

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360140

研究課題名（和文）多チャンネル FBG による全光学的信号処理及び超高感度センシングデバイスへの応用

研究課題名（英文）Application of the all optical signal processing and the high-sensitive sensing devices based on the utilization of multi-channel fiber Bragg grating.

研究代表者

李 洪譜（LI HONGPU）

静岡大学工学部・准教授

研究者番号：90362186

研究成果の概要（和文）：

本研究は、特別な多チャンネルファイバグレーティング（FBG）を持つ新しい高繰り返し超短光パルスの発生法を提案した。本研究の後半では、特別な位相シフト FBG による温度、張力、屈折率等の新しいセンシング法を提案した。ここで、特別な線形チャープト FBG より温度と張力同時測定できるファイバセンシング技術を開発した。又、我々は特別な位相シフト長周期グレーティング（LPG）による温度と媒質屈折率の同時測定を実現した。

研究成果の概要（英文）：

In the first part of this research, a novel all-optical simultaneous pulse multiplication and shaping approach is proposed, which is based on the simultaneous utilization of two amplitude-assisted phase-only spectral filters realizable by using a short fiber Bragg grating. In the second part of this research, a novel scheme for quantitative calibration of a phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating is numerically and experimentally demonstrated and applications of the phase-shift FBG to both the temperature and the refractive-index sensor have been proposed and numerically demonstrated. Finally, a novel approach to calibrate a phase-shift formed in a long-period fiber grating (LPG) is firstly proposed and numerically demonstrated. By using a CO<sub>2</sub> laser with high-repetition-rate pulses emission, an equivalent phase-shift is successfully created at middle of the LPG. As application of the proposed calibration scheme, measurement for the temperature and the refractive index of the ambient solution has been proposed and successfully demonstrated by using a phase-shifted LPG.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・機器、応用光学・量子光工学、ファイバグレーティング、ファイバセンシング、光信号処理、WDM 光通信システム、ファイバリングレーザ、多チャンネル FBG

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 超高速光通信及び超高速光信号処理を実現するために、高繰り返し超短光パルス波形制御技術が不可欠である。今までの高繰り返しパルス列を発生させる技術は、二つに分類される。一つは非線形な方法である。例えば、ファイバまたはFBG中の変調不安定性の効果を利用することにより、連続または準連続レーザを超短光パルス列に同期させることである。ここで、石英ファイバの非線形性は非常に小さいので、極めて高い入射パワーが必要となる。従って、この方法の実現と応用は困難である。もう一つは線形な方法である。パルスは回折格子を用いてスペクトル分解し、又はスペクトルフィルタを用いることにより、パルス列を生成する。このアプローチでは、光パルス処理は、一般的にバルク・グレーティングとレンズシステム、又はAWGと呼ばれるアレイ導波路グレーティングの時間-スペクトル-時間領域変換を用いて行われてきた。この方法の欠点は、質の高いバルク素子を必要とすることと、それら自身を光ファイバシステムの導波装置と結合させることが困難なことである。

(2) 一方で、FBGの応用は光ファイバ通信領域だけではない。FBGは本来センシング機能を持つファイバ素子であり、反射スペクトルの波長変化により、FBGと埋め込んだ構造物や材料の温度、圧力、張力変化などが測定出来る。最近では、FBGセンサーは小型、軽量、多数の波長の多重複合化可能であるので、医療、生命科学、環境診断学等でかなりの注目を集めており、FBGは抗体、核酸、毒素、農薬、火薬、他の小分子を含む様々な種類の生物学的試薬を検知する応用を見出すと期待されている。その原理は外部の検知対象と、細化されたFBGの部分相互に作用しているエ

バネッセント波に基づき、FBG周囲媒質の屈折率変化を反射スペクトルの変化に変換できることである。しかしながら、この方法は波長測定装置(例えば、光スペクトラムアナライザ)の精度または波長走査の時間などに制限され、検知対象の微量変化かつ高速の測定は不可能である。現状では、既存のFBGセンシング手法をさらに超高感度化かつ高速化することが強く求められている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、高繰り返し超短光パルスの発生及びパルス波形を制御させる為の新しい全ファイバリングレーザを提案する。ここでは、特別に設計した153チャンネルチャープドFBGが、ファイバ・リング共振器中の分散素子として用いられており、光パルス列の繰り返し周波数は、100GHz以上にすることが可能である。この方法は、適切なアポダイゼーション曲線を施すことにより発生するパルスの波形を制御することができる。

