

氏名	片桐 崇史		
授与学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成 17 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻		
学位論文題目	ブラッグファイバの製作とその伝搬特性に関する研究		
指導教員	東北大学教授 宮城 光信		
論文審査委員	主査 東北大学教授 宮城 光信	東北大学教授 伊藤 弘昌	
	東北大学教授 中沢 正隆	東北大学助教授 松浦 祐司	

論文内容要旨

現在広く使用されている光ファイバは、石英に添加物を加えることにより断面内の屈折率プロファイルを形成し、全反射により高屈折率のコアに光を閉じ込めることで光伝送を実現している。これまで屈折率プロファイルに改良を重ねることで伝送特性は向上してきたが、近年、光ファイバの用途が多様化するにつれ、従来の光ファイバとは構造も特性も異なる特殊ファイバの研究が盛んに行われるようになった。そのひとつにブラッグ反射により光を伝送しようとする試みがある。図 1 にその伝搬の様子を示す幾何光学モデルを示す。通常、光が伝搬するコア部は空気などの低屈折率媒質、クラッドは 2 次元フォトニック結晶もしくは 1 次元フォトニック結晶 (誘電体多層膜) で形成される。クラッドの周期構造内における多重反射と干渉効果の結果として、コアに入射した光のうちブラッグ条件を満たす特定の波長のみがブラッグ反射を受けコア内に閉じ込められる。

ブラッグ反射を導波原理とする利点のひとつは低損失な中空伝送が実現できる点にある。これまで、金属クラッドを基礎とした中空ファイバにより中空コア伝送が実現されており、レーザ医療および工業分野において幅広く使用されてきた。近年、応用範囲が拡大する一方、中空ファイバは原理的に損失を伴いやすい漏れモードを伝送するため、細径化、長尺化、低損失化が課題となっている。ブラッグ導波型の光ファイバは、中空ファイバと同様に漏れモードを伝送するが、透明媒質中でエネルギーのほとんどが反射されることから漏れ損失を大幅に低減することができる。更に、コアにおける物質との相互作用がないことから、理論的には従来のシングルモードファイバよりも低損失な特性が得られることや、低い非線形性、可視波長域における零分散、パルスエネルギー閾値の上昇など、従来の光ファイバが抱える多くの問題が解決されることから、次世代の通信用光ファイバとして期待されている。

一方、現在使用されている多くの光学素子が、誘電体多層膜等の周期構造で形成されていることから、クラッド構造の設計次第では、特殊な機能を持ったファイバ型素子が実現できることが予想される。そのためには、複雑なファイバ断面構造を高精度に調整可能な製法を開発し、実験的アプローチによりブラッグ導波に関する理解を深める必要がある。

ブラッグ導波型の光ファイバのひとつの構造はクラッドを誘電体多層膜で形成したブラッグファイバである (図 1 (右))。ブラッグファイバの最初の提案は 1978 年に Yeh らによりなされた。本論

文は、理想的な断面構造を持つブラッグファイバを製作し、明確なバンドギャップを形成、制御することを目的として、ファイバの設計、製作法の検討および伝送特性の評価を行ってきた結果をまとめたものである。以下に本研究により新たに得られた知見を中心に各章ごとに述べる。

