

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06009

研究課題名(和文)関数展開法を用いた3次元光導波路デバイスの汎用的なトポロジー最適設計に関する研究

研究課題名(英文) Study on topology optimization of optical waveguide devices based on function expansion method

研究代表者

辻 寧英 (Tsuji, Yasuhide)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：70285518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高速大容量通信のための高性能な光デバイスを設計するため、関数展開法を用いた3次元光導波路デバイスのトポロジー最適化について検討を行った。3次元設計を効率化するために、改良等価屈折率法を提案し2次元近似設計の精度を高め、それを初期構造とした効率的な最適化が可能であることを示した。また、伝搬方向に比較的構造変化が緩やかで反射波が無視できる場合に対して緩慢変化包絡線近似有限要素法を提案しその有効性を示した。ADI法に基づくセミベクトル有限差分ビーム伝搬法に基づく最適設計に関する検討を行い、いくつかの設計例を示すとともに、フルベクトル有限要素ビーム伝搬法の安定化を図り最適設計への応用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop high-performance photonic devices, the function-expansion based topology optimization method for three-dimensional photonic devices has been investigated. In order to improve design efficiency, the usefulness of the approximated two-dimensional design is improved by proposing the improved effective index method. By using these structures as initial structures of three-dimensional optimization, the design efficiency is able to be improved. Furthermore, to improve the computational efficiency of slowly varying waveguides, slowly varying envelope approximated finite element method is newly proposed and its usefulness is demonstrated. Topology optimization using semi-vectorial finite difference beam propagation method based on alternative direction implicit method is also proposed and its usefulness is demonstrated through some design examples have been shown. The stability of the full-vectorial finite element beam propagation method is also discussed.

研究分野：電子工学

キーワード：光導波路デバイス 自動最適設計 トポロジー最適化 有限要素法 関数展開法 随伴変数法

1. 研究開始当初の背景

インターネットを始めとする通信需要の増大にともない、超高速・超大容量光通信システムを実現すべく各種の新しい光デバイスの探索がなされている。こうした中、光デバイスの設計にはいまや計算機を用いた数値シミュレーションが不可欠になっており、有限要素法(FEM)、ビーム伝搬法(BPM)、時間領域差分法(FDTD)を始めとする様々な数値解析法が開発され、実際にモノを作る前に特性を予測できるようになり、光導波路デバイスの設計・開発に利用されている。一方、光導波路デバイスの最適設計においては、当初は、寸法最適化や形状最適化が主であり、設計者の知識と経験によるところが大きく、まったく新しい発想のデバイス構造を見出すことは容易ではなかった。こうしたなか、要求される特性を与えることで、その特性を実現するデバイスを構造のトポロジーまで含めて自動的に生成させる、トポロジー自動最適設計の研究への関心が高まり、2次元光デバイスを中心に検討が活発に行われていた。申請者も、2006年の論文を始めとして随伴変数法に基づくトポロジー最適設計法の検討を積極的に行い、設計領域内の構造を関数展開法により表現するトポロジー最適設計法を提案し、密度法で問題となるグレイ領域の出現を抑圧し、より少ない設計パラメータで設計領域内の構造を表現できるようにすることで解探索の効率を高めるなどの検討を2次元光デバイスの場合を中心に積極的に行ってきた。しかしながら、実際の光導波路デバイスは2次元的に光を閉じ込めて導波する3次元構造であり、3次元解析に基づく設計の効率化と汎用的な設計法の確立が課題となっていた。

2. 研究の目的

光通信のさらなる高速化を実現するためには、既存の知識に頼らない新たな設計理論に基づく高性能な光導波路デバイスの設計が必要となっている。本研究では設計領域と使用する材料を設定し、目的の特性を与えるだけで、自動的に目的とする光導波路デバイスを設計してくれるような計算機による自動最適設計法の開発を目的とする。特に、これまで2次元光導波路デバイスへの適用が主であったトポロジー最適設計法をより実用的な3次元光導波路デバイスの場合に適用できるように各種要素技術についての検討を行い、様々な問題に柔軟に適用できるような自動最適設計法の確立を目指す。

3. 研究の方法

光導波路の効率的な最適設計を実現するために、以下のことを検討する。

(1) 2次元設計を用いた3次元設計の効率化

光導波路の3次元FEM解析は大きな計算機リソースと長い計算時間を要する。自動最適設計においては光デバイスのFEM解析を繰り返

返し行う必要があるため、3次元光デバイスの設計においては解析・設計を効率化することが重要である。そのため、設計の効率化と解析の効率化についての検討を行う。

(2) 有限差分BPMを用いた最適設計の検討

FEMをもちいた最適設計では、素子長が波長に比べて非常に長い場合には現実的な計算機リソースでは解析・設計を行うことができない、BPMは伝搬方向に構造変化が緩やかな場合に非常に有効な解析手法であり、有限差分BPMを用いたデバイスの

