

学位論文題名

Structural Optimization of Photonic Bandgap Fibers for Realizing Low Transmission Loss, Low Bending Loss, and Single-Mode Operation

(フォトニックバンドギャップファイバの低伝送損失, 低曲げ損失,
および単一モード化のための最適構造設計)

学位論文内容の要旨

近年, インターネットにおけるトラフィックの増大に伴い, 伝送用光ファイバのさらなる高性能化に対する要求が高まってきている. 従来型の光ファイバの場合, 全反射現象を利用してクラッド部よりも高い屈折率を持つコア部に光を閉込めるため, ガラス材料中におけるレイリー散乱や吸収による損失が不可避となる. 一方, 光ファイバのクラッドとしてフォトニック結晶と呼ばれる屈折率の異なる材料を周期的に配置した構造を導入し, フォトニックバンドギャップ (PBG) と呼ばれる光の存在できない条件を利用することで, その欠陥部分であるコアに光を閉込めて光の伝送を実現する, フォトニックバンドギャップファイバ (PBGF) に対する関心が世界的に高まっている. PBGF は, 従来型の光ファイバとは異なり, コアを空気とすることもできることから, 高パワー伝送や極低損失伝送, さらには新波長帯域の開拓などの実現が期待されている. また, コアをシリカとし, クラッド領域を Ge 添加などにより実現される高屈折率散乱体を周期的に配置することにより形成するソリッドコア型は, 伝送帯域が周波数に対して不連続に現れることから, ファイバ増幅器ならびにファイバレーザーにおける増強自然放出光の抑圧のためのファイバ型光フィルタデバイスとしての応用が期待されている.

空気コア PBGF では, 通常, シリカ中に空孔を三角格子状に周期的に配置することによってクラッド領域が形成され, 空孔を 7 個もしくは 19 個取り除く (7 セルコア型もしくは 19 セルコア型) ことによって 6 回対称性を有する空気コア領域が形成される. こうした PBGF では, コア径が大きいので, 多モード伝送路になりやすく, また, 単一モード動作を実現するためにコア径を小さくすると, コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失が大きくなることから, 単一モード動作と極低損失伝送の間にはトレードオフの関係があることが大きな問題であった. 加えて, コア周囲のシリカリング領域に光が局在する表面モードと呼ばれるモードが存在し, コアモードと結合することにより, 広帯域にわたる低損失伝送が困難になるという問題もあった. 一方, ソリッドコア PBGF において, 曲げによる損失により, その性能が制限されてしまう可能性があることが懸念されている. また, ソリッドコア PBGF の曲げ特性の研究については実験によるものが先行しており, まだわかっていないことも多く, 理論検討が必要であった. さらに, 低曲げ損失, 低閉込め損失, および単一モード動作の実現の間にトレードオフの関係があることも問題となっていた. そこで, 本論文では, 空気コア PBGF において, コアならびにクラッドに新構造を導入することによって, 単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決できる構造の実現可能性を示している. また, 通常の三角格子型に

において、表面モード抑圧条件の構造パラメータ依存性を明らかにした上で、広帯域極低損失伝送を実現する新構造の提案を行っている。加えて、ソリッドコア PBGF において、ファイバの曲げ特性の理論解明を行い、さらに、低曲げ損失、低閉込め損失、および単一モード動作の実現の間のトレードオフの問題を解決する構造の提案を行っている。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景、目的および構成について述べる。

第 2 章では、PBGF の分類、導波原理、伝搬特性、ならびに最先端のデバイス応用について述べる。

第 3 章では、本研究で用いている、複雑な断面形状を有する PBGF に対応可能な、高精度高信頼度のベクトル有限要素法 (FEM) の定式化について示す。

第 4 章では、まず初めに、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失は大きくなるが、クラッド形状として新たに変形ハニカム格子を導入することによって、あるいはまた、コア径を小さくすることができる 3 回対称性を持つコアを導入することによって、広帯域にわたって単一モード動作する PBGF を設計することが可能であることを示す。さらに、単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決するため、新しい格子形状である改良三角格子を導入し、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失を 19 セルコア型よりも低く抑え、かつ、実効的に単一モード動作可能な PBGF 構造の探索を行い、単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決できる構造の実現可能性を示す。

