

学 位 論 文 題 名

A Study on Numerical Analysis Methods for Nonreciprocal Optical Waveguides and Their Applications to Magneto-Photonic Crystal Circuits

（非相反光導波路のための数値解析法の開発と
その磁性フォトリック結晶光波回路への応用に関する研究）

学位論文内容の要旨

フォトリック結晶（PC）を利用して、真の意味で超小型の光波回路を構成する試みが活発化しており、同時に、こうしたPC光波回路の設計を支援するための数値解析技術に対する関心も急速に高まっている。PC光波回路は原理的に放射損がないという特徴をもつ一方、曲がりや分岐など、各素子間での反射は無視できず、この反射が回路全体の特性に悪影響を与えることが懸念される。そのため今後、こうしたPC光波回路を集積化し、光通信システムに組み込むためには、光の進行方向を一方向に限定する機能を有する光アイソレータが、信号の正確な伝送を確保するために必要となる。

ところが、これまでのPC光波回路に関する研究では、多くの場合、相反性のあるものを対象としており、非相反PC光波回路に関しては、ほとんど検討されていない状況にあった。その一方で、磁性材料を利用したPC、いわゆる磁性フォトリック結晶（MPC）の基本特性が1990年代末に初めて報告されると、バルク型の非相反光デバイスを高性能化できるとして、2000年代に入って以降、この分野の研究は急速に発展し始めた。これは、MPCが、ファラデー効果や磁気カー効果の増強など、工学的にも優れた特徴をもつため、最近ではデバイス化に向けた、より詳細な検討が進められている。しかし、このようなバルク型の構成では、前述したPC光波回路に一体集積化する目的には適さず、MPC光波回路を実現するには、導波路化の検討が不可欠である。

このような状況のもとで、本研究では、MPCを利用した導波路型非相反光デバイスの設計を支援するための基礎理論の構築を目指して、有限要素法を基盤とし、2次元のみならず、3次元構造にも対応した汎用性の高い解析手法を開発するとともに、回路理論を応用することで計算の高速化を図り、MPC光波回路の解析設計手順を体系的に整理した。さらに、ここで開発した解析手法を駆使して、PC光波回路との一体集積化に適した導波路型のMPCデバイスを提案するとともに、MPC導波路そのものの高性能化へ向けた詳細な検討を行っている。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ている。

第2章では、非相反位相変化を呈するMPC導波路の正確な解析を可能にするために、非対称入射に対応した有限要素法を提案している。有限要素法は汎用性が高く、任意形状への適用に優れた数値解析法であり、最近では、PC導波路解析にも容易に対応できるように、入出力導波路での複雑なモード展開を不要とした有限要素法が提案されているが、従来の方法では

入射面に関して対称な入射を仮定しているため、磁気光学導波路のような非相反性を有する導波路への適用には問題があった。提案手法では、非対称な入射にも対応できるような定式化を新たに行っているため、非相反導波路の諸特性を正確に把握できる。また本章では、提案手法の妥当性を示すため、磁気光学効果をもつ3層スラブ導波路解析を行った後、MPC導波路デバイスに対する有効性を示すため、方向性結合器に基づく光アイソレータの設計に適用している。

第3章では、非相反位相変化のみならず偏波変換をも包括的に取り扱えるように、有限要素法をベクトル波解析に対応した形で新たに定式化している。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は全く発生することなく、異なる偏波間の結合を正確に評価することを可能にしている。本章では、MPC導波路デバイスに対する有効性を示すために、提案手法を偏波変換に基づく光アイソレータの設計に適用している。

第4章では、3次元有限要素法を用いて、有限の厚みのあるMPCスラブ導波路の解析を行っている。2次元MPCといえども、実際の構造は磁性体薄膜から作製されるため、有限の厚みをもつことになる。このような複雑な3次元構造の特性を正確に把握するためには、3次元解析が不可欠である。ここでは、クラッドの材料として、 SiO_2 およびナノポーラス SiO_2 を用いた場合を考え、それぞれの非相反特性の導波路形状依存性を明らかにしている。

第5章では、MPC光波回路の解析や設計を高速化するため、散乱行列に基づく方法を非相反回路に拡張することを検討している。これまで用いてきた有限要素法のような領域型解法では、回路の大規模化に伴い、莫大な計算コストが必要となる。一方、散乱行列に基づく方法では、回路を構成する個々の基本エレメントに対する散乱行列を求めておき、これを組み合わせて全体の特性を把握するため、領域型解法の計算領域を必要最小限に小さく抑えることができる。本章ではまた、領域型解法における計算領域を有限な領域に制限するために不可欠な吸収境界条件として、新たに傾斜のあるPC導波路のための完全整合層を提案し、これによって領域型解法で取り扱う計算領域を大幅に縮小することに成功している。この手法を利用することで、散乱行列に基づく方法における個々の基本エレメントの計算を高速化することが可能となり、MPC光波回路の解析設計の一層の高効率化が図られている。