(3) 有限要素ビーム伝搬解析の安定化の検討

3次元光導波路解析を効率的に行う手法として、BPMがあり、横方向の離散化にFEMを用いたFE-BPMは断面内に不均一メッシュを用いることで計算を大幅に効率化できる可能性があり、境界適合メッシュを用いることで、曲辺境界まで含めてデバイス構造を正確に取り扱えるが、BPMを用いたフルベクトル解析は必ずしも安定ではないことが報告されている。そのため、FE-BPM解析の安定化を図る。

これらの検討と並行して設計領域内の構造表現の手法、実際の作成を考慮した構造の平滑化、最適解の探索法についても検討を行っている。

4. 研究成果

(1) 2次元設計を用いた3次元設計の効率化

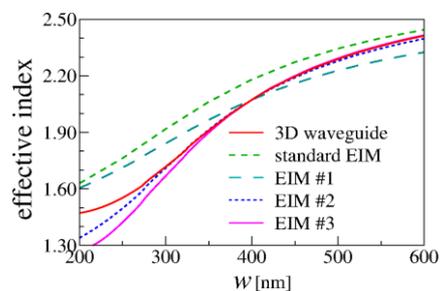


図1 改良等価屈折率法

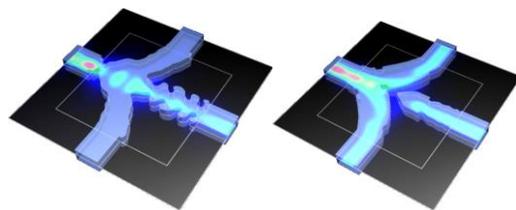


図2 3次元光デバイスの設計

(左:通常のEIMに基づく設計、右:改良EIMに基づく設計を利用した3次元設計)

3次元光導波路を2次元近似する際には等価屈折率法がしばしば用いられるが、強導波路デバイスの設計においては必ずしも有効でないことが報告されている。図1にここで改良したEIMと通常のEIMの近似精度の違い

を示す。3次元導波モードの解析において、改良法(EIM#2)が最も3次元解析と広い導波路幅において一致していることがわかる。これを3分岐導波路の3次元設計に利用した設計例を図2に示す。通常のEIMに基づく設計では3次元解析をしたときに十分な特性が得られないことがわかるが、改良したEIMを用いた場合には3次元解析をしても特性の劣化がわずかであり、これを初期構造として3次元設計することで設計を大幅に効率化できることを示した(雑誌論文⑫など)。

(2) 有限差分BPMを用いた最適設計の検討

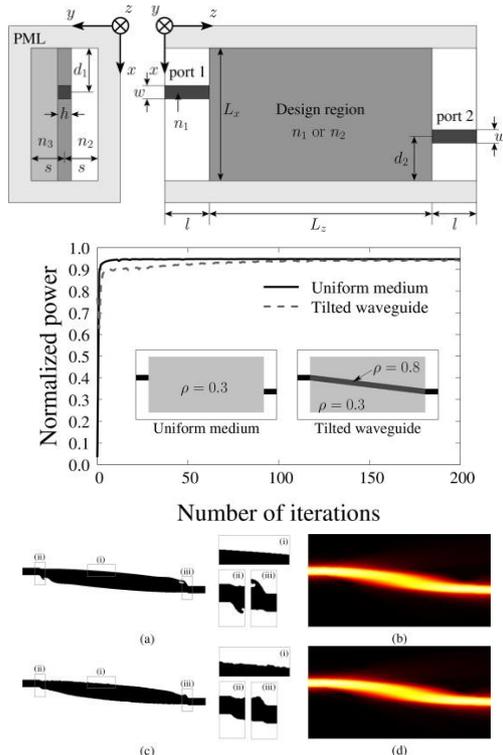


図3 セミベクトルFD-BPMによる3次元設計
(上段：問題設定，中段：目的関数の収束，
下段：最適化構造と伝搬波形)

ADI法に基づくセミベクトルFD-BPM法を用いて3次元光導波路デバイスの設計を行うため、設計領域を密度法で表現した場合に対して、ADI法を用いた場合の随伴変数法による感度解析手法を新たに定式化し、この最適設計法について各種検討を行った。図3にその一例を示す(雑誌論文⑦)。曲がり導波路を例に、目的関数を効率的に改善できることを示すとともに、構造の平滑化の効果についても検討を行い、その効果を確認している。

