法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-06-16

細線光導波路解析法の開発と新機能デバイス 設計への応用

山内, 潤治 / YAMAUCHI, Junji

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 科学研究費補助金研究成果報告書 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 6 (発行年 / Year) 2010-05

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年5月27日現在

研究種目: 基盤研究(C) 研究期間: 2007~2009 課題番号: 19560355 研究課題名(和文) 細線光導波路解析法の開発と新機能デバイス設計への応用 研究課題名(英文) Numerical method for the analysis of a silicon wire optical waveguide and its application to the design of novel functional devices 研究代表者 山内 潤治(YAMAUCHI JUNJI) 法政大学・理工学部・教授 研究者番号: 50174579

研究成果の概要(和文):

シリコン細線導波路では、三角形導波路を用いれば、わずか数μmの軸長で偏波回転し得ることを、理論的に明らかにし、動作のメカニズムを明示した。マイクロ波におけるモデル 実験で動作を実証した。表面プラズモンが伝搬する導波路解析を能率よく行える、陰的有限 差分時間領域法(FDTD)法を開発した。金属材質を含む光デバイスの周波数応答を、パルス波 を用いて一度の計算で実行できるアルゴリズムを構築し、導波路型センサを設計した。

研究成果の概要(英文):

A silicon wire waveguide with a triangular cross section can rotate the polarization with a short device length of a few micrometers. The operation mechanism is theoretically explained together with an experimental demonstration at a microwave frequency. A novel implicit finite-difference time-domain method has been developed, which allows us to evaluate the frequency response of various optical devices at a one- time solution. The method is applied to the design of a waveguide-type sensor.

交付決定額

			(金額単位:円)
	直接経費	間接経費	合 計
2007年度	1, 100, 000	330, 000	1, 430, 000
2008年度	800, 000	240, 000	1, 040, 000
2009年度	800, 000	240, 000	1, 040, 000
年度			
年度			
総計	2, 700, 000	810, 000	3, 510, 000

研究分野: 工学

科研費の分科・細目:電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード:光デバイス、細線光導波路、偏波変換器、表面プラズモン共鳴、光センサ

1. 研究開始当初の背景

光回路の高密度集積化に向けて、簡便かつ 自由に光を誘導できるコンパクトな光配線 が必要になっている。特に近年、シリコン微 細加工と表面プラズモンを利用した細線光 導波路に注目が集まっている。 シリコン導波路のような高屈折率差導波路の課題の一つに偏波依存性の除去がある。 この目的のために、TE波とTM波を相互に変換する偏波回転器を利用した回路を形成する ことが考えられる。しかしながら、偏波回転器に関する検討は少なく、デバイスの小型化 は実現できていない。申請者は、傾斜リブ導 波路の偏波回転機構を解明する過程で、導波路構造を三角形にする新たな着想に至った。

表面プラズモンを利用した導波路研究も 国内外で盛んになっている。表面プラズモン は、光センサデバイスに応用できる。特に、 プリズムに金属薄膜を付加した、いわゆるク レッチマン配置のセンサは、バイオセンサと してすでに実用化されている。クレッチマン 型センサは、表面プラズモン共鳴の特性を利 用し、リアルタイムで高感度に屈折率を測定 できる利点がある。しかしながら、プリズム を利用しているため構造が大型であり、光回 路へモノリシックに集積することは困難で ある。そこで、集積可能で高感度なセンサ構 造ができれば、光源、検出器を一体化した小 型なセンサの実現につながると期待される。

上記の細線光導波路の検討には、理論的解 析が欠かせない。これまで光導波路の理論的 検討には、ビーム伝搬法(BPM)や差分時間 領域(FDTD)法が使用されてきた。しかしなが ら、従来の手法では、精度を確保するには極 端に小さな空間刻み幅を選ぶ必要がある。こ れに伴い、FDTD法では、時間刻み幅も極端に 小さくしなければならず、効率よく解析を行 うことは不可能であった。従って、シリコン や金属のような高屈折率をもつ光回路を効 率よく解析できる手法の開発が急務である。