第6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

学 位 論 文 題 名

A Study on Numerical Analysis Methods for Nonreciprocal Optical Waveguides and Their Applications to Magneto-Photonic Crystal Circuits

(非相反光導波路のための数値解析法の開発と
その磁性フォトニック結晶光波回路への応用に関する研究)

フォトニック結晶(PC)を利用して、真の意味で超小型の光波回路を構成する試みが活発化しており、同時に、こうしたPC光波回路の設計を支援するための数値解析技術に対する関心も急速に高まっている。ところが、これまでのPC光波回路に関する研究では、多くの場合、相反性のあるものを対象としており、非相反PC光波回路に関しては、ほとんど検討されていない状況にあった。その一方で、磁性材料を利用したPC、いわゆる磁性フォトニック結晶(MPC)の基本特性が1990年代末に初めて報告されると、バルク型の非相反光デバイスを高性能化できるとして、2000年代に入って以降、この分野の研究は急速に発展し始めた。これは、MPCが、ファラデー効果や磁気カー効果の増強など、工学的にも優れた特徴をもつため、最近ではデバイス化に向けた、より詳細な検討が進められている。しかし、このようなバルク型の構成では、前述したPC光波回路に一体集積化する目的には適さず、MPC光波回路を実現するには、導波路化の検討が不可欠である。

このような状況のもとで、本研究では、MPCを利用した導波路型非相反光デバイスの設計を支援するための基礎理論の構築を目指して、有限要素法を基盤とし、2次元のみならず、3次元構造にも対応した汎用性の高い解析手法を開発するとともに、回路理論を応用することで計算の高速化を図り、MPC光波回路の解析設計手順を体系的に整理している。

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ている。

第2章では、非相反位相変化を呈するMPC導波路の正確な解析を可能にするために、非対称入射に対応した有限要素法を提案している。有限要素法は汎用性が高く、任意形状への適用に優れた数値解析法であり、最近では、PC導波路解析にも容易に対応できるように、入出力導波路での複雑なモード展開を不要とした有限要素法が提案されているが、従来の方法では入射面に関して対称な入射を仮定しているため、磁気光学導波路のような非相反性を有する導波路への適用には問題があった。提案手法では、非対称な入射にも対応できるような定式化

を新たに行っているため、非相反導波路の諸特性を正確に把握できる。

第3章では、非相反位相変化のみならず偏波変換をも包括的に取り扱えるように、有限要素法をベクトル波解析に対応した形で新たに定式化している。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、いわゆるスプリース解は全く発生することなく、異なる偏波間の結合を正確に評価することを可能にしている。

第4章では、3次元有限要素法を用いて、有限の厚みのある MPC スラブ導波路の解析を行っている。2次元 MPC といえども、実際の構造は磁性体薄膜から作製されるため、有限の厚みをもつことになる。このような複雑な3次元構造の特性を正確に把握するためには、3次元解析が不可欠である。ここでは、クラッドの材料として、 SiO_2 およびナノポーラス SiO_2 を用いた場合を考え、それぞれの非相反特性の導波路形状依存性を明らかにしている。

第5章では、MPC 光波回路の解析や設計を高速化するため、散乱行列に基づく方法を非相反回路に拡張することを検討している。これまで用いてきた有限要素法のような領域型解法では、回路の大規模化に伴い、莫大な計算コストが必要となる。一方、散乱行列に基づく方法では、回路を構成する個々の基本エレメントに対する散乱行列を求めておき、これを組み合わせて全体の特性を把握するため、領域型解法の計算領域を必要最小限に小さく抑えることができる。本章ではまた、領域型解法における計算領域を有限な領域に制限するために不可欠な吸収境界条件として、新たに傾斜のある PC 導波路のための完全整合層を提案し、これによって領域型解法で取り扱う計算領域を大幅に縮小することに成功している。この手法を利用することで、散乱行列に基づく方法における個々の基本エレメントの計算を高速化することが可能となり、MPC 光波回路の解析設計の一層の高効率化が図られている。

第6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、2次元のみならず3次元構造の導波路型非相反光デバイスの設計を支援するための高精度な解析理論を開発し、磁性フォトニック結晶を基盤とする非相反フォトニック結晶光波回路の高性能化、多機能化に関する有益な知見を得ており、ナノフォトニクス、光通信の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。