

長周期光ファイバーグレーティングを用いた振動計測

田 中 哲・高橋 信明

Vibration Measurement Using Long-Period Fiber Grating

Satoshi TANAKA, Nobuaki TAKAHASHI

A fiber-optic vibration sensor is constructed by using a long period fiber grating (LPG) as a sensing element, in which the intensity modulation technique is employed for the sensing scheme that is known to be effective as an interrogation method for fiber Bragg grating (FBG) ultrasonic sensors. In the experiment, LPGs are fabricated by illuminating UV laser light to a photosensitized single-mode optical fiber and it is confirmed that the LPG vibration sensor yields a clear and stable signal waveform and shows good linearity when the amplitude of the vibration strain is varied. In addition, the dynamic range of the sensor is more than 90 dB. Since a LPG shows higher sensitivity to static strain when an appropriate higher cladding mode is adopted, it is expected that with proper choice of the cladding mode a LPG vibration sensor will show much higher sensitivity.

Key words: fiber-optic sensors, long period fiber gratings, LPG sensors, vibration measurement

光ファイバーのコアに、長さ方向に沿って周期的な屈折率変調を誘起して回折格子を形成したものを、光ファイバーグレーティングとよぶ^{1,2)}。これらの光ファイバー型デバイスは波長フィルターとしての機能をもち、回折格子が光ファイバーのコア中に非破壊的に直接形成されるので、細径・軽量、伝送用光ファイバーとの整合性が高い、などの多くの利点を有している。とくに、光ファイバーグレーティングを利用したセンサーでは、センシング部位を長さ数 cm のグレーティングに局在化できるため、局所的なセンシングおよび多点型の計測システムに適している。光ファイバーグレーティングは、一般に回折格子の周期の長さによって2種類に大別される。グレーティングの周期が1 μm 以下のものは、光ファイバーブラッググレーティング (fiber Bragg grating: FBG) としてよく知られており³⁻⁵⁾、ブラッグ条件を満たす特定の波長で反射する。一方、周期が数十～数百 μm 程度のものは、長周期光ファイバーグレーティング (long period fiber grating: LPG または LPFG) とよばれており^{6,7)}、回折格子によって特定の波長

で光ファイバーのコアモードからクラッドモードへの結合が生じて、透過スペクトルに損失ピークがあらわれる。

LPG は FBG と同様に、周期的な強度分布をもつ紫外光のコアへの照射によって作製することができるが、回折格子の周期が長いため、細密な干渉縞を用いる FBG に対して比較的作製が容易であり、周期的な外力の印加⁸⁾ や音響波の励起⁹⁾、あるいは、放電¹⁰⁾ や赤外レーザー¹¹⁾ を用いた熱による周期的な変形や残留応力の緩和などによる作製法も提案されている。また、LPG の応用としては、特定の波長で損失を与える無反射の波長フィルター¹²⁾ や光増幅器の利得を平坦化する利得等価器など¹³⁾ が報告されているほか、透過スペクトルの周囲環境への依存性が高いことから、センサー用途の提案も数多くなされており、ひずみ、圧力、温度、周囲の屈折率、および、これらに変換可能な数多くの物理量がセンシングの対象になっている¹⁴⁻¹⁶⁾。しかしながら FBG とは対照的に、必ずしも実用的な LPG センサーの実現がなされていないのが現状である。

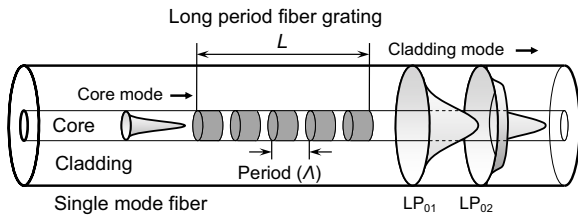


図1 長周期光ファイバグレーティングの模式図.

