

長周期ファイバグレーティング透過スペクトルの長さ依存性[†]

佐藤 悠介* 横内 孝史* 岩田 弘*
須崎 嘉文*** 江島 正毅**

Dependence on Grating Length of Transmission Spectra of Long-Period Fiber Bragg Grating

by

Yusuke SATO*, Takashi YOKOUCHI*, Hiromu IWATA*, Yosihumi SUZAKI*** and Seiki EJIMA**

We have designed mechanically induced long period fiber grating (LPFG) in which the grating length can be changed to any value up to 16cm as we desire. Measurement of the dependence of the transmission spectrum on the grating length showed that the spectrum became sharper as the grating length was increased until about 10cm, and beyond this length the sharpness of the spectrum remained almost the same.

Key words: Long-period fiber bragg grating, Grating length

1 緒 言

近年、インターネットの普及などにより、通信に対する需要は急速に増加し、光通信技術に対する期待は大きい。長周期ファイバグレーティング (LPFG) は光増幅器の利得等化器等に用いられる光フィルタ機能を有する¹⁾通信デバイスであり、それにとどまらず、さらにはセンサー、各種測定器、医療機器等々の幅広い分野への応用が期待される^{2), 3)}優れたメリットを持った光ファイバ型デバイスである。

通常、LPFG はファイバの長手方向に数十〜数百 μm 間隔で、周期的に紫外光を照射することにより作製される。しかし、紫外光を照射して LPFG を作製する場合、大掛かりな設備を必要とし、また、作製直後の特性が不安定なため^{4), 5)}その特性を事前に予測することは難しい。これに対し、安価にファイバに LPFG を作製する方法として、機械式 LPFG が提案されている^{6), 7)}これは、ファイバを側面から周期的な突起により押さえつけることで密度変化による周期的な屈折率変化を形成する手法である。この手法により作製された LPFG は作製後にも任意に LPFG の各寸法を変更することができ、また製作中も製作後も特性の変化が少ないメリットを持っている^{8), 9)}本研究は、この機械式 LPFG を用いて LPFG の透過スペクトルについて、グレーティング長に対する依存性について評価を行った。この研究によるメリットを2つ挙げる。

まず、各用途においてのデバイス長を決定する判断材料を得られることである。LPFG には前述のように様々な用途があり、目的により必要とする減衰特性は異なる。また、デバイスとして小型であることは計測機器などに用いられる場合などにおいても有利である。グレーティング長に対する減衰特性を測定することで、各用途にお

いて最低限必要なデバイス長を決定することができる。

次に、LPFG に必要十分なグレーティング長が分かることが挙げられる。グレーティング長を長くすることで、理論式より減衰効率を向上させられることが予想されるが、どのように減衰スペクトルが変動し、どこまで減衰効率を向上させられるかわからない。測定したスペクトルを他の文献と比較することで、実用に十分とされるグレーティング長を決定できる。

2 理 論

今回研究を行うにあたり、事前に調べた範囲において、LPFG の長さに対する透過特性は理論的に定式化されていることが確認できた^{9), 10)}が、実際に LPFG を用いて実験を行った文献はない。定式化されている LPFG の諸特性は、共振点でのパワー透過率を T として、次式で表せる^{9), 10)}

$$T = 1 - \frac{\sin^2\left(\kappa L \sqrt{1 + (\sigma/\kappa)^2}\right)}{1 + (\sigma/\kappa)^2} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}}^m - \frac{2\pi}{\Lambda} \right] \quad (2)$$

$$\kappa = k \frac{\Delta n}{2} \quad (3)$$

ここで、 κ は結合係数で屈折率変調量 Δn に比例し、 Λ 、 L はそれぞれ、グレーティング周期とグレーティング長である。式 (2) において、 β_{core} および β_{clad}^m は、それぞれコア伝搬光と m 次クラッド伝搬光の伝搬定数を表し、 σ はそれらの位相がどの程度揃っているかを表す位相整合条件である。つまり、位相整合条件 σ は共振点からのズレを表す指標である。これらの式より、グレーティング長、若しくは屈折率変調量が大きくなるほど、減衰量が

[†] 原稿受理 平成 21 年 5 月 7 日 Received May 7, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 高松工業高等専門学校 〒769-8058 高松市勸使町, Takamatsu National College of Tech., Chokushi-cho, Takamatsu, 761-8058

