

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656041

研究課題名(和文) 共鳴モード閉じ込め型光ファイバの導波機構の研究

研究課題名(英文) Research on propagation mechanism of resonantly-guided optical fibers

研究代表者

大寺 康夫 (Ohtera, Yasuo)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20292295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本科研費課題では、微細構造光ファイバの一種であり、石英クラッド中にSiやカルコゲナイドガラス等の高屈折率ロッドを周期的に埋め込むことで構成される「共鳴導波型光ファイバ」について研究を行った。有限差分時間領域法(FDTD法)に基づく電磁界シミュレーションを駆使し、閉じ込めモードの分散関係とモード指標、モードの電磁界分布、損失特性等を明らかにした。また光の閉じ込めにかかわる導波モード共鳴現象の詳細も明らかにした。加えて、解析に必要なFDTD法の新しいアルゴリズムの提案も行った。

研究成果の概要(英文)：In this grant we investigated "Resonantly-Guided optical Fibers". The fiber is a class of microstructured fibers consisting of sub-wavelength periodic array of high refractive index rods such as Si and chalcogenide glass embedded in silica cladding. By utilizing FDTD electromagnetic field simulations, we clarified various modal characteristics of the resonant fibers such as dispersion relation, mode notation, modal field profiles, and leakage losses. We also developed a novel FDTD algorithm to efficiently handle circular periodic structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：光ファイバ 周期構造 導波モード共鳴 FDTD法

1. 研究開始当初の背景

サブ波長の格子ピッチを持つ薄膜回折格子における導波モード共鳴現象 (Guided-Mode Resonance) は、1990 年前後から Wang, Magnusson, Mohorom らのグループによって精力的に研究されてきた。しかし従来の研究は解析手法上の制約から、平坦な格子に関するものが殆どで、応用も平面波を用いるものに限られていた。これに対し代表者らは最近、曲率付きの格子薄膜も曲面波に対し共鳴反射を示すこと、それをを用いて極めて Q 値の高い単一モード円形共振器を構成可能であることを見出した (Y. Ohtera et al., Opt. Lett. 36(9), 1689(2011); S. Iijima et al., MOC '11, H-50, Nov.1, Sendai)。この概念を発展させると、光を径方向に共鳴反射で閉じ込めつつ軸方向に伝搬させる、「共鳴導波型」とも呼ぶべき新規光ファイバーの可能性が見えてくる。

一方、伝統的な全誘電体型・軸対称円形光ファイバーに加え、近年ではコア・クラッド構造に波長以下の寸法の微細構造を付与した光ファイバーが表れてきた。例えば Bragg Reflection Fiber (Omniguide Fiber), Photonic crystal fiber, Si fiber などである。このうち 2 番目の Photonic Crystal Fiber については、従来は石英ガラス / 空気系で構成されるものが大半であったが、最近になって石英クラッド中に Si やカルコゲナイドガラスなどの機能性高屈折率材料を微細構造として埋め込む技術が開発されつつある。本科研費課題で研究に取り組む共鳴導波型光ファイバーは、このような全誘電体型微細構造付き光ファイバーに新たな導波原理を持ち込もうとするものである。

2. 研究の目的

薄膜状のサブ波長回折格子は、特定の条件下で共鳴により反射率 100% の高反射ミラーとして動作することが知られている。これに対し代表者らは最近、曲率を設けた回折格子が同心円状の波面を持つ波に対し、同様の共鳴反射を引き起こすこと、その曲がり格子で囲まれた円形空間が極めて高い Q 値を持つ単一モード光共振器として機能することを見出した。本研究ではこの円形共振器を軸方向に拡張させた「共鳴導波型光ファイバー」を提案する (図 1)。研究ではその導波諸特性 (分散関係、モード分布、モードの種類、伝搬損失など) を明らかにし、光ファイバーセンサー及び光ファイバー型光源など、将来の応用のための理論的基盤を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(平成 24 年度)

