

ファイバースラッググレーティングを用いた光波長弁別システムに関する研究

中川 清

香川大学工学部信頼性情報システム工学科

〒761-0396 高松市林町 2217-20 (Email: nakagawa@eng.kagawa-u.ac.jp)

チャープしたファイバースラッググレーティングを利用したバンドパスフィルターを用いた波長弁別フィルターを提案し、その特性を解析した。単一バンドを持つバンドパスフィルターは、チャープしたファイバースラッググレーティングを連結して作成した。ファイバースラッググレーティングセンサで反射した光の波長を、提案したシステムで波長弁別することができた。本論文で提案した手法は、ファイバースラッググレーティングを用いたセンシングシステムにおいて安価で、コンパクトかつ高精度な波長弁別を可能にすることを示した。

1. はじめに

物理量の計測に光ファイバーを利用する技術は、30年以上の間広く研究されている。これは、光ファイバーが、情報伝送デバイスとしてだけでなく、情報変換デバイスとしても利用できることが一つの理由である。光ファイバーを用いたセンシングシステムは、電気的なセンシング手法に比べて、応答時間、コンパクトさ電気的雑音への耐性などの点で優れている。

ファイバー光学センサの中でも、ファイバースラッググレーティング (Fiber Bragg Grating (FBG)) は多くの分野で最も広く使われているセンサデバイスである。¹⁾ FBG センシングの優れた特徴のひとつは、計測情報を絶対パラメータである光の波長に変換することである。光の波長は、絶対パラメータであるので、計測情報はシステムの損失や、光源出力の揺らぎに依存しない。これらの特徴は、FBG センサで反射した光の波長シフトの測定によって、格子に与えられたひずみや温度変化の高精度な計測を可能にしている。

波長シフトの測定は、分光器やスペクトラムアナライザーを利用すれば、低速ではあるけれども可能である。しかし、これらの計測器は、大型で、比較的重量も大きく、頻繁に校正を行う必要がある。さらに、これらの計測器は比較的高価であるために、FBG を用いたセンシングシステムのコストの大部分を、これらの計測器が占めてしまうこととなる。このため、比較的安価で、光波長のシフトを光強度の変調に変換する技術が求められている。これらの目的のために、多くの手法が、FBG を用いた計測システムのために研究された。提案されたシステムでは、マイケルソン干渉計を含むものや、²⁾ ファブリペローフィルターの走査を行うもの、³⁾ FBG フィルターを用いるもの、⁴⁾ FBG を機械的に伸縮させるもの⁵⁾そして、サニャックループを利用するもの⁶⁾などが提案されている。これらの手法では、比較的高

価なデバイスや設備が必要であったり、機械的な可動部分を含むものがあり、システムとしては不安定な構成となっている。近年、アレー化した導波路格子 (Arrayed Waveguide gratings(AWG)) を利用した波長弁別システムの試みが提案された。⁷⁾ この手法は、比較的高精度で波長シフト量の測定が可能ではあるけれども、AWG は比較的高価なデバイスであり、測定の目的に合わせて、その感度や測定範囲を変更することはできない。

本論文では、チャープした FBG を用いたバンドパスフィルターにより波長弁別を行うシステムについて検討した。提案するバンドパスフィルターは設計が容易で、光プロセスで作成でき、FBG にひずみを与えることで、完成したフィルターのパスバンドの中心波長を微調整することが可能で、これらの点で AWG よりも優れていると考えられる。これらの性質を用いて、測定の目的に応じて波長シフトの測定分解能や測定範囲を設定することができ、低価格で、高性能な波長弁別が可能となる。本論文では、FBG センサで反射した光の波長弁別が高精度で行えることを示す。また、提案したシステムでは、測定の目的に応じて、波長弁別の測定精度の設定が可能であることを示す。

