

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.13 光制御デバイス・光ファイバー (旧3.14)

■ 2023年9月23日(土) 13:00 ~ 16:15 | 会 A308 (熊本城ホール)

[23p-A308-1~12] 3.13 光制御デバイス・光ファイバー (旧3.14)

和田 篤(防衛大)、黒田 圭司(北里大)

◆ 奨励賞エントリー

13:00 ~ 13:15

[23p-A308-1] 単層グレーティングを用いたフラットトップバンドパスフィルタの設計

○石岡 誠太¹、楊 知雨¹、井上 純一¹、金高 健二²、裏 升吾¹ (1.京都工繊大、2.産総研)

13:15 ~ 13:30

[23p-A308-2] 波長アドCRIGMの挿入損失低減のためのDBRのアポダイズ化

○渡邊 明理¹、寺西 俊佑¹、井上 純一¹、金高 健二²、裏 升吾¹ (1.京都工繊大、2.産総研)

13:30 ~ 13:45

[23p-A308-3] 光相関領域反射計におけるノイズフロア形状に関する考察

○吉田 総司¹、清住 空樹¹、水野 洋輔¹ (1.横浜国大)

13:45 ~ 14:00

[23p-A308-4] BOCDRにおける変調振幅の変調周波数依存性に関する考察

○(B)菊地 啓太¹、井上 諒¹、尾崎 滉太²、捧 治紀¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹ (1.芝浦工大、2.横浜国大)

14:00 ~ 14:15

[23p-A308-5] ブリルアン利得・損失スペクトルを用いたサポートベクタ分類によるブリルアン周波数シフトの推定

○野々垣 颯人¹、清 大地¹、田中 洋介¹ (1.農工大)

◆ 英語発表

14:15 ~ 14:30

[23p-A308-6] Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in ZBLAN fiber

○(D)Guangtao Zhu¹, Kenji Goya², Kohei Noda^{1,3}, Heeyoung Lee⁴, Yosuke Mizuno¹ (1.YNU, 2.APU, 3.UTokyo, 4.SIT)

14:45 ~ 15:00

[23p-A308-7] 連結ボトル共振器を用いたフェムトグラム分解能の水中質量センサ

○浅野 元紀¹、山口 浩司¹、岡本 創¹ (1.NTT物性基礎研)

15:00 ~ 15:15

[23p-A308-8] ヘテロダイン検出ファイバーキャビティリングダウン温度センサー

○(M1)池口 泰樹¹、岡 寿樹¹、黒田 圭司¹ (1.北里大理)

15:15 ~ 15:30

[23p-A308-9] ヘテロダイン検出時間・波長分割多重FBGセンサー

○松本 孝広¹、岡 寿樹¹、黒田 圭司¹ (1.北里大理)

15:30 ~ 15:45

[23p-A308-10] プラスチック光ファイバの透過光スペクトルの電気領域での観測と歪依存性の調査

○鷹野 瞭¹、Hamza Javid¹、水野 洋輔¹ (1.横浜国大)

15:45 ~ 16:00

[23p-A308-11] 偏波保持型低反射率FBG-FPIを用いた固体振動の測定

○和田 篤¹、岡野 真人¹、田中 哲¹ (1.防衛大)

16:00 ~ 16:15

[23p-A308-12] 折り返しC-CLPGを用いた偏波保持型EDF σ レーザーセンサによる強度変調型センシングの検討

○田中 哲¹、諸永 望¹、福嶋 匡謙¹、岡野 真人¹、和田 篤¹ (1.防衛大通信)

単層グレーティングを用いたフラットトップバンドパスフィルタの設計

Design of Single Layer Grating for Flat-top Bandpass Filter

京都工繊大¹, 産総研² °石岡 誠太¹, 楊 知雨¹, 井上 純一¹, 金高 健二², 裏 升吾¹

Kyoto Inst. Tech.¹, AIST², °Seita Ishioka¹, Zhiyu Yang¹, Junichi Inoue¹, Kenji Kintaka², Shogo Ura¹

E-mail: m2621003@edu.kit.ac.jp

導波モード共鳴 (GMR) フィルタは、透明基板上の光導波路にサブ波長グレーティングを集積して構成される波長フィルタである[1]。垂直入射光がグレーティングによって導波光に結合される波長においてのみ高い反射率を示す。反射帯域は結合の強さに比例して広がる。さらに、広帯域反射を与える強結合導波モードと狭帯域反射を与える弱結合導波モードを同時に用いると互いの反射を打ち消し合い狭帯域なバンドパス特性が得られる[2]。通常、GMR バンドパスフィルタは鋭いピークを持つ。一方、通信分野への応用にはフラットトップ形状が望ましい。複数の透過ピークを近接させてフラットトップ形状とする検討がなされているが、これまで複雑な多層構造の報告のみだった [3]。そこで我々は、単層構造でフラットトップバンドパス特性を得るために、複数の弱結合導波モードの利用を検討した。共鳴波長は導波モードの実効屈折率とグレーティングの周期によって決まる。本研究では、それらの実効屈折率を近接させる構造として、二重周期の二次元グレーティングを提案し、数値シミュレーションを行ったので報告する。

Fig. 1 に透過中心波長 1450nm としたフィルタの設計例を示す。SiO₂ 基板上に Si グレーティングを形成した構造である。高屈折率のグレーティングは導波コアとしても機能する。基板に対し垂直に入射した x 偏光が、x 方向に伝搬する TM モードに強結合し、y 方向に伝搬する TE モードに弱結合するようにグレーティング周期とフィルファクタを設計した。y 方向にのみ一周期中に $F_{y1}A_y$ と $(0.8-F_{y1})A_y$ の異なる幅を持つ高屈折率部分を設け、二重周期構造とした。このような構造を用いると、細い凸部分に電界

が集中する TE モードと、逆に避けて電界が分布する TE モードが隣接する次数で励振できる。したがって、両者の実効屈折率、つまり共鳴透過波長の F_{y1} 依存性は互いに大きく異なると考えた。

異なる F_{y1} における透過スペクトルの厳密結合波解析結果を Fig. 2 にまとめた。 F_{y1} の変化によって二つの透過ピークの波長間隔を制御できることが分かった。 $F_{y1}=0.313$ のとき半値全幅 8.2 nm のフラットトップ透過特性が期待できる。

[1] R. Magnusson, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **61**, 1022 (1992).

[2] M. Niraula, *et al.*, Opt. Lett., **40**, 5062 (2015).

[3] Y. H. Ko, *et al.*, Opt. Lett., **41**, 4704 (2016).

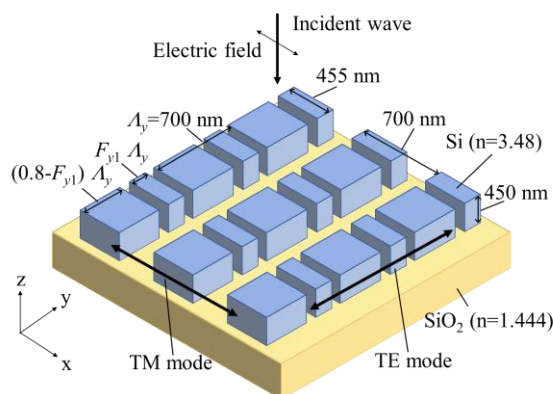


Fig. 1 Schematic diagram of designed filter.

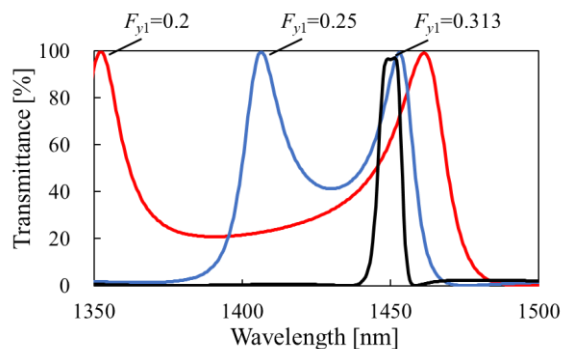


Fig. 2 Transmission spectra at different F_{y1} .

