

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760379

研究課題名(和文)高複屈折FBG-FPIと狭帯域波長掃引による高精度なひずみと温度の同時計測

研究課題名(英文)Precise simultaneous measurement of temperature and strain using FBG-FPI on high birefringence fiber and narrow-ranged wavelength-sweep

研究代表者

和田 篤(Wada, Astushi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・電気情報学群・准教授)

研究者番号：40434021

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：光ファイバブラッグ・グレーティング(FBG)は温度やひずみを測定するセンサとして利用できるが、温度とひずみの両方が独立に変化する環境下においてFBGセンサを使用するのは容易ではない。偏波保持ファイバ上に書き込まれたFBG(PM-FBG)を用いれば温度とひずみを同時に計測可能だが、計測分解能が低下する問題がある。本研究では、偏波保持(PM)ファイバ上に光ファイバブラッグ・グレーティング(FBG)を2個書きこんで構成されたファブリ・ペロー干渉計(FPI)を用いた温度・ひずみセンサを構成した。PM-FBG-FPIによるセンサは単一のPM-FBGよりも高分解能な計測を可能にした。

研究成果の概要(英文)：A Fiber Bragg Gratings(FBG) have been used as a sensor head for measurement of temperature and static strain. However, a standard FBG sensor, which is constructed on single-mode fiber, can not simultaneously measure both temperature and static strain since the sensor has cross-sensitivity between them. The cross-sensitivity problem can be solved by using an FBG constructed on a polarization maintaining fiber(PM-FBG) instead of a standard FBG. We have introduced an Fabry-Perot interferometer constructed with PM-FBG(PM-FBG-FPI) as a sensor head. This presents us improvement on the sensing resolution for the simultaneous measurement of temperature and static strain.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：計測工学

キーワード：光ファイバセンサ 光ファイバブラッググレーティング 温度計測 ひずみ計測

1. 研究開始当初の背景

光ファイバブラッググレーティング (FBG)は図 1 に示すように光ファイバのコア中に周期的な屈折率変化を書き込んだものであり、周期に応じた特定の波長の光を反射する。図 2 に示すように、FBG の反射波長は印加されたひずみや温度に対して線形に変化するため、反射波長の変化を読みとる事でひずみや温度を計測できる。FBG センサはセンサヘッドが省スペース、軽量で、電磁干渉を受けない等様々な利点があり、これを利用した、ひずみ、振動、圧力、音圧、温度といった物理量のセンサが数多く提案されている。しかし反射波長は温度とひずみの両方に対応して変化するため、FBG センサではひずみと温度の分離が常に課題となっている。

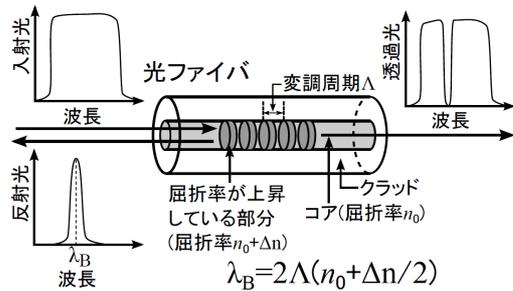


図 1: 光ファイバブラッググレーティング

$$\Delta\lambda = a\Delta\varepsilon + b\Delta T$$

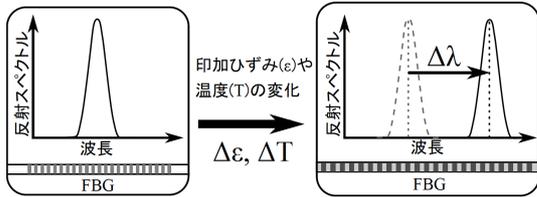


図 2: FBG センサの原理

このような問題を解決する為、FBG センサによるひずみと温度の同時計測に関する研究が数多くなされており、様々な手法が提案されている。しかし、提案された計測手法の精度はひずみで $\pm 20$  マイクロストレイン、温度で $\pm 2$ 程度であり、実用化にはさらなる高精度化が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、高い複屈折性を持つファイバ中に、FBG を反射鏡としたファブリ・ペロー干渉計の構造(FBG-FPI)を構成し、これを用いてひずみと温度の同時計測を高精度に行なう事を目的とする。光の偏光の向きに対して異なる屈折率を示すファイバ中に形成したFBGは、偏光方向に対応して二つの反射波長を持つ。この波長は互いに異なるひずみ依存性と温度依存性を持っており、二つの波長変化を読みとる事でひずみと温度を同時に決定できる。