2. チャープしたファイバースラッググレーティングで構成したバンドパスフィルターを用いた波長弁別システム

提案する波長弁別システムの全体構成を図 1 に示す。波長弁別装置は、 $1 \times 2N$ の光カップラ、チャープした FBG を利用したバンドパスフィルタ (Band pass filter(BPF))、受光器、そして信号処理器から構成されている。センサとしての多重化した FBG センサはシングルモード光ファイバに直列に接続されている。それぞれの FBG センサで反射した光は、 $1 \times 2N$ 光カップラに送られ、複数のチャンネルに分配される。

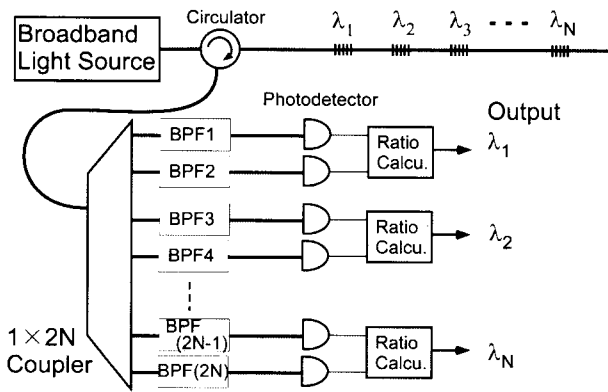


図1 提案する波長弁別システム

それぞれのチャンネルでは、それぞれ受光器が配置され、それぞれのチャンネルで受光器の前には BPF が配置されている。それぞれの BPF を透過した光パワーをそれぞれの受光器が独立して観測することになる。連続するチャンネル間のパワー比を後続の信号処理器で計算する。連続したチャンネル間のパワー比の値により、FBG センサからの反射光の波長を測定する。それぞれの BPF はパスキュードの中心波長は異なっているが、パスキュードのバンド幅はすべて等しく設定する。

ある FBG センサで反射される光の波長がチャンネル k ($1 < k < 2N$) のバンドパスフィルタの透過中心波長とチャンネル $k+1$ のバンドパスフィルタの透過中心波長の中間にあるとき、センサの反射スペクトルがスペクトル領域で対称と仮定すると、受光器 k で観測した光パワーと受光器 $(k+1)$ で観測した光パワーは等しくなる。この場合、これらのパワー比は 1 となる。センサ FBG で反射した光の波長がチャンネル $(k+1)$ の中心波長よりもチャンネル k の中心波長により近い場合、受光器 k で観測される光パワーは受光器 $k+1$ のものよりも大きくなり、その逆の場合もある。したがって、連続した二チャンネルのパワー比は FBG センサで反射した光の波長を評価するのに有効なパラメータであると考えられる。

二つの連続したチャンネルの出力パワーを数値的に比較するために、連続する二チャンネル間 k と $(k+1)$ の出力パワー比を関数 $S(k)$ で

$$S(k) = 10 \log_{10} \frac{P(k+1)}{P(k)} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 $P(k)$ は受光器 k で観測した光パワーである。

光源は、バンドパスフィルタのバンド幅や FBG センサの反射バンド幅に比べて十分に広いスペクトル密度を示すと仮定する。さらに、BPF はガウス型のパスキュードを示す透過スペクトルを示し、FBG センサの反射スペクトルもガウス型と仮定する。これらの仮定の下で、 $S(k)$ は簡単な比例関係で表され、

$$S(k) \propto \Delta \lambda_k (\lambda_{\text{sensor}} - \bar{\lambda}_k) \quad (2)$$

で与えられる。ここで $\bar{\lambda}_k = (\lambda_k + \lambda_{k+1})/2$ は二つの BPF の中心波長の平均値、 $\Delta \lambda_k = \lambda_{k+1} - \lambda_k$ は二つの BPF の中心波長の差である。 $S(k)$ は FBG センサで反射する中心波長の線形関数で与えられる。比例定数は、 $\Delta \lambda_k$ で決定される。従って、二つの連続した BPF のパスキュードの中心波長が調節できるなら、 $S(k)$ の FBG センサからの反射光の波長に関する感度は、二つの BPF の中心波長差 $\Delta \lambda_k$ を変化させることで調整することが可能であると結論できる。