筆者らは、FBGをセンサー素子として用いた各種の固体振動センサーおよび水中音響センサー¹⁷⁻¹⁹⁾を提案してきたが、LPGをセンサー素子として用いた高感度化についても検討している²⁰⁻²²⁾。本稿では、LPGの基本的な性質について解説するとともに、LPGを用いた振動計測に関する最近の研究成果を紹介する。

1. 長周期光ファイバグレーティング (LPG) の構造と性質

単一モード光ファイバーでは、コアに閉じ込められたまま導波する基本モード(コアモード)が減衰することなく光ファイバーを伝搬するが、LPGでは回折格子によってモード結合条件を満たす特定の波長でコアモードとクラッドモードの間に結合が生じ、コアから一部の光が漏洩して減衰することになる。図1に示すように、クラッドモードとは光ファイバーのクラッド部を含めた全体にわたって電界分布をもつモードであり、外乱などにより容易に放射減衰する。また、図において模式的に示したように、LPGによってコアモードと結合するクラッドモードは、基本的に光ファイバーの中心に電界分布のピークをもつLP_{0,m}(*m* = 1, 2, ...)であり、本稿ではこれを*m*次のクラッドモードとよび、このモードの寄与による損失ピークを*m*次の損失ピークとする。

*m*次の損失ピーク波長 $\lambda_p^{(m)}$ は、コアモードと*m*次のクラッドモードの実効屈折率をそれぞれ、 n_{co} および $n_{cl}^{(m)}$ とし、グレーティング周期を Λ とおくと、次式で表すことができる^{15,16)}。

$$\lambda_p^{(m)} = \Lambda(n_{co} - n_{cl}^{(m)}) \quad (1)$$

また、損失ピーク波長における透過率 $T_p^{(m)}$ は、コアモードと*m*次のクラッドモードの間の結合係数を $\kappa^{(m)}$ 、LPG長を*L*とすると、次式で与えられる^{15,16)}。

$$T_p^{(m)} = 1 - \sin^2(\kappa^{(m)}L) \quad (2)$$

LPGをセンサーに応用する場合は、LPGに印加される外力や熱、周囲の屈折率変化などに依存して $\lambda_p^{(m)}$ や $T_p^{(m)}$ が変化することを利用している。

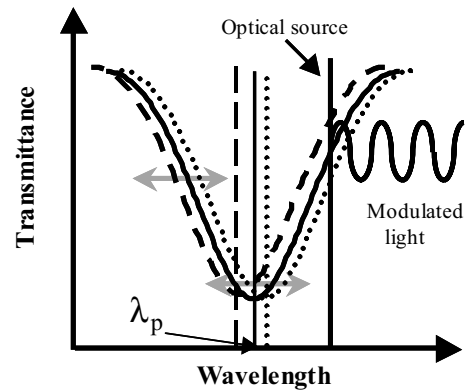


図2 長周期光ファイバグレーティングを用いた強度変調法による振動検出の原理.

2. 長周期光ファイバグレーティング振動センサー

一般的なLPGセンサーでは、LPGの透過スペクトルを直接観測して $\lambda_p^{(m)}$ や $T_p^{(m)}$ を測定するが、筆者らは、損失ピーク波長の変化を光の強度変化に変換する手法(強度変調法)により²³⁻²⁵⁾、振動検出を行っている。この方式の原理を図2に示す。光源にレーザーなどの狭帯域光を使用し、その波長をLPGの損失ピーク近傍のスペクトルの傾斜部位(動作点)に同調させる。このとき、振動などによって動的なひずみがLPGに印加されると、 $\lambda_p^{(m)}$ がこれらの変化に応じてシフトするので、LPG透過光の強度が変調される。この手法では、 $\lambda_p^{(m)}$ のシフトの際に損失ピーク近傍のスペクトルの形状が変わらない、かつ、動作点でのスペクトルの傾斜が直線とみなせる、という条件下に線形応答を示す範囲が限定されるが、通常の振動計測においては、測定対象による動的なひずみによる透過スペクトルの形状の変化は十分に小さく、振動波形を実時間で直接観測することができる。なお、この方式によるセンサー感度は動作点における透過スペクトルの傾き($\Delta T/\Delta \lambda$)と $\lambda_p^{(m)}$ のひずみ感度(η)の積に比例する。

このような強度変調法によるLPGセンサーの特長として、以下の項目があげられる。

- (1) 分光機器を使用しないので動的物理量の計測が容易
- (2) スペクトル測定が不要で波長分解能の制約がない
- (3) 構成が単純で低コスト
- (4) 高強度光源の使用により高いSN比が得られる

とくに、(1)にあげた特長は振動計測に適しており、原理的には、光ファイバーを伝わる振動波の波長がLPGの長さ程度、すなわちLPGへのひずみが一様とみなせる数MHz程度の周波数範囲まで線形応答が可能である。

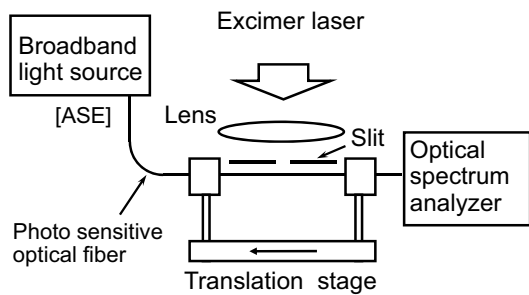


図3 紫外レーザーを用いた長周期光ファイバグレーティングの作製.

