

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420322

研究課題名(和文) 偏波変換導波路の効率的設計手法の確立と超薄型偏波変換板の開発

研究課題名(英文) Development of an efficient design method for a waveguide polarization converter and an extremely thin plate for polarization conversion

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：基板上に金属ストリップを装荷する偏波変換器において、金、銀、銅の三種類の金属を取り上げ、変換特性に及ぼす効果を明らかにした。金属幅の再設計を行うのみで、どの金属を用いても、光通信波長帯で偏波変換特性が得られることを明らかにした。

強調された増幅係数を利用した虚軸ビーム伝搬法を周期構造に適用できるように拡張した。Yee格子に基づいて定式化されており、FDTD法との親和性が高い手法である。長方形開口の周期列からなる偏波変換板に応用し、従来手法に比べて短時間にモード解析の行えることを明らかにした。1/4波長板に関して、いかなる偏波面の入射波であっても、常に90度偏波面を回転できる構造を提案した。

研究成果の概要(英文)：A waveguide type polarization converter is developed, in which a thin metal film is loaded on a substrate or at the interface between the cladding and the air region. No modification to the waveguide core is required, since two asymmetric modes are generated by virtue of the existence of the metal film. The polarization conversion can be obtained for a gold, silver or copper film, provided the configuration parameters are redesigned. Furthermore, the Yee-mesh-based beam-propagation method for a periodic structure is applied to the imaginary-distance procedure with an enhanced amplification factor. The eigenmode analysis of a rectangular hole array is performed with reduced computational time, and the obtained results are utilized to design a polarization converter. A novel configuration composed of two half-wave plates, which are stacked with a inclination angle of 45 degrees has been proposed to obtain the conversion regardless of the polarization plane angle of incident wave.

研究分野：電磁波工学

キーワード：光デバイス 偏波変換 表面プラズモン 周期構造

1. 研究開始当初の背景

直線偏波の向きを(あるいは直線偏波を円偏波に)変える「偏波変換器」は、応用範囲が広く、これまで多くの研究がなされ、実用に供されている。

例えば、光通信回路において、偏波依存性で生じる特性悪化は、偏波を90度回転させる偏波変換器と偏波スプリッタをそれぞれ2個使用する方法で解決できるが、回路の大型化、狭帯域性の問題があった。従って、コンパクトで製造容易な構造を保ちつつ、低損失、広帯域の特性をもつ偏波変換器を設計する手法の確立が、重要な研究課題となっている。

従来この素子の設計には、有限差分時間領域(FDTD)法が利用されているが、膨大な計算時間とメモリを要し、設計に手間取る欠点があった。とりわけ、初期設計の段階では、より効率的な手法の開発が望まれる。そこで、申請者は、固有モード解析の電磁界分布のみで、偏波消光比と挿入損を評価する手法を検討し始めていた。

他方、導波路構造で構成される光集積回路に加えて、空間回路においても偏波変換器の必要性が高まっている。身近な例では、ディスプレイなどの画像装置、DVDの読み取り部に使われている。この目的では、いわゆる1/4波長板(数波長の厚み)が用いられているが、入射波が特定な角度にのみ変換特性が得られ、実用上は角度誤差の軽減が課題となっている。加えて、素子の小型化には変換板の薄型化が必須である。最近、この観点から、表面プラズモンポラリトン(SPP)を利用した周期構造の金属膜変換板が提案され、1/10波長程度の厚さが報告されている。しかしながら、SPPを利用すると損失が大きくなり、透過率が0.3程度しか得られない欠点が指摘されていた。また、Q値の高いSPP共振を利用すると、必然的に波長特性が悪化する問題点を生じている。そこで、如何に透過率を上げた状態で、広帯域に動作させるかが喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、数値解法の改良とそれに基づく新しいデバイスの開発とを含んでいる。研究目的は、導波路型偏波変換器の効率的設計法の確立と、超薄型偏波変換板の開発とからなる。

目的の一つ目は、偏波変換導波路の固有モード解析のみで、伝搬解析を行うことなく偏波変換特性を評価する設計法を確立することにある。固有モードを求める手法には様々あるが、電界と磁界の両者を同時に扱う手法が、諸特性評価において精度の良いことを申請者らは突き止めている。そこで、FDTD法と同様な格子配置に基づくYee格子(YM)虚軸BPMを採用する。本研究では、偏波変換部で得られた二つの直交する固有モード界を利用して、偏波消光比、挿入損を計算し、厳密にFDTD法で解いた値と合理的な範囲

で一致することを明らかにする。この際、YM-BPMにFundamental法と呼ばれる新たな手法を導入し、計算時間の短縮化を図る。結果として、丸一日要した計算時間を30分程度にまで短縮することを目指す。