波長多重合波用 CRIGM の挿入損失低減のための DBR のアポダイズ化

Design of DBR Apodization for Low Insertion Loss CRIGM for Wavelength Multiplexer

京都工繊大¹, 産総研² ○(D)渡邊 明理¹, (M2)寺西 俊佑¹

井上 純一¹, 金高 健二², 裏 升吾¹

Kyoto Inst. Tech.¹, AIST², °Akari Watanabe¹, Shunsuke Teranishi¹,

Junichi Inoue¹, Kenji Kintaka², Shogo Ura¹

E-mail: d1822004@edu.kit.ac.jp

共振器集積導波モード共鳴ミラー(CRIGM)は、高反射性基板上の一対の分布ブラッグ反射器(DBR)による導波路共振器と、その内部に集積されたグレーティングカップラ(GC)から構成されている^[1]。空間光に対して共鳴波長で鋭い反射位相変化を示すため、レーザ共振器において共振器長に関わらず波長安定化をもたらす外部ミラーとしての機能が期待できる。複数の動作波長のCRIGMをカスケード接続し導波光を抽出する、すなわち波長合波機能により、波長多重も期待できる^[2]。しかしDBRのサイドローブによって他波長における透過率が低下し損失が生じる。そこで今回、アポダイズ化によるDBR反射スペクトルの改善と、その際のCRIGMの特性を理論的に検討した。

カスケード接続された2つのCRIGMと光波伝搬の様子をFig. 1に示す。GCに入射された空間光は、共鳴波長において一部は反射性基板上で反射され、一部は導波光に結合される。導波光はDBR共振器に蓄積されGCによって放射光に結合されるためCRIGMは高反射特性を示す。片側DBRを短縮したS-DBRとすれば共振器内の導波光を抽出できる。導波光は異なる動作波長のCRIGMにおいてGCによる放射損失とDBRによる反射損失を受ける。今回、DBRをアポダイズすることで動作帯域外でのDBR反射率の低減を試みた。

波長多重間隔20 nmを想定しCRIGMを設計した。導波路は、SiO₂光バッファ層(屈折率1.471, 厚さ1503 nm), Si-N導波コア層(屈折率1.974, 厚さ324 nm)およびSi-Nグレーティン

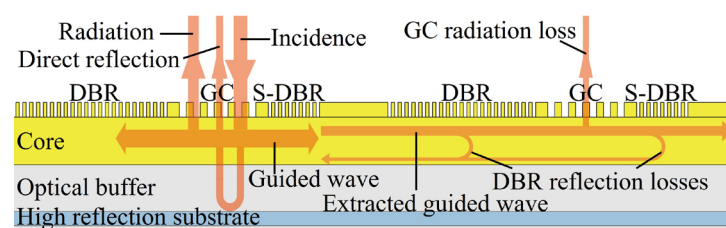


Fig. 1 Configuration of cascaded two CRIGMs and optical wave propagation.

グ層(厚さ40 nm)とした。動作波長1060 nmにおいてDBRとS-DBRは、両端にかけて凹部幅が狭くなるようガウシアン関数で変調させた。周期を共に302.2 nm, 中央の凹凸幅比を1:1とし、長さを182 μm および110 μm とした。

DBRの反射率スペクトルをFig. 2に示す。1080 nm導波光の透過率は、アポダイズしている場合(黒線)-0.6 $\times 10^{-3}$ dB, していない場合(赤線)-0.57 dBと見積もられた。CRIGMの反射率スペクトル(黒線)および反射位相スペクトル(赤線)をFig. 3に示す。共鳴波長近傍で97%の高反射率と、急峻な反射位相変化が見積もられた。以上、アポダイズDBRによるCRIGM挿入損失の低減が予測され、アポダイズDBRを用いたCRIGMの有用性が理論的に示された。

[1] J. Inoue *et al.*, Opt. Lett., vol. 39, pp. 1893-1896, 2014.

[2] A. Watanabe *et al.*, IEEE 73rd Electronic Components Tech. Conf. (ECTC), 2023.

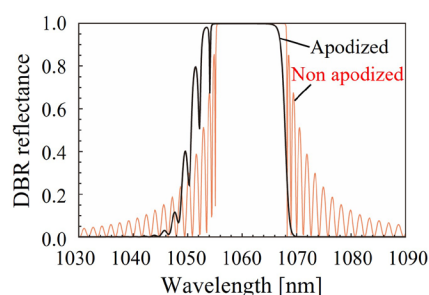


Fig. 2 Reflectance spectra of apodized/non apodized DBR of operation wavelength of 1060 nm.

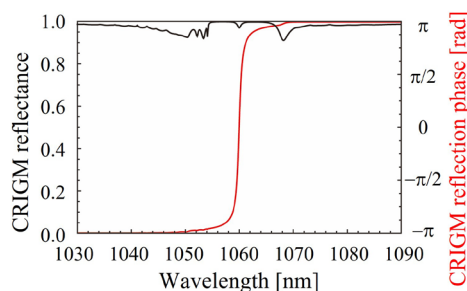


Fig. 3 Reflection spectra of CRIGM of operation wavelength of 1060 nm.

光相関領域反射計におけるノイズフロア形状に関する考察

Discussion on noise floor in optical correlation-domain reflectometry

○ 吉田 総司, 清住 空樹, 水野 洋輔

横浜国立大学 工学研究院

○ Soshi Yoshida, Takaki Kiyozumi, and Yosuke Mizuno

Faculty of Engineering, Yokohama National University

Emails: yoshida-soshi-yc@ynu.jp, kiyozumi-takaki-px@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1 はじめに

近年の光ファイバ通信の急速な普及に伴い、その健全性を診断する技術である光反射計の研究が精力的に推進されている。ここでは、光波コヒーレンス関数の合成法 (SOCF) に基づいた光相関領域反射計 (OCDR) [1] に注目する。OCDR は、任意の測定位置における高速な測定を可能とする「ランダムアクセス性」を有するのが特長の一つである。これは、光時間領域反射計 (OTDR) や光周波数領域反射計 (OFDR) では実現困難である。

OCDR では、測定ファイバ (FUT) 中の反射点が電気信号のピークとして観測される。その際、その主要ピークの周囲には、複数のピークを有するノイズフロアが形成される[2]。しかし、このノイズフロアは、現在の OCDR 理論では発生要因が説明できなかった。

そこで本研究では、異なる実験条件で観測されるノイズフロアの形状から、ノイズの発生要因を推定し、その抑制方法を検討する。

2 原理と実験系

本研究で用いる実験系を Fig. 1 に示す。一般に OCDR では、SOCF に基づき、レーザ出力に正弦波による周波数変調を施すことで、FUT に「相関ピーク」 (=測定位置) を形成し、特定位置からの反射光のみを選択的に検出する。ここで、変調周波数を制御し相関ピークを FUT に沿って掃引することで、反射率の分布測定を実現する。

まず、レーザの駆動電流の直接変調によって周波数変調を施された出力光を、カプラによって入射光と参照光に分岐した。入射光は、光増幅器 (EDFA) で 8.3 dBm まで増幅した後、PC コネクタによる意図的な反射点を設けた FUT に入射した。参照光は、300 m の遅延ファイバを通過させ、偏波状態は偏波スクランブラにより平均化した。FUT からの反射光は、別の EDFA で 1.8 dBm まで増幅した後、音響光学変調器 (AOM) により 100 MHz の周波数シフトを施した。最後に、反射光と参照光は、バランスフォトリダイオード (BPD) にてヘテロダイン検波した。その出力は、電気スペクトラムアナライザ (ESA) における分解能帯域幅 100 kHz のゼロスパン機能により、特定の周波数帯の成分のみを観測した。その周波数帯は 100 MHz, 70 MHz, 40 MHz, 10 MHz と変化させ、ノイズフロアの形状を記録した。記録にはオシロスコープを用い、掃引 64 回ごとに平均処理を行った。変調周波数は 122.98 kHz–130.78 kHz の範囲で掃引し、反射点の周囲 60 m の区間で反射率の分布測定を行った。

3 実験結果, 考察

まず、Fig. 2(a)が、通常の OCDR 測定の結果である 100 MHz におけるパワー変動である。これまでの研究報告[1,2]と同様に、反射ピークを中心として線対称の位置にピーク状のノイズが現れた。次に、70 MHz を中心とする帯域では、中央のピークが 2 つに分裂する (Fig. 2(b))。40 MHz における実験結果 (Fig. 2(c)) では、その分裂はさらに広がり、10 MHz では、分裂したピークが左右のノイズと一体となりピークは 2 つとなった (Fig. 2(d))。

このピークの挙動は、ビートスペクトル[3]における信号の折り返しを考えると説明が可能である。まず、ビートスペクトルの概念図を Fig. 3(a)に示す。これは、光ファイバの各位置で反射した光をヘテロダイン検波した場合のスペクトルであり、それを模式的に平面で表したものが Fig. 3(b)である。ここで、Fig. 3(c)のように、AOM によってビートスペクトルが 100 MHz シフトすると、負の周波数からの折り返しによって、ビートスペクトルが二つ重なった状態となる。ここから、Fig. 3(d)のように、ゼロスパン処理を用いて信号を取り出すと、AOM のシフト周波数である 100 MHz ではピークが 3 つ、そして、低周波に行くにつれ、中央のピークが分裂し 4 つとなり、さらに低周波になると、それぞれのピークが接近し、0 Hz に近づくほどピークは 2 つに収束する。このピーク数の変動やその位置は実験結果と一致する。この折り返し信号に起因するノイズを抑制するためには、AOM を単一側波帯変調器などで代替し、さらに大きな周波数シフトを施すことが挙げられる。これにより、周波数シフト量を変調振幅の 2 倍以上にすることで、折り返しのビートスペクトルとの重なりを回避できると考えられる。

参考文献

[1] K. Hotate, et al., J. Lightw. Technol. **11**, 1701 (1993).

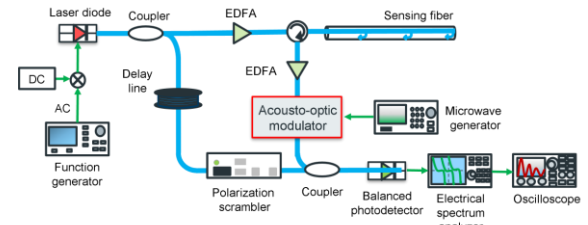


Fig. 1. Schematic experimental setup of optical correlation-domain reflectometry (OCDR). EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

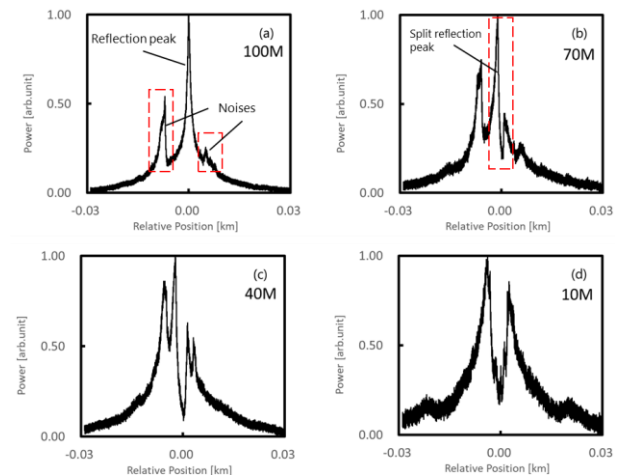


Fig. 2. Experimental results at zero-span frequencies of (a) 100 MHz, (b) 70 MHz, (c) 40 MHz, and (d) 10 MHz.

