

センシング用ファイバーグレーティング

山内 良三・和田 朗*

ファイバーグレーティング(以下FG)は、光ファイバーの伝搬モードの実効屈折率をファイバー軸方向に周期的に変化させて光ファイバー内に回折格子を形成したファイバー型光デバイスで、光ファイバーを伝搬する特定波長の光を選択的に阻止あるいは反射させたり、他の伝搬モードに結合させたりする機能を有する。屈折率変化をもたらす手法としてこれまでいくつかの方法が提案されているが、近年では、UV光照射で誘起される屈折率変化(photo sensitivity)を利用したFGが注目を集めており、その応用研究が急速に進展している¹⁾。このUV光誘起屈折率変化を利用したFGは、機械加工が不要でUV光を照射するだけで光ファイバーのコア中にグレーティング形成できるため、製造が容易、信頼性が高い、小型化できる、高い波長選択性が得られる等の利点があり、センシング用途を含め、多くの分野への適用が期待されている。本稿では、光誘起屈折率変化型FGの製法、特性とそのセンサー分野への応用について概説する。

1. ファイバーグレーティングの製造方法

通常の石英系光ファイバーはコアドーパントとしてゲルマニウム(Ge)を用いている。このGe添加石英コアに波長240 nm近傍のUV光を照射すると屈折率が上昇することが知られている²⁾。そこで空間的に周期的に変化するUV光パターンを光ファイバーの側面から照射すると、光ファイバーコア中にUV光強度パターンに対応した周期的な屈折率変化を形成することができる。

FGはグレーティングピッチの観点から2種類に大別でき、1 μm以下の短い周期をもつラグ反射型ファイバーグレーティング(FBG)と数百μmの周期をもつ長周期ファイバーグレーティング(LPG)があるが、これらは一般に異なる露光方法で作製される。

FBGのグレーティング作製には、通常、干渉露光法²⁾および位相マスク法³⁾が用いられる。干渉露光法では、UVレーザー光をいったん2つの光路に分割して再度重ね合わせ

たときに得られる干渉縞を用いる。位相マスク法では、最終的にファイバーに形成するグレーティングの倍のピッチをもつ位相マスクと呼ばれる石英基板回折格子を用いる。位相マスクに近接してファイバーを配置し反対側からUVレーザー光を入射させると、位相マスクで発生した+1次および-1次の回折光がファイバーが配置された領域で干渉パターンを形成する。

LPGのグレーティング露光には、振幅マスク法⁴⁾、ポイント露光法⁵⁾等が用いられる。振幅マスク法では、グレーティングと同一周期のスリットの振幅マスクを通してUV光を照射してグレーティングを形成する。ポイント露光法では、数十～数百μmに集光したレーザービームを用いて、ファイバーコアにグレーティングを1本ずつ書き込んでいく。

UV光により誘起した屈折率変化は熱的に不安定な成分を含んでおり、そのままでは屈折率変化が経時に減少して特性が劣化する。しかしこの問題は、FG露光後に、適切な温度エージング⁶⁾を施して不安定な屈折率変化成分を取り除くことにより、実用上全く問題のないレベルに軽減することができる。

2. FBGのセンサー応用

FBGは、導波モードの実効屈折率を n_{eff} 、グレーティングピッチを Λ としたとき、 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ を満たすラグ波長 λ_B の光を選択的に反射する。 λ_B は n_{eff} および Λ がそれぞれ歪み依存性、温度依存性をもつことから、グレーティングにかかる歪み、温度に応じて変化する。FBGを用いたセンサーでは、通常、この λ_B の変化を検出することによって、歪みや温度の計測を行う。この方式では、計測量が直接波長変化に変換されるため、検出精度が光源のパワー変動や経路損失の変動に影響されないという利点がある。歪みによる波長変化は、物理的なグレーティングピッチの広がりおよび光弾性効果による屈折率変化に起因するもので、石英系光ファイバーを用いたFBGの歪み感度は1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 程度である。一方、温度による波長変動は、ファイバーガラスの熱膨張および屈折率の温度変動に起因し

(株)フジクラ光電子技術研究所 (〒285-8550 佐倉市六崎 1440)