目的の二つ目は、新たな偏波変換板の開発である。この目的には2種類のアプローチを用いる。まず、金属膜を使用せず、誘電体板においてサブ波長の周期孔を設ける手法を提案する。構造複屈折性を利用するこの方法では、従来は2種類の異なる誘電体の張り合わせ構造を用い、変換板の厚さが数波長程度は必要となる欠点があった。本研究では、単純な空気孔を用いることで、単一の誘電体のみでありながら、きわめて広帯域にかつ低損失に偏波変換を行うことを目的とする。申請者は導波路型において二等辺三角形断面をもつ導波路の有用性を指摘しているが、この時の知見から、直交する二つのモードの伝搬定数差を大きくするには、周期構造においても三角形が最適であるとのアイデアにたどり着き、サブ波長の周期孔でも導波路と同様に動作するとの予想を得た。本研究では、構造の最適化を行い、ほとんど無損失の状態に偏波を変換する誘電体板の設計を行う。通信波長(1.3 μm ~1.55 μm)帯で透過率0.9以上、15dB以上の消光比の達成を目指す。さらに、従来の偏波変換板の欠点であった、特定の入射角のみの動作を解決するために、45度傾けた2つの変換板を張り合わせる構造も検討する。任意の入射角に対して、90度の偏波変換が可能となる構造を見出す。

構造複屈折型で生じる板の厚み依存性を緩和し、かつ極めて薄い板厚で偏波変換を達成するには、金属膜で生じるSPPを利用する方法が考えられる。誘電体板に金属素子を配線する手法と金属板に孔をあける手法とがあるが、本研究では、後者の手法を主に取り上げる。2012年にOptics Lettersにおいて、十字長をわずかにずらし離調することで、0.1 μm 程度の金属膜厚で直線円偏波変換が可能と報告されているが、Q値が高いため動作帯域が狭い。加えて、開口部の面積が小さいため、透過率も0.3程度と改善の必要性があった。本研究では、申請者の実績がある三角形の孔を設ける手法を取り入れる。三角形孔構造、金属膜厚の最適化により、1/10波長程度の超薄型でありながら、波長1.55 μm を中心に5%以上の広帯域で3dB以下の円偏波率、0.7以上の透過率の達成を目指す。

3. 研究の方法

代表者に加え、数値解法に精通した分担者1名、プログラミング、実験担当の協力者(修士課程大学院生)複数名の体制での3年計画であった。

26年度は、文献、図書収集、研究動向調査に重きを置きながら、非対称導波路型偏波変換器の設計を効率よく行えるような、アルゴリズム、プログラムを構築した。

27年度は、完成したプログラムを用いて、周期構造型および導波路型デバイスの偏波変換、フィルタ特性を評価した。周期構造型では、入射偏波角の無依存化、導波路型では、 $1.31\mu\text{m}$ から $1.65\mu\text{m}$ の超広帯域をカバーする設計を行っている。周期構造型に関しては、マイクロ波帯で検証実験も実施した。

28年度は、総まとめとして、米国電気電子学会、米国光学会、電子情報通信学会などの国内外の論文誌、国際会議等へ投稿し、成果を公表した。

4. 研究成果

(1) 数値解析法の開発

Yee格子に基づくフルベクトル虚軸 BPM (YM-BPM)において、強調された増幅係数が得られる刻み幅を算出した。これに基づき、短時間で高次モードを直接算出できるようにした。さらに、この手法を周期構造にも適用できるように拡張した。Yee格子は汎用的な電磁界解析法である FDTD 法との親和性が高く、求めた固有モードを使って、FDTD 解析するのを便利にすることができた。

加えて、FDTD 法の簡略化で提案されていた Fundamental 法を YM-BPM に導入し、計算アルゴリズムを簡略化した。

(2) 導波路型偏波変換器

非対称導波路型変換器の簡易な設計法

導波路コアの一部を欠損させた L 字型偏波変換導波路を効率よく設計するために、フルベクトル手法で算出した固有モードのみを利用する簡易な手法を開発した。重なり積分にもフルベクトル型を採用し、精度を向上した。その際、光軸回転角の評価にポインティングベクトルを利用する手法を提案した。

金属ストリップの利用

従来の導波路型偏波変換器は、コアを欠損させることで生じるハイブリッドモードを利用するものであった。効率よく偏波変換が可能であるが、コアの欠損に伴い放射損が生じる課題があった。

本研究では、コアを欠損させる代わりに、コア近傍に金属ストリップを装荷する手法を提案した。金属ストリップを、コア上部に直接装荷すると損失が高くなる欠点がある。そこで、コア近傍の基板上に設置する構造を提案した。石英基板の空気クラッドとの境界に、コアに対して非対称となる位置に金属ストリップを配置することで、低損失で短い軸長の偏波変換器を構築できることを見出した。

