

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760238

研究課題名（和文） ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの高度利用技術の開発に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Novel Applications of Solid-Core Photonic Bandgap Fibers

研究代表者

齊藤 晋聖（SAITOH KUNIMASA）

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20333627

研究成果の概要（和文）：光ファイバのクラッド領域に微細構造を有する微細構造光ファイバにはいくつかの種類が存在するが、本研究では、ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの有する特異な光学特性に着目し、その複雑な構造パラメータと光学特性との関係を詳細に調査し、高度利用のための基盤技術を確立した。特に、コア径拡大と単一モード動作、および低曲げ損失特性の両立という観点から、複数のバンドギャップにおける光学特性を総合的に評価し、大コア径ファイバとしての最適な透過帯域（フォトニックバンドギャップの次数）を明らかにするとともに、ファイバ製造上の構造制御技術、およびファイバ使用時のコイル径等を考慮に入れたコア径拡大の理論的限界を特定した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the propagation characteristics of solid-core photonic bandgap fibers (SC-PBGFs) aiming to achieve large mode area (LMA) and effectively single-mode operation with a practically allowable bending radius for high-power Yb-doped fiber lasers and amplifiers. Through detailed numerical simulations based on the finite element method (FEM), we evaluated the impacts of the order of photonic bandgap on the bending performance and pointed out the limits of core-size enlargement in the SC-PBGFs with a one-cell core structure due to the increment of bending loss. In addition, under practical constraints, we found that the SC-PBGFs having a seven-cell core can achieve sufficient differential bending loss between the fundamental mode and the higher-order modes and a much larger effective area limit as compared with previously-reported index-guiding LMA fibers.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光ファイバ、フォトニック結晶、フォトニック結晶ファイバ、フォトニックバンドギャップファイバ、有限要素法

1. 研究開始当初の背景

| フォトニック結晶ファイバとは、クラッド

領域に波長スケールの人工的な微細構造（一般的には周期構造）を有する光ファイバの総括であり、その研究開発が急速な勢いで進展している。フォトニック結晶ファイバは、その動作原理の違いから、全反射現象による閉じ込め効果を利用した「屈折率導波型フォトニック結晶ファイバ」と、フォトニックバンドギャップによる閉じ込め効果を利用した「フォトニックバンドギャップファイバ」とに大別される。特に、ソリッドコア型のフォトニックバンドギャップファイバは、その断面に空孔が存在しないという利点があり、ファイバレーザや増幅器への応用が期待されているが、比較的新しく提案されたということもあり、その基本特性に関して未解明な部分が残されており、その可能性を十分に引き出すことができていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバと呼ばれる微細構造光ファイバの有する特異な光学特性に着目し、その極限性能を明らかにするとともに、高度利用のための基盤技術を確立することにより、従来型光ファイバでは実現不可能なパッシブ光ファイバデバイス、さらには、従来の実現限界を超えたアクティブ光ファイバデバイスを開発することを目的としている。

3. 研究の方法

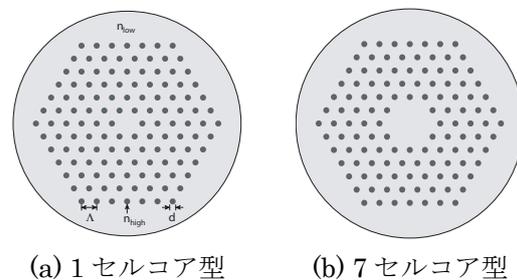
(1) ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバを用いて光デバイスを構築する場合、フォトニックバンドギャップファイバそのものの伝送特性の向上を図る必要がある。特に、高屈折率散乱体の大きさ、屈折率、間隔やその数等が、光学特性へ与える影響を調べるためには、厳密な数値解析、ならびにバンド構造の理論的理解が必要である。本研究では、複雑な構造パラメータと光学特性との関係を明らかにし、設計に役立て得るデータとして統一的に取りまとめる。

(2) 光ファイバを用いて高品質な高パワーレーザや増幅器を構築するには、コア径を拡大しつつ、いかに単一モード特性と低曲げ損失特性を実現するかが大きな課題となる。本研究では、大コア径ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの単一モード化のための具体的な方策を提案する。イッテルビウム元素の増幅帯域である 1064 nm 帯における高パワー、高ビーム品質、低曲げ損失伝送路としての応用を目指し、大コア径単一モードソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの最適構造を明らかにする。

4. 研究成果

図 1(a)は、典型的なソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの断面構造を示している。黒い部分が高屈折率散乱体（高屈折率ガラスロッド）、背景媒質は低屈折率ガラス（シリカガラス）であり、コア領域は、通常、三角格子状に配置された高屈折率ガラスロッドを 1 個取り除いて構成される。ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの構造を決定するパラメータは、高屈折率ガラスロッドの直径 d とその間隔 Λ 、および、高屈折率ガラスロッドの屈折率 n_{high} と背景媒質の屈折率 n_{low} との比屈折率差 Δ である。

ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバは、導波原理が通常の光ファイバと異なり、全反射ではなくフレネル反射を利用しているため、コア径を拡大したとしても基本モードと高次モードの曲げ損失の差を大きく保つことができる可能性があるため、大コア径ファイバとしての応用が期待される。しかしながら、コアの欠陥領域を周期構造の単位セル 1 個分とした図 1(a) に示すような通常の 1 セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバでは、基本モードの実効屈折率とフォトニックバンドギャップエッジの実効屈折率との差が小さいため、低曲げ損失特性を維持することが困難である。図 2 は、1 セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおける曲げ損失の高屈折率ガラスロッド間隔依存性を示している。ここで、動作波長は $\lambda=1064$ nm であり、曲げ半径は $R=7.5$ cm に設定している。また、ロッド直径 d は、動作波長を第 1 フォトニックバンドギャップの中心波長に設定するため、ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの規格化周波数 $V = \pi d \sqrt{n_{\text{high}}^2 - n_{\text{low}}^2} / \lambda$ が 1.6 になるように決定している。比屈折率差 Δ をいずれの値に設定したとしても、ロッド間隔が 9 μm 程度よりも大きくなると曲げ損失が急増しており、低曲げ損失特性を維持するためには、1 μm 帯における実効断面積の限界は 200 μm^2 以下となってしまうことがわかる。



(a) 1セルコア型 (b) 7セルコア型
図 1 ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの断面構造

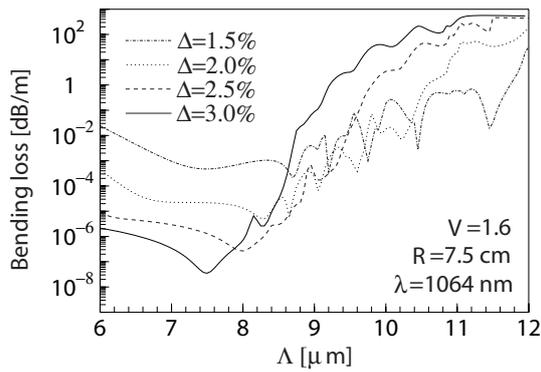


図 2 1セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの曲げ損失特性

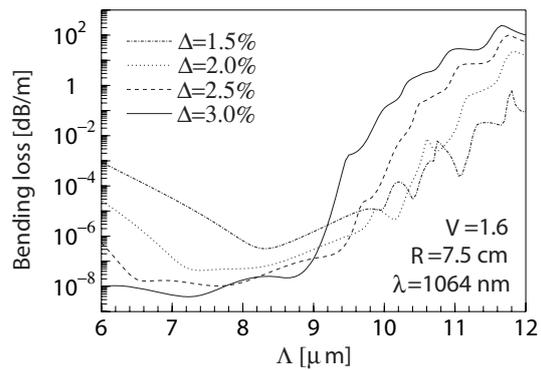


図 3 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの曲げ損失特性

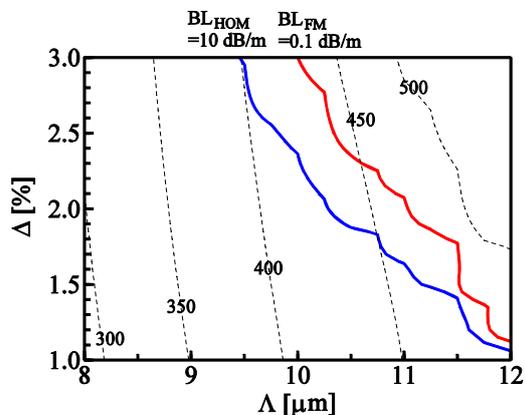


図 4 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおける実効断面積と曲げ損失の関係 (曲げ半径 $R=7.5$ cm)

ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおいて、低曲げ損失特性を維持したままコア径を拡大する方法として、本研究では、図 1(b)に示すような 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバを提案した。図 3 は、7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおける曲げ損失の高屈折率ガラスロッド間隔依存性を示している。ここで、動作波長は $\lambda=1064$ nm、曲げ半径は $R=7.5$ cm で

あり、規格化周波数は 1.6 に設定している。ロッド間隔が $11 \mu\text{m}$ 程度よりも大きくなると曲げ損失が急増しているが、1セルコア型と比べてコア領域が約 2 倍になっているため、非常に大きな実効断面積が実現可能であることがわかる。

