

UV 光誘起屈折率変化を用いた 光ファイバグレーティング作製技術

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤情報学専攻

山下 真司

Fiber Bragg Grating Technologies using UV induced Refractive Index Change

Shinji Yamashita

Department of Frontier Informatics, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

1. はじめに

Ge をドープした石英ガラス光ファイバのコアに UV 光を照射すると、光誘起屈折率変化 (Photosensitivity) によりその屈折率が変化し、照射を止めた後も持続する。光ファイバグレーティング (Fiber Bragg Grating: FBG) は、光ファイバのコアに位相マスク等により紫外光の干渉縞を形成して周期的な屈折率変化を書き込んだもので、回折格子 (グレーティング) として、波長選択デバイスとしての機能をもたせることができる。回折格子を直接光ファイバ中に形成するため、低損失、小型、高信頼性、ファイバを基本とした光システムとの親和性など、多くの利点がある。また、他の光フィルタに比べ柔軟な設計が可能であるため、回折格子を工夫することで従来にはない機能をもった光フィルタの作成が可能であり、現在の波長多重

(WDM) 光ファイバ通信システムに不可欠なデバイスとなっている^{1),2)}。また、この UV 光誘起屈折率変化は光導波路作製にも用いられ始めている。

本稿では、FBG の原理と種類、解析法、作製法、および応用について紹介する。

2. FBG の構造と原理

FBG は、コア中に周期的屈折率変化による回折格子をもつ光ファイバであり、その周期に応じた波長を反射する帯域反射光フィルタ (Band-reflection optical filter) である。例えば、中心波長 $1.5 \mu\text{m}$ の FBG は、周期が約 500 nm の周期的屈折率変化をそのコア中に持つ。また、屈折率変化の周期が $100 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 程度という光ファイバグレーティングもあるが、これは FBG と異なり帯域除去光フィルタとなる。したがって、FBG に対し長周期グレーティング (Long period grating: LPG) と呼ばれる。光誘起屈折率変化に基づく FBG は、1978 年に K. O. Hill らによって初めて報告された³⁾。

〒113-8656 文京区本郷 7-3-1
工学部 3 号館
TEL 03-5841-6659 or 6783
FAX 03-5841-6025
E-mail: syama@ee.t.u-tokyo.ac.jp

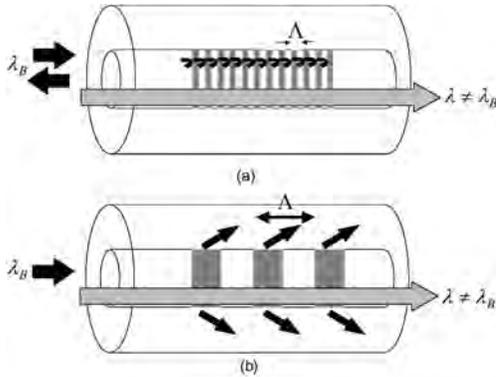


図1 光ファイバグレーティング (a) FBG (b) LPG

図1(a)はFBGの原理を表したものである。一般に、屈折率が変化している場所では反射が生じる。異なる地点で反射した光同士が重なり干渉する際、それぞれの位相が同じもしくは 2π の整数倍の場合、反射した光同士は強め合い、FBGの長さに応じた強度の光が反射される。この波長を λ_B とする。それに対し λ_B 以外の波長の光が入射すると、位相整合が取れないため反射は生じない。このような反射はブラッグ反射と呼ばれ、この周期的な屈折率変化の周期をブラッグ周期と呼ぶ。通常は1次のブラッグ反射を用いるため、隣り合う場所で反射された光は 2π の位相差を持つ。このような光の波長を1次のブラッグ波長と呼ぶ。ブラッグ反射波長 λ_B と屈折率変化の周期 A の関係は実効屈折率 n_{eff} を用いて、

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}A \quad (1)$$

となる。FBGの解析には通常、モード結合理論が用いられる。モード結合理論は複数のモード、FBGの場合には前進波と後退波、の間の相互作用を取り扱う摂動理論である⁴⁾。ただし、屈折率変化が小さく、摂動として取り扱える場合にのみ成立する。モード結合の考え方をを用いれば、伝搬定数 β の前進波モードと伝搬定数 $-\beta$ の後進波モードが、空間周波数 $2\beta = 2\pi/A$ の摂動により結合する、というのがFBGの原理