3. チャープしたファイバークレーティングを用いたバンドパスフィルタの製作と特性

FBG を用いたバンドパスフィルタは提案する波長弁別手法において鍵となるデバイスである。製作したバンドパスフィルタの構造を図 2 に示す。FBG の屈折率構造は、光ファイバーのコア内に形成する。

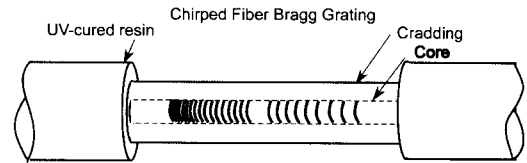


図2 バンドパスフィルタの構造

形成した FBG 構造は、その周期が一定でなく、一定のチャープ比で、周期が変化している。バンドパスフィルタとして使用するため、チャープした FBG の屈折率構造の一部は、格子構造を形成しない。このため、格子構造のない部分に対応するブラッグ波長の光は FBG 構造で、反射されず、透過することとなり、バンドパスフィルタが構成されることとなる。

FBG を用いた BPF は予め水素ロードを施した標準的な通信用シングルモード光ファイバー内にチャープした FBG 構造を、位相マスク法で製作した。チャープした FBG を製作した光学配置を図 3 に示す。

製作の過程で、光ファイバーは零次の回折光を弱めた位相マスクの背後に直接固定された。位相マスクはチャープした格子構造をしており、格子の中心周期は 1075.04 nm で、チャープレイトは 0.22 nm/cm であった。

ファイバーと位相マスクは一緒に固定され、一つの移動ステージの上に固定された。チャープした格子構造は集光させた UV レーザ光の露光で作成した。波長 266 nm の UV レーザ光は固体レーザから出射された。マスクとファイバーを固定した治具をファイバーの長さ方向に移動させることにより、長さ 4.5 cm までの格子構造が作成できる。この制限は、位相マスクの開口径で決められている。光ファイバー

中で、連結したチャープ格子構造を作成するために、ファイバー位相マスク固定治具が移動している間に、機械的シャッターにより短時間 UV レーザ光は遮断する。シャッターが遮断されている間は FBG 構造は形成されず、シャッターが開いている間のみ FBG 構造が形成されることになる。

レーザー光の遮断により、分離した 2 つの部分を持つチャープ格子構造が形成できる。シャッターで、レーザー光を遮断する時間により、BPF の透過スペクトルの透過バンドの中心波長が決められる。シャッターが閉じられている継続時間により BPF のパスバンドのバンド幅が決められる。シャッター制御のタイミングと継続時間を、制御用コンピュータによりマスク位相マスク行程治具の動きに正確に同期させることで、所望の BPF を得ることができる。

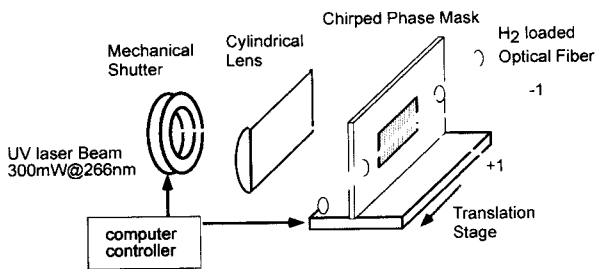


図3 FBG バンドパスフィルタの製作配置

使用した BPF の一つの透過スペクトルを、例として図 4 に示す。S=0 g の時、1554.4nm~1555.6nm にわたってストップバンドが形成され、ストップバンド幅は、1.2 nm である。また、パスバンドの中心波長は、1554.90nm で、そのパスバンド幅は、0.1 nm である。

