

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420336

研究課題名(和文) グレーティングの長さ方向屈折率構造最適化によるLPFG多重型高温異常センサ

研究課題名(英文) Multipoint temperature sensor employing LPFGs with refractive index structure optimized in longitudinal direction

研究代表者

小山 長規 (koyama, osanori)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10336802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、直接人間が立ち入ることが困難な高温環境での長時間・遠隔温度センシングの実現である。CO₂レーザーを使用して作製したLPFG (Long Period Fiber Grating) を直列接続することで、複数地点を同時に遠隔センシングできる多点高温センサを実現した。これに関連して、LPFGの長時間高温環境下における特性について調査し安定的に温度センシング可能な時間的限界を明確にした。また、多点温度センサに適するLPFGのスペクトラムを得るための新規作製法を提案し、最適な作製パラメータを明確にした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is remote temperature sensing under long-term heating environment where humans have difficulty entering. A multipoint temperature sensor which could sense high temperatures at multiple points remotely and simultaneously has been realized by cascading CO₂-laser-induced LPFGs (Long Period Fiber Grating) in series. Furthermore, behaviors of the resonant wavelength and loss value at some loss peaks in a spectrum of the LPFG were investigated under high temperature environment for several hours. Quality keeping times of the LPFG as a high temperature sensor based on the behaviors were evaluated. Additionally, a new method, the double inscribing method using a CO₂ laser, was proposed to make the loss spectrum of the LPFGs more suitable when constructing a multipoint temperature sensor using several the LPFGs. The relationship between grating pitch and parameters of the method was clarified to obtain suitable spectrum for the multipoint sensor

研究分野：情報通信ネットワーク

キーワード：LPFG 長周期ファイバグレーティング 多点温度センサ CO₂レーザー

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災時に福島原子力発電所で事故が発生した結果、発電機の炉が高温化するが、電源喪失などの原因で従来の電気式温度センサが正常に機能せず、炉内温度の現状把握が困難な状態が続いた。このように、電気式温度センサが正常に機能しない場合の代替センシング技術が必要であった。

温度センシングには光ファイバを用いる方法がある。一般的に、これを光ファイバセンシングという。光ファイバセンシングには、従来の電気式温度センサにはない次のような長所がある。具体的には、センサ部に電源が不要、電磁干渉を受けない、サージ電流対策が不要、遠隔センシングが可能、防爆性がある点などである。このため、原子力発電や化学プラントなどの大型施設、原油採掘に使用する油井孔など、直接人間が立ち入ることが困難な場所に対する温度センシングへの応用が期待されている。

Long Period Fiber Grating (LPFG)は、光ファイバセンサの一種である。LPFGの作製法としては、光ファイバに紫外光を照射して作製する方法が一般的である。一方で、CO₂レーザ光を照射することでLPFGを作製することも可能で、この場合、上記の紫外光照射型ファイバセンサの長所に加え次のような長所を持たすことができる。具体的には、高温・長時間センシングが可能、光ファイバに対して特別な事前処理が不要、作製パラメータを容易に変更して作製できるため作製コストの面で優位である、という点が挙げられる。研究開始当初は、CO₂レーザ照射型LPFGの屈折率構造の調整、高温度に対する長時間センシングの時間的限界、また複数のCO₂レーザ照射型LPFGをカスケード接続して構成する多点温度センサについての研究報告はほとんどなかった。

2. 研究の目的

直接人間が立ち入ることが困難な場所、例えば災害時の原子力発電所などを対象とし、施設の温度上昇を遠隔地から検出できる多点温度センサを開発する。温度センシングには、市販の光ファイバにCO₂レーザ光を照射して作製するLPFGを利用する。多地点をセンシングし温度異常を検出できるセンサを作製するには、各LPFGの共振ピークを波長軸上で多重させる必要がある。本研究では、多重数増加を目的に、ファイバ長手方向の屈折率構造の最適化による共振ピーク調整法の提案と評価、1000℃を上限とする高温領域における温度センシング特性を明確化し、実際に複数のLPFGを用いて多点温度センサを実現し、その評価を行う。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、次の(1)から(4)を中心に研究を進めた。(1)CO₂レーザを用いたLPFG作製システムの精度向上。(2)フ

