

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560395

研究課題名(和文) 空孔径制御を用いた偏波保持フォトニック結晶ファイバデバイス作製とその応用

研究課題名(英文) Fabrications of polarization-maintaining photonic crystal fiber devices using air hole diameter control and their applications

研究代表者

横田 浩久 (YOKOTA, Hirohisa)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：30272115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：炭酸ガスレーザー光を照射して偏波保持フォトニック結晶ファイバ(ファイバ断面の中心付近に複数の空孔を二軸対称に配置した光ファイバ)の空孔径を制御することで、機能性光ファイバ素子(光減衰器および長周期ファイバグレーティング)の作製を行った。光減衰器作製においては、照射レーザーパワーの調整により所望の減衰量が得られること、ファイバ曲げにより減衰量を可変できることを実証した。長周期ファイバグレーティング作製では、透過スペクトルにおいて二つの偏波モードに対応する減衰ピークが得られた。作製した素子は光通信システムや光計測システムに応用可能である。

研究成果の概要(英文)：We fabricated functional fiber devices (optics attenuators and long period fiber gratings) by controlling air hole diameters in polarization-maintaining photonics crystal fibers (in which air holes are arranged in two-fold rotational symmetrically around their centers of cross-sections) using carbon dioxide laser irradiation. In the optical attenuator fabrications, it was demonstrated that the desired attenuation could be obtained by laser power control and that the attenuation could be varied using fiber bending. In the long period grating fabrications, attenuation peaks corresponding two polarization modes were obtained in the transmission spectrum. The fabricated fiber devices are applicable not only to fiber optic communication systems but also to optical sensing systems.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：フォトニック結晶ファイバ 偏波保持光ファイバ 光減衰器 長周期グレーティング 炭酸ガスレーザー照射

1. 研究開始当初の背景

ファイバ断面の中心付近に複数の空孔を配したフォトニック結晶ファイバ(PCF)は、空孔配置によって、非常に広い波長帯域での単一モード動作(Endlessly single-mode)、任意の分散制御性、非常に高い(もしくは非常に低い)光非線形性、高複屈折特性など、従来のファイバでは得られなかった特性を実現できることから、近年注目を集めている。当初、PCFはその興味深い特長から機能性ファイバへの応用が考えられ、様々な応用例が報告されてきた。一方、PCFの低損失化が近年進められてきており、PCFを伝送路に用いた光ファイバ通信システムの実現も見通しが得られるようになってきている。また、低損失化によりPCFの光ファイバセンシングシステム用ファイバとしての応用も期待できる。光ファイバ伝送システムの高ビットレート化や光ファイバセンシングシステムの高精度化・高機能化のためには、偏波保持光ファイバの導入が有効である。PCFでは従来の偏波保持光ファイバに比べて高複屈折が容易に得られるため、偏波保持フォトニック結晶ファイバ(PM-PCF)を導入することで、これらのシステムの性能向上が期待できる。特に光ファイバセンシングシステムにおいては、純石英で作製されたPCFを導入することで従来のもの比べて高温条件下での計測が可能になると期待できる。これらのシステムにおいて、PCFの特長を十分に生かすためには、ファイバデバイスもPCFで作製することが望まれる。しかしながら、これまでPCFデバイスに関する研究報告はあまりなされていないのが現状である。

このような状況の中で、研究代表者のグループはPCFデバイスの設計・作製に関する先駆的研究を行い、国内外から高い評価を得ている。これまで、炭酸ガスレーザー照射によるPCFカブラの試作を行い、光結合が得られることを実証するとともに、カブラテーパ部における空孔の状態がカブラの特性に与える影響についても理論的・実験的検討を行った。また、PCFの空孔径制御により作製された光減衰器についても基礎的な研究を行ってきた。さらに、炭酸ガスレーザー照射を用いた空孔径制御により、PCFと通常の単一モード光ファイバの接続損失を低減する方法についても、理論的・実験的に実証した。