2. 研究の目的

(1)FDTD法とBPMの改良

FDTD法に関しては、金属媒質を含む光導波 路の時間領域解析を効率よく行える陰的FDT D法を開発する。特に、局所的1次元法(LOD) に基づくLOD-FDTD法は、過去に提案された陰 的ADI-FDTD法と同等の計算精度を有しつつ、 アルゴリズムが極めて簡素で、結果として計 算時間の短縮が可能である。金属媒質を時間 領域で取り扱う場合、周波数依存の定式化が 必要になる。本研究では、時間領域手法の利 点を生かし、金属媒質を含む光デバイスの周 波数応答を、パルス波を用いて一度の計算で 実行できるLOD-FDTD法に基づくアルゴリズ ムの確立を目指す。

BPMに関しては、複素パデ近似を導入する ことで、金属媒質を含む導波路を安定に解析 できるようにする。

(2) 偏波回転器の最適設計

すでに2μm以下のデバイス長での動作を 確認しているが、三角形導波路の幅と入出 力導波路の幅との比を最適化することは接 続損失を減らす意味で重要な課題である。 そこで、虚軸BPMとFDTD法により接続損失を 0.5dB以下に抑える構造を見出す。特に、波 長特性に注目し、1.25µmから1.65µmの超 広帯域にわたって、低損失な偏波回転(消 光比が20dB以上)を目指す。さらに、マイ クロ波でのモデル実験から数値結果の妥当 性を確認する。

(3) 高感度な導波路型センサ

クレッチマン配置の光の入出力部を導波 路に置き換えることにより、光回路への集 積化を可能にする。屈折率変化に対する表 面プラズモン共鳴のピーク波長の移動量と 共鳴の強さが、従来のクレッチマン型セン サと同等になる構造設計を目指す。高精度 なBPMや、FDTD法を駆使し、構造の最適化を 図り、周波数領域手法と、時間領域手法と の結果の比較から、数値結果の妥当性につ いて詳細に検討する。

3. 研究の方法

(1)07年度

周波数依存型LOD-FDTD法の性能評価を詳細に行う。金属媒質を含む場合の性能評価も同様に、陽的FDTD法、ADI-FDTD法を用いた場合の結果と比較する。従来の手法に比べ、どれだけ計算効率が改善されるかを明らかにしLOD-FDTD法の優位性を示す。さらにLOD-FDTD法の適用限界も見極めていく。

開発する数値解法は、汎用のパーソナルコ ンピュータでも十分に実行できるほど効率 がよいと期待される。しかし、様々な構造を 検討し、データを蓄積するためには、数値計 算に特化した高速CPUを搭載した演算装置が 必要不可欠である。そこで、本申請により高 速演算処理装置を整備する。

初年度では、国際会議に出席し成果の途中 経過の報告、情報の収集を行う。19年度の米 国光学会(OSA)主催の Integrated Photoni cs and Nanophotonics Research and Appli cations (IPNRA) には、大学院生とともに出 席し、成果の一部を報告するとともに、研究 動向を詳細に調査する。

(2)08年度

導波路センサは、従来のセンサに比べて、 屈折率変化に対する表面プラズモン共鳴の 波長シフトの感度は同等であるものの、プラ ズモン共鳴の弱い欠点がある。そこで、金属 薄膜で共鳴を強くする方法の検討に力点を 置く。また、数値結果の妥当性を検討するた め、BPMを用いた周波数領域解析に加え、時 間領域解析も行う。

さらに、3次元構造のセンサを取り上げ、 申請者らが以前に開発した高精度3次元BP Mを用いて詳細な解析を行う。2次元解析で 得られた知見を基に、3次元構造において も高感度なセンサ構造を構築していく。 偏波回転器に関しては、改良されたBPM とFDTDを用いて、広帯域化がどこまで得ら れるかに力点を置いて検討する。デバイス 長をわずかに最適値からずらすことで、広 帯域化が達成される目処を得ているので、 具体的にどの程度最適値からずらすべき かを評価する。その際、20dB以上の消光比 の達成を目標とする。また、光回路はマイ クロ波帯でのモデル実験が可能であるの で、数値結果の妥当性を既存の測定装置に よっても検証する。