イバ長手方向の屈折率構造を調整するための新手法の提案と評価。(3)LPFGの高温度環境下における温度センシング特性の評価。(4)LPFGの直列接続による多点温度センサの実現と評価。

4. 研究成果

研究方法で示した(1)から(4)に対する研究成果について述べる。

(1) CO₂レーザを用いたLPFG作製システムの精度向上

本研究で構築したLPFG作製系を図1に示す。CO₂レーザ光の照射位置をより微細に制御できる微動台を実験系に組み込むことで、従来の位置調整単位であった10 μmを5 μmまで改善することに成功した。また、LPFG作製時にファイバへ作用する張力をより正確に制御可能とするために、張力付加機構を実験系に導入したことで、1 g単位でファイバに作用する張力を調整することが可能となった。LPFGの作製には、CO₂レーザと微動台を交互に動作させる必要があり、従来ではこれを実験者が行っていたため、両動作の時間間隔を一定に保つことが困難であった。このため、両機器を連動させる自動化プログラムを作成し、LPFG作製工程の精度安定性を向上させると同時に作業負荷の軽減を実現した。

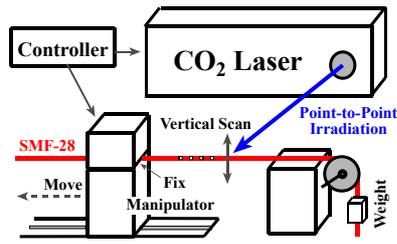


図1 LPFG作製系

(2) ファイバ長手方向の屈折率構造を調整するための新手法の提案と評価

LPFGを直列接続することによって構成する多点温度センサの実現には、広い波長領域においてLPFGの共振波長の制御と、センシングに使用するメインの損失ピーク以外の副ピークを抑制する必要がある。しかし、従来のLPFG作製法では、グレーティングピッチ Λ が、 $\Lambda \geq 520 \mu\text{m}$ の領域において上記条件を達成できなかった。このため、本研究では広線幅書込み法を提案した。図2に広線幅書込み法の概略を示す。

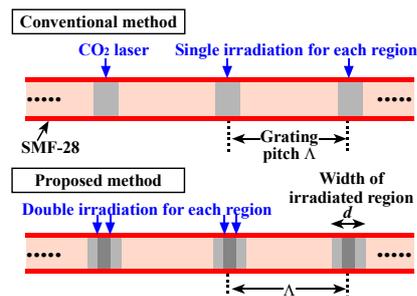


図2 広線幅書込み法

従来法は、CO₂ レーザ光を一度照射し光ファイバのコアに屈折率変化部を設け、これをファイバ長手方向に A だけ離れた点に対し繰返すことで LPFG を作製するものである。広線幅書込み法では、各屈折率変化部に対し2度照射する。1回目の照射点と2回目との間に微小間隔を設ける。ここでは、2回照射して誘起させた屈折率変化部の幅を d と定義した。光ファイバには、商用の通信用光ファイバ(SMF-28)を用いた。

調査を進めると、広線幅書込み法は、 $A \geq 520 \mu\text{m}$ の領域においても多点温度センサの構築に適切な LPFG を実現できる可能性があることが判明した。また、 A に対し最適な d があることが判明した。 $520 \mu\text{m} \leq A \leq 600 \mu\text{m}$ の領域に対して、広線幅書込み法による損失ピークが示す共振波長と損失値、副ピークの抑制効果、最適な d を実験により明らかにした。一例として $A=550 \mu\text{m}$ の場合、 d に対する共振波長と損失値の変化を図3に示す。また、副ピーク抑制効果を図4に示す。

