

学位論文題名

光ビーム伝搬解析ソフトウェア開発のための基礎的研究

学位論文内容の要旨

光導波路を基盤とした集積ホトニクス技術が近年著しく進展し、実用化レベルに達した集積光デバイスも数多く報告されている。今後、光デバイスの集積化がさらに進み、いわゆる光集積回路(光IC)として、各種の光デバイスを一体集積化する段階においては、LSIや超LSIの開発にCADが不可欠となっているように、光ICの開発にも、やはりCADは不可欠なものになると考えられる。

ところで、光ICにおける配線の役割を担っているのは光導波路であるが、LSIにおける電気配線の場合と違って、光信号は配線内に完全には閉じ込められていない。また、光ICでは光信号の制御に利用される材料の性質にも、電気光学効果、音響光学効果、磁気光学効果、熱光学効果、非線形光学効果など、様々なものがある。このため、光CADの開発にあたっては、まず、光ICの基幹部品である光導波路や導波形光デバイスの解析・設計ツールを開発、整備し、その高信頼化を図ることが先決である。

さて、こうした光導波路の伝送特性を評価するための解析フェーズは多岐に渡るが、主として、伝搬方向に構造が変化しない直線導波路の固有伝送モードの実効屈折率と界分布を調べる導波モード解析と、伝搬方向に構造が変化する場合も含めて、光波が光導波路中をどのように伝搬していくかを調べるビーム伝搬解析とに大別される。前者については、光波帯における導波路技術の研究が開始された1960年代後半から様々な解析法が開発され、残された問題は多々あるが、現在、導波モード解析のための方法論としては、ほぼ出揃った感がある。一方、後者については、光ファイバの低損失化が実現し、その後、光導波路を駆使した集積光デバイスの高性能化、多機能化に関する研究が本格化した1980年代からその需要が急速に高まった。特に、1978年にFeitとFleckによって考案されたビーム伝搬法(BPM)は、こうしたビーム伝搬解析に極めて有効であり、様々な集積光デバイスの解析、設計に広く利用されてきた。BPMでは、通常、微小区間における光ビームの伝搬過程を、均質媒質中を伝搬するときを受ける回折の効果と、導波路構造に付随した屈折率分布による位相回転の効果とに分離する(スプリットステップアルゴリズム)。このうち、回折の効果を高速フーリエ変換(FFT)を用いて効率良く処理するBPMがFFT-BPMである。しかしながら、このFFT-BPMを屈折率差の大きな導波路や偏波依存性の強い導波路に適用することは、一般に困難である。このため、こうしたスプリットステップアルゴリズムを必ずしも必要としないBPM、具体的には差分法(FDM)を用いたFD-BPMや有限要素法(FEM)を用いたFE-BPMが種々考案されてきた。特に、FE-BPMは屈折率差の大きな導波路や偏波依存性の強い導波路にも適用できるという点で、FFT-BPMに比べて優れている。また、FE-BPMには、要求される計算精度に合わせて要素次数や要素数を任意に選択することができたり、不均一グリッドを用い、これらを伝搬方向にアダプティブに更新することにより計算精度を劣化させることなく計算の効率化を図ることができるといった、FFT-BPMやFD-BPMにはない特徴もある。しかしながら、FE-BPMの利用は、現状では、プレーナ形(2次元)等方性光導波路におけるTEモード伝搬の場合に限られており、また、ビーム伝搬解析の基本式として近軸式が用いられているた

めに、その適用は、導波路の傾斜角が十分小さい場合に限られる。また、チャネル形(3次元)光導波路に応用するための検討はほとんど行われていない。FE-BPMには前述したような特徴があることから、TMモード伝搬の場合も含めて、異方性光導波路解析や広角ビーム伝搬解析、さらには3次元光導波路解析にも適用することが可能になれば、その利用価値は一層高まるものと期待されている。

本論文は、こうした状況のもとで、光ビーム伝搬解析のためのFE-BPMの高性能化に関する研究をまとめたものである。以下に、本論文の概要を示す。

第2章では、2次元等方性光導波路解析のためのFE-BPMの定式化を、TEモード伝搬、TMモード伝搬の両方を対象として統一に行っている。ビーム伝搬解析のための基本式には、近軸式の他に、広角ビーム伝搬解析に対応可能なパデ式、ヘルムホルツ方程式も用いており、要素には、1次要素、および2次要素を用いている。有限要素グリッドは、光の強度分布に応じて各伝搬ステップごとにアダプティブに更新するアルゴリズムを採用するとともに、解析領域端からのスプリアス反射防止のために透明境界条件(TBC)を採用している。さらに、有限要素行列のバンド性とスパース性を考慮した高速計算アルゴリズムの開発も合わせて行っている。具体的に、ベンチマークテスト用の傾斜直線導波路のビーム伝搬解析を実施し、計算精度、計算効率の観点から、他の様々なBPMとの比較、検討を行い、特に2次要素を用いたパデ式に基づく広角FE-BPMがビーム伝搬解析に極めて有効であることを実証している。

第3章では、第2章で得られた成果を基にして、任意の異方性媒質からなる2次元光導波路解析のための広角FE-BPMの定式化を行っている。また、異方性光導波路解析のためのTBC、およびTE、TMモード間のモード変換が起こる場合にも対応可能な高速計算アルゴリズムも新たに開発している。さらに、ここで開発したFE-BPMを用いて非相反性を有する磁気光学導波路のビーム伝搬解析を初めて行い、これらの非相反光デバイスの動作特性にを明らかにしている。

