

# ポイント露光法によって作製した長周期ファイバグレーティングにおけるスペクトル特性のシミュレーションを用いた検討<sup>†</sup>

須崎 嘉文\* 澤村 容平\*\* 今竹 史典\*\*  
岩田 弘\*\*\* 横内 孝史\*\*\*\* 江島 正毅\*\*\*\*\*

## Characterization with the Simulation of Transmission Spectra in Long-Period Fiber Grating Fabricated by the Point Exposure Method

by

Yoshifumi SUZAKI\*, Yohei SAWAMURA\*\*, Fuminori IMATAKE\*\*, Hiromu IWATA\*\*\*,  
Takashi YOKOUCHI\*\*\*\* and Seiki EJIMA\*\*\*\*\*

Long-Period Fiber Gratings (LPFGs) which have a periodic structure in the refractive index in the longitudinal direction of the fiber with a period of about 0.5 mm, convert incident light in the fundamental LP<sub>01</sub> mode into higher-order LP<sub>0m</sub> modes through mode coupling. Because the higher-order modes cannot propagate in a single-mode fiber but are lost outside the fiber, an LPFG works as an attenuator. LPFGs with different Bragg wavelengths were fabricated by using the point exposure method in which the period was freely changed. Just after excimer laser light exposure, transmission spectra of LPFGs were measured. Furthermore, compared to the simulation, the higher-order modes of peaks in the transmission spectra of experimentally fabricated LPFGs were identified.

**Key words:** Long-period fiber grating, Higher order mode, Transmission spectra

### 1 緒 言

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)<sup>1)</sup>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、<sup>2)</sup>作製の簡便性、低反射、低挿入損失等の優位性によって、<sup>3)</sup>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。<sup>4)</sup>LPFG の作製は、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方法、あるいは、スポット状に絞った紫外光を一定周期で照射するポイント露光法<sup>5)</sup>によって屈折率変化を生じさせるのが一般的である。また、炭酸ガスレーザやアーク放電によって周期的に屈折率変化を与える方法<sup>6)</sup>や周期的な凹凸をもつ金属板やスプリング側面による加圧によって機械的に屈折率変化を与える方法<sup>7)~9)</sup>などが報告されている。

LPFG ではコアを伝ば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じて振舞う伝ば形態であり速やかに減衰する。結合条件を満たす波長  $\lambda_B$  は次式で表される。

$$\lambda_B = (n_{eff}^{01} - n_{eff}^{0m}) \cdot \Lambda \quad (1)$$

ここで  $n_{eff}^{01}$  と  $n_{eff}^{0m}$  はそれぞれ、基本コアモード(LP<sub>01</sub>)および m 次クラッドモード(LP<sub>0m</sub>)における実効屈折率である。また、 $\Lambda$  は屈折率変化の周期である。基本コアモード LP<sub>01</sub> の伝ばはコアに集中するため  $n_{eff}^{01}$  はコアの実効屈折率( $n_{core}$ )に近い。一方、m 次クラッドモード(LP<sub>0m</sub>)は光ファイバ断面全体に広がるため  $n_{eff}^{0m}$  はクラッドの実効屈折率( $n_{clad}$ )に近い。式(1)により波長  $\lambda_B$  の計算が容易にみえるが、実際には、紫外光の照射条件による実効屈折率変化について理論的に求めることは難しく、高次モードのピークを同定しスペクトル特性を求めることは容易ではない。したがって、実行屈折率変化を仮定した計算機シミュレーションを行い、比較検討することが必要である。

本研究においては、ポイント露光法を用いることによって周期、紫外線照射時間、および、繰り返し回数を変化させた LPFG を作製し、その透過スペクトルを光スペクトルアナライザによって観測した。さらに、シミュレーションと比較することによって、高次モードの各ピークを同定し、スペクトル特性について検討することを目的とした。

<sup>†</sup> 原稿受理 平成 21 年 11 月 9 日 Received Nov. 9, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