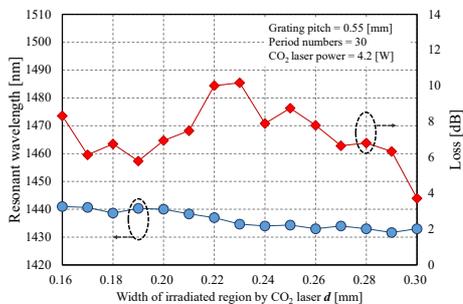


図3 共振波長と損失値の屈折率変化部幅 d に対する依存性

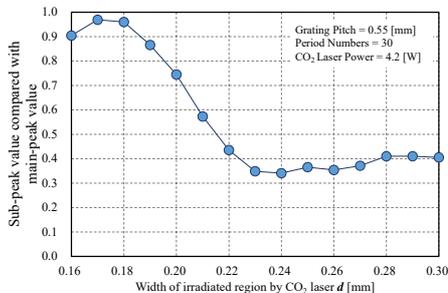


図4 屈折率変化部幅 d と副ピーク抑制効果の関係

図3より、広線幅書込み法は温度センシングの使用に十分な損失値を保ち、かつ共振波長にほぼ影響を与えずに副ピークを抑制できる手法であることが明らかになった。ここでは最適な屈折率変化部幅 d を、損失ピークが適切でありかつ最も副ピーク抑制効果が高い値であると定義した。結果、 $A=550 \mu\text{m}$ の場合、最適な d は、 $0.23 \mu\text{m}$ であることが判明した。図5に、本研究で調査した範囲で複数の A に対する d の最適値まとめた。この成果により、幅広い波長領域において、多点温度センサに適した LPFG の作製を可能とした。

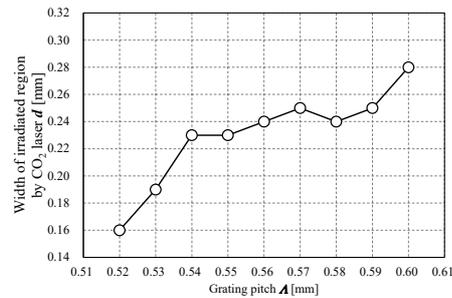


図5 屈折率変化部幅 d の最適値

(3) LPFG の高温環境下における温度センシング特性の評価

人間が直接立ち入ることが困難な環境における可用性を確認するため、本研究では長時間にわたり高温環境下に LPFG を設置した場合の温度センシング特性の評価を行った。研究開始当時、高温環境下における温度特性に関する研究は数多く報告されていたが、長時間にわたる特性評価はほとんどなかったため、研究目的の達成のためだけでなく、長時間高温環境下における温度特性評価自体の新規性も高いと判断した。

図6に温度特性の評価系を示す。CO₂ レーザ光を照射して作製した LPFG を、錘(12.8 g)により一定張力を付加した状態で加熱炉内に設置し、光スペクトラムアナライザ(OSA)で損失ピークの共振波長と損失値をモニタした。炉内温度は、設定温度の80%程度まで約 $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. で上昇した後、徐々に設定温度で安定する。

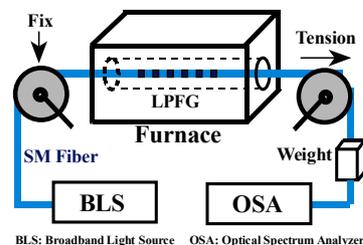


図6 LPFG 温度特性評価系

加熱炉内温度を $410 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ の設定温度まで上昇させた後、炉内温度を一定に保ち、24時間及び10日にわたり LPFG を高温環境下に設置した。図7に、LPFG のスペクトラムにおける損失ピークの室温での損失値を基準とし10日間の損失値の変化を示す。 $603 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下では、損失値の変化はほとんどなかったが、 $802 \text{ }^\circ\text{C}$ では損失値が変動することが確認された。また、24時間のモニタリングでも同様に、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上で損失値の変動が確認できたが、いずれの温度においてもピーク判別に十分な損失値が維持され、共振波長の検出が容易であることが確認できた。また、同じ高温環境下に市販の紫外光照射型 LPFG を設置すると損失値は大きく減衰した。これにより高温環境下における CO₂ レーザ照射型 LPFG の優位性が確認できた。