図 4 は、クラッド領域に直径 d の高屈折率ロッドを三角格子状に 5 層配置した 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおいて、ロッド間隔 Λ 、および比屈折率差 Δ が変化した場合の実効断面積 A_{eff} の変化の様子を示している。ここで、動作波長は $\lambda=1064$ nm であり、曲げ半径は $R=7.5$ cm に設定している。なお、図中の破線で示した実効断面積の値は、ファイバを半径 7.5 cm で曲げた状態での値である。また、図中の赤い実線、青い実線は、それぞれ基本モードの曲げ損失が 0.1 dB/m となる構造、および第一高次モードの曲げ損失が 10 dB/m となる構造を表しており、規格化周波数は 1.6 に設定している。第 1 フォトニックバンドギャップファイバの中心周波数 $V=1.6$ で動作するソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおいては、格子定数が $10 \mu\text{m}$ 程度以上になると、 Δ が大きくなるにつれて曲げ損失が大きくなっていくため、赤線と青線で挟まれた範囲が単一モード特性と低曲げ損失特性を両立できる構造ということになる。これらの結果より、7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおいては、格子定数の拡大限界が $\Lambda=12 \mu\text{m}$ 程度であることがわかる。つまり、コア直径を $3\Lambda=36 \mu\text{m}$ 程度に設定でき、曲げ半径を 7.5 cm と仮定した場合、低曲げ損失特性と実効的単一モード特性を両立できるソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおけるファイバを曲げた状態での実効断面積の限界は $500 \mu\text{m}^2$ 程度であることがわかる。

これらの設計結果を基に、試作した 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの断面写真を図 5 に示す。直径 $d=1.8 \mu\text{m}$ 、比屈折率差 $\Delta=2.0\%$ の高屈折率ガラスロッドが、間隔 $\Lambda=11.2 \mu\text{m}$ でクラッド領域に 5 層配置された構造となっている。図 6 は、この 7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバにおける曲げ損失の曲げ半径依存性の測定結果を示している。曲げ半径 7 cm における曲げ損失は 0.09 dB/m であり、低曲げ損失特性が実現できていることがわかる。図 7 は、曲げ半径が 10 cm、および 11 cm における透過特性の波長依存性、ならびに近視野像を示している。曲げ半径が 11 cm の場合は、高次モードと基本モードとの干渉による透過スペクトルのビートが観察されるが、曲げ半径を 10 cm まで小さくすれば、実効的な単一モード伝送が実現できていることがわかる。

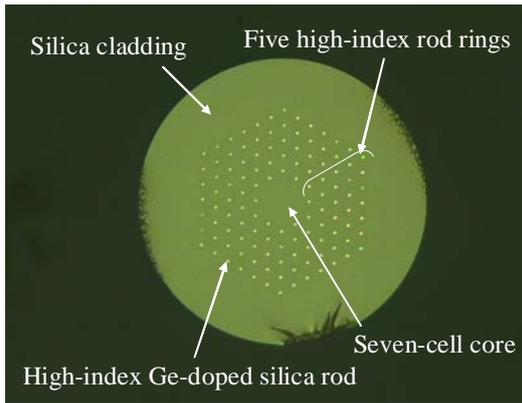


図5 試作した7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの断面写真

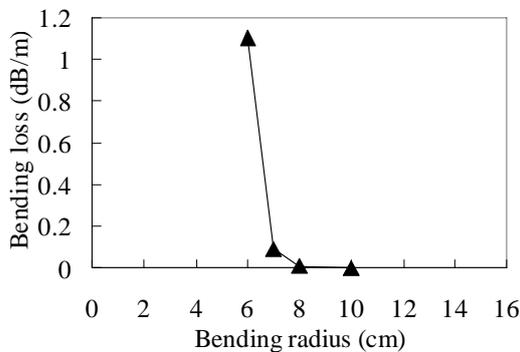


図6 試作した7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの曲げ損失の測定結果

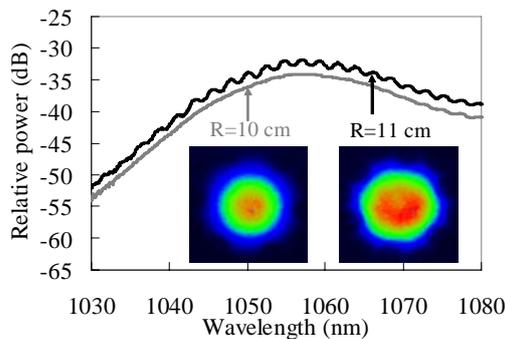


図7 試作した7セルコア型ソリッドコアフォトニックバンドギャップファイバの透過スペクトル特性

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5件)

- ① K. Saitoh, S. Varshney, K. Sasaki, L. Rosa, M. Pal, M.C. Paul, D. Ghosh, S.K.

