

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420346

研究課題名(和文) フォトニックテクスタイルの受光効率改善に関する研究

研究課題名(英文) Study on fiber-optic receivers with side-surface interfaces

研究代表者

坪川 信 (Tsubokawa, Makoto)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70595975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：第一は、光スラブ導波路に散乱層を設けたモデル及び外部形状を変形させたモデルにおける側面入射光に対する受光効率の改善と構造最適化である。第二は、性能改善のための円筒光ファイバをベースとした集光器モデルの提案であり、構造条件の最適化から、数mで1%-10%程度の効率を得た。次に光ファイバの柔軟性を活かす用例として直径が数mの円形状の無指向性光受光器が可能なことを提示した。さらに、別な応用例として光源を内蔵する光プローブ構造を提案し、光ファイバ周囲に分布する物体検出の可能性を示した。最後に光プローブをナノサイズとした導波路構造とその伝搬評価を行い、高効率な伝達効率を得られる構造を提案した。

研究成果の概要(英文)：First, new waveguide structures with a scattering layer and distorted shape were proposed as a light concentrator. The transmission efficiency corresponding to the ratio of the received light to input light power through side-surface of the waveguide was improved, but large loss occurs due to excess scatterings along waveguide. To suppress the scattering, fiber-optic concentrator was proposed. The efficiency of more than 1%-10% was successfully obtained along a ~5 meter-long fiber. Also, omnidirectional photodetectors based on this idea were designed. In addition to above mentioned simple concentrators, optical probes were proposed as one of applications. The light probe of 5-10 cm length, in which both light source and photodetector embedded, enabled to detect the objects around the fiber through the side-face interface. Finally, nanosized applications of optical waveguides were also studied. Waveguide structures and materials were designed to optimize the transmission efficiency.

研究分野：工学

キーワード：国際情報交換 国際会議講演 学術誌掲載

## 1. 研究開始当初の背景

本研究期間は2014年4月より3ヵ年である。従来、光ファイバや光導波路の研究は、殆どが信号伝送路としての用途開拓である。光導波路の両端面が光信号の入出力インターフェースである。もし、光ファイバ側面を介した受光が可能になれば、光ファイバの特徴である軽量、柔軟、低損失などを活かした従来に無い用途、例えば集光器や光検出器などへの応用も期待できる。しかし、通常的光ファイバは、伝送路に適した構造ゆえに側面からの外部光は導波条件を満足することなく素通りしてしまうため、集光させるには構造変更が必須となる。比較的散乱の大きい通常のプラスチックファイバ(POF)でも側面から入射した光がコア端面にまで届く割合(集光効率)は、僅か $7 \times 10^{-6}$ %以下(波長 $0.633 \mu\text{m}$ )という報告例がある[文献1]。

光導波路への側面入射に対しては、プリズムや回折格子等の素子を用いた光結合法が一般的に用いられており、円筒形状の光ファイバに対しては曲げを利用して局所的に光を結合させる方法などが研究されている(文献[2])。いずれの手法も空間の局所(一点)における入射であり、側面全体とは異なるため、所謂、面的な光の集光には適さない。一方、面的な集光では太陽電池パネルの集光器が良く知られているが、数%以上の高い集光効率を狙いとするため、多くはバルクレンズやミラー等で構成された厚みのある大型装置となっており[文献2]、薄膜導波路では困難である。そのため、直接に外部光を集光するのではなく、蛍光を利用した導波路集光器が主流となっている。

別な用途として、近年注目されつつあるスマートクローズ/フォトリックテクスタイルという研究分野がある。光ファイバ等を織物素材として用い、発光/受光器を構成する。センサ利用のため、比較的弱い光(低い集光効率)でも許容され、医用工学の例として外

表面を加工したPOFで織物型の面状の受光器を構築し、体の一部を透過散乱した光を検出した報告がなされている[文献1,3]。

以上のように、光パワーの高効率な集光は困難であるが、薄膜や細径ならではの特殊な形状を生かしたセンサ、ディスプレイなどの応用が期待できる。これまで、導波路自体の構造や材料等に及ぶ解析は未だ端緒にあり、集光効率自身も改善余地が十分にあり、光ファイバなど日本が先端技術を担ってきた研究を別な方向にも拡張していく意味で重要な領域になりうると考えている。

## [文献]

- [1] M. Rothmaier, "Photonic textiles for pulse oximetry," OPTICS EXPRESS, vol.16, No. 17, pp.12973-12986, 2008.
- [2] 例えば V. C. Coffey, "Solar concentrators using optics to boost photovoltaic," OSA Optics and Photonics News, vol. 22, pp.23-27, 2011.
- [3] 納戸一貴、他、"光ファイバ側方入射法," IEICE Technical Report, OFT2011-3, pp. 11-14, 2011.
- [4] 例えば、Smart Clothing Technology and Applications, edited by G. Cho, Chap. 5, CRC Press.