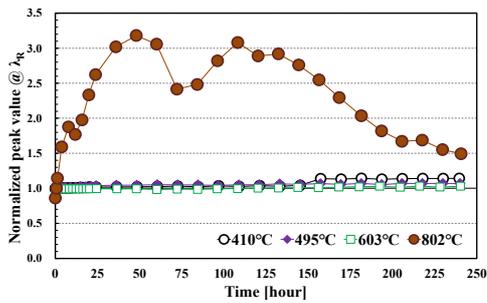


図7 高温環境下での損失値の変化

次に、加熱炉内の温度が安定した直後の共振波長を基準とした24時間及び10日間にわたる共振波長のシフト量の変化を図8、図9に示す。温度が一定であるため、温度を示す共振波長のシフト量は0であることが温度センサとして理想である。図8に示す各加熱炉内温度の24時間にわたる共振波長の変動範囲は、次のとおりとなった：(614 °C, 0 nm ~ +0.5 nm)、(707 °C, -3.0 nm ~ +0 nm)、(800 °C, -3.5 nm ~ +0 nm)、(901 °C, -4.0 nm ~ +58.0 nm)、(1000 °C, -23.0 nm ~ +75.5 nm)。また、図9に示す10日間にわたる共振波長の変動範囲は次のとおりとなった：(410 °C, -0.6 nm ~ +1.0 nm)、(495 °C, -3.2 nm ~ +0.4 nm)、(603 °C, -3.6 nm ~ +0.1 nm)、(802 °C, -6.2 nm ~ +83.0 nm)。いずれの加熱炉内温度であっても時間経過に伴いシフト量が増加するため、安定的に機能できる時間的な限界が存在することが判明した。一定の高温環境下において、共振波長はまず短波長側へシフトし、その後長波長側へシフトする事が確認できた。また、加熱炉内温度が高いほど早く変動しはじめ、そのシフト量も大きいことが明らかとなった。共振波長が短波長側にシフトする要因としては光ファイバの残留応力緩和、長波長側にシフトする要因としてはガラス構造変化とガラスの伸長による Λ の変化などが考えられる。残留応力緩和がガラス構造変化に比べ、温度に対しより速く反応するため、加熱炉内設定温度に到達直後は、残留応力緩和の影響が強く共振波長は短波長側へシフトする。時間経過と共に残留応力緩和が飽和しかつガラス構造変化の影響が大きくなることで共振波長は徐々に長波長側へシフトしたと考えられる。

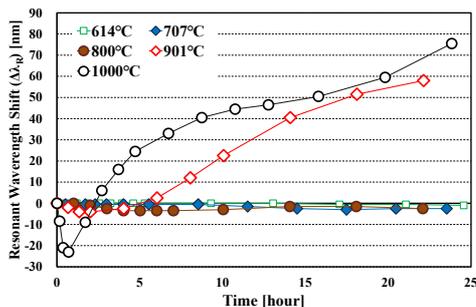


図8 高温環境下の共振波長の変化(24時間)

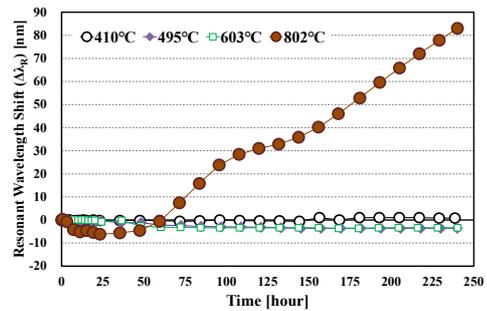


図9 高温環境下の共振波長の変化(10日間)

