

学 位 論 文 題 名

A study on an analysis and design method
for integrated photonic devices based
on nonlinear optical effects and its applications

(非線形光学効果に基づく集積光デバイスの解析設計法と
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・大容量化が急務となっている．また，光ファイバ通信システムの高速化・大容量化に伴い，ネットワークを介してやりとりされるデータも莫大なものとなり，その記録媒体の大容量化への要求も高まっている．

このような背景から，現在，より高速な信号処理を可能とする光電変換を介さない全光学的信号処理，記憶媒体の大容量化を可能とする青色から紫外といった，より短波長域におけるコヒーレント光源に対する関心が高まっている．特に，光強度に依存する非線形屈折率を利用した光双安定素子，論理演算素子などの全光学的信号処理デバイスや第二高調波発生 (SHG: second harmonic generation) を利用した波長変換型短波長コヒーレント光源の高性能化，高信頼化，低価格化を目指して，集積化に有利な非線形光導波路の研究開発が活発化している．

さて，こうした非線形光学効果に基づく導波型光デバイスの設計，特性評価には導波路内部における光波の伝搬の様子を正確に把握しておくことが必要である．しかしながら，非線形光導波路の光波伝搬解析は，線形の場合に比べて一般に難しく，導波型非線形光デバイスの偏波依存性も含めたベクトル波としての実モデルシミュレーションが可能な解析設計法の開発は，まだ十分には進んでいない．例えば，屈折率が光強度に依存して変化する光カー効果を用いた場合には，TE (transverse electric) モードの伝送特性評価は従来から可能であったが，TM (transverse magnetic) モードについては不明なところが多く，偏波無依存性が要求されるデバイス設計に困難をきたしていた．また，SHGを用いた波長変換においては，ドメイン反転を利用して非線形光学係数の符号を光の波長程度の周期で光波の伝搬方向に周期的に反転させる擬似位相整合 (QPM: quasi-phase matching) が有効とさ

れているが、一般に三角形状あるいは半楕円状になるドメイン反転領域を考慮した解析は難しく、こうしたドメイン反転形状の変換効率に与える影響の調査も進んでいない。さらには、非線形光学係数は、導波路作製のためのプロトン交換によって劣化し、アニーリングによって回復するが、こうした非線形光学係数の変化を考慮した波長変換特性の評価も行われていない。

こうした状況の下で、本論文では、偏波や導波路形状によらず対応可能な非線形光導波路の解析設計法を新たに開発するとともに、導波光の偏波状態やドメイン反転領域の形状、さらには非線形光学係数の大きさがデバイス特性に与える影響について詳細に調査した結果をまとめている。

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、光強度に依存するカー型の非線形屈折率をもつ非線形光導波路解析のための有限要素法に基づくビーム伝搬法(FE-BPM: finite-element beam-propagation method)を開発している。解析領域端からのスプリアス反射を防止するために完全整合層(PML: perfectly matched layer)を導入し、その有効性を示している。光空間ソリトン放出現象を用いた結合器を取り上げ、その動作の偏波無依存性を初めて理論的に説明している。また、空間ソリトン放出現象を取り扱うためには伝搬方向への刻み幅を線形光導波路の場合に比べて非常に小さく設定する必要があることを指摘し、それに伴う計算コストを大幅に削減することが可能な反復計算のアルゴリズムを新たに開発している。

第3章では、SHGを用いた波長変換デバイスの簡便な解析設計法として、2次元FE-BPMの開発を行っている。具体的に、 LiNbO_3 ならびに LiTaO_3 を用いたQPM-SHG素子の波長変換特性の評価に本手法を適用し、ドメイン反転形状が波長変換効率に与える影響を詳細に調査している。

第4章では、SHGを用いた波長変換デバイスを直接3次元解析する簡便な方法として、スカラー波近似に基づく3次元FE-BPM(SFE-BPM: scalar FE-BPM)の開発を行っている。具体的に、 LiNbO_3 基板QPM-SHGや LiTaO_3 基板QPM-SHGの波長変換特性の評価に本手法を適用し、ドメイン反転形状が波長変換効率に与える影響を調査している。

第5章では、SHGを用いた波長変換デバイスの、より厳密な解析設計法として、ベクトル有限要素法に基づく3次元FE-BPM(VFE-BPM: vector FE-BPM)の開発を行っている。エッジ要素とノードル要素を組み合わせたハイブリッド要素は、線形光導波路解析においてはその有用性が認められ、多用されているが、ここではこれを非線形光導波路解析に初めて導入している。具体的に、 GaAlAs ならびに LiTaO_3 を用いたQPM-SHGに本手法を適用し、得られた波長変換特性の結果をSFE-BPMによる結果と比較している。特に、 LiTaO_3 基板QPM-SHGにおいては、ベクトル波解析の結果が、スカラー波近似解析の場合に比べて、実験結果をよく説明できることを示している。また、最近光導波路の新しい作製方法として注目されている超精密研削加工法による LiNbO_3 リッジ導波路型QPM-SHG(RW-QPM-SHG: ridge-waveguide QPM-SHG)にも本手法を適用し、その波長変換特性を詳細に調査するとともに、プロトン交換型QPM-SHG(PE-QPM-SHG: proton-exchanged QPM-SHG)との比較評価を行っている。PE-QPM-SHGにおいては、非線形光学係数のプロトン交換による劣化およびアニーリングによる回復を考慮して性能評価を行っており、その結果、RW-QPM-SHGでは、より高い波長変換効率が期待できることを示している。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

