

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560415

研究課題名(和文) 周波数依存型3次元LOD-FDTD法の開発とプラズモンデバイス解析への応用

研究課題名(英文) Development of the frequency-dependent three-dimensional LOD-FDTD method and its application to the analysis of plasmonic devices

研究代表者

柴山 純 (SHIBAYAMA, Jun)

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：40318605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：3次元の微小プラズモンデバイスを極めて高速に解析できる、局所的次元(LOD)法に基づく陰的なFDTD法を開発した。畳み込みの計算が一度で済み高い精度の得られる台形則に基づく手法、さらに、Fundamental法と呼ばれる技法の導入により、計算式の右辺に微分項を含まない極めて簡便な定式化を行った。プラズモニックギャップ導波路をPCで解析したところ、陽的なFDTD法で85分かかった計算がほぼ同等の計算精度を維持しつつ37分に低減された。開発した手法を用いて、種々の3次元プラズモンデバイスを解析した。デバイス特性を2次元構造デバイスと比較しながら議論し、3次元解析の重要性を示した。

研究成果の概要(英文)：An implicit FDTD method based on the locally one-dimensional (LOD) scheme has been developed for the efficient analysis of three-dimensional (3-D) plasmonic devices. The trapezoidal recursive convolution technique has been adopted, in which a single convolution integral is required. In addition, a fundamental scheme has been introduced for efficient formulation of the algorithm, in which no spatial derivative exists in the right-hand side of the equations. The developed LOD-FDTD offers a reduced computation time from 85 min with the conventional explicit FDTD to 37 min for the analysis of a plasmonic gap waveguide. The characteristics of several 3-D plasmonic devices have been investigated using the LOD-FDTD. The 3-D results have been compared with those of 2-D models, showing the necessity of the 3-D analysis for an accurate evaluation of the plasmonic devices.

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：FDTD法 表面プラズモンポラリトン 光回路 LOD-FDTD法

1. 研究開始当初の背景

回折限界を超えた微小な領域に光を閉じこめて導波させる方法として、金属と誘電体表面に局在する表面プラズモンポラリトン(SPP)の活用が検討されている。実験的、理論的検討が精力的になされている。理論解析では有限差分時間領域(FDTD)法がしばしば用いられるが、SPPの解析では空間の刻み幅を波長の300~400分割程度まで極めて細かく選ぶ必要がある。そのため、従来の陽的なFDTD法では時間の刻み幅も極めて小さくなり、特に3次元デバイスを直接解析する際には、膨大な計算時間を要していた。従って、3次元デバイスを効率よく扱える手法の開発が急務であった。

2. 研究の目的

3次元の微小プラズモンデバイスを極めて高速に解析できる、局所的次元(LOD)法に基づく陰的なFDTD法を開発することが目的である。また、開発した手法を用いて、種々の3次元デバイスを解析し、その動作特性を2次元デバイスと比較しながら議論することが、本研究のもう一つの目的である。

3. 研究の方法

陰的な3次元FDTD法を開発するために、申請者らが世界に先駆けて提案したLOD法を導入する。プラズモンを解析するためには、金属の分散性を考慮する必要がある。そのため、畳み込みの計算が一度で済み、かつ高い精度の得られる台形則に基づくTrapezoidal Recursive Convolution(TRC)法を導入する。さらに、ごく最近提案されたFundamental法と呼ばれる技法を導入し、計算式の右辺に微分項を含まない極めて簡便な3次元LOD-FDTD法を開発する。

開発したLOD-FDTD法を用いて、プラズモニックギャップ導波路のギャップ幅を周期的に変調したグレーティングを解析する。2次元グレーティングと比べ、反射特性の帯域幅の縮小と反射率の低下が生じ、この原因を解明する。また、3次元構造において、帯域幅の縮小が抑えられる新たな構造を提案する。

4. 研究成果

まず、LOD法、TRC法を導入した3次元FDTD法を開発した。典型的なプラズモニックギャップ導波路をPC(Intel Core i7, 3.4GHz 1コア使用)で解析したところ、陽的なFDTD法で85分かかった計算がほぼ同等の計算精度を維持しつつ53分に低減された。さらに、Fundamental法を導入し、計算式を簡便化した。その結果、Fundamental法を用いない場合と等価な計算結果が37分で得られ、陽的FDTD法のほぼ40%の計算時間で解析が可能になった。これらの成果は、IEEE、IETの速報誌で報告した。

開発した3次元LOD-FDTD法を用いて、ギ

ャップ導波路で構成された3次元のグレーティングフィルタの反射特性を、2次元構造の結果と詳細に比較した。その結果、2次元構造で得られる広い反射帯域が、典型的な3次元構造(ギャップ幅、金属膜厚共に50nm程度)では得られないことがわかった。これは、2次元構造では光波がフィルタ内に完全に閉じこめられグレーティングの効果が顕著である一方、3次元構造では光波がギャップの外の空気領域に漏れグレーティングの効果が限定的になるためであることを突き止めた。ギャップ幅50nmの3次元構造で、2次元構造と同等の特性を得るためには、金属膜厚を50倍以上の厚みに選ぶ必要があることがわかった。また、金属膜厚が50nm程度で、反射帯域幅を拡大するために、中空コアにシリコンを挿入する方法を提案した。これらの成果を、電子情報通信学会の総合大会、ソサイエティ大会、研究会で報告した。現在、論文を準備中である。

デバイス解析と平行して、新たな数値解法の開発も行った。Fundamental法に基づく周波数依存型LOD-FDTD法を多極のDebye媒質を解析できるように拡張し、成果はIEEEの速報誌に採録された。さらに、Fundamental法を回転対称構造(BOR)用周波数依存型FDTD法にも導入しIEICE Trans. Electronに採録された。

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13件)

- [査読付き] J. Shibayama, T. Oikawa, T. Hirano, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Fundamental LOD-BOR-FDTD method for the analysis of plasmonic devices," IEICE Transactions on Electronics, vol. E97-C, no. 7, July 2014, to be published.
- [査読付き] 柴山 純, 横溝明大, 山内潤治, 中野久松, "Fundamental法に基づく簡素なADI-BPMを用いた導波路型光吸収SPRセンサの三次元解析," 電子情報通信学会論文誌C, vol.J97-C, no.5, pp.177-185, May 2014.
- [査読付き] J. Shibayama, Y. Uchizono, S. Ozaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Treatment of metal for the FDTD analysis of terahertz devices," Optical and Quantum Electronics, vol. 46, no. 2, pp 345-356, February 2014.
- [査読なし] 柴山 純, 齊藤晋聖, "光分野におけるシミュレーション技術とデバイス解析への応用," 電子情報通信学会誌, vol. 96, no. 6, 406-410, July 2013.
- [査読付き] J. Shibayama, N. Sasaki, Y. Wakabayashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Frequency-dependent

- fundamental LOD-FDTD formulation for a multi-pole Debye model,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 10, pp. 965-968, May 15, 2013.
6. [査読付き] 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, vol. 25, no. 2, pp. 147-150, January 2013.
 7. [査読付き] J. Shibayama, T. Hirano, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Efficient implementation of frequency-dependent 3-D LOD-FDTD method using fundamental scheme,” IET Electronics Letters, vol. 48, no. 13, pp. 774-775, June 2012.
 8. [査読付き] J. Shibayama, T. Oikawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Efficient LOD-BOR-FDTD implementation based on a fundamental scheme,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 11, pp. 957-959, June 2012.
 9. [査読付き] 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, vol. E95-C, no. 4, pp. 725-732, April 2012.
 10. [査読付き] J. Shibayama, A. Yokomizo, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Reformulation of the ADI-BPM using a fundamental scheme,” IEICE Electronics Express, vol. 9, no. 5, pp. 365-370, March 2012.
 11. [査読付き] Y. Wakabayashi, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, “An LOD-FDTD method for the analysis of a periodic structure at oblique incidence,” Radio Science, vol. 46, RS0F031 (全9頁), September 2011.
 12. [査読付き] J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Frequency-dependent 3-D LOD-FDTD method for the analysis of plasmonic devices,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 15, pp. 1070-1072, August 2011.
 13. [査読付き] J. Shibayama, R. Ando, J. Yamauchi, and H. Nakano, “A 3-D LOD-FDTD method for the wideband analysis of optical devices,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 11, pp. 1652-1658, June 2011.

[学会発表](計64件)

1. J. Shibayama, Y. Wada, J. Yamauchi,

- and H. Nakano, “Application of the explicit and implicit FDTD methods to the analysis of a terahertz plasmonic grating,” Progress in Electromagnetic Research Symposium, 25-28 August 2014, Guangzhou, China.
2. (Invited) J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Finite-difference time-domain analysis of terahertz devices,” International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA, Aruba, 3-9 August 2014, Palm Beach.
3. (Invited) J. Shibayama, N. Sasaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of an optical nanodipole antenna with a stub,” IEEE Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, IEEE APWC, 3-9 August 2014, Palm Beach, Aruba.
4. 柴山, 和田, 平野, 山内, 中野, “プラズモニクデバイスの2次元解析と3次元解析の比較,” 信学技報, vol. 114, EST2014, 2014年5月30日, 日本大学(東京都).
5. J. Shibayama, S. Ozaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of a terahertz resonator using an efficient LOD-FDTD method with a PEC boundary condition,” IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization, NEMO 2014, TH-IF-4 (全4頁), 15 May 2014, Pavia, Italy.
6. (依頼講演) 柴山, 山内, 中野, “FDTD法を用いたテラヘルツデバイスの解析,” 信学総大, CS-2-2, 2014年3月19日, 新潟大学(新潟県).
7. 柴山, 尾崎, 山内, 中野, “テラヘルツ帯における多層型周波数選択板の透過特性,” 信学総大, C-15-20, 2014年3月18日, 新潟大学(新潟県).
8. 柴山, 和田, 山内, 中野, “テラヘルツプラズモニクグレーティングにおける反射特性の温度依存性,” 信学総大, C-15-15, 2014年3月18日, 新潟大学(新潟県).
9. 平野, 柴山, 山内, 中野, “プラズモニクグレーティングの反射係数の構造依存性(II),” 信学総大, C-3-13, 2014年3月18日, 新潟大学(新潟県).
10. 佐々木, 柴山, 山内, 中野, “誘電体基板上に配置されたスタブ付き光ナノダイポールアンテナ,” 信学総大, B-1-124, 2014年3月18日, 新潟大学(新潟県).
11. 尾形, 佐々木, チャカロタイ, 鈴木, 柴山, “LOD-FDTD法のGPUによる高速化手法の一検討と生体電磁界解析への適用,” 信学技報, vol. 113, no. 261,

- EST2013-67, pp. 83-86, 2013年10月24日, 東北大学(宮城県).
12. J. Shibayama, J. Yamauchi and H. Nakano, "Some applications of a fundamental scheme to simple implementations of the finite-difference time-domain method and the beam-propagation method," IEEE AP/MTT International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, ICECOM, S-34-1(全4頁), 16 October 2013, Dubrovnik, Croatia.
 13. 平野, 柴山, 山内, 中野, "プラズモングレーティングの反射係数の構造依存性," 信学ソ大, C-3-70, 2013年9月19日, 福岡工業大学(福岡県).
 14. 柴山, 尾崎, 山内, 中野, "広帯域なテラヘルツストップバンドフィルタ(II)," 信学ソ大, C-15-5, 2013年9月18日, 福岡工業大学(福岡県).
 15. 柴山, 和田, 平野, 山内, 中野, "等価屈折率法のプラズモンギャップ導波路への適用性," 信学ソ大, C-15-4, 2013年9月18日, 福岡工業大学(福岡県).
 16. 尾形, 佐々木, 鈴木, 柴山, "AMG法による1D LOD-FDTD法の高速化の検討," 信学ソ大, C-15-2, 2013年9月18日, 福岡工業大学(福岡県).
 17. 佐々木, 柴山, 山内, 中野, "プラズモン導波路で給電された光ナノアンテナ(II)," 信学ソ大, B-1-59, 2013年9月17日, 福岡工業大学(福岡県).
 18. J. Shibayama, T. Aso, J. Yamauchi and H. Nakano, "Concise formulation of the full-vectorial BPM without an operator splitting error," 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, AP-RASC, (全1頁), 7 September 2013, Taipei, Taiwan.
 19. (Invited) J. Shibayama, Y. Uchizono, J. Yamauchi and H. Nakano, "Finite-difference time-domain analysis of a terahertz wide stop-band filter," 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, AP-RASC, (全1頁), 7 September 2013, Taipei, Taiwan.
 20. J. Shibayama, T. Oikawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Efficient time-domain technique for the analysis of circularly symmetric plasmonic waveguides," Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 1026, 14 August 2013, Stockholm, Sweden.
 21. J. Shibayama, S. Ozaki, Y. Uchizono, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Effect of a metal dispersion on characterizing terahertz devices in the FDTD analysis," Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 836, 13 August 2013, Stockholm, Sweden.
 22. 仁藤, 柴山, 山内, 中野, "Fundamental法を用いたフルベクトルビーム伝搬法の再定式化," 信学技報, vol. 113, no. 142, OPE2013-36, pp. 119-124, 2013年7月18日, 稚内総合文化センター(北海道).
 23. J. Shibayama, A. Yokomizo, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Analysis of a polarization converter using a full-vectorial fundamental alternating-direction implicit beam-propagation method," The 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, EMTS 2013, 21AM1C-02, pp. 57-59, 21 May 2013, Hiroshima.
 24. 柴山, 尾崎, 内園, 山内, 中野, "FDTD法を用いたテラヘルツデバイス解析における金属の取り扱い," 信学技報, vol. 113, no. 26, EST2013-11, pp. 57-62, 2013年5月10日, NTT厚木研究開発センター(神奈川県).
 25. J. Shibayama, N. Sasaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Frequency-dependent LOD-FDTD simulation of THz sensing," Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 608, 27 March 2013, Taipei, Taiwan.
 26. 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, p. 471, 27 March 2013, Taipei, Taiwan.
 27. 佐々木, 柴山, 山内, 中野, "プラズモン導波路で給電された光ナノアンテナ," 信学総大, B-1-76, 2013年3月22日, 岐阜大学(岐阜県).
 28. 柴山, 平野, 若林, 山内, 中野, "プラズモングレーティングの3次元解析," 信学総大, C-3-82, 2013年3月20日, 岐阜大学(岐阜県).
 29. 横溝, 柴山, 山内, 中野, "パワー保存型フルベクトル Fundamental ADI-BPMの開発," 信学総大, CS-5-3, 2013年3月20日, 岐阜大学(岐阜県).
 30. 及川, 柴山, 山内, 中野, "回転対称構造解析のための周波数依存型 FLOD-BOR-FDTD法," 信学総大, C-1-11, 2013年3月19日, 岐阜大学(岐阜県).
 31. 柴山, 朝生, 山内, 中野, "演算子分割誤差を生じないフルベクトル型 BPMの簡素な定式化," 信学総大, C-1-12, 2013年3月19日, 岐阜大学(岐阜県).
 32. 内園, 柴山, 山内, 中野, "広帯域なテラ

- ヘルツストップバンドフィルタ,” 信学総大, C-15-8, 2013年3月19日, 岐阜大学(岐阜県).
33. 柴山, 尾崎, 若林, 佐々木, 山内, 中野, “テラヘルツ帯における金属メッシュ構造の FDTD 解析,” 信学総大, C-15-9, 2013年3月19日, 岐阜大学(岐阜県).
 34. 柴山, 佐藤, 横溝, 山内, 中野, “伝搬方向に構造が変化する光導波路解析のための Fundamental ADI-BPM,” 信学総大, C-15-10, 2013年3月19日, 岐阜大学(岐阜県).
 35. 柴山, 横溝, 山内, 中野, “Fundamental 法を導入したADI-BPMによる導波路型光吸収 SPR センサの三次元解析,” 信学技報, EST2012-97, pp. 217-222, 2013年1月25日, 大阪大学(大阪府).
 36. J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Efficient time-domain techniques for the wideband analysis of plasmonic antennas,” 2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, (全4頁), 14 November 2012, Maui, Hawaii.
 37. 横溝, 柴山, 山内, 中野, “Fundamental 法を用いたフルベクトル型ADI-BPMの開発,” 信学ソ大, C-3-89, 2012年9月14日, 富山大学(富山県).
 38. 柴山, 平野, 山内, 中野, “Fundamental 法を用いた周波数依存型3次元 LOD-FDTD 法のプラズモン導波路解析,” 信学ソ大, C-1-4, 2012年9月13日, 富山大学(富山県).
 39. 及川, 柴山, 山内, 中野, “金属ロッド光導波路の周波数依存型 LOD-BOR-FDTD 解析,” 信学ソ大, C-1-5, 2012年9月13日, 富山大学(富山県).
 40. 佐々木, 柴山, 山内, 中野, “Debye モデル解析のための周波数依存型 LOD-FDTD 法,” 信学ソ大, C-15-12, 2012年9月13日, 富山大学(富山県).
 41. 内藤, 柴山, 山内, 中野, “テラヘルツ導波路の FDTD 解析における金属の取り扱いの一考察,” 信学ソ大, C-15-13, 2012年9月13日, 富山大学(富山県).
 42. 吉村, 山内, 柴山, 中野, “試料槽をもつクレッチマン型 SPR センサの3次元 BPM 解析,” 信学ソ大, C-3-24, 2012年9月12日, 富山大学(富山県).
 43. J. Shibayama, Y. Uchizono, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Wideband analysis of a stop band filter and a resonator at THz frequencies,” IEEE Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, pp. 888-890, 5 September 2012, Cape Town, South Africa.
 44. 山内, 吉村, 柴山, 中野, “誘電体導波路を用いたクレッチマン型 SPR センサ,” 信学技報, OPE2012-56, pp. 221-226, 2012年7月27日, 北海道大学(北海道).
 45. 柴山, 佐々木, 山内, 中野, “マッハツェンダ干渉を用いた導波路型 SPR センサの数値解析,” 信学技報, OPE2012-57, pp. 227-232, 2012年7月27日, 北海道大学(北海道).
 46. 柴山, 差分法による光導波路解析入門~ビーム伝搬法と有限差分時間領域法~, 信学会 エレクトロニクスシミュレーション研究会 第2回エレクトロニクスシミュレーション講習会, 2012年7月3日, 青山学院大学(東京都).
 47. 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, p. 929, 30 March 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.
 48. 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, p. 563, 29 March 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.
 49. 柴山, 内藤, 山内, 中野, “テラヘルツストップバンドフィルタ及び共振器の FDTD 解析,” 信学総大, C-15-15, 2012年3月23日, 岡山大学(岡山県).
 50. 柴山, 横溝, 山内, 中野, “Fundamental 法を用いた ADI-BPM の再定式化,” 信学総大, C-15-16, 2012年3月23日, 岡山大学(岡山県).
 51. 柴山, 佐々木, 山内, 中野, “マッハツェンダ干渉を用いた導波路型 SPR センサの不等間隔メッシュ FDTD 解析,” 信学総大, C-3-68, 2012年3月22日, 岡山大学(岡山県).
 52. 山内, 吉村, 柴山, 中野, “クレッチマン型 SPR センサを用いた複素屈折率評価の可能性,” 信学総大, C-3-69, 2012年3月22日, 岡山大学(岡山県).
 53. 柴山, 及川, 山内, 中野, “LOD-BOR-FDTD 法の簡素な定式化,” 信学総大, CS-1-4, 2012年3月22日, 岡山大学(岡山県).
 54. 柴山, 平野, 山内, 中野, “Fundamental 法の周波数依存型 LOD-FDTD 法への応用,” 信学総大, C-1-7, 2012年3月21日, 岡山大学(岡山県).
 55. 若林, 柴山, 山内, 中野, “周期構造解析のための3次元 LOD-FDTD 法,” 信学総大, C-1-8, 2012年3月21日, 岡山大学(岡山県).