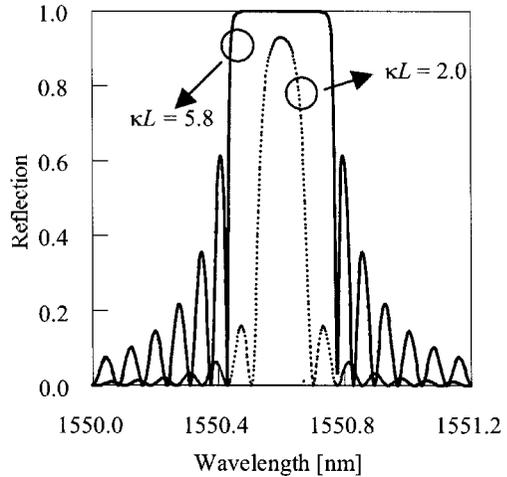


図2 一様なFBGの反射スペクトル ($L = 10 \text{ mm}$, $n_{\text{eff}} = 1.45$, $A = 1070 \text{ nm}$)

である。

モード結合理論により計算した一様なFBGの反射スペクトルの計算例を図2に示す。ここで κ は結合定数と呼ばれ、屈折率変化量に比例する量であり、 L はFBG長である。このように、 κL がある程度大きければ、ほぼ100%の反射率が狭帯域(1 nm以下)で得られることがわかる。このときのブラッグ波長での反射率と、反射帯域幅は

$$R_B = \tanh^2(\kappa L)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{n_{\text{eff}}L} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa L}{\pi}\right)^2} \quad (2)$$

与えられる。ただし、 κL が大きい場合には帯域外のサイドローブが問題となり、この抑圧のためには後述のアポダイズが必要になる。

図1(b)はLPGを表したものである。一般に単一モード光ファイバにはコアを伝搬する1つのモードと、これとは別にクラッドを伝搬する多数のモードがあるが、コアモードとクラッドモードは伝搬定数が異なるため普通は結合しない。しかし、この伝搬定数差に等しい空間周波数をもつ摂動が存在すればモード結合が生じる。クラッドモードは損失が大きいため、LPGは比較的帯域の広い帯域除去光フィルタとな

る。このため、光ファイバ増幅器の利得スペクトル平坦化に用いられている。

3. FBGの製法

光誘起屈折率変化を用いたFBGの製法には主に2つあり、2光束干渉法(図3(a))と位相マスク法(図3(b))である。どちらもUV光を光ファイバの外部から照射してコア部分に干渉縞を形成し、光誘起屈折率変化によりFBGを書き込む方法である。

2光束干渉法はUV光束をハーフミラー等で2分割して光ファイバ上で干渉させることにより干渉縞を形成するホログラフィックな方法である⁵⁾。この方法では、光束と光ファイバのなす角を θ としてUV光波長を λ_{UV} とすれば、干渉縞の周期は $\Lambda = \lambda_{UV} / 2 \sin \theta$ となり、角度を変えることによりFBG周期を可変にできるという利点がある。反面、鮮明な干渉縞を作るためには高コヒーレンス光源が必要であり、またアライメントが難しく安定性に欠けるという欠点がある。

これに対し、位相マスク法は ± 1 次回折光のみが得られるように作られた回折格子である位相マスクを用い、 ± 1 次回折光の干渉により干渉縞を形成する方法である⁶⁾。この方法では、

干渉縞の周期 Λ は位相マスクの周期を Λ_{PM} として $\Lambda = \Lambda_{PM} / 2$ となり、UV光波長に依存しない。したがって、低コヒーレンス光源でも鮮明な干渉縞を作ることができる。また、位相マスクと光ファイバを近接して保持すればよいためアライメントが簡単で、安定性が高く量産性に優れている。さらに後述のような種々のFBGが作りやすい。反面、干渉縞の周期は位相マスクにより固定されてしまう。位相マスクがそのまま転写されてしまうため、位相マスクの品質も高くなければならない。

