

平成30年5月22日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14241

研究課題名(和文) 赤外熱画像伝送のためのチューブリーキーファイババンドル

研究課題名(英文) Tube-leaky fiber bundle for infrared thermal image transmission

研究代表者

松浦 祐司 (Matsuura, Yuji)

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：10241530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ガラス線引法を用いた製作が可能なバンドル型チューブリーキーファイバを提案し、コア径80 μm 以下の245本の素子数をもつバンドルの作製に成功した。誘電体層の光学膜厚を波長の1/4の厚さにすることにより、低損失な光伝送が可能となる。製作したファイババンドルは、素子径が小さいにも関わらず低損失な伝送特性を有していることを確認した。続いて硬性内視鏡への応用を考え、長さ30 cmのファイババンドルと直径2 mmのハーフボールレンズを用いて、内視鏡に挿入可能な細径なイメージングシステムを構築した。このシステムの最低検出温度は32.0 $^{\circ}\text{C}$ 、体内温度付近での温度の分解能が0.7 $^{\circ}\text{C}$ であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A tube-leaky fiber bundle that is fabricated by a glass drawing technique is proposed for endoscopic, infrared thermal image transmission. A fiber bundle that has 245 cores and each pixel sizes are less than 80 μm was fabricated. By setting the thickness of glass wall to a quarter-wavelength optical thickness, light is confined in the air core as a leaky mode with a low loss owing to the interference effect of the thin glass wall. From measurement of the transmission losses, it was found that bundled tube-leaky fibers have reasonably low transmission losses in spite of the small pixel size. 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 an endoscope was fabricated. By using this imaging system, it was shown that the minimum detected temperature was 32.0 $^{\circ}\text{C}$ and the temperature resolution of the system was around 0.7 $^{\circ}\text{C}$ in the body temperature range.

研究分野：医用光工学

キーワード：中空光ファイバ フォトニック結晶ファイバ 赤外サーモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

近年赤外線サーモグラフィーの小型化・低価格化が進み、医療分野においてもさまざまな応用が展開されている。閉塞性動脈硬化症では、血流の滞留を温度の低下として捉えることができ、また各種の関節疾患や脊椎疾患も周囲との温度差を検出することにより、すでに診断の一助となっている。さらに腫瘍などの組織では、血管の新生や増殖が生じるため、それを高温領域として観察できるが、現状では体表温度を計測することにその応用は制限されており、皮膚がんや乳がんの診断が検討されているのみである。内視鏡下での熱画像計測が可能となれば、消化器官をはじめとする各種の内臓粘膜上の初期腫瘍の検出が可能となる。

研究代表者らは長年にわたり、赤外光伝送のための中空光ファイバの開発に従事してきている。これまでのファイバは柔軟なガラス細管の内面に金属および誘電体薄膜を構成したものであり、その膜厚を調整すれば中赤外領域のいかなる波長の光に対しても低損失とすることが可能である。そして、内径 $320\ \mu\text{m}$ の細径中空光ファイバを束ねたバンドルファイバにより体温程度の温度イメージングに成功した。しかし、バンドルファイバの直径は $6\ \text{mm}$ と内視鏡に挿入するには大きく、これ以上のファイバの細径化は大きな損失増を伴うため、ファイバの構造自体に大きな変更を行う必要があると認識し、本研究の発想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、内視鏡下での温度画像観察を可能にする細径な赤外光イメージ伝送路を実現することにある。そのために複数の空孔がハニカム状に配列されているバンドル型チューブリーキー導波路の開発を行う。チューブリーキー導波路とは誘電体薄膜のみで構成されたものであり、本研究では、導波路をバンドル状とした場合の導波路間の結合を考慮した理論検討モデルを構築するとともに、ガラス線引法による導波路作製を試みることにより、熱画像伝送が可能な細径伝送路の実現を目指す。内視鏡下での温度イメージングが可能となれば、早期腫瘍検出をはじめとする各種疾病の非侵襲診断へとつながることが期待される。

