

学位論文題名

A study on a numerical analysis method for
nonlinear optical channel waveguides and its applications

(非線形チャネル光導波路の数値解析法の開発とその応用に関する研究)

学位論文内容の要旨

レーザの出現以後、光ファイバの実用化とともに、様々な機能を有する光デバイスの研究開発が進められ、光エレクトロニクスは通信や情報処理の分野を中心に、今や不可欠な技術となっている。しかし、現状の光ファイバネットワークや光情報処理が、光波自体が有する高速性を十分に活かしているとはいえない。その理由としては、分岐、増幅、スイッチングなどの信号処理の多くを、光電変換を介した電氣的処理に依存しているため、電子デバイス内部でのキャリアの移動速度や回路の時定数によって動作速度の上限が決まってしまうことなどが挙げられる。その一方で、高度化する通信・情報処理技術の進展とともに、既存の光ファイバ通信システムに対する、より一層の高速化・大容量化への要求が高まりつつある。光波のポテンシャルを十分に引き出し、より高速で大容量の光通信を実現するためには、こうした電子デバイスが介在した形での光信号処理が有する限界を超越しなければならない。

このような背景から、現在、光波の特性を活かし、様々な光学効果を応用して光信号を制御する「全光学的信号処理」への関心が高まり、研究が世界的に進められている。また、光双安定素子、光論理素子などの全光学的光信号処理の実現のために、非線形光学効果を利用した光ファイバや導波型光学デバイスの応用が期待されている。これに伴い、非線形光導波路の解析法の開発とその性能評価が様々に展開されている。プレーナ構造、あるいは軸対称構造をもつ非線形光導波路の解析の場合には、1次元解析を行えばよく、数学的にも取り扱いやすく、厳密解が知られているものもある。これらの導波路の解析データは非線形光導波路の基礎的な特性を知るのに有用である。しかし、実際的な非線形光学デバイスの構成に必要な非線形チャネル光導波路の場合には、2次元解析を伴うため、プレーナ構造や軸対称構造の場合と比較して、格段に複雑で困難なものとなる。厳密解が得られるのは極めて稀で、大胆な近似を前提とした解析や数値解析に頼らざるを得ない。このため、解析結果の報告例も少ない。

こうした状況の下で、最近、非線形チャネル光導波路の解析に等価屈折率法や有限要素法の適用が試みられ始めている。特に、有限要素法は、導波路形状や屈折率分布の如何にかかわらず適用でき、ベクトル波解析も可能であることから、3次元構造の非線形光導波路の解析にも柔軟に対応できるものと考えられる。本論文では、これまで線形的光導波路解析に多用されてきた有限要素法を非線形チャネル光導波路の伝送特性の評価に必要な導波モード解析とビーム伝搬解析に新たに導入するとともに、これを様々な非線形光導波路に適用して、有限要素法がこうした非線形光導波路の解析や設計に有用かつ有効であることを示している。

ところで、最近、光導波路を基盤とした集積光デバイス技術が進展し、実用化の報告も数多くなされている。今後、光デバイスの集積度が高まり、光集積回路(光IC)として各種光デ

バイスを一体化する場合には、その設計を支援するCAD (Computer-Aided Design) が必要になると予想される。実際、光IC用CAD (光CAD) システムの研究開発が急速に進展しており、一部には実用化され、商品化されているものもある。ここで開発した非線形光導波路の解析アルゴリズムは、ワークステーションあるいはパーソナル・コンピュータ上で動作する非線形光導波路ならびに非線形光デバイスの解析・設計支援システムへの搭載を想定しているものである。

以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、非線形チャネル光導波路の有限要素法による導波モード解析の効率化を図ることを目的として、スカラ波近似を導入するとともに、三角形アイソパラメトリック要素を用いた離散化、さらには要素行列の作成に必要な積分計算にハンマーらの数値積分公式を適用することを試みている。非線形光ファイバを対象として数値的に種々検討を行い、本手法では、小規模な計算で高精度な解が得られることを明らかにしている。また、非線形グレーデッド型チャネル光導波路の解析を初めて行い、基板の屈折率分布が導波モードの実効屈折率の光パワー依存性に与える影響を調べている。

第3章では、非線形チャネル光導波路のビーム伝搬解析の定式化を行っている。導波路の断面内と伝搬方向の離散化に、スカラ有限要素法とクランク・ニコルソン差分法をそれぞれ適用している。効率的な広角ビーム伝搬解析のために、導波路伝搬方向の差分演算子にPadé近似を導入している。また、高速高精度計算を実現するために、ここでも三角形アイソパラメトリック要素とハンマーらの数値積分公式を導入している。線形コアと非線形クラッドからなる光ファイバを対象として数値的検討を行い、非線形導波光に特有な振舞いを調査している。さらに、光ファイバと非線形薄膜からなる3次元構造の光論理ゲートを新たに提案し、その論理演算機能を明らかにしている。