\* 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

\*\* 香川大学大学院工学研究科 〒761-0396 高松市林町, Graduate School of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

\*\*\* 香川高等専門学校機械工学科 〒761-8058 高松市勸使町, Dept. of Mech. Eng., Kagawa National College of Tech., Chokushi-cho, Takamatsu, 761-8058

\*\*\*\* 香川高等専門学校電気情報工学科 〒761-8058 高松市勸使町, Dept. of Electrical & Computer Eng., Kagawa 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

## 2 シミュレーション

透過スペクトルのシミュレーションには, Optiwave Corporation 製, IFO\_grating プログラム<sup>10)</sup>を用いた。このプログラムは, 光ファイバの仕様条件 (例えば周期 ( $\Lambda$ ), コアにおける屈折率変調 ( $\Delta n$ ) および繰り返し回数 ( $m$ )) に対して透過および反射スペクトルを計算することができる。光ファイバの基本仕様は SMF-28 シングルモードファイバの仕様を用い, コアの実効屈折率 ( $n_{core}$ ) およびクラッドの実効屈折率 ( $n_{clad}$ ) はそれぞれ, 1.44955 および 1.4443 とした。また, コアおよびクラッドの直径はそれぞれ,  $9\mu\text{m}$  および  $125\mu\text{m}$  とした。屈折率変調の形状を矩形と仮定した。Fig. 1 に, LPFG の典型的な透過スペクトルシミュレーションを示す。コアの屈折率変調  $\Delta n = 0.0001$ , 周期  $\Lambda = 500\mu\text{m}$ , 繰り返し回数  $m = 84$  (全長  $L = 42\text{mm}$ ) として計算した。Fig. 1 において,  $1200 \sim 2000\text{nm}$  の波長範囲において 5 つのピークをみることができる。式 (1) を用いた計算によって, これらのピークは  $\text{LP}_{02} \sim \text{LP}_{06}$  と同定することができた。Fig. 2 に, 高次モード ( $\text{LP}_{02} \sim \text{LP}_{05}$ ) のシミュレーション結果と周期との関係を示す。周期が増加すると高次モードのそれぞれのピーク波長が長波長側に移動することがわかる。

## 3 LPFG の作製

Fig. 3 に, 我々のポイント露光法による LPFG 作製装置を示す。エキシマレーザ (Lamda Physik 製, COMPex-

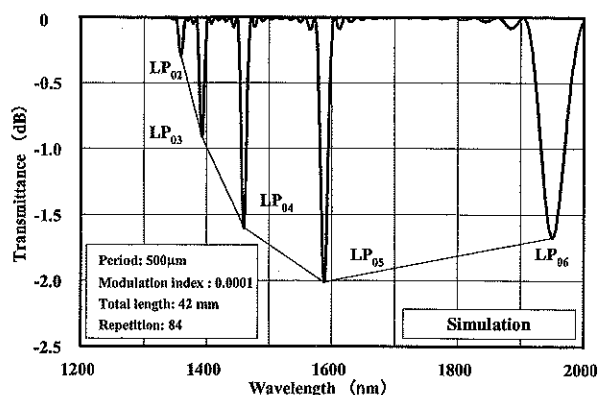


Fig. 1 The simulated typical spectrum of LPFG with modulated refractive index in the core  $\Delta n = 0.0001$ , period  $\Lambda = 500\mu\text{m}$  and repetition  $m = 84$  (total length  $L = 42\text{mm}$ ).

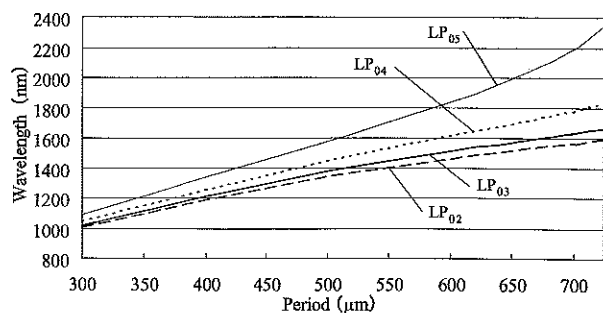


Fig. 2 The relationship between the period and simulated wavelength of the peaks of higher-order modes ( $\text{LP}_{02} \sim \text{LP}_{05}$ ).