FBG-FPI はFBG の反射帯域中に鋭い透過ピークを持っており、これを利用すると計測の感度や精度を向上できる。

本研究では、高複屈折ファイバ中に形成したFBG-FPIを用い、異なる温度依存性とひずみ依存性を持つ急峻な透過ピークの波長変

化を読み取る事で高精度なひずみと温度の同時計測を実現する。

3. 研究の方法

計測の原理図を図 3 に示す。光源の波長を透過ピーク近傍の狭い帯域で掃引すると、光源の波長が透過ピーク波長に等しい瞬間だけ光は強く透過し、透過光中にパルスが出現する。この光パルスは変調信号の周期と同期して繰り返し出現する。この時ピーク波長が不変であれば、各掃引周期中におけるパルスの出現時刻は不変である。ここで、ひずみの印加や周囲温度の変化などが生じると透過ピーク波長がシフトし、パルスの出現時刻が変化する。各光パルスの時間遅延を読みとる事で透過ピークの波長変化を検出する。

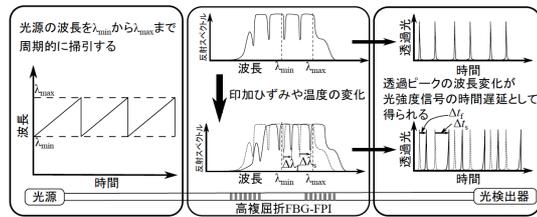


図 3: 高複屈折 FBG-FPI と狭帯域波長掃引によるセンサの原理

4. 研究成果

まず、センサヘッドの設計、試作とその基礎特性の検証を行った。通常的光ファイバ上に構成したFBG-FPIを用いて特性の評価と設計方針の検討を行った。特に、図 4 に示すようなチャープ型FBGを反射鏡としたファブリ・ペロー干渉計(CFBG-FPI)の試作を行い、このファイバ素子を用いたセンシングの有効性を検証した。

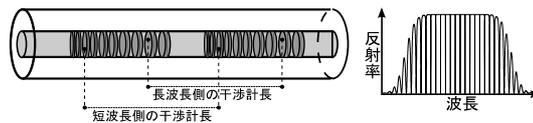


図 4: CFBG-FPI

CFBG は通常FBGとは異なり、格子間隔が光ファイバの軸方向に線形に変化している。このためCFBGでは、波長毎に光を反射する位置、すなわち反射点が異なっており、ブラッグ波長が空間的に分布している見做すことができる。広い反射帯域を持つCFBGでは、数百個から数千個に及ぶ共鳴波長が得られる。したがって、CFBG-FPIを構成することにより急峻な傾斜を持つ透過率ピークが広帯域にわたって多数得られる。

透過ピーク波長のシフトが大きくなると、光源の波長掃引範囲から外れ、そのピークを検出する事が出来なくなるが、波長の掃引幅をCFBG-FPIのフリースペクトルレンジよりも充分広くとれば、掃引範囲から外れた共鳴ピークと入れ替わりに別の共鳴ピークが範

囲内で検出可能になる。波長掃引速度がピーク波長のシフトに対して充分高速であれば、掃引範囲から外れて行くピークと新たに検出可能になるピークを読み変えていくことで、波長掃引の幅を超える大きさの波長シフトが生じて計測可能である。

実際に CFBG-FPI を用いて静ひずみの計測実験を行ない、計測可能範囲の向上を確認した。

次に、光源として利用する分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD)の変調特性について評価を行った。レーザ出力の変調特性についてはかなり高周波の領域まで注入電流に対して線形に追従する事が知られているが、波長の変調特性については明らかではなかった。そこで、1 MHz までの帯域における波長変調特性を評価した。

評価の為に波長測定には、各種のファブリ・ペロー干渉計(FPI)を用いた。これらの測定方法では、電流変調下にある半導体レーザの発振波長が FPI の共鳴ピーク波長と合致する瞬間を検出する。合致する時刻の間隔と、FPI における共鳴ピーク波長の間隔、すなわちフリースペクトルレンジ(FSR)から、単位時間当たりの波長変化量を推定できる。

最初に試みた FBG-FPI を用いた測定では、FBG の反射帯域が狭く、測定可能な波長範囲が限定されている為に粗い近似を用いた推定にとどまった。そこで、FBG よりも反射帯域が広く、ピークの数が多き CFBG-FPI を用いて測定を試みた。CFBG は広い反射帯域を持つ為、CFBG-FPI を用いると広範囲に渡る波長変化を測定できる。ここで使用していた FBG-FPI 及び CFBG-FPI の FSR は 60 pm から 100 pm であり、測定の波長分解能は粗い物であった。最終的には、FSR が 8 pm のファイバ型 FPI を用いて鋸歯状波で電流変調された半導体レーザの発振波長を測定した。