テーパ導波路型変換器の短軸長化

一對のテーパ導波路を積層した導波路型偏波変換器において、従来用いられている直線テーパに変わり、曲線テーパを導入すると、短軸長で偏波変換が達成されることを実証した。パワー保存が可能になるように、電界

と磁界の両者を BPM で並列に解き、ポインティングベクトルによりパワー評価した。計算アルゴリズムには Fundamental 法を導入し、微分計算を大幅に削減し得た。

(3) 偏波変換板

誘電体板型

従来の平行平板の重ね合わせの形式と異なり、三角形孔、長方形孔の周期列でも $1/4$ 波長板、 $1/2$ 波長板として動作することを見出した。孔の大きさがサブ波長程度となると、スロット導波路で見られるように、界分布が孔部に集中し、効率のよい偏波変換が得られることを明らかにした。

特に、上記 $1/4$ 波長板を 45 度回転させ、ずらした関係で積層すると、入射直線偏波面に無関係に、偏波面の 90 度回転を、常に実現できることを発見した。プラズモン効果等を利用した従来手法に比べ、低損失かつ広帯域にわたり動作することを確認した。また、その動作メカニズムについても解明した。実際の使用において、設置状態のトレランスが大きくなり、実用的、汎用的であることを証明した。

金属板型

超薄型の $1/4$ 波長板を実現するため、長方形孔と三角形孔の周期配列を検討した。プラズモンが発生する光波帯のみならず、完全導体とみなせるマイクロ波帯でも動作することを見出した。

三角形孔の場合には、波長の違いにより、右旋と左旋の 2 種類の円偏波が発生できる、いわゆる反円偏波特性のあることを見出した。透過率の向上には、開口部を大きくする必要があることから、長方形孔の周期列を引き続いて検討した。結果として、透過率を 80% 以上にまで向上できた。長方形孔であっても、誘電体基板で挟み込むことで、三角形孔の場合と同様な反円偏波特性の得られることを明らかにした。

加えて、材料としてアルミニウムを使用し、 24×24 の三角形孔、長方形孔からなる金属板を実際に製作した。マイクロ波帯で実験を行うことで、 $1/4$ 波長板としての動作を実証した。

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 5 件)

朝生龍也, 山内潤治, 中野久松, “強調された増幅係数を用いた Yee 格子型虚軸ビーム伝搬法による固有モード解析,” 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, vol. J99-C, no. 5, 2016, pp. 234-242
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-c_5_234

柴山純, 清水圭介, 山内潤治, 中野久松,

“FDTD解析における異なる分散モデルの境界の扱い,”電子情報通信学会論文誌C, 査読有, vol.J98-C, no.5, 2015, pp.135-137

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j98-c_5_135

Yuta Nito, Jun Shibayama, Junji Yamauchi, and Hisamatsu Nakano, “Full-vectorial beam-propagation methods based on a fundamental scheme ---Design of a short polarization converter,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 査読有, vol.32, no.21, 2014, pp.3509-3516

DOI:10.1109/JLT.2014.2346923

Yuu Wakabayashi, Junji Yamauchi, and Hisamatsu Nakano, “Laminated polarizer with an antireflection structure based on a subwavelength grating,” IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol.26, no.15, 2014, pp.1530-1533

DOI:10.1109/LPT.2014.2327756

山内潤治, “非対称導波路型偏波変換器の効率的な特性評価法,” 電子情報通信学会論文誌C, 査読有, vol.J97-C, no.5, 2014, pp.169-176

https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j97-c_5_169

[学会発表](計 23件)

山内潤治, 島村大輝, 中野久松, “入射偏波面に依存しない長方形孔配列を設けた偏波回転子,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月25日, 名城大学(愛知県名古屋市)

カ久裕太, 山内潤治, 中野久松, “基板上に誘電体ストリップを配置した偏波変換器,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月25日, 名城大学(愛知県名古屋市)

カ久裕太, 佐々木陽太, 山内潤治, 中野久松, “クラッド上に金属ストリップを配置した埋め込み導波路型偏波変換器,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月25日, 名城大学(愛知県名古屋市)

新大毅, 馬場隼人, 山内潤治, 中野久松, “誘電体層で挟まれた偏波変換器の厚みに関する一考察,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県名古屋市)

山内潤治, “電磁波伝搬解析における残された課題,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県名古屋市)

新大毅, 山内潤治, 中野久松, “誘電体層で挟まれた周期的長方形孔配列金属板で構成される偏波変換器,” 電子情報通信学会総合大会, 2017年3月22日, 名城大学(愛知県名古屋市)

Tatsuya Aso, Daiki Shimamura, Junji Yamauchi, and Hisamatsu Nakano, “An imaginary-distance YM-BPM with an enhanced amplification factor for the analysis of a periodic structure,” IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2017年3月10日, 熊本県市民センター(熊本県熊本市)