(3) 有限要素ビーム伝搬解析の安定化の検討

FE-BPMはFD-BPMに比べて不均一メッシュを用いることができ、媒質境界に適合したメッシュを用いて形状を正確に表現できる利点があるが、伝搬方向へのメッシュ更新の難易度の高さと補完誤差の蓄積、さらには伝搬方向に構造が変化する場合の解析の不安定性の問題から、その適用範囲が現状ではかな

り限られている。この問題を解決するために、本検討では、より高次の要素を用いた界補間精度の改善と線形フィルタを用いた伝搬解析の安定化の試みを行った。

図4に安定化FE-BPMと通常のFE-BPMの結果の比較を示す。上段右図の左が通常のFE-BPMによる結果で、右が安定化FE-BPMによる結果である。下段に入射端におけるFEM解析の全固有値分布を示すが、複素平面内の虚部が正のモードが不安定性を引き起こすため、同図の挿入図に示すように不安定なモードをフィルタリングすることにより精度を劣化することなく安定化できることを示した(雑誌論文③)。

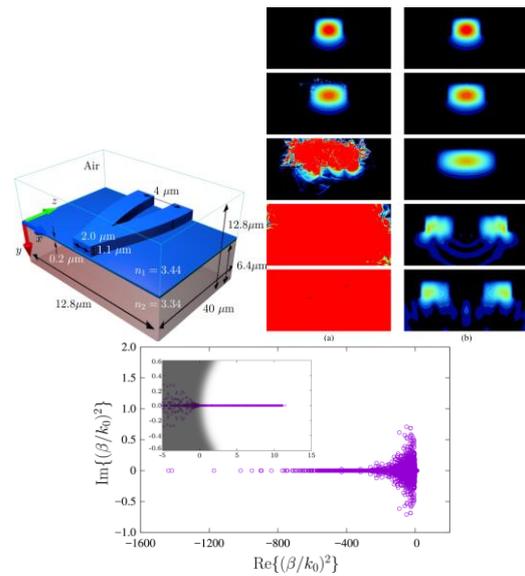


図4 フルベクトルFE-BPMの安定化

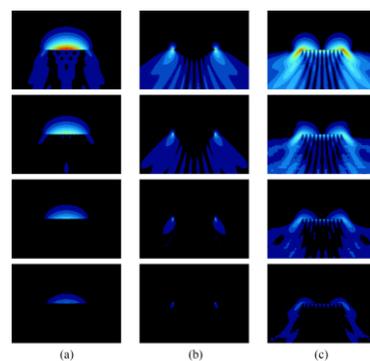
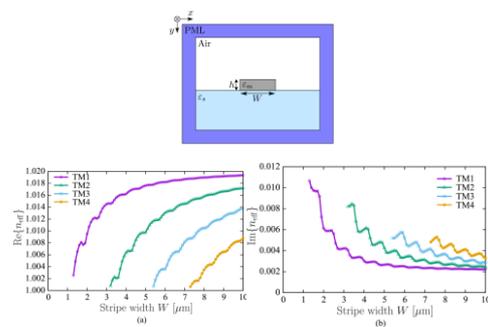


図5 表面プラズモン導波路のFE-BPM解析

また、吸収境界条件として完全整合層 (PML) を用いたときに安定性が劣化することが指摘されているので、PML を用いた場合の安定化、プラズモン導波路への応用可能性についても併せて有効性を示した。図 5 は表面プラズモンストリップ導波路の FEM による漏洩モード解析と FE-BPM 解析の結果を示しているが、この解法が高精度で安定であることを実証している(雑誌論文③)。

(4) その他

汎用的な最適設計法の確立を目指して、いくつかの検討を行った。そのひとつに非線形光学効果を用いた光スイッチおよび光論理ゲートの設計があり、図 6 に入射光パワーにより出力を切り替える光スイッチの設計例を示す(雑誌論文④)。図の左が初期構造であり、右側が最適設計により得られた構造である。非線形効果を有する光導波路の伝搬解析と感度解析を効率的に取り扱うための改良を行っている。

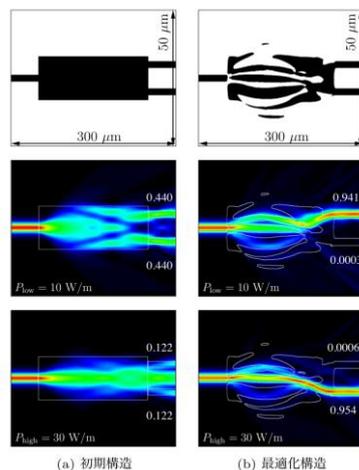


図 6 改良等価屈折率法

3次元 FEM 解析を効率的に行う方法として、BPM で用いられる緩慢変化包絡線近似 (SVEA) を用いた SVEA-FEM による計算の効率化についても検討を行った(学会発表④)。問題によっては伝搬方向の離散化を大幅に緩和できるため計算を大幅に効率化でき、自動最適設計の効率を大幅に改善できることを示した。