(3)09年度

研究の総まとめを行う。特に、国内外の論 文誌への投稿と国際学会、国内発表に力点を 置く。論文は、電子情報通信学会、米国電気 電子学会、米国光学会に投稿する。

4. 研究成果

(1) FDTD 法の改良

陽解法である従来の FDTD 法を陰解法であ る LOD-FDTD 法に変形する。この際に、金属 のような分散性媒質をも取り扱えるように 拡張する。金蔵媒質の影響を考慮するために、 従来からある補助微分方程式(ADE)法、帰納 的畳み込み(RC)法、線形近似帰納的畳み込み (PLRC)法、台形則に基づいた帰納的畳み込み (TRC)法に加えて、Z変換(ZT)に基づく手法 も取り上げ、5 種類の LOD-FDTD 法を従来の陽 的 FDTD 法と比較しながら、性能を議論した。

図1は、Drudeモデルで表された、銀クラ ッドプラズモン光導波路において、伝送特性 を比較したものである。ここで、CFLNは、時 間刻み幅 Δ tを陽解法における最大時間刻み 幅 Δ tcrLで割ったもので定義されている。図よ り、RC法の精度は他の手法に比べて劣ること が見出せる。他の手法では、CFLN<1では、陽 的FDTD法と殆ど同じ結果を与えているが、陰 解法の利点により、CFLN=10に選んでも、精 度よく解けていることが見出せる。



各手法の計算時間(CPU time)を図2に、使 用メモリを図3に示す。図より、LOD-FDTD法 により、計算時間が30%以下に短縮されてい ることが見出せる。但し、メモリ使用量は陰

解法のため、従来の陽的 FDTD 法に比べて約 2 倍に増える。また、定式化の点では、ZT 法が 極めて簡略に行える利点がある。



図2 計算時間の比較



(2)偏波回転器の最適設計

図4に本研究で検討した偏波回転器の構造 を示す。第1モードと第2モードとの伝搬定 数差が大きく取れるので、偏波変換長が短く なる利点がある。1.55μm帯で約2μmの変 換長である。





図5は、三角形導波路の辺の長さと導波路 幅の比w/hに対する挿入損失の計算結果を示 す。屈折率差Δnが約41%と大きい場合でも、 損失を、0.5dB以下に抑えられる寸法比の存 在することが見出せる。 決定した寸法比における、消光比と損失の 波長特性を図6に示す。デバイス長を適切に 選ぶと、偏波変換特性は双峰性になり、結果 として、広帯域に動作させることができる。 この場合、1.25μmから1.65μmの帯域で、 20dB以上の消光比を保つことが分かる。また、 この際に損失は0.5dB以下である。



図6 消光比と挿入損の波長特性

(3) 高感度な導波路型センサ

図7に導波路型センサの構造を示す。計測 試料(analyte)は、金属膜の表面に分布して いるとする。試料の屈折率の微小変化を最大 吸収波長の変化で観測する。

図8に波長変化に伴う、吸収パワーの変化 を示す。本研究で開発された各種計算法によ る結果を比較している。BPMの結果はFDTD法 の結果とよく一致している。



図7 導波路型センサの構造

図9に試料の屈折率変化に伴う最大吸収波

長の変化を示す。屈折率 0.004 の変化が、 0.609 μ m~0.623 μ m の波長シフトとして観 察され、高感度のセンサとして動作すること が見出せる。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

〔雑誌論文〕(計18件)

