

博士（工 学） 庄 秀 萍

学 位 論 文 題 名

磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフト
ならびにモード変換特性解析に関する研究

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

最近の新聞やテレビにおいて、マルチメディアという語を頻繁に見かけるようになった。マルチメディア社会では、家庭、学校、図書館、企業などを結んで、音声、文字、映像、データなどを自由に双方向でやり取りができるようになる。このような社会を実現するためになくてはならないものが、高速・大容量の光ファイバ通信網である。光通信システムは、情報化社会の進展とともに、今後ますます大容量超高速化が要求される。こうした大容量超高速光通信システムを実現するにはIC技術、光デバイス技術、実装技術などの部品技術の高性能化が重要である。現在、超高速光通信ネットワークや超並列光情報処理システムなどの実現を目指して、光集積回路(光IC)と光電子集積回路(OEIC)の二つに代表されるように、光機能素子の高密度集積化に関する研究が活発になっている。

ところで、光通信においても光源と光回路、伝送路との一方向性を保って安定にレーザ発振を行うためには、光アイソレータが是非必要である。特に、磁気光学導波路は、電気光学導波路や音響光学導波路にはない特徴である非相反性を有しているため、非相反導波形光デバイスを構成するうえで不可欠である。磁気光学導波路を用いた非相反導波形光デバイスには、非相反モード変換を利用したモード変換形と、非相反位相シフトを利用した位相シフト形があり、いずれも、様々な非相反光デバイスに応用するための研究が盛んに続けられている。

さて、有限要素法は、任意形状の光導波路はもちろんのこと、任意の屈折率分布をもつ光導波路、さらには任意の異方性材料や非線形光学材料からなる光導波路への適用が極めて容易であり、光導波路の汎用数値解法としても急速に普及しつつあるが、磁気光学材料を含む非相反導波路への応用はこれまで全く行われていなかった。また、非相反導波形光デバイスの解析・設計ツールとしては、マーカットリィの方法と等価屈折率法(いずれも解析的近似解法)を置いて他になく、これらの解析結果の信頼性を評価するうえでも、さらには、非相反導波形光デバイスの極限性能を探るうえでも、より汎用性の高い解析法が必要とされていた。

本論文では、こうした状況のもとで、より解析精度が高く、また、適用範囲が広い磁気光学導波路の解析法を開発することを目的として、磁気光学導波路の有限要素法に基づく解析法の開発および非相反デバイスの高性能化に関する研究成果をまとめたものである。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフト特性解析について述べている。位相シフト形磁気光学チャネル導波路の有限要素法解析の定式化を初めて行っている。最終的には非線形固有値方程式を解く問題に帰着されているが、ここでは、この非線形固有値方程式を直接解くことなく、線形固有値方程式を解くことで非相反位相量の評価ができる簡便な反復計算法も考案している。本手法を用いて、磁気光学リブ導波路と磁気光学リッジ導波路の解析を

行い、実験値との比較から、本手法の妥当性と有効性を確認している。

第3章では、まず、磁気光学リブ導波路の非相反位相量と導波層膜厚との関係を調べて、最適膜厚が存在することを示している。また、磁気光学材料を導波層に用いた場合(磁気光学薄膜導波路)、基板部に用いた場合(磁気光学基板導波路)とも、薄膜と基板の屈折率差が大きいほど、非相反位相量が大きくなること、磁気光学材料のファラデー回転角が大きくなるほど、非相反位相量が大きくなること、磁気光学薄膜導波路よりも磁気光学基板導波路のほうが非相反位相量が大きくなることを明らかにしている。次に、最適膜厚をもつリブ導波路に適当な付加層を装荷した磁気光学リッジ導波路の非相反位相特性も調べ、付加層の屈折率が大きいほど、非相反位相量が大きくなり、膜厚に対する変化量が大きくなることを示している。このとき、付加層として磁気光学材料を用いると、非相反位相量が大きくなると同時に、膜厚に対する変動も小さくなり、膜厚に対する設計許容度が大幅に改善されることを見出している。さらに、誘電体ストリップ埋め込み形磁気光学リブ導波路を新たに提案し、この導波路の非相反位相量が、誘電体ストリップがない通常の磁気光学リブ導波路に比べて著しく大きくなることを見出している。

第4章では、磁気光学チャネル導波路の非相反モード変換特性解析について述べている。磁気光学チャネル導波路の非相反モード変換特性を評価するための有限要素法に基づく解析法の定式化を初めて行っている。最終的には、二つの偏波が結合した非線形固有値方程式を解く問題に帰着させているが、ここでは、この非線形固有値方程式を直接解くことなく、非結合の線形固有値方程式の解を初期解として、その後、結合した線形固有値方程式を繰り返し解いて解を求める簡便な反復計算法を考案している。具体的に、最近、研究が活発化している磁気光学リブ導波路の最大アイソレーション比を評価し、既に報告されている実験値との比較から本手法の妥当性を確かめている。次に、異方性誘電体クラッド構造磁気光学導波路の解析を行い、導波路のチャネル化がモード変換特性に与える影響を調べている。

