

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1日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560347

研究課題名（和文） 炭酸ガスレーザー照射を用いたフォトニック結晶ファイバデバイス作製技術

研究課題名（英文） Fabrication technique of photonic crystal fiber devices using carbon dioxide laser irradiation

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

研究成果の概要（和文）：ファイバ断面の中心付近に複数の空孔を配置したフォトニック結晶ファイバ（PCF）に炭酸ガスレーザー光を照射して加熱・溶融を行うことで、様々な機能をもつ PCF デバイス（PCF カプラおよび PCF 光減衰器）の作製を行った。PCF デバイスの特性は空孔の状態（空孔の有無および空孔径）に強く影響されるため、照射レーザーパワーの調整による空孔制御技術を確認した。同技術は、従来の光ファイバと PCF を接続する際のパワー伝送損失を低減することにも有効である。

研究成果の概要（英文）：Heating and fusing of photonic crystal fibers (PCFs) that have air holes around the centers of their cross sections using a carbon dioxide laser irradiation, various functional PCF devices (PCF couplers, PCF attenuators, and so on) were fabricated. Since characteristics of PCF devices strongly depend on the states of air holes, the technique for air hole control by adjustment of irradiated laser power had been established. This technique is also effective to reduce splice losses between conventional optical fibers and PCFs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光エレクトロニクス

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：光ファイバ、フォトニック結晶ファイバ、ファイバデバイス、炭酸ガスレーザー

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、分散補償、パルス圧縮、スーパーコンティニウム（SC）光発生などを目的とした機能性ファイバへの応用が考えられてきた。近年、PCF の低損失化が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た。さら

に、PCFの特長を十分に生かした全PCFシステムの実現も期待されている。全PCFシステムを構成するためには、PCFを用いて作製したPCFデバイスの開発が必要であるが、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。これまでファイバカプラおよびコア拡散ファイバの作製に用いてきた炭酸ガスレーザー照射技術を応用してPCFカプラの試作を行い、光結合が得られることを実証するとともに、カプラテーパ部における空孔の状態がカプラの特性に与える影響についても理論的・実験的検討を行ってきた。また、PCFの空孔径制御およびテーパ化による光減衰器の実現可能性についても基礎的な研究を行ってきた。

2. 研究の目的

研究課題申請時の研究目的は以下の通りである。

(1) PCFC の設計・作製

理論的研究においては、損失を低減するためのテーパ形状ならびにファイバ構造を明らかにする。作製においては、低損失化のための延伸条件および炭酸ガスレーザー照射条件を明らかにする。空孔を消失させたPCFC作製においては空孔消失位置の最適化を図る。これらの研究をもとに過剰損失の低減(1dB以下)を図る。

(2) PM-PCFC の設計・作製

低偏波クロストークのPCFC作製に適したPM-PCFの構造パラメータおよびカプラのテーパ形状を理論的に明らかにする。また、低損失・低偏波クロストークを実現するための延伸条件および炭酸ガスレーザー照射条件を明らかにする。目標値は過剰損失1dB以下、偏波クロストーク-30dB以下とする。

(3) PCF 光減衰器の設計・作製

減衰量の波長依存性低減に有効なテーパ形状および空孔径の制御法を理論的に明らかにする。作製においては、減衰量の波長依存性低減を図るため、テーパ作製時の延伸条件、炭酸ガスレーザー照射条件、作製したPCFテーパへの炭酸ガスレーザー照射条件を明らかにする。目標値は減衰量3~30dB、減衰量変動±10%以内とする。