(2) 本研究後半では、特別な位相シフト多チャンネルFBGを用いて新しい超高感センシングデバイスを提案する。ここで、差し込んだ多チャンネルFBGは各バンド端に近い波長で機能し、光の群速度を大きく減らすバンド端に近い波長領域は「遅い光」領域(a slow-light region)と言われる。結果として、測定システムの位相変化の感度を既存のFBGセンシングシステムと比較し、数桁大きく増加させることが可能である。また、FBGセンシング部分(外径が細化されたFBG部分)において適切な厚さの多層膜を蒸着し、その得られた感度をさらに高めることが予想している。

## 3. 研究の方法

(1) 図3に我々の提案する高繰り返し超短

光パルスの発生及び波形制御ための実験配置を示す。図中において、多チャンネル FBG は本研究で重要な役割を果すデバイスである。発生するパルスの繰り返し周波数は、リング共振器の共振周波数の整数倍になる。適切な動作の為に、ニオブ酸リチウム(LN)光変調器の変調周波数は、共振器の共振周波数に同期させなければならない。

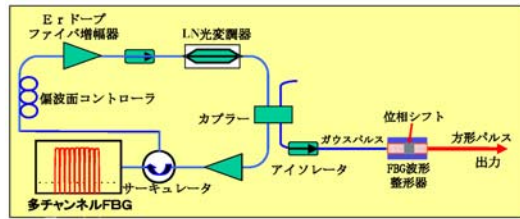


図3 高繰り返し超短光パルス列の発生系

(2) 位相シフト多チャンネル FBG を用いて、図5による高感度 FBG センシングデバイスの発生の動作確認と特性評価を行う。ここで、チューナブルレーザーは GPIB によって制御される。入力光は図5に示すように2つのアームに分けられる。一方は多チャンネル FBG に直接入射し、透過される。もう一方は参考ファイバに直接透過し、出力パワーは光学ヘッドで検知される。上記の構成で出力スペクトルは試料の屈折率に強く依存していることを明らかにする。また、これらの測定に加えて、温度に対する特性の変化も調べる。

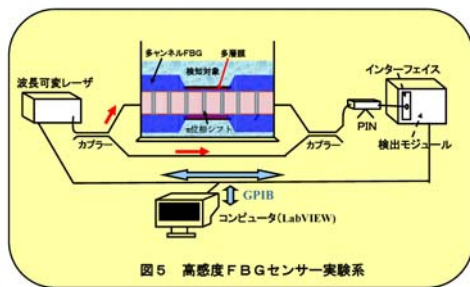


図5 高感度FBGセンサー実験系

#### 4. 研究成果

本研究の前半では、高繰り返し超短光パルスを生じさせる為の新しい方式を提案した。ここでは、特別に設計された多チャンネルファイバグレーティング (FBG) が入力パル

スの多重再生スペクトルフィルタとして用いられ、発生するパルスの波形を制御することができる。本研究の後半では、特別に設計された位相シフト FBG による新しい温度、屈折率、張力等のファイバセンシング技術を提案した。ここで、特別な単一チャンネル線形チャープト FBG より温度と張力同時測定できるファイバセンシング法を提案した。次に特別な相シフト長周期グレーティング (LPG) による温度と溶剤の屈折率を同時測定できる法を提案し、高感度・多機能を持つ LPG センシングデバイスの動作及び特性評価等の予備実験を行った。主な研究進展は以下の通りである。