共振波長のシフト量が許容変動範囲内に留まっている状態を安定機能状態とし、その時間的な限界の評価を行った。図10は、各加熱炉内温度に対し共振波長の許容変動範囲を1 nm、2 nm、3 nmとした場合と、測温抵抗体に関する国際規格(IEC60751)のCクラスに相当する許容変動範囲とした場合の安定機能可能な時間的な限界の評価結果を示す。図中の表には同規格の許容温度誤差と、温度係数(116.0 pm/°C)から導いた許容波長変動範囲、またこれに基づく安定機能の時間的な限界の数値を示す。707 °Cでは7時間、他の温度でも図10内の表に示される時間内は安定的に機能する可能性があることが明らかとなった。

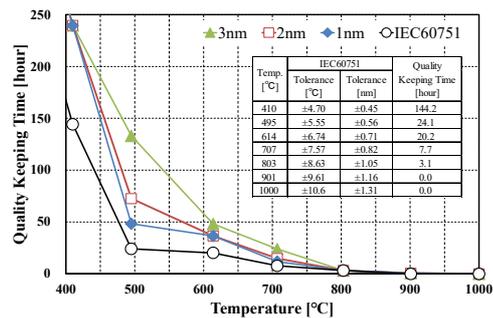


図10 安定機能する時間的な限界

(4) LPFGの直列接続による多点温度センサの実現と評価

広線幅書込み法と高温度特性を考慮して、異なる共振波長を持つ複数のLPFGを直列接続することで多点温度センサを実現した。同時センシングサイトの数を10、各LPFGが測定可能とする最高温度を100 °Cとした。図11に、カスケード接続されたLPFGによる多点温度センサの構成と温度モニタシステムについて示す。CO₂ レーザ光を照射し異なる共振波長($\lambda_{R1}, \dots, \lambda_{R10}$)を持つLPFG (LPFG₁, ..., LPFG₁₀)を作製し、光ファイバ接続用アダプタを用いて、それぞれを直列接続することで多点温度センサを構成した。白色光源(WLS)から白色光を入力し、光スペクトラムアナライザ(OSA)で透過光をモニタする。OSAから得られる光損失スペクトラム上の共振波長の変化をPCによりモニタすることで、温度変化を検出する。 λ_{Ri} ($i=1 \dots 10$)の変化がLPFG_iの設置された場所の温度変化を示す。

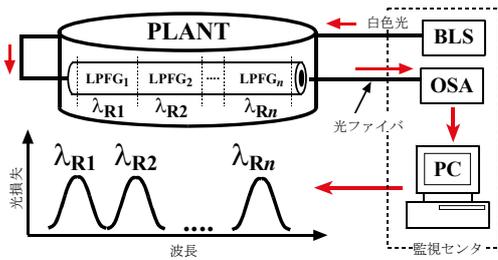


図 11 多点温度センサとセンサシステム
 図 12 に作製した LPFG ($i=10$) の光損失スペクトルを示す。各 LPFG は異なるグレーティングピッチ A_i ($i=1, \dots, 10$) を有している ($A_1=0.478$ mm, $A_2=0.484$ mm, $A_3=0.490$ mm, $A_4=0.496$ mm, $A_5=0.502$ mm, $A_6=0.510$ mm, $A_7=0.520$ mm, $A_8=0.550$ mm, $A_9=0.580$ mm, $A_{10}=0.610$ mm)。ただし、 $A \geq 0.52$ mm の領域においては広線幅書き込み法を用いた。図 12 の丸印は SC コネクタを用いて LPFG₁ から LPFG₁₀ を直列接続した際の光損失スペクトルを示し、図 12 の実線は各 LPFG の損失スペクトルの合計値を示した。両者はほぼ一致しており、SC コネクタによる直列接続は実装方法として適切であることを確認した。

