

二次共振によるフーリエドメインモードロックレーザーの基礎実験 Fundamental Experiment of Secondary Resonance Fourier Domain Mode Locked Laser

○山口達也¹, 石原圭祐², 篠田之孝¹*Tatsuya Yamaguchi¹, Keisuke Ishihara², Yukitaka Shinoda¹

Abstract: We demonstrate a secondary resonance Fourier domain mode locked (FDML) laser for improving a measurement speed in a fiber Bragg grating (FBG) interrogation system. This laser achieves high-speed operation with a sweep rate of ~101.4 kHz and an output power of ~1.6 mW.

1. はじめに

近年、橋梁やダムなどのインフラ施設の老朽化が問題となっており、構造物の状態を監視するシステムの重要性が増している^[1]。そこで、筆者らはファイバセンサのファイバブラッググレーティング (FBG) を用いた振動計測システムの開発を行っている^[2]。測定用光源にファイバリング共振器型の波長掃引レーザーを用いるシステムは、実装が比較的容易であるが、レーザーの掃引周波数が数十 kHz に制限される問題があった。この問題を解決するため、フーリエドメインモードロック (FDML)^[3] を用いた波長掃引レーザーを開発した^[4, 5]。FDML レーザでは、数 km の遅延ファイバが共振器内に挿入され、光の周回時間と共振器内部に設置された波長フィルタの掃引周期を一致させ、高速な波長掃引が可能となっている。本文は、FDML レーザを 2 次の共振周波数で駆動させ、掃引周波数を 101.4kHz とした波長掃引のさらなる高速化について検討した。

2. FDML レーザの構築

FDML レーザの構成を図 1 に示す。FDML レーザは半導体光増幅器 (SOA)、ファイバファブリペローチューナブルフィルタ (FFP-TF)、2 km の遅延ファイバからなるリング共振器により構成した。FFP-TF は発振器 (OSC) により選択された波長領域の光のみを透過する。そのため、FFP-TF は制御信号に掃引周波数 f_m の正弦波波形を用い、波長の掃引が可能である。ここで、共振器内を光が周回する時間 τ_{round} は(1)式で表される。

$$\tau_{round} = \frac{n \cdot l_{cavity}}{c} \quad (1)$$

ただし、 n は光ファイバのコアの屈折率、 l_{cavity} はファイバリング共振器のファイバ長、 c は光速である。なお、FDML レーザは(2)式の条件を満たす必要があり、光の周回時間 τ_{round} と FFP-TF の掃引周期 $T_m (= 1/f_m)$ を一致させる。

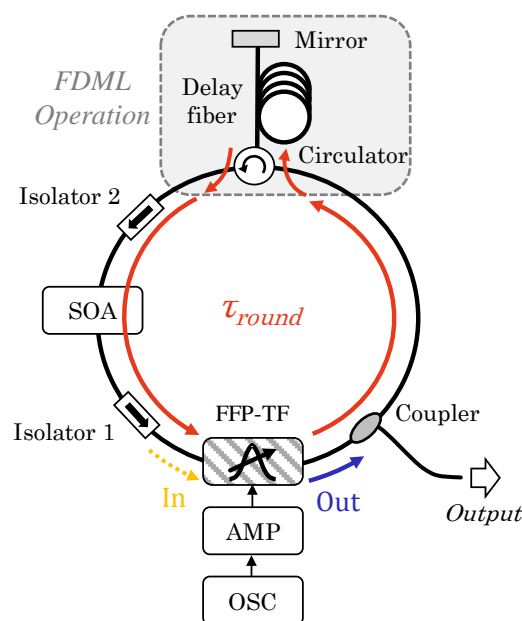


Figure 1. Construction of FDML laser

$$\tau_{round} = k \cdot T_m \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

ただし、 k は共振次数であり、 $k = 2$ とした場合が 2 次共振による FDML レーザとなる。

図 2 は FDML レーザの動作の概略であり、図 1 の FFP-TF の出射光と入射光の関係を示している。図 2 (a) は一般的なファイバリング共振器型の波長掃引レーザー ($k < 1$) であり、周回時間 τ_{round} の影響により出射光と入射光の波長が一致しない。これがレーザーの光出力を低下させ、掃引周波数の制限を引き起こす原因となる。図 2 (b) は基本共振周波数の FDML レーザ ($k = 1$) であり、それぞれの波長が一致した状態になる。また、本実験においては、波長掃引のさらなる高速化を実現するため、基本共振周波数の倍の掃引周波数に制御し駆動する 2 次共振の FDML レーザ ($k = 2$) について検討した (図 2 (c))。

