

学位論文題名

A Study on an Analysis and Design Method
for Integrated Photonic Devices Based
on Acoustooptic Effects and Its Applications

(音響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

光伝送技術は 1980 年代初頭に実用化されて以来、時分割多重 (TDM) 方式を用いた 2 地点間の大容量通信技術として、ネットワークに大きな変革をもたらしてきた。しかしながら、これまでの TDM 方式の高速化を支えてきた電子デバイスの速度限界や、既設の光ファイバによる通信容量の増大を目指した欧米の波長分割多重 (WDM) 方式の開発などを背景として、光伝送技術は新しい段階へ入りつつある。特に、インターネットに代表される広帯域のマルチメディア通信に対応するためには、ネットワークの一層の大容量化と低コスト化が必要である。

このような社会的要請を受けて、WDM 技術を中核とした光波ネットワークの研究開発が各国で進められている。WDM 技術を用いたネットワークは伝送容量の大幅な増大を可能とするだけでなく、ノード機能を含めたネットワーク全体の光化を可能とする技術として注目されている。ネットワークの全光化のための技術課題は多岐にわたるが、波長が正確に定まった光源、波長可変フィルタ、光分岐/挿入装置など、デバイスレベルからの開発を必要とするところが極めて多い。こうした WDM 用の光デバイスは、既存の光学部品の組合せによって既に一部実用化されているが、信頼性、量産性、耐環境性などの向上のために、様々な物理的効果を有効に、また複合的に利用して各種の光デバイスを一体集積化することが急務となっている。とりわけ、音響光学 (AO) 効果は光導波路内を伝搬する光波を制御するための有力な方法の一つであり、実際、光導波路の作製上、不可避的に生じる複屈折性の制御、あるいはこうした複屈折性を積極的に利用した光デバイスの構成に多用されている。さらに、弾性表面波 (SAW) との相互作用を利用したモードスプリッタ、モード変換器、波長フィルタなど、WDM ネットワークの基幹部品となる集積光デバイスの検討も盛んに行われている。

さて、こうした AO 効果に基づく光デバイスの設計、特性評価には、まず、材料の熱膨張係数差や SAW によって光導波路内に生じる応力あるいはひずみ分布を正確に見積もることが先決である。しかしながら、AO 効果型光デバイスの残留熱応力解析法としては、約 20 年前に開発された等方性材料向けのものが唯一で、様々な基板材料を効果的に使用する昨今の集積光技術には対応できないままであった。さらに、AO 効果型光デバイスの構成に欠かせない伝搬方向に構造が変化する導波路内の SAW の 3 次元分布を評価することも困難であった。また、AO 効果による屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価することも難しく、AO 効果型光デバイスの設計には試行錯誤的などころが多かった。

こうした状況のもとで、本論文では、任意の異方性材料に適用可能な残留熱応力解析法、お

よび SAW 導波路解析法を新たに開発するとともに、応力解析や SAW 導波路解析によって得られたひずみや電界の分布を基にして AO 効果による屈折率変化を正確に見積り、この屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価する AO 効果型集積光デバイスの新しい解析設計法を開発している。

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、任意の異方性を有する光導波路内の残留熱応力を評価することが可能な応力解析法、ならびに応力解析の結果得られた屈折率変化をそのまま考慮した光導波路解析法を開発している。応力解析、光導波路解析のいずれにも有限要素法を採用しているため、応力解析によって得られた複雑な屈折率変化を光導波路解析に忠実に反映させることができる。SiO₂/LiNbO₃ 構造のひずみ誘起光導波路およびモード変換器を取り上げ、導波路内に生じる応力やひずみ、さらには屈折率変化の様子を明らかにし、これらが光波の伝送特性に与える影響について調べ、実験結果を初めて理論的に説明している。

第 3 章では、SAW を利用した AO 効果型集積光デバイスの一設計法として、SAW 導波路解析を行ってひずみや電界の分布を求め、次に、これらのひずみ、電界の分布から屈折率変化を算出し、この屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価する方法を提案している。具体的に、WDM 通信システムへの導入が期待されている AO 可変波長フィルタ (AOTF) の評価に本手法を適用し、サイドロープレベルを除いて実験結果とほぼ一致したフィルタ特性を得ている。ここでは、導波路内の 3 次元 SAW 分布を求めるために、基板内における 2 次元解析の結果と基板表面における 2 次元解析の結果を組み合わせるという簡便な方法を採用している。

第 4 章では、SAW 導波路内の 3 次元 SAW 分布を直接求めるために、伝搬方向に構造が緩やかに変化する導波路内を伝搬する SAW の空間的な発展の様子を調べることが可能な 3 次元ビーム伝搬法を開発を行っている。本手法は、導波路断面の離散化に有限要素法を用いているため、任意形状の断面をもつ SAW 導波路への適用が容易であり、また、材料の異方性や圧電性を考慮することもできる。具体的に、 $\Delta v/v$ 導波路型レイリー波収束器に本手法を適用し、伝搬方向への SAW の変化の様子が実験結果と比較的良好に一致していることを確認している。

