

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06035

研究課題名(和文) 陰的及び半陰的円筒座標FDTD法の確立と金属円盤型THz表面波分割器の開発

研究課題名(英文) Establishment of implicit and hybrid-implicit-explicit FDTD methods in cylindrical coordinates and development of a metal disc-type THz surface wave splitter

研究代表者

柴山 純 (SHIBAYAMA, Jun)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：40318605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、円筒座標系FDTD法の計算効率改善のため、陰的な局所的次元(LOD)法を導入した。また、周回方向の離散化のみに陰解法を用いるハイブリッド型半陰的円筒座標系FDTD法を開発した。以上の手法により、円筒型デバイスの計算時間が1/3～1/10に低減され、当初の目的が達成された。これらの手法を金属円盤形テラヘルツ表面波分割器の設計に応用し、GHz帯でデバイスを作成した。8～12.5GHzで放射パターンの測定をしたところ、計算結果と極めて良い一致を示し、設計の妥当性が確認できた。また、周波数分割の振る舞いが観察され、表面波分割の基礎的知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have introduced the locally one-dimensional scheme to improve the efficiency of the finite-difference time-domain (FDTD) method in cylindrical coordinates. In addition, we have developed a semi-implicit FDTD method in cylindrical coordinates, in which the implicit scheme is adopted only in the circumferential direction. Using these technique, the computation time is successfully reduced to 1/3 to 1/10 of that of the traditional explicit FDTD method in cylindrical coordinates. We have applied these methods to the design of a metal disc-shaped surface wave splitter and fabricated one at GHz frequencies. The radiation patterns were measured and compared with the numerical results obtained from the developed FDTD method in cylindrical coordinates. It has been found that the measured results agree well with the numerical results, demonstrating the validity of the design. We have also observed the behavior of the frequency splitting.

研究分野：機能素子工学

キーワード：FDTD法 円筒座標系 LOD-FDTD法 半陰的FDTD法 テラヘルツ波 疑似表面プラズモン 周波数分割

### 1. 研究開始当初の背景

円筒座標系有限差分時間領域(FDTD)法は中心軸付近の空間刻みが微小なため、時間刻みも小さくなり計算効率が悪い。計算効率の高い円筒座標系 FDTD 法の開発が喫緊の課題となっている。そこで、筆者らのグループで実績のある陰的な局所的次元(LOD)法を空間の全方向に導入し、計算の効率化を図る。また、周回方向にのみ陰解法を導入した、ハイブリッド型半陰的円筒座標系 FDTD 法も開発する。

テラヘルツ(THz)帯では、金属表面にグレーティングを設置した表面波分割器が提案されている。しかし、THz 波の結合領域が狭いグレーティング部に限られており、電磁波が十分に活用されていない問題がある。そこで、金属円盤に扇状にグレーティングを配置した、円盤形表面波分割器を提案する。

### 2. 研究の目的

円筒座標系 FDTD 法の計算効率を向上させるため、効率よい陰解法である LOD 法を導入する。さらに、周回方向の離散化にのみ陰解法を用いるハイブリッド型半陰的円筒座標系 FDTD 法を開発する。並列化などの技法を用いずに、従来の手法に比べ計算時間を大幅(1/3~1/10)に低減させる。

開発手法を用いて THz 周波数分割器を検討する。グレーティングを放射方向に扇状に設置した、簡素な金属円盤型 THz 表面波分割器を提案する。THz 波入射部及び疑似表面プラズモンポラリトンの効率よい導波のためのグレーティング部の構造最適化、カバーディスクの付加・中心ロッドの導入により高い結合効率を目指す。試作を行い、周波数分割の動作を実証する。

### 3. 研究の方法

代表者に加え、プログラミング、実験、学会発表等の協力者4~7名(博士前期課程)に適宜参加してもらい3年計画とした。

27年度は、4名の協力者とともに陰的及び半陰的円筒座標系 FDTD 法の確立に重点を置いた。平行して、従来の陽的 FDTD 法を用い金属円盤型 THz 表面波分割器の基本特性を明らかにした。FDTD 法の性能実証と表面波分割器の基本特性が得られ、速報誌に投稿した。

28年度は、完成した陰的・半陰的円筒座標系 FDTD 法を用いて金属円盤型 THz 表面波分割器の特性改善に取りかかった。入力部、グレーティング部の構造最適化、カバーディスクの付加などで 90%以上の出力パワーを目指した。試作も行った。途中経過を学会で発表し、研究動向の調査も行った。

