

ファイバグレーティングを用いたセンシング技術

住友電気工業(株)横浜研究所
茂原 政一

Sensing Technology using Fiber Grating

Masakazu Shigehara

Yokohama Research Laboratories
Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1. はじめに

Geなどを添加した石英ガラスに紫外光を照射して得られる光誘起屈折率変化を利用したファイバグレーティングの開発が盛んに行われている。ファイバグレーティング^{1) 2)}はファイバのコア中に直接回折格子を形成し特定波長(ブラッグ波長)のみを反射する光フィルタで、ファイバ型光部品としてファイバとの結合性がよく、挿入損失も低いことから多くの応用が期待されている。ファイバグレーティングのブラッグ波長はコアを伝搬する光の実効的な屈折率と屈折率変調の周期で決定される。そのため温度・歪み・圧力などに対してこれらのパラメータが変化するため、そのときのブラッグ波長の変化を測定することによってファイバセンサとして利用できる。また最近波長オーダーより十分長い屈折率周期構造を持った長周期ファイバグレーティング³⁾をファイバセンサとして利用する検討がされている。本章ではこれらのファイバグレーティングのセンシング技術への応用について紹介する。

2. ファイバグレーティングを用いたセンサ

ファイバグレーティングの開発はファイバの

側方から紫外光の干渉縞を照射して作製するホログラフィック法⁴⁾が検討されてから加速され、それとともにセンサとしての応用も検討されてきた。最初にセンサとして報告されたものは温度と歪みに対する感度を評価したもので⁵⁾、温度特性0.01nm/°C、歪み特性0.1 μ strainが得られている。このブラッグ波長の温度や歪みでの変化を分離するために、Fig. 1に示すブラッグ波長による感度の差を利用して2つの異なる波長帯のファイバグレーティングが使われた⁶⁾。0.85 μ m帯と1.3 μ m帯の2つのファイバグレーティングを直列に作製し、ファイバグレーティングの両端からそれぞれのファイバグレーティングの透過波長特性を測定し、ブラッグ波長を読みとっている。また分離ではなく温度変化にのみ反応するように温度変化を歪みに変えて感度を向上させた温度センサもある^{7) 8)}。ファ

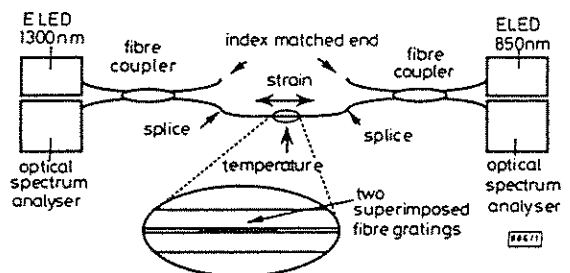


Fig.1 Schematic diagram of experiment arrangement

イバグレーティングを熱膨張の大きい金属に固定する、熱膨張の異なる2種の金属を組み合わせる温度の上昇とともに張力を印可させる等の方法 (Fig. 2) で $0.052\text{nm}/\text{C}$ の温度感度が得られている。低温下でのセンサとしてはPMMA上に固定したファイバグレーティングで $0.04\text{nm}/\text{K}$ (at 100K) が得られている (Fig. 3)⁹⁾。

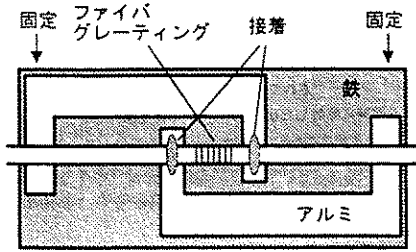


Fig. 2 Schematic diagram of temperature sensor

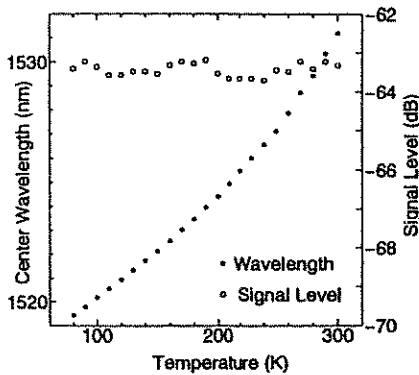


Fig. 3 Wavelength shift of a grating bonded on a PMMA substrate with temperature. The signal levels are also shown.

