短いプラスチック光ファイバ中のモード間干渉の観測と温度依存性の解明

Temperature dependence of modal interference spectra in short plastic optical fibers

東京工業大学 未来産業技術研究所 ○萩原 園子、野田 康平、松谷 夏樹、李 熙永、水野 洋輔、中村 健太郎
FIRST, Tokyo Tech ○S. Hagiwara, K. Noda, N. Matsutani, H. Lee, Y. Mizuno, and K. Nakamura
E-mail: {shagiwara, ymizuno, knakamur}@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

光ファイバを用いた温度センサは、軽量・小型・電磁界耐性などの特長を有する。種々の方式が知られているが、中でも多モード光ファイバ（MMF）中の複数の導波モードの干渉に基づく温度センサは、構成が簡素であり注目を集めている。ここでは、特に MMF の両端を単一モード光ファイバ（SMF）で挟み込んだ「SMS 構造」による温度センサに着目する [1,2]。

Liu ら[1]は、1.8 m の屈折率傾斜型（GI）のシリカ MMF を用いて、1550 nm 帯で+58.5 pm/°C の温度感度を得た。また、Tripathi ら[2]は、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。例えば、シリカ MMF の代わりにプラスチック光ファイバ（POF）を用いることにより、温度感度を向上させることができる。これまでに、Numata ら[3]は、長さ 1.0 m、コア径 62.5 μm の全フッ素化（PF）GI-POF [4]を用いて、1300 nm 帯で 49.8 nm/°C という高い温度感度（絶対値はシリカファイバの 1800 倍以上）を得た。なお、Kawa ら[5]は、SMS 構造を折り畳む構造を提案するとともに、30 cm 以上の POF について、温度感度は POF 長に対して明瞭な依存性を示さないことを明らかにした。センサの小型化の観点から、SMS センサの POF 長をどこまで短くできるかは極めて興味深い。

そこで本研究では、4.0 cm から 0.7 cm までの異なる長さの短い POF を用いて SMS センサを構成し、モード間干渉に特有な透過スペクトルの観測の可否、および、そのディップ波長の温度依存性を調査した。

2. 実験系

POF を用いた SMS 構造による温度センサの実験系を **Fig. 1** に示す。MMF として、コア径 50 μm、クラッド径 70 μm、補強層径 490 μm の PFGI-POF を用いた。超広帯域スーパーコンティニューム光源（帯域 460–2000 nm）の出力を、シリカ SMF を介して POF に入射した。POF の透過光は、再びシリカ SMF を通した後、光スペクトラムアナライザ（帯域 600–1700 nm）でスペクトルを観測した。従来の POF は **Fig. 2(a)**に示すように、フェルールで中心軸を固定した状態でハウジングを装着し、アダプタを介して FC コネクタを備えたシリカ SMF に突合せ接合していた[6]。これに対し、本実験では、**Fig. 2(b)**に示すように、ハウジングを用いずに、短く加工したフェルールと POF をエポキシ樹脂により固定した。その後、この POF とシリカ SMF を突合せ接合することで、mm オーダの短い POF を SMS 構造に組み込んだ。透過スペクトルの温度依存性を測る際は、恒温槽を用いて POF の全長を約 55°C まで加熱した。温度は POF 付近に設置した熱電対温度計により校正した。室温は 20.5°C であった。

3. 実験結果

まず、2.2 cm の POF を用いたときの透過スペクトルを観測した。一般に、数 10 cm 以上の比較的長い POF を用いた場合には、モード間干渉に起因する温度感度の高いディップが約 1300 nm よりも長波長側に観測されていた[3,5]。しかし、2.2 cm の POF の場合は、1026 nm 付近にのみモード間干渉によるディップが観測された（多数のディップが観測されたが、周波数間隔が一定ではなく、モード間干渉でしか説明できない[7]）。その温度依存性を **Fig. 3** に示す。温度の上昇に伴い、ディップはほぼ線形に長波長側にシフトした。その温度依存係数は 0.51 nm/°C であった。

次に、0.7 cm の POF を用いて同様の測定を行った。2.2 cm の場合同様、1300 nm より長波長側ではモード間干渉によるディップが観測されなかった。1000 nm 付近にはディップが観測され、その温度依存性を **Fig. 4(a)**に示す。温度の上昇に伴い、ディップはほぼ線形に短波長側へシフトした。モード間干渉によるディップの温度や歪に対するシフト方向は"臨界波長"[2]により決定されるが、観測波長によっては些細な構造の変化でも逆符号になることが知られている[3]。ディップ波長を温度に対してプロットしたのが **Fig. 4(b)**である。温度依存係数は–0.054 nm/°C であった。他にも、1.1 cm および 4.0 cm の POF を用いた場合についても同様の測定を行った。

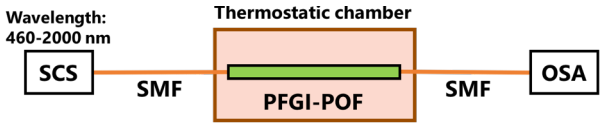

Fig. 1 Schematic of experimental setup. OSA, optical spectrum analyzer; PFGI-POF, per-fluorinated graded-index plastic optical fiber; SCS, supercontinuum source; SMF, single-mode fiber.

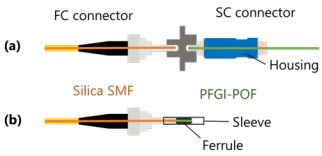

Fig. 2 (a) Conventional connection and **(b)** housing-less connection of silica SMF and PFGI-POF.

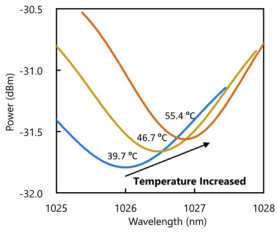

Fig. 3 Spectral dependence on temperature when the POF length was 2.2 cm.

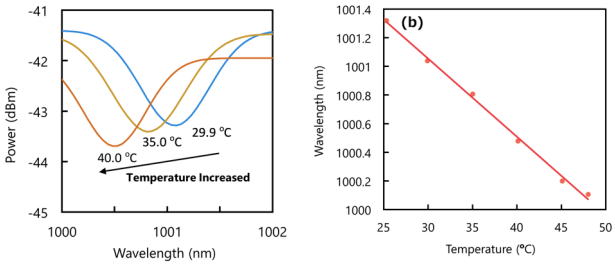

Fig. 4 Measured results when the length of the POF was 0.7 cm. **(a)** Spectral dependence on temperature. **(b)** Dip wavelength dependence on temperature.

4. 議論

0.7 cm という短い POF 中においてもモード間干渉が観測できることを示したのは、（シリカ MMF も含めて）本実験が世界初である。しかし、その温度依存性は、従来の 30 cm 以上の POF を用いた SMS センサよりも桁違いに低かった（0.7 cm の場合にシリカ SMF と同等）。これでは、センサが小型にはなるものの、POF を用いた SMS センサの最大の利点（シリカ SMF の 1000 倍以上の高感度）が失われてしまう。以上から、モード間干渉による温度センサの小型化を目指す場合は、融着が可能なガラス MMF を用いる方が好ましいかもしれない。

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] G. Numata, et al., *IEEE Photon. J.* **6**, 6802306 (2014).
[4] Y. Koike. et al.. *NPG Asia Mater.* **1**. 22 (2009).
[5] T. Kawa, et al., *IEICE Electron. Express* **14**, 20161239 (2017).
[6] Y. Mizuno, et al., *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010).
[7] Y. Mizuno, et al., *J. Lightwave Technol.* **32**, 4132 (2014).

© 2019年 応用物理学会