

BOF の温度及び圧力印加による反射スペクトルシフト

Reflection Spectrum Shift caused by Temperature and Pressure

斧田 誠一
Seiichi Onoda

中野 正行
Masayuki Nakano

黒木 保
Tamotsu Kuroki

長瀬 亮*
Ryo Nagase*

(株)渡辺製作所
WATANABE CO.,LTD.

*日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所
NTT Photonics Laboratories, NTT Corporation

1. まえがき

筆者らは先にファイバ端面に多層膜 BPF(Band Pass Filter)を直接形成した BOF(BPF On Fiber-end)を反射センサとして、外部物理量に応じて変化する反射スペクトルシフトを、BPF の中心波長を挟む2つの波長における反射率比から割り出す新たなファイバセンシング方式を提案した¹⁾。

今回実際に BOF センサを試作し、温度による反射スペクトルシフトを評価したところ、FBG に比べて大きな波長シフトが得られた。ついで BOF の膜厚方向に圧力を加えたときの反射スペクトルを求めたところ、ここでも大きな波長シフトが得られることを見出した。併せて報告する。

2. BOF の試作

図1のように単一モードファイバのフェルル端面に、SiO₂/TiO₂による2キャビティ誘電体多層膜BPFをイオンアシストにより蒸着した。

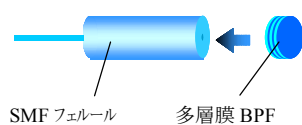


図1 BOF の形成

図2(a)(b)は平面研磨SiO₂フェルルおよび球面研磨ZrO₂フェルルのBOF外観である。図3にBPFの斜断面写真を示す。図4はこれらによる温度プローブの外観である。

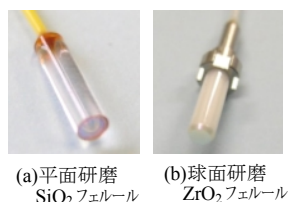


図2 試作 BOF 外観

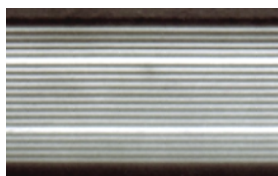


図3 BOF 斜断面

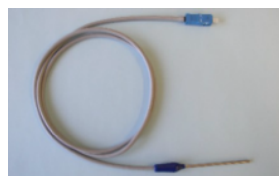


図4 温度プローブ

3. 反射スペクトルの温度特性

ZrO₂フェルル BOF の反射スペクトル温度特性を求めた。図5に-20℃から50℃までの温度範囲を5℃刻みで振ったときのスペクトルを重ねて示す。図6は温度に対する半値中心波長の変化を求めたものである。温度上昇とともに12pm/Kの割合で長波長側へシフトしていることがわかる。この波長シフト量は平均的なFBGの温度感度(10pm/K)に比べて2割大きく、

フィルタ設計時のシミュレーション値とほぼ一致している。

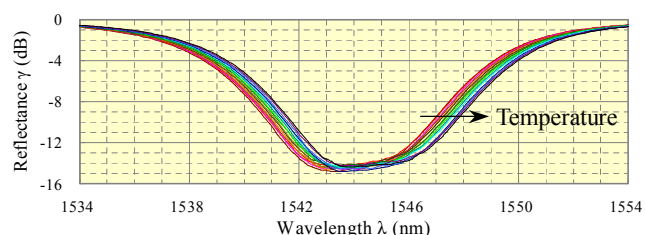


図5 BOF 反射スペクトルの温度依存性 (-20~50℃)

つぎに、ある規準温度において反射スペクトルの中心波長を挟む2つの波長における反射率の動きに注目すると、両者は温度変化に応じて±プッシュプルに変化するから、その比を求めることによってスペクトルシフト量を安定に割り出すことができる²⁾。

