

学位論文題名

A Study on Numerical Analysis of Curved Optical Waveguides by the Finite-Element Method

(有限要素法による曲がり光導波路の数値解析に関する研究)

学位論文内容の要旨

最近、情報処理分野への光技術導入に関する研究開発が活発化している。光デバイスの計算機への本格的な導入のためには、光デバイスの集積化、いわゆる光集積回路として光デバイスを一体集積化することが必要である。

さて、光集積回路の構成部品には様々なものがあるが、とりわけ、曲がりをもった光導波路はその最も基本的な構成要素の一つであると同時に、リング導波路レーザーといった単体の光デバイスにも積極的に利用されるなど、各方面で注目を集めている。こうした曲がり導波路を用いた各種光デバイスの高性能化を図っていくためには、その動作特性を正確に予測できるデバイスシミュレータを開発しておくことが必要であるが、通常の直線状導波路に比べて、曲がり導波路の解析は格段に難しく、特に、集積化に必須の3次元(チャンネル)導波路の場合には、これまで主に、解析的なアプローチによって解析が試みられてきた。解析的方法は工学的な見通しが良い反面、一般に汎用性に乏しい。実際、曲がり導波路の場合には、矩形の断面をもつ構造にのみ有効であり、それ以外の構造には適用できない。また、リング導波路の導波モードの一つであり、実用的にも重要なウィスパリングギャラリーモード(WGM: Whispering Gallery Mode)の解析もできない。WGMは内側のクラディングが不要であること、リング径が小さくなるとともに通常の導波モードがWGMに近づくことなどから、光集積回路の構成に有利な性質をもっている。

ところで、直線状の光導波路の解析、設計には、既に種々の数値解法が利用され、デバイス特性の向上に役立っている。特に、スカラ波近似に基づく有限要素法(SFEM: Scalar Finite Element Method)は、極めて汎用性が高く、また、ベクトル有限要素法で問題となるスプリアス解も発生しないことから、光導波路デバイス設計用CADの解析ツールとしても広く利用されつつある。

本論文は、このような状況のもとで、曲がり光導波路の解析ツールならびにデバイスシミュレータ開発に関する研究結果をまとめたものである。具体的には、曲がりによる放射を無視した場合と考慮した場合に対する2種類のSFEMを新たに開発するとともに、これらのSFEMを解析ツールとして用いた曲がり光導波路デバイスシミュレータを構築している。また、リブ導波路における導波モード、リング導波路や誘電体円板におけるWGMの伝送特性を解析し、曲率半径あるいは導波路の断面形状がこれらのモードの伝搬特性に与える影響を明らかにしている。

第1章では、本研究の背景、目的、論文全体の構成について述べている。

第2章では、スカラ波近似を導入し、曲がり導波路における準TE(Transverse Electric)モード、準TM(Transverse Magnetic)モード解析のための基礎方程式を導いている。

第3章では、曲がりによる放射を無視した場合のSFEMの定式化を行っている。具体的には、導波部から十分離れた位置に仮想境界を設定し、この境界にノイマン条件を課すことによって、曲がり導波路の伝搬問題を通常の一般化固有値問題に帰着させている。さらに、ここで定式化したSFEMを解析ツールとして用いて、曲がり光導波路デバイス設計支援のため

のシミュレータ COW (Curved Optical Waveguide) を構築し、そのプログラム、ファイル構成について述べている。なお、COWでは、上記の一般化固有値問題をジェニングス法を用いて解いている。

第4章では、曲がりによる放射を考慮した場合のSFEMの定式化を行っている。具体的には、導波路の外側境界においてハンケル関数を用いた解析的關係式を接続することにより、放射を伴う曲がり導波路の伝搬問題を非線形の複素一般化固有値問題に帰着させている。さらに、ここで定式化したSFEMを解析ツールとして用いて、曲げ損失の評価が可能なシミュレータ COWL (Curved Optical Waveguide with curvature Loss) を構築し、ハンケル関数の評価方法、プログラム、ファイル構成について述べている。なお、COWLでは、上記の非線形の複素一般化固有値問題を反復法を用いて解いている。

第5章では、COW、COWLの性能評価を詳細に行っている。まず、リング導波路、リブ導波路を取り上げ、COWLによる曲げ損失値の数値的安定性について調査している。この結果、ハンケル関数を用いた解析的關係式を接続する境界の位置が曲げ損失値に比較的大きな影響をもつこと、境界の位置を適当に設定することにより、曲げ損失が安定に算出されることが確かめられた。また、これらの曲げ損失値は実験による結果とよく一致している。次に、リング導波路、誘電体円板内のWGMの角度伝搬定数を評価し、曲率半径が十分に大きく、曲げ損失が無視できる場合には、COWとCOWLとで、ほぼ一致した結果が得られることを確認した。CPU時間を比較すると、COWはCOWLの約25倍高速であることから、曲げ損失が無視できる場合や初期設計にはCOWが有効であると判断される。

第6章では、光集積回路の構成に多用されるリブ導波路を取り上げ、断面の形状を台形として一般化し、断面の形状が光強度のピーク位置、角度伝搬定数に与える影響を調べている。ピーク位置は、曲率半径が小さくなるとともにリブの外側に移動すること、このピーク位置の移動量と角度伝搬定数の間には正の相関があること、角度伝搬定数と曲率半径の間には負の相関があること、などを見出している。