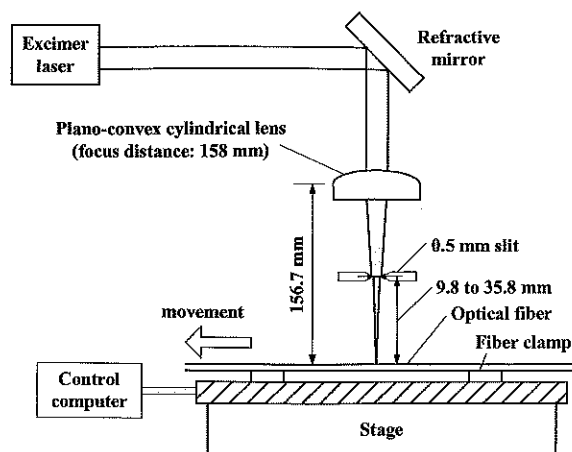


Fig. 3 Schematic diagram of our experimental setup of the point exposure method.

102) からの紫外光は, 波長:  $248\text{nm}$ , エネルギー:  $120\text{mJ/pulse}$ , パルス幅:  $25\text{ns}$ , 繰り返し周波数:  $20\text{Hz}$  とした。  $8 \times 24\text{mm}^2$  の断面積の出力光から,  $7 \times 7\text{mm}^2$  の強度の均一な部分 ( $30\text{mJ/pulse}$ ) を切り出して使用した。光線はミラーによって下方向へ反射し, 焦点距離が  $186\text{mm}$  のシリンドリカルレンズ (シグマ光機製, 合成石英シリンドリカルレンズ, CLSQ-30100-200P) を通して, 光ファイバに対して垂直な方向に集光した。LPFG 作製時にはまず, 被覆除去した光ファイバをファイバクランプを用いてステージに固定し, シリンドリカルレンズから  $156.7\text{mm}$  の位置に配置した。これは, 光ファイバが焼き切れないように, 焦点距離よりも少し短くずらしている。しかしながら, 焦点からあまりずらし過ぎると光が弱すぎて LPFG を書き込むことができない。幅  $0.5\text{mm}$  のスリットをシリンドリカルレンズと光ファイバの間に配置した。作製する LPFG の周期の半分の幅に光を照射できるように, この高さを  $9.8 \sim 35.8\text{mm}$  の範囲で調整した。光ファイバとして, 基本的なシングルモードファイバ (Corning 社製, SMF-28) を用いた。LPFG 作製の前に, 光ファイバを  $10\text{MPa}$  の水素ガス中に 10 日間保管することによってファイバコアに水素ロードを行い, 紫外線感度を向上させた。作製する LPFG よりも  $2\text{mm}$  長い範囲で光ファイバの被覆を除去し, 超音波洗浄を行った後すぐに装置に固定し LPFG 作製を行った。ステージはパソコンによって制御を行い, 周期の長さ ( $400 \sim 750\mu\text{m}$ ) ずつ移動して, 照射時間 ( $10 \sim 15\text{s}$ ) の間停止する動作を  $100 \sim 300$  回繰り返した。また, ASE 光源 (Thorlabs 製, ASE-7701-AP,  $1.45 \sim 1.61\mu\text{m}$ ), および, スペクトルアナライザ (Advantest 製, Q8384) を用いて透過光スペクトルを観測しながら LPFG 作製を行った。