* E-mail: akiwada@fujikura.co.jp

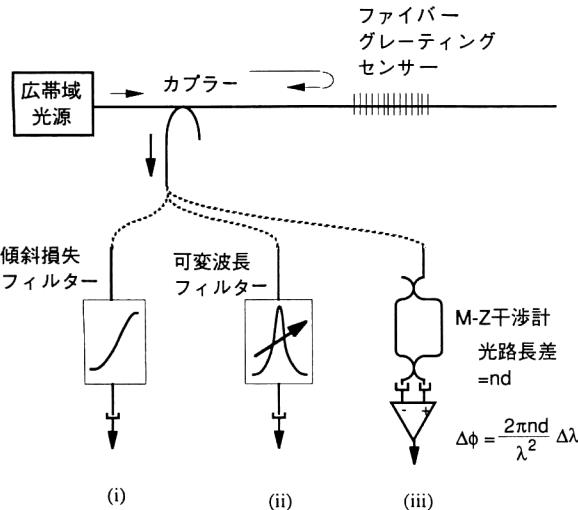


図1 ファイバーグレーティングセンサーの波長変化検出方法。

ており、温度感度は $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 程度である。そこで、 $1 \mu\epsilon$ あるいは 0.1°C の変化を検出するためには 1 pm の分解能を有する検出系が要求される。この波長分解能を実現するためのさまざまな波長検出方法が提案されている⁷⁾。代表的なものとしては、(i) FBG の波長変化範囲をカバーする広帯域光源からの光を FBG に入射させ、FBG からの反射光を波長に依存して損失が変化する広帯域フィルターを通過させて検出し、その強度変化から波長変化を求める方法⁸⁾、(ii) 広帯域フィルターの代わりに狭帯域の可変波長バンドパスフィルターを用いて波長変化を検出する方法⁹⁾、(iii) マッハ・ツェンダー干渉計を用いて位相変化を検出する方法¹⁰⁾などがある(図1)。

FBG を用いた、温度-歪み同時計測センサーも提案されている。基本的には、温度依存性、歪み依存性の異なる 2 つのセンサーの波長変化 $\Delta\lambda_{B1}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}$ を計測し、これらと温度、歪みの関係から得られる連立方程式を解くことにより温度、歪みを分離算出する¹¹⁾。独立した 2 つの FBG を用いる代わりに、偏波面保存ファイバーの直交する 2 つの偏波モードを用いる方法¹²⁾、後述する LPG の異なる 2 つのクラッドモード結合ピークを利用する方法¹³⁾なども提案されている。

3. LPG のセンサー応用

Λ を数百 μm とすると、光ファイバーのコアを伝搬する光の中で、 $\lambda = (n_g - n_{cl})\Lambda$ を満たす波長 λ の光を、コアを伝搬する導波モードからクラッドモードに結合させることができる。ここで n_g は導波モードの実効屈折率、 n_{cl} は結合するクラッドモードの実効屈折率である。クラッドモ-

ドに結合した光は、光ファイバーの被覆樹脂に吸収されるなどして速やかに減衰するため、結果として LPG は波長 λ 近傍の光に損失を与える透過阻止型の無反射フィルターとして機能する。このため、LPG を用いたセンサーでは透過スペクトルを用いることになる。クラッドモードは複数存在するため、透過スペクトルには結合するクラッドモードに対応した複数のピークが存在する。これらの損失ピークの温度依存性、歪み依存性は、結合するクラッドモードの電界分布が違うため、コアやクラッドの組成や屈折率分布構造によって変化する。大きな温度、歪み依存性をもつよう設計された LPG では、FBG と比べて、約 1 衍大きな温度、歪み感度を得ることができる。また、ファイバ一屈折率分布構造、コアガラスの組成などを適切に選ぶことによってほとんど温度依存性をもたない LPG も報告されている^{14,15)}。こうした LPG を用いれば、温度の影響を受けない歪みセンサーが実現可能である。

プラグ反射型ファイバーグレーティングおよび長周期ファイバーグレーティングのセンサー応用について述べた。UV 光誘起型のファイバーグレーティングは製造が容易で、構造も小型でシンプルなため、センシングプローブとして今後ますます発展していくと期待される。

文 献

- 1) K. O. Hill, et al.: J. Lightwave Technol., **15** (1997) 1263-1276.
- 2) G. Meltz, et al.: Opt. Lett., **14** (1989) 823-825.
- 3) K. O. Hill, et al.: Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 1035-1037.
- 4) K. O. Hill, et al.: Electron. Lett., **27** (1991) 1548-1550.
- 5) K. O. Hill, et al.: Electron. Lett., **26** (1990) 1270-1272.
- 6) T. Erdogan, et al.: J. Appl. Phys., **76** (1994) 73-80.
- 7) A. D. Kersey, et al.: J. Lightwave Technol., **15** (1997) 1442-1463.
- 8) S. M. Melle, et al.: IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 516-520.
- 9) D. A. Jackson, et al.: Opt. Lett., **18** (1993) 1192-1194.
- 10) A. D. Kersey, et al.: Electron. Lett., **28** (1992) 236-238.
- 11) M. G. Xu, et al.: Electron. Lett., **30** (1994) 1085-1087.
- 12) M. Sudo, et al.: Conf. Tech. Dig. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, OWC7 (1997) pp. 170-173.
- 13) H. J. Patrick, et al.: IEEE Photonics Technol. Lett., **8** (1996) 1223-1225.
- 14) J. B. Judkins, et al.: Conf. Tech. Dig. Optical Fiber Communication '96, Post Deadline Paper PD-1 (1996).
- 15) K. Shima, et al.: Conf. Tech. Dig. Optical Fiber Communication '97, Paper FB2 (1997).

(1998 年 3 月 3 日受理)