** 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町, Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

*** 正 会 員 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町, Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

大きくなり、パワー透過率はゼロに近づくことが分かる。

すでに、屈折率変調量により減衰量を制御できることは他の文献より報告されている。よって本論文では実験により LPFG の長さによる特性の変動を求めた。式 (1) および式 (3) より、最大減衰量を 10dB に固定して横軸を位相整合条件 σ 、縦軸にパワー透過率 T をとり、グレーティング長の変化に対する透過スペクトルの変動をシミュレーションした。結果を Fig. 1 に示す。

3 実験方法

今回、グレーティング長の変化に対する透過スペクトルの変動を調べるため、Fig. 2 に示すグレーティングデバイスを作製した。このデバイスはエナメル線をアルミ板に隙間なく巻きつけることで、エナメル線の線径 0.637mm のグレーティング周期を持つ。グレーティングデバイスをファイバに対して斜めに押し当てることにより、作製したグレーティングデバイスの形状による制限から、最大で約 36° 、グレーティング周期にして約 0.787mm まで微調整できる。なお、グレーティングデバイスの角度はベベルプロトラクタをあてがって測定した。また、グレーティングデバイスの下には金属板を置き、ファイバをグレーティングデバイスと金属板で挟んだ。これにより、金属板の長さを変更することで、グレーティング長を任意に変更できる機構とした。実験では、このグレーティングデバイスにより LPFG の形成されたファイバに対し、光源から光波を入射し、光スペクトラムアナライザで透過スペクトルを観測した。光源には ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源と白色光源を用

意した。それぞれの定格出力波長帯域は 1530 ~ 1560nm (C バンド) と 500nm~1700nm である。なお、実験に使用したファイバは一般的に用いられている Cornig 社の SMF-28CPC シングルモードファイバ (コア直径: 8.3 μ m, クラッド直径: 125 μ m, 開口数 NA: 0.11) である。

作製した可変グレーティング長 LPFG の特性評価をするため、透過特性を観測した。評価方法として、上記 2 種類の光源を用いて、グレーティング長 10cm の時の広帯域と局所帯域での透過スペクトルを観測した。

まず、広帯域での透過スペクトルを観測するため、白色光源を用いて観測を行った結果を Fig. 3 に示す。このとき、グレーティングデバイスをおしつける角度は 20° 、グレーティング周期にして約 0.675mm とした。観測結果には大きな減衰帯域が 3 つ現れる。これはこれまで報告されている機械式 LPFG^{9), 8)} の広帯域透過特性と同様である。本論文では、それぞれ短波長側から第 1, 第 2, 第 3 減衰帯域と呼ぶこととする。

次に局所帯域での透過スペクトルを観測するため、ASE 光源を用いて第 2 減衰帯域を観測したものを Fig. 4 として示す。グレーティング周期は 0.665mm に調整した。Fig. 4 より、最大減衰波長を中心にして、両側に減衰が続く V 字の減衰が得られた。これらの結果より、試作した可変グレーティング長 LPFG は別の方法で作られた機械式 LPFG^{9), 8)} と一致し、また報告されている紫外光を照射する方法で作成された LPFG^{1), 4)} と同様な透過スペクトルを持つことが確認でき、今回の実験により得られる結果は様々な LPFG についていえる。

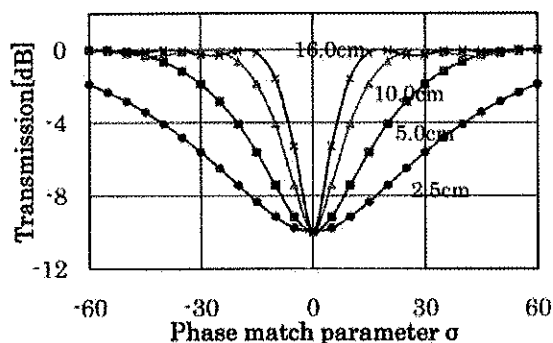


Fig. 1 Theoretical determination of the relationship between grating length and transmission spectra.

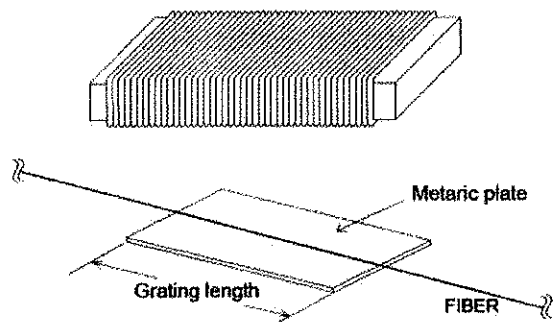


Fig. 2 Setup for mechanically tuning an LPFG using a coiled metallic cable.