数値解析に時間領域 FE-BPM を用いた最適設計法についても基礎的な検討を行った(雑誌論文②)。単一波長での動作ではなく、波長平坦性を目指した最適設計を効率的に行えることを示した。ただし、波長選択性を考慮した設計については今後の検討を必要とする。

ここまでの検討では出力光強度のみを設計対象としていたが、光デバイスを多段接続する場合には出力光の位相も重要になる。そのため、出力光の位相を考慮した設計が行えるように最適設計法の改良を行った(学会発表③)。これにより、光論理ゲートの多段接続を考慮した設計が可能であることを示し

た。

光ファイバの大容量化を目指した少数モードファイバの設計についても基礎的な検討を行い、広い波長帯域にわたって群遅延時間差を低減できるマルチステップインデックファイバの設計例を示した(雑誌論文⑩)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Z. Zhang, Y. Tsuji, M. Eguchi, and C. Chen, Study on single-polarized holey fibers with double-hole unit cores for cross-talk free polarization splitter, IEICE Transaction on Electronics, to be published. (査読有)
- ② A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, Topology optimal design for optical waveguides using time domain beam propagation method, IEICE Electronics Express, to be published. (査読有)
DOI: 10.1587/elex.15.20180417
- ③ S. Kawai, A. Iguchi, and Y. Tsuji, Study on high precision and stable finite element beam propagation method based on incomplete third order hybrid edge/nodal element, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 36, No. 11, pp. 2278-2285, June 2018. (査読有)
DOI: 10.1109/JLT.2018.2811042
- ④ 森 洗遥, 辻 寧英, ビーム伝搬解析と随伴変数法による感度解析を用いた非線形光学デバイスのトポロジー最適設計に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J101-C, No. 5, pp. 245-252, May 2018. (査読有)
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j101-c_5_210&category=C&year=2018&lang=J&abst=
- ⑤ 森本 佳太, 辻 寧英, 有限要素法に基づく伝搬演算法による光導波路突合せ接続の解析に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J101-C, No. 5, pp. 210-216, May 2018. (査読有)
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j101-c_5_210&category=C&year=2018&lang=J&abst=
- ⑥ K. Satoh and Y. Tsuji, A study on photonic crystal slab waveguide with absolute photonic band gap, AIMS Materials science, Vol. 5, No. 1, pp. 116-126, Feb. 2018. (査読有)
DOI: 10.3934/matersci.2018.1.116
- ⑦ A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, Efficient topology optimization of optical waveguide devices utilizing semi-vectorial finite-difference beam propagation method, Optics Express, Vol. 25, No. 3, pp. 28210-28222, Nov. 2017. (査読有)
DOI: 10.1364/OE.25.028210

