室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

ビーム伝搬法を活用した光導波路デバイスの構造最適設計

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-06-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 井口, 亜希人 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00009913

氏　　名	井口　亜希人
学 位 論 文 題 目	ビーム伝搬法を活用した光導波路デバイスの構造最適設計
論 文 審 査 委 員	主査　教授　辻　寧英 教授　長谷川　弘治 准教授　渡邊　浩太

論文内容の要旨

近年，インターネットの総通信量が増加傾向にあり，光通信システムのさらなる高速・大容量化を達成するため，光通信システムの最も基本的な要素である光導波路デバイスの極限までの小型化，低損失化が要求されている．従来，様々な光導波路デバイスは，設計者の電磁気現象に関する深い理解や，これまでに提案されてきた動作原理の知識等に基づいて設計が行われてきた．計算機の計算処理能力の向上や電磁界シミュレーション技術の発展によって，近年は光導波路デバイスの設計に数値シミュレーションを活用した構造最適化手法が積極的に利用されており，その中で，特にトポロジー最適化は非常に高い設計自由度持ち，デバイスの大幅な性能改善および新たな動作原理を持つデバイスの創生の可能性があるとして注目を集めている．従来の光導波路デバイスの感度解析に基づく構造最適化において，数値解析手法として有限要素法(FEM)や時間領域有限差分法(FDTD 法)等が利用されてきた．光導波路解析において，平面光波回路(PLC)デバイス等，波長に対して長手方向のデバイス長が非常に長い場合に対しては，ビーム伝搬法(BPM)が効率的な数値解析手法として幅広く利用されている．BPM を解析手法として用いた感度解析に基づく形状最適設計あるいはトポロジー最適設計例はこれまで報告されておらず，この最適化法が実現できれば感度解析に基づく構造最適化の計算コストが低減可能となり，FEM や FDTD 法等では計算コスト上困難な設計問題への応用が期待できる．

本論文では，BPM を活用した光導波路素子の感度解析に基づくトポロジー最適化法の実現を新たに行っており，具体的に2次元 BPM，3次元セミベクトル BPM，3次元フルベクトル BPM，2次元時間領域 BPM を光波伝搬解析手法として利用した場合のトポロジー最適化手法を実現している．本論文では特に，BPM として横方向の離散化方法に有限差分法を用いる FD-BPM，材料分布の表現手法として密度法，感度解析手法として随伴変数法を適用する場合の感度計算方法を述べている．また，設計変数空間の探索手法には最速降下法を適用している．

本手法を曲がり導波路の2次元近似設計問題および3次元設計問題へと適用し，いずれの問題においても提案するトポロジー最適設計手法によって特性が改善するように最適化計算が進むことを確認している．また，パワー分岐導波路，モード次数変換素子，導波路型

反射器，偏波回転素子の設計を通して，提案するトポロジー最適化法の汎用性を明らかにしており，本設計アプローチが今後も発展が予想される石英系平面光波回路素子だけではなく，シリコンフォトニックデバイスのさらなる小型化・低損失化に貢献できる可能性を見出した.

ABSTRACT

In recent years, more compact and higher performance optical waveguide devices, which is a fundamental component in optical communication networks, are required in order to deal with the rapid increasing of internet traffic. The optical waveguide devices have been developed based on designer's experience and profound understanding of guided-wave optics so far. Recently, the structural optimization based on numerical simulation has been used in the design of optical waveguide devices owing to the recent development of computer technology and simulation techniques. Topology optimization has possibility that the device performance is largely improved and a novel operation principle is discovered, because this optimal design method has particular high design of freedom among structural optimization methods. In conventional topology optimization, a finite element method (FEM), or a finite difference time domain (FDTD) method, etc. is utilized as a numerical simulation method of guided-wave in optical waveguides. A beam propagation method (BPM) has been widely used in the field of guided-wave optics, and it can efficiently analyze a long-length device which is difficult to address using the FEM or the FDTD, such as a planner light-wave circuit (PLC) device. It can be expected that the performance of such devices is highly enhanced with very low computational cost if the gradient-based topology optimization utilizing the BPM is realized.