3. 研究の方法

(1) バンドル型チューブリーキーファイバの作製

バンドル型チューブリーキー導波路は、フォトニック構造ファイバの製作法として既に確立されているガラス線引法を応用して製作する。利用するのは既存の線引き装置で

あり、誘電体薄膜として機能するガラス材料は、比較的低温で線引き可能でかつ可視から中赤外までの広い透過域を有するホウケイ酸ガラスを利用する。あらかじめ先端を封止した直径 $1\ \text{mm}$ 程度のガラスキャピラリを $20\ \text{mm}$ 径程度のガラス管に挿入してプリフォームを形成する。そしてそれを 900°C 程度に加熱延伸することでバンドルを形成するが、ここでキャピラリ内部を加圧、外部を減圧することにより、キャピラリ間のデッドスペースをなくし、有効面積を最大化することが可能である。

またガラス膜厚の制御は、プリフォームに利用するガラスキャピラリの肉厚、線引時の延伸比、および付加圧力差によって制御することが可能であり、今回対象とする波長 $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ で低損失となる膜厚が得られるよう実験的にその最適条件を求める。

(2) バンドル型導波路の損失特性評価

導波路の伝送対象波長は、利用する InSb サーモグラフィーカメラの検出波長である $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ である。理論計算によれば膜厚 $1.1\ \mu\text{m}$ 程度で反射率が最大となり、その条件で導波路の伝送損失が最低となる。しかし、今回のように複数のチューブリーキー導波路を隣接させ、それらのうち、ひとつの導波路を励振すると、放射漏れモードと導波モードの結合により他方の導波路へパワー移行が生じる。そこで、これを考慮した伝送損失を幾何光学的手法を用いて計算し、最適となる膜厚条件を求め、それを導波路製作へ適用するとともに、製作した導波路の損失特性の測定結果にもとづき、あらためて計算を実施し最適な条件を導出する。

(3) バンドル型チューブリーキーファイバによる熱画像伝送実験

製作したバンドル型チューブリーキー導波路を用いて熱画像伝送を行うが、導波路のサイズとしては、前述のとおり以前に作製した内径 $320\ \mu\text{m}$ 、素子数 127 の解像度を大きく上回るようにコア径 $50\text{--}60\ \mu\text{m}$ 、素子数 250 を最初の目標とする。本提案の構造では、この条件でも全体の直径が $1\ \text{mm}$ 程度と非常に小さく抑えることができる。まずは、直径がコア径程度 ($\sim 50\ \mu\text{m}$) の電熱線をターゲットして画像伝送を行い、解像度を測定することにより、さまざまな条件で作製したバンドル型導波路のクロストークの評価を行う。なお画像取得に使用するのは InSb カメラ (素子数 640×512) である。

その後、放射する赤外光パワーが微弱となる体温程度の物体の観察を試みる。評価項目としては位置分解能、温度分解能、最低検出温度などが挙げられ、実験によりこれらの評価を行うとともに、必要であれば製造条件にフィードバックを行い、より優れた構造を探索する。また、導波路先端に微少なレンズを取り付けることにより、視野を拡大する方法

についても実験的に検討を行う。

4. 研究成果

(1) バンドル型チューブリーキーファイバの作製

ファイバを構成する誘電体材料としては低い加工温度での製作を実現するためにホウ珪酸ガラスを選択した。まず外径 20 mm、内径 18 mm のホウ珪酸ガラス管を熔融延伸することにより、外径 1 mm、肉厚 0.05 mm の薄肉キャピラリ形成した。製作したキャピラリを長さ 15 cm 間隔で切断し、片端を封止した後、外径 20 mm、内径 18 mm のホウ珪酸ガラスパイプに隙間なく挿入し、これをプリフォームとした。最後にプリフォームを再び熔融延伸することによりバンドル型チューブリーキーファイバを形成した。ここで、線引きする際にプリフォームの上端からキャピラリ間の空隙に対して真空ポンプによる減圧を行い、下端からは窒素ガスによる加圧を行う。これによりキャピラリ間の空隙を埋めるように膨張が起こり、均一かつ肉薄なハニカム構造を有するバンドル型チューブリーキーファイバが完成した。