上記データをもとに、室温において反射スペクトルの波長勾配が最急となる2つの波長(1540.7/1547.9nm)を設定し、両波長における反射率比ζ(dB)を求めた結果を図7に示す。温度に対してζがリニアに変化していることがわかる。温度勾配は0.08dB/Kであった。すなわち反射率比の検出感度が0.08dB以下であれば、±1Kの温度センシングが可能であることを示している。

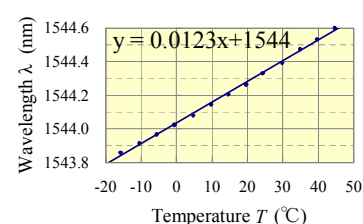


図6 BOF 反射率半値中心波長の温度依存性

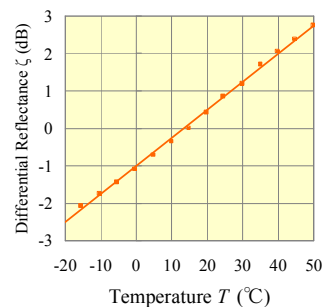


図7 2波長反射率比の温度依存性

4. 反射スペクトルの圧力特性

BOF の成膜材料がTiO₂/SiO₂といった弾性誘電体であることから、膜厚方向に圧力が印加されると、弾性変形によって多層膜の光路長が変化し、温度の場合と同様反射スペクトルが

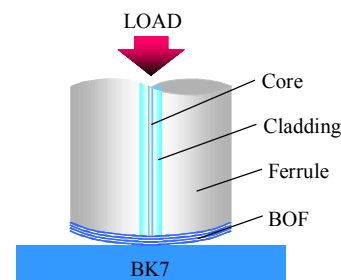


図8 BOF 圧力特性の測定

シフトするものと予想される。

図 8 のように、球面研磨 ZrO₂フェルールの BOF を BK7 板に押し当てて荷重(0~34N)を加えたときのスペクトル変化を求めた。図 9 に結果を示す。図 10 は半値中心波長の変化である。2桁(0.1~10N)の荷重変化に対して 3nm 程度波長がシフトしている。

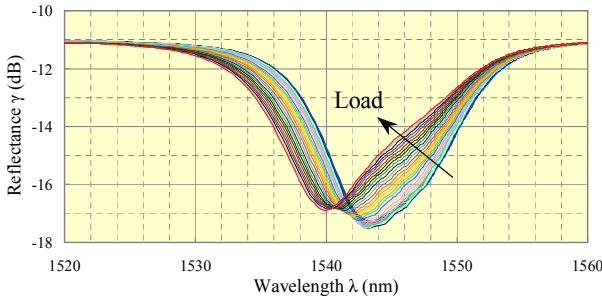


図 9 BOF 反射スペクトルの荷重依存性 (0~34N)

先の温度センシングと同じようにして、荷重 8(N) 時のピーク値の半値をあたえる 2 つの波長 (1539/1547nm) を設定したときの荷重対反射率比 ζ (dB) を求めたのが図 11 である。BOF によって荷重(歪)の検出が可能であることがわかる。同図で荷重の小さい領域で反射率比 ζ が寝ているのは測定器具の摩擦による影響である。

ここで上記特性を Hertz の弾性接触論によって検証してみよう。圧力ないし荷重によって膜厚が圧縮されるとすれば、BOF の波長シフト率は弾性圧縮率(歪)に等しいと考えてよいはずである。このとき波長シフト Δλ は次式であたえられる。

$$\begin{cases} \Delta\lambda = \varepsilon\lambda_0 = \frac{3K^{2/3}W^{1/3}\lambda_0}{2\pi E_A R_A^{2/3}} & \dots\dots\dots(1) \\ \frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right) & \dots\dots\dots(2) \end{cases}$$

ここで、E_A、E_B および ν_A、ν_B はファイバ材 SiO₂ あるいはフェルール材 ZrO₂ および BK7 のヤング率とポアソン比、R_A はファイバ端面の曲率半径、W は荷重、ε は歪である。上式より、スペクトルシフトを大きくするには、接触子材料のヤング率とポアソン比を大きくし、接触半径を小さくすればよいことがわかる。

