

擬似ランダム変調共鳴散乱ライダー用 CW 光源の提案

福島 友梨香, 阿保 真

東京都立大学 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Proposal on the continuous-wave laser source for pseudorandom modulation resonance scattering lidar

Yurika FUKUSHIMA and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Many observations of metallic layers in the mesopause region have been conducted by the resonance scattering lidar. Conventional resonance scattering lidar uses a pulse laser which has high peak power. However, long-term operations using pulse laser have been difficult due to their low maintainability. A CW laser has a longer lifetime and higher maintainability than the pulse laser. Therefore, we propose the fiber amplifier based CW laser configuration for the pseudorandom modulation resonance scattering lidar, and show the feasibility.

Key Words: resonance scattering lidar, pseudorandom modulation, sporadic layer, CW laser, optical fiber amplifier

1. はじめに

地球温暖化や気候変動などの地球環境問題を理解し、予測につなげるためには、地球規模での大気循環のメカニズムの解明が必要である。中間圏界面領域に成層する金属原子層の密度分布は温度、風速、重力波などと密接に関係しているため、原子層の観測は情報の少ない高度領域の物質循環を知るうえで有用である。

共鳴散乱ライダーは、金属原子の共鳴散乱波長に正確に同調したレーザーを用いることにより、原子層密度の高度分布を高分解能で観測する装置である。しかし従来のパルスレーザーを用いた観測では、レーザー装置のメンテナンスに専門性が必要であり、自動観測のような長期運用は困難である。一方、CW (continuous wave) レーザーはパルスレーザーに比べピークパワーが低いことにより部品へのダメージも少なくメンテナンスが容易である。本研究では、CW レーザーを符号変調することにより距離分解能を持たせる擬似ランダム変調法を用いた共鳴散乱ライダーの実現を目指し、Na, Fe, K, Ca, Ca⁺の共鳴波長に同調した CW レーザー装置の構成について検討した。

2. 擬似ランダム変調共鳴散乱ライダー

送信 CW レーザーを擬似ランダム符号で変調し、受信信号を同じ符号で復調することで、測定対象の応答特性（高度プロファイル）を求めることができる。擬似ランダム変調ライダーはパルスライダーと同じ平均パワーのレーザーに対しては同じ受信信号強度が期待出来る。一方雑音強度はパルスライダーより大きくなるが、重なり関数を工夫することにより、中間圏界面高度 90km 付近の Na 金属層の共鳴散乱観測が実現可能であることがシミュレーションによりすでに明らかとなっている¹⁾。しかし光源の問題により実際の観測はまだ行われていない。

共鳴散乱ライダーでは、原子やイオンの共鳴波長に正確にレーザーの波長を同調する必要がある

が、この波長制御は一般的にパルスレーザーより CW レーザーの方が容易に実現出来る。Table 1 に過去にパルスライダーで観測実績がある各原子・イオンの共鳴散乱波長、ライダーの性能を評価するレーザーの平均出力と受信望遠鏡面積の積 (PA 値)、並びに口径 80cm, 30cm の望遠鏡を使用した場合のレーザーパワーを示す。擬似ランダム変調方式の場合は変調により平均出力は 1/2 となるため、この 2 倍以上の CW レーザーパワーが必要となる。

Table 1. Resonance wavelength of the species and realistic power aperture product and laser power with $\phi 80\text{cm}/\phi 30\text{cm}$ telescope for the resonance scattering lidar.

Spices	Resonance wavelength[nm]	Power aperture product[Wm ²]	Laser power[W]	
			$\phi 80\text{cm}$	$\phi 30\text{cm}$
Na	588.995	0.05 ¹⁾	0.10	0.71
Fe	371.994	0.02 ²⁾	0.04	0.28
K	769.896	1.26 ³⁾	2.5	17.8
Ca	422.673	0.06 ⁴⁾	0.12	0.85
Ca ⁺	393.366	0.05 ⁴⁾	0.10	0.71

3. CW レーザー装置の構成

波長の安定した狭帯域 CW レーザーを実現するには、共振器制御が必要な高出力レーザーを構成するより、波長安定化した種光源を光増幅する方式が安定性、メンテナンス性の面から有利であることから、今回はこの方式を検討した。

3.1 種光源

種光源は狭帯域で波長安定化が容易であるものが適している。今回は温度や電流により波長制御が容易な DFB (distributed feedback) レーザーダイオードを用いる。

3.2 光増幅器

光増幅器には半導体光増幅器と光ファイバ増幅器がある。今回は波長の選択幅が広く高出力が可能な後者を採用する。光ファイバ増幅器には、

希土類イオンの反転分布による誘導放出過程を基本とする希土類添加ファイバ増幅器と、光ファイバ中の非線形散乱による誘導散乱過程を基本とするファイバラマン増幅器がある。希土類添加ファイバ増幅器では増幅始準位と終準位のエネルギー差に対応する波長しか増幅できない。一方、ファイバラマン増幅器は光ファイバに強い励起光を入射することで光増幅を実現するもので、励起効率では希土類添加ファイバ増幅器に劣るが、励起光より約 100nm 長波長の光を増幅できる。Table 2 に希土類添加ファイバレーザの添加物の例と、その動作波長を示す。

Table. 2 Emission wavelength of rare-earth-doped fiber lasers.