製作したバンドル型チューブリーキーファイバの断面図を図 1 に示す。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 0.76 μm 、素子数は 245 本、バンドル長は 90 cm であった。この結果より、長尺かつ均一なハニカム構造を実現し、目標膜厚を達成することができた。

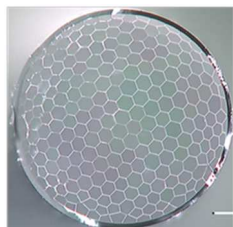


図 1 ファイババンドルの断面図

(2) バンドル型導波路の損失特性評価

長さ 90 cm のチューブリーキーファイバの赤外損失スペクトルを図 2 に示す。波長 2 μm 付近において誘電体層での多重反射による干渉ピークが確認でき、誘電体層での光の干渉効果により、波長 2.5~4.5 μm において低損失な領域が得られた。また、長波長域における損失の増加はホウ珪酸ガラスの吸収によるものである。

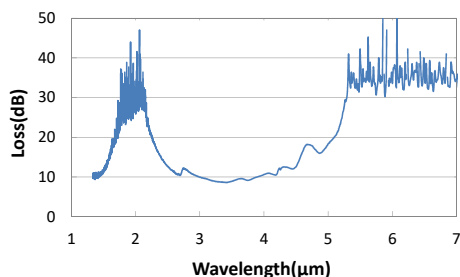


図 2 ファイバの伝送損失スペクトル

サンプルとして直径 0.2 mm のニクロム線を約 120°C に加熱し、放射された赤外光をレンズでファイバ入射端に結像させ、ファイバからの出射光の近傍界分布を赤外カメラで撮像することにより熱画像を取得した。図 3 はファイバ長 1.5 cm、7 cm、60 cm、90 cm に対する解像度の変化の測定結果である。なおレンズによりファイバ入射端に結像されるニクロム線の像の太さは 0.06 mm となる。ファイバが短いとき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していることが確認できるが、ファイバが長くなると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。

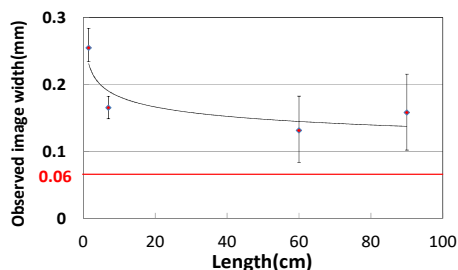


図 3 ファイバ長に対する解像度

(3) バンドル型チューブリーキーファイバによる熱画像伝送実験

本ファイバはガラスで構成されたハニカム状の断面構造を有しているため最小曲げ半径は 40 cm 程度となり、軟性内視鏡には適さないものの、硬性内視鏡への応用は十分に可能である。そこで内視鏡へ挿入可能なイメージングシステムの構築を行った。図 4 にその外観と構造を示す。

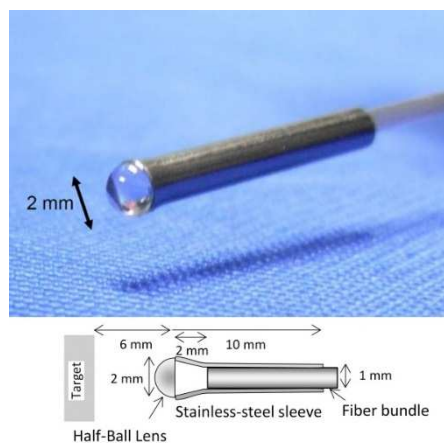


図 4 イメージングシステムの外観と構造

このシステムでは長さ 30 cm のファイババンドルの先端に、直径 2 mm のサファイア製の半球レンズが取り付けられている。レンズの焦点距離は 1.3 mm であり、倍率 1/3 の結像系が得られる位置にレンズが配置されている。