LPGの作製は周期が長いいためもっと簡単であり、屈折率変化を与えたい場所にUVビームをコリメートするか、振幅マスクを用いて照射するだけでよい。

UV光源としては、主にエキシマレーザまたは周波数通倍アルゴンレーザが用いられている。エキシマレーザは高パワーなパルスレーザであり、波長が248 nm (KrF) または193 nm (ArF) のものが用いられる。コヒーレンスとビームクオリティが低いため、主に位相マスク法で用いられる。周波数通倍アルゴンレーザは波長488 nmのアルゴンレーザ出力を非線形結晶で通倍した波長244 nmのものが用いられる。これはCWでコヒーレンス、ビームクオリティともに高いが、パワーは比較的低い。こ

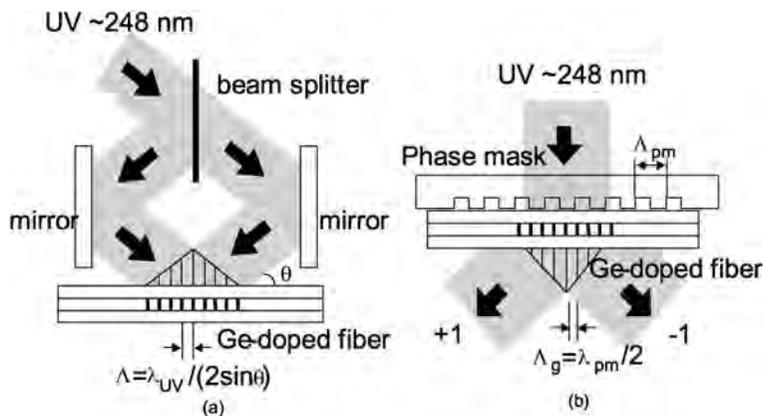


図3 FBGの作製法(a) 2光束干渉法(b) 位相マスク法

の他に、周波数 4 通倍 Nd: YAG レーザや銅蒸気レーザも用いられることがある。

FBG を形成する光ファイバも重要である。後述のように、光誘起屈折率変化は主に Ge を含む石英ガラスで起こり、Ge 濃度が大きいほど変化も大きいことが知られている。通常の単一モード光ファイバ (SMF) ではコアに Ge が含まれているが、濃度は比較的低いため、そのまま反射率が 100% に近い FBG を作るのは難しい。FBG のための Ge 高濃度光ファイバも作られているが、もっと簡便な方法が提案され、広く用いられている。これは高圧水素処理法もしくは水素ローディングと呼ばれ、100 気圧程度の高圧水素中に光ファイバを数日以上留置するだけで光誘起屈折率変化が大きくなり、SMF でも反射率が 100% に近い FBG を作ることができる⁷⁾。ただし、水素セルから取り出してガラス中の水素が揮発しないうちに (室温で数時間以内) に FBG を書き込んでしまう必要がある。

4. 光誘起屈折率変化の原因

光誘起屈折率変化の原因は一つではなく、光ファイバの種類、水素処理の有無、光源の波長、パルスか CW か、などの条件によって異なると考えられている。しかし UV 光子を吸収

して始まる点は共通である。Ge を含む石英ガラスに 240 nm 近傍の光を照射する場合、酸素欠乏欠陥による吸収帯が光吸収の役割をする。図 4 に Ge ドープ石英ガラスにおける各種の欠陥を示す¹⁾。酸素欠乏欠陥とは、Ge 原子と Si 原子の間にあるべき酸素原子がなく、図 4(a) のように直接結合している状態であり、光子を吸収すると GeE' センターと電子を生じ、電子は Ge(1)、Ge(2) などの欠陥を作る。Ge²⁺ もまた酸素欠乏により生じ、240 nm 付近に吸収帯をもつ。また、水素処理を施した場合、OH ラジカルやゲルミルラジカルなども生じる。光吸収により屈折率変化を生じる機構は、後述のクラマース・クローニッヒモデルと圧縮モデルのいずれかで論じられることが多い¹⁾。

クラマース・クローニッヒモデルでは、Ge-Si 欠陥などに光子が吸収されると、電子が放出され、図 4(d) の Ge(1) や図 4(e) の Ge(2) などの欠陥ができ光吸収スペクトルが変化する。物質の光吸収スペクトルが変化することにより、クラマース・クローニッヒの関係を通して屈折率も変化するようになる。圧縮モデルでは、UV 光の照射が分子の再配列を引き起こし、ガラス構造の圧縮が起こるとしている。実際に、このような圧縮に伴うコア-クラッド界面の変形やガラス母材の体積の減少が確認されている。