In this paper, new topology optimal design approaches utilizing the BPM for optical waveguide devices are realized. In this research, use of the 2DFD-BPM, the semi-vectorial FD-BPM based on alternative direction implicit method (ADIM), the full-vectorial FD-BPM (FV-FD-BPM) based on ADIM, and the time domain FD-BPM based on ADIM is studied. The density method as a representation method of the refractive index distribution in the design region, the adjoint variable method as a sensitivity analysis method are employed to the proposed design approaches, and how to calculate the sensitivity is described in the case of using these methods. In the design example, the steepest descent method is employed as a gradient-based optimization algorithm for finding the minimum point of the objective function.

The figure of merit is improved with increasing iteration count in 2D and 3D design problems of the bending waveguide using the proposed design approach, thus the validity of the proposed design approaches is confirmed. Moreover, the usefulness is also considered by designing the optical power splitters, mode order converter, waveguide reflector, and polarization rotator. It is shown that there is possibility that the proposed design approaches enhance the figure of merit of

not only PLC devices but also the optical components in silicon on insulator (SOI) platform which is expected to be next-generation optical devices.

論文審査結果の要旨

近年のインターネットの普及により高速大容量通信への要求はますます高まっており，その基盤となる光通信の高速大容量化のため，高性能な光デバイスの開発が急速に進められている．こうしたなか，計算機の大容量化と処理能力の向上に加え，電磁界解析技術の進展により，現在では，計算機上で光デバイスの解析・設計を行える環境が整い，さらには計算機を用いた光デバイスの最適設計の技術も格段に進歩し，デバイスのトポロジーまで含めた自由度の高い汎用的な自動最適設計法の報告が近年活発になされている．トポロジー最適設計では，設計者の知識や経験を必要とせずに，任意のトポロジーを有するデバイスを自動的に発現可能であり，これまでに考えられてこなかったまったく新しいデバイス構造を見出し，光デバイスの可能性を大きく広げられる可能性がある．こうしたトポロジー自動最適設計法では，光デバイスの特性評価のための数値解析法として，有限要素法(FEM)や有限差分時間領域法(FDTD法)が一般に用いられているが，素子長が長い場合には計算機容量の観点からそもそも解析が行えない問題があった．一方で，ビーム伝搬法(BPM)は，弱導波路や長手方向に比較的構造変化が緩やかな導波路デバイスの解析に有効であり，反射を無視できる問題においては，計算コストを大幅に低減できることから，これまでに様々な光デバイスの解析に用いられてきた．

本論文では，このBPMを活用したトポロジー自動最適設計法を新たに提案し，最適設計に必要な感度(構造の変化に対する特性の変化)解析のための随伴変数法(AVM)を新たに定式化するとともに，最適設計に必要とされる各種技術の開発を行い，本提案手法を用いた具体的な最適設計例を示すことで，その有用性を明らかにしている．以下にその概要を述べる．

まず，2次元光導波路デバイスの設計問題を考え，BPMを数値解析に用いた場合のAVMの新たな定式化を行い，弱導波路デバイスに対して基本的なデバイスの最適設計例を示しその有用性を示している．また，実際の作製を考慮して最適設計で得られた構造が複雑化するのを避けるための構造平滑化，感度平滑化を適用することで比較的単純な構造で目的の特性を有するデバイスが設計できることを示している．次に，より実際的な3次元光導波路デバイスの設計を目的としてセミベクトルBPM，フルベクトルBPMを用いた最適設計法の定式化を行い具体的な設計例を通してその有効性を示している．計算の効率化の観点から解析には交互方向陰的差分法(ADIM)を用い，ADIMを用いたときのAVMについても新たに定式化を行っている．最後に，こ

れら周波数領域での最適化に加えて，周波数特性を一括最適設計することを目的として時間領域BPMを活用したトポロジー最適設計を提案・定式化し，実際に波長無依存デバイスの設計が可能であることを示している．

本論文で得られた知見は，光通信の発展に大きく寄与するものであり，博士(工学)の学位を授与するに値するものと認める．