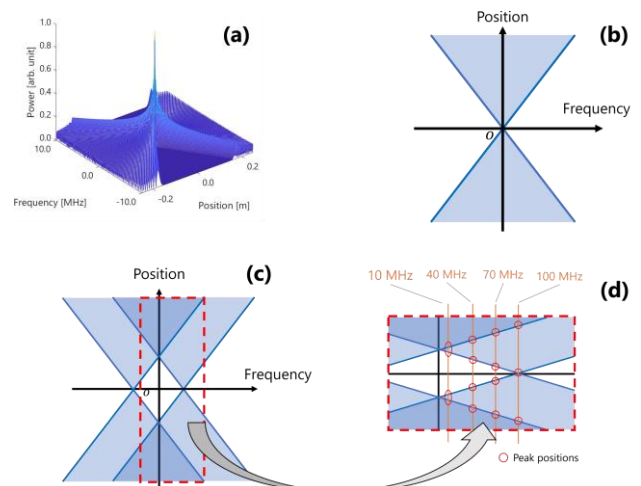


Fig. 3. Explanation based on folded beat spectrum. (a) 3-dimensional schematic of beat spectrum, (b) simplified 2-dimensional schematic of beat spectrum, (c) beat spectrum shifted by acousto-optic modulator (AOM), and (d) its magnified view in the frequency range from 10 MHz to 100 MHz.

[2] K. Hotate, Meas. Sci. Technol. **13**, 1746 (2002).

[3] T. Kiyozumi, et al., submitted to IEEE Trans. Instrum. Meas.

BOCDR における変調振幅の変調周波数依存性に関する考察

Modulation amplitude dependence on modulation frequency in BOCDR

○菊地 啓太¹、井上 諒¹、尾崎 滉太²、棒 治紀¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹

¹ 芝浦工業大学 理工学研究科 ² 横浜国立大学 工学研究院

OKeita Kikuchi¹, Ryo Inoue¹, Kouta Ozaki², Haruki Sasage¹, Yosuke Mizuno², and Heeyoung Lee¹

¹ Shibaura Institute of Technology ² Yokohama National University

E-mails: af20098@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた歪・温度センサは、散乱スペクトルの周波数シフトに基づき比較的高精度な分布測定が可能であるため、インフラモニタリング技術としての応用が期待されている。中でも、「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」は、測定ファイバの片端からの光入射により動作し、最高で mm オーダの高い空間分解能とランダムアクセス性を兼ね備える唯一の技術である[1]。

BOCDR では、光波コヒーレンス関数の合成法に基づき、測定ファイバへの入射光に周波数変調を施すことで位置分解を実現する。周波数変調を施す方法として広く用いられているのが「直接変調方式」である。直接変調方式は、実装が容易かつ低コストである一方、(i) 高速かつ深い変調に適したレーザを選定する必要がある、(ii) 周波数変調と同時にパワー変調を伴う、(iii) 変調振幅が変調周波数に大きく依存する、などの欠点がある。特に、(iii)の影響により、測定位置によって空間分解能が大きく変動してしまう場合があると考えられていた。一方、これまでに、直接変調方式に替わる新たな手法として「外部変調方式」が提案されている[2,3]。外部変調方式は、実験系が煩雑・高コストになってしまうものの、直接変調方式の欠点を緩和することできると考えられている。しかし、両変調方式における変調振幅の変調周波数依存性の実験的検証は、十分であるとはいえない状況である。

そこで本研究では、直接変調方式と外部変調方式のそれぞれの場合について、変調振幅の変調周波数依存性を精緻な実験により解明するとともに、それらが BOCDR の性能に及ぼす影響について検討した。

2. 原理

BOCDR の理論空間分解能 Δz は、

$$\Delta z = \frac{c\Delta v_B}{2\pi n f_m \Delta f} \quad (1)$$

で与えられる[4]。ここで、 c は光速、 Δv_B はブリルアン線幅、 n はコアの屈折率、 f_m は変調周波数、 Δf は変調振幅である。すなわち、空間分解能は変調周波数と変調振幅の積に反比例する。BOCDR では、変調周波数の制御によって測定位置を掃引するため、測定位置によって空間分解能がある程度変化する。このとき、変調振幅が一定であれば位置による空間分解能の変動は比較的小さく抑えられる。しかし、変調振幅も変調周波数に依存してしまう場合は、空間分解能の位置依存性が顕著となる可能性がある。これは BOCDR の実用性・利便性に悪影響を与えかねないため、変調振幅の変調周波数依存性を詳細に調査し、対策を検討することが肝要である。

3. 実験系および実験条件

用いた直接変調方式の実験系を Fig. 1 に示す。レーザの駆動電流を制御することで周波数変調を実現した。一方、用いた外部変調方式の実験系を Fig. 2 に示す。波形発生器 (FG) と電圧制御発振器 (VCO) によって得られる変調信号を、電気光学変調器 (EOM) を用いてレーザの出力光に乗せ、変調信号光のみを狭線幅バンドパスフィルタ (BPF) によって切り出した。両方式により周波数変調された光は、一般的な BOCDR の実験系[1, Fig. 2.参照]に入力した。いずれの方式においても、電気スペクトラムアナライザ (ESA) にて、レイリー散乱由来のスペクトルの広がり半分の[1]として変調振幅を算出した。

変調振幅と変調周波数の関係を調査する際、FG の出力電圧は、直接変調方式のとき $1.0 V_{p-p}$ 、外部変調方式のとき $2.0 V_{p-p}$ に固定した。変調周波数は 0.1–15 MHz の範囲で変化させ、

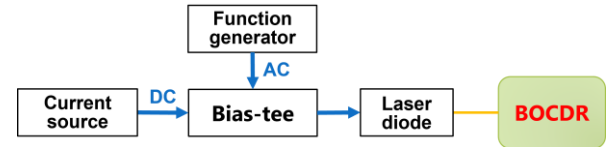


Fig. 1. Schematic setup of direct-modulation BOCDR.

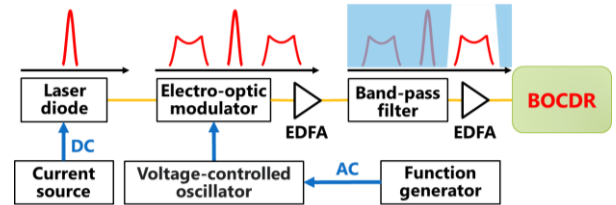


Fig. 2. Schematic setup of external-modulation BOCDR. EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

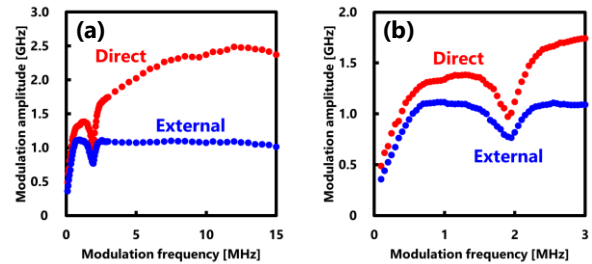


Fig. 3. (a) Dependence of the modulation amplitude on the modulation frequency (range: 0.1–15 MHz); comparison between direct- and external-modulation schemes. (b) Its magnified view around 1.5 MHz.

0.1–3 MHz では 0.05 MHz おき、3–15 MHz では 0.5 MHz おきに測定を行った。

4. 実験結果と考察

両変調方式について、変調振幅の変調周波数依存性を測定した結果を Fig. 3(a) に示す。直接変調方式の場合、変調周波数が高くなるにつれ、変調振幅は増加する傾向にあった。一方、外部変調方式の場合、変調周波数の変化に依らず、変調振幅はほぼ一定であった。しかし、低周波数帯においては、変調振幅が顕著に変化する帯域が存在した。変調周波数 0.1–3 MHz の範囲の拡大図を Fig. 3(b) に示す。どちらの変調方式の場合でも、0.5 MHz 程度までは急激に変調振幅が増加し、その後、約 2 MHz 付近で極小値をとることが明らかになった。

以上から、外部変調方式では、基本的には変調振幅は変調周波数に依存しないこと、すなわち、空間分解能が変調周波数のみに依存することから、空間分解能の測定位置による変動が抑制できることが確認された。一方で、直接変調方式のみならず外部変調方式においても、比較的低い周波数帯では変調振幅の変調周波数依存性が激しくなり、空間分解能の測定位置による変動が顕著に現れてしまう可能性があることが明らかになった。すなわち、比較的低い変調周波数が用いられる長距離測定においては、変調周波数を適切な周波数帯に設定する必要があるといえる。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [2] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express* **12**, 022005 (2019).
- [3] K. Noda, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 068004 (2019).
- [4] Y. Mizuno, et al., *J. Lightwave Technol.* **28**, 3300 (2010).