第4章では、非線形チャネル光導波路のベクトル有限要素法による導波モード特性解析の定式化を行っている。導波路断面内の界を補間するエッジ要素と伝搬方向の界を補間するノード要素を組み合わせたハイブリッド要素を非線形光導波路解析に初めて導入している。線形コアと非線形クラッドからなる光ファイバ、非線形薄膜を装荷したチャネル光導波路、そして非線形多重量子井戸を組み込んだチャネル光導波路を対象として、導波モード解析を行っている。また、スカラ有限要素法による結果と比較し、導波光の非線形性が強く現われる、入射光パワーの高い領域で生じるスカラ波近似の適用限界について調査している。

第5章では、非線形チャネル光導波路のベクトルビーム伝搬解析の定式化を行っている。導波路の断面内と伝搬方向の離散化に、ベクトル有限要素法とクランク・ニコルソン差分法をそれぞれ適用している。効率的な広角ビーム伝搬解析のためのPadé近似をベクトル波動解析の場合にも導入することに成功している。また、ここで新たに開発したベクトルビーム伝搬解析法の妥当性を確認するために、非線形コアと線形クラッドからなる光ファイバを対象として初期的な検討を行っている。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

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
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

A study on a numerical analysis method for nonlinear optical channel waveguides and its applications

(非線形チャネル光導波路の数値解析法の開発とその応用に関する研究)

光波エレクトロニクスは通信や情報処理の分野を中心に、今や不可欠な技術となっているが、現状の光ファイバネットワークや光情報処理が、光波自体が有する高速性を十分に活かしているとはいえない。すなわち、分岐、増幅、スイッチングなどの信号処理の多くを、光電変換を介した電氣的処理に依存しているため、電子デバイス内部でのキャリアの移動速度や回路の時定数によって動作速度の上限が決まってしまう。

このような背景から、非線形光学効果を利用した光ファイバや導波型光学デバイスの全光学信号処理への応用が期待されており、これに伴い、非線形光導波路の解析法の開発とその性能評価が様々な展開されている。プレーナ構造、あるいは軸対称構造をもつ非線形光導波路の場合には、1次元解析を行えばよく、数学的な取扱いも比較的容易で、厳密解が知られているものもある。これらの導波路の解析データは非線形光導波路の基礎的な特性を知るのに有用である。しかし、実際の非線形光学デバイスの構成に必要な非線形チャネル光導波路の場合には、2次元解析を伴うため、プレーナ構造や軸対称構造の場合と比較して、その取扱いは格段に複雑で困難なものとなる。

こうした状況の下で、最近、非線形チャネル光導波路の解析に等価屈折率法や有限要素法の適用が試みられ始めている。特に、有限要素法は、導波路形状や屈折率分布の如何にかかわらず適用でき、ベクトル波解析も可能であることから、3次元構造の非線形光導波路の解析にも柔軟に対応できると考えられる。本論文では、これまで線形の光導波路解析に多用されてきた有限要素法を非線形チャネル光導波路の伝送特性の評価に必要な導波モード解析とビーム伝搬解析に新たに導入するとともに、これを様々な非線形光導波路に適用して、有限要素法がこうした非線形光導波路の解析や設計に有用かつ有効であることを示している。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、非線形チャネル光導波路の有限要素法による導波モード解析の効率化を図ることを目的として、スカラ波近似を導入するとともに、三角形アイソパラメトリック要素を用いた離散化、さらには要素行列の作成に必要な積分計算にハンマーらの数値積分公式を適用することを試みている。また、非線形グレーデッド型チャネル光導波路の解析を初めて行い、基板の屈折率分布が導波モードの実効屈折率の光パワー依存性に与える影響を調べている。

第3章では、非線形チャネル光導波路のビーム伝搬解析の定式化を行っている。導波路の断面内と伝搬方向の離散化に、スカラ有限要素法と克蘭ク・ニコルソン差分法をそれぞれ適用している。効率的な広角ビーム伝搬解析のために、導波路伝搬方向の差分演算子に Padé 近似を導入している。線形コアと非線形クラッドからなる光ファイバを対象として数値的検討を行い、非線形導波光に特有な振舞いを調査している。さらに、光ファイバと非線形薄膜からなる3次元構造の光論理ゲートを新たに提案し、その論理演算機能を明らかにしている。

第4章では、非線形チャネル光導波路のベクトル有限要素法による導波モード特性解析の定式化を行っている。導波路断面内の界を補間するエッジ要素と伝搬方向の界を補間するノードル要素を組み合わせたハイブリッド要素を非線形光導波路解析に初めて導入している。線形コアと非線形クラッドからなる光ファイバ、非線形薄膜を装荷したチャネル光導波路、そして非線形多重量子井戸を組み込んだチャネル光導波路を対象として、入射光パワーの高い領域で生じるスカラ波近似の適用限界について調査している。

第5章では、非線形チャネル光導波路のベクトルビーム伝搬解析の定式化を行っている。導波路の断面内と伝搬方向の離散化に、ベクトル有限要素法と克蘭ク・ニコルソン差分法をそれぞれ適用している。効率的な広角ビーム伝搬解析のための Padé 近似をベクトル波解析の場合にも導入することに成功している。

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、非線形チャネル光導波路の伝送特性を精度よく、また効率よく評価することが可能な新しい数値解析法を開発するとともに、非線形導波光の特異な振舞いならびにその全光学的信号処理への応用に関する有益な知見を得たものであり、光波エレクトロニクスの分野に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。