## 4 結果と考察

### 4.1 モード次数の同定

Fig. 4 (a)~(c) に, エキシマレーザ照射により LPFG を作製した直後の  $1450 \sim 1610\text{nm}$  における典型的な透過スペクトルを示す。照射時間  $15\text{s}$ , 繰り返し回数  $100$  回, 周期は (a)~(c) それぞれ,  $550, 600, 640\mu\text{m}$  の結

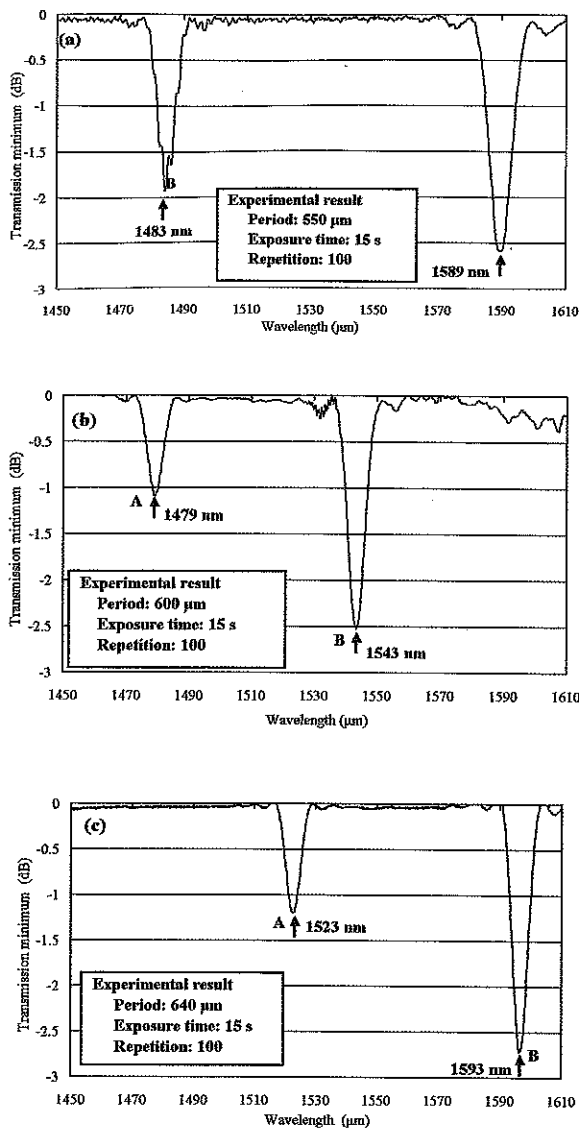


Fig. 4 Typical transmission spectra of LPFGs for wavelengths of 1450-1610nm, measured with an ASE light source just after fabrication by exposure to excimer laser light for the exposure time of 15s, 100times alternately with the period (a) 550, (b) 600 and (c) 640nm, respectively.

果である。Fig. 4 (a)においては、1483nm (図中 B) および 1589nm に 2 つのピークがみられる。周期 550 $\mu\text{m}$  における 1483nm のピークが、周期 600 $\mu\text{m}$  の Fig. 4 (b) においては、1543nm に移動し、さらに、周期 640 $\mu\text{m}$  の Fig. 4 (c) においては、1593nm に移動することがわかった。一方、Fig. 4 (b) において 1479nm に現れたピーク (図中 A) は、Fig. 4 (c) において 1523nm に移動していることがわかる。この 1523nm 以下の波長においてその他のピークがみられないことから、このピーク (図中 A) が LP<sub>02</sub> モードであると同定できた。

Fig. 5 に、透過スペクトルにおけるピーク波長と周期の関係を示す。図中の●プロットは、照射時間 15s、繰り返し回数 100 回の実験結果である。図中の実線は、コアにおける屈折率変調を 0.0001 とし、繰り返し回数 100

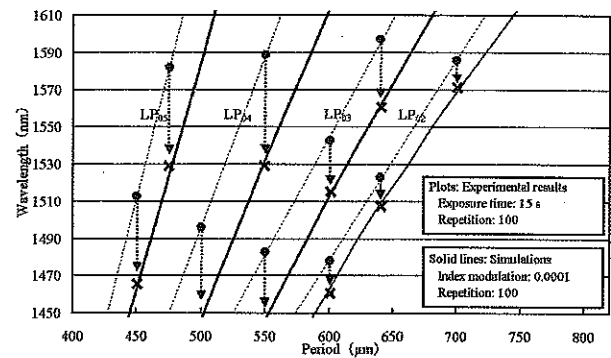


Fig. 5 The relationship between period and wavelength of peaks in the transmission spectrum.