ブリルアン利得・損失スペクトルを用いたサポートベクタ分類による ブリルアン周波数シフトの推定

Brillouin Frequency Shift Estimation Using Support Vector Classifier with Brillouin Gain and Loss Spectra

農工大工, °野々垣 颯人, 清 大地, 田中 洋介

Tokyo Univ. of Agri. & Tech., °Hayato Nonogaki, Daichi Sei, Yosuke Tanaka

E-mail: s225163v@st.go.tuat.ac.jp, tyosuke@cc.tuat.ac.jp

1. 緒言

分布型ブリルアンファイバセンサは、一本の光ファイバに沿って温度や歪みの分布を測定できることから、構造ヘルスマニタリング等への応用が期待されている[1]。その代表的なセンシング手法の1つに BOTDA (Brillouin optical time domain analysis) がある。一般的な BOTDA では、ブリルアン利得スペクトル (BGS: Brillouin gain spectrum) を観測し、ポンプ光と BGS の周波数差である BFS (Brillouin frequency shift) の変化から、温度や歪みの変化を求める。ここで、従来の BGS 測定では、スペクトルデータ処理を行うカーブフィッティング(CF)に要する時間の長さが、課題の1つとなっていた。そこで、最近では機械学習 (ML) の活用により CF を行わない BFS 測定が提案されている。特に、サポートベクタマシン(SVM)などの ML モデルが BGS データの分類に利用されている[2]。一方、CF を行わない別の手法として、我々は BGS に加えて BLS (Brillouin loss spectrum) と 2 周波プローブ光により仮想合成したブリルアン利得スペクトル (VBGS: Virtual Brillouin gain spectrum) と傾斜利用法による BFS 測定を提案している[3]。

本研究では SVM モデルにおいても、VBGS を利用すると BGS を用いたときよりもより高精度な BFS 測定が実現することが確認できたので報告する。

2. VBGS の生成原理

Fig. 1 に VBGS の生成原理を示す。SBS で発生する BGS と BLS は、ポンプ光周波数 ν_p から $\pm\Delta\nu_{BFS}$ だけシフトした周波数を中心にピークを持つローレンツ分布となり、以下で与えられる。

$$G(\nu) = \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{\{\nu - (\nu_p - \Delta\nu_{BFS})\}^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (1)$$

$$L(\nu) = \frac{-g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{\{\nu - (\nu_p + \Delta\nu_{BFS})\}^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\nu_B$ は BGS の線幅、 g_0 は BGS の最大利得である。

提案手法では 2 つの周波数成分 $\nu_p + \Delta\nu$ と $\nu_p - \Delta\nu$ を持つプローブ光で BGS と BLS を同時に掃引するため、プローブゲイン VGS は以下で与えられる。

$$A(\Delta\nu_{BFS}) \propto \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\Delta\nu_m - \Delta\nu_{BFS} - \Delta\nu)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} - \frac{g_0(\Delta\nu_B/2)^2}{(\Delta\nu_m - \Delta\nu_{BFS} + \Delta\nu)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2}, \quad (3)$$

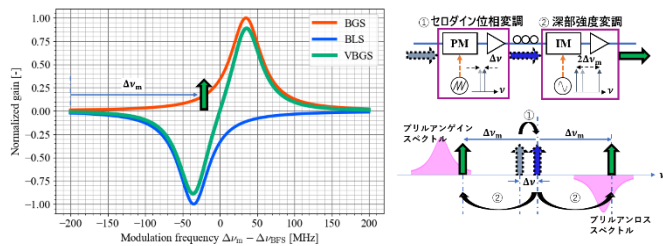


Fig.1 Generation of VBGS.

3. 結果

ML による BFS 測定では、教師データとして予め作成された SVM モデルと、周波数掃引点分だけ測定されたプローブゲインから BFS を測定する。VBGS は合成条件次第で BGS よりも複雑な形状にできる。そのため、特徴量であるプローブゲインから、ラベルである BFS を推定する ML において優位性があると考えられる。

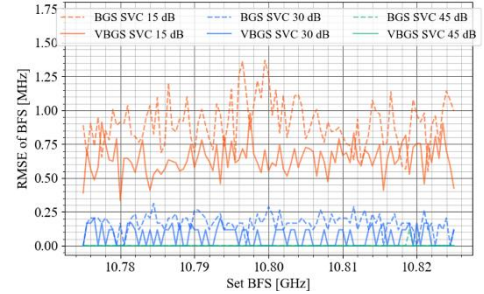


Fig.2 RMSE of estimated BFS and set BFS: BGS SVC and VBGS SVC.

Fig. 2 に BGS、VGS をそれぞれ SVM モデルとした場合の BFS 測定精度のシミュレーション結果を示す。ここでは、 $\Delta\nu$: 20 MHz、BFS 範囲: 10.775 – 10.825 GHz (0.5 MHz ステップ)、線幅 30 – 100 MHz (2 MHz ステップ) で教師データを作成し、周波数掃引範囲: 10.7 – 10.9 GHz (1 MHz ステップ)、BFS: 10.775 – 10.825 GHz (0.5 MHz ステップ)、線幅: 48 – 72 MHz (2 MHz ステップ) に設定した。シミュレーション結果から、BGS よりも VGS を SVM モデルとした場合のほうが、BFS を高精度に推定できることがわかる。

最後に、提案手法を用いて、長さ 30 m のファイバの端から 15 m 付近を 4.4 °C から 49.7 °C まで 4000 s かけて恒温器内で温度変化させながら、BFS をリアルタイム測定し、本手法の妥当性を検証した (Fig. 3)。

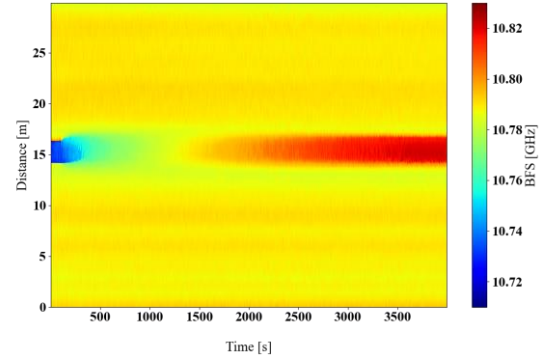


Fig. 3 Colormap of BFS estimated by VBGS SVC.

4. 結言

本研究では VBGS を SVM モデルとした BFS 測定を提案し、シミュレーションと実験により検証を行った。その結果、SVM モデルに VGS を用いると、BGS を用いる場合よりも、BFS 測定の精度が向上することが確認された。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (JP21KK0067, JP22K18790) の支援を受けた。

参考文献

- 1) H. Li, D. Li, and G. Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," Eng. Struct., vol. 26, no. 11, pp. 1647-1657, Sep. 2004.
- 2) H. Wu, L. Wang, N. Guo, C. Shu, and C. Lu, "Brillouin optical time domain analyzer assisted by support vector machine for ultrafast temperature extraction," J. Lightwave Technol., vol. 35, no. 19, pp. 4159-4167, Oct. 2017.
- 3) D. Saito and Y. Tanaka, "Slope assisted Brillouin optical time domain analysis using dual frequency probe with gain and loss spectra," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), paper Ath2S.4, May. 2021.

Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in ZBLAN fiber

Guangtao Zhu¹, Kenji Goya², Kohei Noda^{1,3}, Heeyoung Lee⁴, and Yosuke Mizuno¹

¹ Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

² Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University, Akita 015-0055, Japan

³ Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

⁴ College of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Tokyo 135-8548, Japan

E-mails: zhu-guangtao-jm@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

Introduction

Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) [1] has been extensively studied over recent decades to measure the distribution of strain and/or temperature along a fiber under test (FUT) for the demand of health monitoring of infrastructures susceptible to damages from earthquakes, aging, etc. Brillouin frequency shift (BFS), defined as the frequency shift of the Brillouin scattered light from the incident light, is proportional to the ambient temperature and strain, and varies in different fiber materials. ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) glass fibers have been widely studied for their wide-band transmission, low phonon energy [2], etc. The characteristics of stimulated Brillouin scattering in ZBLAN fibers has been reported to have a much higher power threshold than that in single-mode silica fibers [3], which indicates that Brillouin scattering in ZBLAN fibers can be exploited for a variety of practical applications.

In this work, for sensing applications, we investigate the dependences of the BFS on strain and temperature in a ZBLAN fiber using spontaneous Brillouin scattering in a BOCDR system. It is shown that the BFS in a ZBLAN fiber shifts towards negative frequency direction with increasing strain and temperature with coefficients of -90.9 MHz/% and -1.6 MHz/K, respectively.

Principles

The experimental setup of BOCDR is depicted in Fig. 1. The optical output from a laser diode (LD) is divided into pump and reference light beams. The pump light is injected into an FUT, and the Stokes light is directed into a photodetector. The reference light acts as an optical local oscillator. The electrical beat signal of the two light beams gives the Brillouin gain spectrum (BGS) and is monitored using an electrical spectrum analyzer (ESA). The central frequency of the BGS gives the BFS in the FUT. By holding one of the strain or temperature constant and varying the other, the BFS dependences on either of the strain or temperature can be obtained.

