

光ファイバーは通信媒体として現在広く用いられていますが、センサーに利用する際にも、低損失で遠隔計測が可能、電磁ノイズの影響を受けにくい、耐腐食性・耐絶縁性に優れている、といった電気的なセンサーに比べて有利な特長があり、さまざまな分野で応用されるようになってきました¹⁾。とりわけ光ファイバーブラッググレーティング (FBG) を用いたセンサーは、センシング部位が小型で多点計測に好適、伝送用の光ファイバーを含め構造物への埋め込みが可能、波長分割方式による多重化が容易、といった利点があります²⁾。最近では、自己診断および自己制御機能をもつ建築構造物 (スマートストラクチャー) や複合材料 (スマートマテリアル)、および部材や構造体などの成形過程を監視して最適制御を行う製造技術 (スマートマニュファクチャリング) などにおいて、モニタリングへの応用が注目されており、実用化されつつあります。本稿では、この FBG センサーについて紹介します。

屈折率変化による光ファイバーへのグレーティングの形成は、1978 年 Hill らによって最初に実現されました³⁾。コアに GeO_2 が添加されている通常の光ファイバーにアルゴンレーザー光 (488 nm) を入射させると、この定在波によって屈折率の周期構造が誘起されることが報告されています。後に、この光感受性は二光子吸収を介していることが明らかになり、1989 年には、色素レーザーの第二高調波 (244 nm) による干渉縞を光ファイバーの側方から照射して光ファイバーの任意の部位にグレーティングを書き込むという実用的な方法が発表されました⁴⁾。現在では、KrF エキシマーレーザー (248 nm) やアルゴンレーザーの第二高調波 (244 nm) を書き込み用の光源とし、位相マスクによる干渉パターンを用いる手法が一般的となっています。

図 1 に FBG の模式図 (a) と典型的な反射および透過スペクトル (b) を示します。図に示されるように、この FBG ではブラッグ波長とよばれる特定の波長 λ_B で強い反射を示し、この波長近傍の光をほとんど透過しません。また、変調の周期を Λ 、コアの実効屈折率の平均値を n_{eff} とすると、 λ_B は $2n_{\text{eff}}\Lambda$ で与えられます。例えば、通常の光ファイバー

($n=1.45$) に書き込まれる C-band 帯 (1530~1565 nm) 用の FBG では、約 $0.5\ \mu\text{m}$ の周期で数 cm の範囲にわたってグレーティングが形成されており、反射帯域幅が 0.1 nm 程度の狭帯域波長フィルターが実現可能です。また、特殊な光ファイバーを用いたり、屈折率の周期構造に変調を加えたりして、さまざまな特性をもつ FBG が開発されています。

FBG をセンサーに应用する際には、ひずみや温度に依存して Λ や n が変化し、その結果 λ_B がシフトすることを利用しています。なお、ひずみに対しては Λ の変化が支配的で、温度では n の温度依存性が支配的になります。通常の光ファイバーに書き込まれた FBG では、波長シフトのひずみに対する感度は C-band 帯で約 $1.2\ \text{pm}/\mu\text{strain}$ ($1\ \mu\text{strain}$ は 10^{-6} のひずみを示す)、温度に対しては $0.1\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 程度です。また、実際のセンサーでは、ひずみや温度のほか、何らかの手段を用いて、変位、曲げ、圧力、加速度、傾斜などの物理量を FBG へのひずみに変換することでセンシングを行います。

FBG センサーにおいてブラッグ波長を検出する一般的な手法は、分光機器によって FBG の反射スペクトルを直接測定してそのピーク波長を求める方式です。光源に広帯域光を用いて、回折格子や波長可変フィルターにより計測を行います。一般的に波長分解能は数 pm ですが、さらに高い分解能を得る方法として、スペクトルデータに曲線適合や微分などの演算処理を施す手法も行われています。

また、この方式では複数の FBG を用いたセンサーの多重化も容易で、ブラッグ波長の異なる FBG を連ねたセンサーアレイを構成する、さらに、複数のセンサーアレイを光スイッチなどで切り換える、という方法で多点計測が可能です。また、最近では高速の波長可変フィルターや波長走査レーザーが開発されており、FBG 単体でのセンサーでは、実時間で数 kHz の振動検出が達成されています⁵⁾。

