得られることが分かった。なお、本研究の一部は宇宙開発事業団との契約に基づき行われたものである。