Experiments

The length of the single-mode ZBLAN fiber used in the experiments is 5 m, and a 1550-nm band LD was used. We first investigated its strain characteristic under the room temperature of 21.9 °C. Each end of the fiber was fixed with tapes on a fixed stage and a movable stage with a micrometer, and strain was applied by adjusting the position of the movable stage. From the applied strain of 0.063% to 0.162%, the BGS was obtained, and the BFS was then calculated. The results of the spectra under varied strain are shown in Fig. 2(a) and were normalized by making the amplitude of the noise floor 0. Next, we investigated the temperature characteristic by putting the whole slack fiber in a thermostatic chamber. The normalized BGSs were then obtained under varied temperatures of from 30.1 °C to 90.2 °C, which are shown in Fig. 2(b). It is clearly depicted that the BFS in the ZBLAN fiber shifts towards negative frequency direction with increasing strain and temperature.

Subsequently, to obtain the BFS under varied strain and temperature, we fit the BGS data to Lorentzian curves to acquire the central frequency values. The fitting results of the BGS in the strain and temperature experiments are shown in Fig. 3(a) and (b), respectively. The BFS dependences on strain and temperature and their linear fitting are shown in Fig. 4(a) and (b), respectively. According to the linear fitting results, the strain and temperature coefficients of the BFS in the ZBLAN fiber are -90.9 MHz/% and -1.6 MHz/K, respectively.

Compared to the strain and temperature sensitivities in a single-mode silica fiber of 580 MHz/% [4] and 1.18 MHz/K [5], respectively, the sensitivities in the ZBLAN fiber are -0.16 and -1.3 times the values in silica fibers. With these unique BFS dependencies, we believe that the Brillouin scattering in ZBLAN fibers can be a useful tool for strain-insensitive high-accuracy

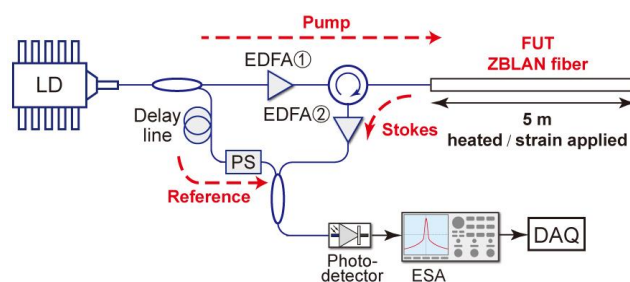


Fig. 1 Experimental setup of BOCDR. DAQ: data acquisition, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, PS: polarization scrambler.

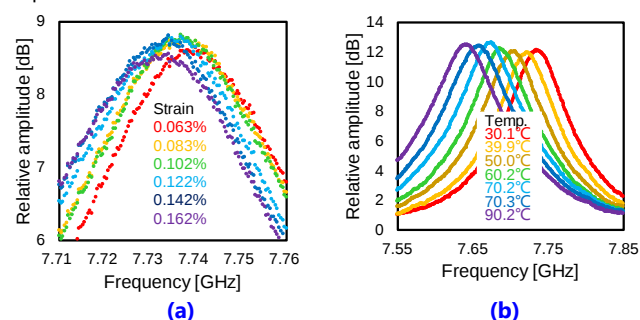


Fig. 2 Brillouin gain spectra under varied (a) strain and (b) temperature.

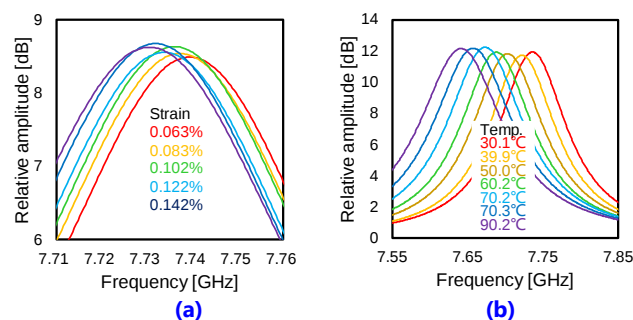


Fig. 3 Lorentzian fitting results of Brillouin gain spectra under varied (a) strain and (b) temperature.

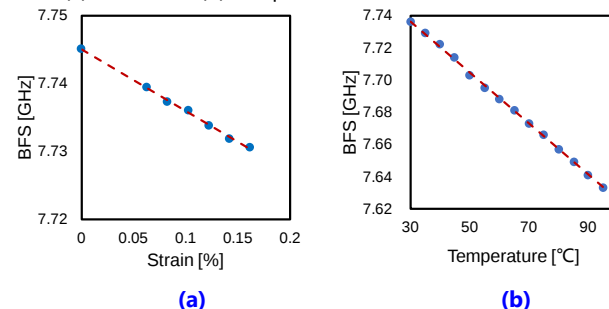


Fig. 4 BFS dependences on (a) strain and (b) temperature and their linear fitting results.

temperature sensing needs. Distinguishing strain and temperature measurement in Brillouin sensing with combined use of a silica fiber would also be a potential for the ZBLAN fiber in the future.

References

- [1] Y. Mizuno, et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
- [2] D. Hewak, et al., Electron. Lett. **29**, 237 (1993).
- [3] V. Lambin-lezzi, et al., J. Non-Cryst. Solids **359**, 65 (2013).
- [4] T. Horiguchi, et al., IEEE Photon. Technol. Lett. **1**, 107 (1989).
- [5] T. Kurashima, et al., Appl. Opt. **29**, 2219 (1990).

連結ボトル共振器を用いたフェムトグラム分解能の水中質量センサ Sub-femtogram-resolution mass sensor in water using a twin-microbottle resonator

NTT 物性基礎研 浅野 元紀[○], 山口 浩司、岡本 創

NTT Basic Research Labs., [○]Motoki Asano, Hiroshi Yamaguchi and Hajime Okamoto

E-mail: motoki.asano@ntt.com

機械振動子は、微小粒子の付着に伴う振動周波数の変化からその質量を敏感に読み取ることが可能なセンサとして機能する。この質量センサの性能指標である検出可能な最小質量、すなわち質量分解能は、振動子の有効質量 m_{eff} と振動周波数の推定精度を表すアラン分散 σ_A との積で決定される[1]。このアラン分散を格段に改善する方法として、光キャビティと機械振動子とが結合したオプトメカニカル素子の利用が挙げられるが、質量検出の重要性が高いバイオ・化学分野へ応用するためには、液中での光キャビティの特性劣化を防ぐ素子構造が必要であった。我々は、これを解決する素子として、液中の任意の位置にアクセス可能な連結ボトル共振器を提案し、実証実験において 8 pg の質量分解能を達成してきた[2]。この値は単一バクテリアの質量程度である一方、微量タンパク質といった更に微小な対象の検出に向けて、分解能の更なる向上が求められる。

我々は、振動子の有効質量 m_{eff} を低減する方法として素子サイズの小型化を試みた。連結ボトル共振器のくびれ構造を作製するテーパ化の間隔を緻密に制御することで、初期のファイバ直径 ($\sim 80 \mu\text{m}$) よりも小さなボトル径 ($\sim 68 \mu\text{m}$) を実現した (図 a)。これにより、初期検証[2]に比べて一桁小さな有効質量 ($4.0 \times 10^{-6} \text{ g}$) を実現した。次に、アラン分散 σ_A を低減するため、振動検出感度の向上を実現するバランスホモダイン干渉計の構築と、振動周波数の推定を行う位相同期ループ (PLL) のバンド幅削減を行った。前者は、光キャビティに導入するレーザー光の偏光を制御し、非共鳴の偏光成分を局部発振光として用いることで実現し、フォトディテクタによる直接検出に比べ、5 倍程度優れた信号対雑音比を達成した (図 b)。更に、振動に対するプローブレーザー光の周波数安定化などを施すことで PLL 全体の安定度を向上させ、バンド幅を 5 Hz まで削減することに成功した。本セットアップを用いて素子を水中で動作させることで、初期検証[2]に比べて三桁優れたアラン分散を実現し、サブフェムトグラムの質量分解能 $7.0 \times 10^{-16} \text{ g}$ を達成した (図 c) [3]。本研究は JSPS 科研費 JP21H01023、JP23H05463 の助成を受けたものです。

[1] M. Sansa *et al.* Nat. Commun. 11 3781 (2020).

[2] M. Asano *et al.*, Sci. Adv. 8, eabq2502 (2022).

[3] M. Asano *et al.*, Appl. Phys. Express 16, 032002 (2023).

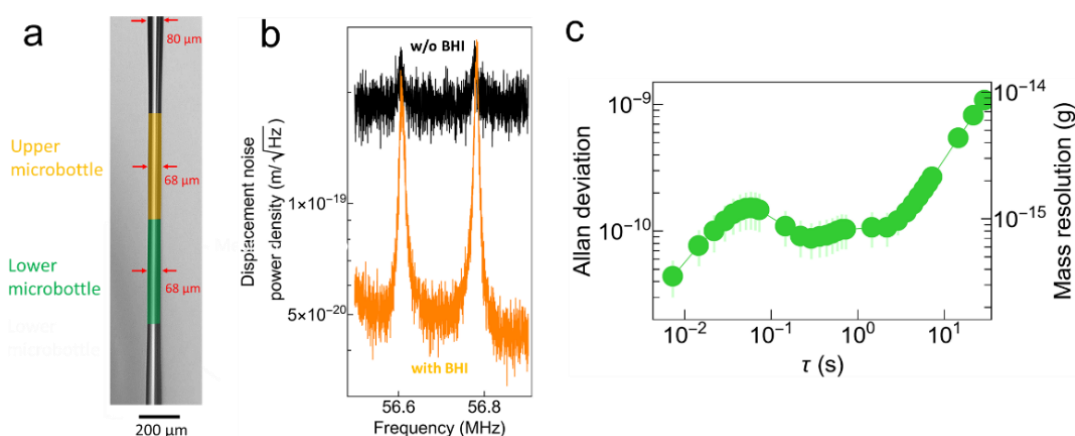


Fig. a: Optical microscope image of the miniaturized twin microbottle resonator. Fig. b: Displacement noise power density with and without the balanced homodyne interferometer (BHI). Fig. c: Allan deviation and mass resolution with respect to integration time.