## 2. 研究の目的

光ファイバ等の光導波路は主に端面から光信号を入射させて伝搬させる目的で設計されているため、通常、側面からの入射光は透過してしまい伝搬光となり得ない。しかしながら、側面からの受光が改善できるとその柔軟性や細径さを活かした線や面状のパッシブな受光器が容易に作成でき、新たなセンシングやプローブ用途などへの応用性が期待できる。本研究では、光導波路において側面方向からの入射光を効率良く導波光として取り込むことの出来る新たな導波路形状、屈折率分布、材料等を新規に考案し、従来の受光性能を上回る構造を提案することを目標とする。既に外形状の変形による受光効率改善の効果を確認しており、他の要素を加え、一層の改善を目指す。基礎的検討をまとめた段階で応用事例の検討を重視し、応用事

例として特に光プローブへの適用性を検討し、さらには近年注目を集めつつある微細なマイクロ/ナノサイズ領域への用途を見出すことを目標とした。

### 3. 研究の方法

以下の課題設定を行い検討を進めた。解析は計算機上で導波路構造のモデルを構築し、主に光線追跡法、光ビーム伝搬法、有限差分時間領域法の各シミュレーションソフトウェアを用いることで実施した。

1. 比較対象として、最初にスラブ型光導波路をベースとした集光器モデルを検討し、形容や構造等による集光効率の評価を実施。
2. 改良案として光ファイバ型の集後期モデルを提案し、スラブ型と比較。さらに、外部変形を加えた場合の集光効率も評価。
3. 次段階として、応用例を検討。具体的には数 cm 規模の光プローブと数 m 規模の光受光器を検討。
4. 関連応用として、マイクロサイズの光プローブに関しても検討実施。(当初計画の範疇を超えるものであったが、ナノ構造デバイスの重要性から追加で検討実施。

### 4. 研究成果

初年度の H25 年度は、代表的なスラブ型導波路及び本研究の主眼となる光ファイバにおける集光特性を改善するための新たな構造の提案を行い、光線追跡シミュレーションを用いて集光特性等の特性評価を実施した。具体的には、集光機能を改善するために微小な Mie 散乱球を含む散乱層を導波路内に配置したモデルを考案し、側面からの入射光を散乱効果で伝搬方向に一部取り込む手法を検討し、その散乱部の構造や密度、配置条件に対する集光特性を分析し

た。特に円筒形状の光ファイバはレンズ効果により、スラブに比較して高い集光性能を示すことなど成果を学術論文にまとめ発表した。

次に提案構造では、光ファイバ径の減少と長さの増加に対して集光性能が顕著な減少傾向を示したため、応用例として細径で短尺な注射針のような光ファイバプローブへの応用検討を進めた。これは 26 年度以降の実施計画であったが、類似構造での可能性が推定できたため、新しいセンサ用途として先行的に検討し、得られた成果を国際会議において発表した。側面を入射光のインターフェースとして用いる構造により、光ファイバに沿った物体の分布が測定可能となることを明らかにした。当初計画ではシミュレーション結果の一部実験検証を予定していたが、実験装置の一部購入と予備試験に留まり、次年度以降の継続課題とした。これは実験よりも、先行的に有望と思われる応用例の理論検討とシミュレーションによる検証を進めておくことを重視した理由による。

H26 年度は主に 2 つの実績があり、1 つは昨年度からの課題解決であり、光ファイバ長手方向の集光特性の平坦化の実現である。従来、1mm 径程度の細径光ファイバで構成された集光器においては集光率が長さの拡大に応じて劣化し、1m 長程度以上では十分な感度が得られない課題があったが、散乱層構造を長手方向に指数分布化すること等により、5m 長程度の長さに亘り、1 桁程度内の受光効率の平坦化が実現できた。例えば、この光ファイバを用いて円形の光受信機を構築すると、軸周りに回転させることで周囲方向全 360 度からの入射光に対する大面積光受信機が形成できることを示した。

もう 1 つの実績は、ナノサイズの光プローブ構造の提案である。従来、比較的大型

の1 mm 径程度の光ファイバを用いた集光器や光プローブを提案してきたが、逆にナノサイズの微細な光ファイバを用いた新たな光プローブ構造についても検討を進めた。この場合は、側面入射ではなく端面入射相当であるが、特殊な高屈折率差導波路構造を微細な光プローブに適用することで走査型近接場顕微鏡等に用いられる金属針形のナノサイズ光プローブと同等の性能が得られることを示した。スロット導波路と呼ばれる光導波路では Si のような高屈折率部に挟まれたナノメートルサイズの SiO<sub>2</sub> のような低屈折率コア部を有しており、中央のコア部に光パワーが効果的に閉じ込められる。この原理を光プローブに適用することで例えば波長(1550nm)の入射光に対して回折限界を超える50~100 nm という微細な光スポットが容易に形成され、さらに受光器機能も光プローブ内に組み込むことでプローブ先端周辺の近接場領域におかれた微小な金属物体が50 nm 程度の空間分解能で観測できることをシミュレーション解析により実証した。以上の成果は学術論文2誌、国際/国内会議3件、単行本1件で外部発表済。[4,5,8-11]