表1 長周期光ファイバグレーティングの作製条件.

周期 [μm]	234
スリット幅 [μm]	116
レーザー出力 [mJ/pulse]	9.9
繰り返し周波数 [Hz]	400
パルス数	5000
格子数	58

3. 実験および実験結果

3.1 紫外線レーザーを用いた長周期光ファイバグレーティングの作製

筆者らは、KrF エキシマーレーザー光 (波長 247 nm) を一定の間隔で光ファイバに照射することによって、LPG を作製している。図3の実験系に示すように、移動ステージ上に固定された単一モード光ファイバはスリットを介してレーザー光により露光される。実験では、光感受性を高めた光ファイバとして、コアに Ge に加えて B を添加したものを用いた。LPG の作製条件を表1に示す。また、作製した LPG 透過スペクトルの一例を図4に示す。図に示す波長範囲においては、3つの損失ピークが表れている。これらに対応するクラッドモードの次数を見積もるため、数値計算によって光ファイバのクラッドモードについて実効屈折率を求めた²⁶⁾。この結果から得られたグレーティング周期と損失ピーク波長の関係を図5に示す。この結果から、図4における減衰ピークに寄与するクラッドモードの次数が、それぞれ $m=6, 7, 8$ と見積もられた。

3.2 長周期光ファイバグレーティングのひずみと温度への依存性

作製した LPG の3つの損失ピーク波長について、ひずみへの依存性を調べるため、LPG に静的なひずみを印加して LPG 透過スペクトルの測定を行った。ひずみに依存する透過スペクトル変化の一例として、8次のピークについて測定した結果を図6に示す。図からわかるように、損失ピーク近傍の透過スペクトルは、その形状をほぼ一定に保ったまま、ひずみに比例して長波長側にシフトする。このようにして、3つの損失ピークのひずみへの依存性を調

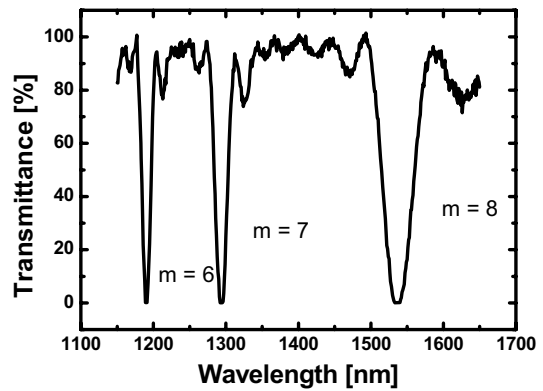


図4 長周期光ファイバグレーティングの透過スペクトル.

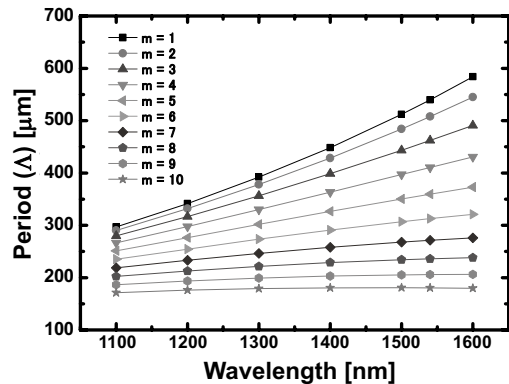


図5 長周期光ファイバグレーティングの屈折率変調の周期と損失ピークの関係.

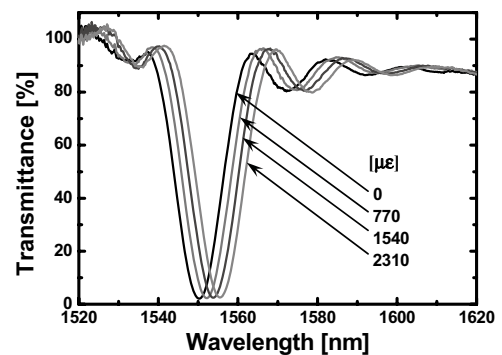


図6 8次の損失ピーク近傍の透過スペクトルのひずみへの依存性.