Bhadra, and M. Koshiba, Limitation on effective area of bent large-mode-area leakage channel fibers, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, pp. 2609-2615, 2011 【査読有】.

- ② T. Murao, K. Nagao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Design principle for realizing low bending losses in all-solid photonic bandgap fibers, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, pp. 2428-2435, 2011 【査読有】.
- ③ T. Murao, K. Nagao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Understanding formation of photonic bandgap edge for maximum propagation angle in all-solid photonic bandgap fibers, Vol. 28, pp. 453-461, 2011 【査読有】.
- ④ T. Murao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Multiple resonant coupling mechanism for suppression of higher-order modes in all-solid photonic bandgap fibers with heterostructured cladding, Optics Express, Vol. 19, pp. 1713-1727, 2011 【査読有】.
- ⑤ K. Saitoh, T. Murao, L. Rosa, and M. Koshiba, Effective area limit of large-mode-area solid-core photonic bandgap fibers for fiber laser applications, Optical Fiber Technology, Vol. 16, pp. 409-418, 2010 【査読有】.

〔学会発表〕(計14件)

- ① 村井亮太, 齊藤晋聖, 小柴正則, テーパー屈折率分布結合型マルチコアファイバの大コア径ファイバへの応用, 電子情報通信学会総合大会, 岡山大学(岡山県), 2012年3月20日.
- ② 千葉将貴, 長尾 超, 齊藤晋聖, 小柴正則, Yb添加AS-PBGFにおける第1PBGによるフィルタ特製の優位性, 電子情報通信学会総合大会, 岡山大学(岡山県), 2012年3月20日.
- ③ M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, and M. Fujimaki, Highly bendable and effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area, Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2012), Los Angeles Convention Center (USA), 8 Mar., 2012.
- ④ 千葉将貴, 長尾 超, 齊藤晋聖, 小柴正則, オールソリッドフォトニックバンドギャップファイバにおけるフィルタ特性向上のための設計指針, 電気・情報関係

- 学会北海道支部連合大会, はこだて未来大学 (函館市), 2011 年 10 月 22 日.
- ⑤ 佐々木香織, 齊藤晋聖, 小柴正則, 曲げ条件下における Leakage Channel Fiber の実効断面積拡大限界の評価, 電気・情報関係学会北海道支部連合大会, はこだて未来大学 (函館市), 2011 年 10 月 22 日.
 - ⑥ 村井亮太, 齊藤晋聖, 小柴正則, 結合型マルチコアファイバの大コア径ファイバへの応用, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 北海道大学 (札幌市), 2011 年 9 月 15 日.
 - ⑦ 柏木正浩, 齊藤晋聖, 竹永勝宏, 谷川庄二, 松尾昌一郎, 藤巻宗久, 低曲げ損失ラージモードアリアシングルモードソリッドバンドギャップファイバ, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 北海道大学 (札幌市), 2011 年 9 月 14 日.
 - ⑧ M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, and M. Fujimaki, Practically deployable and effectively single mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area, Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2011), Baltimore Convention Center (USA), 2 May, 2011.
 - ⑨ K. Saitoh, Design of large-mode-area microstructured fibers with low bending loss for fiber laser applications, IEEE Photonics Society Winter Topicals 2011, Keystone, USA, 11 Jan., 2011.
 - ⑩ 齊藤晋聖, ファイバーのラージモードエリア化の限界と挑戦: 理論的考察, レーザー学会第 31 回年次大会, 東京, 2011 年 1 月 9 日.
 - ⑪ K. Saitoh, S.K. Varshney, K. Sasaki, L. Rosa, M. Pal, M. Paul, and S. Bhadra, Limitation of effective area for large-mode area leakage channel fibers under bent condition, 35th Australian Conference on Optical Fiber Technology (ACOFT 2010), Melbourne, Australia, 8 Dec., 2010.
 - ⑫ K. Saitoh, Limitation of effective area for large-mode-area all-solid photonic bandgap fibers, The 2nd Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications (WSOF 2010), Oaxaca, Mexico, 15 Sept., 2010.
 - ⑬ L. Rosa and K. Saitoh, Optimization of large-mode-area tapered-index multi-core fibers with high differential

mode bending loss for Ytterbium-doped fiber applications, European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010), Torino, Italy, 22 Sept., 2010.

- ⑭ T. Murao, K. Saitoh, K. Nagao, and M. Koshihara, Design principle for low bending losses in all-solid photonic bandgap fibers, Conference on Lasers and Electro-Optics Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2010), San Jose, California, USA, 18 May, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 晋聖 (SAITOH KUNIMASA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授

研究者番号 : 20333627