第 5 章では、3 次元異方性光導波路解析のためのビーム伝搬法を開発を行っている。解析領域端からのスプリアス反射を防止するために、任意の異方性材料に適用可能な完全整合層 (PML) を導入し、その有効性を示している。AO 効果型光デバイスの多くは、伝搬方向に構造が変化するとともに、異方性材料で構成されているため、第 4 章、第 5 章で開発した解析法が有効な設計ツールとなる。

第 6 章では、SAW を用いた AO 効果型光デバイスを 3 次元構造のまま解析し、設計するために、まず、第 4 章で述べた SAW 導波路解析のためのビーム伝搬法によって導波路内のひずみや電界の 3 次元分布を直接求め、次に、これらのひずみ、電界分布から屈折率変化を算出し、得られた屈折率変化を第 5 章で述べた異方性光導波路解析のための 3 次元ビーム伝搬法にそのまま取り込んで光波の伝送特性を評価する方法を提案している。具体的に、第 3 章で取り上げた AOTF の再評価を行い、サイドローブの振る舞いが、最大サイドロープレベルも含めて実験結果とよく一致することを示している。

第 7 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 an Analysis and Design Method for Integrated Photonic Devices Based on Acoustooptic Effects and Its Applications

(音響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)

インターネットに代表される広帯域のマルチメディア通信に対応するため、波長分割多重(WDM)技術を中核とした光波ネットワークの研究開発が各国で進められている。こうしたWDM用の光デバイスは、既存の光学部品の組合せによって既に一部実用化されているが、信頼性、量産性、耐環境性などの向上のために、様々な物理的効果を有効に、また複合的に利用して各種の光デバイスを一体集積化することが急務となっている。とりわけ、音響光学(AO)効果は光導波路内を伝搬する光波を制御するための有力な方法の一つであり、WDMネットワークの基幹部品となるAO効果型集積光デバイスの検討が盛んに行われている。

さて、こうしたAO効果に基づく光デバイスの設計、特性評価には、まず、材料の熱膨張係数差や弾性表面波(SAW)によって光導波路内に生じる応力あるいはひずみ分布を正確に見積もることが先決である。しかしながら、AO効果型光デバイスの残留熱応力解析法としては、約20年前に開発された等方性材料向けのものが唯一で、様々な基板材料を効果的に使用する昨今の集積光技術には対応できないままであった。さらに、AO効果型光デバイスの構成に欠かせない伝搬方向に構造が変化する導波路内のSAWの3次元分布を評価することも困難であった。また、AO効果による屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価することも難しく、AO効果型光デバイスの設計には試行錯誤的なところが多かった。

こうした状況のもとで、本論文では、任意の異方性材料に適用可能な残留熱応力解析法、およびSAW導波路解析法を新たに開発するとともに、応力解析やSAW導波路解析によって得られたひずみや電界の分布を基にしてAO効果による屈折率変化を正確に見積り、この屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価するAO効果型集積光デ

バイスの新しい解析設計法を開発している。

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、任意の異方性を有する光導波路内の残留熱応力を評価することが可能な応力解析法、ならびに応力解析の結果得られた屈折率変化をそのまま考慮した光導波路解析法を開発している。SiO₂/LiNbO₃ 構造のひずみ誘起光導波路およびモード変換器を取り上げ、導波路内に生じる応力やひずみ、さらには屈折率変化の様子を明らかにし、これらが光波の伝送特性に与える影響について調べ、実験結果を初めて理論的に説明している。

第 3 章では、SAW を利用した AO 効果型集積光デバイスの一設計法として、SAW 導波路解析を行ってひずみや電界の分布を求め、次に、これらのひずみ、電界の分布から屈折率変化を算出し、この屈折率変化をそのまま光導波路解析に取り込んで光波の伝送特性を評価する方法を提案している。ここでは、導波路内の 3 次元 SAW 分布を求めるために、基板内における 2 次元解析の結果と基板表面における 2 次元解析の結果を組み合わせるといった簡便な方法を採用している。

第 4 章では、SAW 導波路内の 3 次元 SAW 分布を直接求めるために、伝搬方向に構造が緩やかに変化する導波路内を伝搬する SAW の空間的な発展の様子を調べることが可能な 3 次元ビーム伝搬法の開発を行っている。レイリー波収束器に本手法を適用し、伝搬方向への SAW の変化の様子が実験結果と比較的良く一致していることを確認している。

第 5 章では、3 次元異方性光導波路解析のためのビーム伝搬法の開発を行っている。解析領域端からのスプリアス反射を防止するために、任意の異方性材料に適用可能な完全整合層 (PML) を導入し、その有効性を示している。

第 6 章では、SAW を用いた AO 効果型光デバイスを 3 次元構造のまま解析し、設計するために、まず、第 4 章で述べた SAW 導波路解析のためのビーム伝搬法によって導波路内のひずみや電界の 3 次元分布を直接求め、次に、これらのひずみ、電界分布から屈折率変化を算出し、得られた屈折率変化を第 5 章で述べた異方性光導波路解析のための 3 次元ビーム伝搬法にそのまま取り込んで光波の伝送特性を評価する方法を提案している。WDM 通信システムへの導入が期待されている AO 可変波長フィルタ (AOTF) の評価に本手法を適用し、実験結果とほぼ一致したフィルタ特性を得ている。

第 7 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、音響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、波長分割多重通信システムへの導入が期待されている音響光学可変波長フィルタ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。