

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420293

研究課題名(和文) 反共振反射を導波原理とする中空コアコヒーレントファイババンドル

研究課題名(英文) Hollow core coherent fiber bundle based on antiresonant reflecting guidance mechanism

研究代表者

片桐 崇史 (Katagiri, Takashi)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90415125

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)：内視鏡下による赤外サーモグラフィの実現に向け、反共振反射中空ファイバによるファイババンドルを提案した。素子数245、長さ90cm、外径1.06mmのホウケイ酸ガラス製のファイババンドルは、ガラス線引き法により製作された。製作したファイババンドルは、設計どおり、InSb赤外カメラの検出波長域である3-4 μ mにおいて低損失な特性を示した。硬性内視鏡への応用を想定し、2mm径の鉗子口から挿入し得る、長さ30cmのファイババンドルと半球レンズから成るイメージングシステムを構築した。本イメージングシステムは視野2mm、空間分解能420 μ mであり、検出限界温度は32℃、温度分解能は0.7℃であった。

研究成果の概要(英文)：A bundle of anti-resonant hollow optical fibers was proposed for endoscopic infrared-thermal imaging. A bundle of 245 fibers made of borosilicate glass was fabricated by using a glass drawing technique, and the length and total diameter of the bundle were 90 cm and 1.06 mm, respectively. As designed, the bundle fiber showed low losses in the wavelength range of 3 to 4 μ m that fit the detection wavelengths of InSb infrared cameras. By considering applications with rigid endoscopes, an imaging system composed of a 30-cm long fiber bundle and a half-ball lens with a diameter of 2 mm that can be inserted into a working channel of endoscopes was fabricated. By using an imaging system with a one-third reduction ratio, an image resolution of around 420 μ m was successfully obtained with a field-of-view of 2-mm diameter. Another tests showed that the minimum detected temperature was 32.0 °C, and the temperature resolution of the system was around 0.7 °C.

研究分野：医用光工学

キーワード：中空光ファイバ 赤外イメージング 内視鏡

1. 研究開始当初の背景

光計測用ファイバプローブの光伝送媒体として中空光ファイバが注目されている。中空光ファイバは、ガラスチューブの内面に金属や誘電体による高反射膜を形成した構造を有し、光を空気のコアに閉じ込めて伝送するため、雑音の要因となる光と物質の相互作用（吸収、散乱、非線形光学効果）を極限まで低減できることが最大の特徴である。特に従来型の石英系光ファイバが使用できない赤外分光やラマン分光の応用分野では、中空光ファイバの使用が一般化されつつある。中空光ファイバをコヒーレントにバンドル化することにより二次元（イメージ）計測への適用が可能となるが、現時点の中空ファイババンドルの研究は、製作が困難であることから、太く短いバンドルを用いたフィジビリティスタディに終止しており、長尺かつフレキシブルな実用に耐えるファイババンドルは実現されていなかった。

2. 研究の目的

申請者のこれまでの研究によって、網目状のガラスにより保持された一層の誘電体薄膜チューブが反共振反射により赤外光を低損失に伝送することが明らかとなっている。本研究では、薄膜チューブを細密に配列したバンドル構造における光結合の構造依存性に着目し、低結合構造の設計指針と適応波長範囲を明らかにし、反共振反射を導波原理とした中空ファイババンドルの開発に資する普遍的な指導原理を確立する。

3. 研究の方法

反共振反射を導波原理とする中空ファイババンドルについて以下の点において調査する。

- (1) 製作可能で結合係数の異なる複数種類の中空ファイババンドルを製作する。
- (2) 広帯域赤外光を全コアに入射したときの出射光の強度スペクトルを FTIR で測定し、波長 - 損失特性を分析する。
- (3) 広帯域赤外光を一つのコアに入射したときの出射光の分光イメージを観察し、結合係数および結合長を分析する。
- (4) 複数種類の低結合ファイババンドルを製作し、可視 - 近赤外波長域におけるスペクトル特性を測定し、適応波長域を求める。
- (5) フレキシブルファイババンドルを製作し、イメージ伝送実験を行う。