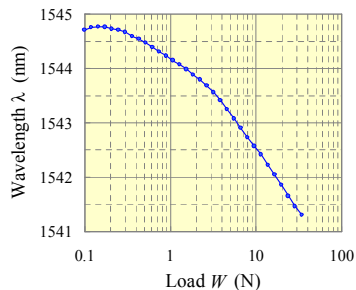


図 10 BOF 反射率半値中心波長の荷重依存性

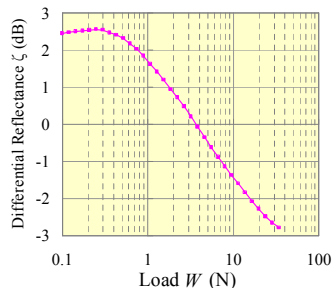


図 11 2 波長反射率比の荷重依存性

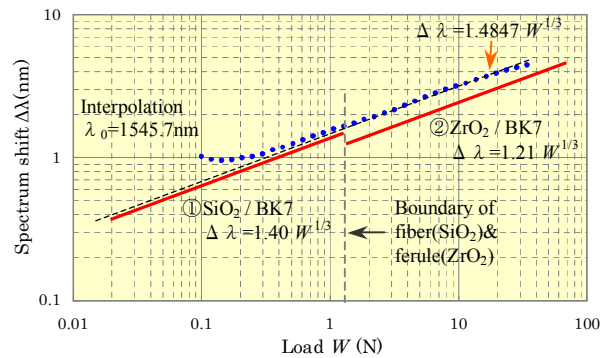


図 12 荷重に対する波長シフト特性

図 12 は荷重対波長シフトの関係を示したもので、プロットは実測値、実線は計算値である。ただし波長シフトは直接には求められないので、荷重に対する中心波長変化が Hertz の 1/3 乗則にフィットしている領域のデータをもとにゼロ荷重時の波長を内挿し、そこからの偏差として求めた。

計算直線①は荷重による接触面積がファイバ断面内の場合、直線②は ZrO₂ フェルールに大きくはみ出した場合の特性である。計算による両者の境界は接触面積がファイバ断面と等しくなるときで、荷重 1.2N に相当する。図のように計算と実測はよく一致している。荷重 0.2N 以下で波長シフトが寝てくるのは摩擦の影響である。

圧力による波長シフトの要因として光弾性効果による屈折率の変化も考えられるが、上記のように Hertz 理論で非常によく説明できることから、その影響は無視できる程度と考えてよいだろう。

5. あとがき

誘電体多層膜により形成された BOF の温度および印加圧力に対するスペクトルシフト特性を実測評価した。温度に対しては 12pm/K と通常の FBG より大きな温度感度が得られた。膜厚方向への印加圧力に対しては、2 桁の荷重変化に対して 3nm の波長シフトが観測された。荷重と波長シフトの関係は Hertz の弾性接触論でよく説明できる。以上のことから BOF が新たな温度および圧力センサとして可能性をもつことが実証された。

<謝辞>

BOF の試作で協力頂いた光伸光学工業(株)技術部遠藤尚マナーに感謝します。なお本研究の一部は 2005 年の経産省地域新生コンソーシアムの中でなされたものである。併せて謝意を表したい。

<参考文献>

- 1) 「2 波長プッシュプル反射計測方式 (DWPR) の提案」 斧田、塚本、荻野、丸山、山下 2007.3 信学総大 C-5-13
- 2) 「BOF によるファイバ温度センシングの提案」 斧田、井上 2007.3 信学総大 C-5-14
- 3) 「BOF 反射スペクトルの温度依存性」 斧田、中野、黒木、井上 2007.8.23 信学会 EMD 研資
- 4) 「BOF 反射スペクトルの膜厚方向圧力依存性」 斧田、黒木、中野、井上、長瀬 2007.8.23 信学会 EMD 研資