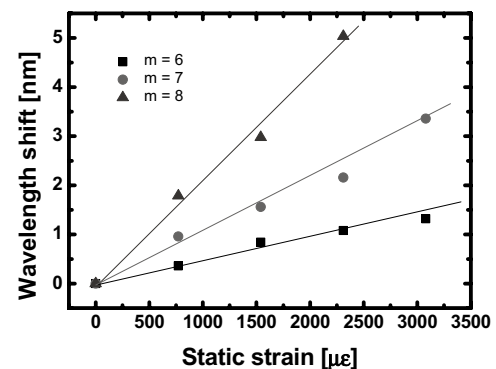


図7 損失ピーク波長のひずみへの依存性.

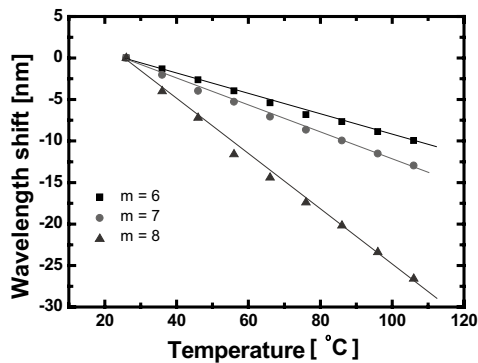


図8 損失ピーク波長の温度への依存性.

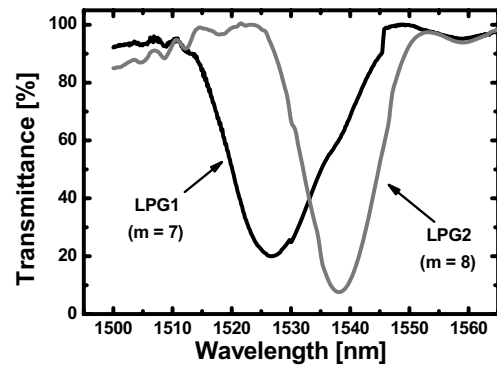


図9 作製したセンサー用長周期光ファイバグレーティングの透過スペクトル.

表2 センサー用長周期光ファイバグレーティングの作製条件.

	LPG1	LPG2
周期 [μm]	283	242
スリット幅 [μm]	140	116
レーザー出力 [mJ/pulse]	10.8	5.6
繰り返し周波数 [Hz]	400	400
パルス数	5000	100
格子数	33	250

べた結果を図7に示す. この結果, 6, 7, および8次の損失ピークのひずみに対する波長シフト感度は, それぞれ 0.46, 0.93, 2.17 pm/ μe (μe は 10^{-6} のひずみを表す) であり, 次数が増すとともに感度が大きくなっている. なお, 通常のLPGでは, ある程度次数が高くなると, クラッドモードの実効屈折率がコアモードのものよりも大きくなり, ひずみに対して負の感度をもつことが報告されている¹⁶⁾.

LPGの基本的な特性として損失ピーク波長の温度依存性を調べた結果を図8に示す. この実験では, LPGを恒温槽に設置して30~110°Cの範囲で温度制御を行った. この結果から, 6, 7, および8次の損失ピークの温度に対する波長シフト感度はいずれも負の値を示し, それぞれ-0.12, -0.16, -0.33 nm/ $^{\circ}\text{C}$ であった. 一般に, 損失ピーク波長の温度感度はコアの材料の熱光学効果へ強く依存しており, とくにBをGeとともにコアに添加した光ファイバーでは通常の光ファイバーと逆の温度依存性を示すことが知られている²⁷⁾.

3.3 LPGを用いた振動計測

損失ピーク波長のひずみへの依存性を考慮すると, LPG振動センサーの高感度化において, 高次の損失ピークを用いることがより有利であると考えられる. ここでは, 7次および8次の損失ピークを利用したLPG振動センサーについて, 感度の比較を行った結果を示す. なお, この実験では, 7次および8次の損失ピーク波長を光源に使用する波