図 4 では、BPF に S=0, 40, 80 g のひずみを与えた時に、この BPF が示す透過スペクトルの特性変化も示している。パスバンドの中心波長とストップバンドが BPF に与えるひずみ量に従って形を変え、ること無く平行に移動していることが解る。

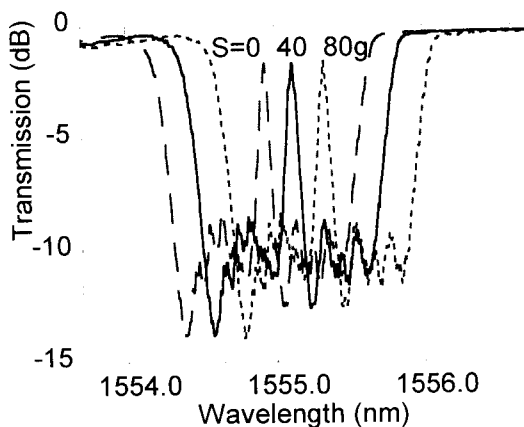


図4 バンドパスフィルタの透スペクトル特性

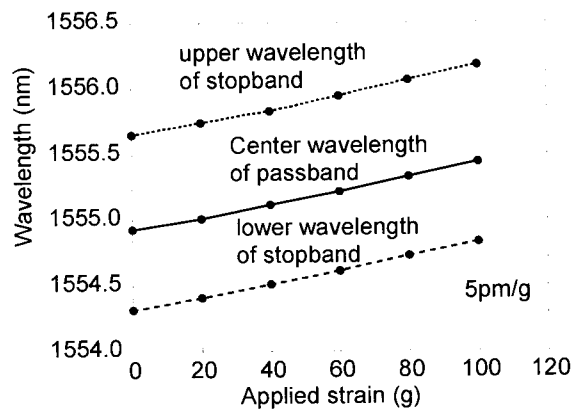


図5 製作したバンドパスフィルタのパスバンドのひずみ依存性、ストップバンドの最大最小波長とパスバンドの中心波長も示す。

図 5 には、ストップバンドの最大最小波長とパスバンドの中心波長を、BPF に与えたひずみ量の関数として示している。これらの波長は、ひずみ量の増加とともに線形に増加している。比例定数は、3 種類の波長ともに、5 pm/g であった。BPF のパスバンドの中心波長が与えたひずみ量に依存することは、パスバンドの波長選択に利用できる。したがって、これらの特性を利用して、FBG センサで反射した光の波長を計測するための感度 $S(k)$ を容易に調整することができると思われる。

4. 波長弁別システムの応答

提案した波長弁別システムの応答を実験的に検討するために、実験室で用いた光学配置を図 6 に示す。広帯域光源からの光は光サーキュレータを介して FBG センサに導かれる。FBG センサを含む一定長さのファイバーはファイバーセンサーに一定量のひずみを与えられるように、固定ポストと移動ステージ (ファイバーストレッチャ) とに固定した。FBG センサで反射した成分は光サーキュレータを介して波長弁別システムに入射した。

