学位論文題名

Analysis of Functional Devices in Photonic Crystal
Waveguide with Various Medium Conditions by
Condensed Node Spatial Network Method

(種々の媒質条件を含むフォトニック結晶導波路を利用した
機能性デバイスの凝縮節点空間回路網法による解析)

学位論文内容の要旨

屈折率の異なる人工的周期構造を有するフォトニック結晶構造は、ある周波数帯域の電磁波を強く遮蔽する PBG (Photonic Band Gap) 特性によって強い閉じ込め効果を有する光導波路の構成を可能とする他、急峻な光路変換が実現されるなどの他の導波路では実現し得ない特徴を有している。このフォトニック結晶構造を利用した超微細構造デバイスの実現が期待されており、その工学的応用研究が活発に行われている。最近では低閾値レーザや、フォトニック結晶ファイバ(PCF)またはホーリーファイバ(HF)、4光波の多重・分離素子(MUX-DEMUX)、光ファイバ中のビームの広がりを抑制するフォトニック結晶スポットサイズ変換器(PC-SSC)等、種々の導波路やデバイスの提案が数値シミュレーション等の解析結果や試作による実験結果の両面から数多く報告されている。

近年、提案・報告されているフォトニック結晶導波路デバイスの多くは、通常は無損失・線形・等方性誘電体で構成されているものが多くを占めており、この場合、デバイス規模の増大や製作の上で困難をまねく。これに対して本論文では分散性媒質、異方性媒質、非線形媒質をフォトニック結晶導波路構造に含んだ場合の特徴ある電磁界の基本的な伝搬特性を利用し、新たなフォトニック結晶導波路デバイスの検討を、複雑形状や機能性媒質条件の取扱いに威力を発揮する凝縮節点空間回路網法 (CN-SNM) による数値解析のシミュレーション結果から行い、デバイス規模の縮小化と製作上の困難性を向上させないことを目指しながら、種々の具体的な機能性フォトニック結晶デバイスの構造やその特性について考察を行うものである。

本論文は、全9章で構成される。

第1章でフォトニック結晶導波路と凝縮節点空間回路網法の特徴を併せて述べ、本論文の意義について論ずる。

第2章では、フォトニック結晶導波路の基本的な概念として、2.1節では2種以上の屈折率を有する媒質で構成した完全周期構造において、あらゆる方向の電磁界の伝搬を禁止するPBG特性について説明する。2.2節ではその完全周期構造に欠陥列を与えて構成する導波路について、その際に急峻曲がり導波路を構成できる等の興味深い特性を、無損失・線形・等方性誘電体で構成した際の導波特性から説明している。

第3章では、本論文で用いる時間応答電磁界解析手法の凝縮節点空間回路網法について説明する。3.1節では本手法の最も基本的な概念として、Maxwell方程式のベクトルポテンシャル表示について示す。これはMaxwell方程式を通常の変数(E, H)ではなく、磁気ベクトルポテンシャル(A)に双対となる電気ベクトルポテンシャル(S)を新たに定義し、Maxwell方程式に対応する基本方程式を表示することで、媒質を扱う際の電気分極および磁気分極の時間微分に伴った各時刻における差分誤差の蓄積を軽減させられる。3.2節で本手法の基礎である空間回路網法について示し、空間格子網が電磁界の波動方程式が満足されることを示す。3.3節でその拡張法である凝縮節点空間回路網法について示し、従来の空間回路網法では電界・磁界の6つの成分が特定の空間格子節点配置であったが、凝縮節点法の適用によってその単位節点には全ての電磁界成分が含まれることとなり、複雑形状の境界や媒質条件を扱う際に特長を有することを示す。3.4節では凝縮節点空間回路網法の主要な境界条件の取扱いについて説明している。

第4章では、ローレンツ型、デバイ型分散性媒質および非磁化半導体プラズマでフォトニック結晶導波路を構成した際の減衰・増幅特性について検討するため、4.1節でこれらの媒質条件の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明し、4.2節では共鳴吸収特性を有するローレンツ型分散性媒質がピラー型フォトニック結晶導波路構造に含まれる際の減衰伝搬特性や、媒質が反転分布の状態となると仮定した場合の誘導放出による増幅伝搬特性について述べる。4.3節ではデバイ型分散性媒質が含まれる際の減衰伝搬特性について、4.4節では非磁化半導体プラズマ発生による減衰特性について述べている。

第5章では、一軸異方性基板によって構成した場合のエアホール型フォトニック結晶直角曲がり導波路の特性改善法について検討するため、5.1節で一軸異方性誘電体の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明し、5.2節で、通常利用されている等方性誘電体で構成した際の曲がり特性改善法の場合に、製作上の困難性を増加させることについて述べ、それに対し5.3節では、一軸異方性媒質で構成すれば、その製作上の困難性を増加させることなく、曲がり特性の改善が図れることを説明している。

第6章では、キラル媒質で構成したエアホール型フォトニック結晶導波路において偏波面が回転しながら伝搬する特性について検討するため、6.1節でキラル媒質の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明する。6.2節では、電磁界の偏波面を回転させるキラル媒質の特性を利用して、エアホール型フォトニック結晶導波路ではピラー型と比較して容易に偏波面回転特性が得られ、モード変換器の構成が可能であることを示す。

第7章では、ジャイロ異方性を有する磁化半導体プラズマ特性を利用したフォトニック結晶デバイスについて検討するため、7.1節でジャイロ異方性の凝縮節点空間回路網法における取り扱いについて説明し、7.2節で磁化半導体プラズマ特性における特徴的な特性として、電磁波の入射周波数によって波が受ける実効複素誘電率の分散曲線が変化することと、外部直流磁場の印加強度によって複素実効誘電率の制御が可能であることに着目し、「2光波入力→1光波出力」のフォトニック結晶スイッチング素子について述べている。