- J. Shibayama, A. Nomura, R. Ando, J. <u>Yamauchi</u>, and H. Nakano, A frequencydependent LOD-FDTD method and its application to the analysis of plasmonic waveguide devices, IEEE J. Quantum Electron., 査読有, Vol.46 No.1, pp.40-49, 2010
- J. Yamauchi, S. Harada, S. Kobori, and H. Nakano, Semivetor finite difference formula for the analysis of a step-index waveguide with a tilted interface, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol.21, No.24, pp. 1867-1869, 2009
- J. Yamauchi, S. Harada, and H. Nakano, Minimum loss condition of a bent rectangular hollow waveguide, Microw. Opt. Technol. Lett., 査読有, Vol.51, No.12, pp.2901-2902, 2009
- 4. J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, An LOD-FDTD method for the analysis of periodic structure at normal incidence, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 査読有, Vol.8,

pp. 890-893, 2009

- 5. <u>山内潤治</u>, 駒田隆明, 中野久松, 金属装 荷導波路型偏光子のビーム伝搬解析, 電 子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J92-C, No. 7, pp. 241-248, 2009
- J. Yamauchi, Y. Nito, and H. Nakano, A modified semivetorial BPM retaining the effects of the longitudinal field component and its application to the design of a spot-size converter, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 27, No. 13, pp. 2470-2476, 2009
- J. Yamauchi, N. Shibuya, and H. Nakano, Polarization coupling between strongly guiding waveguides stacked laterally, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol.27, No.13, pp. 2433-2438, 2009
- J. Shibayama, B. Murakami, J. Yamauchi, and H. Nakano, LOD-BOR-FDTD algorithm for efficient analysis of circularly symmetric structures, IEEE Wireless Compon. Lett., 査読有, Vol. 19, No. 2, pp. 56-58, 2009
- J. Yamauchi, N. Shimada, Y. Nito, and H. Nakano, Transverse-magnetic BPM analysis of a step-index slab waveguide expressed by a sigmoid function, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 21, No. 24, pp. 149-151, 2009
- J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. <u>Yamauchi</u>, and H. Nakano, Simple trapezoidal recursive convolution technique for the frequency-dependent FDTD analysis of a Drude-Lorentz model, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 21, No. 2, pp. 100-102, 2009
- T. Yamazaki, H. Aono, <u>J. Yamauchi</u>, and H. Nakano, Coupled waveguide polarization splitter with slightly different core widths, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol.26, No.21, pp.3528-3533, 2008
- <u>柴山純</u>,高橋達也,<u>山内潤治</u>,安田元気, 中野久松,水平方向広角アルゴリズム を用いた三次元セミベクトルADI-BPMに よる光導波路解析,電子情報通信学会論 文誌,査読有, Vol. J91-C, No. 10, pp. 479-488, 2008
- J. Shibayama, A Kretschmann-type absorption-based surface plasmon resonance waveguide sensor, Microw. Opt. Technol. Lett., 査読有, Vol. 50, No. 10, pp. 2497-2500, 2008
- 14. <u>J. Shibayama</u>, R. Takahashi, A. Nomura, <u>J. Yamauchi</u>, and H. Nakano, Concise

frequency-dependent formulation for LOD-FDTD method using Z transforms, IET Electron. Lett., 査読有, Vol.44, No.16, pp.949-9650, 2008

- J. Yamauchi, M. Yamanoue, and H. Nakano, A short polarization converter using a triangular waveguide, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol. 26, No. 12, pp. 1708-1714, 2008
- 16. J. Shibayama, R. Takahashi, J. <u>Yamauchi</u>, and H. Nakano, Frequencydependent locally one-dimensional FDTD implementation with a combined dispersion model for the analysis of surface plasmon waveguide, IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 20, No. 10, pp. 824-826, 2008
- 17. J. Shibayama, T. Takeuchi, N. Goto, J. <u>Yamauchi</u>, and H. Nakano, Numerical investigation of a Kretschmann-type surface plasmon resonance waveguide sensor, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol.25, No.9, pp.2605-2611, 2007
- 18. J. Yamauchi, Y. Kamei, K. Murase, and H. Nakano, Analysis of polarization splitters composed of multilayer thin-film waveguides using the beam-propagation method based on Yee's mesh, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 査読有, Vol.25, No.9, pp. 2345-2351, 2007