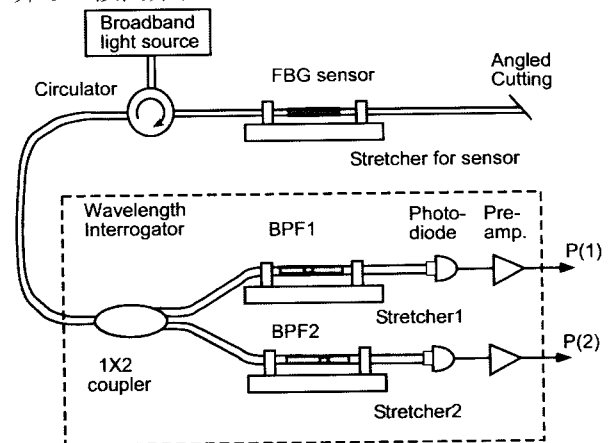


図6 波長弁別システムの特性格解析実験配置

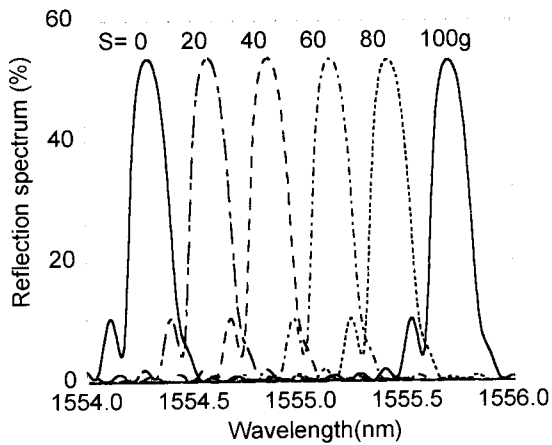


図7 FBG センサの反射スペクトルとその張力依存性

波長弁別システムでは、FBG センサで反射された光は1×2カプラで2方向に分けられる。それぞれの方向にはチャープしたファイバグレーティングを利用した BPF と受光器を含んでいる。それぞれの BPF からの出力パワーはそれぞれの受光器で独立して測定された。BPF 含むある長さの光ファイバーは、一定量のひずみを BPF に与えるために FBG センサと同様のファイバーストレチャに固定した。BPF にひずみを与えることで、BPF のパスバンドの中央波長を選択することができる。

実験で用いた FBG センサの反射スペクトルを図7に示す。FBG センサの反射スペクトルの半値全幅は、0.1 nm である。また用いた FBG の最大反射率は0.53であった。図では、センサーに与えたひずみ量を変化させたときに変化するスペクトルの様子も示している。スペクトルの形状に変化はなく、反射波長が長波長側に推移することが確認できる。

FBG センサに与えたひずみ量に対する FBG センサで反射する光の波長の関係を図8に示している。反射光の波長は、与えたひずみ量に対して線形に増加する。この実験で用いた FBG センサの場合、比例定数は、14 pm/g である。

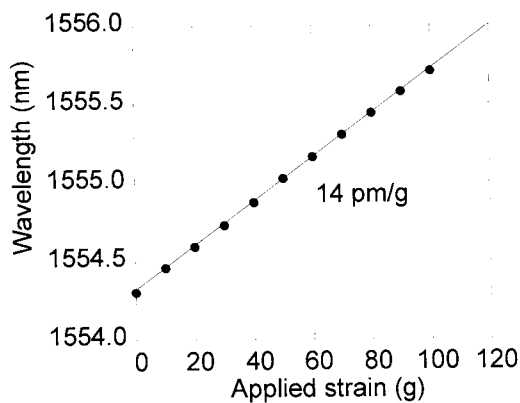


図8 FBG ひずみセンサーの反射波長のひずみ量依存性

FBG センサに与えるひずみを変化させた時、与えられたひずみ量に対応して FBG センサで反射する光の波長は変化するので、同時に、それぞれのチャンネルからの出力強度はまた変化することになる。FBG センサで反射する光の波長が BPF のパスバンドの中心波長よりも短い場合、二つの波長は重なっていないので、受光器で観測される光パワーは小さい。与えるひずみ量が増加すると、FBG センサで反射する光の波長は長くなり、あるひずみ量で、FBG センサで反射する光の波長とパスバンドの中心波長が一致する。パスバンドの中心波長と FBG センサの最大反射波長が一致し、対応する受光器から最大光パワーを観測することになる。ひずみ量が増加し続けると、FBG センサで反射する光の波長は BPF のパスバンドよりも長くなり、FBG の反射ピーク波長は、BPF の透過ピーク波長と一致せず、受光器で観測される出力パワーは減少することが考えられる。