第4章では、3次元光導波路解析のための広角FE-BPMの定式化を、スカラー波近似に基づいて行っている。曲線境界も含めた任意の導波路断面形状に対応するため、要素にはアイソパラメトリック三角形2次要素を用いている。また、3次元光導波路解析用のTBCも新たに開発している。具体的に、ベンチマークテスト用のリブ形光導波路のガウスビーム励振問題、Y分岐リブ導波路の分岐部における放射問題を取り上げ、ここで開発した3次元FE-BPMの妥当性、有効性を確認している。さらに、光ICの立体化に有望とされているARROW導波路に代表されるリーキー導波路の解析、設計にも、こうしたビーム伝搬解析が有効に利用できることを初めて明らかにしている。

第5章では、FE-BPMをソルバーとして用いた光ビーム伝搬解析ソフトウェアのプロトタイプの開発を行っている。こうした光CADでは、ソルバーの高速性、高信頼性に加えて、ユーザインターフェースが重要な役割を担っている。ここでは、Xウインドー上での動作を念頭におき、マウス、およびキーボード操作によって、導波路形状定義、パラメータ入力から数値結果の可視化までを対話形式で一貫して行える解析環境を実現している。

第6章では、本論文で得られた結論をまとめている。

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 栃 内 香 次
副 査 教 授 小 川 恭 孝

学位論文題名

光ビーム伝搬解析ソフトウェア開発のための基礎的研究

光導波路を基盤とした集積ホトニクス技術が近年著しく進展し、実用化レベルに達した集積光デバイスも数多く報告されている。今後、光デバイスの集積化がさらに進み、いわゆる光集積回路(光IC)として、各種の光デバイスを一体集積化する段階においては、LSIや超LSIの開発にCADが不可欠となっているように、光ICの開発にも、やはりCADは不可欠なものになると考えられる。

さて、こうした光導波路の伝送特性を評価するための解析フェーズは多岐に渡るが、現実的な伝搬方向に構造が変化する場合の光ビーム伝搬解析には、ビーム伝搬法(BPM)が極めて有効であり、様々な集積光デバイスの解析、設計に広く利用されてきた。BPMは界の横方向の離散化の方法により、高速フーリエ変換(FFT)を用いたFFT-BPM、差分法(FDM)を用いたFD-BPM、有限要素法(FEM)を用いたFE-BPMに大別されるが、特に、FE-BPMは屈折率差の大きな導波路や偏波依存性の強い導波路にも適用できるという点で、FFT-BPMに比べて優れている。また、FE-BPMには、要求される計算精度に合わせて要素次数や要素数を任意に選択することができたり、不均一グリッドを用い、これらを伝搬方向にアダプティブに更新することにより計算精度を劣化させることなく計算の効率化を図ることができるといった、FFT-BPMやFD-BPMにはない特徴もある。したがって、FE-BPMをTMモード伝搬の場合も含めて、異方性光導波路解析や広角ビーム伝搬解析、さらには3次元光導波路解析にも適用することが可能になれば、その利用価値は一層高まるものと期待されている。

本論文は、こうした状況のもとで、光ビーム伝搬解析のためのFE-BPMの高性能化に関する研究の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2章では、2次元等方性光導波路解析のためのFE-BPMの定式化を、TEモード伝搬、TMモード伝搬の両方を対象として初めて統一的行っている。ビーム伝搬解析のための基本式には、近軸式の他に、広角ビーム伝搬解析に対応可能なパデ式、ヘルムホルツ方程式も用いており、要素には、1次要素、および2次要素を用いている。有限要素グリッドは、光の強度分布に応じて各伝搬ステップごとにアダプティブに更新するアルゴリズムを採用するとともに、解析領域端からのスプリアス反射防止のために透明境界条件(TBC)を採用している。さらに、有限要素行列のバンド性とスパース性とを考慮した高速計算アルゴリズムの開発も合わせて行っている。具体的に、ベンチマークテスト用の傾斜直線導波路のビーム伝搬解析を実施し、計算精度、計算効率の観点から、他の様々なBPMとの比較、検討を行い、特に2次要素を用いたパデ式に基づく広角FE-BPMがビーム伝搬解析に極めて有効であることを実証し

ている。

第3章では、第2章で得られた成果を基にして、任意の異方性媒質からなる2次元光導波路解析のための広角FE-BPMの定式化を行っている。また、異方性光導波路解析のためのTBC、およびTE、TMモード間のモード変換が起こる場合にも対応可能な高速計算アルゴリズムも新たに開発している。さらに、ここで開発したFE-BPMを用いて非相反性を有する磁気光学導波路のビーム伝搬解析を初めて行い、これらの非相反光デバイスの動作特性を明らかにしている。

第4章では、3次元光導波路解析のための広角FE-BPMの定式化を、スカラー波近似に基づいて行っている。曲線境界も含めた任意の導波路断面形状に対応するため、要素にはアイソパラメトリック三角形2次要素を用いている。また、3次元光導波路解析用のTBCも新たに開発している。具体的に、ベンチマークテスト用のリブ形光導波路のガウスビーム励振問題、Y分岐リブ導波路の分岐部における放射問題を取り上げ、ここで開発した3次元FE-BPMの妥当性、有効性を確認している。さらに、光ICの立体化に有望とされているARROW導波路に代表されるリーキー導波路の解析、設計にも、こうしたビーム伝搬解析が有効に利用できることを初めて明らかにしている。

第5章では、FE-BPMをソルバーとして用いた光ビーム伝搬解析ソフトウェアのプロトタイプの開発を行っている。ここでは、Xウィンドー上での動作を念頭におき、マウス、およびキーボード操作によって、導波路形状定義、パラメータ入力から数値結果の可視化までを対話形式で一貫して行える解析環境を実現している。

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、導波形集積光デバイスの解析、設計に必須のビーム伝搬法の高性能化を実現するとともに、光ビーム伝搬解析ソフトウェア開発ならびに光導波路中の光ビーム伝搬現象に関す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。