〔学会発表〕(計 12 件)

- J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a photonic bandgap structure using a periodic LOD-FDTD method, Asia Pacific Microwave Conference, 2009 年 12 月 8 日, Singapore
- Y. Wakabayashi, S. Kimura, <u>J. Yamauchi</u>, and H. Nakano, A broadband mirror using a two-dimensional subwavelength grating, 15th Microoptics Conference, 2009 年 10 月 27 日, Tokyo
- Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, FDTD analysis of alldielectric planar chiral metamaterials with large optical activity, Int. Symp. on Antennas and Propag., 2009年10月21日, Bangkok
- J. Yamauchi, T. Iguchi, and H. Nakano, Analysis of enhanced transmission through an annular slit surrounded by periodic grooves, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009 年 7 月 15 日,

Honolulu

- 5. <u>J. Yamauchi</u>, S. Harada, S. Kobori, and H. Nakano, Modified finite-difference formula for the analysis of a step-index waveguide with a tilted interface, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009 年 7 月 13 日, Honolulu
- J. Shibayama, R. Ando, A. Nomura, J. <u>Yamauchi</u>, and H. Nakano, Analysis of a plasmonic microcavity using the frequency- dependent LOD-FDTD method, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2009 年 7 月 13 日, Honolulu
- J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Unconditionally stable locally one-dimensional FDTD methods for efficient electromagnetic simulations, Applied Computational Electromagnetics, (Invited), 2009 年 3月12日, Monterey
- J. Yamauchi, Y. Nito, and H. Nakano, A modified semivectorial beampropagation method retaining the longitudinal field component, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2008年7月16日, Boston
- J. Shibayama, A. Nomura, R. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Study of the sidelobe suppression in a plasmon waveguide grating filter using the FDTD method, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2008年7月14日, Boston
- 10. J. Yamauchi, Numerical modeling of polarization converters, The Third Research Forum of Japan-Indo Collaboration Project on Infrastructural Communication Technologies Supporting Fully Ubiquitous Information Society, (Plenary Talk), 2007年12月13日, New Delhi,
- 11. J. Yamauchi, M. Yamanoue, and H. Nakano, An extremely short polarization converter using a triangular waveguide, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, 2007年7月10日, Salt Lake City
- 12. <u>J. Yamauchi</u>, T. Yamazaki, K. Sumida, and H. Nakano, TE/TM wave splitters using surface plasmon polaritons, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications,

(Invited), 2007年7月10日, Salt Lake City

〔図書〕(計1件) 山<u>内潤治</u>監修、薮哲郎著、光導波路解析入門、 森北出版社、2007

〔産業財産権〕
○出願状況(計2件)
名称:誘電体導波路を用いた偏波変換器及び
偏波分離・変換器
発明者:<u>山内潤治</u>、山之上雅弘、中野久松
権利者:<u>山内潤治</u>
種類:特許
番号:特願第 2008-226286
出願年月日:2008年9月3日
国内外の別:国内

名称:誘電体導波路を用いた偏波変換器及び 偏波分離・変換器 発明者:山内潤治、山之上雅弘、若林佑、中 村正志、中野久松 権利者:山内潤治 種類:特許 番号:特願第 2009-195955 出願年月日:2009 年8月26日 国内外の別:国内

〔その他〕 ホームページ等 http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profile s/0004/0001152/profile.html

6. 研究組織

(1)研究代表者 山内 潤治(YAMAUCHI JUNJI) 法政大学・理工学部・教授 研究者番号:50174579
(2)研究分担者 柴山 純(SHIBAYAMA JUN) 法政大学・理工学部・専任講師 研究者番号:40318605 (2007年4月1日→2009年9月18日: 連携研究者)