

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24年 5月31日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560040

研究課題名（和文）

機械的に誘起された長周期グレーティングに基づくファイバレーザセンシング

研究課題名（英文）

Fiber laser sensing based on mechanically-induced long-period gratings

研究代表者

坂田 肇 (SAKATA HAJIME)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：40377718

研究成果の概要（和文）：

任意のファイバへの形成が可能な圧力印加型長周期ファイバグレーティング（LPFG）を機械押着、光硬化樹脂収縮、磁力誘起の3つの方法で実現した。LPFGは元来選択波長に損失を与えるが、クラッド-コアモード変換によりバンドパスフィルタ応答を得た。希土類添加ファイバからなるレーザ共振器内にLPFGを挿入し発振波長を制御した。さらに、LPFGの周囲環境変化に対する発振波長・出力光強度の変化から、温度・圧力の同時センシングをレーザ光特性から得る方式を得た。

研究成果の概要（英文）：

Pressure-induced long-period fiber gratings (LPFGs) were formed in fibers by three methods, *i. e.*, mechanical pressure, UV-curable adhesive, and magnetic force. Although the LPFG is known as a band-rejection filter, the bandpass filter response was obtained by cladding-to-core modes conversion. By introducing the LPFG into the rare-earth-doped fiber laser resonator, tunable operation of the fiber lasers was attained. By using the change of the laser output power and the wavelength according to the circumstance of LPFG, simultaneous sensing of temperature and pressure was obtained from the laser output characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光ファイバ、レーザ工学

1. 研究開始当初の背景

長周期ファイバグレーティング（LPFG）は、数100 μm の周期を有するファイバ素子であり、共鳴波長において損失を示す。共鳴波長は温度や圧力など周囲環境に応じてシフトするため、光アンプ利得等化器として利用されるのみならず、センサとしての研究も盛ん

に行われている。ただし、現在、研究されているセンサ応用の多くは、ファイバの透過スペクトル特性を観測することで成り立つため、以下のような課題がある。第1に、測定のため、広帯域光源と光スペクトラムアナライザを必要とし、システムの大型化や低速化を招く。第2に、LPFG作製にはファイバ中に

屈折率変調を与えるため、エキシマレーザ、炭酸ガスレーザなどメンテナンスの要求される大型高出力光源を必要とする。第3に、LPFG 形成は非可逆的であり、敷設済みファイバ内での移設は困難である。

研究代表者らは、LPFG の特徴である“グレーティング周期の長さ”を“制御容易性”として生かすために、圧力印加により LPFG を誘起し、センサヘッドとして活用した。この圧力誘起 LPFG をファイバ共振器内に挿入し、ファイバレーザの発振波長および出力光強度を計測することで、検出位置とその状況を感知する方式を着想し研究を行った。

2. 研究の目的

本研究においては、ファイバレーザと LPFG を融合したセンサシステムを以下の観点から研究する。すなわち、(1) LPFG は再構成可能で共鳴波長を可変制御できること、(2) ファイバレーザ構造により、自ら信号を発するアクティブなセンシングを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

1) ファイバへの圧力印加による LPFG 形成

シングルモードファイバ (SMF) への周期的圧力印加による LPFG 形成のメカニズムを明らかにし、効果的手法でコアモードクラッドモード変換を発生させる。周期的マイクロベンドをファイバ中に形成するため、以下の3方式を検討した。① グラファイトロッドアレイないしコイルスプリングと精密ステージによる機械的圧力印加、② グラファイトロッドアレイと UV 硬化樹脂の収縮による継続的圧力印加、③ コイルスプリングと磁石の圧着による圧力印加。

2) LPFG 周期によるレーザ発振波長制御

ファイバレーザ共振器内に LPFG が誘起されると、利得スペクトルが波長選択的損失を受けることで利得ピーク波長に変化を生じる。つまり、LPFG 未形成時の発振とは異なる条件でレーザ発振が生じる。ファイバレーザ共振器で使用する場合、発振可能波長範囲を最大 100 nm 程度と考えれば、グレーティング周期を±10%程度制御できればよいことになる。本研究では、発振波長の制御が可能なようにピッチ可変なコイルスプリングを通して SMF への圧力印加を行った。

3) レーザ出力と発振波長の解析による圧力・温度同時センシング

LPFG に与える圧力と温度の変化に応じて、ファイバレーザの発振波長と出力光強度の変化する様子を把握する。変換パラメータを求め、レーザの発振状態を元に、温度と圧力の同時センシングを行う。

