

フェムト秒レーザ加工による長周期ファイバグレーティング

光電子技術研究所 藤井 朋子*1・福田 武司*1・石川 紫文*1・石井 裕*1
佐久間 健*1・細谷 英行*2

Long-Period Fiber Grating Fabricated by Femtosecond Laser Pulses

T. Fujii, T. Fukuda, S. Ishikawa, Y. Ishii, K. Sakuma & H. Hosoya

フェムト秒レーザの集光照射によって誘起される透明材料内部の局所的な屈折率変化を利用した光デバイス開発が注目を集めている。この技術を用いて作製した長周期ファイバグレーティングは優れた熱安定性を持つことから、高温領域でも動作可能な温度センサなどとしての応用が期待できる。今回われわれは、フェムト秒レーザの集光点付近で発生する白色光を指標とすることで、光ファイバのコア中心部に精度よく屈折率上昇領域を誘起した。その結果、優れた損失スペクトル形状を有し、過剰損失の小さい長周期ファイバグレーティングを再現性よく実現したので報告する。

Fabrication of optical devices that utilizes the localized refractive-index change induced in transparent materials by focused femtosecond laser pulses has attracted much interest. Long-period fiber grating (LPFG) fabricated by this method has high temperature resistance. Therefore, it is promising, for example, as a temperature sensor that can operate in high temperature surroundings. In this time, we show the novel method to induce the refractive-index change just at the center of the fiber core by utilizing the white-light generated near the focal point as the index. The transmission loss spectrum of the LPFG fabricated by this method is in good agreement with the theoretical analysis and the low excess loss is also realized.

1. ま え が き

フェムト秒レーザの集光照射によって誘起される屈折率変化を利用して、ガラスなどの透明材料内部に光導波路¹⁾⁴⁾やファイバグレーティング⁵⁾⁷⁾、回折素子^{8),9)}などの光デバイスを直接形成する技術が注目を集めている。

フェムト秒レーザ光は $10^{-15} \sim 10^{-13}$ 秒程度のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光である。この短いパルス幅ゆえにフェムト秒レーザ光は非常に大きなピークパワーを持ち、さらにレンズで集光することにより容易に数百TW/cm²もの高いパワー密度を実現する。このため、使用した波長が1光子過程では透明材料に吸収されない場合でも、一定のしきい値以上の電場強度に達した集光点付近では、多光子過程などの非線形相互作用が生じ、その結果の一つとして、 μm オーダの屈折率上昇領域が形成される。

集光点を3次元的に走査すれば、任意形状の屈折率上昇領域を透明材料内部に直接形成できることから、フェムト秒レーザ加工は、従来のリソグラフィプロセス技術

では実現の難しかった3次元光導波路などの作製が可能であり、光回路の高集積化を実現する手法として期待されている。すでにわれわれは石英ガラス内部に波長1,520nm~1,620nmの光通信波長帯において、伝搬損失0.12~0.13dB/cmの低損失直線光導波路を実現するとともに³⁾⁴⁾、3次元構造の1入力8出力光スプリッタを試作し、3次元光導波路の実現が可能であることを示している⁴⁾¹⁰⁾。

今回われわれは、長周期ファイバグレーティング (Long-Period Fiber Grating 以下LPFG) について報告する。フェムト秒レーザ加工により作製したLPFGは優れた熱安定性を持つことが報告されており⁵⁾、高温領域でも動作可能な温度センサなどへの応用が期待できるが、実用化には損失スペクトル形状や過剰損失などに、より一層の改善が求められる。われわれは、フェムト秒レーザの集光点付近で発生する白色光を指標としてレーザ集光位置を調整することにより、光ファイバのコア中心部に精度よく屈折率上昇領域を誘起することに成功した。その結果、優れた損失スペクトル形状を有し、過剰損失も0.26dBと十分小さなLPFGを再現性よく実現したので報告する。

*1 光通信研究部

*2 光通信研究部長

2. 長周期ファイバグレーティング (LPFG)