第5章では、磁気光学チャネル導波路のベクトル波解析について述べている。スカラ有限要素法は、磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフトならびにモード変換特性解析に導入された最初の数値解法であり、これによって従来から用いられてきた解析的近似解法に比べて、解析精度が一段と向上するとともに、様々な磁気光学チャネル導波路に対応できるようになった。しかしながら、スカラ有限要素法は、あくまでもスカラ波近似のもとで定式化されているので、適用範囲にはおのずから制約があり、高精度な解析、設計には、さらに信頼性の高い解析法の開発が必要である。これまでに各種のベクトル有限要素法が開発されているが、とりわけ磁界の3成分を用いた有限要素法は、現実的で複雑な問題に幅広く適合するものであり、マイクロ波、ミリ波、ならびに光波領域の様々な誘電体導波路の解析に広く用いられている。しかしながら、この磁界の3成分を用いた有限要素法解析の重大な問題点として、スプリアス解の発生があげられる。この問題を解決する手段として、エッジ要素と呼ばれる新しい要素を用いた有限要素法が最近開発された。ここでは、このエッジ要素を用いたベクトル有限要素法を磁気光学チャネル導波路の解析に拡張するための基礎的な検討を行っている。

第6章では、本研究で得られた成果のまとめを行っている。

学位論文審査の要旨

主査 教授 小柴正則

副査 教授 伊藤精彦

副査 教授 小川恭孝

副査 教授 朝倉利光

学位論文題名

磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフト

ならびにモード変換特性解析に関する研究

光通信システムにおいては、光波の一方向性伝搬を保障する非相反光デバイスが随所に要求される。特に、磁気光学導波路を利用した非相反導波形光デバイスに関する研究が盛んに続けられているが、集積化に必要なチャネル構造の非相反光デバイスについては、実験結果の報告は相次いでいるものの、その解析・設計を支援する有効な手段がなく、非相反導波形光デバイスの極限性能を探るうえでも、より汎用性の高い解析法が必要とされていた。

本論文は、こうした状況のもとで、チャネル構造非相反光デバイスの位相シフト特性ならびにモード変換特性を精度よく評価するための解析法を開発することを目的として、磁気光学チャネル導波路の有限要素法に基づく解析法を考案し、これを応用して非相反光デバイスの高性能化の方策について研究した結果をまとめたものである。以下に、本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフト特性解析について述べている。位相シフト形磁気光学チャネル導波路の有限要素法解析の定式化を初めて行っている。最終的には非線形固有値方程式を解く問題に帰着されているが、ここでは、この非線形固有値方程式を直接解くことなく、線形固有値方程式を解くことで非相反位相量の評価ができる簡便な反復計算法も考案している。本手法を用いて、磁気光学リブ導波路と磁気光学リッジ導波路の解析を行い、実験値との比較から、本手法の妥当性と有効性を確認している。

第3章では、まず、磁気光学リブ導波路の非相反位相量と導波層膜厚との関係を調べて、最適膜厚が存在することを示している。また、磁気光学材料を導波層に用いた場合(磁気光学薄膜導波路)、基板部に用いた場合(磁気光学基板導波路)とも、薄膜と基板の屈折率差が大きいほど、非相反位相量が大きくなること、磁気光学材料のファラデー回転角が大きくなるほど、非相反位相量が大きくなること、磁気光学薄膜導波路よりも磁気光学基板導波路のほうが非相反位相量が大きくなることを明らかにしている。次に、最適膜厚をもつリブ導波路に適当な付加層を装荷した磁気光学リッジ導波路の非相反位相特性も調べ、付加層の屈折率が大きいほど、非相反位相量が大きくなり、膜厚に対する変化量が大きくなることを示している。このとき、付加層として磁気光学材料を用いると、非相反位相量が大きくなると同時に、膜厚に対する変動も小さくなり、膜厚に対する設計許容度が大幅に改善されることを見出している。さらに、誘電体ストリップ埋め込み形磁気光学リブ導波路を新たに提案し、この導波路の非相反位

相量が、誘電体ストリップがない通常の磁気光学リップ導波路に比べて著しく大きくなることを見出している。

第4章では、磁気光学チャネル導波路の非相反モード変換特性解析について述べている。磁気光学チャネル導波路の非相反モード変換特性を評価するための有限要素法に基づく解析法の定式化を初めて行っている。最終的には、二つの偏波が結合した非線形固有値方程式を解く問題に帰着させているが、ここでは、この非線形固有値方程式を直接解くことなく、非結合の線形固有値方程式の解を初期解として、その後、結合した線形固有値方程式を繰り返し解いて解を求める簡便な反復計算法を考案している。具体的に、最近、研究が活発化している磁気光学リップ導波路の最大アイソレーション比を理論的に初めてを評価し、既に報告されている実験値との比較から本手法の妥当性を確かめている。

第5章では、磁気光学チャネル導波路のベクトル波解析について述べている。スカラ有限要素法は、磁気光学チャネル導波路の非相反位相シフトならびにモード変換特性解析に導入された最初の数値解法であり、これによって従来から用いられてきた解析的近似解法に比べて、解析精度が一段と向上するとともに、様々な磁気光学チャネル導波路に対応できるようになった。しかしながら、スカラ有限要素法は、あくまでもスカラ波近似のもとで定式化されているので、適用範囲にはおのずから制約があり、高精度な解析、設計には、さらに信頼性の高い解析法の開発が必要である。ここでは、エッジ要素を用いたベクトル有限要素法を磁気光学チャネル導波路の解析に拡張するための基礎的な検討を行っている。

第6章では、本研究で得られた成果のまとめを行っている。

これを要するに、著者は、非相反導波形光デバイスの高度設計技術の確立を目指して、有限要素法に基づく高精度、高信頼度の解析法を開発するとともに、非相反光デバイスの高性能化を図るために指針を与える有益な新知見を得たものであり、光・波動エレクトロニクスに対して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（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。