4. 研究成果

(1) 中空ファイババンドルの製作

図 1 に製作したファイババンドルの断面の一例を示す。各素子のガラス肉厚の光学膜厚を伝送モードに対して $1/4$ 波長とすることにより、光は低損失漏れモードとして伝送する。図 1 に示すファイバは直径 1 mm 程度のホウケイ酸ガラスキャピラリを直径 20 mm のホウケイ酸ガラス管に隙間なく挿入し、これをプ

リフォームとして溶解延伸することにより作製した。ここで、線引きする際にプリフォームの上端から減圧、下端から加圧を行うことで均一かつ肉薄なハニカム構造を形成する。本ファイバの外径は 1.06 mm、平均素子径は 60 μm 、平均膜厚は 1 μm 、素子数は 245 本、バンドル長は 90 cm であった。

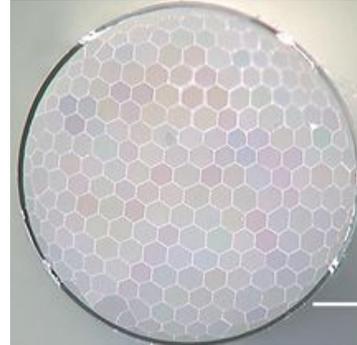


図 1 製作した中空ファイババンドルの断面。

(2) 中赤外域損失特性

製作したファイババンドルの伝送損失スペクトルをフーリエ変換赤外分光器 (FT-IR) により測定した。内径 700 μm 、長さ 10 cm の単芯の中空ファイバを結合用ファイバとし、バンドルファイバの中心コアおよそ 120 本に赤外光を入射した。測定した赤外損失スペクトルを図 2 に示す。誘電体層における光の干渉効果により、波長 3~4 μm 付近において低損失な特性が得られた。

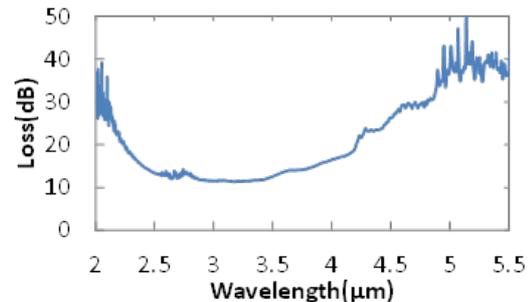


図 2 赤外伝送損失スペクトル。

(3) 隣接コアへの光結合の観察

熱源からの放射光をレンズを介しておよそ 20 μm のスポットに集光し、長さ 90 cm のファイババンドル内の一つのコアに入射した。出射端面における近傍界の様子を図 3 に示す。中心のコアに入射した光が隣接するコアへ移行する様子が分かるが、その広がり方は不均等であった。移行の有無は隣接コアとのコア径差に依存している。すなわち、光の移行にはコヒーレントな光結合が寄与しており、コア径差が近い場合にクロストークが生じる。更に、ビーム伝搬法による数値シミュレーションの結果、クロストークが生じるためには、コア径が高い精度で一致する必要があり、コア径に僅か 10% の摂動を加えることにより抑制可能であることが示された。