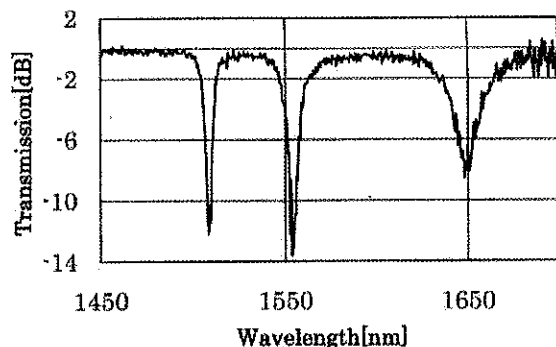


Fig. 3 Measured transmission spectrum of LPFG using white light source.

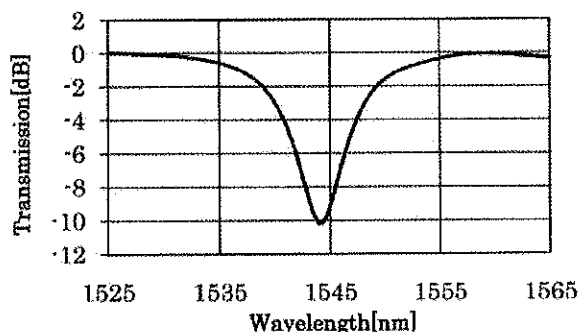


Fig. 4 Measured transmission spectrum of LPFG using ASE light source.

4 実験結果

作製した可変グレーティング長デバイスを用いて第3章と同様の実験環境で透過スペクトルを観測した。透過スペクトルの形状からグレーティング長への依存性を比較するため最大減衰量は上からのせる鍾の量を加減して10dBで規格化した。同様にグレーティング周期は、減衰帯域が1545 [nm] 付近に生じるようにするため、グレーティングデバイスの角度を約17°に傾け、グレーティング周期 $\Lambda = 0.667\text{mm}$ で規格化して測定を行った。なお、光源はASE光源を用い、金属板は合計11個用意した。その代表例として2.5cm, 5.0cm, 10.0cm, 16.0cm, 計4つの観測結果をまとめてFig. 5として示す。得られた透過スペクトルから、グレーティング長と透過スペクトルの急峻性の関係をFig. 6として計11のグレーティング長についてグラフに示した。グラフ上、グレーティング長は横軸にとり、透過スペクトルの急峻性として縦軸には半値幅 (FWHM: Full width half maximum) を用いて規格化し、ピークから3 [dB]下がったところのスペクトル幅をnm単位で表した。なお、各点から急峻性の変動を近似曲線で同図上に示した。Fig. 6より、グレーティング長の増加にともない、半値幅は減少し、急峻性が良くなっていることが分かる。また、グレーティング長10cm, 13cm, 16cmのときの半値全幅の変化量を見る限り、急峻性の変動は飽和に近付いているといえる。

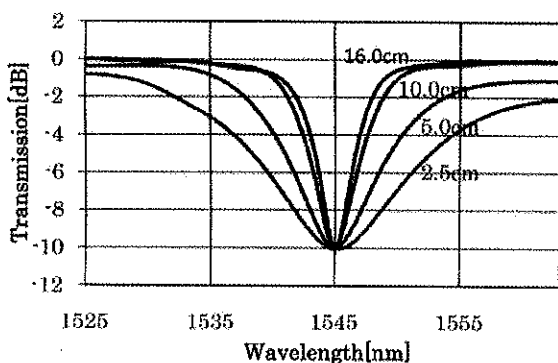


Fig. 5 Measured transmission spectra of LPFGs with grating lengths $L = 2.5, 5.0, 10.0$ and 16.0cm .

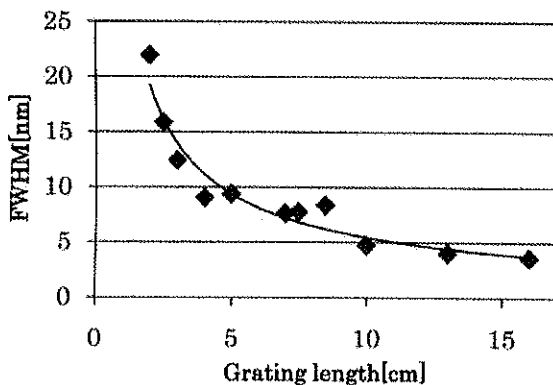


Fig. 6 Full width at half maximum of LPFGs with grating lengths.

