

学 位 論 文 題 名

オイラー法の発散条件を用いた光導波路解析の新アルゴリズム

学位論文内容の要旨

集積光学なる概念が1969年に提出されて以来、光通信の主要な構成要素である光導波路の重要性が広く認識されるようになった。より高度な光ファイバ通信システムや光集積回路の研究開発には、光導波路の伝播特性を正確に理解するとともに、それを具体的な光デバイスの設計に結びつけることが必要となる。このためには、光導波路の数値解析が極めて有効な手段となる。これまで光導波路のための精度の高い数値解析法が種々開発され、光デバイス設計に不可欠なものとなっている。しかし従来の方法は光導波路構造の複雑化や光波のベクトル性あるいはハイブリット性を考慮したとき、計算速度かつ精度の面で効率が悪くなることが指摘されてきた。

本論文は、オイラー法の時間差分に関する発散条件を用いた数値アルゴリズムを光導波路のモード解析に初めて適用したものである。本論文ではこの方法をベクトル波解析にまで拡張し、大規模かつ高速の新しい数値解析法を確立し、またこの方法を具体的な光導波路に適用し、その有効性を実証している。

第1章では、序論を述べ、光通信における光導波路の重要性と高速かつ高精度数値解析法の必要性について概説している。第2章では、光集積回路や光デバイスの基本構成要素となる光導波路の機能、材料及び種類について概説し、本研究の目的について述べている。

第3章では、光導波路中での光波の伝播現象を理解するために必要な電磁波理論の基礎的概念を説明し、光導波路を解析するための基本となるマックスウェル方程式から波動方程式を導出し、これらの波動方程式について説明している。

第4章では、光導波路中における導波モードの伝播特性を理解するために、比較的単純な構造である2次元スラブ光導波路を取り上げ、波動理論を用いた解析法について説明している。さらに屈折率が厚み方向に変化するグレーテッド型2次元光導波路や厚み方向と同時に横方向にも光波を閉じこめる実際的な3次元光導波路に関する導波モードの近似解法であるWKB法と等価屈折率法について述べている。

第5章では、本研究で確立した光導波路のための新しい数値解析方法について、詳細な説明が与えられている。最初に第3章で導出した波動方程式に対してベクトル波、セミベクトル波近似、およびスカラー波近似の定式化を行い、有限差分近似を用いて離散化した波動方程式を導出している。次に実対称行列の固有値問題となるスカラー波近

似波動方程式と格子振動系の運動方程式との類似性に着目し、これらの対応関係により格子動力学的観点からオイラー法による時間発展の発散条件を積極的に利用することによってスカラー波近似波動方程式の固有値問題を解く方法が示される。さらにスカラー波近似波動方程式に対する格子動力学的手法を、非対称行列の固有値問題と関係するベクトル波及びセミベクトル波近似波動方程式の場合に拡張している。最後に本方法の効率の比較検討のために用いた高速性を特徴とする数値解析法であるランチョス法についても説明している。

第6章では、本数値解析法を、厳密解が知られている光導波路や実際の半導体光導波路に適用する。これらの数値解析結果を厳密解及び他の有効な数値解析手法の結果と比較検討することにより、本方法の精度および有効性が実証される。さらに必要メモリ容量が大きいため一般に数値解析が難しいとされる非対称型方向性結合器に対しても本方法が適用される。このベクトル波解析により、 x -偏光の基本結合モードばかりでなく、 y -偏光の基本結合モードの伝播特性も明らかにされる。

第7章では、本研究によって確立された光導波路の新しい数値解析法について総括し、結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 山 恒 義

副 査 教 授 大 塚 喜 弘

副 査 教 授 田 村 信 一 朗

副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

オイラー法の発散条件を用いた光導波路解析の新アルゴリズム

集積光学なる概念が1969年に提出されて以来、光通信の主要な構成要素である光導波路の重要性が広く認識されるようになった。より高度な光ファイバー通信システムや光集積回路の研究開発には、光導波路の伝搬特性を正確に理解するとともに、それを具体的な光デバイスの設計に結びつけることが必要となる。このためには、光導波路の数値解析が極めて有効な手段となる。これまで光導波路のための精度の高い多くの数値解析法が開発され、光デバイス設計に不可欠なものとなっている。しかし、光導波路構造の複雑化や光波のベクトル性あるいはハイブリッド性を考慮したとき、従来の方法は計算速度かつ精度の面で効率が悪くなることが指摘されてきた。今後の光デバイスの極限性能を拓くうえでも、ベクトル波解析が可能な高速かつ高精度の数値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、光波の波動方程式を格子動力学の運動方程式にマッピングし、オイラー法の時間差分に関する発散条件を積極的に利用することによって、ベクトル波解析も含めた光導波路解析のための高速かつ高精度の新しい数値アルゴリズム開発に関する研究成果をまとめたものである。以下に、本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第1章では、序論を述べ、光通信における光導波路の重要性と高速かつ高精度数値解析法の必要性について概説している。第2章では、光集積回路や光デバイスの基本構成要素となる光導波路の機能、材料及び種類について概説し、本研究の目的について述べている。

第3章では、光導波路中での光波の伝搬現象を理解するために必要な電磁波理論の基礎的概念を説明し、光導波路を解析するための基本となるマックスウェル方程式から波動方程式を導出し、これらの波動方程式について説明している。

第4章では、光導波路中における導波モードの伝搬特性を理解するために、比較的単純な構造である2次元スラブ光導波路を取り上げ、波動理論を用いた解析法について説

明している。さらに屈折率が厚み方向に変化するグレーテッド型2次元光導波路や厚み方向と同時に横方向にも光波を閉じこめる実際的な3次元光導波路に関する導波モードの近似解法であるWKB法と等価屈折率法について述べている。

第5章では、本研究で確立した光導波路のための新しい数値解析方法について、詳細な説明が与えられている。最初に第3章で導出した波動方程式に対してベクトル波、セミベクトル波近似、およびスカラー波近似の定式化を行い、有限差分近似を用いて離散化した波動方程式を導出している。次に実対称行列の固有値問題となるスカラー波近似波動方程式と格子動力学的運動方程式との類似性に着目し、これらの対応関係により格子動力学的観点からオイラー法による時間発展の発散条件を積極的に利用することによってスカラー波近似波動方程式の固有値問題を解く方法が示される。さらにスカラー波近似波動方程式に対する格子動力学的手法を、非対称行列の固有値問題と関係するベクトル波およびセミベクトル波近似波動方程式の場合に拡張している。最後に本方法の効率の比較検討のために用いた高速性を特徴とする数値解析法であるランチョス法についても説明している。

第6章では、本数値解析法を、厳密解が知られている光導波路や実際的な半導体光導波路に適用する。これらの数値解析結果を厳密解および他の有効な数値解析法の結果と比較検討することにより、本方法の精度および有効性が実証される。さらに必要メモリ容量が大きいため一般に数値解析が難しいとされる非対称型方向性結合器に対しても本方法が適用される。このベクトル波解析により、 x -偏光の基本結合モードばかりでなく、 y -偏光の基本結合モードの伝搬特性も明らかにされる。

第7章では、本研究によって確立された光導波路の新しい数値解析法について総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、従来の方法とは異なった視点から光導波路の数値解析法に取組み、光波のベクトル性も考慮した光導波路のための高速かつ高精度の新しい数値アルゴリズムを開発したものであり、複雑な形状の光導波路中の光波の伝搬現象に関する有益な新知見を得ており、応用物理学および光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。