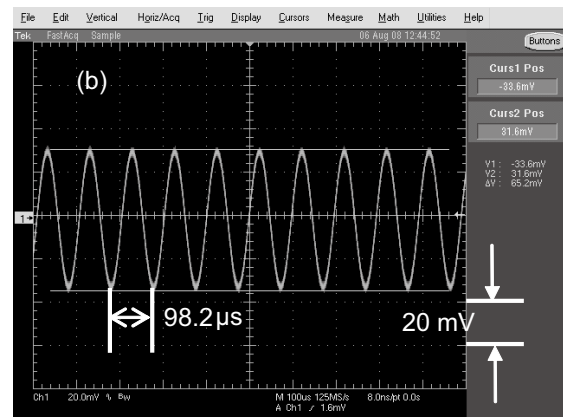
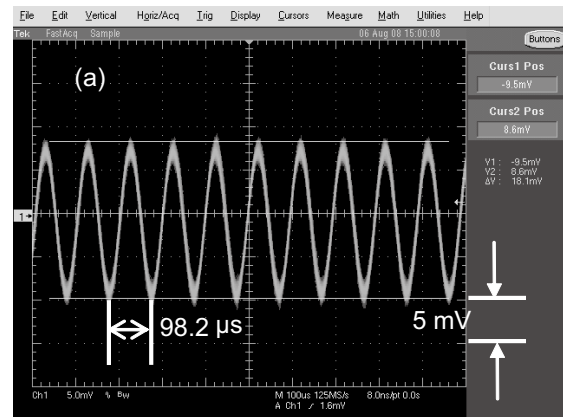


図10 センサーの出力波形. (a) LPG1, (b) LPG2.

長可変レーザーの動作波長範囲 (1520~1590 nm) に合わせるため, 2つのLPG (LPG1, LPG2) を新たに作製した. これらのLPGの作製条件を表2に示す. なお, LPG2の作製においては, 動作点での透過スペクトルの傾きがより急峻となるように, 作製条件を調整した. 図9に示されているように, LPG1およびLPG2について, それぞれ7次および8次の損失ピークが, 光源の動作波長範囲で得られていることがわかる.

振動計測の実験においては, 角柱型の圧電素子 (140×5

表3 センサー用長周期光ファイバグレーティングの特性.

LPG	η [pm/ $\mu\epsilon$]	$\Delta T/\Delta\lambda$ [%/nm]
LPG1 ($m=7$)	0.86	5.70@1534 nm
LPG2 ($m=8$)	2.00	1.01@1534 nm

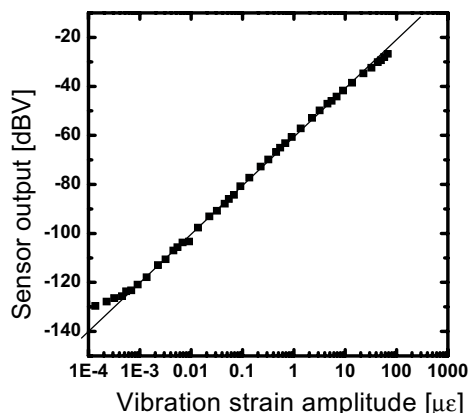


図11 センサーの出力のひずみ振幅への依存性.

×10 mm) に、それぞれ LPG1 および LPG2 を含む光ファイバを並列に並べ素子の両端部分で接着剤を用いて固定した。素子には、共振周波数 (10.22 kHz) で正弦波状の信号を加えた。LPG1 および LPG2 から得られたセンサー出力の波形の例を図 10 (a) および (b) に示す。印加した振動に応じて明瞭なセンサー出力波形が得られていることがわかる。また、振動に対するセンサーの出力感度を比較した結果、LPG2 を用いたセンサーの出力は、LPG1 を用いたものに比べ 4 倍程度の高い値が得られた。また、ここで得られた値は、表 3 に示す LPG のひずみ感度 (η) と動作点でのスペクトルの傾き ($\Delta T/\Delta\lambda$) から見積もられる値とほぼ一致している。

LPG2 を用いたセンサー出力の振動による動的ひずみの振幅への依存性を調べた結果を図 11 に示す。図に示されているように、このセンサーでは約 90 dB のダイナミックレンジが得られる。なお、ここではセンサー出力の下限および上限が、それぞれ電氣的ノイズおよび圧電素子の耐電圧により制限されている。また、損失ピーク波長のひずみ感度とその近傍のスペクトル形状から見積もると、本センサーでは、ひずみの振幅に換算して 4000 $\mu\epsilon$ 程度の大きさまで線形応答が可能であると考えられる。

本稿では、LPG の基本的な特性を示すとともに、筆者らの行っている LPG を用いた強度変調法による振動計測について述べた。現段階では、FBG と比較して数倍程度の感度であるが、作製法が多様な LPG では、設計を工夫することによってさらに高感度化を行うことが可能である

