

学位論文題名

光グレーティング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ているが、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 の場合と同様に、CAD が不可欠なものになると考えられる。実際、ここ数年、光 IC の設計を支援するための CAD、いわば光 CAD の研究開発が立ち上がり始め、一部は商品化されるに至っている。また、デバイス単体のみならず、光源となる半導体レーザーから光検出器に至るまでの通信システム全体の伝送シミュレーションを可能とするような光 CAD の開発プロジェクトも立ち上がり始めている。

ところで、光 IC における配線、すなわち光配線の可能性として、(1) 電気配線の限界を破る超高速光配線、(2) 膨大な入出力を有するシステムの高密度光配線、(3) 電力制限による速度制限を破る低電力光配線、(4) プログラマブルな機能をもった配線、などが考えられ、電気配線をしのぐものとして期待は大きい。こ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 では基板材料一つをとってみても、ガラス、強誘電体、半導体、有機材料など、極めて多岐にわたっており、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。

こうした様々な光デバイスのなかでも、とりわけ誘電体格子(グレーティング)は光通信、光情報処理の分野で欠くことのできないキーデバイスの一つになっており、特に最近、光グレーティング設計のための高性能 CAD に対する要求が高まっている。光グレーティングは二つの隣接する媒質の境界に周期的に溝(グループ)を設けたり、あるいは周期的に誘電率(または屈折率)が変化するような層を挟んだりして、誘電率を周期的に変調させたものである。二つの媒質の境界が単純な平面境界であれば、一方の媒質から入射してきた光は、よく知られたフレネルの公式にしたがって一部は反射し、一部は透過するが、周期的に変化する境界があると、無変調の場合に反射・透過する方向とは異なる方向にも光が回折される。

このような光グレーティング特有の性質を利用すると、単独で、あるいは他の素子と組み合わせ、入出力結合器、偏光器、分波器、反射器、モード変換器、波長フィルタなどの様々な機能素子を実現できる。こうしたことから、光グレーティングの回折特性を予め理論的に予測し、その振舞いを明らかにするとともに、その結果を光グレーティングの設計に反映させるための解析法の開発が以前から進められており、既に、モード結合理論、空間高調波展開法、ユニモーメント法、微分法、境界要素法、伝達行列法など、各種の解析法が確立されるに至っている。これらの解析法は、いずれもそれぞれに特徴を有しており、広く用いられているが、任意形状の光グレーティングに直接適用することは比較的困難である。これに対して本研究で採用した有限要素法は、任意形状の光グレーティングを直接取り扱うことができるばかりでなく、損失媒質や異方性媒質などからなる光グレーティングにも容易に適用できるため、その早期実現が強く望まれている光グレーティング解析ソフトウェアを構築するうえでも有効と考え

られる。

本論文では、こうした状況のもとで、光グレーティングの有限要素法に基づく解析法ならびに光グレーティング解析ソフトウェアの開発に関する研究についてまとめたものである。具体的には、グレーティング光導波路の反射特性、等方性/異方性光グレーティングのプレーナ/コンニカル回折特性の解析法を新たに開発している。また、これらの解析法をソルバーに内蔵した光グレーティング解析ソフトウェアのプロトタイプの開発もあわせて行っている。以下に本論文の概要を示す。

第2章では、グレーティング光導波路の反射特性を簡単に評価するための一方法として、モード結合理論 (CMT) と有限要素法 (FEM) とを組み合わせた解析法 (CMT-FEM) を新たに提案している。多数の不連続箇所をもつグレーティング光導波路の反射特性の評価に CMT を用いているので、計算時間はグレーティング長によらない。また、FEM はグレーティング光導波路の1周期に相当する領域にのみ適用され、モード結合方程式中の結合係数の決定に用いられている。このため、任意形状のグレーティング光導波路の解析が可能であり、非伝搬モードのエネルギー蓄積効果も自動的に考慮される。具体的に、屈折率変調型グレーティング反射器の解析を行い、他の解析法による結果との比較から、本手法の妥当性を確認している。また、グループ型グレーティング反射器の設計に本手法を応用し、その有用性を示している。

第3章では、任意形状の光グレーティングによるプレーナ回折特性の FEM に基づく解析法を提案し、TE 波入射と TM 波入射、等方性媒質と異方性媒質のいずれの場合をも対象として統一的な定式化を行っている。特に、異方性光グレーティングの FEM 解析は、本研究によって初めて可能になったものである。具体的に、屈折率変調型グレーティング、グループ型グレーティングの回折特性を評価し、他の解析法による結果や実験結果との比較から、本手法の妥当性を確認している。