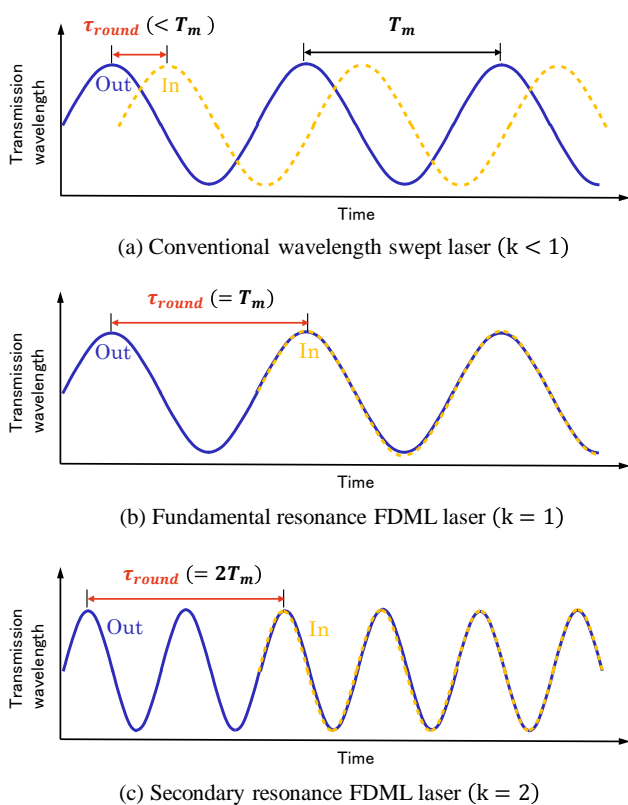


Figure 2. Scheme of FDML operation

3. FDML レーザの出力特性

2 km の遅延ファイバを挿入している本 FDML レーザの場合、光の周回時間を概算すると、2 次の共振状態になる掃引周波数 f_m は約 102 kHz であると概算される。そこで、掃引周波数による FDML レーザの光出力を測定した (図 3)。FDML レーザは概算値にほぼ一致する掃引周波数 f_m が 101.4 kHz において、約 1.6 mW の光出力が得られており、2 次の共振状態における FDML レーザとして動作している。

そこで、掃引周波数 f_m を 101.4 kHz とし、FDML レーザの波長掃引光を光スペクトラムアナライザに入射させ、波長帯域を測定した (図 4)。FDML レーザは、波長 1550 nm 帯において、光出力の低下を起こすことなく、連続的に発振波長を掃引できている。また、その波長可変範囲は約 1520~1580 nm であり、掃引帯域幅は約 60 nm である。構築した FDML レーザは 2 次の共振周波数において駆動できており、掃引周波数を 101.4kHz とした高速掃引を実現した。今後、本 FDML レーザを用いることにより、アコースティックエミッション等の計測に取り組む予定である。

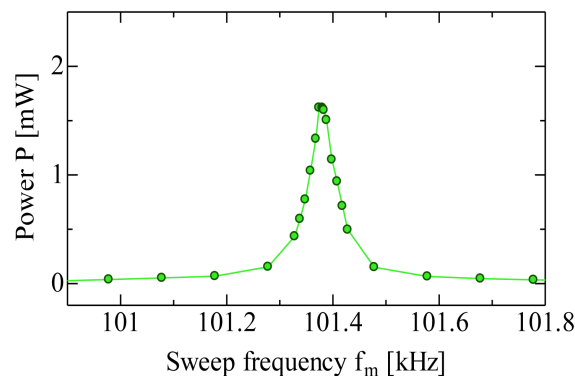


Figure 3. Output power versus sweep frequency

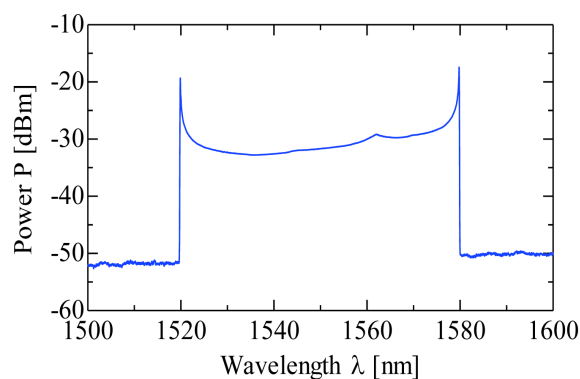


Figure 4. Spectrum of secondary resonance FDML laser

4. 参考文献

- [1] J.M.Lopez-Higuera ed.: “Handbook of Optical Fibre Sensing Technology”, Wiley, 2002.
- [2] T.Yamaguchi, Y.Shinoda: “High-speed vibration measurement by fiber Bragg gratings with Fourier domain mode locking laser”, Optical Fiber Sensors Conference (OFS), 2017 25th. IEEE, 2017.
- [3] R.Huber et al.: “Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography”, *Opt. Express*, Vol.14, No.8, pp.3225-3237, 2006.
- [4] T.Yamaguchi, Y.Shinoda: “Real-time fiber Bragg grating measurement system using temperature-controlled Fourier domain mode locking laser”, *Opt. Eng.*, Vol.56, No.6, 066112, 2017.
- [5] T.Yamaguchi, Y.Shinoda: “Multichannel High-Speed Fiber Bragg Grating Interrogation System Utilizing a Field Programmable Gate Array”, *IEEE Sens. L.*, Vol.2, No.1, 5500204, 2018.