第7章では、様々な応用が期待されているWGMについての検討を行っている。まず、リング導波路にWGMが存在することを示し、そのための最小の導波路幅を求めるとともに、その最小幅と曲率半径の間には正の相関があることを見出している。次に、誘電体円板におけるWGMの基本モードと1次、および2次の高次モードの伝搬特性を調べ、いずれのモードも、曲げ損失は曲率半径が大きくなるとともに急速に減少すること、高次のモードほど曲げ損失が大きいことを示している。また、角度伝搬定数は曲率半径が大きくなるとともに急激に増加するが、これは、角度伝搬定数と曲げ半径との間に負の相関があるリブ導波路と対照的である。さらに、円板のエッジの傾きや凹凸の影響を調べ、凹凸の影響はエッジの傾きの影響に比べて小さいことを明らかにしている。

第8章では、各章の結果を総括している。

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 本 間 利 久
副 査 教 授 朝 倉 利 光

学 位 論 文 題 名

A Study on Numerical Analysis of Curved Optical Waveguides by the Finite-Element Method

(有限要素法による曲がり光導波路の数値解析に関する研究)

最近、情報処理分野への光技術導入に関する研究開発が活発化している。光デバイスの計算機への本格的な導入のためには、光デバイスの集積化、いわゆる光集積回路として光デバイスを一体集積化することが必要である。

さて、光集積回路の構成部品には様々なものがあるが、とりわけ、曲がりをもった光導波路はその最も基本的な構成要素の一つであると同時に、リング導波路レーザーといった単体の光デバイスにも積極的に利用されるなど、各方面で注目を集めている。こうした曲がり導波路を用いた各種光デバイスの高性能化を図っていくためには、その動作特性を正確に予測できるデバイスシミュレータを開発しておくことが必要であるが、通常の直線状導波路に比べて、曲がり導波路の解析は格段に難しく、特に、集積化に必須の3次元(チャネル)導波路の場合には、これまで主に、解析的なアプローチによって解析が試みられてきた。解析的方法は工学的な見通しが良い反面、一般に汎用性に乏しい。実際、曲がり導波路の場合には、矩形の断面をもつ構造にのみ有効であり、それ以外の構造には適用できない。また、リング導波路の導波モードの一つであり、実用的にも重要なウィスパリングギャラリーモード(WGM: Whispering Gallery Mode)の解析もできない。

本論文は、このような状況のもとで、曲がり光導波路のスカラ波近似に基づく有限要素法(SFEM: Scalar Finite Element Method)の開発、ならびにデバイスシミュレータの開発に関する研究結果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景、目的、論文全体の構成について述べている。

第2章では、スカラ波近似を導入し、曲がり導波路における準TE(Transverse Electric)モード、準TM(Transverse Magnetic)モード解析のための基礎方程式を導いている。

第3章では、曲がりによる放射を無視した場合のSFEMの定式化を行っている。具体的には、導波部から十分離れた位置に仮想境界を設定し、この境界にノイマン条件を課すことによって、曲がり導波路の伝搬問題を通常の一般化固有値問題に帰着させている。さらに、ここで定式化したSFEMを解析ツールとして用いて、曲がり光導波路デバイス設計支援のためのシミュレータCOW(Curved Optical Waveguide)を構築し、そのプログラム、ファイル構成について述べている。

第4章では、曲がりによる放射を考慮した場合のSFEMの定式化を行っている。具体的には、導波路の外側境界においてハンケル関数を用いた解析的関係式を接続することにより、放射を伴う曲がり導波路の伝搬問題を非線形の複素一般化固有値問題に帰着させている。さらに、ここで定式化したSFEMを解析ツールとして用いて、曲げ損失の評価が可能なシミュレータCOWL(Curved Optical Waveguide with curvature Loss)を構築し、ハンケル関数の評価

方法、プログラム、ファイル構成について述べている。

第5章では、COW、COWLの性能評価を詳細に行っている。まず、リング導波路、リブ導波路を取り上げ、COWLによる曲げ損失値の数値的安定性について調査している。次に、リング導波路、誘電体円板内のWGMの角度伝搬定数を評価し、曲率半径が十分に大きく、曲げ損失が無視できる場合には、COWとCOWLとで、ほぼ一致した結果が得られることを確認している。CPU時間を比較すると、COWはCOWLの約25倍高速であることから、曲げ損失が無視できる場合や初期設計にはCOWが有効であることを示している。

第6章では、光集積回路の構成に多用されるリブ導波路を取り上げ、断面の形状を台形として一般化し、断面の形状が光強度のピーク位置、角度伝搬定数に与える影響を調べている。

第7章では、様々な応用が期待されているWGMについての検討を行っている。まず、リング導波路にWGMが存在することを示し、そのための最小の導波路幅を明らかにしている。次に、誘電体円板におけるWGMの基本モードと1次、および2次の高次モードの伝搬特性を調べ、いずれのモードも、曲げ損失は曲率半径が大きくなるとともに急速に減少すること、高次のモードほど曲げ損失が大きいことを示している。

第8章では、各章の結果を総括している。

これを要するに、著者は、曲がり光導波路の解析ツールならびに曲がり導波路を用いた光デバイス設計支援のためのシミュレータを開発することに成功し、光集積回路の設計指針を与える有益な新知見を得ており、光エレクトロニクスの進歩に貢献するところ大である。

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。