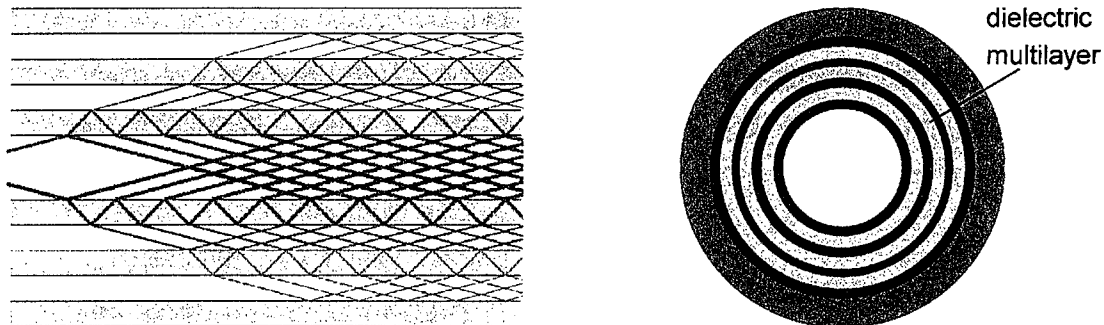


図1 ブラッグ導波型光ファイバの光伝搬（左）とブラッグファイバの断面構造（右）。

第2章では、低損失かつ広帯域な特性を持つブラッグファイバの断面構造設計に関する理論検討を行った。従来、低損失な特性を得るためにはクラディング多層膜の屈折率比 n_2/n_1 を大きくする必要があったが、コアの屈折率 n_{co} をクラディング低屈折率層の屈折率 n_1 に近づけることで、 n_2/n_1 が小さくても低損失な特性を実現できることが分かった。特に $n_1/n_{co}=1$ とした場合、屈折率比 $n_2/n_1=\sqrt{2}$ において最も低損失かつ広帯域な特性が得られ、クラディング低屈折率層の膜厚 d_1 を大きくするほど帯域が長波長側に広がる性質があることが明らかとなった。このことは、これまでのブラッグ導波型光ファイバでは不可能なレベルの帯域設計および超広帯域特性が実現可能であることを示唆している。数値計算を行わずに簡易に帯域設計を行うため、バンドエッジ波長から最適膜厚を求める設計式を導出した。本設計式は、製作したファイバのスペクトル特性から多層膜の膜厚を算出する場合にも有用である。

第2章で理論的に導かれたファイバの最適構造は、石英のコアを用いることにより実現することができる。また、ブラッグファイバを機能デバイスとして応用しようとした場合、従来のシングルモードファイバと低損失な結合が可能であることや、非線形光学等のコア媒質と光の相互作用を利用できる点など、石英のコアを持つことは有利な点が多いことが予想される。第3章では、コアが石英で形成されたブラッグファイバについて、製作法の検討および基本特性の測定を行っている。ファイバの製作は、予め作製した SiO_2 のコアの周囲に RF マグネトロンスパッタを応用して Si/SiO_2 多層膜を直接成膜する手法により行った。ファイバに対し3方向からスパッタを行うことにより、ファイバを回転することなく周方向に均一な薄膜が形成可能となり、長手方向膜厚の揺らぎは薄い膜（50 nm 以下）を所望の膜厚まで積層することにより低減されることが示された。Si 膜の充填密度は Ar ガス圧により大きく変化し、低圧ほど緻密で平滑な膜が得られることが分かった。検討された製作条件より、試作として16層の多層膜クラディングを持つコア径 125 μm のブラッグファイバを製作し、近赤外波長域に明確なバンドギャップを確認した。バンド特性は、前章で導出した理論式によりフレキシブルに制御可能であることが明らかとなり、中心波長の67%に渡るこれまでにない広帯域なブラッグファイバが実現された。次に、双方向テーパの製作技術を応用して細径のコアを形成する装置を構築し、コア径 10 μm 以下のブラッグ

ファイバを製作した (図 2 (左)). ファイバの入出射端をテーパ結合器を介して単一モードファイバに結合することにより, 単一モードファイバと高効率に結合可能な素子形状を実現した. 伝送損失を測定した結果, 理論値より 2~3 桁大きな値となったが, 低圧条件で成膜することにより若干の改善が見られ, 最小で 3 $\mu\text{m}\phi$ の微小コア内のブラッグ伝送が確認された (図 2 (右)). 製作したブラッグファイバがバンドエッジ付近において巨大な群速度分散を持つという理論予想に基づき, 実際に長波長側のバンドエッジ付近において測定した相対遅延時間から群速度分散を見積もったところ, 全反射型の石英系光ファイバより 2 桁も大きな異常分散を持つことを確認した. また, 近傍界分布の測定から, 本ファイバが単一モードで動作していることが明らかとなり, 高次モードがカットオフされる原理を理論的に明確にした.

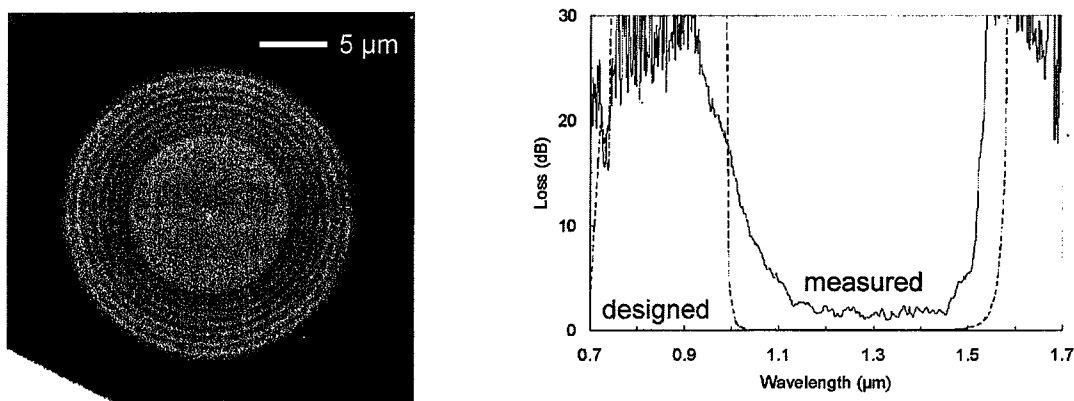


図 2 製作したブラッグファイバの断面 SEM 写真 (左) と損失スペクトル (右).

