

ファイバグレーティングの作製とデバイス応用

井 上 享

Fabrication Technique and Application of Fiber Grating

Akira INOUE

Fiber gratings, which consist of refractive index gratings written in optical fibers by UV-induced refractive index change, are attractive device in DWDM transmission systems and optical sensing systems. Fiber gratings are categorized according to its grating period. Fiber gratings with grating period of wavelength order are called short period grating and function mainly as reflection filter. The other type of fiber gratings with grating period of several hundred microns is called long period grating and functions mainly as wavelength selective transmission loss filter. Mechanism of refractive index change, fabrication process of fiber gratings and its characteristics and applications are reviewed.

Key words: fiber grating, UV-induced refractive index change, Bragg, optical filter, passive optical component

ファイバグレーティング (FG) はファイバコアに周期的な屈折率変化を形成した光デバイスで、屈折率変化の周期に応じて短周期ファイバグレーティング (ファイバブラッググレーティング: FBG) と長周期ファイバグレーティング (LPG) に大別される (図 1)。FBG は屈折率変化の周期が波長オーダーであり、ブラッグ反射の原理により特定波長の光を反射する働きがある。また、LPG は屈折率変化の周期が数十～数百 μm と大きく、コア伝搬光をクラッド伝搬光にモード変換することにより特定波長の光を遮断する働きがある。本稿では、これらファイバグレーティングに関して、その製法、特性および応用例について解説する。

1. 紫外光誘起屈折率変化

GeO_2 を添加したシリカガラスには、スス体を焼結する際に GeO_2 の解離が生じ、酸素不足型の欠陥吸収帯が 240 nm 付近に生じる。最近の研究では 240 nm 帯吸収は、酸素が不足する数が 1 個か 2 個かで 2 種類に分類され、それぞれ NOMV, NODV (neutral oxygen mono (di) vacancy) という略称をもつ。この吸収帯と同じ波長の紫外線を照射すると、前者は結合が切断され、 GeE' 欠陥中心となり吸収帯が 200 nm 近辺に発生し、このときの吸収スペクトルの

変化とともに Ge 添加石英ガラスの屈折率が上昇する。ただし、紫外光照射で生じる屈折率変化量は前記 GeO_2 起因欠陥吸収の変化だけでは説明できないため、欠陥部の切断再配列でガラス密度が上昇し屈折率が変化するという機構も提唱されている¹⁾。屈折率変化量が大きいほど効率のよいグレーティングデバイスが得られるが、紫外光誘起屈折率変化の増感を図るために、ファイバ中に水素を高濃度で溶解させる手法も開発されている。この場合、水素の介在により、式 (1) に示す反応が生じているものと考えられる²⁾。



また、Ge と B (ホウ素) を共添加することでも屈折率変化の増感作用が得られることが明らかになっている³⁾。これらの増感手法を用いた場合、およそ 1×10^{-2} の屈折率変化量が得られる。屈折率変化を生じさせるための紫外光源としては、KrF エキシマーレーザー ($\lambda = 248 \text{ nm}$)、アルゴンイオンレーザー (2 倍波: $\lambda = 244 \text{ nm}$)、YAG レーザー (4 倍波: $\lambda = 266 \text{ nm}$)、銅蒸気レーザー (2 倍波: $\lambda = 255 \text{ nm}$) などが用いられる。

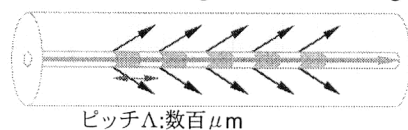
2. 屈折率熱緩和

紫外光照射で生じた屈折率変化は完全に安定ではなく、

短周期ファイバグレーティング(Fiber Bragg Grating:FBG)



長周期ファイバグレーティング(Long Period Fiber Grating:LPG)



特定波長(λ_P)近傍の光を放射: $\lambda_P = \Lambda(n_{コア} - n_{クラッド})$

図1 光ファイバグレーティングの原理と種類.

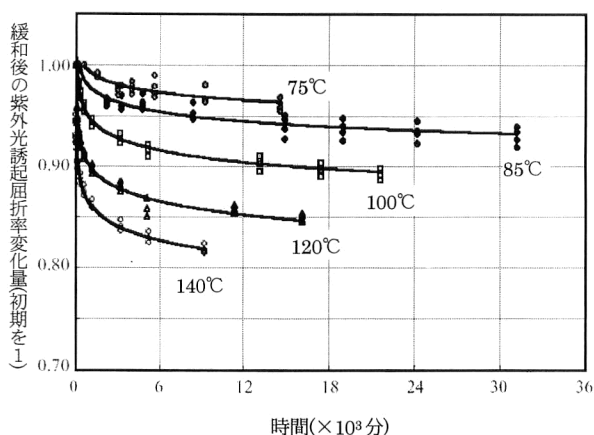


図2 紫外光誘起屈折率変化の熱緩和.