4. 研究成果

1) ファイバへの圧力印加による LPFG 形成

LPFG の形成方法として、グラファイトロッドアレイによる周期固定型とコイルスプリングによる周期可変型を作製し評価した。周期固定型においてはファイバとグラファイトロッドアレイを挟んだガラス基板を UV 硬化樹脂で固定した。図1に示すように、加熱し圧力を加えた状態で紫外線を照射後、冷却させる方法で作製時の外部圧力を取り去っても LPFG が維持できる結果を得た。ファイバへの装着が容易となり、かつ小型化に貢献する。一方、周期可変型については、図2に示すように、コイルスプリングを伸縮させることで任意の共鳴波長を有する LPFG の再構成が可能となった。

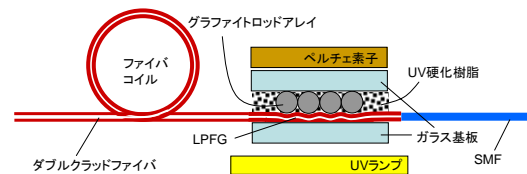


図1 試作した周期固定型圧力印加 LPFG

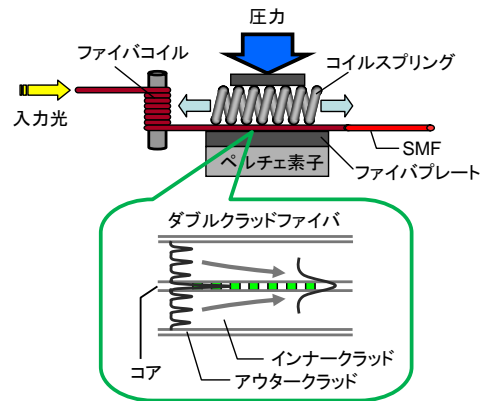


図2 試作した周期可変型圧力印加 LPFG

長周期ファイバグレーティング (LPFG) は元来、選択波長に損失を与えるバンドリジエクションフィルタであるが、これをバンドパスフィルタ (BPF) に変換した。図1および図2に示すように、ダブルクラッドファイバを用いてファイバコイルを形成することで入力光をすべてクラッドモード光とし、その後段に周期的マクロベンドからなる LPFG を形成した。共鳴波長においてコアモードへ光パワーを戻すことで図3に示すような BPF 応答を得た。LPFG 周期の調整で任意波長を設定可能であり、LPFG 長によりフィルタ帯域幅を変えた。また、周囲圧力に応じて透過光強度が上昇し、かつ温度に対して透過ピーク波長が直線的にシフトすることを確認した。損失

ピークではなく透過ピークの変化を利用するため、センサ単体としても、またレーザ共振器内波長チューナとしても有用となる。

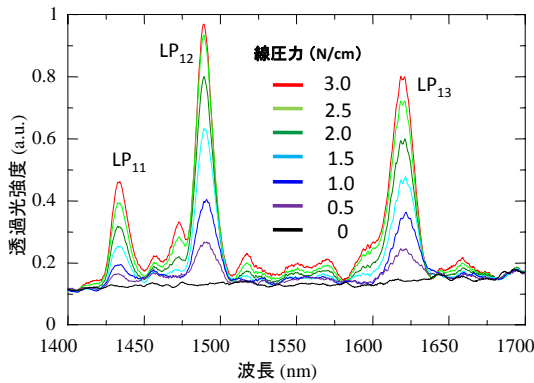


図3 LPFGで構成したBPFの透過スペクトル特性

2) LPFG 周期によるレーザ発振波長制御

圧力印加型 LPFG からなる可変 BPF と Er 添加ファイバを含んだファイバリング共振器を図4のように構成した。使用した LPFG はコイルスプリングを利用した周期可変型であり、コイルピッチを制御することで、発振波長を図5の例に示すように任意に設定できた。このレーザシステムにおいて、LPFG 形成部の圧力を増減するとレーザ出力の変化を生じ、温度上昇に対して発振波長は正の変化を示した。温度や圧力の変化範囲を考慮して、基準となる発振波長を予め設定できる。