回として計算したシミュレーション結果である。周期が 750 $\mu\text{m}$  よりも大きい場合、1450 ~ 1610nm の波長範囲において高次モードのピークがみられないことから、Fig. 5 中の一番右側の実線が LP<sub>02</sub> モードであると同定できた。また、他の 3 本の実線はそれぞれ右から順番に LP<sub>03</sub>、LP<sub>04</sub>、LP<sub>05</sub> モードであると同定できた。ここで、シミュレーションと実験結果を比較すると、実験結果のピーク位置が 10 ~ 70nm 程度、長波長側へずれていることがわかる。我々は、LPFG 作製後、50 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$  の熱処理を行うか、あるいは室温で 2 週間経過することによって、ピーク波長が短波長側へ 30 ~ 100nm 移動することを報告している<sup>11), 12)</sup> このピークの移動は、作製中の光感度をあげるために光ファイバコアにローディングした水素が抜けることに起因して、コアおよびクラッドの実効屈折率が変化することによる。今回の透過スペクトル測定は、LPFG 作製直後に行ったもので、Fig. 5 におけるピーク波長の長波長側へのずれは、以上の報告における傾向によって説明することができる。図中 × プロットは、作製した LPFG を室温で 2 週間放置した後のピーク位置測定結果を示したものである。それぞれのピークが短波長側に移動し、シミュレーション結果とほぼ一致したことがわかる。ただし、周期 500 $\mu\text{m}$  における LP<sub>04</sub>、および、周期 550 $\mu\text{m}$  における LP<sub>03</sub> モードのピークについては、2 週間放置後のスペクトルの測定範囲よりも長波長側へはずれたため測定できなかった。

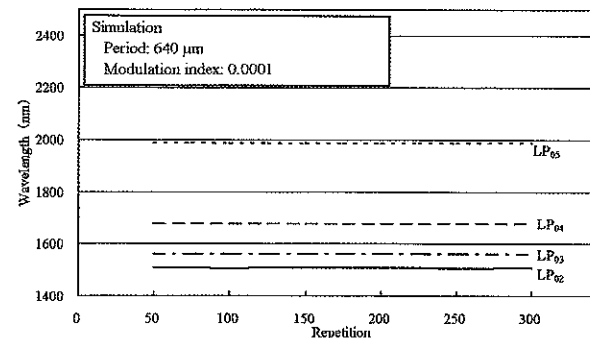


Fig. 6 The simulation of the wavelengths of the peaks of modes (LP<sub>02</sub>-LP<sub>05</sub>) in the transmittance spectrum with 50-300 repetitions when the period is 640 $\mu\text{m}$  and modulation of the refractive index is 0.0001.