第 5 章では、通常の三角格子型において、表面モード抑圧条件の構造パラメータ依存性を調査し、どのようなコア径、および構造パラメータであっても、その抑圧条件はコア周囲のシリカリング幅がクラッドに存在する空孔間におけるシリカブリッジ幅の半分であるという条件を見出す。また、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失を低減するために、19 セルコア型のようにコア径を拡大することが提案されているが、さらに散乱損失を低減するために 37 セルコア型とすると、高次モードが多数存在するといった問題があることから、19 セルコア型が限界であるとされていた。ここでは、3 回対称性を有するコア形状を新たに提案し、先に見出した表面モードの抑圧条件を適用した上で 27 セルコア型とすると、19 セルコア型とした場合と比べてコア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失をさらに低減できること、ならびに 37 セルコア型とした場合と比べてマイクロベンディングなどによる基本モードと高次モードとの結合を抑えることが可能であることを示し、広帯域極低損失伝送の実現可能性を示す。

第 6 章では、FEM を用いることによって、ソリッドコア PBGF の曲げによる内側放射を説明するために導入された PBG エッジの傾きが実際に生じることを示す。また、ファイバを曲げた場合のクラッド領域における光の状態を考慮することで、PBG エッジの傾きを与える近似式を提案し、FEM による結果と比較することでその近似式の妥当性を示す。さらに、ソリッドコア PBGF の曲げによってクラッドモードが多数存在し、そういったモードがコアモードと結合を起こすことによって損失が増大すること、曲がりに対して内側に存在するクラッドモードとの結合によって内側放射が起こることを示す。加えて、曲げ損失の PBG の次数依存性および構造依存性を評価することで、曲げ損失を低減することが可能な構造の条件を見出す。

第 7 章では、ヘテロクラッド構造という新規クラッド概念を提案し、そのクラッド構造を用いたソリッドコア PBGF が、第 6 章において見出した低曲げ損失条件を満足するのみならず、トレードオフの関係にある、低閉込め損失ならびに単一モード動作についても同時に満足することを示す。

第 8 章では、本研究で得られた成果の総括を行うとともに、今後の研究課題について示す。

学位論文審査の要旨

主査	教授	小柴正則
副査	教授	宮永喜一
副査	教授	野島俊雄
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	齊藤晋聖

学位論文題名

Structural Optimization of Photonic Bandgap Fibers for Realizing Low Transmission Loss, Low Bending Loss, and Single-Mode Operation

(フォトリックバンドギャップファイバの低伝送損失, 低曲げ損失,
および単一モード化のための最適構造設計)

近年, インターネットにおけるトラフィックの増大に伴い, 伝送用光ファイバのさらなる高性能化に対する要求が高まってきている. 従来型の光ファイバの場合, 全反射現象を利用してクラッド部よりも高い屈折率を持つコア部に光を閉込めるため, ガラス材料中におけるレイリー散乱や吸収による損失が不可避となる. 一方, 光ファイバのクラッドとしてフォトリック結晶と呼ばれる屈折率の異なる材料を周期的に配置した構造を導入し, フォトリックバンドギャップ (PBG) と呼ばれる光の存在できない条件を利用することで, その欠陥部分であるコアに光を閉込めて光の伝送を実現する, フォトリックバンドギャップファイバ (PBGF) に対する関心が世界的に高まっている. PBGF は, 従来型の光ファイバとは異なり, コアを空気とすることもできることから, 高パワー伝送や極低損失伝送, さらには新波長帯域の開拓などの実現が期待されている. また, コアをシリカとし, クラッド領域を Ge 添加などにより実現される高屈折率散乱体を周期的に配置することにより形成するソリッドコア型は, 伝送帯域が周波数に対して不連続に現れることから, ファイバ増幅器ならびにファイバレーザーにおける増強自然放出光の抑圧のためのファイバ型光フィルタデバイスとしての応用が期待されている.

空気コア PBGF では, 通常, シリカ中に空孔を三角格子状に周期的に配置することによってクラッド領域が形成され, 空孔を 7 個もしくは 19 個取り除く (7セルコア型もしくは 19セルコア型) ことによって 6 回対称性を有する空気コア領域が形成される. こうした PBGF では, コア径が大きいので, 多モード伝送路になりやすく, また, 単一モード動作を実現するためにコア径を小さくすると, コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失が大きくなることから, 単一モード動作と極低損失伝送の間にはトレードオフの関係があることが大きな問題であった. 加えて, コア周囲のシリカリング領域に光が局在する表面モードと呼ばれるモードが存在し, コアモードと結合することにより, 広帯域にわたる低損失伝送が困難になるという問題もあった. 一方, ソリッドコア PBGF において, 曲げによる損失により, その性能が制限されてしまう可能性があることが懸念されている. また, ソリッドコア PBGF の曲げ特性の研究については実験によ