- (1) 円柱座標系での光伝搬解析に向けたプログラムの改造を行う。代表者がこれまで開発してきた有限差分時間領域法 (FDTD 法) のプログラムを基盤とする。

- (2) 環状配置サブ波長格子の共鳴スペクトルの解析。高屈折率ロッド列の共鳴特性を把握するために、曲げの曲率半径とピーク反射率、共鳴線幅と Q 値、電磁界分布を前述のプログラムで数値解析する。

- (3) 光ファイバー構造における伝搬特性の解明。モード形状と分散関係、開口数、偏波特性、モード指標などを明らかにする。(平成 25 年度)

- (1) 伝搬特性の解析 (続き) と、センシング応用のための構造設計。前年度に続いて、導波特性 (分散特性、伝搬損失) を解析する。伝搬損失は周期格子の曲率半径 (クラッドの内径) と、コアの屈折率に左右されると予想される。また曲げ損失は共鳴線の線幅によって決まることが予想される。以上で得られた損失特性の知見を、ガスセンサ (中空コアを気体の流路とする) 等の構造設計に利用する。

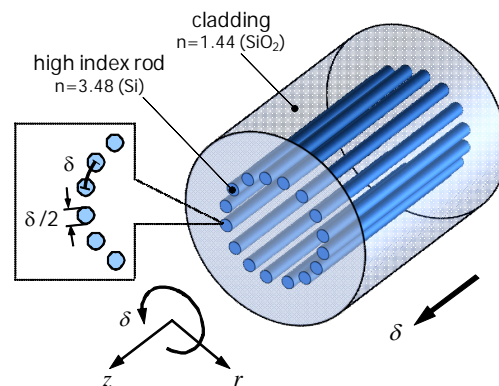


図 1. 共鳴導波型光ファイバーの概念図 (Si/SiO₂ 材料系の例)

4. 研究成果

- (1) 低屈折率差・アシストホール付きファイバ構造における、分散関係と伝搬損失、モード形状を解明した (雑誌論文、学会発表 など)。カルコゲナイドガラスロッド / 石英クラッドという中程度の屈折率差を想定し、さらに光の閉じ込めを改善するためにアシストホール列を付与した構造を設計し、FDTD 法で低損失モードの分散関係及び損失特性を明らかにした。

- (2) Si/SiO₂ 系ファイバー構造の伝搬特性を解明し、さらに導波モードの発生に複数種類の共鳴現象が関与していることを明らかにした (図 2 はモード形状の例)。また従来の軸対称光ファイバーでの分類法にならって、本ファイバーのモードがどのような指標で分類されるかを整理した (論文、学会発表)。

- (3) 円形共振器の共振機構の解明と共振特性を解析した。本ファイバーの元となる、光集積回路型の円形光共振器構造について、その共鳴で閉じ込められる型の共振モードの特性や、周囲のバス導波路からの

励振時の特性等を明らかにした(学会発表)

- (4) 円形共鳴構造解析のために、新たな FDTD 法の解析手法を開発した。円柱座標系コンパクト 2 次元 FDTD 法プログラム向けの、仮想的吸収壁である Convolution PML (CPML) の実装を行い、その性能を明らかにした(雑誌論文、学会発表)。また円柱座標系特有の、座標軸原点付近での小さな数値サンプリングに伴う計算量の増大を避けるために、共振器中心付近を回転対称体 (BOR) アルゴリズムで取り扱う新たな FDTD アルゴリズムを提案・実証した(学会発表)。このアルゴリズムを実装した FDTD 法のプログラムは、実際に円形共振器や共鳴導波光ファイバーの解析に活用した。

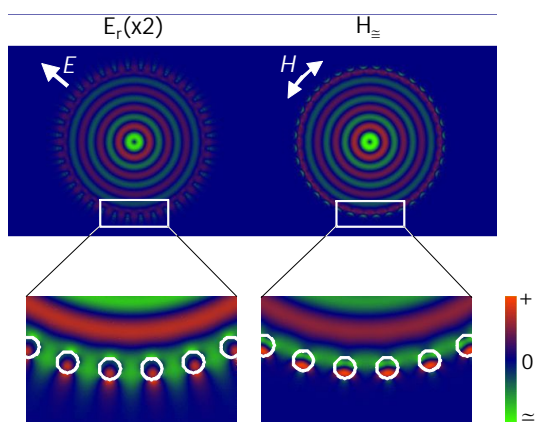


図 2. Si/SiO₂系共鳴導波型ファイバの最低損失モードの電磁界分布の例.