と考えられる。また、LPG は FBG とは違って光源への反射光がなく、アイソレーターを用いた FBG センサーと比較した場合においても、レーザー光源の戻り光による強度変動の抑制効果が高いので、強度変調法におけるより高精度な動作が期待される。LPG センサーの実用的な応用に際しては、さらに高感度化・高精度化が望まれており、筆者らは、高感度化へ向けた LPG 素子の設計のほか、温度変動の影響の除去ないし補償法について検討しているところである。

文 献

- 1) R. Kashap: *Fiber Bragg Gratings* (Academic Press, San Diego, 1999).
- 2) A. Othonos and K. Kalli: *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Artech House, Boston, 1999).
- 3) K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki: "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 647-649.
- 4) K. O. Hill and G. Meltz: "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Lightwave Technol.*, **15** (1997) 1263-1276.
- 5) A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrik, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnum and E. J. Friebele: "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, **15** (1997) 1442-1463.
- 6) K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson and I. Skinner: "Efficient mode conversion in telecommunication fiber using externally written grating," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 1270-1272.
- 7) 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.*, **14** (1996) 58-65.
- 8) S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino and H. J. Shaw: "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 710-712.
- 9) H. S. Kim, S. H. Yun, I. K. Kwang and B. Y. Kim: "All-fiber acousto-optic tunable notch filter with electronically controllable spectral profile," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1476-1478.
- 10) G. Humbert and A. Malki: "High performance bandpass filters based on electric arc-induced π -shifted long-period fibre gratings," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1506-1507.
- 11) M. I. Braiwish, B. L. Bachim and K. T. Gaylord: "Prototype CO₂ laser-induced long-period fiber grating variable optical attenuators and optical tunable filters," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 1789-1793.
- 12) M. S. Kwon and S. Y. Shin: "Tunable notch filter using a thermo-optic long-period grating," *J. Lightwave Technol.*, **22** (2004) 1968-1975.
- 13) A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano and C. R. Davidson: "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 336-338.
- 14) V. Bhatia and A. M. Vengsarkar: "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 692-694.
- 15) S. W. James and R. P. Tatam: "Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, **14** (2003) R49-R61.
- 16) V. Bhatia: "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing," *Opt. Exp.*, **24** (1999) 457-466.
- 17) S. Tanaka, T. Ogawa, W. Thongnum, N. Takahashi and S.

- Takahashi: "Thermally stabilized fiber-Bragg-grating vibration sensor using erbium-doped fiber laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 3060–3062.
- 18) S. Tanaka, H. Yokosuka and N. Takahashi: "Temperature-independent fiber Bragg grating underwater acoustic sensor array using incoherent light," *Acoust. Sci. Technol.*, **27** (2006) 50–52.
- 19) S. Tanaka, H. Yokosuka, K. Inamoto and N. Takahashi: "Wavelength division multiplexed fiber Bragg grating vibration sensor array with temperature compensation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 4588–4590.
- 20) H. Somatomo, S. Tanaka and N. Takahashi: "Vibration sensing of solid using long-period fiber grating," *Proc. SPIE*, **7004** (2008) 2J1–2J4.
- 21) S. Tanaka, H. Somatomo, A. Wada and N. Takahashi: "Sensitivity enhancement of LPG vibration sensor using higher-order cladding mode," *Proc. SPIE*, **7503** (2009) 3C1–3C4.
- 22) S. Tanaka, H. Somatomo, A. Wada and N. Takahashi: "Fiber-optic mechanical vibration sensor using long-period fiber grating," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 07GE05.
- 23) N. Takahashi, A. Hirose and S. Takahashi: "Underwater acoustic sensor with fiber Bragg grating," *Opt. Rev.*, **4** (1997) 691–694.
- 24) N. E. Fisher, D. J. Webb, C. N. Pannell, D. A. Jackson, L. R. Gavrilov, J. W. Hand, L. Zhang and I. Bennion: "Ultrasonic hydrophone based on short in-fiber Bragg gratings," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 8120–8128.
- 25) G. Wild and S. Hinckley: "Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art," *Sens. J.*, **8** (2008) 1184–1193.
- 26) Z. Zhang and W. Shi: "Eigenvalue and field equations of three-layered uniaxial fibers and their applications to the characteristics of long-period fiber gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **22** (2005) 2516–2526.
- 27) X. Shu, T. Allsop, B. Gwandu, L. Zhang and I. Bennion: "High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge codoped fiber," *Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 818–820.

(2012年5月21日受理)