

令和 3 年 6 月 30 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18843

研究課題名（和文）中空導波路型赤外光合分波器の開発原理

研究課題名（英文）Development principle of hollow infrared waveguide coupler

研究代表者

片桐 崇史（Katagiri, Takashi）

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：90415125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000 円

研究成果の概要（和文）：中赤外光の高効率な導波路型合分波器の実現を目指し、中空光ファイバを基礎とした光結合の指導原理を明らかにした。分岐部においてコアを共有する側面研磨型ファイバカブラ構造では、励振される低次モードのポインティングベクトルが導波路中で保存されるため、光は分岐部に向かって直進する性質を示す。したがって、カブラの分岐比は入射ポートの曲げ角により柔軟に制御可能であることが判明した。この原理に基づき、AgI内装中空光ファイバを基礎としたファイバカブラを製作し、低コストかつ高性能な実用的なファイバカブラが実現した。製作したカブラが惑星観測用ヘテロダイン分光器に利用可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子カスケードレーザーの技術革新により、小型堅牢で安価な赤外光源が入手可能となり、赤外ファイバとの組み合わせにより赤外光の応用領域が拡大しつつある。本研究で得られた知見は、それら装置から光の合分波に必要なミラー、ビームスプリッター、レンズなどの光学素子を排除し、柔軟で小型な光計測装置の実現に寄与し、医療計測、宇宙・環境観測、光通信を含む広範な波及効果を有する。

研究成果の概要（英文）：The guiding principle of optical coupling based on a hollow optical fiber was clarified to fabricate high-efficiency mid-infrared fiber coupler. In the side-polished fiber coupler structure that shares the core at the branch, the inserted light travels straight toward the branch. Therefore, it was found that the branching ratio of the coupler can be flexibly controlled by the bending angle of the input fiber. Based on this principle, a fiber coupler based on the AgI/Ag hollow optical fiber was fabricated, and a low-cost, high-performance fiber coupler was realized. We have also demonstrated that the proposed fiber coupler can be used in heterodyne spectrometers for planetary observations.

研究分野：光量子科学

キーワード：中赤外光 中空光ファイバ 光ファイバカブラ

### 1 . 研究開始当初の背景

赤外光の低損失伝送媒体として中空光ファイバの利用範囲が拡大している . 中空光ファイバとは , 内径 1 mm 以下のガラスまたは樹脂製のフレキシブルな細管の内面に金属および誘電体薄膜を内装した構造を有し , 光を中空コア内に閉じ込めて伝送する特殊光ファイバである . 研究開始当初の中空光ファイバに関する研究は , 伝送損失の低減に終止しており , 平行ファイバ間の光電力の授受 ( 光結合 ) について , その機構 , どの程度の電力移行が実現できるのか , どのように制御するのか , に関する基礎的知見が欠落していた .

申請者は , 平行配置された反共振反射を導波原理とする中空導波路 ( ARROW 型中空導波路 ) において , コヒーレントな光結合が生じていることを見出した . また , 電力移行の程度がコア径の摂動に依存していることが判明した . 可視 近赤外域における石英系光ファイバ系では , 熔融ファイバ結合器の成熟した技術があるが , 赤外ファイバ系では実現されていない . こうした中で , 偶然に見出した中空光ファイバ間の光結合現象を系統的に整理し , 赤外ファイバ系合分波器の開発に資する指導原理を確立するために , 本研究の着想に至った .

### 2 . 研究の目的

本研究では , 導波路間結合理論と中空伝送理論を融合し , 中空光ファイバ間の光結合の学理を究明することを目的とし , ARROW 型平行中空導波路の実験モデルにおいて以下のことを調査する .

- ( 1 ) 光電力が最大移行するまでの導波路長 ( 結合長 )
- ( 2 ) 光電力が最大移行する効率 ( 結合効率 )
- ( 3 ) 結合に伴う損失の内訳 ( 挿入損失 )

上記を統合して , 中空導波路間の光結合理論の構築と , それによって可能となる , 「結合長」と「結合効率」の構造依存性を明らかにし , 十分に小さな「挿入損失」を有する赤外合分波器を実現するための必要条件とその機構を明らかにする .

### 3 . 研究の方法

- ( 1 ) ARROW 型平行中空導波路のモデル製作 ( 30・31 年度 )

申請者提案の加圧線引き法により , ハニカム構造を有するマルチコア中空光ファイバを製作し , 強結合状態にある平行隣接コアを選別することにより実験モデルとする .