2.1 LPFGの原理

ファイバグレーティングは、光ファイバのコアに周期的な屈折率変化を形成することにより、光ファイバ中を伝搬する光のうち特定波長近傍の光のみを反射、あるいは減衰させる波長フィルタである。このうち、グレーティング周期が数十 μm から数百 μm のものがLPFGと呼ばれ、特定の波長付近において、コア近傍を伝搬する導波モードを進行方向のクラッドモードに結合させて減衰させる。LPFGはファイバアンプの利得平坦化フィルタや温度/圧力センサなどとして広く利用されている。

2.2 フェムト秒レーザー加工LPFGの特徴

現在ファイバグレーティングの作製方法としては紫外線照射を行う方法が広く用いられている。この方法では、ゲルマニウムに起因した欠陥生成が屈折率上昇の主要因となっているため、コアにゲルマニウムを含むことがグレーティングを形成するための条件になる。これに対してフェムト秒レーザーは、光ファイバの組成に依存せずに屈折率変化を誘起することができるので、例えば純粋石英コアファイバなどへのグレーティング形成が可能である。

また、紫外線照射を用いてファイバグレーティングを作製する場合、十分な屈折率上昇が得られない場合がある。この場合、加工を行う前に光ファイバを長時間高圧水素雰囲気中に暴露して増感させる必要がある。フェムト秒レーザー加工の場合、直接照射を行うだけで $10^{-3} \sim 10^{-2}$ オーダの屈折率変化を誘起できることから、こういった前処理が不要である。

さらに紫外線照射により作製したファイバグレーティングは、屈折率変化の熱緩和（熱劣化）により、光学特性が劣化してしまう。そこで、光学特性の長期安定性を確保するために、あらかじめ高温で加速エージングを行うなどの後処理を必要とする。これに対してフェムト秒レーザーを用いて作製したLPFGは、500℃、8時間の熱処理を行っても、その透過特性が劣化しないとの報告があることから⁵⁾、優れた熱安定性を持っていると考えられる。

3. 作製方法

図1にフェムト秒レーザーを用いた加工装置の構成を示す。光ファイバは、コアが純粋石英、クラッドにフッ素を含む純粋石英コアファイバを用い、被覆を除去・洗浄したのちに6軸ステージ上に設置した。用いたフェムト秒レーザー光は中心波長800nm、パルス幅155fs、繰り返し周期200kHzの再生増幅光である。再生増幅装置から出たレーザー光はメカニカルシャッタを通過した後、開口数 (N.A.) 0.50、倍率50倍の対物レンズにより光ファイバ内部に集光される。レーザー照射強度は対物レンズ直後で45mWに調整した。光ファイバの長手方向 (Y軸方向) に沿ってステージを速度30 $\mu\text{m/s}$ で連続的に走査し、所定の時間間隔でメカニカルシャッタを開閉することにより、