ファイバグレーティングの他のセンサとしては圧力センサ¹⁰⁾、電界センサ¹¹⁾などがある。圧力センサはファイバグレーティングのブラッグ波長の圧力に対する感度を調べ、 70Mpa で 0.22nm の波長変化を観測している。「電界センサはファラデー効果を利用し、電界の変化に対する屈折率変化について円偏光の2つの回転方向によって生じる差を検出している (Fig. 4)。」

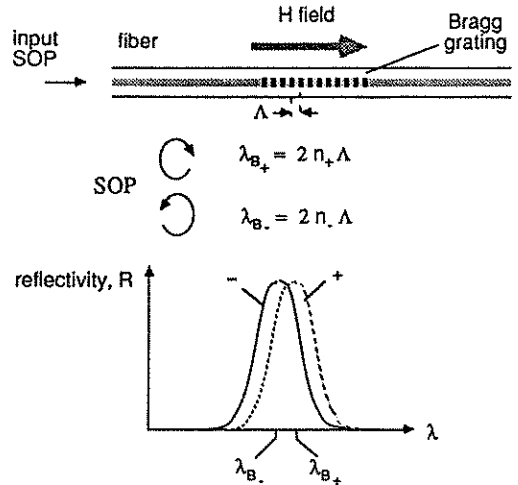


Fig. 4 Splitting of the Bragg resonance due to magnetically induced circular birefringence (Paraday effect). Effect is shown greatly exaggerated

長周期グレーティングは通常のファイバグレーティングと比べて温度や歪みによる損失ピーク波長の変化の割合が大きく¹²⁾、クラッドモードの次数によっても感度が異なる¹³⁾ (Fig. 5)。そのため温度と歪みの切り分けが容易である。また温度による損失ピーク波長の変化を小さくしたファイバ構造¹⁴⁾も利用できる。この構造のファイバに作製した長周期グレーティングでの感度が通常のファイバに作製したものに対して逆特性を示すことが興味深い¹⁵⁾ (Fig.

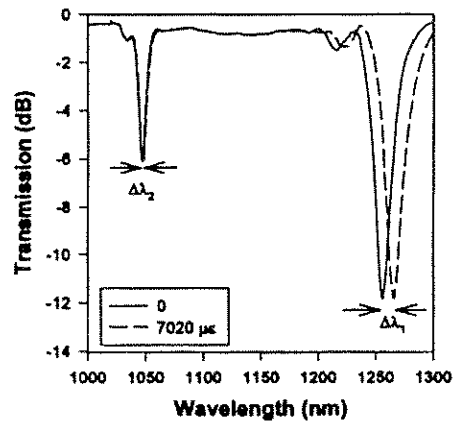


Fig. 5-1 Shift the two highest order bands of a long-period grating in Flexcor fiber with applied strain.

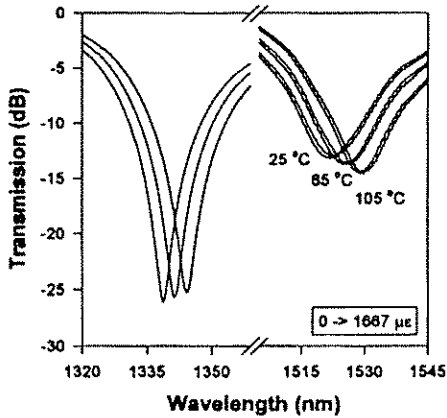


Fig. 5-2 Shift in two bands of a grating written in Corning fiber ($A=320\mu\text{m}$) with strain at three different temperatures.

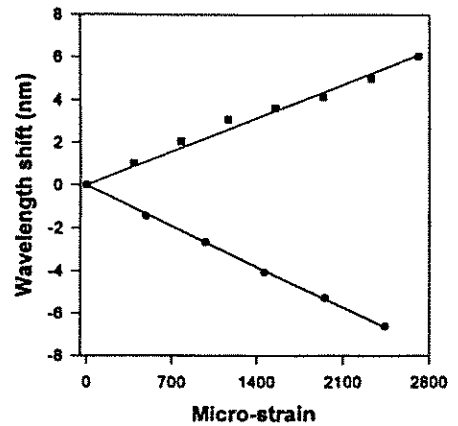


Fig. 6-2 Spectral shifts with axial strain for gratings written in the fiber from [3] (●) and in Corning FLEXCOR fiber (■).