熱による緩和が観測される. 図2に75~140°Cにおける紫外光誘起屈折率変化の熱緩和挙動を示す. 初期に急激に緩和が生じ, その後安定な状態に移行することがわかる. これらの緩和曲線は式(2)に示すべき型関数でよく近似できる.

$$\eta = \text{緩和後屈折率上昇量/初期屈折率上昇量} = A \cdot t^{-\alpha} \quad (2)$$

長期的に安定した品質を保証するために, 紫外光照射後のファイバグレーティングは高温下で加速エージング処理を行われるのが一般的である.

3. ファイバグレーティングの作製方法

3.1 短周期ファイバグレーティング (FBG)

FBGは屈折率変調の周期(格子ピッチ)が光の波長オーダーと微細なため, 紫外光の干渉縞をGe添加コアファイバーに照射することで作製する. FBGの製造には, 二光束干渉法⁴⁾・位相格子法⁵⁾が主として用いられる(図3). 二光束干渉法では, 干渉角と格子ピッチの関係は式(3)で表され, 干渉角の制御により任意ピッチのグレーティングが作成できる.

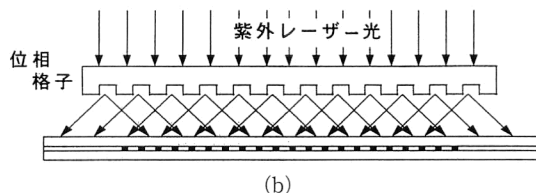
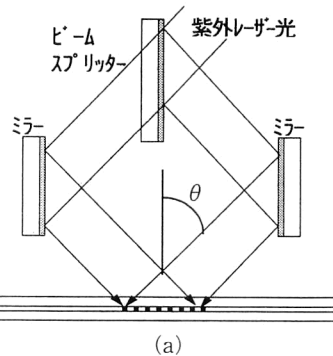


図3 FBGの作製方法. (a) 二光束干渉法, (b) 位相格子法.

$$\text{格子ピッチ} = \text{紫外光波長} / \{2 \cdot \sin(\text{干渉角 } \theta)\}$$

(3)

一方, 位相格子法の利点は製造再現性がよいことである. 位相格子は, 石英基板の表面に凹凸を形成した位相変調型の透過回折格子で, 紫外干渉縞は+1次と-1次の透過回折光どうしの干渉により生成される. この場合, 干渉縞のピッチは正確に位相格子の格子ピッチの1/2となる.

3.2 長周期ファイバグレーティング (LPG)

LPGは格子ピッチが数十~数百μmと比較的大きいため, 強度変調マスク法およびポイント・バイ・ポイント法を用いて作製される. 強度変調マスク法では, ラインアンドスペースの2値パターンを形成したマスクを介してファイバーに紫外光を照射し, ポイント・バイ・ポイント法では, スリットや集光レンズを介してビーム幅を狭めた紫外光を間歇的にファイバーに照射する.

4. ファイバグレーティングの特性と応用デバイス

FBGはブラッグ反射の効果により式(4)で表される波長の光を反射する.

$$\text{FBG 反射波長} = 2 \cdot n_{コア} \cdot \text{格子ピッチ} \quad (4)$$

($n_{コア}$: コア伝搬モードの実効屈折率)

光ファイバーの長手軸方向に数万層もの格子を形成することですぐれた急峻性をもつスペクトル特性が実現できるため, 高密度波長多重通信用の合分波器として用いられる⁶⁾. また, 用途に応じて, ファイバー長手方向に格子ピッチを変化させたチャープトFBG⁷⁾や, ファイバー軸に対して格子を傾斜させたスランティドFBG⁸⁾などが開発されている.

表1 光ファイバグレーティングの種類と用途.

FG 種別	用途	代表特性
FBG (等ピッチ)	波長多重通信用合分波フィルター (狭帯域フィルター)	反射率 99%以上 帯域幅 1 nm 以下
	半導体レーザー外部共振器	反射率 1~50% 帯域幅 0.1~数 nm
FBG (チャープ型)	光線路の波長分散補償器	反射率 90%以上 帯域幅 0.5~数 nm
	広帯域フィルター	反射率 90%以上 帯域幅数~数十 nm
FBG (チャープ型/スラント型)	光アンプの利得波長依存性の補償	遮断率数~90% 帯域幅数十 nm
LPG		
FBG/LPG	光センシング (温度, 歪み, 圧力等)	センサー構成により設計は多岐にわたる

LPG は式(5) で表される波長付近で比較的緩やかな損失スペクトル特性を有する.

$$\text{LPG 損失波長} = (n_{\text{コア}} - n_{\text{クラッド}}) \cdot \text{格子ピッチ} \quad (5)$$

($n_{\text{クラッド}}$: コア伝搬モードの実効屈折率)

LPG は原理的に反射波が生じない利点もあることから, おもに光ファイバ増幅器の利得波長依存性を補償するフィルターとして用いられている⁹⁾. 表1 にグレーティングの種類とその用途を示す.