カ久裕太, 山内潤治, 中野久松, “非欠損コアを有する導波路型偏波変換器,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2017年1月18日, 伊勢市民文化会館(三重県伊勢市)

新大毅, 山内潤治, 中野久松, “開口部を誘電体で埋めた周期的長方形孔配列で構成される1/4波長金属板,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道札幌市)

カ久裕太, 山内潤治, 中野久松, “基板上に金属ストリップを配置した偏波変換器 金属媒質による特性変化,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道札幌市)

朝生龍也, 島村大輝, 山内潤治, 中野久松, “強調された増幅係数を用いた周期構造解析用虚軸YM-BPM,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道札幌市)

Junji Yamauchi, Yuta Rikihisa, and Hisamatsu Nakano, “A silicon-waveguide polarization converter with a metal strip on an SiO₂ substrate,” International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), 2016年7月12日, Sydney, Australia

山内潤治, 新大毅, 中野久松, “角を部分的に埋めた周期的長方形配列で構成される1/4波長金属板,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県福岡市)

藤村峻也, 仁藤雄大, 山内潤治, 中野久松, “曲線テーパ導波路を用いた偏波分離変換器(),” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月17日, 九州大学(福岡県福岡市)

高田匠, 山内潤治, 中野久松, “側壁にラフネスを有する導波路型偏波変換器,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月17日, 九州大学(福岡県福岡市)

山内潤治, カ久裕太, 中野久松, “基板上に金属ストリップを配置した導波路型偏波変換器の損失低減,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月17日, 九州大学(福岡県福岡市)

高木雄平, 山内潤治, 中野久松, “入射偏波面に依存しない偏波回転子の傾斜入射時における波長特性,” 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月17日, 九州大学(福岡県福岡市)

山内潤治, 島村大輝, 本田慧, 中野久松,

“無反射コーティングにも周期的に三角形孔を設けた 1/2 波長板,” 電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 17 日, 九州大学 (福岡県福岡市)

山内潤治, 榮山竜清, 高木雄平, 中野久松, “金属板に角を埋めた三角形孔配列を設けた 1/4 波長板,” 電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 17 日, 九州大学 (福岡県福岡市)

Junji Yamauchi, Yuhei Takagi, and Hisamatsu Nakano, “Counter-circular-polarization characteristics of a quarter-wave plate using a triangular hole array in a metallic plate,” Optical wave & Waveguide Theory and Numerical Modelling, 2015 年 4 月 17 日, London, UK

21 Yuta Nito, Shunsuke Fujimura, Junji Yamauchi, and Hisamatsu Nakano, “A polarization converter using a curvilinearly tapered waveguide,” Optical wave & Waveguide Theory and Numerical Modelling, 2015 年 4 月 17 日, London, UK

22 Junji Yamauchi, Takumi Takada, and Hisamatsu Nakano, “Wavelength characteristics of a waveguide polarization converter with sidewall-roughness,” Optical wave & Waveguide Theory and Numerical Modelling, 2015 年 4 月 17 日, London, UK

23 Junji Yamauchi, Ryouyusuke Taniguchi, Yuhei Takagi, and Hisamatsu Nakano, “Quarter-wave plates consisting of subwavelength triangular hole arrays,” Integrated Photonics Research, Silicon, and Nanophotonics, 2014 年 7 月 15 日, San Diego (USA)

〔図書〕(計 1 件)

山内潤治, 朝倉書店、電磁波解析の事典、(ビーム伝搬法の章を担当)、発行確定

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 金属膜に周期的に非対称開口を配設した位相差板

発明者: 山内潤治、高木雄平、谷口棕亮、中野久松

権利者: 学校法人法政大学

種類: 特許

番号: 特許願 2015-29941

出願年月日: 平成 27 年 2 月 18 日

国内外の別: 国内

名称: 金属膜に周期的に非対称開口を配設した位相差板

発明者: 山内潤治、高木雄平、谷口棕亮、中野久松

権利者: 学校法人法政大学

種類: 特許

番号: 特許願 2014-174956

出願年月日: 平成 26 年 8 月 29 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

学術研究データベース

<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profiles/12/0001152/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・教授

研究者番号: 40318605

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

谷口 棕亮 (TANIGUCHI, Ryouyusuke)

高木 雄平 (TAKAGI, Yuhei)

藤村 峻也 (FUJIMURA, Shunya)

高田 匠 (TAKADA, Takumi)

新 大毅 (ATARASHI, Daiki)

本田 慧 (HONDA, Satoru)

力久 祐太 (RIKIHISA, Yuta)

榮山 竜清 (SAKAEYAMA, Ryusei)

島村 大輝 (SHIMAMURA, Daiki)

法政大学・大学院理工学研究科・修士課程