図 5 は本システムで得られた 38.0°C に加熱したループ状のニクロム線のイメージで

ある。明瞭なイメージが得られ解像度は 0.4 mm であった。

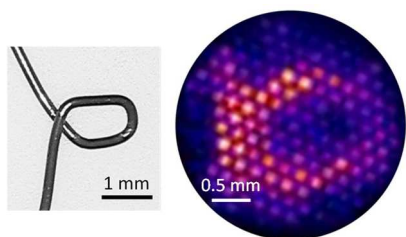


図5 ニクロム線の外観と熱イメージ

次に体温程度に加熱したセラミック板のイメージ伝送を行った。図 6(a)は 32.0°C のサンプルから得られた熱画像である。体温より低い温度でも十分な SNR をもつ熱イメージを得ることができた。図 6(b)は 38.0°C と 37.3°C に加熱した 2 枚のセラミック板の画像である。体温付近の領域において、温度分解能 0.7°C が得られた。早期がんの炎症による温度増加は一般的には 1.0°C 以上あるとされ、これを検出するのに十分な温度分解能が得られている。

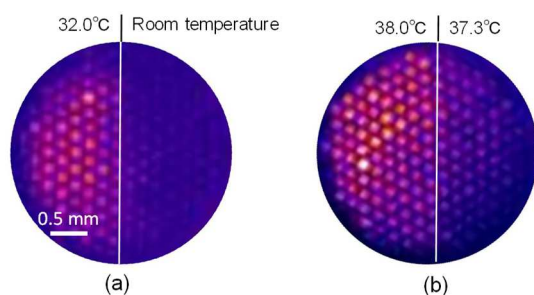


図 6 セラミック板の熱イメージ。(a) 32.0°C サンプル、(b) 38.0°C と 37.3°C のサンプル

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 8 件)

1. T. Katagiri, K. Yaegashi, Y. Matsuura, "Sensitivity improvement of midinfrared gas sensing system using single-wavelength quantum cascade laser and hollow-waveguide gas cell," *Opt. Eng.*, vol. 56, no. 8, pp. 080503-1-080503-3 (2017). 査読有
2. A. Seki, K. Iwai, T. Katagiri, Y. Matsuura, "Sensitivity improvement of optical fiber acoustic probe for all-optical photoacoustic imaging system," *Appl. Phys. Express*, vol. 10, no. 7, pp. 072503-1-072503-4 (2017). 査読有
3. 関淳, 片桐崇史, 松浦祐司, "光ファイバ型音響センサを用いた全光学式音響イメージングプローブ," *超音波テクノ*, vol. 29, no. 5, pp. 82-85 (2017). 査読無

4. 小山卓耶, 柿野聡子, 松浦祐司, "光音響法による不顕性う蝕イメージング," *超音波テクノ*, vol. 29, no. 5, pp. 86-89 (2017). 査読無
5. 松浦祐司, "炭酸ガスレーザー光伝送用中空光ファイバー," *日本レーザー医学会誌*, vol. 38, no. 2, pp. 82-86 (2017). 査読有
6. A. Seki, K. Iwai, T. Katagiri, Y. Matsuura, "Forward-viewing photoacoustic imaging probe with bundled ultra-thin hollow optical fibers," *J. Opt.*, vol. 18, no. 7, pp. 074015-1-074015-5 (2016). 査読有
7. A. Yamada, S. Kakino, Y. Matsuura, "Detection of Photoacoustic Signals from Blood in Dental Pulp," *Opt. Photonics J.*, vol. 6, no. 9, pp. 229-236 (2016). 査読有
8. T. Kobayashi, T. Katagiri, Y. Matsuura, "Multi-element hollow-core anti-resonant fiber for infrared thermal imaging," *Opt. Express*, vol. 24, no. 23, pp. 26565-26574 (2016). 査読有

[学会発表] (計 19 件)

1. 柴山享佑, 飯田猛, 片桐崇史, 秋草直大, 松浦祐司, "気道内局所的 CO₂ 濃度計測のための赤外光ファイバプローブの基礎検討," 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018 年 3 月, 東京)
2. 奥山泰平, 片桐崇史, 松浦祐司, "マルチキャピラリを用いた微量タンパク質迅速定量システムの検討," レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会 (2018 年 1 月, 京都)
3. T. Koyama, S. Kakino, Y. Matsuura, "Photoacoustic imaging of hidden dental caries by using a bundle of hollow optical fibers," *SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVIII* (Jan. 2018, San Francisco).
4. K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. Shi, X. Zhu, Y. Matsuura, "Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on stainless tube," *SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVIII* (Jan. 2018, San Francisco).
5. 奥山泰平, 片桐崇史, 松浦祐司, "ガラスマルチキャピラリを用いたバイオセンサの高感度化に関する検討," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (2017 年 9 月, 福岡)

