

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289101

研究課題名(和文) As-S(Se)ナノファイバを用いた非線形ファイバグレーティングの開発とその応用

研究課題名(英文) Development and application of the As-S(Se)-based nonlinear fiber gratings

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の前半では、新たな螺旋状ナノ長周期ファイバグレーティング(LPG)作製法を提案し、その作製法の有用性と適用性を明らかにした。また試作したLPGを用いて、全光学的非線形デバイス：非線形光微小球共振器や、光パルスの多重再生と任意波形発生器や、又広帯域バンド阻止フィルタ等への応用を提案した。本研究の後半では、特別な直列螺旋状LPGを用いて、新たな温度と折率、温度とねじれ同時測定できるファイバセンシング法を提案し、高感度・多機能ファイバセンシングデバイスへの応用を実現した。

研究成果の概要(英文)：In the first part of this research, a novel method to fabricate a helical long-period fiber grating (LPG) in a micro/nanofiber has been proposed. By using the fabricated both the nanofiber and the helical LPGs, all-optical components such as the nonlinear optical micro-cavity, the optical pulse-multiplication and optical arbitrary pulse generator, and the band-rejection filter, which are essential to the next-generation broadband and ultrafast photonics systems, have been successfully realized.

In the second part of this research, new kind of HLPGs written by using CO2 laser is proposed and experimentally demonstrated, As an application of this kind of HLPG, novel fiber sensors which allow for temperature-insensitive measurement of the refractive index and the torsion are proposed and experimentally demonstrated, which is based on utilization of two cascaded HLPGs but with different transverse diameters and opposite helicities.

研究分野：工学

キーワード：電子デバイス・機器 回路 ナノファイバ ファイバグレーティング 非線形光デバイス 光ファイバセンシング 光信号処理 応用光学・量子光工学 光デバイス・光

1. 研究開始当初の背景

インターネット、スマートフォン等無線ネットワークの急激な普及に伴い、光ファイバ通信システムとして波長分割多重システムと160Gb/s～1Tb/s級の光時分割多重システムを融合したフォトニックネットワークシステムの実現が期待されている。このような光通信システムでは光信号を直接制御・処理することができ、チャンネル数が多くかつ超高速で動作できる光スイッチや光論理デバイス(光学微積分器、光 AND や光 OR ゲート、全光的波形整形器)等非線形光デバイスの実現が不可欠である。これまでに、ファイバグレーティングを用いた光スイッチや光論理デバイスへの実現は沢山報道されたが、石英ファイバ中の非線形効果(光カー係数 n_2)は非常に小さいので、そのようなファイバグレーティング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。現状では、既存のファイバグレーティングを更に微小化し、実用化可能な全光学非線形ファイバデバイスへの実現が強く望まれている。

一方で、ファイバグレーティング特に長周期ファイバグレーティング LPG の応用は光ファイバ通信領域だけではない、本来強くセンシング機能を持つデバイスであり、透過スペクトルの波長変化により、LPG と埋め込んだ構造物や材料の温度、圧力、張力、歪み変化などが測定でき、過去数十年間に土木工学、石油・ガス産業、電気エネルギー、航空宇宙機等分野に幅広く応用された。その原理は外部の検知対象と、LPG のクラッドモード部分相互に作用しているエバネッセント波に基づき、LPG 周囲媒質の屈折率変化を透過スペクトル波長(損失ピーク波長)の変化に変換できることである。しかしながら、通常の LPG は波長シフト/屈折率変化の感度が極めて小さく、上記の方法は波長シフトの微小量を精確に測定するため、より高い波長分解能を有する光スペクトルアナライザ(OA)または広帯域光源等が望まれるが、そのデバイスはすべて複雑かつ高価であり、更に波長走査は極めて低効率(低速度)なので、検知対象の微小量変化かつ高速の測定は不可能である。現状では、従来の LPG デバイス及び既存の LPG センシング技術をさらに小型化、超高感度化かつ高速化することが強く求

められている。

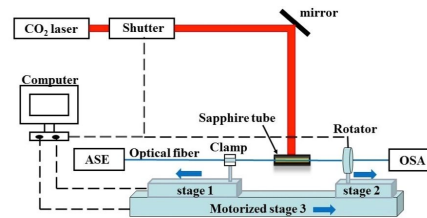
2. 研究の目的

(1)本研究では、先ずカルコゲナイド光ナノファイバ(直径は数十 nm 数百 nm)を用いられ、新しい螺旋状長周期ファイバグレーティング(LPG)を提案し、小型化、高性能化とその次世代広帯域・超高速フォトニクス通信システムに不可欠な全光学的非線形デバイスへの応用を目指す。

(2)CO₂ レーザを用いて 2 cm 程度の短いファイバ中に螺旋状の LPG の作製及びその歪み・ねじれセンサーへの応用を試みる。本研究では、従来の LPG 作製技術を更に発展させ、螺旋状ナノ LPG の新しい設計法の開発と作製法の確立を実証し、そして小型化、安価、高性能化及び超高感度・高速ナノファイバ LPG 系センシングデバイスへの応用を目指す。