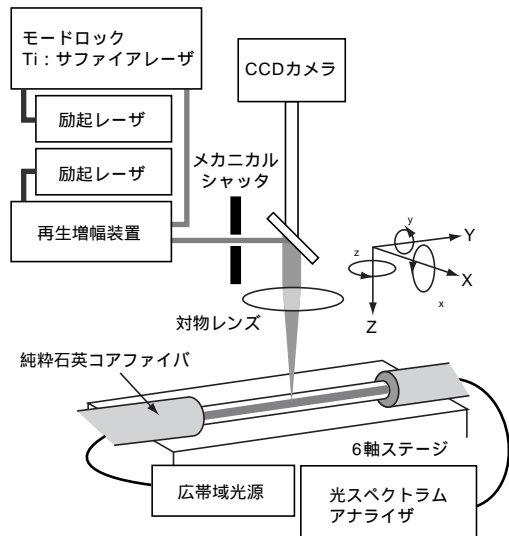


図1 LPFG用加工装置の構成図
Fabrication setup for LPFG

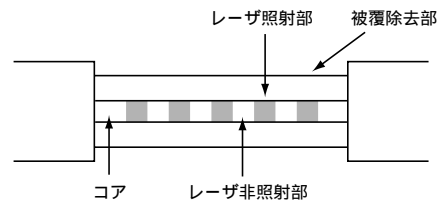


図2 LPFGの構造図
Structure of LPFG

図2にあるようなグレーティング構造を作製した。また、光ファイバの一端を広帯域光源、もう一端を光スペクトラムアナライザに接続することにより、作製中のLPFGの透過特性をリアルタイムで測定した。さらにフェムト秒レーザーの集光点付近の様子は対物レンズの上方に設置したCCDカメラで観察した。

4. レーザ集光位置の制御

4.1 制御方法

フェムト秒レーザーを集光照射することによって誘起される屈折率上昇領域は、直径数 μm 程度の大きさである。LPFGを作製するには、この屈折率上昇領域を光ファイバのコア中心部に誘起する必要がある。そこで、われわれはフェムト秒レーザーの集光点付近で発生する白色の発光（以下、白色光）を指標としてレーザー集光位置を制御することにより、光ファイバのコア中心部に精度よく屈折率上昇領域を形成した。

図3 (a) は、フェムト秒レーザーの集光位置をレーザーの照射方向 (Z軸) に沿って変化させたときの白色光をCCDカメラで観察した結果である。レーザー集光位置が光ファイバコアの中心付近 ($Z=60\mu\text{m}$) にくると、白色光はファイバの長手方向 (Y軸) に沿って細長く観測されることがわかる。次に、Z軸方向の集光位置をこの状態に固定したまま、X軸方向の集光位置を変化させたときの様子を図3 (b) に示す。集光位置が $\pm 1\mu\text{m}$ 変化しただけで、白色

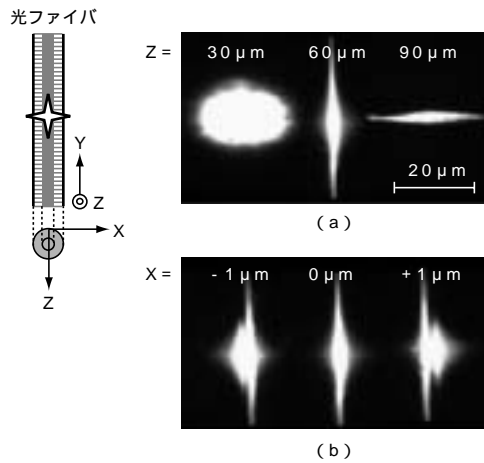


図3 白色光のCCD画像．レーザ集光位置をそれぞれ (a) Z軸, (b) X軸に沿って変化させた CCD images of white-light

The focal point is changed along (a) Z-axis, (b) X-axis.

光は大小2つの部分に分かれて観測されることがわかる．そこで、グレーティング構造を形成する前に、白色光が光ファイバの長手方向に沿って細長く観測されるように、Z軸ステージおよび回転ステージを調整した．これにより、加工領域全体で、常にレーザ集光位置が光ファイバコア内の同じ位置にくるようにした．

