

チューナブル長周期ファイバグレーティングの製作と特性評価

横内 孝史[†] 須崎 嘉文[†] 中川 清[†] 江島 正毅[†]
山内 誠^{††} 木村 雅則^{††} 水谷 康男^{††} 木村 進^{††}

Fabrication and Estimation of Mechanically Induced Tunable Long-Period Fiber Grating

Takashi YOKOUCHI[†], Yoshifumi SUZAKI[†], Kiyoshi NAKAGAWA[†], Seiki EJIMA[†],
Makoto YAMAUCHI^{††}, Masanori KIMURA^{††}, Yasuo MIZUTANI^{††},
and Susumu KIMURA^{††}

あらまし 長周期ファイバグレーティング (LPFG) は特定の波長領域に損失を与えるフィルタ機能を有するが、製作過程においてそのフィルタ特性を正確に予測することは容易でない。この対策として、製作手法または製作後の特別な処理により減衰波長領域を制御する方式がいくつか提案されたが、実用性の面で不十分である。本論文では、スプリングを用いた機械式チューナブルLPFGによるフィルタ特性の制御手法を提案した。実験の結果、減衰波長領域を細かく制御することができた。

キーワード 長周期ファイバグレーティング, 機械式チューナブルLPFG

1. ま え が き

光ファイバに周期的な (数百 μm 程度) 屈折率変化を与えた長周期ファイバグレーティング (Long-Period Fiber Grating : 以下 LPFG) [1] は、クラッドモードとの結合条件を満たす特定の波長領域にのみ損失を与えるフィルタ機能を有し [2] ~ [4]、製作の簡便性、低反射、低挿入損等の優位性により [5]、ファイバアンプのゲインイコライザや変位・化学センサ等に用いられている [6],[7]。LPFG の製作は、ゲルマニウムを添加した光ファイバに強度変調マスクやスリットを通して紫外光を照射することにより屈折率変化を生じさせる方法が一般的である。しかし、この方法により作製された LPFG は、UV 照射後のアニール処理等により波長特性が大きく変化し、その減衰量も時間経過とともに変動するので、フィルタ特性を正確に予測するこ

とは容易でない [4],[8]。また、炭酸ガスレーザやアーク放電により周期的に屈折率変化を与える製作方法も報告されているが [4],[9]、これらの手法による LPFG の製作は、高価なレーザ発生装置や放電機器を必要とし、一度作製された LPFG は、その特性 (周期、長さ、位置、屈折率変化量等) を任意に変えることは困難である。

これに対して安価でシンプルな LPFG 作製法が報告されている。機械的に屈折率変化を生じさせる方法である。周期的な凹凸をもつ金属板によるファイバへの加圧で屈折率変化を生じさせる手法 [10]、ナイロン線を周期的にファイバに巻き付け屈折率変化を生じさせる方法 [11] 等である。これら機械的手法による製作の場合は、製作中も製作後も減衰波長はほとんど変動しない [10],[11]。また、減衰量も機械的に加える圧力量を調整することで可変となる。

一方、減衰波長を可変とするいくつかのチューナブル LPFG が提案されている。アニール処理後にファイバ外周部に屈折率の異なる媒質を局部的に装加する方法 [8]、周期的な凹凸をもつ金属板を用いる手法においてファイバと金属板との接触角度を変えることにより

[†] 香川大学工学部, 高松市
Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Haya-
shimachi, Takamatsu-shi, 761-0396 Japan

^{††} 伸興電線株式会社, さぬき市
Shinko Electric Wire Co.,Ltd., 1298-12 Shido, Shido-cho,
Sanuki-shi, 769-2101 Japan

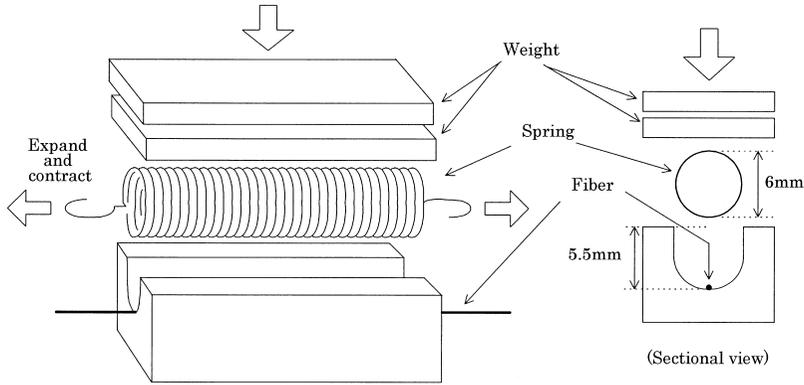


図1 機械式チューナブルLPFGの構成

Fig. 1 Configuration of mechanically induced tunable long-period fiber grating.