6). この長周期グレーティングはクラッドモードを利用するためクラッド周囲の屈折率によっても損失ピーク波長が変化することから、屈折率センサ¹²⁾としても応用できる。他にFig. 7に示すようにファイバグレーティングと長周期グレーティングを組み合わせて、長周期グレーティングの損失波長の変化とともにファイバグレーティングの見かけの反射率が変化することを利用したもの¹⁰⁾も報告されている。

一方、ブラッグ波長の変化を高精度に検出する方法も検討されてきた。センサの検討が始め

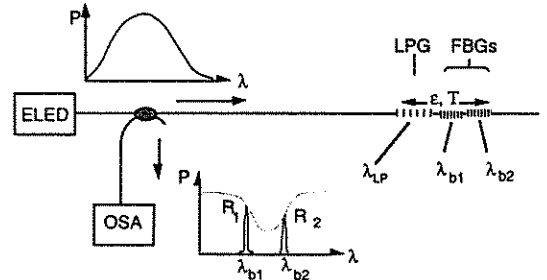


Fig. 7 Schematic diagram of the dual LPG/FBG strain/temperature sensing scheme

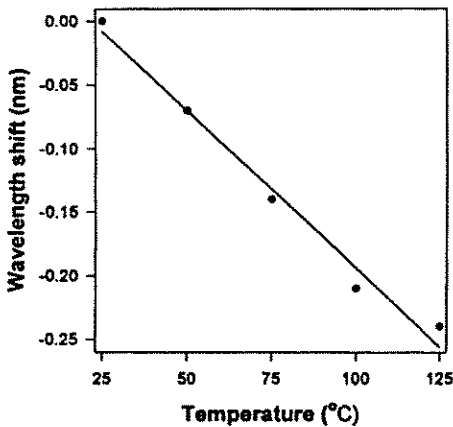


Fig. 6-1 Spectral shift in the resonance band with ambient temperature for a grating written in fiber with modified profile.

られた当初は広帯域で発振する光源とスペクトラムアナライザの組み合わせで測定されていた。しかしスペクトラムアナライザは回折格子を機械的に動作させるため、波長の確度が0.1nmとブラッグ波長の変化を検出するためには比較的大きかった。改善策として基準のファイバグレーティングを使って1走査の中で2つのブラッグ波長を測定してその差を検出する方法が報告されている。基準のファイバグレーティングを温度一定にしてBragg波長を変化させない方法⁷⁾や、Fig. 8に示すような温度補償型ファイバグレーティングによりブラッグ波長を一定に保つ¹¹⁾工夫がされている。光源のS/N比を向上させるため、センシング部であるファイバグ

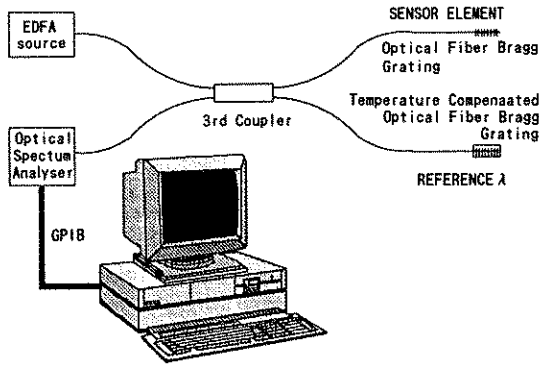


Fig. 8 Schematic of the wavelength referenced optical fibre temperature sensor system.

レーティングを共振器ミラーとして用いたアクティブなセンサ¹³⁾もある (Fig. 9)。

3. センサネットワーク

ファイバレーティングを用いたセンサを有効に活用するためには、ファイバの特性を生かした疑似分布型センサとして複数のファイバレーティングを設置、モニタする必要がある。その方法としてFig. 10のTDM、WDM、同一Bragg波長のファイバレーティングのペアでファブリペロ干渉計を構成するWDMなどが提案されている¹⁹⁾。WDMでは特定の波長帯で使用できるファイバレーティングの数は制限される。そのため光スイッチを組み合わせで5ラインに各12個のファイバレーティングを設けた60個の歪みセンサシステムがある²⁰⁾。1.3