5. 温度特性の制御

式(4) に示すように, FBG の波長はコア伝搬光の実効屈折率とグレーティング周期によって決定される. 光ファイバを構成する石英系ガラスは屈折率・物理長ともに正の温度依存性を有するため, FBG の波長も正の温度依存性をもつこととなる. FBG 単体の波長温度依存性は約 10 pm/°C であり, 高密度波長多重通信システムに適用していく場合の問題点となる. これを解決するために, FBG ピッチに負の温度依存性を与える温度補償型パッケージが用いられる. 温度補償パッケージには, 負熱膨張の材質に FBG を固定する負熱膨張係数基材型¹⁰⁾ と, 膨張率の異なる複数の材料で構成した複合型¹¹⁾ の 2 種類がある. 負熱膨張材としては, 結晶化ガラス・液晶ポリマーなどがあげられる. 複合型では膨張率差の大きい材料, たとえば石英とアルミのような材質の組み合わせが用いられる. 温度補償パッケージの構造を図4 に示す. 温度補償型パッケージを用いることにより, グレーティング波長の温度依存性は 1 pm/°C 以内に抑制可能である. LPG の動作波長は式(5) で決定されるが, コア伝搬モードとクラッド伝搬モードの実効屈折率の温度依存性を調整することで LPG の温度特性を制

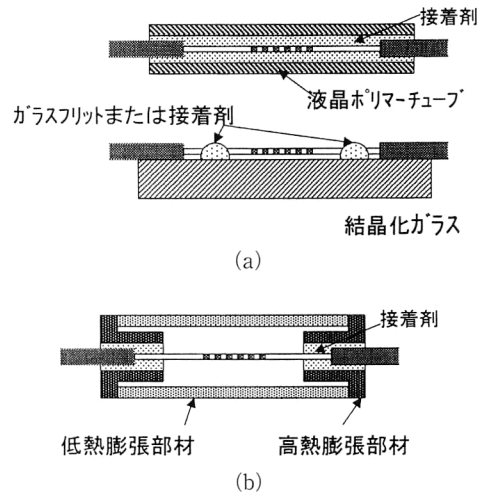


図4 FBG 温度補償パッケージの構造. (a) 負熱膨張係数基材型, (b) 複合型.

御することが可能である. 屈折率の温度依存性は, Ge, B などの物質を適当な濃度分布でファイバに添加することで調整できる^{12,13)}.

ファイバグレーティングに関して, その製法, 特性および応用例について述べた. ガラスの屈折率分布を自由自在に操ることができれば, グレーティングに限らずさまざまな光デバイス応用が可能である. 今後の屈折率制御技術の進展には大いに期待したい.

文 献

- 1) 西井準治, 金高健二: 応用物理, **68** (1999) 1140-1143.
- 2) J. Nishi, et al.: Opt. Lett., **20** (1995) 1184-1186.
- 3) D. L. Williams, et al.: Electron. Lett., **29** (1993) 45-47.
- 4) G. Meltz, et al.: Opt. Lett., **14** (1989) 823-825.
- 5) K. O. Hill, et al.: Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 1035-1037.
- 6) A. Inoue, et al.: IEICE Trans. Electron, **E81-C** (1998) 1209-1218.
- 7) L. D. Garret, et al.: Tech. Digest of Optical Fiber Commun. Conf. (OFC '99), PD15 (1999).
- 8) I. Riant, et al.: Tech. Digest of Optical Fiber Commun. Conf. (OFC 2000), TuH3 (2000) pp. 118-120.
- 9) A. M. Vengsarkar, et al.: IEEE J. Lightwave Technol., **14** (1996) 58-62.
- 10) D. L. Weidman, et al.: Proc. 22nd European Conf. on Optical Communication, MoB.3.5 (1996) pp. 1.61-1.64.
- 11) T. E. Hammon, et al.: Tech. Dig. First Optoelectronics and Communications Conf., 18C1-2 (1996) pp. 350-351.
- 12) J. B. Judkins, et al.: Tech. Digest Optical Fiber Commun. Conf. (OFC '96), PD1 (1996).
- 13) K. Shima, et al.: Tech. Digest Optical Fiber Commun. Conf. (OFC '97), FB2 (1997) pp. 347-348.

(2002年12月18日受理)