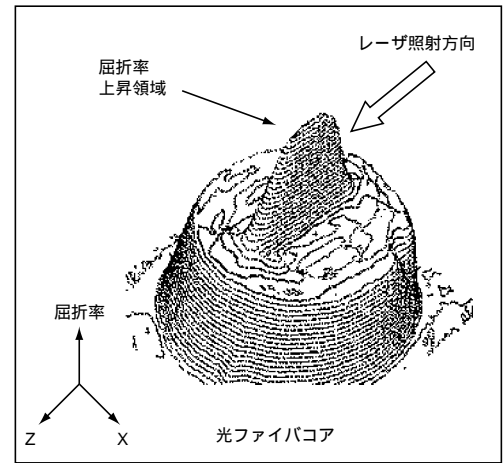
4.2 光ファイバ断面の屈折率分布

図4は、前述の方法でレーザ集光位置を調整した後に作製したLPFGの光ファイバ断面の屈折率分布を示す．図4 (a) は2次元プロット、図4 (b), (c) はそれぞれレーザの照射方向に垂直 (X軸方向)、および平行 (Z軸方向) な断面での屈折率分布である．測定波長は675nmであった．フェムト秒レーザによる屈折率上昇領域は光ファイバのコア中心に精度よく誘起されており、白色光の発光形態を指標としたレーザ集光点の位置決めが有効であることがわかる．この方法による位置決め精度はX軸方向に対して $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下であった．なお、屈折率変化量の最大値は0.007であった．

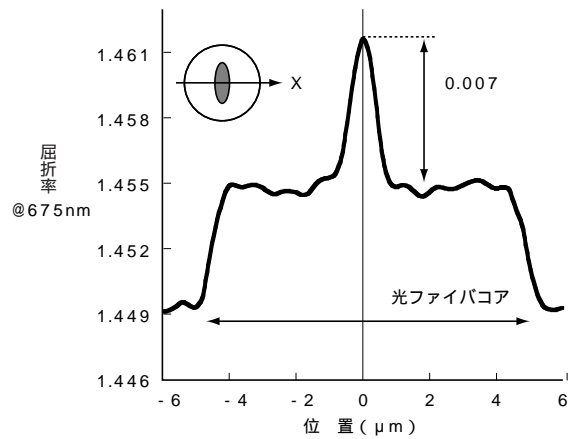
5. 作製したLPFGの特性

5.1 透過特性

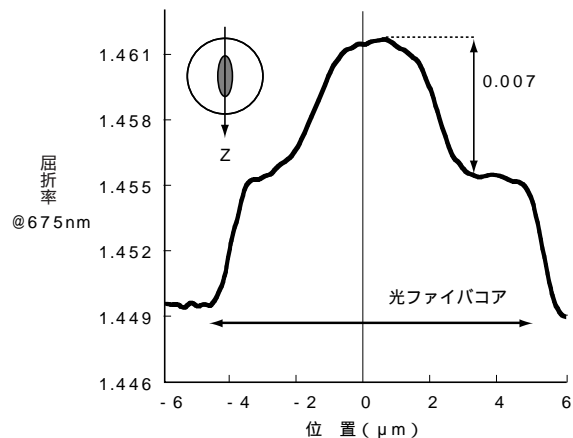
図5 (a) に作製したLPFGの透過特性を示す．グレーティング周期は $370 \mu\text{m}$ 、グレーティング長は37mmとした．1,300nmから1,700nmの波長範囲にわたって阻止率が2.5dBから10dBの損失ピークが複数本形成されていることがわかる．図5 (b) に1,550nm付近の損失ピークを拡大した図を示す．実線は実験値、点線はsinc関数の二乗をフィッティングした結果を示す．損失中心波長は1,552.3nm、最大阻止率は9dBであった．グレーティング周期の均一なLPFGの損失スペクトルはsinc関数の二乗でよく近似できることが知られている．実験結果は非常によくフィッティングされていることから、今回われわれが作製したLPFGは、優れた損失スペクトル形状を有していることがわかる．また過剰損失も0.26dB程度と小さいことから十



(a)



(b)



(c)

図4 光ファイバ断面の屈折率分布 (a) 2Dプロット, (b) X軸に平行な断面, (c) Z軸に平行な断面
Cross sectional views of refractive-index profile (a) 2D plotting, (b) along X-axis, (c) along Z-axis

分実用的なLPFGを実現できた．

5.2 偏波依存損失

図6に波長1,530nmから1,570nmにおける偏波依存損失 (Polarization Dependent Loss 以下PDL) と、挿入損失の平均値を示す．PDLは損失中心波長付近で3dB以上の大きな値を持つことがわかる．今回われわれは白色光の発光