ヘテロダイン検出ファイバーキャビティリングダウン温度センサー



Fiber cavity ring-down temperature sensor based on heterodyne detection

北里大理¹, [○](M1) 池口 泰樹¹, 岡 寿樹¹, 黒田 圭司¹

Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, [○](M1) Taiki Ikeguchi¹, Hisaki Oka¹,
Keiji Kuroda¹

E-mail: ikeguchi.taiki@st.kitasato-u.ac.jp

ファイバーキャビティリングダウン分光法 (FLRD) はキャビティリングダウン分光法 (CRDS) から派生した吸収分光法の一つである。CRDS は 2 枚の高反射ミラーを用いて光を試料内で多数回往復させることで相互作用長を伸ばし、分子の微小な濃度や状態変化を測定する方法である。それに対して FLRD はミラーの代わりにファイバーを用いてループを形成し、試料濃度やセンサーヘッドによる周囲環境 (圧力、温度、歪など) の変化を高精度に検出する方法である。その測定精度は光パルスのループ内周回数 (あるいはリングダウン時間 τ) により決まる、光損失の検出限界 B_{min} は以下の式で表される [1]。

$$B_{min} = \frac{1}{m} \frac{\Delta\sigma_r}{\tau}$$

ここで m はループ周回数、 $\Delta\sigma_r$ はリングダウン時間の標準偏差である。式より B_{min} は光周回数 m 倍、精度が向上することがわかる。また本来、強度測定 $\Delta I/I_0$ と時間測定の精度はほぼ同じ約 10^{-3} である。よってループ構造による時間領域測定を用いることで強度測定に対して精度が m 倍されることになる。

温度センサーヘッドとして使用するファイバーストラクチャーリング (FBG) は光ファイバーのコアに回折格子が形成されているデバイスで、ブラッグ反射条件を満たす波長のみを反射する。FBG は熱変化や歪が加わることで周期や屈折率が変化しセンサーヘッドとして使用できる。先行研究 [2] では FBG をファイバーループにサーキュレータを通して組み込み、反射型センサーとして用いていた。しかしサーキュレータは一般に損失が 20% 弱と大きく、周回数 m を減らす大きな原因となる。これにより読み取りパルス個数は約 6 個であった。

そこで今回新しいキャビティ構造を提案し、ヘテロダイン検出による高感度化を報告する。図 1 に実験セットアップ図を示す。FG (ファンクションジェネレータ) を用いて半導体レーザー (LD1) からパルス幅 60 ns の単一パルスを発振させ 99:1 カプラーで 1% を FBG センサーヘッドへ入射する。FBG からの反射は再びカプラーを通りファイバーストラクチャーリングへ入射される。FBG の反射率は 99% であるため FBG とミラーで疑似的な線形キャビティを構成する。FBG の 1% 透過光でループパルス出力を検出するため、サーキュレータを必要としない透過型センサーとなり損失の低減が期待される。さらに別の半導体レーザー (LD2) からの連続光 (参照光) を PC (偏波コントローラ) で偏光を調整した後、FBG からの透過光とカプラーで混合する。カプラーからの 2 つの出力をバランス検出器 (BD) で検出しオシロスコープ上で観測する。このときヘテロダイン検出により参照光と干渉した出力パルスはビート信号として検出される。ビート信号は二つの光の電場振幅の積 ($2|E_{sig}E_{ref}|$) に比例するため、微弱な信号パルスを高感度に測定できる。また出力パルスの振幅を測定するため、振幅 E の減衰時間は強度検出に比べ 2 倍長くなり周回数 m を増加させ、高精度化することが期待できる。

図 2 にヘテロダイン検出によって生じたビート信号を示す。ここで LD の波長は FBG のピーク付近に設定してある。図 3 にオシロスコープ上で図 2 のパルス波形に roof 関数を用いた図を示す。ここで roof は 1000 回の測定のピーク信号を表示する機能である。図 4 に得られた波形のピーク値と指数関数によるフィッティングラインを示す。図 3 よりフィッティングラインが実験データをよく再現し、パルス個数は約 25 個まで増加した事が確認できる。また図 5 に参照光を用いず BD の片方のチャンネルのみを用いた強度検出 (オレンジ) とヘテロダイン検出 (青) の比較を示す。ここでは信号強度を上げるため LD の波長は FBG のピークからずらしてある。ヘテロダイン検出のデータは強度検出に比べ減衰が 2 倍程度長くなっており読み取れるパルス個数の増加も確認できる。以上より新しいキャビティ構造とヘテロダイン検出により高感度化、高精度化が可能になることがわかった。講演では FBG の温度を変えた場合の測定から温度センサーとしての精度も議論する予定である。

[1] C. Wang, *Sensors*, 9, 7595-7621 (2009).

[2] B. M. Mao, et. al., *Applied Optics*, 59(19), 5693-

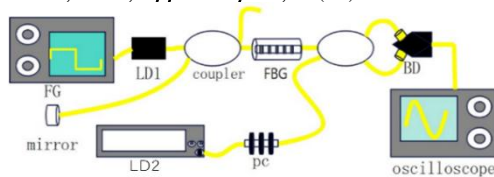


Figure 1

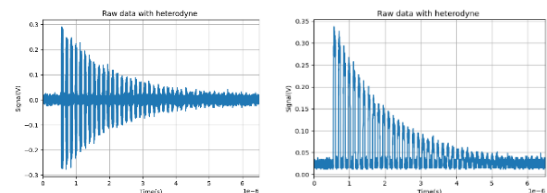


Figure 2

Figure 3

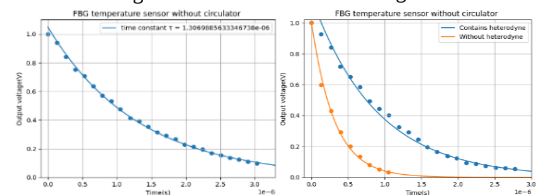


Figure 4

Figure 5

ヘテロダイン検出時間・波長分割多重 FBG センサー

Time- and wavelength-division multiplexed FBG sensor based on heterodyne detection

北里大理¹, [○](M1)松本 孝広¹, 岡 寿樹¹, 黒田 圭司¹Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, [○](M1)Takahiro Matsumoto¹,
Hisaki Oka¹, Keiji Kuroda¹

E-mail: matsumoto.takahiro@st.kitasato-u.ac.jp

FBG(Fiber Bragg Grating)は温度・歪みセンサーのセンサーヘッドとして利用される。効率的なセンサーシステムの構築には単一伝送路に複数のセンサーヘッドを組み込むことが求められ、このためには低反射率FBGからの微弱反射光を高感度に検出する必要がある。我々のグループではこれまでにヘテロダイン検出による高感度化の実証[1]、時間分割多重化(TDM: Time-Division Multiplexed)[2], 波長分割多重化(WDM: Wavelength-Division Multiplexed) [3]を報告してきた。今回は時間分割多重と波長分割多重の併用によるハイブリット化、アセチレン(C₂H₂)セルを用いた波長較正による高精度化、温度による波長自動掃引とLabVIEWプログラムによるデータ自動取り込み化によるFBGセンサーシステムを構築したので報告する。

用いたFBGは中心波長が1531.1±0.1nm, 1540.5±0.1nm, 1550.1±0.1nmの3種類で、半値全幅はすべて0.2±0.1nmであり反射率は1%である。上記3波長FBGを波長順に約2m間隔で直列配置した3ユニットで計9個のFBGセンサー部となっている。光源側を先頭としてFBG1~FBG9としている。

光源はDistributed Feedback(DFB)レーザーアレイを用い、波長1531nm、1540nm、1550nmの三波長で1.6μs、の遅延をかけパルス幅500nsで発振させる。これによりWDM化を行っている。出力光を90%/10%カプラーで2分割し10%を波長マーカーとして用いるC₂H₂セルへ送る。90%をさらに等分割し信号光と参照光として分離させ信号光は強度変調器で70nsパルスに切り取り、このパルスをサーキュレーター経由でFBGに送り込む。FBGからの反射光は偏波コントローラーにより偏光を調整した参照光と混合し、バランス検出器でヘテロダイン検出する。この時、複数の同一波長FBGからの70ns反射光は500ns参照光によって同時に検出されTDM化を行っている。このFBG反射光のビートとC₂H₂セル透過光をオシロスコープ(NI:PXI-5152)を通してPCで取り込む。繰り返し10sのRamp電圧をレーザーの温度コントローラーに印加することで、温度(波長)自動掃引を行った。

図1にビート信号の代表的な波形を示す。LDへの電圧印加による熱膨張とその拡散で共振器長が変わり、周波数ドリフトが起きる。反射光と参照光間の光路差による遅延でビート信号が現れる。図2は図1のビート振幅の2乗を計算し、パルス幅内で積分した値をプロットしたものである。これによりビート振幅に揺らぎがあっても十分なS/N比で反射光強度を測定できることがわかっている。横軸の波長はC₂H₂スペクトルから波長較正した。