この結果、電流変調の周波数が低い場合の方が単位電流変化当たりの波長変化量が大きく、周波数が高くなると波長変化量が減少する傾向にある事、変調振幅がある程度大きくなると、変調電流と波長変化量の対応関係が非線形となる事が分かった。また、ファイバ型 FPI をセンシングシステムに組み込み、波長変化の非線形性を補償するように改善した。

最後に、偏波保持ファイバで構成した光ファイバ光学系を構成し、高い複屈折性を持つファイバ中に構成した FBG-FPI による温度とひずみの同時計測を実施した。FBG-FPI の構造に起因する鋭い透過ピークは、FBG の反射ピークと同様に、入射光の偏光方向に対応して 2 種類存在し、その温度とひずみの依存性は偏光方向毎に異なる事が確認できた。また、これらの温度依存性とひずみ依存性は実験を用いて定量的に評価した。そして、2 種類の透過ピークの変動を測定する事により、FBG-FPI に印加されたひずみと FBG-FPI 周囲の温度を同時に測定する事ができた。温度と

ひずみの測定結果のふらつき具合は単一の FBG を用いた場合に比べて十分に小さい事が確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- 1) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, "Optical fiber vibration sensor using FBG Fabry-Perot interferometer with wavelength scanning and Fourier analysis," IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 1, 2012, pp.225-229. 査読有 DOI: 10.1109/JSEN.2011.2141984
- 2) Atsushi Wada, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, "Enhancement of dynamic range of optical fiber sensor using fiber-Bragg grating Fabry-Perot interferometer with pulse-position modulation scheme: compensation of source wavelength sweep nonlinearity," IEEE Photonics Journal, Vol. 5, No. 4, 2013, 6801108(8pp). 査読有 DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2276971
- 3) Atsushi Wada, Keisuke Ikuma, Masakatsu Syoji, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi, "Wide-dynamic-range high-resolution fiber Fabry-Perot interferometric sensor with chirped fiber Bragg gratings," Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, No. 18, 2013, pp. 3176-3180. 査読有 DOI: 10.1109/JLT.2013.2280279

〔学会発表〕(計 8 件)

- 1) 井熊 佳祐, 和田 篤, 田中 哲, 高橋 信明「チャープ型 FBG を反射鏡とするファブリ・ペロー干渉計型光ファイバセンサの検討」第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日
- 2) 和田 篤, 井熊佳祐, 手倉森新伍, 田中 哲, 高橋信明「波長掃引とフーリエ解析を用いた FBG ファブリ・ペロー干渉計型光ファイバセンサの性能評価」2012 年秋季第 73 回応用物理学会, 愛媛大学, 2012 年 9 月 11-14 日
- 3) 和田 篤, 田中 哲, 高橋信明「フーリエ解析を用いた狭帯域波長掃引型 FBG-FPI 振動センサ」2012 年日本光学会年次学術講演会講演予稿集, 東京, 2012 年 10 月 23-25 日
- 4) Atsushi Wada, Keisuke Ikuma, Satoshi Tanaka, and Nobuaki Takahashi "Experimental investigation of

dynamic characteristics of wavelength of DFB-LD for FBG-FPI vibration sensor based on wavelength-to-time mapping,” 22th International Conference on Optical Fiber Sensors, Beijing, China, (2012.10).

- 5) 手倉森新伍, 井熊佳祐, 竹内誠, 和田篤, 田中哲, 高橋信明「波長掃引方式チャープ FBG ファブリ・ペロー干渉計型光ファイバセンサによる広ダイナミックレンジ温度測定」2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日
- 6) 和田篤, 井熊佳祐, 田中哲, 高橋信明「波長掃引型 FBG-FPI 振動センサのための分布帰還型半導体レーザの波長変調特性の測定」2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 2013 年 3 月 27-30 日
- 7) 内村良太郎, 和田篤, 手倉森新伍, 田中哲, 高橋信明「偏波保持ファイバ内に構成した FBG ファブリ・ペロー干渉計の静ひずみ・温度依存性の測定」2013 年秋季第 74 回応用物理学会学術講演会, 京都, 2013 年 9 月 16-20 日
- 8) 内村良太郎, 和田篤, 手倉森新伍, 竹内誠, 月田統, 田中哲, 高橋信明「偏波保持ファイバ内に構成したファブリ・ペロー干渉計を用いた温度と静ひずみの同時測定」2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 2014 年 3 月 6 日

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

和田 篤 (WADA ASTUSHI )  
防衛大学校・電気情報学群・准教授  
研究者番号： 40434021

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし