

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号： 32675

研究種目： 基盤研究（C）

研究期間： 2010～2012

課題番号： 22560350

研究課題名（和文） 周期構造型および導波路型偏波変換・制御デバイスの開発

研究課題名（英文） Development of polarization conversion and control devices based on periodic and waveguide structures

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）：導波路型および周期構造型の偏波変換・制御デバイスを解析し得る、効率のよい数値解法として、陽解法と陰解法に基づく有限差分時間領域法を金属膜のような分散性媒質を含む際にも取り扱えるように拡張した。構築した解法に基づき、周期構造型偏波変換器の動作メカニズムを明らかにした。また、導波路型偏波変換器を広帯域に動作させる手法を考案した。結果として、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ の広帯域に渡って、15dB 以上の消光比、0.5dB 以下の挿入損を実現した。

研究成果の概要（英文）：To analyze polarization conversion and control devices based on periodic and waveguide structures, we develop explicit and implicit finite-difference time-domain methods for dispersion materials. The mechanism for splitting two polarizations has been explained using the surface plasmon effect. For the waveguide-type converter, the polarization conversion is obtained with an extinction ratio of more than 15dB and an insertion loss of less than 0.5dB over a wide wavelength range of 1.3 to 1.65 μm .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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、偏波変換器、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」、TE 波と TM 波の直線偏波の片方（あるいは右旋、左旋円偏波のいずれか）のみを通す「偏波フィルタ」、異なる偏波を分離する「偏波スプリッタ」、などの「偏波変換・制御デバイス」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、波長依存性の問題があった。従って、偏波変換・制御デバイスが、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

性を維持するような設計法の確立が、重要な研究課題となっている。

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・制御デバイスの必要性が高まっている。例えば、半導体レーザの出射面には特定の偏波のみを通過させる偏波フィルタが設置されている。この場合、回折素子が利用されているが、周期構造にともなう波長依存性、入射角依存性が問題になる。そこで、如何に許容誤差を大きくしながら、広帯域に動作させるかが喫緊の課題となっている。加えて、金属周期構造によって生じる表面プラズモンを利用したデバイスも、誘電体のみでは実現できない新たな素子としての可能性を秘めており、近年関心が高まっている。

偏波変換・制御デバイスの設計には、数値解法が不可欠である。研究代表者は長年にわたり、誘電体導波路の解析に適したビーム伝搬法(BPM)、時間領域の電磁界解析に適した有限差分時間領域(FDTD)法の改良に努力を払ってきた。その過程で種々の偏波変換・制御デバイスを考案してきた。特に、シリコン細線導波路において、三角形導波路を用いれば、わずか数 μm の素子長で偏波回転し得ることを見出し、動作原理を詳述した。その後、三角形導波路の先端部の製作誤差の許容範囲を検討する過程で、先端部の界が小さいことに気づき、この部分を取り除いても性能を維持できる着想にたどり着き、特許出願した。しかしながら、上記の二つのモデルでは、導波路に傾斜部が存在するので、製作に困難さが伴うことが課題となっていた。そこで、傾斜部を階段近似ともいえる、直角形状に単純化することを思いつき、L字型構造を提案した。簡易な構造にもかかわらず偏波が変換されることを見出した。構造の最適化さえ行えば、製作が容易な偏波変換器として実用になると期待される。

他方、偏波フィルタ・スプリッタに関しては、研究代表者の成果の集約的な内容を、国際会議における招待講演として発表してきた。特に、表面プラズモンを利用すれば、従来に比べて素子長を 1/10 以下に短縮できること、さらに誘電体周期構造を併用することにより、電氣的にシールド効果を有する偏波フィルタを実現できることを見出してきた。表面プラズモンは金属膜界面に局在するため、厳密に扱うには分散性媒質の特性を取り込んだ高精度の数値解法が必要となる。そこで、BPM の数値安定性の改善、陽的 FDTD 法への台形側に基づく Recursive Convolution 法の導入などの改良に努力を払ってきた。

2. 研究の目的

研究目的は、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。

目的の一つ目は、周期構造からなる「偏波変換・制御デバイス」を効率よく解析するための改良型 FDTD 法を開発することである。すでに FDTD 法は広く用いられているが、従来の手法は陽解法であるため、収束条件により計算の刻み幅に厳しい条件が課され、計算効率の悪化する問題があった。この問題を解決するために、研究代表者らは局部次元 (LOD)法を応用した陰的 FDTD 法を世界に先駆けて考案した。この発表以来、世界の多くの研究者が更なる改良、応用に取り組んでいるが、回折型偏波変換・制御デバイスに関しては、斜め方向からの入射に対しても特性を検討する必要がある、アルゴリズムの開発が待たれている。本研究では、この課題に取り組んでいる。

目的の二つ目は、導波路型偏波変換器の最適設計を行うことである。すでに数波長という短軸長での動作を確認しているが、実用化するには入出力導波路と L 字型偏波変換部との接続損失を極力抑える必要がある。L 字型偏波変換部は入出力の矩形導波路の一部を切り落とした形状であるので、切り落とす部分の長さの最適化により、低損失化が可能となる。本研究では、寸法を最適化することにより接続損失を 0.5dB 以下に抑えることを目的にする。特に、波長特性に注目し、1.3 μm から 1.65 μm の超広帯域にわたって、低損失な偏波回転 (消光比が 15dB 以上) を目指す。さらに、マイクロ波・ミリ波帯でのモデル実験から数値結果の妥当性を確認する。なお、別形状の偏波変換器として、MIT で考案されたテーパ型の基礎検討も行う。この検討には BPM が使えるが、パワー保存性に問題が生じている。研究代表者はすでにセミベクトル型 BPM に関してパワー保存性を改善する手法を提案した。本研究では、フルベクトル型 BPM においてもパワー保存型アルゴリズムを構築し、偏波変換器の設計を行っていく。既存のテーパ型偏波変換器に比べて、軸長を半減することを目的とする。

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 6 名 (博士後期課程院生 1 名を含む) の体制での 3 年計画とする。22 年度は、文献、図書収集、研究動向調査に重きを置きながら、傾斜入射を取り扱える陰的 LOD-FDTD 法、パワー保存性を改善した BPM のアルゴリズムを完成している。23 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、入射角の依存性軽減、導波路型では、1.3 μm から 1.65 μm の超広帯域をカバーする設計を行っている。導波路型に関し

ては、マイクロ波帯で検証実験も実施した。24年度は、総まとめとして、米国電気電子学会、米国光学学会、電子情報通信学会などの国内外の論文誌への投稿し、成果を公表した。

4. 研究成果

(1) 数値解析法の開発

① FDTD 法

偏波変換・制御デバイスを解析する数値解析法の開発・改良を行い、基礎的構造を解析、検討した。次に傾斜入射に対応した周期構造用 FDTD 法の開発を行った。分散性媒質を含む場合を取り扱い、さらに陰的手法の特長を活かした、周期構造用の局部 1 次元 (LOD) FDTD 法をも導出し、傾斜入射時に適用できるようなアルゴリズムを確立した。

陰解法に基づく LOD-FDTD 法に関しては、数値分散補正パラメータを導入した。その結果、時間刻み幅を従来の 10 倍近くに選んでも、許容できる精度での解析が可能となった。これにより、計算時間を大幅 (従来の陽解法の 10%) に短縮することに成功した。

さらに Fundamental 法の応用を実施した。3次元 LOD-FDTD 法に適用し、ギャップ表面プラズモン導波路の解析に利用した。金属の分散性の表現には、これまで多用される Drude モデルに加えて、より実験値との整合のよい、Drude-Critical Points モデルでの定式化を行った。従来の陽的手法の計算時間を 1 とすると、LOD-FDTD で 0.62、Fundamental 型 LOD-FDTD で 0.43 にまで短縮することに成功した。周期構造に対しても応用し、基板上に配置された金属グレーティングにおいて、実験値との良好の一致をみた。さらに傾斜入射時にも対応できるように拡張した。

② ビーム伝搬法 (BPM)

パワー保存型アルゴリズムを再点検し、従来のセミベクトル型をフルベクトル型へ拡張した。具体的には、電界と磁界の両方のフレネル方程式を平行して解き、ポインティングベクトルを用いてパワーを評価する手法を考案した。応用例として、シリコン細線導波路と石英系導波路とを接続するスポットサイズ変換器、テーパ型偏波変換器をとりあげ、パワーの相反性が保たれていることの確認から、解析手法の妥当性を証明した。

(2) 周期構造型偏波変換・制御デバイス

① 積層型偏光子・偏波分離器の広帯域化に取り組んだ。結果として、無反射コーティングの最適設計により、波長 $1\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ の帯域にわたり、90%以上の透過率を達成した。

② 図 1 に示す、金属薄膜と誘電体グレーティングの複合構造からなる偏光子を検討した。表面プラズモンの励起が関わる動作メカニ

ズムを解明した。TE 波の導波モード共振、TM 波の表面プラズモン共振、両モードに共通なファブリペロー共振の 3 種類の共振現象を利用することで、要求に応じた波長特性を有する偏光子を設計できることを明らかにした。結果として、17dB 以上の消光比が $1.5\mu\text{m}$ から $1.75\mu\text{m}$ の広帯域で得られた。また、消光比特性が光波の入射角に対して鈍感である利点を確認した。垂直入射時の透過/反射特性の一例を図 2 に示す。

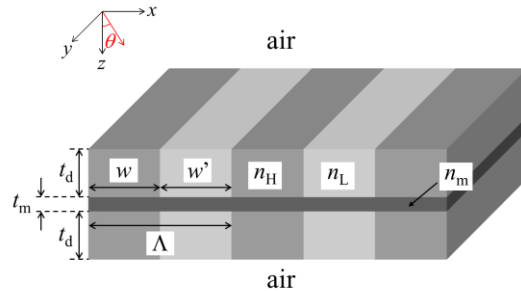


図 1 金属 (Ag) 薄膜と誘電体グレーティングで構成される偏波分離器

($n_H=3.715$, $n_L=2.049$, $w=w'=0.29\mu\text{m}$, $t_m=0.03\mu\text{m}$, $t_d=0.22\mu\text{m}$, $\Lambda=2w$)

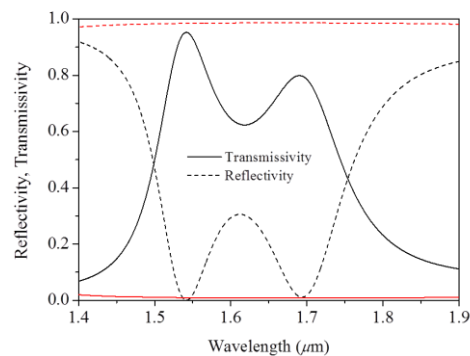


図 2 透過率と反射率の波長特性 ($\theta=0$)

③ 周期構造における固有モード特性を算出できるアルゴリズムを構築した。L 形状からなる平面キラルナノ周期構造を利用した偏波変換器に関しては、平面波励振時に生成されるモード形状と伝搬定数を明らかにした。

(3) 導波路型偏波変換・制御デバイス

① TM 透過、TE 遮断導波路型偏光子を開発した。バッファ層の屈折率を変えることで、TE 透過、TM 遮断型にも変更できる柔軟性のあるデバイスを設計し得た。

② ナノ構造に光を閉じ込める導波路として注目されているスロット導波路を用いた偏波変換器を開発した。スロット導波路の片側の高さを変える、あるいは一部を欠損させ、非対称構造を生み出すことで、15dB 以上の消