6. 村上凌生, 片桐崇史, 松浦祐司, “内視鏡下での熱画像伝送を可能にするバンドル型チューブリーキーファイバ,” 平成29年度電気関係学会東北支部連合大会 (2017年8月, 青森)
7. T. Koyama, S. Kakino, Y. Matsuura, “Photoacoustic Imaging of Hidden Dental Caries by Using a Fiber-Based Probing System,” Biomedical Imaging and Optical Sensing Conference (BISC) 2017 (Apr. 2017, Yokohama).
8. Y. Okuyama, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Multi-capillary based optical sensors for highly sensitive protein detection,” Biomedical Imaging and Optical Sensing Conference (BISC) 2017 (Apr. 2017, Yokohama).
9. T. Kobayashi, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Fabrication of bundle-structured tube-leaky optical fibers for infrared thermal imaging,” RIEC International Workshop on Biomedical Optics 2017 (Mar. 2017, Sendai).
10. T. Kobayashi, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Fabrication of bundle-structured tube-leaky optical fibers for infrared thermal imaging,” SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XVII (Jan. 2017, San Francisco).
11. 奥山泰平, 片桐崇史, 松浦祐司, “マルチキャピラリを用いた高感度蛍光バイオセンサ,” レーザー学会学術講演会第37回年次大会 (2017年1月, 徳島) I107aVII03
12. 松浦祐司, 関淳, “光ファイバ型音響センサを用いた全光学式音響イメージングプローブ,” レーザー学会学術講演会第37回年次大会 (2017年1月, 徳島)
13. 飯田猛, 片桐崇史, 松浦祐司, “気道内局所的 CO₂ 濃度計測のための赤外光ファイバプローブの基礎検討,” Optics & Photonics Japan 2016 (2016年11月, 東京)
14. Y. Matsuura, “Biomedical applications of hollow Biomedical applications of hollow-optical fiber probe -Noninvasive measurement of blood glucose-,” 2016 Biomedical Engineering Ecosystem Symposium (Oct. 2016, Tainan).
15. 小林拓矢, 片桐崇史, 松浦祐司, “バンドル型チューブリーキーファイバによる赤外熱画像イメージング,” 第77回応用物理学会秋季学術講演会 (2016年9月, 新潟)
16. 松浦祐司, 飯田猛, 丸田勝弘, “気道内ガス局所分光計測のための光ファイバプローブの開発,” 第39回日本呼吸器内視鏡学会学術集会 (2016年6月, 名古屋)
17. T. Kobayashi, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Infrared thermal imaging by bundled tube-leaky hollow optical fibers,” Biomedical Imaging and Optical Sensing Conference (BISC) 2016 (May 2016, Yokohama).
18. K. Yaegashi, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Spectroscopic gas analysis using hollow-optical fiber gas cell and infrared quantum cascade laser,” Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS)2016 (May 2016, Yokohama).
19. T. Iida, T. Katagiri, Y. Matsuura, “Hollow optical-fiber probe for analysis of CO₂ gas localized in respiratory system,” Advanced Lasers and Photon Sources Conference (ALPS)2017 (May 2016, Yokohama).
- [図書] (計2件)
1. K. Sasaki, O. Suzuki, N. Takahashi Ed., *Interface Oral Health Science 2016 -Innovative Research on Biosis-Abiosis Intelligent Interface-*, Springer Japan, 2017, pp. 173-180.
2. 「生体情報センシングとヘルスケアへの最新応用」, 技術情報協会, 2017, pp. 180-185
- [産業財産権] なし
[その他] なし
6. 研究組織
(1)研究代表者
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
- (2)研究分担者
木野 彩子 (KINO, SAIKO)
東北大学・大学院医工学研究科・研究支援者
研究者番号: 10536082