周期を変化させる方法 [10], エッチングによりクラッド径を変えることで結合状態を変化させる方法 [11] 等である。これらの手法は、簡便性、パッケージ化等の面において実用化が困難である。また、減衰波長及び減衰量の可変性に関する細かい報告はなされていない。

LPFG を実際に利用する場合、アプリケーションの要求に合わせて減衰波長と減衰量を簡単な方法でチューニングできれば、広い範囲で応用が期待できる。本論文では、スプリングを用いた機械式チューナブルLPFG を提案し、実際に作製したLPFG の減衰波長及び減衰量に関する測定を行った。得られたデータを用いて、減衰波長領域を細かくチューニングできることを示す。

2. チューナブルLPFGの製作

LPFG ではコアを伝搬してきた光波の一部がクラッドモードと結合する条件が現れる。クラッドモードは、光ファイバのガラス部分全体をコアと感して振舞う伝搬形態であり速やかに減衰する。結合条件を満たす波長 λ_p は、コア伝搬光の実効屈折率 n_{core} 、 m 次クラッドモードの実効屈折率 n_{clad}^m 、屈折率変化の周期 Λ を用いて、

$$\lambda_p = \Lambda(n_{core} - n_{clad}^m) \quad (1)$$

で与えられる。コア伝搬光が損失を受ける波長は、結合するクラッドモードの次数に応じて複数存在する [4],[6]。式 (1) より Λ を可変に調整できるLPFG なら λ_p を制御できることは明らかである。

ファイバに圧力を加えると、光弾性効果により圧力点に屈折率変化が生じる。屈折率の変化量は加えられ

た圧力の大きさに比例する [3],[10],[11]。式 (1) で与えられる減衰波長 λ_p における減衰量は、コアモードと m 次クラッドモード間の結合係数に比例して大きくなる [3],[6],[8]。この結合係数は屈折率の変化量に比例するので [1],[5],[10],[12]、ファイバへの加圧量を調整すればコア伝搬光とクラッドモードとの結合効率に変化し、 λ_p における減衰量を制御することが可能となる。以上の原理に基づき、 Λ を可変とするチューナブルLPFG を製作する。

提案する機械式チューナブルLPFG の実験システムを図1に示す。スプリングの外径に合わせたU字溝をもつ台座（金属製）の最底部にファイバを通し、そのファイバ上にスプリングをセットし、そのスプリングの上に重りを載せる構成である。重りによりスプリングの外周部の各点がファイバへ圧力をかけることになり、これにより周期的な屈折率変化を生じさせる。 Λ をスプリングの伸縮により可変とし、その伸縮量はマイクロメータを取り付けたスライド型伸縮器で調整した。これにより $1 \mu\text{m}$ 以下のオーダで Λ を連続的に可変できる機構を実現した。また、ファイバへの加圧量は重りの重さで調整することとした。スプリング台の深さは、スプリングの外径より若干浅くし、重りによる圧力がバランス良く効果的にファイバへかかる構造とした。本研究で用いたスプリングはステンレス製で、線径 0.5 mm 、コイル部外径 6 mm 、コイル部長さ 40 mm の引張りコイルばねである。形成するLPFG のグレーティング長はU字溝台座の長さで決められ、本実験では 40 mm である。光ファイバはコーニング社製シングルモードファイバSMF-28を使用した。ファイバの被覆はとらず、直径 $250 \mu\text{m}$ の素線のみで利

用した。

3. チューナブルLPFGの特性評価

図1の構成でファイバに圧力をかけることにより、提案するLPFGの透過特性を測定した。広帯域（白色）光源若しくはASE（Amplified Spontaneous Emission）光源からの光波をLPFGを形成したファイバに入射し、その透過光のスペクトルを光スペクトルアナライザで観測した。 Λ を0.6mm及び0.625mmとしたときの1400~1650nmにおける透過特性を図2に示す。 Λ が増加すると減衰帯域が長波長側へシフトしている。図のようにこの波長帯では大きな減衰帯域が3箇所現れる。これまで報告された機械式LPFGの広帯域透過特性と同様である[10],[11]。本論文では各減衰帯域を短波長側より第1、第2及び第3減衰帯域と呼ぶこととする。