上述の光誘起屈折率変化は通常の FBG 作製

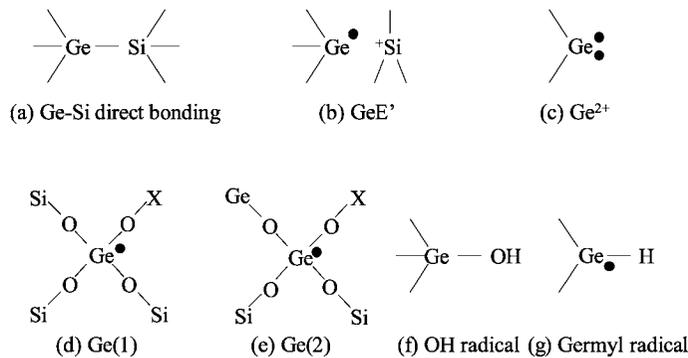


図 4 Ge ドープ石英ガラスにおける各種欠陥¹⁾

に用いられるもので、Type I の光誘起屈折率変化と呼ばれている。これは比較的 low パワーの UV 光で起こるもので、屈折率変化量は照射時間 (or パルス数) に比例する。これに対し、Type IIA と Type II と呼ばれる光誘起屈折率変化も知られている。Type I において照射を続けると屈折率上昇は飽和し、続いて低下を初め、さらに元の屈折率よりも大きく低下する。この大きな負の屈折率変化を Type IIA と呼ぶ。Type II は大パワーの UV 光で起こる大きな正の屈折率変化で、ガラスの物理的ダメージにより起こるものである。

5. FBG の種類

前述の位相マスク法により、一様な屈折率分布をもつ FBG だけではなく、種々の FBG を作製することが可能になっている。図 5 に種々の FBG の屈折率分布を示す⁸⁾。

図 5(a) は一様な FBG、図 5(b)(c) は一様な FBG の屈折率分布に窓関数をかけたアポダイ

ズ FBG である。アポダイズとは「焼きなます」という意味がある。図 5(b) では平均屈折率変化が一様でない (DC 成分をもつ) が、図 5(c) は平均屈折率変化がゼロ (DC フリー) となるようにしてある。このようにアポダイズをかけることにより、図 2 にあったサイドローブを抑圧することができる。完全にサイドローブを抑圧するためには、図 5(c) のように DC フリーのアポダイズでなければならない。図 6 にガウシアンでアポダイズをかけた場合の反射スペクトルの計算結果を示す。アポダイズ形状を最適化することによりさらに (40 dB 以上) サイドローブを抑圧することができる。アポダイズをかけるためには、FBG を書き込む前処理 (プリプロセス) または後処理 (ポストプロセス) において振幅マスクが用いられる。

図 5(d) は FBG の周期が変化するチャープ FBG である。チャープ FBG のある位置で反射する光は、その位置でのブラッグ波長の光であるので、波長により反射点が異なることになり、波長に対して異なる群遅延時間、すなわち

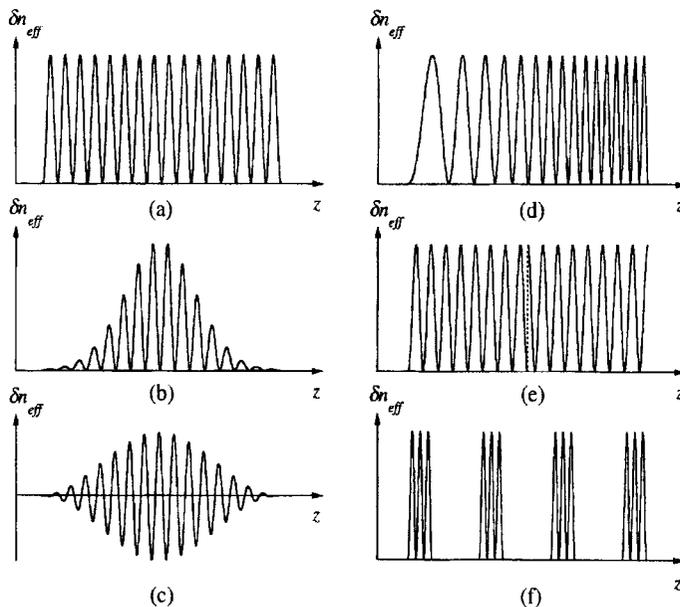


図 5 種々の FBG の屈折率分布⁸⁾

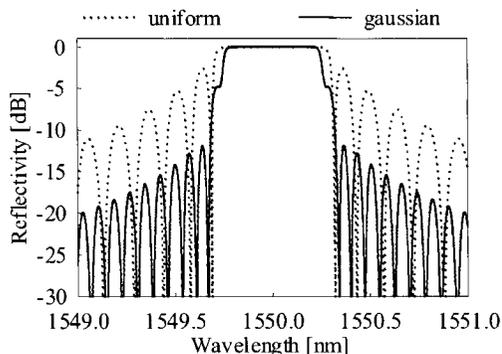


図6 ガウシアンアポダイズFBGの反射スペクトル

大きな波長分散を与えることができる。これは光ファイバの波長分散補償に用いられている。製法としては、チャープ位相マスクを用いるか、もしくは光ファイバと位相マスクを相対的に動かすことにより実現されている³⁾。

図5(e)は途中に位相シフトが入っている位相シフトFBGである。位相シフトFBGでは位相シフト部分を境にして左右のFBGが一種の共振器を形成し、共振の効果により反射スペクトルに「穴」があく。これは、超狭帯域透過フィルタや光ファイバDFBレーザに利用されている。

また、図5(f)は短いFBGを等間隔で並べたもので、サンプルFBG、もしくはFBGの周期構造のうえにサンプリング構造が重畳されていることからスーパーストラクチャFBGと呼ばれる。これも共振の効果により、櫛(コム)状の等間隔の反射スペクトルをもつ。図7にサンプルFBGの反射スペクトルの計算結果を示す。サンプリング周期を L_s としたとき、反射スペクトルのコム間隔 Δf は、

$$\Delta f = c/2n_{\text{eff}}L_s \quad (3)$$

となる。 c は光速である。これは後述のような波長多重通信(WDM)用の光フィルタとして用いられる。

これらの一様でないFBGの解析にも前述のモード結合理論を適用できる。よく用いられる

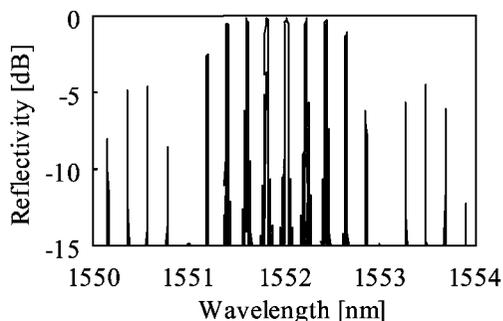


図7 サンプルFBGの反射スペクトル

のは、一様でないFBGを微小な一様FBGに分解してその伝達行列を乗算してゆく伝達行列法である。しかしながら、あまり微小(数周期以下)に分解しすぎると、摂動の仮定が成立しなくなり、正しい結果が得られなくなるので注意が必要である。

製造技術の進歩により、解析と良く一致する特性のFBGが得られるようになっている。

6. FBGの応用

FBGの応用としては主に光ファイバ通信応用と光ファイバセンサ応用がある。これらの応用に関してのFBGの特長として、以下が挙げられる。

- 光ファイバ型である(伝送路との整合性)
- 非破壊的な作製法
- 狭帯域
- 低サイドローブ
- 鋭いカットオフ
- 低損失
- 偏波無依存
- 小型
- パッケージングにより高安定・高信頼性
- 反射と透過が両方存在する

これらの特長を生かした種々の光デバイスが作られている。

光ファイバフィルタはFBGが最もよく用い

られている応用である。前述のように FBG は狭帯域で鋭いカットオフをもつため、高密度 WDM (DWDM) 用のフィルタとして最適である。ただし、帯域反射であるため、サーキュレータが必要になる。また、張力または温度変化により波長チューニングも可能である。光ファイバは引っ張りよりも圧縮に強いので、FBG にうまく圧縮歪みをかけることにより、100 nm 近い波長可変フィルタが実現されている⁹⁾。さらに、構成を工夫することにより、ある 1 つの波長のみを落として (ドロップ)、さらにその波長の別の信号を付け加える (アド) ことのできるアド・ドロップ・マルチプレクサ (ADM) を実現できる。