- ⑧ Z. Zhang, Y. Tsuji, M. Eguchi, and C. Chen, Design of polarization converter based on PCF with anisotropic lattice core consisting of circular holes, Journal of Optical Society of America B, Vol. 34, No. 10, pp. 2227-2232, Oct. 2017. (査読有)
DOI: 10.1364/JOSAB.34.002227
- ⑨ Z. Zhong, Y. Tsuji, and M. Eguchi, Single radial/azimuthal mode photonic crystal fibers with anisotropic elliptical-hole lattice core, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 29, No. 16, pp. 1285-1288, Aug. 2017. (査読有)
DOI: 10.1109/LPT.2017.2702622
- ⑩ 西本 仁, 辻 寧英, 感度解析に基づく少数モードファイバの最適設計に関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-C, No. 5, pp. 225-231, May 2017. (査読有)
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j100-c_5_225&category=C&year=2017&lang=J&abst=
- ⑪ 千田 宏幸, 辻 寧英, 佐藤 慎悟, 関数展開法に基づくトポロジー最適化による偏波分離素子の設計, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-C, No. 5, pp. 217-224, May 2017. (査読有)
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j100-c_5_217&category=C&year=2017&lang=J&abst=
- ⑫ 辻 寧英, 関数展開法に基づく3次元光導波路デバイスのトポロジー最適設計, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-C, No. 2, pp. 53-60, Feb. 2017. (査読有)
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j100-c_2_53&category=C&year=2017&lang=J&abst=
- ⑬ A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, Topology optimization of optical waveguide devices based on beam propagation method with sensitivity analysis, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 34 No. 18, pp. 4214-4220, Sept. 2016. (査読有)
DOI: 10.1109/JLT.2016.2597308
- ⑭ Z. Zhang, Y. Tsuji, and M. Eguchi, Design of cross-talk free polarization converter based on square lattice elliptical-hole core circular-hole holey fibers, Journal of Optical Society of America B, Vol. 33 No. 9, pp. 1808-1814, Sept. 2016. (査読有)
DOI: 10.1364/JOSAB.33.001808
- ⑮ M. Eguchi and Y. Tsuji, Single-polarization hollow-core square photonic bandgap waveguide, AIP Advances, Vol. 6, No. 7, #075322, July 2016. (査読有)
DOI: 10.1063/1.4960426
- ⑯ K. Ichikawa, Z. Zhang, Y. Tsuji, and M. Eguchi, A study on single polarization guidance in photonic band gap fiber with anisotropic lattice of circular air holes, IEICE Transaction on Electronics, Vol. E99-C, No. 7, pp. 774-779, July 2016. (査読有)
DOI: 10.1587/transele.E99.C.774
- ⑰ Z. Zhong, Z. Zhang, Y. Tsuji, and M. Eguchi, Study on crosstalk-free polarization splitter based on square lattice single polarization photonic crystal fibers, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 52, No. 5, 7000107, May 2016. (査読有)
DOI: 10.1109/JQE.2016.2549509
- [学会発表] (計 93 件)
- ① K. Morimoto and Y. Tsuji, Full-vectorial Analysis of Optical Waveguide Discontinuities Using Propagation Operator Method Based on Finite Element Scheme, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Aug. 2018. (富山 ; 日本) (査読有)
- ② Z. Zhang, Y. Tsuji, M. Eguchi, and C. Chen, Study on polarization converter based on double-hole unit photonic crystal fiber, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Aug. 2018. (富山 ; 日本) (査読有)
- ③ K. Mori and Y. Tsuji, Design optimization of nonlinear optical waveguide devices considering output signal phase, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Aug. 2018. (富山 ; 日本) (査読有)
- ④ T. Tanaka and Y. Tsuji, Slowly varying envelope approximation based finite element method for efficient topology optimization of optical devices, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Aug. 2018. (富山 ; 日本) (査読有)
- ⑤ S. Kawamura and Y. Tsuji, Design of tapered Directional coupler type polarization splitter using 3-D FE-BPM based on coordinate transformation, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018), Aug. 2018. (富山 ; 日本) (査読有)
- ⑥ K. Satoh and Y. Tsuji, Design of photonic crystal devices with absolute PBG using finite element analysis, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), Nov. 2017. (Nanyang ; Singapore) (査読有)
- ⑦ K. Morimoto and Y. Tsuji, Analysis of butt coupling of optical waveguides using propagation operator method based on finite element method, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), Nov. 2017. (Nanyang ; Singapore) (査読有)
- ⑧ A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K.

- Hirayama, Topology optimization using time domain beam propagation method for design of optical waveguide devices,” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), Nov. 2017. (Nanyang ; Singapore) (査読有)
- ⑨ Z. Zhang, Y. Tsuji, M. Eguchi, and C. Chen, Design of polarization splitter based on high-birefringence photonic crystal fiber with double-hole unit core, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), Nov. 2017. (Nanyang ; Singapore)
- ⑩ Z. Zhong, Y. Tsuji, and M. Eguchi, Design of single TM-like mode photonic crystal fiber with an actinomorphic elliptical-hole lattice core, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016), Aug. 2016. (上海 ; 中国) (査読有)
- ⑪ A. Iguchi, Y. Tsuji, T. Yasui, and K. Hirayama, Topology optimal design of optical waveguides in consideration of polarization dependence using BPM and AVM, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016), Aug. 2016. (上海 ; 中国) (査読有)
- ⑫ Z. Zhang, Y. Tsuji and M. Eguchi, Design of taper coupler type polarization splitter with single-polarization photonic crystal fiber,” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2016), Aug. 2016. (上海 ; 中国) (査読有)
- ⑬ Z. Zhang, Y. Tsuji and M. Eguchi, Study on polarization splitter and converter using square lattice elliptical-hole core circular-hole holey fibers, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2015), July 2015. (Praque ; Czech Republic) (査読有)

他、国内学会 80 件 (研究会 19 件、全国大会 12 件、支部大会 49 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www3.muroran-it.ac.jp/yt-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 寧英 (TSUJI Yasuhide)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 70285518