3. 研究の方法

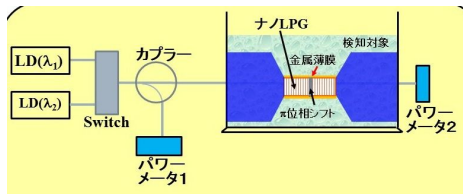
(1)本研究提案するナノファイバと螺旋状 LPG 製法を下図に示す。ここで、特別な(サファイアチューブ)結晶管の使用を提案している。CO₂ レーザ光で結晶管を照射すると、



管内温度はファイバが溶ける温度 800 以上まで上昇する。その後、管内に溶けられたファイバはステージ 1 及び 2 移動することによって細線化し、さらにステージ 3 でファイバ移動させていくに伴い、回転モーターで一定の速度で回転させる。ここで、CO₂ レーザ出力パワー、サファイアチューブのサイズ、三つステージの移動速度、回転モーターの回転速度等を理論的、実験的に最適化することが必要である。

(2)下図による高感度 LPG 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。センシング部分として作られた螺旋状ナノ LPG を用いる。ここで、LD1 と LD2 は波長が異なる単一縦モード半導体レーザである。入力光カプラーに分けられる。一つは螺旋状ナノ LPG 直接入射し、透過され、光パワーをパワ

ーメータ1が検知する。もう一方は参考光としてパワーメータ2で検知する。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。実験結果と理論の比較により、提案した方式の有用性と妥当性を明らかにする。



4. 研究成果

光ファイバのコア部分に周期的な屈折率変化を書き込んだファイバ・グレーティングは、波長多重(WDM)光通信システムや光ファイバ・センシングシステムに不可欠な光デバイスである。本研究では、我々はこれから開発した多チャンネル・高性能ファイバ・グレーティングの作製技術を更に発展させ、次世代広帯域・超高速フォトニクス通信システムや超高感度・高速度光ファイバセンシングシステムに不可欠なマクロ・ナノファイバグレーティングの実現を目指す。本研究の前半では、新しい螺旋状マイクロ・ナノ長周期ファイバグレーティング(LPG)作製技術を成功した。応用として、次世代広帯域・超高速フォトニクス通信システムに不可欠な全光学的非線形デバイス：カルコゲナイトファイバを用いた非線形光微小球共振器や、光パルスの多重再生と任意波形発生器や、又光通信用広帯域バンド阻止フィルタ等を実現した。本研究の後半では、螺旋状LPGによる新しい温度、屈折率、ねじれ等のファイバセンシング技術を提案した。ここで、特別な二つ直列螺旋状LPGより温度とねじれ測定できるファイバセンシング法を提案した。次に細線化した螺旋状LPGによる溶剤の温度と屈折率の同時測定法を提案し、高感度・多機能を持つLPGセンシングデバイスを実現した。主な研究進展は以下の通りである。

カルコゲナイトファイバを用いた非線形光微小球共振器の作製法を開発した。ファイバ・グレーティングによる光パルスの多重再生と任意波形発生器を提案した。螺旋状長周期ファイバ・グレーティングによ

る光通信用広帯域バンド阻止フィルタへの応用を実現した。

CO₂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CO₂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。

炭酸ガスレーザーによる長さ30cmの光ナノファイバの作製方法を開発出来た。炭酸ガスレーザーによる螺旋状長周期ファイバ・グレーティング作製法を提案し成功した。

螺旋状ナノファイバグレーティングの製作法を開発した。

螺旋状長周期ファイバ・グレーティングによる温度と歪み・ねじれ同時測定センサーへの応用を実現した。

螺旋状長周期ファイバ・グレーティングによる歪みと溶剤濃度同時測定センサーへの応用を実現した。

以上の研究結果より、本分野のトップ雑誌に掲載のことが及びIEEE、OSA学会からの依頼講演もあり、大きい注目を集めた。尚、カルコゲナイトグラスによりナノファイバ及び螺旋ナノファイバグレーティングの製作の目標には、実現されてなかった。カルコゲナイトグラスの融点は一般石英ガラスの融点と違い、極めて低く、CO₂レーザによる作製技術は適用しないことを明らかにした。カルコゲナイトナノファイバグレーティングの開発は、引続き今後の課題である。

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)

G. Inoue, P. Wang, and H. Li, "Flat-top band-rejection filter based on two successively-cascaded helical fiber gratings," *Opt. Express*, Vol. 24, pp. 5442-5447 (2016).
DOI: 10.1364/OE.24.05442

P. Wang and H. Li, "Helical long-period grating formed in a thinned fiber and its application to refractometric sensor," *Applied Optics*, Vol. 55, pp. 1430-1434 (2016).
DOI: 10.1364/AO.55.001430

H. Li and X. Chen, "Energy-efficient optical pulse multiplication and shaping based on a triply sampled filter utilizing a fiber Bragg grating," *IEEE/OSA J.*

Lightwave Technol., Vol. 33, pp. 2167-2176 (2015).