第4章では、任意形状の光グレーティングによるコンニカル回折特性の FEM に基づく解析法を提案している。第3章ではプレーナ回折、すなわちグレーティングベクトルが入射平面内にある場合に限定されていたが、本章では、より一般的なコンニカル回折、すなわちグレーティングベクトルが入射平面内でない場合の取扱いを可能としている。FEM の光グレーティングへの応用はこれまでも二、三試みられてきたが、いずれもプレーナ回折の場合に限られており、本研究でコンニカル回折の場合の取扱いが初めて可能となった。具体的に、他の解析法による結果との比較から本手法の妥当性を確認するとともに、回折効率の最大化を実現するためのパラメータの決定の仕方に関して詳細な調査を行い、その指針を提供している。

第5章では、前章までに述べた理論に基づき、これらをソルバーに内蔵した光グレーティング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、グレーティング形状の定義、各種パラメータ入力から最終的な数値結果の可視化までの一連の作業をインタラクティブに進めることができるような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 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

光グレーティング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ているが、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 の場合と同様に、CAD が不可欠なものになると考えられる。実際、ここ数年、光 IC の設計を支援するための CAD、いわば光 CAD の研究開発が立ち上がり始め、一部は商品化されるに至っている。また、デバイス単体のみならず、光源となる半導体レーザから光検出器に至るまでの通信システム全体の伝送シミュレーションを可能とするような光 CAD の開発プロジェクトも立ち上がり始めている。

こうした様々な光デバイスのなかでも、とりわけ誘電体格子（グレーティング）は光通信、光情報処理の分野で欠くことのできないキーデバイスの一つになっており、特に最近、光グレーティング設計のための高性能 CAD に対する要求が高まっている。こうしたことから、光グレーティングの回折特性を予め理論的に予測し、その振舞いを明らかにするとともに、その結果を光グレーティングの設計に反映させるための解析法の開発が以前から進められており、既に、モード結合理論、空間高調波展開法、ユニモーメント法、微分法、境界要素法、伝達行列法など、各種の解析法が確立されるに至っている。これらの解析法は、いずれもそれぞれに特徴を有しており、広く用いられているが、任意形状の光グレーティングに直接適用することは比較的困難である。これに対して本研究で採用した有限要素法は、任意形状の光グレーティングを直接取り扱うことができるばかりでなく、損失媒質や異方性媒質などからなる光グレーティングにも容易に適用できるため、その早期実現が強く望まれている光グレーティング解析ソフトウェアを構築するうえでも有効と考えられる。

本論文は、こうした状況のもとで、光グレーティングの有限要素法に基づく解析法ならびに光グレーティング解析ソフトウェアの開発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、グレーティング光導波路の反射特性を簡単に評価するための一方法として、モード結合理論（CMT）と有限要素法（FEM）とを組み合わせた解析法（CMT-FEM）を新たに提案している。多数の不連続箇所をもつグレーティング光導波路の反射特性の評価に CMT を用いているので、計算時間はグレーティング長によらない。また、FEM はグレーティング光導波路の 1 周期に相当する領域にのみ適用され、モード結合方程式中の結合係数の決定に用いられている。このため、任意形状のグレーティング光導波路の解析が可能であり、非伝搬モードのエネルギー蓄積効果も自動的に考慮される。具体的に、屈折率変調型グレーティング反射器の解析を行い、他の解析法による結果との比較から、本手法の妥当性を確認している。また、グループ型グレーティング反射器の設計に本手法を応用し、その有用性を示している。

第3章では、任意形状の光グレーティングによるプレーナ回折特性のFEMに基づく解析法を提案し、TE波入射とTM波入射、等方性媒質と異方性媒質のいずれの場合をも対象として統一的な定式化を行っている。特に、異方性光グレーティングのFEM解析は、本研究によって初めて可能になったものである。具体的に、屈折率変調型グレーティング、グループ型グレーティングの回折特性を評価し、他の解析法による結果や実験結果との比較から、本手法の妥当性を確認している。

第4章では、任意形状の光グレーティングによるコニカル回折特性のFEMに基づく解析法を提案している。第3章ではプレーナ回折、すなわちグレーティングベクトルが入射平面内にある場合に限定されていたが、本章では、より一般的なコニカル回折、すなわちグレーティングベクトルが入射平面内にない場合の取扱いを可能としている。FEMの光グレーティングへの応用はこれまで二、三試みられてきたが、いずれもプレーナ回折の場合に限られており、本研究でコニカル回折の場合の取扱いが初めて可能となった。具体的に、他の解析法による結果との比較から本手法の妥当性を確認するとともに、回折効率の最大化を実現するためのパラメータの決定の仕方に関して詳細な調査を行い、その指針を提供している。

第5章では、前章までに述べた理論に基づき、これらをソルバーに内蔵した光グレーティング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、グレーティング形状の定義、各種パラメータ入力から最終的な数値結果の可視化までの一連の作業をインタラクティブに進めることができるような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。

これを要するに、著者は、光通信、光情報処理の分野で欠くことのできないキーデバイスの一つである光グレーティングに対して、2次元構造に限れば、あらゆる使用状況下での回折特性評価を可能とする理論を新たに構築し、これを基にして、光グレーティング解析ソフトウェアを開発するとともに、光グレーティング回折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。