- ( 2 ) 結合長・結合効率・挿入損失の調査 ( 30・31 年度 )

製作した実験モデルについて , 現有の FTIR 分光イメージングシステムおよび量子カスケードレーザ ( QCL : 波長 5.2  $\mu\text{m}$  ) を用いて , カットバック法により長さ方向の光結合特性を計測する . これらの実験結果より , 結合長 , 結合効率 , 挿入損失を導出し , モード結合理論による解析結果およびビーム伝搬法によるシミュレーション結果と総合して , 中空導波路間の光結合理論を構築する .

- ( 3 ) 低損失合分波器の製作と応用検証 ( 32 年度 )

構築した中空導波路間の光結合理論を応用し , 実用的な以下の合分波器の設計 , 試作を行い , 各応用分野における新規デバイスとしての有効性について検証する .

- ( 3a ) 赤外 ATR 血糖値測定システム
- ( 3b ) 惑星観測用ヘテロダイン分光器

### 4 . 研究成果

- ( 1 ) 構造と原理

実験に先立ち , ビーム伝搬法により詳細なシミュレーションを実施した結果 , 実用的なデバイス構造として , 側面研磨型のファイバカブラ構造に帰着した . 図 1 にその構造とパラメータを示す . 一定曲率で湾曲させた 2 本の AgI/Ag 中空光ファイバの一部側面を研磨し , 貼り合わせることにより製作する .

カブラの構造は , コア径  $d$  , 曲率半径  $R$  , 入射ポートの曲げ角  $\theta$  および研磨深さ  $\Delta p$  により規定される . ここで , 中空光ファイバが通常低次モードを優先的に伝送することに注意が必要である . これは , 漏れモードの特性上 , 高次モードは損失するためである . このとき , 入射ポートに入射した光は入射時のポインティングベクトルを維持したまま概ね直線的に曲げの外側に向かう . このことから , 本デバイスの分岐比は入射光の入射位置と入射角度に強く依存し , 入射ポートの曲げ角  $\theta$  によって厳密に制御可能である . このことは同時に  $2 \times 2$  カブラにおいて 4 つの入射ポートに対応する分岐比を独立に設計可能であることを意味しており , 従来は困難である非対称な分岐デバイスが実現可能であることを示唆している .

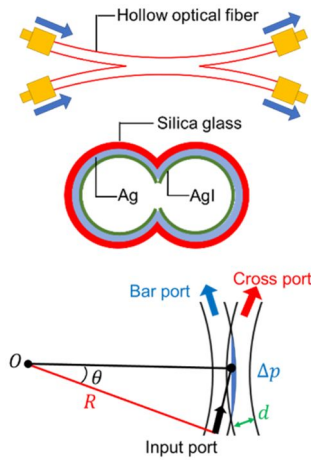


図1 デバイス構造

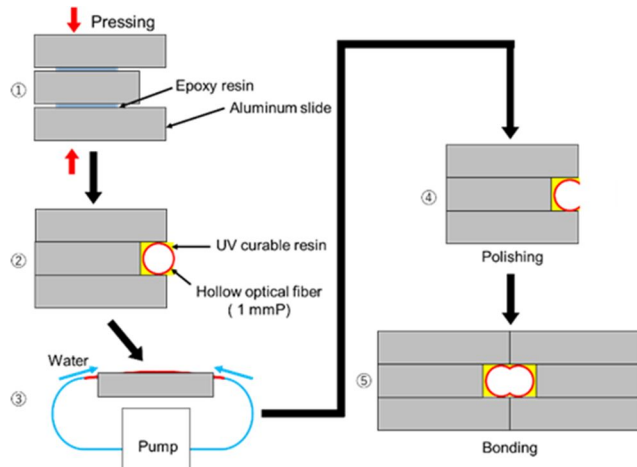


図2 製作プロセス

(2) 製作と評価

コア径 1 mm の銀内装中空光ファイバを母材としてデバイスの試作を行った。製作工程を図2に示す。デバイスの構造体としてアルミ板を用いた。まず、長方形のアルミ板 2 枚と  $R = 1600$  mm の円弧形状を持つアルミ板 1 枚をエポキシ樹脂で接着し構造体を形成した。次に、銀内装中空光ファイバ（コア径 1 mm、長さ 260 mm）を構造体の溝に配置し紫外線硬化樹脂を充填して固定した。次に、マイクロチューブポンプによりファイバ内に注水しながら深さ  $100 \mu\text{m}$  まで研磨した。同プロセスにより製作した 2 組の側面研磨ファイバを組み合わせることによりデバイスは完成した。