第8章では、2次の非線形媒質でフォトニック結晶導波路を構成した場合の高調波発生を利用したデバイスについて検討するため、8.1節で非線形媒質の凝縮節点空間回路網法における取り扱いについて説明し、8.2節でフォトニック結晶導波路における基本的な導波特性と高調波発生について検討する。また8.3節で非線形媒質による高調波の発生と、複合型フォトニック結晶導波路構造に

よるフィルタリング特性を利用したフォトニック結晶周波数変換素子を提案している。
最後に第9章で本論文の結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	宮永喜一
副査	教授	野島俊雄
副査	教授	小柴正則
副査	教授	小川恭孝
副査	助教授	吉田則信

学位論文題名

Analysis of Functional Devices in Photonic Crystal Waveguide with Various Medium Conditions by Condensed Node Spatial Network Method

(種々の媒質条件を含むフォトニック結晶導波路を利用した機能性デバイスの凝縮節点空間回路網法による解析)

近年、フォトニック結晶構造を利用した超微細構造デバイスの実現が期待されており、その工学的応用研究が活発に行われている。特に低閾値レーザや、フォトニック結晶ファイバ(PCF)またはホーリーファイバ(HF)、4光波の多重・分離素子(MUX-DEMUX)、光ファイバ中のビームの広がりを抑制するフォトニック結晶スポットサイズ変換器(PC-SSC)等、種々の導波路やデバイスの提案が数値シミュレーション等の解析結果や試作による実験結果の両面から数多く報告されている。

現在、提案・報告されているフォトニック結晶導波路デバイスの多くは、通常は無損失・線形・等方性誘電体で構成されているものが多くを占めており、この場合、デバイス規模の増大や製作の上で困難をまねく。これに対して本論文では分散性媒質、異方性媒質、非線形媒質をフォトニック結晶導波路構造に含んだ場合の特徴ある電磁界の基本的な伝搬特性を利用し、新たなフォトニック結晶導波路デバイスの検討を、複雑形状や機能性媒質条件の取扱いに威力を発揮する凝縮節点空間回路網法(CN-SNM)による数値解析のシミュレーション結果から行い、デバイス規模の縮小化と製作上の困難性を向上させないことを目指しながら、種々の具体的な機能性フォトニック結晶デバイスの構造やその特性について考察を行っている。

本論文は、全9章で構成されている。

第1章でフォトニック結晶導波路と凝縮節点空間回路網法の特徴を併せて述べ、本論文の意義について論じている。

第2章では、フォトニック結晶導波路の基本的な概念について説明している。

第3章では、本論文で用いる時間応答電磁界解析手法の凝縮節点空間回路網法について説明している。

第4章では、ローレンツ型、デバイ型分散性媒質および非磁化半導体プラズマでフォトニック結晶導波路を構成した際の減衰・増幅特性について検討するため、4.1節でこれらの媒質条件の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明し、4.2節では共鳴吸収特性を有するローレンツ型分散性媒質がピラー型フォトニック結晶導波路構造に含まれる際の減衰伝搬特性や、媒質が反転分布の状態となると仮定した場合の誘導放出による増幅伝搬特性について述べている。4.3節ではデバイ型分散性媒質が含まれる際の減衰伝搬特性について、4.4節では非磁化半導体プラズマ発生による減衰特性について述べている。

第5章では、一軸異方性基板によって構成した場合のエアホール型フォトニック結晶直角曲がり導波路の特性改善法について検討するため、5.1節で一軸異方性誘電体の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明し、5.2節で、通常利用されている等方性誘電体で構成した際の曲がり特性改善法の場合に、製作上の困難性を増加させることについて述べ、それに対し5.3節では、一軸異方性媒質で構成すれば、その製作上の困難性を増加させることなく、曲がり特性の改善が図れることを説明している。

第6章では、キラル媒質で構成したエアホール型フォトニック結晶導波路において偏波面が回転しながら伝搬する特性について検討するため、6.1節でキラル媒質の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明している。6.2節では、電磁界の偏波面を回転させるキラル媒質の特性を利用して、エアホール型フォトニック結晶導波路ではピラー型と比較して容易に偏波面回転特性が得られ、モード変換器の構成が可能であることを示している。

第7章では、ジャイロ異方性を有する磁化半導体プラズマ特性を利用したフォトニック結晶デバイスについて検討するため、7.1節でジャイロ異方性の凝縮節点空間回路網法における取り扱いについて説明し、7.2節で磁化半導体プラズマ特性における特徴的な特性として、電磁波の入射周波数によって波が受ける実効複素誘電率の分散曲線が変化することと、外部直流磁場の印加強度によって複素実効誘電率の制御が可能であることに着目し、「2光波入力→1光波出力」のフォトニック結晶スイッチング素子について述べている。

第8章では、2次の非線形媒質でフォトニック結晶導波路を構成した場合の高調波発生を利用したデバイスについて検討するため、8.1節で非線形媒質の凝縮節点空間回路網法における取扱いについて説明し、8.2節でフォトニック結晶導波路における基本的な導波特性と高調波発生について検討する。また8.3節で非線形媒質による高調波の発生と、複合型フォトニック結晶導波路構造によるフィルタリング特性を利用したフォトニック結晶周波数変換素子を提案している。

最後に第9章で本論文の結論を述べている。

これを要するに、筆者は、新たなフォトニック結晶導波路デバイスの検討を行い、種々の具体的な機能性フォトニック結晶デバイスの構造やその特性を求め、その有効性を示した。これにより、光情報通信システムの設計に関する多くの有益な知見を得ており、情報科学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、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。