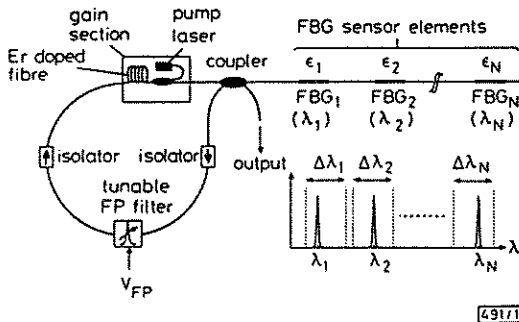


Fig. 9 Fibre loop-reflector laser multiple FBG sensor feedback elements

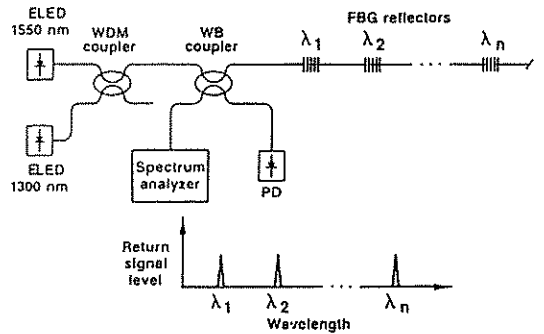


Fig. 10-1 WDM of fiber grating sensors using broadband sources.

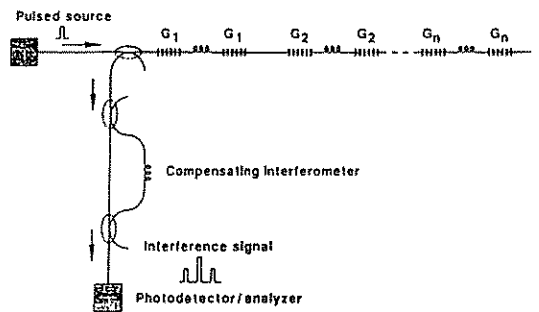


Fig. 10-2 Interferometric grating sensor pairs WDM.

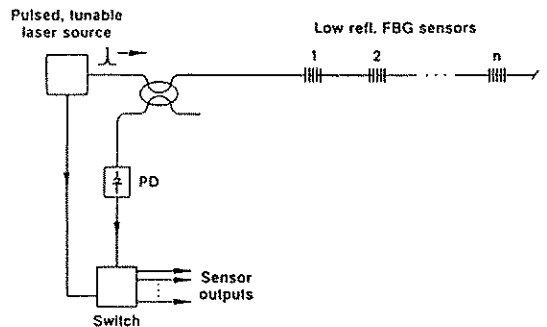


Fig. 10-3 TDM of fiber grating sensors using a tunable narrowband source.

μm 帯でファイバレーティングのBragg波長を3nmの間隔で作製し、LEDからの反射光の波長をファブリペロ型フィルタでモニタしている (Fig. 11)。

歪みセンサはカルガリ橋で実用化されている²¹⁾。Fig. 12のようにセンサは橋の4カ所に

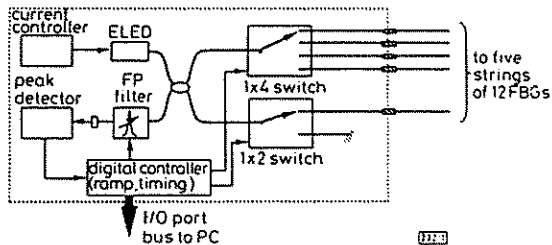


Fig. 11 FEB sensor electro-optics system

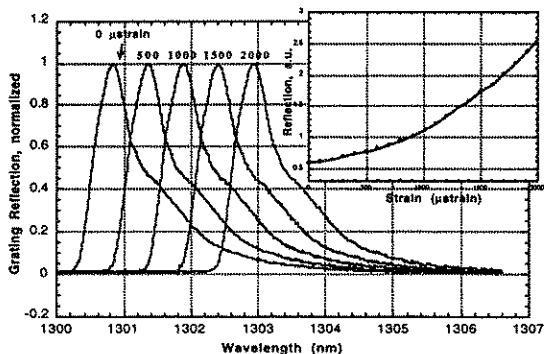


Fig. 13 Shift in Grating spectrum with fiber strain (inset shows the change in reflectivity at a fixed wavelength of 1303 nm.)