- 1) 超高チャンネル数の FBG を実現するために、新しい2重、3重サンプリング法を提案した。これにより光ファイバ通信バント (O+E+S+C+L) 全体を覆う 1215 チャンネル FBG の新たな設計・作製法を提案した。
- 2) PZT 素子による 51 チャンネル位相シフトファイバグレーティング (FBG) を提案した。位相シフト FBG による多チャンネル超狭フィルター及び多波長レーザーへの応用を実現した。
- 3) 特別に設計された位相シフトファイバグレーティング (FBG) による新しい温度、屈折率等ファイバセンシング技術を提案した。又は特別な単一チャンネル線形チャープト FBG より温度と張力同時測定できるファイバセンシング法を提案した。
- 4) CO<sub>2</sub> レーザによる長周期ファイバグレーティング (LPG) 及び位相シフト (LPG) の作製法を開発出来た。
- 5) 特別な相シフト長周期グレーティング (LPG) による温度と溶剤の屈折率を同時測定できる法を提案し、高感度・多機能を持つ LPG センシングデバイスへの応用を確認することが出来た。
- 6) CO<sub>2</sub> レーザによるナノファイバの作製技術を開発した。または CO<sub>2</sub> レーザによるナノファイバグレーティングの新たな作製法を提案した。

以上の研究結果より、本分野のトップ雑誌に

掲載のこと及びIEEE、OSA 学会からの依頼講演もあり、大きい注目を集めた。尚本研究使用している材料は一般通信用な光ファイバーに限り、非線形性が低い、非線形効果（光カー係数  $n_2$ ）は非常に小さいので、そのようなFBG は非線形光デバイスとしても、極めて高い入射光パワー（平均数百W）が必要となり、実用化は完全不可能である。他の高非線形材料、例えばカルコゲナイドガラスによりファイバグレーティング及びナノファイバの作製方法の開発等は、今後の課題である。

#### 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9件）

- ① K. Hishiki and H. Li, “Phase-shift formed in a long period fiber grating and its application to the measurements of temperature and refractive-index,” *Opt. Express*, 査読有, Vol. 21, pp. 11901-11912 (2013).  
DOI: 0.1364/OE.21.011901
- ② L. Xian and H. Li, “Calibration of a phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating and its thermal effect,” *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 査読有, Vol. 31, pp. 1185-1190 (2013).  
DOI: 10.1109/JLT.2013.2245100
- ③ L. X, P. Wang, K. Ogusu, and H. Li, “Cladding mode coupling in a wide-band fiber Bragg grating and its application to a power-interrogated temperature sensor,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, Vol. 25, pp. 231-233 (2013).  
DOI: 10.1109/LPT.2012.2235062
- ④ X. Chen, L. Xian, K. Ogusu, and H. Li, “Single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser,” *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 査読有, Vol. 107, pp. 791-794 (2012).  
DOI: 10.1007/s00340-012-4926-8
- ⑤ X. Chen, K. Ogusu, and H. Li, “Phase-Shift induced in a high-channel-count fiber Bragg grating and its application to multiwavelength fiber ring laser,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, Vol. 23, pp. 498-500 (2011).  
DOI: 10.1109/LPT.2011.2112761

- ⑥ “X. Chen, J. Hayashi, and H. Li, “Ultrahigh-channel-count fiber Bragg grating based on the triple-sampling method,” *Optics Commun.*, 査読有, Vol. 284, pp. 1842-1846 (2011).  
DOI: 10.1016/j.optcom.2010.12.029
- ⑦ X. Chen, T. Kameyama, Ming Li, and H. Li, “Multiple dual-wavelengths fiber ring laser utilizing a phase-only sampled fiber Bragg grating with multiple phase-shifts inserted,” *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 査読有, Vol. 101, pp. 115-118 (2010).  
DOI: 10.1007/s00340-010-4017-7
- ⑧ X. Chen, Y. Painchaud, K. Ogusu, and H. Li, “Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating,” *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 査読有, Vol. 28, pp. 2017-2022 (2010).  
DOI: 10.1109/JLT.2010.2051215
- ⑨ X. Chen, J. Hayashi, and H. Li, “Simultaneous dispersion and dispersion-slope compensator based on a doubly-sampled ultrahigh-channel-count fiber Bragg grating,” *Applied Optics*, 査読有, Vol. 49, pp. 823-828 (2010).  
DOI: 0003-6935/10/050823-06