製作したカプラの評価結果を図3に示す。2本のファイバを貼り合わせる際に伝搬方向にシフトを加えることにより曲げ角を微調整し、結合比の変化をプロットした。測定では、光源に  $\text{CO}_2$  レーザ（波長  $10.6 \mu\text{m}$ 、出力 930 mW）を用い、長さ 13 cm の結合ファイバを介して製作したカプラに入射した。製作したカプラは、シミュレーション結果と同様にシフト位置 5 mm で分岐比が最大となっており、概ね設計通りの分岐特性を示した。また、1.9 dB から 3.9 dB（うち導波路損失 0.6 dB）の過剰損失が発生しており、シフト量の増大に伴い過剰損失が増大していた。

過剰損失は研磨面の粗さに起因しており、研磨精度の向上により過剰損失が 1 dB まで低減された。また、結合比は貼り合わせのシフト量により製作時に調整可能であるため、低コストかつ高性能な実用的なファイバカプラが実現できることが明らかとなった。

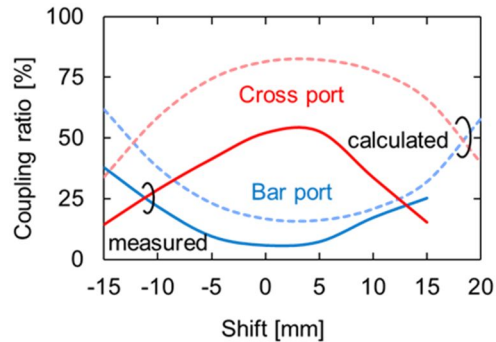


図3 製作したファイバカプラの分岐特性

(3) 応用検証

東北大・理（中川：連携）の惑星観測用ヘテロダイン分光器は、赤外レーザー光を光源とし、天体からの信号光を重畳して得られる混合光を高速赤外線検出器で受信し、超高波長分解能で惑星大気物質変動を観測する。分岐比 15:2 で製作した中空光ファイバカプラを当該分光器に導入し、 $\text{CO}_2$  レーザ（波長  $10.6 \mu\text{m}$ ）により QCL（波長  $10.3 \mu\text{m}$ ）スペクトルのヘテロダイン検波が可能であることを確認した（図4）。この結果は、本研究により実現した中空光ファイバカプラが、今後の中赤外波長域の研究・産業の発展に寄与することを示すものである。

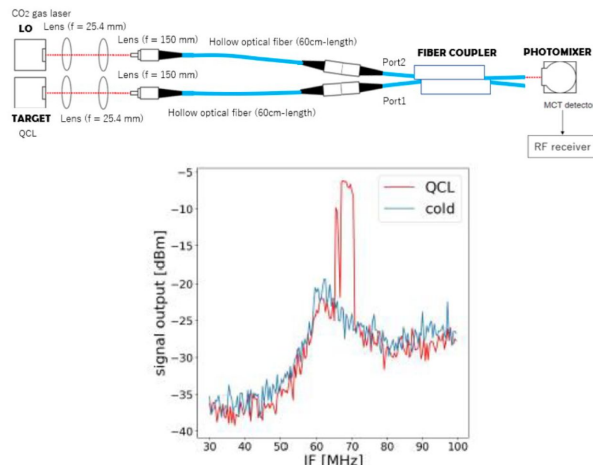


図4 惑星観測用ヘテロダイン分光器による実証実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 片桐崇史, 松浦祐司	4. 巻 48
2. 論文標題 中赤外光イメージングのための反共振型中空マルチコアファイバ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 291-295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 加藤仁教, 松浦祐司, 片桐崇史
2. 発表標題 中赤外レーザー用研磨型中空光ファイバカプラ
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Hirahara, Ryota Ito, Yuji Yokoyama, Yuji Matsuura, Takashi Katagiri, Hiromu Nakagawa, Yasumasa Kasaba, Atsushi Yamazaki
2. 発表標題 Development of the liquid nitrogen cooled hollow core waveguide fiber for the mid-infrared region
3. 学会等名 Proc. SPIE 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤仁教, 松浦祐司, 片桐崇史
2. 発表標題 側面研磨型中空光ファイバカプラの非対称分岐特性
3. 学会等名 電気学会光・量子デバイス研究会「バイオメディカルフォトンクス応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤仁教, 松浦祐司, 大嶋佑介, 片桐崇史
2. 発表標題 中赤外レーザー用研磨型中空光ファイバカブラの製作
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤仁教, 松浦祐司, 大嶋佑介, 片桐崇史
2. 発表標題 側面研磨型中空光ファイバカブラ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	松浦 祐司  (Matsuura Yuji)  (10241530)	東北大学・医工学研究科・教授    (11301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	中川 広務  (Nakagawa Hiromu)  (30463772)	東北大学・理学研究科・助教    (11301)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------