56. 柴山, “差分法による光導波路解析の最近の研究動向,” 信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会 第 1 回エレクトロニクスシミュレーションワークショップ, 2011 年 11 月 21 日, NTT 武蔵野研究開発センタ(東京都).
57. 柴山, 及川, 山内, 中野, “Higdon 形吸収境界条件の 2 次元 LOD-FDTD 法への適用,” 信学ソ大, C-1-6, 2011 年 9 月 15 日, 北海道大学(北海道).
58. 柴山, 山内, 中野, “陰的 FDTD 法の時間刻み幅の上限に関する一考察(II),” 信学ソ大, C-1-7, 2011 年 9 月 15 日, 北海道大学(北海道).
59. 柴山, 横溝, 山内, 中野, “導波路型光吸収 SPR センサの 3 次元 BPM 解析,” 信学ソ大, C-3-30, 2011 年 9 月 15 日, 北海道大学(北海道).
60. 柴山, 佐々木, 横溝, 内園, 山内, 中野, “マッハツェンダ干渉を用いた導波路型 SPR センサの固有モード解析,” 信学ソ大, C-3-31, 2011 年 9 月 15 日, 北海道大学(北海道).
61. 柴山, 内園, 山内, 中野, “MIM 型テラヘルツ導波路の BPM 及び FDTD 解析,” 信学ソ大, C-15-5, 2011 年 9 月 13 日, 北海道大学(北海道).
62. 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 Optoelectronic Devices (NUSOD), MB1 (全 2 頁), 5 September 2011, Rome, Italy.
63. 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, IMC3 (全 3 頁), 13 June 2011, Toronto, Canada.
64. 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, ISMOT, CD-ROM (全 4 頁), 6 June 2011, Prague, Czech Republic.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等
<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profiles/17/0001656/profile.html#gakui>

<http://scholar.google.com/citations?user=0kyoHfwAAAAJ&hl=en>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴山 純 (SHIBAYAMA, Jun)
 法政大学・理工学部・准教授
 研究者番号：40318605

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：