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 3 件)

Yasuo Ohtera, Haruka Hirose and Hirohito Yamada, "Performance analysis of CPML for the compact 2-D FDTD method in cylindrical coordinate system," IEICE Transaction on Electronics, 査読有, vol. E97-C, no. 07, 2014., 掲載決定.

<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=C&lang=E&curr=1>

Yasuo Ohtera, Haruka Hirose and Hirohito Yamada, "Resonantly guided modes in microstructured optical fibers with circular array of high-index rods," Optics Letters, 査読有, vol. 38, no. 15, pp. 2695-2697, 2013

DOI: 10.1364/OL.38.002695

Yasuo Ohtera, Haruka Hirose and Hirohito Yamada, "Resonantly confined modes in optical fibers with

circularly aligned high-index rods," Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Full paper, 査読有, pp. 228-231, 2013.

<http://piers.org/piersproceedings/piers2013TaipeiProc.php?start=50>

[学会発表](計 11 件)

大寺康夫, 広瀬遥, 山田博仁, "円形共振器解析のための BOR・2 次元ハイブリッド型 FDTD 法," 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会 (EST), EST2013-64 (EMCJ2013-72, MW2013-112, EST2013-64), 2013 年 10 月 24 日, 東北大学.

広瀬遥, 大寺康夫, 山田博仁, "共鳴導波型光ファイバーの導波原理の解析," 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-39, 2013 年 9 月 18 日(福岡工業大学) H. Hirose, Y. Ohtera and H. Yamada, "Modal Analysis of Resonantly-Guided Optical Fibers," 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, IEEE Student Session 1B05, 2013 年 8 月 22 日, 会津大学.

Y. Ohtera, H. Hirose and H. Yamada, "Resonantly confined modes in Si/SiO₂ micro-structured optical fibers," 34th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 3A8b-1, August 14, 2013, Stockholm, Sweden.

大寺康夫, 広瀬遥, 山田博仁, "円柱座標系用 CPML の性能評価," 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会 (EST), MW2013-48 (OPE2013-17, EST2013-12, MWP2-13-7), 2013 年 7 月 18 日, 稚内総合文化センター.

広瀬遥, 大寺康夫, 山田博仁, "共鳴導波型光ファイバーの解析," 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会 (OPE), MW2013-62 (OPE2013-31, EST2-13-26, MWP2-13-21), 2013 年 7 月 18 日, 稚内総合文化センター.

S. Iijima, Y. Ohtera and H. Yamada, "High-Q Microdisk Resonator Having Sub-Wavelength Grating on Its Sidewall," Conference on Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim (CLEO/PR) 2013, WI1-5, July 3, 2013, Kyoto, Japan.

Y. Ohtera, H. Hirose and H. Yamada, "Resonantly confined modes in optical fibers with circularly aligned high-index rods," 33rd Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2A1-2, March 26, 2013, Taipei, Taiwan.

広瀬遥, 大寺康夫, 山田博仁, "散乱行列を用いたサブ波長共鳴格子の解析," 2013 年電子情報通信学会総合大会, C-3-74,

2013年3月20日, 岐阜大学.

飯嶋祥平, 大寺康夫, 山田博仁, “バス導波路を有する共鳴モード格子円形光共振器の解析,” 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-92, 2012年9月14日, 富山大学.

S. Iijima, Y. Ohtera and H. Yamada, “Analysis of guided-mode resonant circular optical resonator with an access waveguide,” 平成24年度電気関係学会東北支部連合大会 2A02, 2012年8月31日, 秋田県立大学.

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大寺 康夫 (OHTRA, YASUO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20292295

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: