

学位論文題名

A Study on Effectively Single-Mode Photonic Crystal Fibers Exhibiting Low Bending Losses

(実効的に単一モード動作する

低曲げ損失フォトニック結晶ファイバに関する研究)

学位論文内容の要旨

近年の FTTH (Fiber-To-The-Home) の目覚ましい進展に代表されるように、次世代超高速大容量光通信システムの構築が急速に進んでおり、それに伴い、光ファイバに求められる光学特性も非常に多岐に渡ってきている。不純物を添加することでコア部を形成した通常の光ファイバにおいては、その光学特性に限界があり、次世代超高速大容量光通信システムに導入するには、いくつか克服すべき問題点が残っている。これに対して、最近登場したフォトニック結晶ファイバ (PCF) では、空孔間隔および空孔直径を適宜変えることによって、通常の光ファイバでは実現不可能な光学特性を発現させることができ、関心が高まっている。

ところで、昨今の波長多重伝送方式 (WDM) の進展や光ファイバのアクセス系への導入などに伴い、PCF に対しても、単一モードを保証しつつ、曲げ損失が小さく、また従来型ファイバとの接続性にも優れ、さらには大きな実効コア面積を有する実用に耐え得る構造の特定が強く要請されている。しかしながら、一様な空孔直径の値を有する標準的な PCF においては、こうした特性を両立させることは、一般に困難であるとされてきた。そこで、本論文では、曲げに強く、また大きな実効コア断面積を有し、かつビーム品質にも優れた単一モード PCF を開発することを目的として、数値解析による最適構造探索を行い、要求仕様を満たす新規 PCF の設計指針を見出すことに成功している。特にここで新たに開発したゲルマニウム添加空孔付加型低曲げ損失単一モード PCF については、実験によって設計理論の妥当性を検証している。なお、数値解析による最適構造探索においては、有限要素法に基づくモード解析法を用いることで、曲げ損失、および各モードにおける閉込め損失を精度良く評価することが可能である。またビーム品質因子については、有限要素法に基づくビーム伝搬解析によって評価する方法を提案している。

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, 3 章では、複雑な断面形状を有するあらゆる PCF に対応可能で、かつ曲げ損失の評価も可能な高精度高信頼度のフルベクトル型有限要素法に基づく設計支援ツールを用いて解析することを目的として、有限要素法を適用したモード解析法およびビーム伝搬法の定式化を示している。ここでは、エッジ/ノーダルハイブリッド要素と呼ばれるベクトル型要素を利用することで、非物理的な解、いわゆるスプリアス解を完全に抑圧し、高精度なシミュレーション解析を行うことを可能としている。

第 4 章では、FTTH への導入を目指して、非常に小さい許容曲げ半径を維持しつつ、従来の光ファ

イバとも低損失な接続が可能な単一モード光ファイバの設計指針を新たに提案するとともに、この設計指針に基づいて新規空孔付加型光ファイバを試作し、実験的検証も行っている。実験結果を理論にフィードバックすることにより、高性能空孔付加型光ファイバを実現するための信頼性の高い設計指針を得ることができ、ここで用いているベクトル有限要素法があらゆる PCF の強力な設計ツールになり得る可能性があることを示している。試作した空孔付加型光ファイバは、許容曲げ半径が 5 mm 程度まで低減されているとともに、カットオフ波長が $1.1\ \mu\text{m}$ 以下、通常のシングルモードファイバとの接続が 0.08 dB 以下であり、高密度配線用光ファイバとして、非常に有効であることを示している。

第 5 章では、有限要素法に基づくモード解析法を用いることで、大きな実効コア断面積を有する PCF の解析を行っている。一般に、光と媒質の相互作用によって発生する非線形現象自体を抑制するには、光ファイバ中の光パワー密度を小さくすることが有効であり、従来、実効コア断面積を拡大した低非線形ファイバの研究が行われてきた。しかしながら、低非線形性を実現するために実効コア断面積を拡大すると耐曲げ特性が劣化してしまい、伝送用光ファイバとして利用するには難がある。これに対して、PCF では、その空孔間隔、空孔直径を適切に設計すると、非線形性を低減しつつ、かつ良好な耐曲げ特性を実現できると考えられる。本章では、様々なコア形状を有する PCF に対して、従来の光ファイバ理論を導入するための簡便な方法を新たに見出すことで、複雑な断面形状を有する PCF の光学特性を容易に知ることを可能とするとともに、非線形性を低減しつつ、かつ良好な耐曲げ特性を有する PCF 断面構造の特定を行っている。

第 6 章では、第 5 章で得られた結論を基にして、大きな実効コア断面積を有し、かつ曲げに強い単一モード PCF の設計可能性を示している。中心コアの周囲にリングコア領域を設け、これら 2 つのコア間における共振結合を利用することで、 $1400\ \mu\text{m}^2$ という非常に大きな実効コア断面積を有し、かつ 5 cm の曲げ半径まで曲げても曲げ損失特性が劣化しない PCF 構造を新たに見出している。本章で提案する構造の PCF は、イッテルビウム等を添加した高パワー高効率ファイバレーザへの応用が期待され、次世代超高速大容量光通信システムの実現可能性を示している。

第 7 章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

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

A Study on Effectively Single-Mode Photonic Crystal Fibers Exhibiting Low Bending Losses

(実効的に単一モード動作する

低曲げ損失フォトニック結晶ファイバに関する研究)

近年の FTTH (Fiber-To-The-Home) の目覚ましい進展に代表されるように、次世代超高速大容量光通信システムの構築が急速に進んでおり、それに伴い、光ファイバに求められる光学特性も非常に多岐に渡ってきている。不純物を添加することでコア部を形成した通常の光ファイバにおいては、その光学特性に限界があり、次世代超高速大容量光通信システムに導入するには、いくつか克服すべき問題点が残っている。これに対して、最近登場したフォトニック結晶ファイバ (PCF) では、空孔間隔および空孔直径を適宜変えることによって、通常の光ファイバでは実現不可能な光学特性を発現させることができ、関心が高まっている。

ところで、昨今の波長多重伝送方式 (WDM) の進展や光ファイバのアクセス系への導入などに伴い、PCF に対しても、単一モードを保証しつつ、曲げ損失が小さく、また従来型ファイバとの接続性にも優れ、さらには大きな実効コア面積を有する実用に耐え得る構造の特定が強く要請されている。しかしながら、一様な空孔直径の値を有する標準的な PCF においては、こうした特性を両立させることは、一般に困難であるとされてきた。そこで、本論文では、曲げに強く、また大きな実効コア断面積を有し、かつビーム品質にも優れた単一モード PCF を開発することを目的として、数値解析による最適構造探索を行い、要求仕様を満たす新規 PCF の設計指針を見出すことに成功している。特にここで新たに開発したゲルマニウム添加空孔付加型低曲げ損失単一モード PCF については、実験によって設計理論の妥当性を検証している。なお、数値解析による最適構造探索においては、有限要素法に基づくモード解析法を用いることで、曲げ損失、および各モードにおける閉込め損失を精度良く評価することが可能である。またビーム品質因子については、有限要素法に基づくビーム伝搬解析によって評価する方法を提案している。

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2,3章では、複雑な断面形状を有するあらゆる PCF に対応可能で、かつ曲げ損失の評価も可能な高精度高信頼度のフルベクトル型有限要素法に基づく設計支援ツールを用いて解析することを目的として、有限要素法を適用したモード解析法およびビーム伝搬法の定式化を示している。ここでは、エッジ/ノードルハイブリッド要素と呼ばれるベクトル型要素を利用することで、非物理的な解、いわゆるスプリアス解を完全に抑圧し、高精度なシミュレーション解析を行うことを可能としている。

第4章では、FTTH への導入を目指して、非常に小さい許容曲げ半径を維持しつつ、従来の光ファイバとも低損失な接続が可能な単一モード光ファイバの設計指針を新たに提案するとともに、この設計指針に基づいて新規空孔付加型光ファイバを試作し、実験的検証も行っている。実験結果を理論にフィードバックすることにより、高性能空孔付加型光ファイバを実現するための信頼性の高い設計指針を得ることができ、ここで用いているベクトル有限要素法があらゆる PCF の強力な設計ツールになり得る可能性があることを示している。試作した空孔付加型光ファイバは、許容曲げ半径が 5 mm 程度まで低減されているとともに、カットオフ波長が $1.1\ \mu\text{m}$ 以下、通常のシングルモードファイバとの接続が 0.08 dB 以下であり、高密度配線用光ファイバとして、非常に有効であることを示している。

第5章では、有限要素法に基づくモード解析法を用いることで、大きな実効コア断面積を有する PCF の解析を行っている。一般に、光と媒質の相互作用によって発生する非線形現象自体を抑制するには、光ファイバ中の光パワー密度を小さくすることが有効であり、従来、実効コア断面積を拡大した低非線形ファイバの研究が行われてきた。しかしながら、低非線形性を実現するために実効コア断面積を拡大すると耐曲げ特性が劣化してしまい、伝送用光ファイバとして利用するには難がある。これに対して、PCF では、その空孔間隔、空孔直径を適切に設計すると、非線形性を低減しつつ、かつ良好な耐曲げ特性を実現できると考えられる。本章では、様々なコア形状を有する PCF に対して、従来の光ファイバ理論を導入するための簡便な方法を新たに見出すことで、複雑な断面形状を有する PCF の光学特性を容易に知ることが可能とするとともに、非線形性を低減しつつ、かつ良好な耐曲げ特性を有する PCF 断面構造の特定を行っている。

第6章では、第5章で得られた結論を基にして、大きな実効コア断面積を有し、かつ曲げに強い単一モード PCF の設計可能性を示している。中心コアの周囲にリングコア領域を設け、これら2つのコア間における共振結合を利用することで、 $1400\ \mu\text{m}^2$ という非常に大きな実効コア断面積を有し、かつ 5 cm の曲げ半径まで曲げても曲げ損失特性が劣化しない PCF 構造を新たに見出している。本章で提案する構造の PCF は、イッテルビウム等を添加した高パワー高効率ファイバレーザへの応用が期待され、次世代超高速大容量光通信システムの実現可能性を示している。

第7章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、曲げに強く、また実効的に単一モードで動作し、かつビーム品質にも優れた PCF の設計指針を見出すとともに、実験的検証を行うことで従来の光ファイバでは実現不可能な PCF に関する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。