

モード間干渉スペクトルの傾斜を利用した光ファイバ型温度センシング Slope-assisted temperature sensing based on multimodal interference in optical fibers

○佐野 元基¹、野田 康平^{1,2}、李 ひよん³、中村 健太郎²、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 工学研究院 ²東京工業大学 未来産業技術研究所 ³芝浦工業大学 工学部

O Motoki Sano¹, Kohei Noda^{1,2}, Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Shibaura Institute of Technology

E-mails: sano-motoki-vn@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

ビルの内壁やダム、橋梁、飛行機の翼や風車の羽根など、多様化する構造物の経年劣化や地震による損傷などを監視するために、光ファイバを用いた歪・温度センシング技術の研究開発が推進されている。中でも、比較的構成が単純で低廉な手法として、光ファイバ中のモード間干渉を用いた歪・温度センサが注目されている。

光ファイバ中のモード間干渉を観測するための簡素な構成の一つは、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」である[1-5]。この構造では、一方の SMF から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 に歪や温度変化を加え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や温度を推定することができる。

SMS 構造を初めて提案した Liu ら[1]は、長さ 1.8 m の屈折率傾斜型 (GI) のシリカ MMF を用いて、1550 nm 帯で $-18.6 \text{ pm}/\mu\text{e}$ の歪感度および $+58.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ の温度感度を得た。また、Tripathi ら[2]は、歪・温度感度の絶対値および符号が MMF の構造や材料に大きく依存することを示した。更に、Huang ら[3]は、より大きい歪の測定にも適用できるように、MMF として標準的なアクリル (PMMA) をベースとした長さ 0.16 m プラスチック光ファイバ (POF) を導入し、1570 nm 帯で歪感度 $-2.82 \text{ pm}/\mu\text{e}$ および温度感度 $+93.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ を得た。一方、我々はこれまでに、長さ 1.0 m、コア径 $62.5 \mu\text{m}$ の全フッ素化 GI-POF を用いて、1300 nm 帯で $-112 \text{ pm}/\mu\text{e}$ の歪感度および $+49.8 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ の温度感度を得た (従来よりも桁違いに高感度) [4]。

これらのモード間干渉に基づくセンサは、光スペクトラムアナライザ (OSA) により広帯域光の透過スペクトルを測定し、そのディップやピークの波長から歪や温度を推定していた。しかし、OSA の波長掃引は比較的低速であるため、歪や温度の情報をリアルタイムに取得することは困難であった。

そこで本研究では、モード間干渉スペクトルの傾斜を利用した歪・温度計測法を提案し、基本動作を検証した。本手法は、OSA の波長掃引が不要であるため、原理的にリアルタイム動作が可能である。

2. 原理と実験系

従来、モード間干渉を用いた歪・温度センシングは、専ら SMS 構造を透過した広帯域光のスペクトルの干渉パターンのシフトを直接測定することで実現されていた。しかし、波長掃引を必要とするため、高速測定は困難であった。一方、今回提案する傾斜利用測定法では、OSA のゼロスパン機能を利用し、固定波長におけるスペクトルパワーの時間変化を観測する。波長掃引が不要となり、高速測定が可能となる。

本手法の検証に用いた実験系を Fig. 1 に示す。スーパーコンティニューム光源から出力された広帯域光を 0.5 m のシリカ MMF を含む SMS 構造に入射し、透過光を OSA で観測した。MMF の 0.1 m の区間をホットプレートで加熱し、温度依存性を観測した。得られた温度係数を 5 倍することで、全長を加熱した場合の温度係数が算出できる (モード間干渉では、MMF 全長に 1 の歪や温度変化を与える場合と、MMF の全長の $1/k$ の区間に k の歪や温度変化を与える場合で、透過スペクトルに及ぼす影響は同一であることが知られている[3,5])。

3. 実験結果

1575 nm 付近のディップ付近の透過スペクトルの温度依存性を Fig. 2 に示す。温度の上昇に伴い、ディップは長波長側にシフトした。パワーは減少する傾向にあった (モード間干渉の性質を考えると妥当)。このときのディップ波長の温度依存性はほぼ線形であり、その依存係数は $+98.0 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ であった。温度を下げると、スペクトル形状は元に戻ることも確認した。