2. 研究の目的

(1) PM-PCF 光減衰器の設計・作製

制御した空孔径(空孔率)に対して得られる減衰量を理論的に明らかにする。空孔制御を行う前の空孔配置および空孔径が減衰量の偏波依存性に与える影響についても理論解析を行う。それらの結果をもとに、炭酸ガスレーザー照射を用いてPM-PCF光減衰器の作製を行う。所望の空孔径(空孔率)に制御するためのレーザー照射条件を明らかにし、それにより得られる減衰量およびその偏波依

存性を求める。目標値は減衰量 3~30dB、波長および偏波に対する減衰量変動 $\pm 10\%$ 以内とする。

(2) 長周期 PM-PCF グレーティングの設計・作製

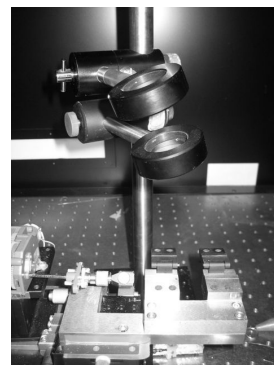
制御した空孔径(空孔率)および空孔径制御の周期(グレーティング周期)から決定される透過スペクトルの減衰ピーク波長を理論的に明らかにする。炭酸ガスレーザー照射によりPM-PCFの長手方向に周期的に空孔径制御を行い、長周期グレーティングを形成する。目標値は減衰ピーク 5dB以上とする。また、偏波間の減衰ピーク波長差とファイバ構造(空孔配置、空孔径)の関係も明らかにする。

(3) 長周期 PM-PCF グレーティングを用いた温度・歪み同時計測システムの構築

偏波保持ファイバグレーティングを用いることで温度と歪みを同時に計測可能となることが報告されている。本研究では、偏波保持ファイバグレーティングとして長周期PM-PCFを用いた温度・歪み同時計測システムの構築を行う。歪みの測定誤差 $\pm 20\mu\epsilon$ 、温度の測定誤差 ± 2 を目標とする。



(a) 炭酸ガスレーザー



(b) レーザ照射部

図 1 炭酸ガスレーザー照射型ファイバ加熱溶解装置

3. 研究の方法

本研究では、偏波保持フォトニック結晶ファイバ(PM-PCF)デバイスとして、PM-PCF光減衰器)、PM-PCF長周期グレーティングの開発を行った。理論面では、これらのデバイス中の伝搬モードおよび光波伝搬を計算することによりデバイスの光学特性を求め、

特性向上のための構造およびパラメータを調べた。実験面では、炭酸ガスレーザー照射型ファイバ加熱溶融装置(図1), アーク放電ファイバ融着接統器を用いてデバイスを作製し, 特性評価を行うことで, 作製条件の最適化およびデバイスの特性向上を図った。

4. 研究成果

(1) PM-PCF 光減衰器の作製

これまで, 炭酸ガスレーザー照射を用いた加熱・溶融により PCF の空孔径を制御(縮小)できることを実験的に見出している。空孔径を縮小することで閉じ込め損失が増加し, 光減衰器として応用できる(図2)。PCF は従来の光ファイバに比べて波長によるモードフィールド径(MFD)の変化が小さいことから, 波長依存性の小さい耐パワー性に優れた光減衰器の実現が可能となる。さらに, PM-PCF を導入することで, 偏波保持特性を有する光減衰器の実現が期待できる。

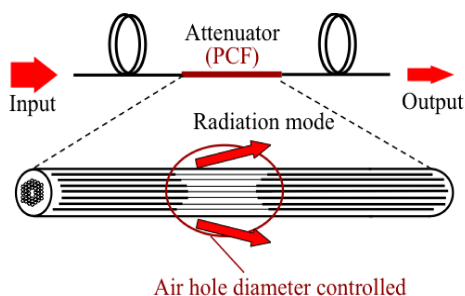


図2 PCF 光減衰器

光減衰器作製には, 図3に示された断面をもつ PM-PCF を用いた。空孔ピッチ Λ は $4.4\mu\text{m}$, 小空孔の空孔径 d_1 は $2.2\mu\text{m}$, 大空孔の空孔径 d_2 は $4.5\mu\text{m}$ である。