#### 4・2 繰り返し回数の影響

LPFG 作製において, 一定時間紫外光を照射した後一定距離ステージを移動し, また一定時間の照射を繰り返す. Fig. 6 に, この繰り返し回数と各高次モード ( $LP_{02} \sim LP_{05}$ ) のピーク波長の関係についてシミュレーションによって計算した結果を示す. 屈折率変調は 0.0001, 周期は  $640\mu\text{m}$  とし, 繰り返し回数 50 ~ 300 回について計算した. 図より繰り返し回数を変えても, いずれのピーク波長も変わらないことがわかる. Fig. 7 に, 繰り返し回数を変えたときの透過阻止量の実験結果およびシミュレーション結果を示す. 図中の実線は, 屈折率変調を 0.00015, 周期を  $640\mu\text{m}$  としたシミュレーション結果であり, プロットは, 照射時間 15s, 周期  $640\mu\text{m}$  で作製した LPFG の測定結果である. シミュレーションにおいて  $LP_{02}$  モードの結果をみると, 繰り返し回数が増加するにしたがって透過阻止量が増加することがわかる. ところが,  $LP_{03}$  モードについては, 繰り返し回数 225 回までの範囲では透過阻止量が増加するが, 225 回以上 300 回までの範囲では減少している. この傾向は実験結果においてもみられる. すなわち  $LP_{03}$  モードにおいて, 繰り返し回数 200 回以下の範囲では増加し, 200 ~ 210 回において最大値をとり, それ以上の繰り返し回数においては透過阻止量が減少する. また,  $LP_{02}$  モードの実験結果においてもシミュレーションと同様に単調増加である. この結果から, 繰り返し回数を増加した場合, いずれのモードの透過阻止量も

増加するわけではなく, ある繰り返し回数において極大をとり, その後減少することがあることがわかった.

#### 4・3 紫外線照射時間の影響

紫外線照射時間を長くするにしたがって, コアの屈折率変調が大きくなると考えられる. Fig. 8 に, 周期を  $640\mu\text{m}$ , 繰り返し回数を 150 回とし, 屈折率変調を 0.00002 ~ 0.00011 の範囲で変化した場合の透過阻止量のシミュレーション結果を示す. 屈折率変調が増加するのにしたがって透過阻止量は,  $LP_{02}$  モード,  $LP_{03}$  モードいずれにおいても増加することがわかる. Fig. 9 に, 周期を  $640\mu\text{m}$ , 繰り返し回数を 150 回, 紫外線照射時間を 5 ~ 30s として作製した LPFG の透過スペクトルにおける  $LP_{02}$  モード (1522nm), および,  $LP_{03}$  モード (1596nm) のピークにおける透過阻止量を示す. 30s を超える照射時間においては, 光ファイバーが焼き切れてしまったため透過スペクトルを測定することはできなかった. シミュレーションと実験結果は同様の傾向を示しており, LPFG 作製時の紫外線の照射時間を増加することによって屈折率変調も増加し, 透過阻止量が増加することがわかった.

### 5 結 言

周期長を容易に変えることのできるポイント露光法を用いて, 周期を 400 ~  $750\mu\text{m}$  の範囲で変化して LPFG を作製した. 紫外光照射後, 作製した LPFG の透過スペクトルを測定した. さらに, このスペクトルをシミュレーション結果と比較検討することによって得られた結果を以下に列記する.

(1) 作製した LPFG の透過スペクトルにおいて, シミュレーションと良く一致した高次モード ( $LP_{02} \sim LP_{05}$ ) の各ピークが観測でき, それぞれのモード次数を同定することができた.

(2) 繰り返し回数を増加するにつれて, LPFG の透過スペクトルにおける  $LP_{02}$  モードのピークにおける透過阻止量が増加することがわかった. 一方,  $LP_{03}$  モードのピークにおける透過阻止量は繰り返し回数約 200 回までは増加し, その後 300 回まで反対に減少することがわかった.

(3) 紫外線の照射時間を増加した場合, 屈折率変調が増加することによって,  $LP_{02}$  モード, および,  $LP_{03}$  モードのピークにおける透過阻止量がいずれも増加することがわかった.

最後に, 本研究の一部はかがわ産業支援財団平成 19, 20 年度産学官共同研究開発事業の助成を受けて行った. ここに記して謝意を表します. また, LPFG 作製, および, スペクトル測定においてご援助いただいた伸興電線(株)に感謝します.

### 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, pp.58-64 (1996).
- 2) H. Kanamori, "Fiber grating", *Shingaku-shi*, Vol.82, pp.731-739 (1999).