青丸が実験データで、オレンジの実線はガウス関数によるフィッティングで、実験データをよく再現している。図3はTDM・WDMハイブリッドにより検出されたFBG1~9のビート信号を表している。各波長の参照光パルスにはそれぞれ3つの反射光が干渉することで9個のビートが出現する。これはFBGの配列番号順とは異なり、参照光パルスの波長順で並ぶ。つまり1531nm(FBG1,4,7)、1540nm(FBG2,5,8)、1550nm(FBG3,6,9)の順になっている。図4はさらに恒温槽に入れた1531nmのFBG10を加えた10FBGの反射スペクトルを規格化・3次元化したものである。図3に示すビート信号からLabVIEWを用いたプログラムで自動データ取り込み及び反射スペクトル表示が可能となった。ヘテロダイン検出で十分なS/N比を得た上でTDM・WDMハイブリッドによりFBGセンサー多点化が可能となっている。TDM多点化はパルス幅によりFBG間距離が制限されるがWDMを用いた場合、FBG間隔に制限はなくなる。そのためTDMとWDMを併用することでセンサー数増加のみならず高密度配置も可能となることが利点として挙げられる。講演では恒温槽による温度変化を与えた場合の結果も報告する予定である。

[1]黒田、平井、林、第68回応用物理学会春季学術講演会 17p-P03-5,

[2]黒田、浜田、第69回応用物理学会春季学術講演会 23p-P02-2,

[3]黒田、第69回応用物理学会春季学術講演会 22p-D215-6

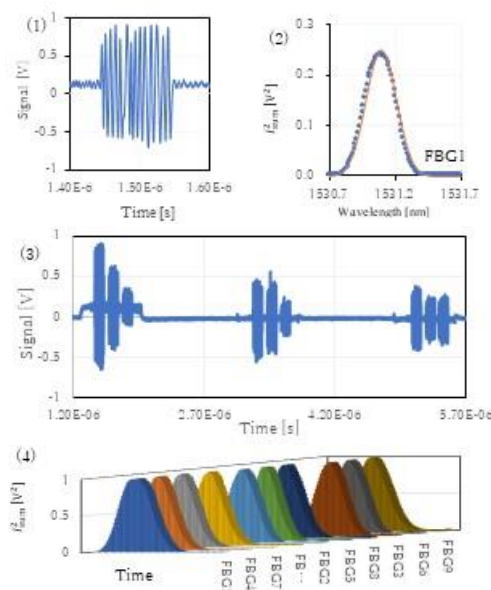


Figure 1 Beat signal, Figure 2 Blue circles: I_{sum}^2 , Orange line: Gaussian fit, Figure 3 10FBG beat signal, Figure 4 Normalized 3D-spectra of 10FBGs

プラスチック光ファイバの透過光スペクトルの電気領域での観測と歪依存性の調査

Electric-domain observation of POF-transmitted light spectrum and its strain dependence

○鷹野 瞭, Hamza Javid, 水野 洋輔 横浜国立大学 大学院工学研究院

ORyo Takano, Hamza Javid, and Yosuke Mizuno Faculty of Engineering, Yokohama National University

E-mails: takano-ryo-cm@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

電気センサにはない多くのメリットを有する光ファイバセンサは、種々の方式が提案されてきた。比較的構成が単純で低廉な歪センシング手法として、光ファイバ中のモード間干渉に基づく手法が挙げられる。モード間干渉を容易に観測するためには、1本の多モード光ファイバ (MMF) を2本の単一モードファイバ (SMF) で挟み込んだ「SMS構造」を用いることが多い[1-3]。この構造では、一方のSMFからの入射光のエネルギーがMMF中で複数の伝搬モードに分配され、もう一方のSMFに出力される際に各伝搬モードが干渉する。結果として、SMS構造に広帯域光を入射すると、透過光のスペクトルに特異な干渉パターンが生じる。ここで、MMFに歪を印加すると干渉パターンがシフトするため、そのシフト量を測定することで歪を推定することができる。なお、MMFとして、プラスチック光ファイバ (POF) を用いると、歪感度が劇的に向上することが知られている[4,5]。

一般に、MMF中のモード間干渉に寄与する各モードの実効的な光路差は比較的短く、透過光スペクトルにはTHzオーダーの構造を有する特異な干渉パターンが生じるため、光スペクトラムアナライザ (OSA) を用いて直接観測する。しかし、OSAは波長掃引速度が比較的遅く、リアルタイムかつ高精度に干渉パターンを計測することは困難であった。干渉パターンの傾斜におけるパワーを利用した高速測定法も提案されているが[6]、パワー変動の影響を強く受けるため安定性が低いという問題があった。

一方で、比較的長いMMFの両端面での反射によって構成されるインライン・マッハ・ツェンダ干渉計の光路差は、MMFの長さの2倍をそのコアの屈折率で割った値となる。結果的に、MHzやGHzオーダーの周期を有する干渉パターンが生じるため、OSAよりも高速動作が可能な電気スペクトラムアナライザ (ESA) を用いて観測することが多い。なお、後者の干渉パターンは、狭線幅の光源でも観測できることが報告されている[7]。

広く知られたマトリクス法に基づき、MMF中のモード間干渉とインライン・マッハ・ツェンダ干渉を併用することで、MMF全長に印加されている歪と温度変化の分離計測が可能であると考えられるが、現時点で実験的報告はない。

そこで本研究では、POFを用いた場合に歪と温度の分離測定を実証するために、POFを含むSMS構造を透過した比較的狭線幅の光をフォトディテクタにより電気信号に変換し、そのスペクトルをESAにより観測した。また、現れた干渉パターンの歪依存性を調査し、リアルタイム歪計測への応用可能性を検証した。さらに、そのパターンがPOFでのインライン・マッハ・ツェンダ干渉に起因するものであるかを検証した。

2. 実験と考察

Fig. 1に示す実験系を用いた。長さ57.3 cm、コア径50 μm 、コアの屈折率1.35の全フッ素化屈折率傾斜型 (PFGI-) POFを測定ファイバとして用いた。このPOFを6.8 mおよび19 cmのシリカSMFで挟み、SMS構造を実装した。光源にはスーパーコンティニューム発生装置を使用した。シード光だけが射出される設定としたため、波長1100 nm

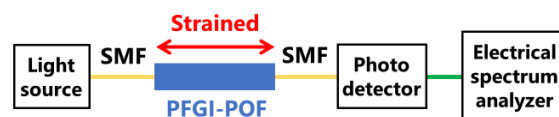


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

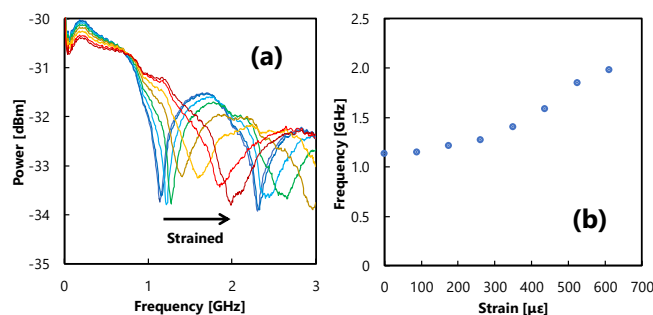


Fig. 2. (a) Measured spectral dependence on strain. (b) Measured strain dependence of dip frequency.

帯の狭線幅レーザと見なすことができる。その出力パワーは約-15 dBmであった。SMS構造を透過した光はフォトディテクタにより電気信号に変換し、そのスペクトルをESAにより観測した。また、POFの全長に対して609 μe までの均一の歪を印加し、その歪依存性を調査した。

POFに歪を印加しないときに観測された干渉パターンがFig. 2(a)の青いカーブである。約1.1 GHzと2.2 GHzに明瞭なディップが現れた。次に、POFに609 μe まで87 μe のステップで歪を印加した際の干渉パターンの変化もFig. 2(a)に示す。歪印加に伴い、1.1 GHz付近のディップは高周波数側に明瞭にシフトした。最後に、1.1 GHz付近のディップ周波数の歪依存性をFig. 2(b)に示す。この歪の範囲では、歪の増加に伴い、ディップ周波数も増加した (線形ではなかった)。歪とディップ周波数が1対1対応しているため、本特性は歪センシングの原理として活用可能であるといえる。なお、印加した歪を解放すると、ディップが初期位置 (約1.1 GHz) に戻ることも確認した。

最後に、本現象がPOFでのインライン・マッハ・ツェンダ干渉に起因するものか考察した。もしそうであれば、その干渉パターンの周期は、POFの長さでコアの屈折率を用いて理論的に計算でき[7]、0.19 GHz程度となるはずである。また、ディップ波長の歪依存性はおおよそ線形となるはずである。これらの理論と実験結果が一致していないことから、本現象はPOFでのインライン・マッハ・ツェンダ干渉ではない可能性が高い。

今後は、実験条件を多様に変化させて挙動を調査し、本現象の起源を解明したい。また、これと並行し、本現象に基づくリアルタイム歪検出の実証も行いたい。

参考文献

- [1] Y. Liu, et al., Appl. Opt. **46**, 2516 (2007).
- [2] S. M. Tripathi, et al., J. Lightwave Technol. **27**, 2348 (2009).
- [3] J. Huang, et al., Opt. Lett. **37**, 4308 (2012).
- [4] G. Numata, et al., IEEE Photonics J. **6**, 6802306 (2014).
- [5] G. Numata, et al., IEICE Electron. Express **12**, 20141173 (2015).
- [6] 佐野 ほか, 2022 年 秋応物, 21p-A406-6.
- [7] Y. Mizuno, et al., J. Lightwave Technol. **32**, 4734 (2014).