このほか、波長フィルターなどを用いて間接的にブラッグ波長を検出する手法もよく使われています。例えば、ブラッグ波長の近傍に線形なスペクトル傾斜部をもつエッジフィルターを用意し、FBG で反射した光の強度をこのフィルターを通して検出

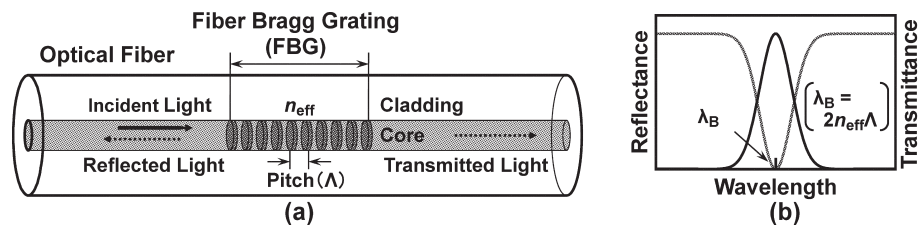


図1 (a) ファイバーブラッググレーティング (FBG) の模式図, (b) FBG の反射および透過スペクトル。

することによって、ブラッグ波長のシフト量がわかります。この手法では、エッジフィルターの代わりに、アレイ導波路回折格子 (AWG) を用いて FBG を多重化する手法や、センサー用とフィルター用の 2 つの FBG を用いて温度補償機能をもたせたものが提案されています。これらの方式は一般に、分光的な手法に比べて分解能が低いこと、多点化する場合に FBG の数だけフィルターを用意する必要があること等の欠点がありますが、応答が速いので振動など動的な被測定量に対しては非常に有利です。実際に、超音波アクチュエーターと組み合わせ、構造体の損傷を検知するアクティブな自己診断システムに応用されています⁶⁾。

筆者らは、FBG の反射スペクトルの傾斜部にレーザーなどの狭帯域光を同調させると FBG を反射した光の強度がブラッグ波長のシフトに伴って変化することを利用して超音波センシングを行っています。この方式では、FBG による反射光だけでなく透過光も利用できるため柔軟なシステム構成が可能であること、FBG の急峻なスペクトルを使うことで高感度な検出ができること、高強度のレーザーを用いることによって高い SN 比が期待できることなどの長があります。この方法により、 $0.1 \mu\text{strain}$ オーダーのひずみ振幅の振動波形や水中音響による音圧波形の実時間計測が可能になっています。しかしながら、温度変化に対しては光源の波長を制御するなどして何らかの補償を行う必要があること、多点計測を行うためには多波長の光源が必要であることなどが問題点となっており、現在これらの課題に取り組んでいます⁷⁾。

このほか、FBG センサーの新しい方式として、光波コヒーレンス関数の合成法 (SOCF) を用いて、

同一のブラッグ波長をもつ FBG の多重化を実現したものが報告されています⁸⁾。また、FBG そのものに非一様に分布するひずみを高い空間分解能で測定する方法として、SOCF を適用したものや周波数領域反射測定法 (OFDR) を適用したものが提案されており、分布型の FBG センサーとして期待されています。

以上、FBG センサーについて簡単に紹介しましたが、FBG センサー以外にもさまざまな方式による光ファイバーセンサーが実用化されています¹⁾。特に最近ではモニタリング技術への需要が高まっており、道路、橋梁、トンネル、ビルなどの施工や維持管理に利用されています。また、繊維強化複合材に埋め込むことによって、建築資材や航空機および人工衛星に用いる構造体の実装されつつあります。近年よく聞かれるようになったキーワード「安全・安心な社会」を実現する上でも、光ファイバーセンサーが幅広く利用されることを期待しています。

(防衛大学校 田中 哲)

文 献

- 1) J. M. López-Higuera (ed): *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology* (John Wiley & Sons, New York, 2002) pp. 1-23.
- 2) A. D. Kersey *et al.*: *J. Lightwave Technol.*, **15** (1997) 1442.
- 3) K. O. Hill *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 647.
- 4) G. Meltz *et al.*: *Opt. Lett.*, **14** (1989) 823.
- 5) T. Saitoh *et al.*: *Proc. SPIE*, **5855** (2005) 146.
- 6) N. Takeda *et al.*: *Compos. Sci. Technol.*, **65** (2005) 2575.
- 7) S. Tanaka *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 4588.
- 8) K. Hotate *et al.*: *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 2541.
- 9) H. Igawa *et al.*: *Proc. SPIE*, **5855** (2005) 547.