(4) SMF と PCF の接続損失低減

アーク放電により融着接続したSMFとPCFの接続損失低減に有効な炭酸ガスレーザー照射条件を明らかにする。目標値は接続損失1dB以下とする。

3. 研究の方法

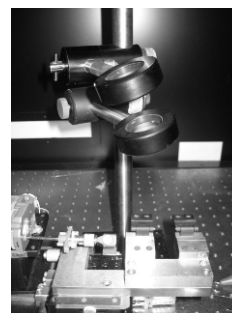
本研究では、フォトニック結晶ファイバ(PCF)デバイスとして、PCFカプラ(PCFC)、偏波保持PCFC(PM-PCFC)、PCF光減衰器の開発を行うとともに、単一モードファイバ(SMF)とPCFの融着接続損失低減技術の確立を図った。理論面では、これらのデバイス中の光波伝搬を計算することによりデバイスの光学特性を求め、特性向上のための構造およびパラメータを調べた。また、新たに導入したファイバのモード計算ソフトウェア(日本RSOFT・FEM-SIM)を用いて、所望の特性を有するPCFデバイス作製に適した偏波保持PCFの設計を行った。実験面では、炭酸ガスレーザー照射型ファイバカプラ作製装置(図1.1)、炭酸ガスレーザー照射型ファイバ加熱溶解装置(図1.2)、アーク放電ファイバ融着接続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。



図 1.1 炭酸ガスレーザー照射型ファイバカプラ作製装置



(a) 炭酸ガスレーザー



(b) レーザ照射部

図 1.2 炭酸ガスレーザー照射型ファイバ加熱溶解装置

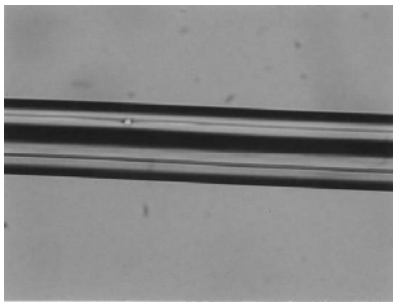
4. 研究成果

研究の主な成果を以下に示す。

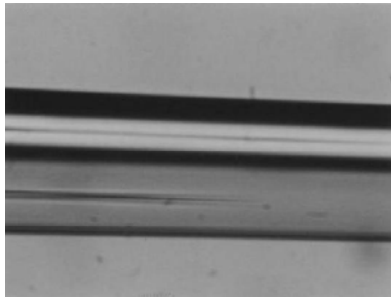
(1) PCFC の設計・作製

PCFC の損失の原因は、カプラテーパ部において PCF の最外部にある純石英層に結合した光パワーがコアに再結合しないために生じるものと考えられている。したがって、損失を低減するためには、純石英層を薄くする、すなわち空孔層数を多くすることが有効である。ビーム伝搬法を用いて PCFC 中の光波伝搬を数値的に計算することにより、上記の有効性を理論的に確かめた。ファイバ作製上の制約から、PCF の空孔層数には限界があるため、上記の有効性に関する実験的な検証は現時点で得られていない。

PCFC の特性はカプラテーパ部における空孔の有無に強く依存する。これまで、延伸過程における照射レーザーパワーの調整により空孔の有無を調整できることが明らかにされているが、所望の特性を得るための精密な空孔制御は困難であった。そこで、PCFC の特性調整を目的とした空孔制御の新たな方法として、PCFC 作製における延伸過程と空孔制御過程を分離することを提案した。空孔を残した PCFC を作製後に炭酸ガスレーザー照射によりテーパ部の空孔を消失させてその長さを制御することで、カプラの消光比（結合率）を調整できることを実証した。図 2.1 は炭酸ガスレーザー照射前後のカプラテーパ側面写真である。レーザー照射により空孔が消失していることが分かる。レーザー照射により空孔を消失させることで、クロスポートにおける消光比を 27%から 57%へと変化させることができた。



(a) 空孔を残した PCFC のテーパウエスト部



(b) 空孔を消失させた PCFC のテーパ移行部
図 2.1 作製した PCFC のテーパ側面写真

(2) PM-PCFC の設計・作製

前述の通り、PCFC の特性はテーパ部における空孔の有無に強く依存する。偏波保持 PCF (PM-PCF) を用いて作製される PM-PCFC では、特に偏波依存結合特性が空孔の有無に大きく影響されると考えられる。炭酸ガスレーザー照射により試作を行った結果を表 1.1 に示す。この表から明らかな通り、空孔を残した PM-PCFC では偏波分離特性が得られていることが示されている。一方、空孔を消失させた PM-PCFC では、偏波に依存しない結合特性が得られることが分かる。