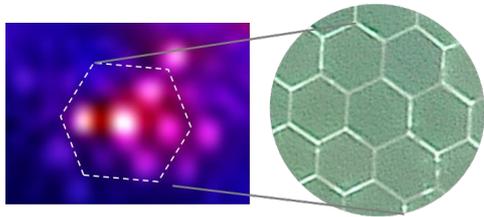


図3 隣接コアへの光結合の様子。

(4) 可視 - 赤外域損失スペクトル

可視-赤外の広帯域において損失スペクトルを測定することにより、伝送特性をより詳細に調査した。図4は長さ7 cm, 膜厚 1.16 μm のファイババンドルの可視-赤外伝送損失スペクトルである。ここで、可視-近赤外域の測定では、ハロゲンランプを光源に用いている。比較のため、結合ファイバと等しいコア径 (700 μm) のチューブリーキーファイバの理論値もプロットした。研究開始当初、ファイババンドルの損失はコア径に依存すると考えていたが、およそ 60 μm のコア径の理論損失は、実験値を優に上回る結果となった。コアに入射された光は漏れを伴って伝搬すると考えられるが、漏れた光は隣接コアに再結合するため、結果として、最外周のコアまで到達しない限りは損失として観測されない。すなわち、損失はコア径ではなくバンドル径依存となる。また、膜厚に対して波長が短くなると、膜の干渉効果が弱くなるため、損失が上昇する。一方、長波長側の損失上昇は、ホウケイ酸ガラスの吸収によるものであるが、光エネルギーのほとんどが中空コア内に分布することから、その影響はバルクのガラスに比べて著しく小さいことが確認された。以上の結果より、本提案のファイババンドルは、見かけ上、超低損失な超細径中空ファイバ束として振る舞い、特に石英系ファイバの使用が不可能な 3 μm 以上の中赤外イメージ伝送に有効であることが示唆された。

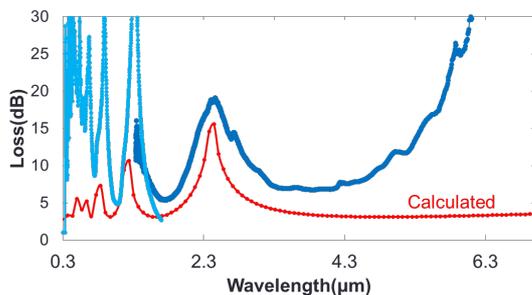


図4 可視-赤外伝送損失スペクトル

(5) 赤外イメージ伝送実験

InSb 検出器で構成された赤外カメラ (感度波長 3~4 μm) を用いて熱イメージング伝送を試みた。サンプルとして直径 0.2 mm のニクロム線を約 120 $^{\circ}\text{C}$ に加熱し、放射された赤外光をレンズを介してファイバに入射

させた。図5に示すように隣接コアへの伝送光の移行により、イメージが若干広がるものの線状サンプルのイメージが 90 cm に渡り伝送されることが確認された。図6にファイババンドルを伝搬後のサンプルの線幅とバンドル長の関係をプロットした。この結果も研究開始当初の予想と反するものであった。すなわち、漏れモードによる画像伝送では、バンドル長が長くなるに従って、光が周囲のコアに拡散し、解像度が劣化すると考えていたが、実験結果では、長尺化に伴ってむしろクロストークは減少し、バンドル長 20 cm 程度で一定値に収束する様子が観測された。これはファイバ中の伝送距離が短い範囲では高次モードが周囲に漏れることによって解像度が低下するものの、伝送距離が長くなるに従い次第に漏れの小さい低次のモードが支配的になるため解像度の劣化は小さく抑えられていると考えられる。その証拠として、幾何光学を基礎とする理論計算においても、同様の傾向となることが確認された。ここで、実験値が理論値を下回っている原因として、本計算モデルでは前述のコヒーレントな光結合の効果が無視されている点が挙げられる。製作したファイババンドルにはコア径間に 9.2 % の摂動があるため、クロストークの強い抑制効果が働いていることが予想される。

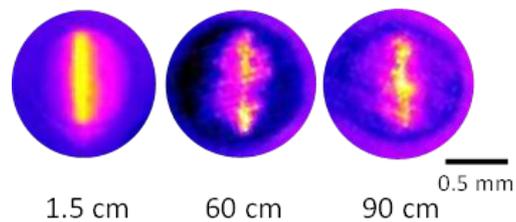


図5 ニクロム線の熱画像伝送。

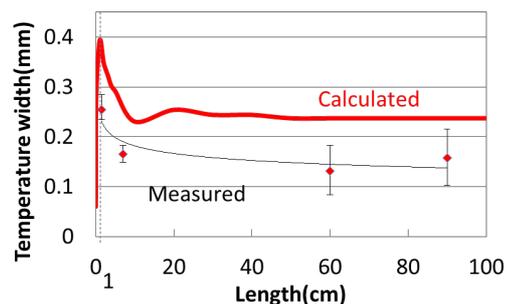


図6 解像度のバンドル長依存性。

(6) 硬性内視鏡への応用

研究開始当初の計画より早いペースで研究が進んだことから、実用に向けた性能評価実験を実施した。近年、硬性内視鏡は腹腔鏡術や医療ロボットの普及により需要が増している。硬性内視鏡は一般に長さ 30 cm, 外径 5 mm の直線金属棒の先端に観察用のイメージセンサを有し、2 mm 径の鉗子口から治療