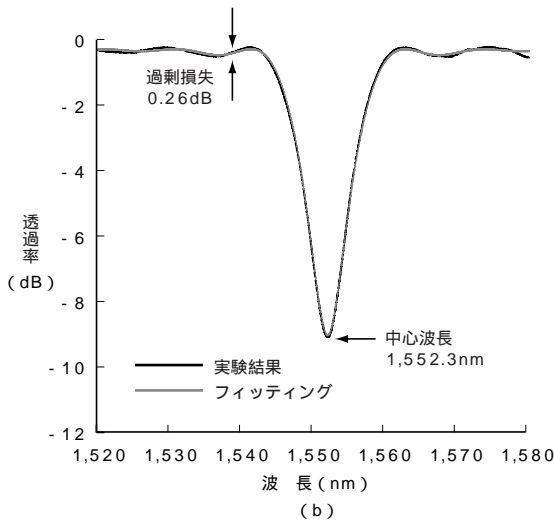
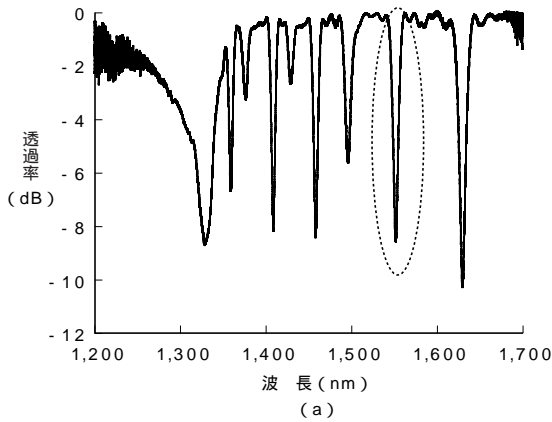


図5 (a) 作製したLPFGの透過スペクトル
(b) 波長1,550nm付近の拡大図

(a) Transmission spectrum of an LPFG
(b) Enlargement of the loss peak in the vicinity of 1,550nm

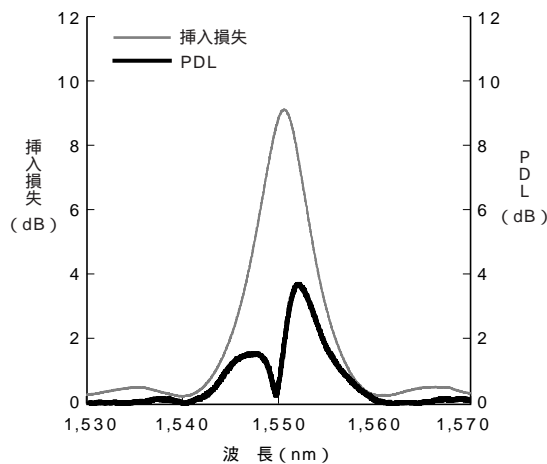


図6 平均挿入損失とPDLの波長依存性

Wavelength dependence of average insertion loss and PDL

形態を指標としてレーザ集光位置を決定することにより、光ファイバのコア中心部に屈折率変化を誘起するという点では十分な制御を行うことを可能にした。しかしながら、図4を見ると明らかのように、誘起された屈折率上昇領域は、レーザの照射方向(図4(a)中Z軸方向)に大き

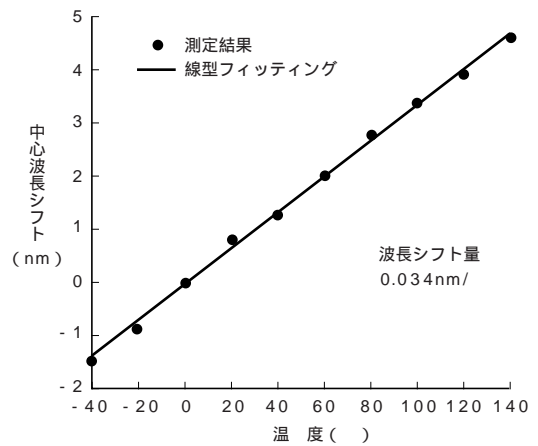


図7 中心波長の温度依存性

Center wavelength shift of LPFG against temperature

く扁平した形状をしていることがわかる。このように、屈折率上昇領域自体が光ファイバの中心軸に対して異方性を持っていることが、今回のようにPDLが大きくなった原因であると考えられる。