各 LPFG の温度感度について評価した。各 LPFG を恒温槽に入れ 0 °C から 70 °C まで変化させ、次に加熱炉に入れ 100 °C から 200 °C まで変化させ、共振波長の変化をモニタした。測定中、測定対象外の LPFG は室温 (20 °C) の環境下に設置した。例として、 λ_{R5} 、 λ_{R6} 、 λ_{R7} の温度変化を図 13 に示す。各 LPFG の温度感度 B は次のとおりとなった。 $B_1=0.091$ nm/°C, $B_2=0.109$ nm/°C, $B_3=0.083$ nm/°C, $B_4=0.073$ nm/°C, $B_5=0.079$ nm/°C, $B_6=0.052$ nm/°C, $B_7=0.060$ nm/°C, $B_8=0.043$ nm/°C, $B_9=0.044$ nm/°C, $B_{10}=0.075$ nm/°C。

最後に、多点温度センシングの可能性について評価した。多点温度センサ全体を恒温槽に入れ、20 °C における光損失スペクトラムを測定し、これを基準とした。LPFG₆ のみに 120 °C、170 °C の温度変化を与えた。この際の共振波長の変化を図 14 に示す。20 °C 環境下の共振波長に比べ、長波長側に 120 °C で 5.3 nm、170 °C で 8.5 nm シフトした。隣接する LPFG₆ と LPFG₇ の温度差が 150 °C であった場合でも λ_{R6} と λ_{R7} のピーク間隔は 13.2 nm 確保されていた。両共振ピークは明確に判別可能であり、同時多点温度センシングが可能であることを確認した。

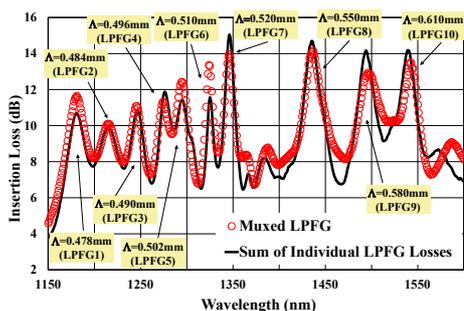


図 12 多点温度センサの光損失スペクトル

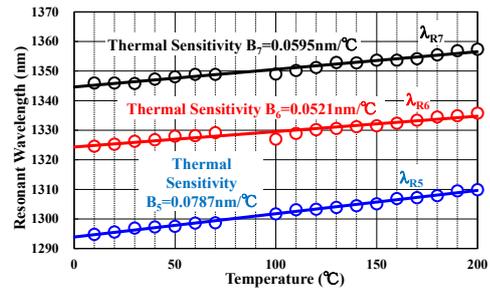


図 13 共振波長 (λ_{R5} 、 λ_{R6} 、 λ_{R7}) の温度変化と温度感度

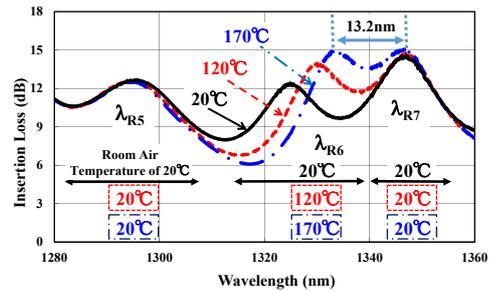


図 14 隣接 LPFG に 150 °C の温度差を与えた場合の光損失スペクトル

以上により、複数の LPFG を直列接続し共振波長を多重することで、10 サイトの同時温度センシングを可能とするの多点温度センサを実現した。各 LPFG の温度感度を評価し、100 °C 程度の温度差がある環境下での多点温度センシングが可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) **O. Koyama**, H. Sumiana, Y. Toyooka and M. Yamada "High temperature detection inside large-scale plants using distributed sensor fabricated by 10 LPFG resonant wavelengths multiplexing" IEICE Electron. Express, vol. 10, no. 18, pp. 1-9 (2013).