スプリングの伸縮により Λ を変化させながらLPFGの透過スペクトルの変化を測定した。 Λ の変化に対する第1、第2及び第3減衰帯域の中心波長の変動を図3に示す。図から分かるように減衰帯域によって変動係数は異なるが、各減衰中心波長ともスプリングの伸びによる Λ の増加と波長変化は比例している。これは、スプリングを用いた Λ の制御が有効であることを示している。図3は、スプリング長を約43mmから53mmまで伸長した結果であり、更にスプリングを伸ばすことは可能な状態であった。このことから、このスプリング1個で300nm程度の範囲で減衰帯域を任意に設定できることが分かった。

LPFGのフィルタ機能は、図3で示した広帯域にお

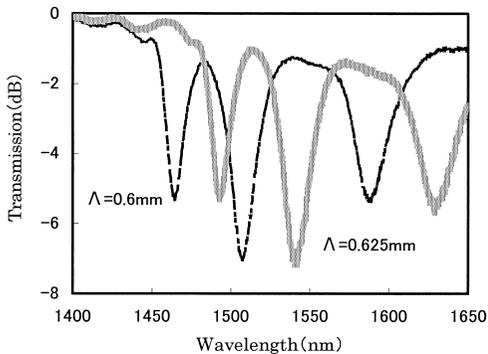


図2 Λ を0.6mm及び0.625mmとしたときの透過スペクトル
Fig.2 Measured transmission spectra of gratings with $\Lambda = 0.6$ mm and 0.625mm.

ける減衰波長の可変性だけでなく、特定の帯域において細かく波長値を制御できることも重要である。そこで、スプリングの微小な伸びによる Λ の増加に対する波長変動を測定した。前述の広帯域特性測定と同じ構成で、スプリング長を50 μ mずつ増加させ、第3減衰帯域の変動を求めた。スプリングの伸長は Λ に換算すると0.641 μ mずつの増加となる。 Λ を0.590mmから0.601mmまで変化したときの代表的な透過スペクトルを図4に示す。減衰中心波長に対して対称でひずみの少ない減衰特性が得られた。図2と同様、 Λ の増加により長波長側へのスペクトルシフトが観測された。図5は Λ の変化に対する減衰中心波長の変化を示している。 Λ の微小変化においても、減衰波長変動は Λ

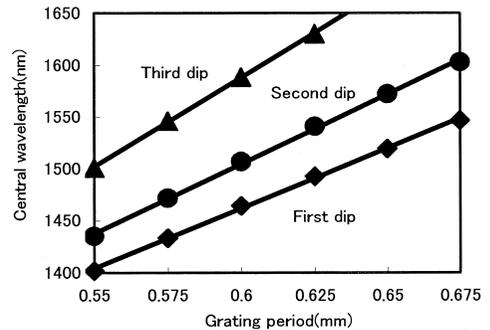


図3 Λ の変化による第1、第2及び第3減衰中心波長の変動
Fig.3 Spectral shift of the first, the second, and the third transmission dip in Fig.2 as a function of period.

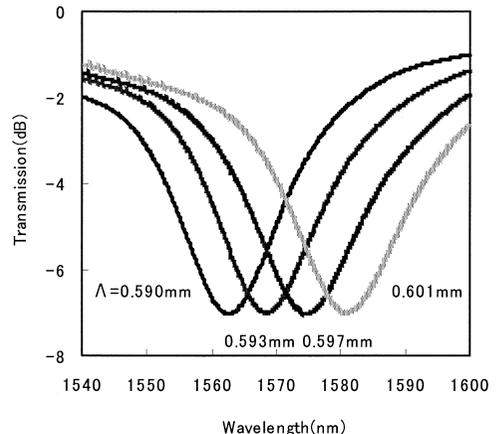


図4 微小間隔で Λ を変化させたときの透過波形の代表例
Fig.4 Measured transmission spectra for gratings with different periods.

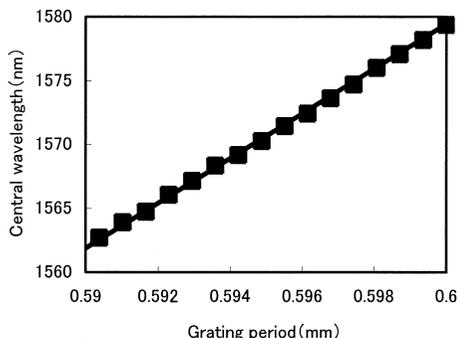


図5 微小間隔で Λ を変化させたときの減衰波長変動
 Fig.5 Measured resonance wavelength for gratings with different periods, obtained by expanding the spring.