第 4 章では, 中空のコアを持つブラッグファイバについて 2 つの製作法を提案し, それぞれについて試作を行った. 液層法による製作は, ガラスキャピラリの内側に溶液を送液し, 加熱することにより内面に誘電体層を成膜するもので, 常圧で製作可能であり, キャピラリ自体が構造体となることから, 容易にフレキシブルなファイバが実現できる利点がある. 試作として, ゼルゲル法と PHPS を前駆体とする手法を用い, Ta_2O_5 および SiO_2 による 3 層の誘電体内装金属中空ファイバを製作し, 付着力の強い平滑な多層膜を目的の膜厚で形成することに成功した. しかし, 長手方向の膜厚の揺らぎが大きく, 屈折率比も小さいことから, 多層化の大きな効果は得られず, 成膜の再現性が悪いことから, 更なる多層化, 長尺化は困難であった. 一方, スパッタリングによる製作は, 自動で多層膜の連続成膜が可能であることから, 再現性が高く, 液層法に比べ, 高い膜厚精度が実現可能である. 問題とされていたエッチング工程の困難さを解決する技術として, 新たに肉厚を波長程度まで薄くした透明な薄膜チューブを母材とする製作法を提案し, 薄膜チューブを製作するためのファイバ線引き装置を構築した. 本装置は, 数 μm の膜厚の薄膜チューブを $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以下の膜厚精度で 10 m 以上にわたり線引きすることが可能である. 線引きされた膜厚 3.2 μm の薄膜チューブに 14 層の Si / SiO_2 多層膜を形成することにより, ブラッグファイバを製作した. 屈折率比の大きな材料の組み合わせが実現したことから, はっきりとしたブラッグ反射による中空伝送が実現された. また, 薄膜チューブを挿入することにより, 表面波モードによる損失の上昇が観測され, 薄膜チューブの膜厚を注意深く調整する必要性が示された.

以上要する本論文は、低損失かつ広帯域なブラッグファイバの新しい設計法および高精度な製作法を提案し、実験によりファイバの実現に有用な知見を与えると共に、その伝送特性を明らかにしたものである。本研究成果がブラッグ導波型光ファイバの新しい応用分野の発展に少しでも寄与するものとなることを期待したい。課題としては、膜質を改善することによる伝送損失の低減が挙げられる。ファイバの低損失化が実現されることにより、長尺化と細径化が可能となれば、ブラッグ導波の特徴がより明確に現れることが予想される。特に、波長以下のコア径を持つブラッグファイバの振る舞いは興味深い論題である。

論文審査結果の要旨

近年、光ファイバの用途が多様化するにつれ、従来の光ファイバとは構造および特性が異なる特殊ファイバの研究が盛んに行われている。ブラッグファイバは、誘電体多層膜で構成されたクラディングを持ち、ブラッグ反射に基づく閉じ込め効果により光を伝送する。このため、従来の光ファイバでは得られない多くの機能を実現可能であることが理論的に予測されるが、これまで実際に製作されたファイバは、損失が著しく大きく、また明確なバンドギャップの形成や特性の制御が困難であった。著者は、スパッタリング法を応用した新たな製作法を提案することにより、理想的なブラッグファイバ構造を形成し、明確で広いバンドギャップを持つ低損失なブラッグファイバを実現した。本論文はその研究成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、低損失かつ広帯域なブラッグファイバの最適構造を導くために、理論的検討を行っている。その結果、多層膜クラディング中の低屈折率層とコアの屈折率が等しい構造において、低損失かつ極めて広い帯域が実現できることを見出し、ファイバの最適構造および設計法を導いている。これは、ブラッグファイバの損失低減を実現する新たな提案として評価できる。

第3章では、ブラッグファイバの製作法および新たに構築した製作装置についての説明を行い、実験より導かれた最適な製作条件について述べている。実際に、石英とシリコンを構成材料とするコア径 $125\ \mu\text{m}$ のブラッグファイバの製作・評価を行うことにより、提案した設計法が正しいことを実証すると共に、これまでにない広い帯域を持つブラッグファイバの実現に成功している。更に、コア径 $10\ \mu\text{m}$ 以下のファイバを製作し、特性の解析から本ファイバがシングルモードで動作することを明らかにしている。

第4章では、赤外レーザ光伝送用中空コアブラッグファイバを実現するための2つの製作法を提案している。1つは、ガラスキャピラリの内面に液相法を用いて誘電体多層膜を形成する手法であり、五酸化タンタルと石英による多層構造を形成することに成功している。また、もうひとつの手法として、厚さ数 μm の薄肉ガラスチューブの外面に多層膜クラディングを形成する手法を試み、試作したファイバの伝送特性とその問題点について述べている。

第5章は結言であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、低損失かつ広帯域なブラッグファイバの新しい設計法および高精度な製作法を提案し、実験に基づく検証により、新たな機能を有するファイバの実現についての有用な知見を与えると共に、その伝送特性を明らかにしたもので、光伝送および通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。