光比を維持しつつ、デバイス長を $10\ \mu\text{m}$ という短軸長で偏波変換が可能になることを見出した。さらに、この研究の過程で、誘電体チューブ導波路の低損失化に関する条件を導出することに成功した。チューブ導波路は新たなナノ構造導波路として最近見直されており、チューブ導波路における偏波変換の可能性を探る基礎資料を得ることができた。

③ L字型シリコン細線導波路と埋め込み型空気コアナノ導波路の2種類に関して、構造設計法を明らかにした。特に広帯域に渡る動作を得るために、変換器長を最適値からわずかに長くする手法を提案した。消光比特性は単峰性から双峰性に変わり 15dB 以上の消光比が、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ に渡って維持されることを見出した。この時、挿入損 0.5dB 以内に抑えられることも明らかにした。図3に示すシリコン細線導波路型では、対向する2か所の角を切り取るダブルカット構造を提案し、挿入損を劇的に (0.2dB) に減らすことに成功した。図4にダブルカット構造における消光比と挿入損の波長特性を示す。

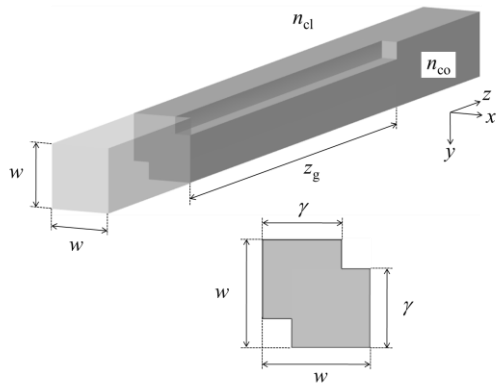


図3 シリコン細線ダブルカット導波路型偏波変換器

($w=0.32\ \mu\text{m}$, $\gamma=0.24\ \mu\text{m}$,
 $n_{\text{co}}=3.476$, $n_{\text{cl}}=1.444$)

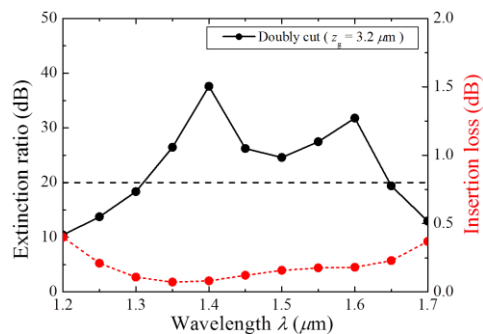


図4 ダブルカット導波路型偏波変換器の消光比と挿入損の波長特性

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 17 件)

- ① 山内潤治, 橋本貴, 若林佑, 中野久松, 埋め込み型空気コアナノ導波路を用いた短軸長偏波変換器、電子情報通信学会論文誌C、査読有、vol. J96-C、2013、印刷中
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=C&lang=J&curr=1>
- ② Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Short waveguide polarization converter operating over a wide wavelength range, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 査読有, vol. 31, no. 10, 2013, pp. 1544-1550
DOI:10.1109/JLT.2013.2253445
- ③ J. Shibayama, A. Yokomizo, J. Yamauchi, and H. Nakano, Simplified algorithms for the full-vectorial ADI-BPM using a fundamental scheme, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 25, no. 2, 2013, pp. 147-150
DOI:10.1109/LPT.2012.2230159
- ④ 山内潤治, 大野朋美, 中野久松, 近似的にエアリービームを発生する直交及び1/4円弧形状からなる移相素子のFDTD解析、電子情報通信学会論文誌C、査読有、vol. J95-C、no. 9、2012、pp. 187-194
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=C&lang=J&vol=J95-C&num=9&abst=>
- ⑤ J. Shibayama, T. Hirano, J. Yamauchi, and H. Nakano, Efficient implementation of frequency-dependent 3D LOD-FDTD method using fundamental scheme, IET Electronics Letters, 査読有, vol. 48, no. 13, 2012, pp. 774-775
DOI:10.1049/el.2012.1462
- ⑥ J. Shibayama, K. Watanabe, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency-dependent formulations of a Drude-critical points model for explicit and implicit FDTD methods using the trapezoidal RC technique, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol. E95-C, no. 4, 2012, pp. 725-732
DOI: 10.1587/transele.E95.C.725
- ⑦ J. Shibayama, A. Yokomizo, J. Yamauchi, and H. Nakano, Reformulation of the ADI-BPM using a fundamental scheme, IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 9, no. 5, 2012, pp. 365-370
DOI: 10.1587/elex.9.365
- ⑧ J. Shibayama, T. Oikawa, J. Yamauchi,