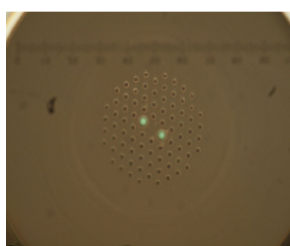


図3 PM-PCF の断面写真

照射ビーム径 $8\text{mm} \times 1\text{mm}$, 照射時間 180 秒, 空孔径制御長 10mm として光減衰器を作製した。照射レーザーパワーに対する空孔率(空孔径/空孔ピッチ)を測定した結果を図4に示す。レーザーパワーを増加することで空孔率を小さくできることが示されている。波長 1550nm において, 空孔率に対する減衰量の変化を調べた結果を図5に示す。空孔率が小さくなるにつれて減衰量が増加していることが分かる。以上のことから, 照射レーザーパワーを調整することで所望の減衰量を得られることが実証できた。

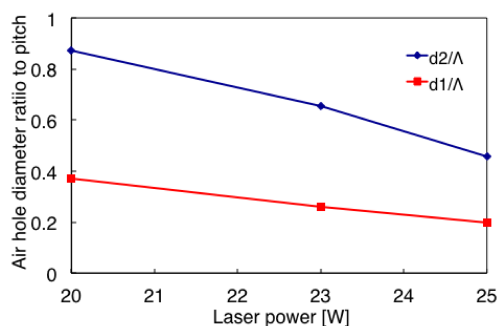


図4 照射レーザーパワーに対する空孔率

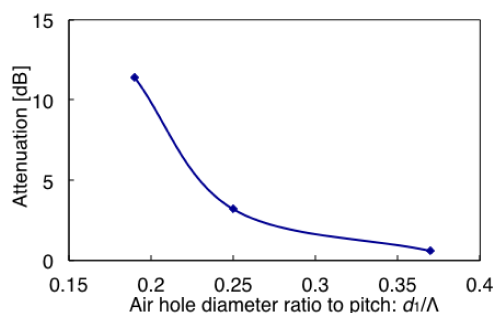


図5 空孔率に対する減衰量

光減衰器は減衰量固定型だけでなく減衰量可変型も必要とされている。本研究では, 空孔径制御部に曲げを加えることで減衰量を変化させることを試みた。図6に曲げ角度に対する減衰量の変化を示す。曲げ角度を大きくするにつれて減衰量が増加することが示されており, ファイバ曲げによる可変型光減衰器が実現できることを実証できた。この結果から, PM-PCF 光減衰器の曲げセンサとしての応用も期待できる。

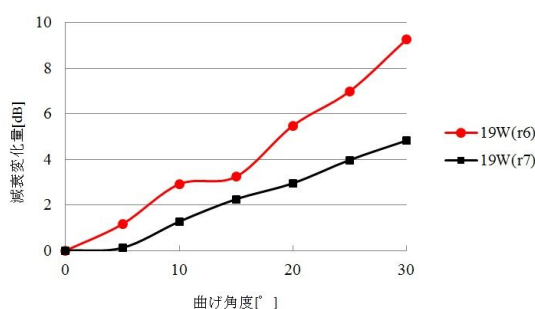


図6 ファイバ曲げ角度に対する減衰量変化

空孔径制御およびファイバ曲げによる偏波保持特性の劣化は見られず, 偏波保持特性に優れた光減衰器が実現できることを実証できた。

(2) PM-PCF 長周期グレーティングの作製

PM-PCF の長手方向に周期的に炭酸ガスレーザー光を照射して空孔径制御を行うことで等価屈折率変調を形成し, 長周期グレーティング(LPG)を作製した。

はじめに、通常のPCFにLPGを形成した。PCFのコアモードとクラッドモードの実効屈折率から、波長1550nm帯に減衰が得られるグレーティング周期を341 μm と算出し、炭酸ガスレーザ照射によりPCFにLPGを形成した。透過スペクトルを図7に示す。波長1550nm付近に減衰ピークが得られていることが分かる。