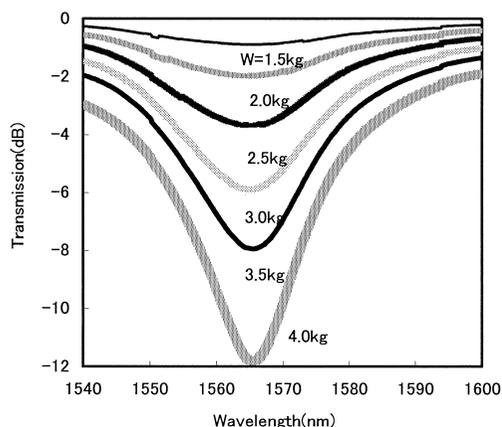


図6 重りの変化による透過スペクトルの変動
 Fig.6 Measured transmission spectra of a grating with $\Lambda = 0.593$ mm measured for an applied weight increasing from 1.5 kg to 4.0 kg.

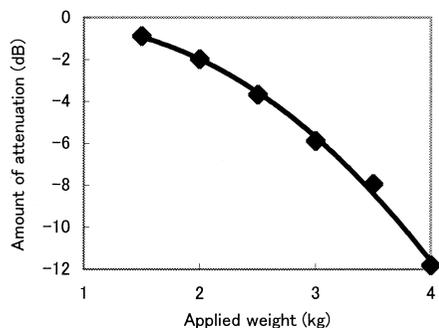


図7 重りの変化による減衰量の変動
 Fig.7 Measured attenuation of a grating with $\Lambda = 0.593$ mm measured for an applied weight increasing from 1.5kg to 4.0kg.

に比例している．これにより広帯域においても狭帯域においてもスプリングの伸縮を調整すれば，減衰中心波長を細かく制御できることが分かった．なお，この狭帯域における微小波長変動の制御は，今回報告した 1560 ~ 1580 nm 帯域のみならず，このスプリングで可変可能と思われる約 300 nm の範囲で有効であると考えられる．

次にスプリングに載せる重りの重さと減衰量の関係を測定した． $\Lambda = 0.593$ mm とし，重りの重さを 1.5kg から 4.0kg まで 0.5kg 間隔で増加させた．得られた透過スペクトルの変化を図 6 に示す．これまで同様，第 3 減衰帯域の変動の様子である．ほかでも報告されているとおり [10],[11]，減衰中心波長を変えることなく，重りの重さの増加に従って減衰量は増加している．このことは LPFG をイコライザ等で利用する場合，目標波長値を維持したまま減衰量を調整できるため大きなメリットである．重りの変化に対する減衰量の変動を図 7 に示す．両者の関係を二次曲線で近似した結果，図のようにフィットした．これにより重りが数 kg までの範囲においては，対数比で表す減衰量は重りの重さの二次関数で与えられることが明らかになった．

以上の実験により，提案するチューナブル LPFG では，スプリングの伸縮と荷重の調整で減衰波長領域を細かく制御できることを確認した．

4. チューナブル LPFG による ASE 光源の出力平坦化

提案したチューナブル LPFG を用いて，ASE 光源の出力平坦化を試みた．ASE 光源からの出力光を LPFG を形成した光ファイバに入射し，その透過光を

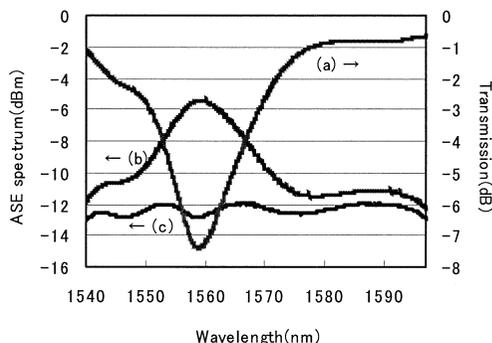


図8 ASE 光源の出力平坦化に応用した例
 Fig.8 The example which used the LPFG as an equalizer for ASE light source.