Dopant	Emission wavelength[nm]
Yb ³⁺	1030-1120 ⁵⁾
Pr ³⁺	1280-1330 ⁶⁾
Er ³⁺	1530-1550 ⁷⁾
Tm ³⁺	1860-2090 ⁸⁾

3.3 波長変換

Na と K は、共鳴波長の 2 倍の波長をもつレーザを直接発振できるため、第 2 高調波発生(SHG)を利用する。Fe, Ca, Ca⁺は、共鳴波長の 3 倍もしくは 4 倍の波長をもつレーザの発振は可能であるが、この場合変換効率が下がるため、和周波発生(SFG)を利用する。

波長変換を行うための非線形結晶は、中赤外領域で高い変換効率を持つ QPM 結晶を用いる。

4. レーザの構成

3 章で示した要件を考慮し、Table. 1 に示した観測のために必要と考えられる出力を得るために構成を検討した。Fig. 1 に構成図、Table. 3 に種光のパワーと波長、各増幅器の種類と利得、波長変換の種類並びに最終的に想定される出力を示す。ここでは Na での波長変換では変換効率は 17%、そのほかの SHG, SFG の変換効率は 30%としている。

5. まとめ

本研究では、現行の波長可変パルスレーザに替わる、保守性の高い CW レーザを用いた擬似ランダム変調共鳴散乱ライダーの実現可能性を検討した。増幅器の構成とレーザ波長の組合せにより、Na, Fe, K, Ca, Ca⁺についてそれぞれ 1 つの装置で観測に十分な送信レーザの出力が得られることを示し、構成の提案を行った。増幅器の検討を行った結果、Na, Fe, Ca, Ca⁺では口径 30cm の小さな受信望遠鏡を用いた場合でも十分な出力が見込めるが K では口径 100cm 以上の受信望遠鏡を用いるか、増幅器の増設が必要であることがわかった。

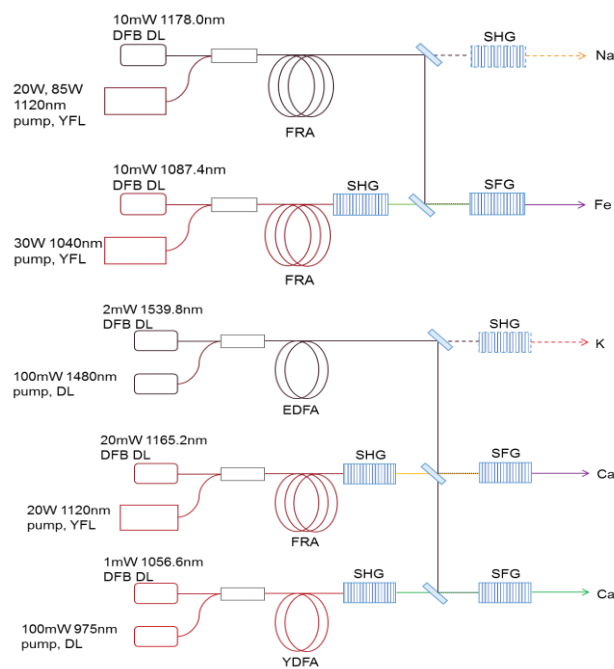


Fig. 1 Schematic diagram of the fiber amplifier based CW laser configuration for pseudorandom modulation resonance scattering lidar. (DFB: Distributed feedback, DL: Diode laser, YFL: Yb-doped fiber laser, FRA: Fiber Raman amplifier, EDFA: Er-doped fiber amplifier, SHG: Second harmonic generator, SFG: Sum frequency generator)

Table 3. Power and wavelength of the seed laser, type of amplifier and gain, nonlinear optical effect and the output power for each species.

Species	Seed power[mW] (Wavelength[nm])	Amplifier(Gain)	Nonlinear optical effect	Output power[W]
Na	10 (1178.0)	FRA(36dB)	SHG(17%)	7.0 ⁹⁾
Fe	10 (1087.4), 10 (1178.0)	FRA(20dB)	SHG, SFG	12
K	2 (1539.8)	EDFA(37dB)	SHG	3.0
Ca	20 (1165.2), 2 (1539.8)	EDFA(37dB), FRA(20dB)	SHG, SFG	3.2
Ca ⁺	1 (1056.6), 2 (1539.8)	EDFA(37dB), YDFA(33dB)	SHG, SFG	3.4

参考文献

- 1) C.-Y. She *et al.*: Appl. Opt. **50** (2011) 2916.
- 2) Y. Shibata *et al.*: J. Meteor. Soc. Japan. **84A** (2006) 317.
- 3) J. S. Friedman *et al.*: Geophys. Res. Lett. **29** (2002) 15-1.
- 4) M. Gerding *et al.*: J. Geophys. Res. **105** (2000) 27131.
- 5) M. Auerbach *et al.*: Opt. Express. **10** (2002) 139.
- 6) Y. Ohishi *et al.*: Opt. Lett. **16** (1991) 1747.
- 7) G. A. Ball and W. W. Morey: Opt. Lett. **17** (1992) 420.
- 8) W. A. Clarkson *et al.*: Opt. Lett. **27** (2002) 1989.
- 9) Lei Zhang *et al.*: Appl. Opt. **52** (2013) 1636