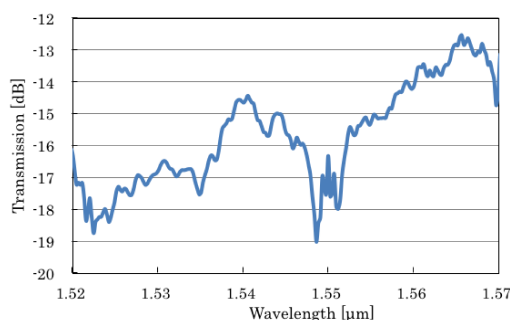
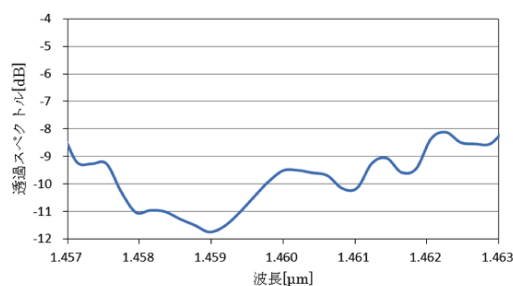
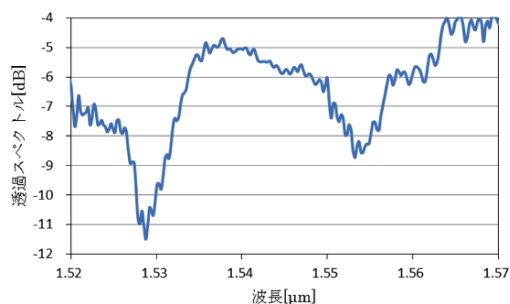


図7 PCF-LPGの透過スペクトル

同様にして、PM-PCFにLPGを形成した。二つの直交する偏波のコアモードとクラッドモードの実効屈折率からグレーティング周期を算出した。周期232 μm でLPGを形成して得られた透過スペクトルを図8に示す。波長1460nm付近と1550nm付近に二つの偏波モードに対応する減衰ピークが得られ、シミュレーション結果とほぼ一致することが確かめられた。波長1530nmにも減衰ピークが見られるが、空孔径制御の誤差(変動)によるものと考えられる。



(a) 波長1460nm付近



(b) 波長1550nm付近

図8 PM-PCF-LPGの透過スペクトル

炭酸ガスレーザ照射を用いた空孔径制御により、PM-PCFにLPGを形成することが

できた。PM-PCF-LPGは高温状況下での温度・歪み同時計測への応用が期待できる。歪みや温度変化に対する透過スペクトルの変化については、本研究期間中に測定できていないため、今後実験による検証を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

H. Yokota, K. Ushiroda, N. Inoue, Y. Imai, Y. Sasaki, "Fabrication of photonic crystal fiber optical attenuators with air hole diameter control using CO₂ laser irradiation technique", Optical Fiber Technology, vol. 23, pp. 37-41, 2015 査読有

H. Yokota, N. Inoue, Y. Kobayashi, Y. Imai, "Fabrication of polarization-maintaining photonic crystal fiber optical attenuator using air hole diameter control", OECC/PS2013 Technical Digest, TuPS-3, 2013 査読有

H. Yokota, Y. Imai, "Recent progress in research on photonic crystal fiber devices" (Invited), ICTON 2013 Proceedings, We.B6.1, 2013 査読無

H. Yokota, Y. Ito, H. Kawashiri, H. Kiue, H. Tobita, Y. Imai, Y. Sasaki, "Fabrication of polarization-maintaining photonic crystal fiber coupler with air hole state control using CO₂ laser irradiation technique", IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, no. 10, pp. 1689-1691, 2012 査読有

〔学会発表〕(計3件)

奈村晃平, 横田浩久, 今井洋, 「CO₂レーザ照射によるフォトニック結晶ファイバへの長周期グレーティング形成」, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014.9.18, 北海道大学(北海道・札幌市)

小林脩人, 横田浩久, 今井洋, 「ファイバ曲げを用いた偏波保持フォトニック結晶ファイバ可変光減衰器」, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014.3.17, 青山学院大学(神奈川県・相模原市)

横田浩久, 井上直哉, 小林脩人, 今井洋, 「空孔径制御を用いた偏波保持フォトニック結晶ファイバ光減衰器の作製」, 電子情報通信学会技術報告 光ファイバ応用技術研究会, 2013.1.25, アスティ徳島(徳島県・徳島市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

横田 浩久 (YOKOTA Hirohisa)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 30272115

(2)研究分担者

今井 洋 (IMAI Yoh)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：20151665