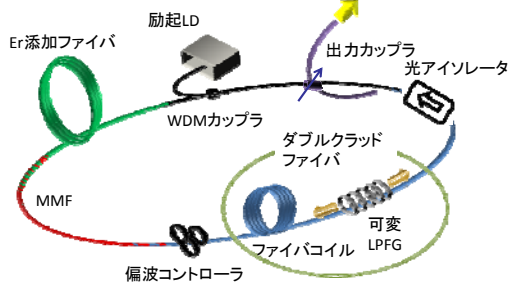


図4 LPFGで構成した波長可変ファイバレーザ

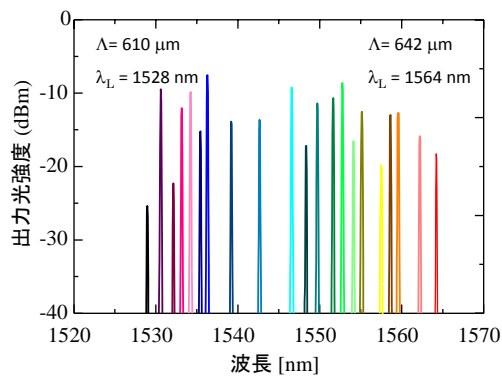


図5 LPFG挿入ファイバレーザの発振スペクトル

3) LPFG 型 BPF を組み込んだファイバレーザを利用したセンシング特性評価

LPFG 周期でファイバレーザの発振波長が制御された状態とすることで、LPFG はセンサヘッドとして活用される。図6、図7は、温度および負荷を変化させたときのレーザ出力光の発振波長および出力光強度の変化を測定したものである。負荷変化 $\Delta\varepsilon$ に対しては波長、出力ともに変化を示すが、温度変化 ΔT に関してはほぼ波長のみが変化を示す様子が分かる。関係を表した式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta P \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{但し、} K = \begin{bmatrix} 0.227 & -0.214 \\ 0.004 & -0.146 \end{bmatrix}$$

式(1)の逆行列から得たパラメータを用いることで、レーザ光の出力特性から温度・圧力の同時検出を得る方式を確認した。従来の広帯域光源を使い LPFG の透過光スペクトルの損失ピークをモニターする方式とは異なり、より簡便で高速に状況変化の検知が行える見通しが付いた。

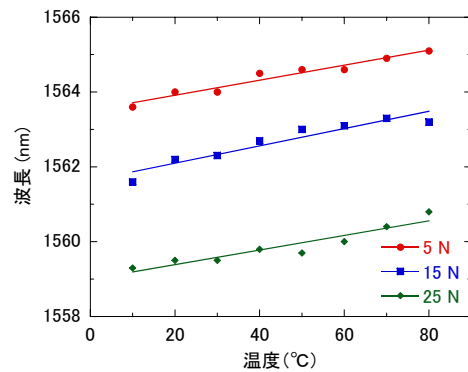


図6 温度に依存する発振波長の変化

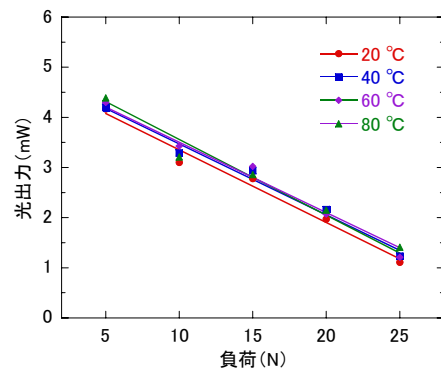


図7 負荷に依存するレーザ出力強度の変化

4) Tmファイバレーザへの適用

Tm添加シリカファイバはEr添加ファイバと比べて利得スペクトルが単調で且つ広帯域であるため、LPFGへの環境変化がレーザ発振特性に連続的に反映されると期待される。本研究ではLPFG周期をEr添加ファイバ共振器への組み込み時より長く調整してコアモード-クラッドモード間結合を $1.9\mu\text{m}$ 帯に移行させた。図8は、LPFGにおけるコアモードと共鳴するクラッドモードの中心波長をLP₁₁、LP₁₂、LP₁₃で示している。図8には、隣接するクラッドモードの間に形成されたパスバンドに沿って発振するレーザの発振波長も示している。LPFG周期の制御で発振波長がおおよそ100nmにわたってシフトする様子が掴める。今後、レーザ発振効率の向上とLPFGをセンサヘッドとして発振特性がどう変化するかの研究を進展させたい。

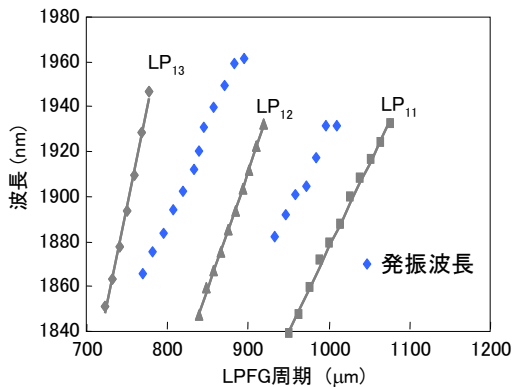


図8 TmファイバレーザのLPFG周期制御による発振波長の変動特性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① H. Sakata, K. Yamahata, Magnetic-force-induced long-period fiber gratings, Optics Letters, 査読有, Vol.37, 2012, pp.1250-1252.
- ② H. Sakata, S. Araki, R. Toyama, M. Tomiki, All-fiber Q-switched thulium-doped fiber lasers based on piezoelectric microbending, Applied Optics, 査読有, Vol.51, 2012, pp.1067-1070.
- ③ H. Sakata, T. Saito, Adhesive-fixed microbend long-period fiber gratings with bandpass filter response, Microwave and Optical Technology Letters, 査読有, Vol.53, 2011, pp.1740-1743.
- ④ H. Sakata, M. Ichikawa, H. Nakagami, Tunable Tm-doped fiber ring laser operating at $1.9\mu\text{m}$ band using force-induced fiber grating as wavelength tuner, Applied Optics, 査読有, Vol.50, 2011, pp.291-295.
- ⑤ H. Sakata, K. Nishio, M. Ichikawa,