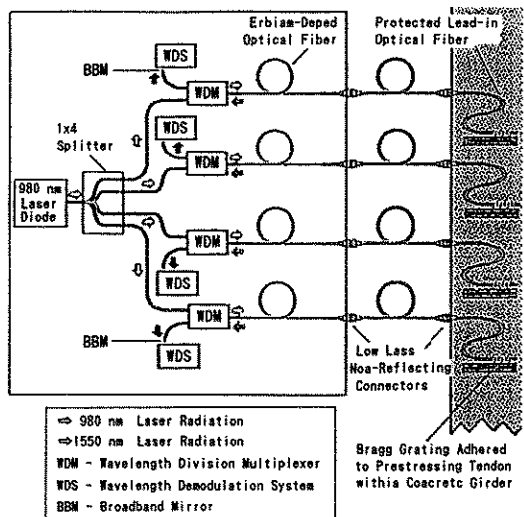


Fig. 12 Schematic of a four-channel Bragg grating fiber laser sensing system based on passive wavelength demodulation and involving two low-reflection, low-insertion loss connectors in each laser cavity.

設置し、0.98 μmの励起レーザを1×4スプリッタで分岐、EDFを通してセンシング用ファイバグレーティングを共振器ミラーとしてレーザ発振させ、その発振波長をモニタする。半年間の歪みの変化や、トラックが通過する際の動的な歪みの変化などを読みとっている。

グレーティングを用い反射率を各波長で制御したものがある²²⁾。任意の特定の波長で見した場合、Fig. 13のように歪みの印可とともに反射率が変化していくので反射光で波長のシフトを読みとることができる。そのためセンサを直列に並べてOTDRで容易に一括して反射レベルをモニタできる。

4. まとめ

ファイバグレーティングのセンシング技術への応用について述べさせていただいた。まだ相当数の紹介できなかった応用例が残ったが、この分野はファイバセンサの中では新しく、これからの様々な構成のセンサが検討され、実用化すると考えられる。

参考文献

- 1) K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki; Appl. Phys. Lett, Vol.32, No.10, P.647, 1978
- 2) 井上; レーザー研究, Vol.23, No.10, P68, 1995
- 3) A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J.E.Sipe; J. Lightwave Tech., Vol.14, No.1, P58, 1996
- 4) G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn; Opt. Lett., Vol.14, No.15, P.823, 1989
- 5) G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, and J. D. Farina; OFS Tech. Dig., P.163, 1988
- 6) M.G.Xu, J.L.Archambault, L.Reekie, and J.P.Dakin; Electron. Lett., Vol.30, No.13, P.1085, 1994
- 7) 茂原, 井上, 服部; 電子情報通信学会春季大会, C-372, P.4-369, 1994

- 8) 茂原, 井上; 応用物理学会秋季大会, 27a-F-11, P.908, 1995
- 9) S. Gupta, T. Mizunami, T. Yamao, and T. Shimomura; *Appl. Opt.*, Vol. 35, No.25, P.5202, 1996
- 10) M. G. Xu, L.Reekie, Y. T. Chow, and J. P. Dakin; *Electron. Lett.*, Vol.29, No.4, P.398, 1993
- 11) A. D. Kersey, and M. J. Marrone; OFS-10 Tech. Dig., P.53, 1994
- 12) V. Bhatia, T. D'Alberto, K. A. Murphy, R. O. Claus, and A.M.Vengsarkar; OFS-11 Tech. Dig., We4-3, P.360, 1996
- 13) V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus, and A. M. Vengsarkar; OFS-11 Tech. Dig., Fr2-5, P.702, 1996
- 14) J. B. Judkins, J. R. Pedrazzani, D. J. Di Givanni, and A.M.Vengsarkar; OFC Tech. Dig., PD1, 1996
- 15) V. Bhatia, M. K. Burford, N. Zabaronick, K. A. Murphy, and R. O. Claus; OFS-11 Tech. Dig., Fr3-1, P.2, 1996
- 16) H. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar; OFS-11 Tech. Dig., Tu4-2, P.96, 1996
- 17) T. E. Hammon, and A. D. Stokes; OFS-11 Tech. Dig., Th3-37, P.566, 1996
- 18) A. D. Kersey, and W. W. Morey; *Electron. Lett.*, Vol.29, No.11, P.964, 1993
- 19) W. W. Morey, J. R. Dunphy, and G. Meltz; *Fiber and Integrated Optics*, Vol.10, P.351, 1992
- 20) M. A. Davis, D. C. Bellemore, M. A. Putnam, and A. D. Kersey; *Electron. Lett.*, Vol.32, No.15, P.1393, 1996
- 21) R. M. Measures, A. T. Alavie, R. Maaskant, M. Ohn, S. Karr, and S. Huang; *SPIE*, Vol.2294, P.53, 1995
- 22) A. D. Kersey, M. A. Davis, and T. Tsai; OFS-11 Tech. Dig., Th4-5, P.634, 1996