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 an analysis and design method for integrated photonic devices based on nonlinear optical effects and its applications

(非線形光学効果に基づく集積光デバイスの解析設計法と
その応用に関する研究)

最近，光強度に依存する非線形屈折率を利用した光双安定素子，論理演算素子などの全光学的信号処理デバイスや第二高調波発生 (SHG: second harmonic generation) を利用した波長変換型短波長コヒーレント光源の高性能化，高信頼化，低価格化を目指して，集積化に有利な非線形光導波路の研究開発が活発化している。

さて，こうした非線形光学効果に基づく導波型光デバイスの設計，特性評価には導波路内部における光波の伝搬の様子を正確に把握しておくことが必要である。しかしながら，非線形光導波路の光波伝搬解析は，線形の場合に比べて難しく，導波型非線形光デバイスの偏波依存性も含めたベクトル波としての実モデルシミュレーションが可能な解析設計法の開発は，まだ十分には進んでいない。例えば，屈折率が光強度に依存して変化する光カー効果を用いた場合には，TE (transverse electric) モードの伝送特性評価は従来から可能であったが，TM (transverse magnetic) モードについては不明なところが多く，偏波無依存性が要求されるデバイス設計に困難をきたしていた。また，SHG を用いた波長変換においては，ドメイン反転を利用して非線形光学係数の符号を光の波長程度の周期で光波の伝搬方向に周期的に反転させる擬似位相整合 (QPM: quasi-phase matching) が有効とされているが，一般に三角形状あるいは半楕円状になるドメイン反転領域を考慮した解析は難しく，こうしたドメイン反転形状の変換効率に与える影響の調査も進んでいない。さらには，非線形光学係数は，導波路作製のためのプロトン交換によって劣化し，アニーリングによって回復するが，こうした非線形光学係数の変化を考慮した波長変換特性の評価も行われていない。

こうした状況の下で，本論文では，偏波や導波路形状によらず対応可能な非線形光導波路の解析設計法を新たに開発するとともに，導波光の偏波状態やドメイン反転領域の形状，さらには非線形光学係数の大きさがデバイス特性に与える影響について詳細に調査した結

果をまとめている。

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、光強度に依存するカー型の非線形屈折率をもつ非線形光導波路解析のための有限要素法に基づくビーム伝搬法(FE-BPM: finite-element beam-propagation method)を開発している。光空間ソリトン放出現象を用いた結合器を取り上げ、その動作の偏波無依存性を初めて理論的に説明している。

第3章では、SHGを用いた波長変換デバイスの簡便な解析設計法として、2次元FE-BPMの開発を行っている。具体的に、 LiNbO_3 ならびに LiTaO_3 を用いたQPM-SHG素子の波長変換特性の評価に本手法を適用し、ドメイン反転形状が波長変換効率に与える影響を詳細に調査している。

第4章では、SHGを用いた波長変換デバイスを直接3次元解析する簡便な方法として、スカラー波近似に基づく3次元FE-BPM(SFE-BPM: scalar FE-BPM)の開発を行っている。具体的に、 LiNbO_3 基板QPM-SHGや LiTaO_3 基板QPM-SHGの波長変換特性の評価に本手法を適用し、ドメイン反転形状が波長変換効率に与える影響を調査している。

第5章では、SHGを用いた波長変換デバイスの、より厳密な解析設計法として、ベクトル有限要素法に基づく3次元FE-BPM(VFE-BPM: vector FE-BPM)の開発を行っている。具体的に、 GaAlAs ならびに LiTaO_3 を用いたQPM-SHGに本手法を適用し、得られた波長変換特性の結果をSFE-BPMによる結果と比較している。特に、 LiTaO_3 基板QPM-SHGにおいては、ベクトル波解析の結果が、スカラー波近似解析の場合に比べて、実験結果をよく説明できることを示している。また、最近、光導波路の新しい作製方法として注目されている超精密研削加工法による LiNbO_3 リッジ導波路型QPM-SHG(RW-QPM-SHG: ridge-waveguide QPM-SHG)にも本手法を適用し、その波長変換特性を詳細に調査するとともに、プロトン交換型QPM-SHG(PE-QPM-SHG: proton-exchanged QPM-SHG)との比較検討を行っている。PE-QPM-SHGにおいては、非線形光学係数のプロトン交換による劣化およびアニーリングによる回復を考慮して性能評価を行っており、その結果、RW-QPM-SHGでは、より高い波長変換効率が期待できることを示している。

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、非線形光学効果に基づく集積光デバイスの解析設計法を新たに開発し、光空間ソリトンを利用した全光学的信号処理や第二高調波発生を利用した波長変換型短波長コヒーレント光源の高性能化に関する有益な知見を得ており、光通信工学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。