PDLを低減するための対策としては、(1)使用する対物レンズのN.A.やフェムト秒レーザの照射強度等のパラメータを最適化することにより、屈折率上昇領域の形状を真円に近づける、(2)光ファイバを回転させながらレーザ照射を行うなどの手法を用いて¹¹⁾、屈折率分布自体の異方性を光ファイバの長手方向に対して相殺させることなどが考えられる。

5.3 損失中心波長の温度依存性

図7に波長1,550nm付近の損失スペクトルにおける損失中心波長の温度依存性を示す。測定温度範囲は - 40 ~ 140 である。損失中心波長は温度に対して線型に変化し、波長シフト量は0.034nm/°Cであった。

6. むすび

フェムト秒レーザの集光照射によりLPFGを作製した。レーザの集光点付近で発生する白色光の発光形態を指標としてレーザ集光位置を制御することにより、光ファイバのコア中心部に精度よく屈折率上昇領域を形成できることを示した。作製したLPFGは、優れた損失スペクトル形状を有し、過剰損失も0.26 dBと十分小さな値を実現できた。

参考文献

- 1) K. M. Davis, K. Miura, N. Sugiyama and K. Hirao: Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Opt. Lett.* 21, 1729-1731, 1996
- 2) K. Miura, H. Inoue, J. Qiu, T. Motsuyu and K. Hirao: Optical waveguides induced in inorganic glasses by femtosecond laser, *Nucl. Instr. and Meth. B141*, 726-732, 1998
- 3) 福田武司, 石川紫文, 四方朋子, 佐久間健, 細谷英行: フェムト秒レーザによる純粋シリカガラス内部への光導波路

- の作製, 2002年秋季応用物理学会 27p-YB-5
- 4) K. Sakuma, S. Ishikawa, T. Shikata, T. Fukuda and H. Hosoya: Ultra low-loss waveguide of 0.12 dB/cm directly written in pure silica glass by femtosecond laser pulses, Optical Fiber Communication Conference, 2003 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Atlanta, 2003) pp. 445-446.
- 5) Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. G. Kazansky and K. Hirao: Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses, Opt. Lett. 24, 646-648, 1999
- 6) 河村賢一, 本光英治, 平野正浩, 細野秀雄: フェムト秒シングルパルス干渉露光法によるファイバグレーティングの作成, 2002年秋季応用物理学会 27p-YB-8
- 7) 四方朋子, 石井裕, 佐久間健, 細谷英行: フェムト秒パルスレーザーによる長周期ファイバグレーティングの作製, 第30回光波センシング技術研究会講演論文集 p.153-158
- 8) K. Kawamura, N. Sarukura, M. Hirano, and H. Hosono: Holographic Encoding of Permanent Gratings Embedded in Diamond by Two Beam Interference of a Single Femtosecond Near-Infrared Laser Pulse, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 767-769, 2000
- 9) 中谷隆幸, 邱健栄, 平尾一之: フェムト秒レーザーによるガラス内部への微細な集光レンズと回折光学素子の形成, NEW GLASS, Vol.17, No.1, pp.32-38, 2002
- 10) 石川紫文, 福田武司, 四方朋子, 佐久間健, 細谷英行: フェムト秒レーザーによる純粋シリカガラス内部への三次元光導波路の作製, 2003年電子情報通信学会総合大会 C-3-77
- 11) Y. Ishii, K. Shima, S. Okude, K. Nishide and A. Wada: PDL Suppression on Long-Period Fiber Gratings by Azimuthally Isotropic Exposure, IEICE TRANS. ELECTRON, E85-C, 934-939, 2002