〔学会発表〕（計16件）

- ① L. Xian and H. Li, “Simultaneous temperature and strain measurement based on the utilization of a wide-band fiber Bragg grating with a power-interrogation method” IEICE Society Conference 2013, 2013年03月19日～2013年03月22日, 岐阜大(岐阜市).
- ② H. Li, “Calibration of a phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating and its application to environmental parameters sensor,” *Photonics Global Conference 2012*, Dec. 13-16, 2012, Resorts World Convention Centre (Singapore). (**Invited report**).
- ③ L. Xian and H. Li, “Investigation of the phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating by using power-interrogated fiber ring laser” IEICE Society Conference 2012, 2012年09月11日～2012年09月13日, 富山大(富山市).
- ④ H. Li, “High channel-count comb-filter based on sampled fiber Bragg grating,” *International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA2012)*, July 2-5, 2012,

Ecole de technologie superieure (Montreal, Canada) **(Invited report)**.

- ⑤ K. Hishiki, Y. Taki, Y. Goto, X. Chen, and H. Li, "Fabrication of phase-shifted long-period fiber grating by using CO<sub>2</sub> laser," IEICE Society Conference 2012, 2012年3月20日～2012年03月23日, 岡山大(岡山市).
- ⑥ X. Chen and H. Li, "Enhanced slow light in a phase-shifted multichannel fiber Bragg grating assisted by stimulated Brillouin scattering," Asia Communications and Photonics 2011, Nov. 13-16, 2011, Convention Center, Shanghai (China).
- ⑦ X. Chen, and H. Li, "Enhanced Slow Light in a Phase-Shifted Multichannel Fiber Bragg Grating Assisted by Stimulated Brillouin Scattering," IEICE Society Conference, Sept. 13-16, 2011, 北大(札幌市).
- ⑧ L. Xian, X. Chen, and H. Li, "High channel-count ultra-narrow comb-filter based on a triply sampled fiber Bragg grating," IEICE Society Conference, Sept. 13-Sept. 16, 2011, 北大(札幌市).
- ⑨ H. Li, "High channel-count ultra-narrow comb-filter based on a sampled fiber Bragg grating," OECC2011, July 4-8, 2011, The Splendor Kaohsiung (Taiwan). **(Invited report)**.
- ⑩ X. Chen, L. Xian, and H. Li, "Single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser incorporating an unpumped erbium-doped fiber loop," CLEO2011, May 1-6, 2011, The Convention Center, Baltimore (U.S.A).
- ⑪ 林 純也、陳 緒興、李 洪譜, "トリプルサンプリング法による超高チャンネルファイバブラッググレーティング," 電子情報通信学会2011総合大会、2011年3月14日～2011年3月17日, 東京都市大(東京).
- ⑫ X. Chen and H. Li, "Single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser incorporating an unpumped erbium-doped fiber," 電子情報通信学会2011総合大会、2011年3月14日～2011年3月17日, 東京都市大(東京).
- ⑬ X. Chen and H. Li, "Phase-Shift Induced in a high-channel-count Fiber Bragg Grating and Its application to multiwavelength fiber ring laser," PGC2010, Dec. 14-16, 2010, Suntec Convention Centre (Singapore).
- ⑭ H. Li, "Ultra-high channel-count fiber Bragg grating based on the utilization of

the phase-only sampling," SPIE Photonic Asia 2010, Oct 18-20, 2010 Beijing (China). **(Invited report)**.

- ⑮ 陳 緒興、線 輪輪、李 洪譜, "Phase shift induced by piezoelectric transducer attached to a phase-only sampled fiber Bragg grating," 電子情報通信学会2010ソサイエティ大会、2010年9月14日～2010年9月17日, 大阪大(大阪).
- ⑯ X. Chen, Y. Painchaud, and H. Li, "Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating," OSA Optics & Photonics Congress 2010 (BGPP), Jun. 21-24, 2010, Karlsruhe (Germany).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

李 洪譜 (LI HONGPU)  
静岡大学工学部・准教授  
研究者番号：90362186

### (2) 研究分担者

なし

研究者番号：

### (3) 連携研究者

なし

研究者番号：