偏波保持型低反射率 FBG-FPI を用いた固体振動の測定

Solid Vibration Measurement using Low Reflectivity FBG-FPI on Polarization Maintaining Fiber

防衛大 ○和田 篤、岡野 真人、田中 哲

National Defense Academy, ○Atsushi Wada¹, Makoto Okano, Satoshi Tanaka

E-mail:a24wada@nda.ac.jp

光ファイバをセンサ素子として利用する光ファイバセンシング技術は、通常の電気式センサに比べ、細径、軽量、耐電磁干渉性などのさまざまな優位性を持つ。光ファイバブラッググレーティング (FBG) は特定の波長の光成分のみを反射する光ファイバ型デバイスである。FBG の反射波長はひずみが印加されたり、周囲温度が変化するとシフトする特性を持っており、これを用いて各種物理量を測定することができる。FBG を用いたセンシングは、センシング部位の局在化が可能、構成が簡単、小型化が容易、といった特徴があり、これを利用した、温度、ひずみ、音圧、固体振動といった物理量の計測手段が数多く提案されている。

FBG センサの大きな魅力の一つは一本のファイバ上に複数の FBG を設置する事で多点センシングが可能な事である。従来の多点 FBG の方式は大きく二つに分けられる。一つは設置する FBG の反射波長が互いに異なるように設計し、光の波長方向に信号を分離する方式、もう一つは同じ反射波長の低い反射率を持つ FBG を複数設置し、各 FBG からの反射光が検出器に到着するまでの時間の差で信号を分離する方式である。波長方向に信号を分離する方式は光源の波長帯域で設置可能が FBG の数が制限される。一方、時間差で信号を分離する方式では、可能な最大数の FBG を設置するには配置を等間隔にする必要がある。

光源波長の帯域による制限や、等間隔配置の必要性などの制約がない多点センシングの実現手段として、我々が検討しているのは低反射率の FBG で構成したファブリ・ペロー干渉計 (FBG-FPI) を用いる方法である。同一の反射波長を持つ低反射率の FBG を間隔を空けて二つ設置すると、ファブリ・ペロー干渉計が構成される。FBG-FPI の反射スペクトルは FBG の反射スペクトルに正弦波を乗算した構造を有する。正弦波の周期は FBG 間の間隔によって決まっており、間隔の異なる FBG-FPI を一本のファイバ上に複数設置するとファイバ全体の反射スペクトルの構造は複数の正弦波を足し合わせた構造となる。センサ毎の信号は反射スペクトルをフーリエ解析する事で分離できる。

偏波保持ファイバ上に FBG を書き込むと、互いに直交する偏光成分に対して異なる反射波長を示す。各反射波長のひずみと温度の変化に対する依存係数は僅かに異なる。また、FBG-FPI を構成した場合、正弦波構造の依存係数も同様に偏波成分に対して僅かに異なっている。これを利用することで温度とひずみの同時計測が可能である。

ひずみを高速に測定できれば、固体のひずみの動的変化である固体振動が測定できる。その為には、振動の速度に対して十分短い測定時間で反射スペクトルの読み取りを完了する必要がある。半導体レーザの注入電流を変えると光強度だけでなく、発信波長も変化する。これを利用すると狭い幅ではあるが高速な波長掃引が可能である。

今回は低反射率 PM-FBG-FPI を用いて実際に固体振動を計測した結果を報告する。

折り返し C-CLPG を用いた偏波保持型 EDF σ レーザセンサによる 強度変調型センシングの検討

An Investigation of Intensity-Modulation Based Sensor using
Polarization-Maintaining EDF σ Laser with Double-Pass C-CLPG

防衛大・通信 $\circ$ 田中 哲, 諸永 望, 福嶋 匡謙, 岡野 真人, 和田 篤

Department of Communications Engineering, National Defense Academy of Japan,

$\circ$ Satoshi Tankaka, Nozomi Moronaga, Koken Fukushima, Makoto Okano, Atsushi Wada

E-mail: satoshi@nda.ac.jp, st_nda@ybb.ne.jp

これまで我々は、カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティング (C-CLPG) を波長選択素子およびセンサ素子として用いた EDF レーザセンサを構成し、それらの高性能化について検討を行ってきた。とくに、折り返し C-CLPG を用いた σ 共振器型 EDF レーザ (EDF σ L) を用いた手法[1]では、C-CLPG における複屈折補償効果を実現し、センシング動作時においても安定した発振動作が可能なことを示した。また、さらに偏波保持 EDFA (PM-EDFA) を用いた PM 型 EDF σ レーザ (PM-EDF σ L) を新たに提案し、より高安定な発振動作による高精度レーザ型センサを実現した。本研究では、ここで提案した PM-EDF σ L における発振出力パワーの安定化動作について詳細に調べるとともに、安定した出力パワー特性を活かした強度変調型のセンシング方式について検討を行った。

Fig.1 (a) に本研究で構成した PM-EDF σ L の構成を示す。また、(b) に参照実験のために構成した従来型の EDF σ L を示す。図に示すように PM-EDF σ L では、安定化動作のために共振器内に設置した偏波制御器による事前の調整が不要になっている。基礎実験としてレーザの出力光について、PM-EDF σ L および EDF σ L の発振波長と発振パワーの安定度を調べた結果の一例を Fig.2 (a) および (b) にそれぞれ示す。図から、いずれの結果においても、発振波長については、0.05 nm 未満の変動幅で高い安定度が得られていることが分かる。一方発振パワーにおいては、変動幅は PM-EDF σ L の方が小さく、ここでは 1/3 以下の幅に抑えられ、高い安定度を示すことが分かった。この高い安定度によって、発振波長検出において、波長フィルタを用いた高速な強度変調型のセンシング方式も適用可能なものと考えられる。講演では、強度変調方式によるセンシングの実証実験についても併せて報告する予定である。

文献 [1] K. Fukushima, A. Wada, S. Tanaka, F. Ito : Opt. Ccommun. **58** (7), 127713 (2022.4).

[2] 福嶋, 岡野, 和田, 田中, 伊藤 : 第 83 回秋季応物講演会予稿集, 21p-A406-4 (2022.9).

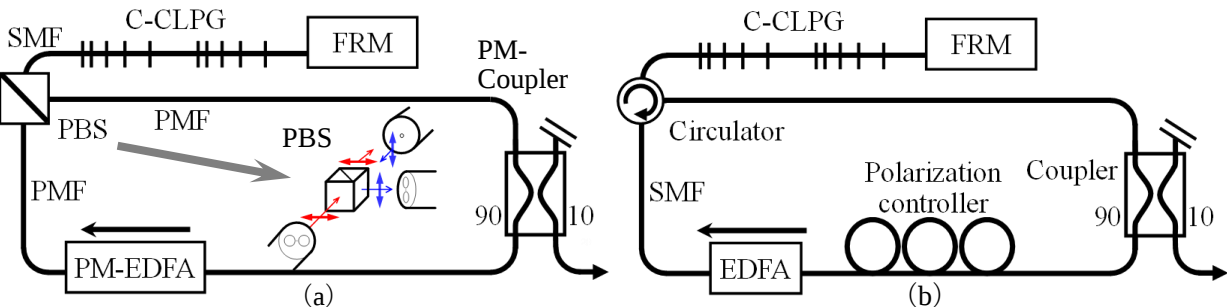


Fig.1. 偏波保持型 EDFA を用いた PM-EDF σ L (a) と、参照実験のために構成した EDF σ L (b) の実験系。

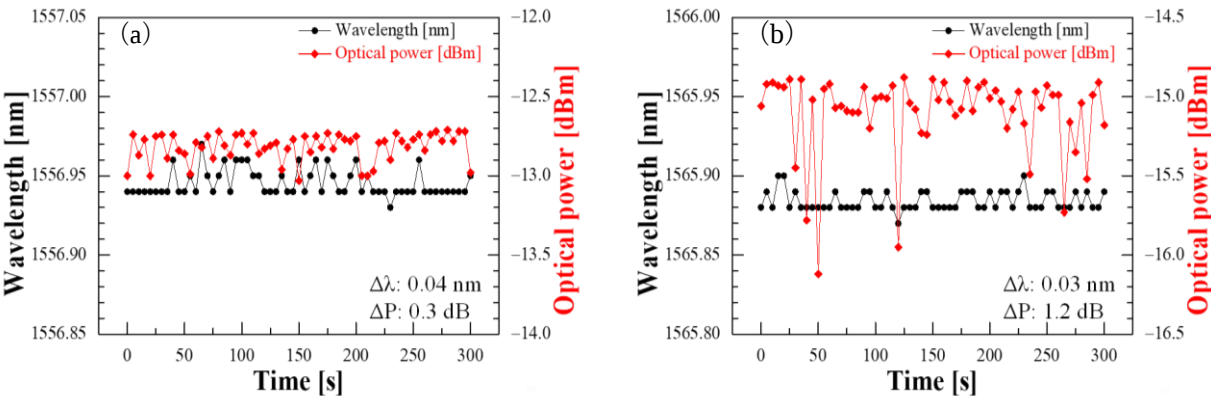


Fig.2. レーザの発振波長 (黒) および出力パワー (赤) の安定度 ; PM-EDF σ L (a), EDF σ L (b).