- and H. Nakano, Efficient LOD-BOR-FDTD implementation based on a fundamental scheme, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol.24, no.10, 2012, pp.957-959
DOI: 10.1109/LPT.2012.2190502
- ⑨ 若林佑、小林勇介、山内潤治、中野久松、無反射コーティングを付加した積層型偏光子及び偏光分離素子の波長特性、電子情報通信学会論文誌C、査読有、vol. J94-C, no. 12, 2011, pp.520-529
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=C&lang=J&vol=J94-C&num=12&abst=>
- ⑩ Y. Wakabayashi, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, A locally one-dimensional finite difference time domain method for the analysis of a periodic structure at oblique incidence, Radio Science, 査読有, vol. 46, 2011, RSOF03, 9 pages
DOI: 10.1029/2011RS004730
- ⑪ 山内潤治、中野朋浩、中野久松、TE波若しくはTM波を選択的に透過する導波路型偏光子の数値解析、電子情報通信学会論文誌C、査読有、vol. J94-C, no. 9, 2011, pp. 229-236
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=C&lang=J&vol=J94-C&num=9&abst=>
- ⑫ J. Yamauchi, T. Nakano, S. Harada, and H. Nakano, Minimum loss condition of a bent rectangular tube waveguide, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 23, no. 16, 2011, pp.1133-1135
DOI: 10.1109/LPT.2011.2157674
- ⑬ J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, IEEE Photonic Technology Letters, 査読有, vol. 23, no. 15, 2011, pp. 1070-1072
DOI: 10.1109/LPT.2011.2154361
- ⑭ J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, A 3-D LOD-FDTD method for the wideband analysis of optical devices, 査読有, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 11, 2011, pp. 1652-1658
DOI: 10.1109/JLT.2011.2138680
- ⑮ Y. Nito, T. Oda, S. Takase, J. Yamauchi, and H. Nakano, A beam-propagation method using both electric and magnetic fields, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 23, no. 7, 2011, pp. 429-431
DOI: 10.1109/LPT.2011.2107572
- ⑯ Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, A TM-pass/TE-stop polarizer based on a surface plasmon resonance, Advances in OptoElectronics, 査読有, vol. 2011, 867271, 2011, 6 pages
DOI: 10.1155/2011/867271
- ⑰ J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of plasmonic waveguides and gratings using implicit finite-difference methods, Advances in OptoElectronics, 査読有, vol. 2011, 287284, 2011, 6 pages
DOI: 10.1155/2011/287284
- [学会発表] (27件)
- ① J. Shibayama, N. Sasaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency-dependent LOD-FDTD simulation of THz sensing, Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2013年3月27日, Taipei, Taiwan
- ② J. Shibayama, T. Hirano, Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of plasmonic devices using the frequency-dependent fundamental 3D-LOD-FDTD method, Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2013年3月27日, Taipei, Taiwan
- ③ 山内潤治、表面プラズモンを用いた光ナノ共振器・アンテナ・ブラックホール、電子情報通信学会総合大会、2013年3月20日、岐阜大学
- ④ Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, FDTD analysis of a metal grating structure at oblique incidence using the TRC technique, Asia Pacific Microwave Conference, 2012年12月6日, Kaohsiung, Taiwan
- ⑤ J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Efficient time-domain techniques for the wideband analysis of plasmonic antennas, International Conference on Wireless Information Technology and Systems, 2012年11月14日, Maui, Hawaii
- ⑥ Y. Wakabayashi, T. Fukui, J. Yamauchi, and H. Nakano, Transmission characteristics of a thin metal film sandwiched between dielectric gratings, International Symposium on Antennas and Propagation, 2012年10月31日, Nagoya
- ⑦ 山内潤治、広帯域に動作する導波路型偏波変換器、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2012年9月13日、富山大学
- ⑧ J. Shibayama, Y. Uchizono, J. Yamauchi, and H. Nakano, Wide band analysis of a stop band filter and a resonator at THz