次に、37°C における透過スペクトルの傾斜を評価するため、波長で微分した結果を示す (Fig. 3)。極小値と極大値を中心に、その絶対値が 20% 減少するまでの範囲を線形領域と定義した。線形領域はディップの短波長側が 1574.28–1575.71 nm、長波長側が 1577.27–1579.48 nm であった。

続いて、(温度ダイナミックレンジが最も広いと推察される) 各線形領域の中で最も長い波長におけるパワーの温度依存性

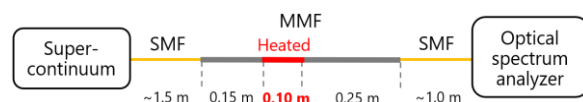


Fig. 1. Experimental setup.

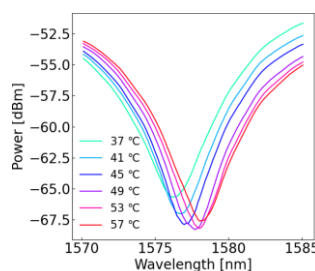


Fig. 2. Temperature dependence of the transmitted spectrum.

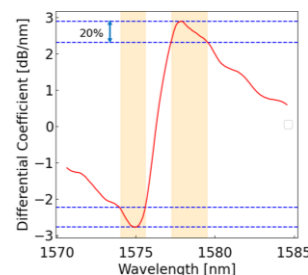


Fig. 3. Differential coefficient of the spectrum (measured at 37°C) at each wavelength. The linear regions are indicated.

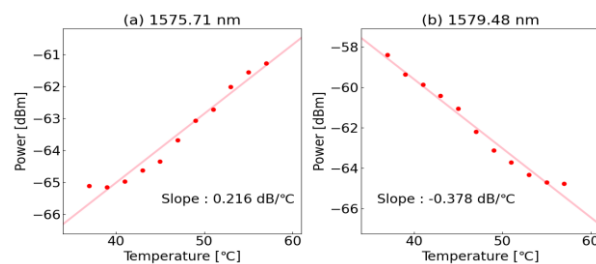


Fig. 4. Temperature dependencies of the spectral power at (a) 1575.71 nm and (b) 1579.48 nm. The solid lines are linear fits.

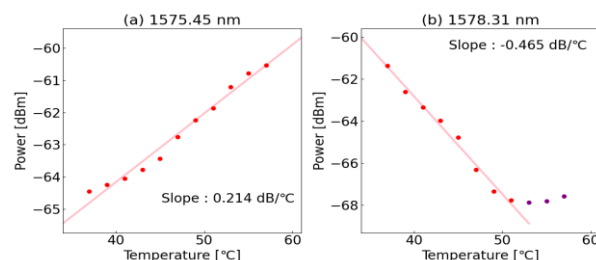


Fig. 5. Temperature dependencies of the spectral power at (a) 1575.45 nm and (b) 1578.31 nm. The solid lines are linear fits (of the red points).

を Fig. 4(a)(b) に示す。どちらも依存性はおおよそ線形となった。両者の依存係数の差は、ディップの中心波長におけるパワー変動に起因すると考えられる。一方、線形範囲の中心波長におけるパワーの温度依存性を Fig. 5(a)(b) に示す。長波長側の Fig. 5(b) では、高温において依存性が線形ではなく、温度ダイナミックレンジが制限されていた。

以上から、適切な波長を選択し、モード間干渉スペクトルの傾斜におけるパワーを測定することで、歪や温度変化に読み替えることが可能であることが示された。本手法は原理的にリアルタイム動作が可能であるため、今後はこれを実証したい。

参考文献

- [1] Y. Liu, et al., Appl. Opt. **46**, 2516 (2007).
- [2] S. M. Tripathi, et al., J. Lightw. Technol. **27**, 2348 (2009).
- [3] J. Huang, et al., Opt. Lett. **37**, 4308 (2012).
- [4] G. Numata, et al., IEEE Photon. J. **6**, 6802306 (2014).
- [5] Y. Mizuno, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 058002 (2018).