DOI: 10.1109/JLT.2015.2404333

P. Wang, L. X, and H. Li, "Fabrication of phase-shifted long-period fiber grating and its application to strain measurement," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 27, pp. 557-560 (2015).

DOI: 10.1109/LPT.2014.2385067

L. Xian, P. Wang, and H. Li, "Power-interrogated and simultaneous measurement of temperature and torsion using paired helical long-period fiber gratings with opposite helicities," Opt. Express, Vol. 22, pp. 20260-20267 (2014).

DOI: 10.1364/OE.22.020260

H. Li and X. Chen, "High channel-count ultra-narrow comb-filter based on a triply sampled fiber Bragg grating," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 26, No. 11, pp. 1112-1115 (2014).

DOI: 10.1109/LPT.2014.2316492

K. Ogusu and H. Li, "Pulse response of nonlinear multimode interference couplers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 50, pp. 295-303 (2014).

DOI: 10.1109/JQE.2014.2307922

K. Ogusu and H. Li, "Normal-mode analysis of switching dynamics in nonlinear directional couplers," IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 31, pp. 2639-2646 (2013).

DOI: 10.1109/JLT.2013.2272467

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

[学会発表](計16件)

Peng Wang, Gen Inoue, and Hongpu Li, "Flat-top band-rejection filter based on helical long-period fiber grating," IEICE Society Conference 2016, 2016年3月15日~2016年03月18日、九州大(福岡県・福岡市西区).

H. Li, "Advanced phase-shifted fiber gratings and their applications to comb filter and fiber sensors," Asia Communications and Photonics 2015 Hong Kong (China), (Invited report).

H. Li, "Phase-shifted fiber gratings and their applications to fiber ring laser and fiber sensors," 2015 EMN Optoelectronics meeting, 2015, Beijing (China), (Invited report).

Peng Wang and Hongpu Li, "Helical long-period fiber gratings formed in

optical fiber with a different diameter," IEICE Society Conference 2015, 2015年9月8日~2015年9月11日、東北大(宮城県・仙台市青葉区).

P. Wang and H. Li, "Fabrication of a long-length microfiber by using a CO₂ laser," IEICE Conference 2015, 2015年3月10日~2015年3月13日、立命館大(滋賀県・草津市野路東).

H. Li, "Energy-efficient optical pulse multiplication and shaping based on triply-sampled spectral filter utilizing fiber Bragg grating," SPIE Photonics Asia 2014, Beijing (China), (Invited report).

Peng Wang and Hongpu Li, "Fabrication of a phase-shifted long-period fiber grating and its thermal and strain characteristics," IEICE Society Conference 2014, 2014年9月23日~2014年9月26日、立命館大(滋賀県・草津市野路東).

H. Li, "Optical pulse multiplication based on doubly-sampled spectral filter utilizing fiber Bragg grating," ICP 2014(5th International Conference on Photonics), Kuala Lumpur (Malaysia).

P. Wang, K. Hishiki, and H. Li, "Simultaneous temperature and strain measurement by using a power-interrogated long-period fiber grating," OSA Optics & Photonics Congress, Advanced Photonics, Barcelona (Spain).

Lunlun Xian, Peng Wang, and H. Li, "Simultaneous measurement of temperature and strain by using on a linearly chirped fiber Bragg grating with a slanted reflection spectrum," Asia Communications and Photonics 2013 Beijing (China).

H. Li, "Phase-shift formed in a tapered long period fiber grating and its application to simultaneous measurements of temperature and refractive index," SPIE 2013 Optics+Photonics (Photonic Fiber and Crystal Devices 2013), San Diego (U.S.A).

日紫喜圭介、王鵬、細越賢人、李洪譜、長周期ファイバグレーティングを用いたパワーインタロゲーション温度センサーの実現、電子情報通信学会2014総合大会、2014年3月18日~2014年3月21日、新潟大(新潟県・新潟市).

L. Xian and H. Li, "Simultaneous temperature and strain measurement by using a wide-band fiber Bragg grating," CLEO-PR & OECC/PS2013, Kyoto (Japan), paper: MS2-7, July, 2013.

L. Xian and H. Li, "Fabrication of helical long-period fiber gratings by using a CO₂

laser,” 2013年9月17日～2013年9月20日、九州工大(福岡県・福岡市)。

P. Wang, K. Hishiki, L. Xian, and H. Li, “Microfiber interferometer fabricated by using CO₂ laser and its application to a temperature-insensitive refractometric sensor,” IEICE Society Conference 2013, 2013年9月17日～2013年9月20日、九州工大(福岡県・福岡市)。

日紫喜圭介、李洪譜、位相シフト長周期ファイバグレーティングの位相シフト量のキャリブレーション、電子情報通信学会2013ソサイエティ大会、2013年9月17日～2013年9月20日、九州工大(福岡県・福岡市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 件)

〔その他〕

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~dhli/index.html>

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：