前述のように、チャープ FBG は波長分散補償器として用いられる。伝送用光ファイバのもつ波長分散と逆の波長分散をもつように設計することにより、全体としての分散をゼロとすることができる。

また、エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) は利得に波長依存性を有しているが、この利得等化器として LPG をいくつか組み合わせたものが用いられることが多い。

サンプル FBG は WDM 用のマルチチャネルフィルタとして用いることができる。DWDM に合わせて反射スペクトルのコム間隔 Δ_f を小さくするためには、式 (3) によりサンプリング周期 L_s を大きくしなければならない。筆者らは、サンプル FBG に位相シフトを加えることにより、サンプリング周期 L_s を変えないでコム間隔 Δ_f を小さくする多点位相シフト (MPS) 法を提案した¹⁰⁾。

前述のように、FBG は狭帯域反射フィルタであり、光ファイバレーザ用ミラーとして優れている。エルビウムドープ光ファイバを 2 つの等しいブラッグ波長をもつ FBG で挟んだ分布ブラッグ反射 (DBR) 構造だけではなく、エルビウムドープ光ファイバ上に直接 FBG を書き込んだ分布帰還 (DFB) 構造の光ファイバレーザも作られている¹¹⁾。DFB 光ファイバ

レーザを安定に発振させるためには、途中に $\pi/2$ 位相シフトが必要である。また FBG はカスケード光ファイバラマンレーザ用のミラーとして用いられる他、波長 980 nm の EDFA 励起用半導体レーザの波長安定化のためにも用いられている¹¹⁾。

FBG のもう一つの注目すべき応用は光ファイバセンサである。FBG は張力または温度変化により波長が変化するため、FBG を構造物や材料に埋め込んでおくことにより、波長変化として張力または温度変化が測定できる¹¹⁾。さらに、ブラッグ波長の異なるいくつかの FBG を使うことで、WDM 技術により 1 本の光ファイバで多点化が可能である。このようにセンサを埋め込んだ構造物/材料をスマートストラクチャ/スマートマテリアルと呼ぶ。FBG センサは比較的安価で高い分解能をもつため、すでに実用化が進められている。課題としては張力と温度の分離がある。

7. ま と め

FBG の原理と種類、解析法、作製法、および応用について紹介した。FBG は比較的簡単な作製法で高機能な光デバイスが実現できるため、基幹系の光ファイバ通信だけでなく、メトロ系やアクセス系へのさらなる応用が期待される。また、安心・安全な社会の実現のためにも、FBG センサによるスマートストラクチャ/スマートマテリアルの実用化が期待される。

最後に、光誘起屈折率変化の応用としては FBG だけではなく、平面スラブ基板上で UV ビームをスキャンすることによる光導波路作製も試みられている¹²⁾ことを附記する。

参 考 文 献

- 1) A. Othonos, K. Kalli, Fiber Bragg Gratings, Artech House, 1999.
- 2) R. Kashyap, Fiber Bragg Gratings, Academic Press, 1999.

- 3) K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Jhonson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection fiber fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- 4) 岡本勝就, 光導波路の基礎, コロナ社, 1992.
- 5) G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- 6) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Jhonson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1035-37, 1993E.
- 7) P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi and W. A. Reed, "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1191-1193, 1993.
- 8) T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Light-wave Technol.*, vol. 15, pp. 1277-1294, 1997.
- 9) C. S. Goh, S. Y. Set, K. Kikuchi, "Widely tunable optical filters based on fibre Bragg gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 1306-1308, 2002.
- 10) Y. Nasu and S. Yamashita, "Multiple-phase-shift superstructure fiber Bragg grating for DWDM systems," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 24, pp. 1471-1472, Nov. 2001.
- 11) 山下真司, "通信・計測用光源への応用" (「エルビウム添加光ファイバ増幅器～情報通信ネットワークに革命をもたらすキーデバイス～」中の一章), オプトロニクス社, pp. 253-284, Nov. 1999.
- 12) K. Kashiwagi and S. Yamashita, "Fabrication of silica-based glass optical waveguide by UV beam scanning," *Micro-Optics Conference (MOC'03)*, no. H46, Oct. 2003.