表 1.1 PM-PCFC の結合特性

空孔	偏波	ストレート		クロス	
		消光比	偏波 CT	消光比	偏波 CT
有	X	83%	-30dB	17%	-
	Y	19%	-	81%	-29dB
無	X, Y	54%	-30dB	46%	-30dB

(3) PCF 光減衰器の設計・作製

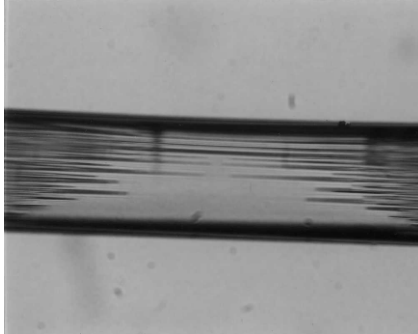
炭酸ガスレーザー照射を用いた加熱・熔融により PCF の空孔径を制御（縮小）できることを実験的に見出した。空孔径を縮小することで閉じ込め損失が増加し、光減衰器として応用できる。PCF は従来の光ファイバに比べて波長によるモードフィールド径 (MFD) の変化が小さいことから、波長依存性の小さい光減衰器の実現が期待できる。

炭酸レーザー光を照射した PCF の断面では、レーザーを照射した側の温度が高くなり温度分布が均一にならない。この問題を解消するために、レーザー照射時に PCF を回転させて断面内の温度を均一にすることを試みた。図 2.2 にレーザー光を照射した PCF の側面写真を示す。図 2.2(a) は PCF を回転させずにレーザー光を照射した場合の PCF 側面写真を示している。断面内の温度が不均一なため、空孔径が均一に制御されていないことが分かる。一方、図 2.2(b) は回転速度 0.5s^{-1} (30rpm) で PCF を回転させながらレーザー光を照射した PCF の側面写真である。空孔径が均一に制御されており、PCF を回転させながらレーザー光を照射することで断面内の温度が均一になっていることが分かる。

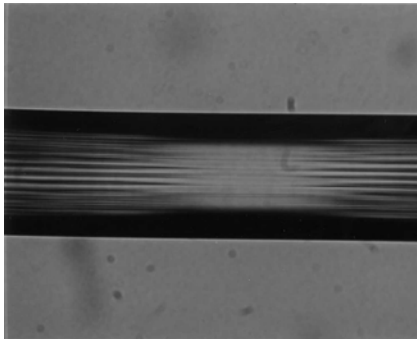
レーザー照射時間を一定にして、照射レーザーパワーに対する空孔径（空孔率）の変化を測定した結果、照射レーザーパワーを大きくするにつれて空孔径（空孔率）が小さくなっており、照射レーザーパワーを調整することで空孔径を所望の大きさに制御できることが実証された。

空孔径を制御して作製した PCF 光減衰器の特性を図 2.3 に示す。空孔率が小さくなるにつれてより大きな減衰量が得られているこ

とが分かる。また、作製した PCF 光減衰器では、波長 980nm から 1550nm において、減衰量が平坦な波長特性を示すことも確かめられた。なお、PM-PCF を用いた光減衰器の作製も試みており、現在、必要な特性を得るためのファイバ構造設計および PM-PCF 光減衰器の試作を行っている。