- frequencies, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2012年9月5日, Cape Town, South Africa
- ⑨ J. Yamauchi, H. Sato, and H. Nakano, High-gain characteristics of a slightly flared dielectric tube antenna, IEEE Antennas and Propagation Symposium, 2012年7月12日, Chicago, USA
- ⑩ Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, Three-dimensional periodic LOD-FDTD method with a fundamental scheme, Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics, 2012年6月18日, Colorado Springs, USA
- ⑪ J. Yamauchi, T. Hashimoto, Y. Wakabayashi, and H. Nakano, Polarization converters using optical nano-waveguides, Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics, 2012年6月18日, Colorado Springs, USA
- ⑫ J. Shibayama, A. Yokomizo, J. Yamauchi, and H. Nakano, Three-dimensional analysis of a surface plasmon resonance waveguide sensor for detecting material absorption, Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2012年3月30日, Kuala Lumpur, Malaysia
- ⑬ J. Shibayama, Y. Uchizono, J. Yamauchi, and H. Nakano, BPM and FDTD analyses of a metal-insulator-metal type terahertz waveguide, Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2012年3月29日, Kuala Lumpur, Malaysia
- ⑭ 山内潤治, 数値シミュレーションによる光デバイス設計、電子情報通信学会総合大会、2012年3月19日、岡山大学
- ⑮ J. Yamauchi, H. Harada, and H. Nakano, Numerical analysis of a cigar antenna, International Symposium on Antennas and Propagation, 2011年10月28日, Jeju, Korea
- ⑯ Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, FDTD analysis of a metal grating structure at oblique incidence, International Symposium on Antennas and Propagation, 2011年10月27日, Jeju, Korea
- ⑰ J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a gap plasmonic waveguide using the frequency-dependent 3-D LOD-FDTD method, The 11th International Conference on Numerical Simulation of Opto-

- electronic Devices, 2011年9月5日, Rome, Italy
- ⑱ J. Shibayama, T. Oikawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, Technique for improving the implicit BOR-FDTD method based on the locally one-dimensional scheme, 13th International Symposium on Microwave and Optical Technology, 2011年6月22日, Prague, Czech Republic
- ⑲ Y. Wakabayashi, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of periodic structures at oblique incidence using an LOD-FDTD method, Integrated Photonics Research, Silicon and Nano Photonics, 2011年6月13日, Toronto, USA
- ⑳ 山内潤治, ビーム伝搬解析の最近の動向(III)、電子情報通信学会総合大会、2011年3月17日、東京
- ㉑ J. Yamauchi, Y. Nito, and H. Nakano, Power-conserving beam-propagation method for photonic device simulation, Workshop on Simulation and Modeling of Emerging Electronics, 2010年12月7日, Hong Kong

[その他]
 ホームページ等
 学術研究データベース
<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profile/s/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・准教授
 研究者番号：40318605

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

若林 佑 (WAKABAYASHI YUU)
 法政大学・大学院理工学研究科・博士後期課程