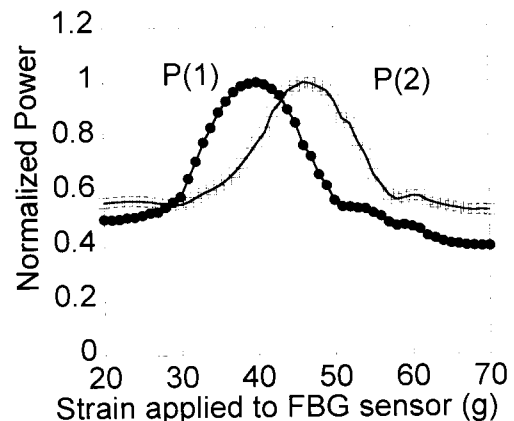


図9 FBG センサに与えるひずみを変化させた時に、受光器で観測されるそれぞれのチャンネルでの出力パワーの変化

FBG センサに与えるひずみを変化させた時に、受光器で観測されるそれぞれのチャンネルでの出力パワーの変化を測定した。それぞれのチャンネルについて測定された最大値で出力パワー変化を規格化した測定結果を図9に示す。

BPF1 と BPF2 はパスバンドの中心波長が異なっており、それぞれ 1554.88 nm と 1554.98 nm であったので、それぞれのチャンネルの出力パワーは FBG センサに与えた異なったひずみの値で最大値を示している。この結果は、提案する波長弁別システムにより、FBG センサで反射した光の波長シフトを BPF からの透過出力光パワーの変化に変換していることを示している。したがって、FBG センサで反射した光の波長は、BPF1 からの出力パワーと BPF2 の出力パワーの比較によって決定できると考えられる。

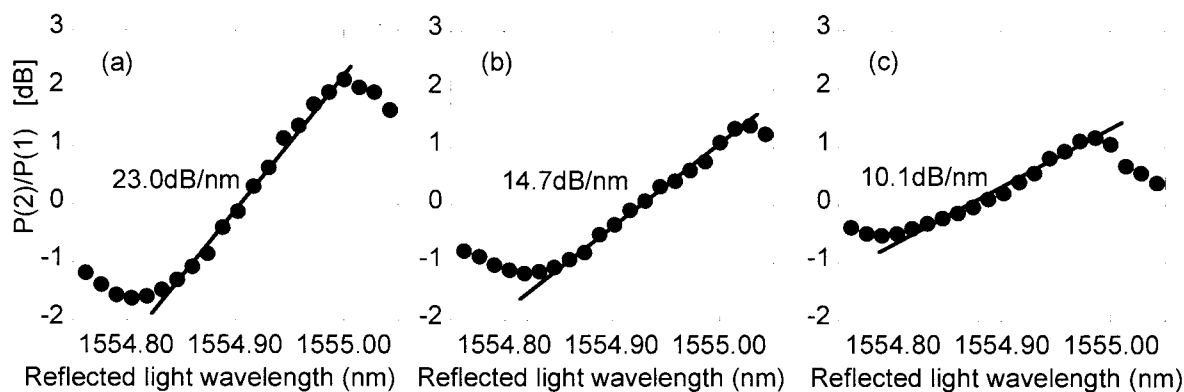


図10 BFG センサーで反射された光の波長の変化による2つのチャンネルのバンドパスフィルタからの出力パワー比の変化と、二つのバンドパスフィルタのパスバンドの中心波長間隔による測定感度の変化, $\Delta\lambda_k = 0.10\text{nm}$ (a), $= 0.06\text{nm}$ (b), $= 0.004\text{nm}$.