(a) ファイバ回転なし



(b) ファイバ回転あり

図 2.2 レーザ照射後の PCF 側面写真

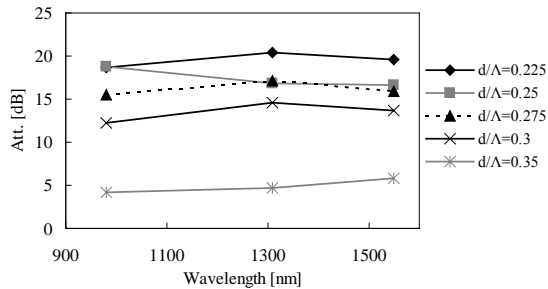


図 2.3 作製した PCF 光減衰器の減衰特性

(3) SMF と PCF の接続損失低減

スーパーコンティニウム (SC) 光発生などに用いられる高非線形 PCF (HNL-PCF) は空孔ピッチを小さくするとともに空孔率を大きくすることで実現できる。HNL-PCF に光を入射するには従来の光ファイバを介して行うことが有効であるが、MFD 不整合損失が問題となる。この問題に対して、炭酸ガスレーザー照射を用いた空孔径制御により HNL-PCF の MFD を拡大し、MFD 不整合損失を低減することを提案し、その有効性を理論的・実験的に明らかにした。

図 2.4 は空孔径の変化に対する接続損失ならびに MFD の変化の計算結果を示したものである。HNL-PCF の空孔径が小さくなると MFD が拡大され従来のファイバ (SMF) の MFD と等しくなったときに接続損失が最小となることが示されている。

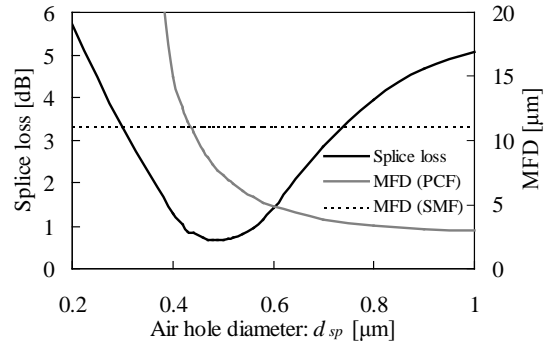


図 2.4 空孔径に対する接続損失および MFD

炭酸ガスレーザー照射により、空孔ピッチ 1.2 ミクロン、空孔径 1 ミクロンの HNL-PCF の空孔を 0.56 ミクロンに縮小することで、従来の光ファイバ (SMF) との接続損失を 4.48dB 低減することができた。この値は図 2.4 に示された理論計算結果ともよく一致しており、提案した手法が SMF と HNL-PCF の MFD 不整合損失の低減に有効であることが理論的・実験的に確かめられた。

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 4 件)

- ① H. Yokota, Y. Ito, H. Kawashiri, Y. Imai, Y. Sasaki, "Fabrication of polarization-maintaining photonic crystal fiber couplers using CO₂ laser irradiation technique", Proceedings of 21st International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-21), 7753-217, 2011, 査読有
- ② 横田浩久, 八嶋紘寛, 今井洋, 佐々木豊, 「CO₂ レーザ照射を用いた空孔径制御による単一モード光ファイバと高非線形フォトニック結晶ファイバの接続損失低減」, 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J94-C, no. 2, pp. 53-56, 2011 査読有
- ③ H. Yokota, K. Ushiroda, T. Takasugi, Y. Imai, Y. Sasaki, "Fabrication of Photonic Crystal Fiber Attenuator with Air Hole Diameter Control Using CO₂ Laser Irradiation", 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010) Technical Digest, 9C2-2, 794-795, 2010 査読有

- ④ H. Yokota, Y. Nakajima, T. Ichige, Y. Imai, Y. Sasaki, “Air hole control for characteristic adjustment in air hole collapsed photonic crystal fiber coupler”, 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2009) Technical Digest, FS3, 2009 査読有

〔学会発表〕(計3件)

- ① 井上直哉, 横田浩久, 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」, 第59回応用物理学関係連合講演会 17p-GP13-8, 2012.3.17, 東京
- ② 横田浩久, 後田耕佑, 井上直哉, 今井洋, 佐々木豊, 「CO₂ レーザ照射による空孔径制御を用いた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 OFT2010-34, 2010.10.25, 埼玉
- ③ 横田浩久, 中島優, 市毛友也, 今井洋, 佐々木豊, 「CO₂ レーザ照射による空孔径制御を用いたフォトニック結晶ファイバカプラの結合特性調整」, 電子情報通信学会技術報告 光ファイバ応用技術研究会 OFT2009-49, 2009.10.30, 別府

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