具を挿入して手術を行う。本実験では、鉗子口から挿入可能なサーモイメージングプローブを構成し、観測した熱画像の空間分解能、検出限界温度、および温度分解能を調査した。

図7、図8に中空ファイババンドルを基礎とするサーモイメージングプローブの概要と写真を示す。中空ファイバプローブの先端にサファイア製の半球レンズを用いて3倍の結像系を構成し、ステンレス製の金属スリーブにより固定した。作動距離は6 mm、実行視野は2 mmであった。図9に、観測した熱画像を示す。ニクロム線の画像が明瞭に観測されていることが分かる。空間分解能は420 μmであった。図10には温度の異なるセラミック板を用いた低温での実験結果を示す。本実験により、検出限界温度は32℃、温度分解能は0.7℃であることが分かり、提案したファイババンドルが、生体を対象とした硬性内視鏡応用において、十分に応用可能な性能を有していることを確認した。

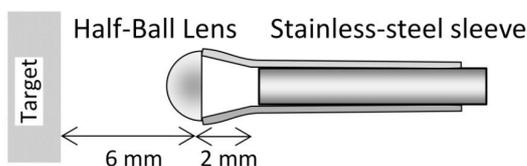


図7 硬性内視鏡用サーモイメージングプローブの先端構造。

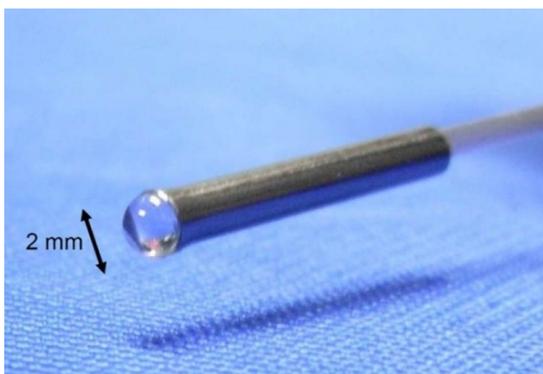


図8 硬性内視鏡用サーモイメージングプローブの先端写真。

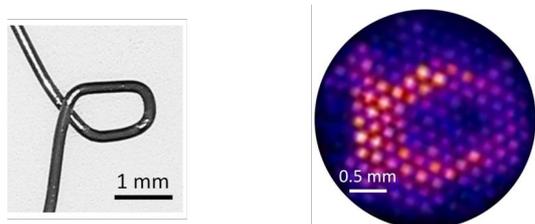


図9 硬性内視鏡用サーモイメージングプローブで観察した熱画像。

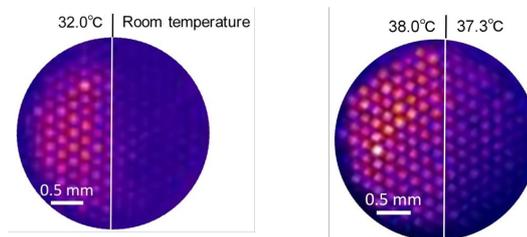


図10 測定温度下限値と温度分解能。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Takuya Kobayaashi, Takashi Katagiri, Yuji Matsuura, Multi-element hollow-core anti-resonant fiber for infrared thermal imaging, Opt.Express, vol.24, pp. 26565-26574, 2016, 査読有.
DOI: 10.1364/OE.24.026565

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片桐 崇史 (KATAGIRI, Takashi)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90415125

(2) 研究分担者

松浦 祐司 (MATSUURA, Yuji)
東北大学・大学院医工学研究科・教授
研究者番号: 10241530

(3) 研究協力者

小林 拓矢 (KOBAYASHI, Takuya)
東北大学・大学院医工学研究科