FBG センサに与えたひずみ量を変化させた時に発生する反射光の波長変化に対応して変化した各チャンネルの出力パワーを観測し、実験的に観測されたパワー比 $S(1)$ を求め、その結果を図10に示す。実験では、BPF に与えたひずみ量を変えることで、異なったチャンネルの二つの BPF の中心波長差を容易に変化できる。そこで、三種類の実験条件 $\Delta\lambda_k = 0.10, 0.06$, そして 0.04nm の場合におけるパワー比 $S(1)$ を別々に測定した。それぞれの実験条件下において平均中心波長 $\bar{\lambda}_k$ は、 $1554.93, 1554.95$, そして 1554.90nm であった。その結果は、図10(a), 7(b), そして10(c)に示す。二つの BPF からの出力パワー比 $S(1)$ は、両 BPF のパスバンドの中心波長で決められる波長領域内で、FBG センサで反射された光の波長の変化に対して線形な関数として求められている。この結果より、適当な中心波長のパスバンドを持つ二つの BPF 間の出力パワーの比を測定することで、FBG センサで反射した光の波長の弁別が可能であると結論できる。

線形性の傾きは、二つの BPF のパスバンドの中心波長間の差波長に依存する。波長弁別においては、線形性の傾きは、測定の感度を意味している。反射光の波長の測定感度は、3種類の条件において、それぞれ、 $23.0, 14.7$, そして 10.1dB/nm であった。用いた FBG センサの感度は、図8に示すように、 0.014nm/g であるので、 $0.32, 0.21$, そして 0.14dB/g の測定感度に対応している。この測定感度は、多くの分野で利用可能な感度と考えられる。本論文では、BPF に与えられたひずみ量を変化させることにより、異なったチャンネルの BPF 間の波長差 $\Delta\lambda_k$ を簡単に変更することができるので、波長シフトの測定の感度は、測定の目的や、センサの設置状況に合わせて容易に変更できる。この特徴は、FBG センサを用いる計測システムを実際的、産業的に応用していくうえで、有効な点と考えられる。

本論文では、センサ FBG がたった1本 ($N=1$) の場合の実験を行ったが、ここで提案した波長弁別

システムは N 個の直列接続の FBG センサにも適応できる。しかしながら、FBG センサで反射された光は $2 \times N$ に分割されるため、各チャンネルで受光される光のパワーは N の増加に従って減少する。 $N=100$ であれば、少なくとも 23dB を損失することになる。しかし、近年、 5dBm/nm 以上のスペクトル密度をもった広帯域光源を導入することが容易である。また、 μW のオーダーを最少測定量に持つ受光器を比較的安価で導入できる。したがって、本論文で提案した、波長弁別方式は、数個の直列センサから100個の直列センサーまで応用できると考えられる。

5. 結論

チャープした FBG を利用したバンドパスフィルタを用いて構成した波長弁別システムを提案した。単一のパスバンドを持つバンドパスフィルタはチャープしたグレーティングを連結することで製作した。パスバンドの中心波長は、チャープした FBG を利用したバンドパスフィルタにひずみを与えることで、微調整を行うことができる。FBG センサから反射した光波長は、提案した弁別システムで、精度よく測定することができることを示した。測定の目的や、FBG センサの設置条件に対応させて、波長シフトの測定感度は、バンドパスフィルタの特性で、調整することができる。低コストで高性能な波長弁別システムを構成することができた。

参考文献

- 1) A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnum, and E. J. Friebele: *J. Lightwave Technol.* 15 (1997) 1442.
- 2) D. A. Flavin, R. McBride, and J. D. C. Jones: *Opt. Commun.* 170 (1999) 347.

- 3) A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey: Opt. Lett. 18 (1993) 1370.
- 4) M. A. Davis, and A. D. Kersey: Electron. Lett. 31 (1995) 882.
- 5) A. B. L. Ribiro, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and D. A. Jackson: Appl. Opt. 36 (1997)934.
- 6) X. Yang, C.-L. Zhao, Q. Peng, X. Zhou, and C. Lu: Opt. Commun. 250 (2005) 63.
- 7) Y. Sano and T. Yoshino: J. Lightwave Technol. 21 (2003) 132.
- 8) L. Zhang, Y. Liu, I. Bennion, and K. Sugden: Opt. Lett. 23 (1998) 1665.