Tunable bandpass filter based on force-induced long-period fiber grating in a double cladding fiber, Optics Letters, 査読有, Vol.35, 2010, pp.1061-1063.

- ⑥ H. Sakata, K. Honda, Temperature-dependent transmittance of cascaded long-period fiber gratings for sensor applications, Microwave and Optical Technology Letters, 査読有, Vol.51, 2009, pp.1809-1811.
- ⑦ H. Sakata, T. Iwazaki, Sensitivity-variable fiber optic pressure sensors using microbend fiber gratings, Optics Communications, 査読有, Vol.282, 2009, pp.4532-4536.

[学会発表] (計14件)

- ① 山畑孝介, 坂田 肇, 磁力誘起による長周期ファイバグレーティングの形成、レーザー学会第32回年次大会, 2012/1/31, 仙台.
- ② 荒木隼悟, 外山 諒, 富木政宏, 坂田 肇, ピエゾ素子による全ファイバ型Qスイッチ Tmファイバレーザ、レーザー学会第32回年次大会, 2012/1/30, 仙台.
- ③ 市川万理恵, 荒木隼悟, 坂田 肇, LPFG共鳴モード間パスバンドによる Tmファイバリングレーザの波長可変動作, 第72回応用物理学会学術講演会, 2011/8/30, 山形大学.
- ④ 荒木隼悟, 外山 諒, 富木政宏, 坂田 肇, ピエゾ-マイクロバンドを用いた Tmファイバリングレーザの能動的Qスイッチング, 第72回応用物理学会学術講演会, 2011/8/30, 山形大学.
- ⑤ H. Sakata, M. Ichikawa, S. Araki, H. Nakagami, Tunable operation of Tm-doped fiber ring laser controlled by microbend-induced fiber grating, Specialty Optical Fibers 2011, OSA Advanced Photonics Congress, 2011/6/13, Toronto, Canada.
- ⑥ 西尾圭介, 山畑孝介, 富木政宏, 坂田 肇, マイクロバンド長周期ファイバグレーティングを用いたバンドパスフィルタの帯域幅制御, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010/9/16, 長崎大学.
- ⑦ 仲上宏之, 荒木隼悟, 坂田 肇, TmシリカファイバレーザのDFB-LD利得スイッチングによる $1.9\mu\text{m}$ 帯発振, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010/9/14, 長崎大学.
- ⑧ 市川万理恵, 仲上宏之, 坂田 肇, 圧力印加長周期グレーティングによる $1.9\mu\text{m}$ 帯 Tmファイバリングレーザのチューナブル化検討, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010/9/14, 長崎大学.
- ⑨ H. Sakata, T. Saito, K. Nishio, Transmission bandpass filters based on force-induced fiber gratings for sensor and tunable laser applications, Bragg

Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides 2010, OSA Optics & Photonics Congress, 2010/6/24, Karlsruhe, Germany.

- ⑩ 仲上宏之, 西川浩平, 坂田 肇, 1.6 μm 帯半導体レーザ励起による Tm シリカファイバレーザの 1.9 μm 帯レーザ発振, 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2010/5/28, 福井大学.
- ⑪ K. Nishio, H. Sakata, Pressure and temperature characteristics of tunable bandpass filter using microbend LPFG, The 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, 2010/4/20, Yokohama, Japan.
- ⑫ 齊藤拓也, 坂田 肇, 接着固定マイクロバンド LPFG によるファイババンドパスフィルタの作製 2010 年電子情報通信学会総合大会, 2010/3/17, 東北大学.
- ⑬ 齊藤拓也, 坂田 肇, マイクロバンド LPFG からなるバンドパスフィルタの作製と歪み/温度特性, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2009/9/11, 愛知工業大学.
- ⑭ 西尾圭介, 市川万理恵, 坂田 肇, 機械式 LPFG バンドパスフィルタによるファイバリングレーザの波長可変発振, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009/9/10, 富山大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂田 肇 (SAKATA HAJIME)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号: 40377718

(2) 研究分担者

富木 政宏 (TOMIKI MASAHIRO)
静岡大学・工学部・助教
研究者番号: 60362183