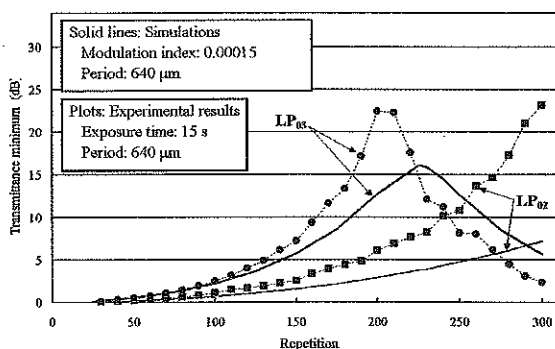


Fig. 7 Stress distribution in 3rd (Case 1).

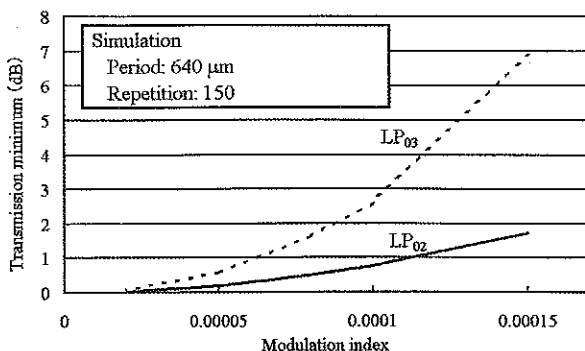


Fig. 8 The simulation of the relationship between transmission minimums and modulation of the refractive index of 0.00002~0.00011 with a period of  $640\mu\text{m}$  and repetition of 150.

- 3) L. R. Chen, "Phase-shifted long-period gratings by refractive index refractive index-shifting", *Optics Communication*, Vol.200, pp.187-191 (2001).
- 4) V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors", *Optics Letters*, Vol.21, pp.692-694 (1996).
- 5) Y. Suzuki, H. Iwata, K. Nakayama, Y. Mizutani, M. Yamauchi, E. Izumikawa, T. Yokouchi and S. Ejima, "Apodization Method Owing to the Finite Length of UV Laser Coherence in Fabricating Fiber Bragg Gratings", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, pp.9100-9102 (2006).
- 6) M. Yan, S. Luo, L. Zhan, Y. Wang, Y. Xia and Z. Zhang, "Step-changed period chirped long-period fiber gratings fabricated by CO<sub>2</sub> laser", *Optics Communications*, Vol.281, pp.2784-2788 (2008).
- 7) Wu, R. Yang, K. San, C. Lin, F. Alhassen and H. P. Lee, "A highly efficient thermally controlled loss-tunable long-period fiber grating on corrugated metal substrate", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.17, pp.612-614 (2005).
- 8) T. Yokouchi, Y. Suzuki, K. Nakagawa, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani, S. Kimura and S. Ejima, "Thermal tuning of mechanically induced long-period fiber grating", *Applied Optics*, Vol.44, pp.5024-5028 (2005).
- 9) 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", *J. the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, Vol.J88-C, pp.22-27 (2005).
- 10) "IFO\_grating", Integrated and fiber optical gratings design software program (Optiwave Corporation, Ottawa, 2001).
- 11) K. Fujita, Y. Masuda, K. Nakayama, M. Ando, K. Sakamoto, J. Mohri, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani, S. Kimura, T. Yokouchi, Y. Suzuki and S. Ejima, "Thermal tuning of mechanically induced long-period fiber grating", *Applied Optics*, Vol.44, pp.7032-7038 (2005).
- 12) Y. Masuda, M. Nakamura, C. Komatsu, K. Fujita, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani, S. Kimura, Y. Suzuki, T. Yokouchi, K. Nakamura and S. Ejima, "Wavelength Evolution of Fiber Bragg Gratings Fabricated from Hydrogen-loaded Optical Fiber During Annealing", *Journal of Lightwave Technology*, Vol.22, pp.934-941 (2004).