[学会発表] (計 14 件)

- (1) **O. Koyama**, S. Kasahara, H. Sumiana, Y. Tokunaga and Y. Katsuyama "Distributed high temperature sensing in large-scale plants by LPFG with multiplexed resonant wavelengths" Proc. The 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC), pp. TuPS-15, Kyoto, Japan, July (2013).
- (2) 豊岡義和, 角穴光, **小山長規**, 山田誠 "大規模設備の高温分布を対象とした共振波長多重型 LPFG センサ" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 講演論文集, p. C-3-33, 福岡, 9 月 (2013).
- (3) 角穴光, **小山長規**, 山田誠 "広線幅調整による LPFG の光損失スペクトルへの影響" 電気関係学会関西支部連合大会 講

- 演論文集, p. G8-4, 大阪, 11月 (2013).
- (4) 飯田守, 角穴光, 豊岡義和, 小山長規, 山田誠 “CO₂ レーザで作製した LPFG を用いた高温測定” 電子情報通信学会関西支部学生会第 19 回学生会研究発表講演会 講演論文集, p. C1-3, 京田辺, 2月 (2014).
 - (5) 角穴光, 飯田守, 豊岡義和, 小山長規, 山田誠 “CO₂ レーザで作製した LPFG の高温特性” 2014 年電子情報通信学会総合大会 講演論文集, p. C-3-11, 新潟, 3月 (2014).
 - (6) M. Iida, O. Koyama, H. Sumiana, Y. Toyooka and M. Yamada “High-temperature attenuation peak behaviors of long-period fiber grating inscribed with CO₂ laser” Proc. The 19th OptoElectronics and Communications Conference (OECC), pp. 484-489, Melbourne, Australia, July (2014).
 - (7) 飯田守, 小山長規, 角穴光, 豊岡義和, 山田誠 “CO₂ レーザ照射型 LPFG の長時間高温過熱時の特性評価” 平成 26 年電気関係学会関西連合大会 講演論文集, p. G8-16, 生駒, 11月 (2014).
 - (8) 高須賀将, 小山長規, 飯田守, 角穴光, 豊岡義和, 山田誠 “長時間高温下における CO₂ レーザ光照射型 LPFG の損失ピーク変化” 電子情報通信学会関西支部学生会第 20 回学生会研究発表講演会 講演論文集, p. C2-1, 神戸, 3月 (2015).
 - (9) 飯田守, 小山長規, 高須賀将, 角穴光, 豊岡義和, 山田誠 “高温環境下における CO₂ レーザ光照射型 LPFG の安定動作限界” 2015 年電子情報通信学会総合大会 講演論文集, p. C-3-16, 草津, 3月 (2015).
 - (10) 高須賀将, 小山長規, 角穴光, 飯田守, 山田誠 “広線幅化書込法による LPFG の光損失スペクトラム調整” 平成 27 年電気関係学会関西連合大会 講演論文集, p. G2-12, 寝屋川, 11月 (2015).
 - (11) 村上隼典, 小山長規, 草間章博, 高須賀将, 飯田守, 山田誠 “CO₂ レーザ光照射型 LPFG の張力依存性” 電子情報通信学会関西支部学生会第 21 回学生会研究発表講演会, p. C2-2, 兵庫県姫路市, 3月 (2016).
 - (12) 草間章博, 小山長規, 村上隼典, 高須賀将, 飯田守, 山田誠 “CO₂ レーザ側面照削法による LPFG の共振波長調整法” 電子情報通信学会関西支部学生会第 21 回学生会研究発表講演会, p. C2-3, 兵庫県姫路市, 3月 (2016).
 - (13) 村上隼典, 高須賀将, 小山長規, 飯田守, 草間章博, 山田誠 “アニールによる CO₂ レーザ光照射型 LPFG の温度安定性の向上” 2016 年電子情報通信学会総合大会 講演論文集, p. C-3-63, 福岡県福岡市, 3月 (2016).
 - (14) A. Kusama, M. Iida, O. Koyama, S. Takasuka, T. Murakami and M. Yamada “Double Inscripting Method with CO₂ Laser for Suitable Spectrum of LPFG Used in Multipoint Temperature Sensor” Proc. The 21th OptoElectronics and Communications Conference (OECC), pp. WA2-58, Niigata, Japan, July (2016).

6. 研究組織

研究代表者

小山 長規 (KOYAMA, Osanori)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 10336802