5 考察

Fig. 1に示した理論式からの透過スペクトルの変動と実験結果を比較すると、理論通りの結果が得られており、グレーティング長を長くすることで、透過スペクトルは急峻になることが確認できた。また、Fig. 6より、グレーティング長に対する透過スペクトルの急峻性の変動は10cm付近まで急激に変化し、10cmを超えたあたりからその変化は飽和している。これは、理論式のように透過量に対する減衰量がsin関数で与えられるためである。この点から、LPFGを作製する場合において、10cm以上のグレーティング長は不必要であるといえる。

また、グレーティング長が10cm以内、つまりグレーティング長により透過スペクトルの急峻性が大きく変化する領域において、以上の結果からグレーティング長を調整することで、透過スペクトルの形状を急峻性の面で任意に制御できると考えられる。

6 結論

本論文では、LPFGのグレーティング長を変更することで、透過スペクトルがどのように変動するのかを測定することを目的としている。通常の紫外光を用いて作製するLPFGは大掛かりな設備を必要とし、またその製作直後の特性は不安定であり、今回のような実験においては利便性に欠ける。そこで、作製後の特性の変化が少ない機械式LPFGを用いることで、グレーティング長の変更に対する透過スペクトルを観測した。実験に使用したLPFGはグレーティング長を任意に変更できるように作製したものであり、秀逸な透過スペクトルが観測できた。これは他の文献との比較による判断であり、機械式LPFGは紫外光を照射して作製したLPFGと同様な透過特性を持つ。

グレーティング長の変化による透過スペクトルの急峻性の変化をグラフとして示したことは本研究室で行っているチューナブルオプティカルフィルタに適用できる研究成果といえる。本研究室で提案しているチューナブルオプティカルフィルタは異なった透過スペクトル特性を持たせたチューナブルLPFGを縦列接続することで、様々な透過スペクトルを作り出すデバイスである。チューナブルオプティカルフィルタに、グレーティング長の変化を加える事で、透過スペクトルの形状を、さらに様々に変化させることができる。透過スペクトルを多様に変化させることは、光増幅器の利得等化器として利用する場合において非常に有利である。

しかし、今回実験により得られたデータは、Fig. 6のようにばらつきが多くみられる。これはグレーティング装置の不具合や、測定上の不具合によるものと考えられ、今後の研究内容として、実験装置の改良とともに、更に細かくグレーティング長を変更して急峻性に変動に関して信頼性のあるデータを取得していく予定である。

参 考 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", *Journal of Lightwave Technology*, Vol.14, No.1, pp.58-64 (1996).
- 2) M. Harumoto, M. Shigehara and H. Kannuma, "Gain Flattening Filter using Long-Period Fiber Gratings", TECHNICAL REPORT OF IEICE, OPE2000-115 (2000).
- 3) V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-Period grating sensors", *Optics Letters*, Vol.21, No.9, pp.692-694 (1996).
- 4) M. Shigehara, T. Enomoto, M. Harumoto, S. Ishikawa and H. Kanamori, "Long-period grating written by residual stress relaxation", TECHNICAL REPORT OF IEICE, OFT97-154 (1998).
- 5) A. Matsumura, H. Nishi and J. Nishii, "Proposal and characteristic evaluation of post-tunable long-period fiber grating", TECHNICAL REPORT OF IEICE, PS2001-94, OFT2001-91, OPE2001-123, LQE2001-121 (2002).
- 6) S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino and J. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings", *Optics Letters*, Vol.25, No.10, pp.710-712 (2000).
- 7) T. Yokouchi, Y. Suzuki, K. Nakagawa, S. Ejima, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani and S. Kimura, "Fabrication and Estimation of Mechanically Induced Tunable Long-Period Fiber Grating", *The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Vol.89, pp.22-27 (2005).
- 8) G. Rego, J. R. A. Fernandes, J. L. Santos, H. M. Salgado and P. V. S. Marques, "New technique to mechanically induced long-period fiber gratings", *Optics Communications*, Vol.220, pp.111-118 (2003).
- 9) K-S. Chiang "Widely tunable long-period waveguide grating filters, Asia-Pacific Optical and Wireless Communications Conference and Exhibition (APOC-2006), Paper 6351-167 (2006).
- 10) S. Ishikawa, M. Shigehara, T. Enomoto and M. Harumoto, "Thermal Decay Analysis for Long-Period Optical Fiber Grating Written by UV-induced index change", TECHNICAL REPORT OF IEICE, OCS99-79, OPE99-83, LQE99-80 (1999).