最終年度のH27年度は、以下2つの計画を遂行し、内1つに関しては外部発表までの十分案成果を生み出すことが出来た。1つ目の計画は、従来線上の光ファイバ集光器の受講特性改善に向けた研究であり、今期は新たな改善策として、光ファイバ内に分布させる散乱体形状を従来の球状ではなく直方体や扁平円盤形状とすることによる散乱効率改善に取り組んだ。散乱時に明瞭な角度依存性を与えることで入射光の取り込み効率を向上させつつ、導波路伝搬を抑制させる狙いで、基本モデルの作成と散乱効率シミュレーションを行ったが、データの信頼性が不十分で外部発表にまで至らなかった。

昨年度着手したもう一方のマイクロな導波路構造の研究を継続し、高い光閉じ込め率が得られる高屈折率コントラスト構造を有する誘電体光スロット導波路とプラズモニックメタルギャップ導波路の結合問題をシミュレーション評価した。両導波路は有効な光閉じ込め領域サイズが同等であり、高い結合性が期待できるが、これまで評価されてきていなかった。従来の単純なスラブ導波路構造とメタルギャップ導波路との接合に比べ、僅かであるが結合効率の改善が確認でき、誘電体スロット導波路の微細導波路への適用性が示された。

年度後半期には、メタルギャップ導波路自体の応用性を調べるために基本的なT型形状の2入力1出力の光結合器の評価を実施し、入力光の相対位相により出力光パワーへの結合効率がほぼ0%~100%にわたり制御できることを見出した。この特性を生かすことで一例として光コヒーレント受信器などにおいて用いられる光90度ハイブリッド結合器が簡易に実現できることをシミュレーションにより実証した。以上の成果は、本年度、学術論文3誌、国内会議2件で報告済である[1-3,6,7]。

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)

- [論文](計6件)
1. [査読有] D. Kong, M. Tsubokawa, and L. Chen, "A controllable nanosize combiner in T-shaped metal-insulator-metal waveguides," IEICE Electronics Express, vol. 13, No. 6, pp. 1-5, 2016.
  2. [査読有] D. Kong and M. Tsubokawa, "Evaluation of slot-to-slot coupling between dielectric slot waveguides and metal-insulator-metal slot waveguides," Optics Express, vol. 23, No. 15, pp. 19082-19091, Jul. 2015.
  3. [査読有] M. Tsubokawa and D. Kong, "Near-field light probe with an optical slot-waveguide structure," Optics

Express, vol. 23, No. 3, pp. 1981–1991,  
Jan 2015.

4. [査読有] M. Tsubokawa, “Flexible Fiber-Optic Receiver with Side-Surface Interface,” IEICE Trans. Electron., vol. E97-C, No. 12, pp. 1154–1157, Dec. 2014
5. [査読有] M. Tsubokawa and S. Tateyama, “A novel fiber-optic light concentrator with scattering parts,” IEICE Trans. Electron., vol. E97-C, No.2, pp. 93–100, Feb. 2014.

〔学会発表〕(計5件)

6. [査読無] D. Kong, 坪川信, “誘電体スロット導波路とメタルスロット導波路の接続特性の検討,” 電子通信学会技術報告 OFT, 松山, 11月, 2015.
7. [査読無] 坪川信, D. Kong, “誘電体スロット光導波路を用いたナノ光プローブの検討,” 電子通信学会技術報告 OFT, 金沢, 5月, 2015.
8. [査読有] M. Tsubokawa, “Fibre-optic probe design with side-surface interface,” Proc. the 2<sup>nd</sup> International conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), Lisbon, pp. 158–162, Lisbon, Jan., 2014.
9. [査読無] 坪川信, “側面インターフェースを有する光ファイバプローブの検討,” 電子通信学会技術報告 OFT, 神戸, 10月, 2014.
10. [査読無] 坪川信, “光ファイバにおける側面送受光特性改善の検討,” 電子通信学会技術報告 OFT, 長岡, 11月, 2013.

〔図書〕(計1件)

11. PHOTOPTICS2014 Revised Selected Papers, *Springer Proceedings in Physics*, Eds. P.A. Ribeiro and M. Raposo, ISBN 978-3-319-27319-8, pp. 121–131, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪川 信 (TSUBOKAWA Makoto)  
早稲田大学・大学院情報生産システム研究  
科・教授  
研究者番号：0751612

(2) 研究分担者 無し

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 無し

( )

研究者番号：