スペクトルアナライザでモニタしながらスプリングの伸縮量と荷重を調整し、出力スペクトルの平坦化を行った。図8に平坦化前後のASE光源の出力波形及びLPFGの透過スペクトルを示す。特別な技術を必要とせず、簡単な作業で利得等化器を作製することができた。測定の結果、1541～1596 nmの範囲において0.85 dBの平坦度が得られた。この実験により、提案したチューナブルLPFGは多様な発光スペクトルに対して柔軟に対処することができ、平坦化に有効であることが分かった。また、発光スペクトルの経年変化等に対しても、同じLPFGの再調整で対応できることも明白である。

5. む す び

提案したチューナブルLPFGは、スプリングの自在性により屈折率変化の周期を任意に変える単純な機構であるが、報告したように減衰波長領域を細かく制御できた。図1の構成において重りの位置に金属板をセットし、スプリングを押さえる形でその金属板をスプリング台にビス止めすれば、その固定する強度により減衰量を制御できる。また小型の伸縮器をスプリング台に取り付け、スプリング長を可変とする構造にすれば、実験用だけではなく実用可能なLPFGになると考えられる。

文 献

- [1] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, vol.14, no.1, pp.58-64, Jan. 1996.
- [2] 金森弘雄, "ファイバグレーティング," *信学誌*, vol.82, no.7, pp.731-739, July 1999.
- [3] 春本道子, 茂原政一, 金森弘雄, "長周期ファイバグレーティングの損失特性の張力依存性," *信学技報*, OFT98-9, April 1998.
- [4] 茂原政一, 榎本 正, 春本道子, 石川真二, 金森弘雄, "残留応力緩和型長周期グレーティング," *信学技報*, OPE97-154, Feb. 1998.
- [5] L. R. Chen, "Phase-shifted long-period gratings by refractive index-shifting," *Opt. Commun.*, vol.200, pp.187-191, Dec. 2001.
- [6] 春本道子, 茂原政一, 菅沼 寛, "長周期ファイバグレーティング利得等化器," *信学技報*, OPE2000-115, Dec. 2000.
- [7] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, vol.21, no.9, pp.692-694, May 1996.
- [8] 松村 幌, 西 壽巳, 西井準治, "ポストチューニング可能な長周期ファイバグレーティングの提案と特性評価," *信学技報*, PS2001-94, OFT2001-91, OPE2001-135, LQE2001-121, Jan. 2002.
- [9] B.H. Kim, T.-J. Ahn, D.Y. Kim, B.H. Lee, Y. Chung, U.-C. Paek, and W.-T. Han, "Effect of CO₂ laser irradiation on the refractive-index change in optical fibers," *Appl. Opt.*, vol.41, no.19, pp.3809-3815, July 2002.
- [10] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol.25, no.10, pp.710-712, May 2000.
- [11] G. Rego, J. R. A. Fernandes, J. L. Santos, H. M. Salgado, and P. V. S. Marques, "New technique to mechanically induce long-period fibre gratings," *Opt. Commun.*, vol.220, pp.111-118, 2003.
- [12] C. Kakkar and K. Thyagarajan, "Novel fiber design for broadband long period gratings," *Opt. Commun.*, vol.220, pp.309-314, 2003.

(平成16年6月3日受付, 7月8日再受付)



横内 孝史 (正員)

1986法政大・法・法卒。1999より香川大学工学部技術職員。主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。



須崎 嘉文 (正員)

1987阪大大学院工学研究科修士課程了。1988高松工業高等専門学校講師, 1997同校助教授, 2000より香川大学工学部助教授。工博。主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事。精密工学会, 応用物理学会, 日本材料学会各会員。

中川 清 (正員)

1986神戸大大学院工学研究科修士課程了。1987神戸大学工学部助手, 2001より香川大学工学部助教授。博士(工学)。主として光学情報処理・応用光学に関する研究に従事。応用物理学会, 日本光学会各会員。



江島 正毅

1973米国コロロンビア大大学院理工学部博士課程了。同年米国プリンストン大学プラズマ研究所ポスドク, 1974米国ゼネラルアトミック社, 1987信越化学工業(株)精密機能材料研究所, 2000より香川大学工学部教授。Ph.D.。主として光通信用デバイス及び素材に関する研究に従事。応用物理学会, 米国物理学会, 米国光学会, 日本材料学会各会員。



山内 誠 (正員)

2002 香川大・工・知能機械システム卒．同年伸興電線(株)入社，現在技術部所属．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



木村 雅則

1995 香川職業能力開発短期大・制御技術卒．同年伸興電線(株)入社，現在製造部所属．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



水谷 康男

1986 東海大・工・応用物理卒．同年伸興電線(株)入社，2002 より技術部主任．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．



木村 進

1972 横浜国大・工・電気化学卒．1984 伸興電線(株)入社，2002 より同社技術部長．主として光通信用ファイバデバイスに関する研究に従事．