るものが先行しており、まだわかっていないことも多く、理論検討が必要であった。さらに、低曲げ損失、低閉込め損失、および単一モード動作の実現の間にトレードオフの関係があることも問題となっていた。そこで、本論文では、空気コア PBGF において、コアならびにクラッドに新構造を導入することによって、単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決できる構造の実現可能性を示している。また、通常の三角格子型において、表面モード抑圧条件の構造パラメータ依存性を明らかにした上で、広帯域極低損失伝送を実現する新構造の提案を行っている。加えて、ソリッドコア PBGF において、ファイバの曲げ特性の理論解明を行い、さらに、低曲げ損失、低閉込め損失、および単一モード動作の実現の間のトレードオフの問題を解決する構造の提案を行っている。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景、目的および構成について述べる。

第 2 章では、PBGF の分類、導波原理、伝搬特性、ならびに最先端のデバイス応用について述べる。

第 3 章では、本研究で用いている、複雑な断面形状を有する PBGF に対応可能な、高精度高信頼度のベクトル有限要素法 (FEM) の定式化について示す。

第 4 章では、まず初めに、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失は大きくなるが、クラッド形状として新たに変形ハニカム格子を導入することによって、あるいはまた、コア径を小さくすることができる 3 回対称性を持つコアを導入することによって、広帯域にわたって単一モード動作する PBGF を設計することが可能であることを示す。さらに、単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決するため、新しい格子形状である改良三角格子を導入し、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失を 19 セルコア型よりも低く抑え、かつ、実効的に単一モード動作可能な PBGF 構造の探索を行い、単一モード動作と極低損失伝送の間のトレードオフの問題を解決できる構造の実現可能性を示す。

第 5 章では、通常の三角格子型において、表面モード抑圧条件の構造パラメータ依存性を調査し、どのようなコア径、および構造パラメータであっても、その抑圧条件はコア周囲のシリカリング幅がクラッドに存在する空孔間におけるシリカブリッジ幅の半分であるという条件を見出す。また、コア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失を低減するために、19 セルコア型のようにコア径を拡大することが提案されているが、さらに散乱損失を低減するために 37 セルコア型とすると、高次モードが多数存在するといった問題があることから、19 セルコア型が限界であるとされていた。ここでは、3 回対称性を有するコア形状を新たに提案し、先に見出した表面モードの抑圧条件を適用した上で 27 セルコア型とすると、19 セルコア型とした場合と比べてコア周囲のシリカ表面粗さによる散乱損失をさらに低減できること、ならびに 37 セルコア型とした場合と比べてマイクロベンディングなどによる基本モードと高次モードとの結合を抑えることが可能であることを示し、広帯域極低損失伝送の実現可能性を示す。

第 6 章では、FEM を用いることによって、ソリッドコア PBGF の曲げによる内側放射を説明するために導入された PBG エッジの傾きが実際に生じることを示す。また、ファイバを曲げた場合のクラッド領域における光の状態を考慮することで、PBG エッジの傾きを与える近似式を提案し、FEM による結果と比較することでその近似式の妥当性を示す。さらに、ソリッドコア PBGF の曲げによってクラッドモードが多数存在し、そういったモードがコアモードと結合を起こすことによって損失が増大すること、曲がりに対して内側に存在するクラッドモードとの結合によって内側放射が起こることを示す。加えて、曲げ損失の PBG の次数依存性および構造依存性を評価することで、曲げ損失を低減することが可能な構造の条件を見出す。

第 7 章では、ヘテロクラッド構造という新規クラッド概念を提案し、そのクラッド構造を用いたソリッドコア PBGF が、第 6 章において見出した低曲げ損失条件を満足するのみならず、トレードオフの関係にある、低閉込め損失ならびに単一モード動作についても同時に満足することを示す。

第 8 章では、本研究で得られた成果の総括を行うとともに、今後の研究課題について示す。

これを要するに、著者は、従来型ファイバとは、導波原理が全く異なる PBGF に関して、互

いにトレードオフの関係にある低曲げ損失, 低閉込め損失, および単一モード動作を同時に実現するための設計指針を見出すとともに, 広帯域極低損失伝送実現のための有益な知見を得ており, 情報通信フォトニクスに関する学術分野に貢献するところ大なるものがある.

よって著者は, 北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める.