29年度は実験を行い金属円盤型表面波分割器の動作を実証した。研究の総まとめとして、米国電気電子学会、電子情報通信学会等へ論文投稿も行った。国内外での学会発表も精力的に行った。

### 4. 研究成果

研究の目的通り、円筒座標系 LOD-FDTD 法を確立し、計算時間を 1/3 程度に低減することが出来た。成果は、IEEE Photonics Technology Letters で公表した(2017年6月)。本手法を周波数依存型にまで拡張し、その結果は IEICE(電子情報通信学会) Transaction on Electronics で採録となった(2018年8月出版)。

また、半陰的円筒座標系 FDTD 法においては、従来手法に比べ計算時間が 1/10 程度に低減され、その成果を電子情報通信学会研究会にて発表(2018年1月)、2018年8月に IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization にて発表予定である。現在、学術雑誌に投稿すべく、論文を執筆中である。以上の開発手法により、円筒型デバイスの計算時間が 1/2~1/10 に低減され、当初の目的が達成された。

加えて、金属円盤形表面波分割器を提案し、上述した計算手法で設計を行った。円盤構造のみでは特に低周波で 80%以上の反射波が生じていたが、入力部にテーパ付きロッドを導入することで、反射波は 10%以下に低減され、90%以上のパワーを出力できるようになった。

GHz 帯において設計を行い、デバイスの作成を行った(図)。実際に、放射パターンを測定したところ、12.5、9.5 GHz において周波数分割の振る舞いが得られた。なお、放射パターンの測定結果と計算結果は極めて良く一致し、計算の妥当性が確認された。

当初の本研究の目的には含まれていないが、円筒座標系 FDTD 法への入射固有モードを生成するための、円筒座標系 Yee 格子虚軸ビーム伝搬法の開発も行った。本手法により、回転対称構造に限らず、効率よい固有モードの計算が可能になった。この成果は学術雑誌に投稿中である。

本研究により、円筒座標系での入射固有モード解析から、FDTD 法による効率よい解析まで一貫した扱いが可能になった。今後、本手法が円筒型の電磁界デバイス解析・設計に広く利用されると予想される。



図 作成した金属円盤形表面波分割器

## 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 10 件)

- [1] J. Shibayama, T. Hara, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency-dependent LOD-FDTD method in cylindrical coordinates, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol. E101-C, no. 8, 2018.
- [2] J. Shibayama, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, A fundamental LOD-FDTD method in cylindrical coordinates, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol. 29, no. 11, pp. 865-868, June 2017.
- [3] 柴山, 清水, 山内, 中野, 試料槽を設けたテラヘルツ SPR 導波路型センサの FDTD 解析, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, vol. J100-C, no. 5, pp. 239-241, May 2017.
- [4] 柴山, 電磁界シミュレーションのコツ (実用編) - 光導波路デバイスを例に, 応用物理, 査読有, vol. 86, no. 5, pp. 408-411, May 2017.
- [5] 柴山, 電磁界シミュレーションのコツ (基礎編) - 光導波路デバイスを例に, 応用物理, 査読有, vol. 86, no. 4, pp. 327-330, April 2017.
- [6] 柴山, 尾崎, 山内, 中野, 正方形パッチとクロスダイポールで構成された3層型テラヘルツ周波数選択板の FDTD 解析, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, vol. J100-C, no. 3, pp. 123-131, March 2017(招待論文)
- [7] J. Shibayama, Y. Wada, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of two- and three-dimensional plasmonic waveguide band-pass filters using the TRC-FDTD method, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol. E99-C, no. 7, pp. 817-819, July 2016.
- [8] 柴山, 楠, 山内, 中野, 金属円盤型 THz 表面波分割器の FDTD 解析におけるパワー評価, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有, vol. J99-C, no. 5, pp. 247-249, May 2016.
- [9] J. Shibayama, K. Shimizu, J. Yamauchi, and H. Nakano, Surface plasmon resonance waveguide sensor in the terahertz regime, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 査読有, vol. 34, no. 10, pp. 2518-2525, May 2016.
- [10] 柴山, 清水, 山内, 中野, 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, pp. 135-137, May 2015.

〔学会発表〕(計 65 件)

- [1] 柴山, 山本, 山内, 中野, THz ハイブリッ

ドプラズモニック導波路を用いた偏波分割器の設計, 信学総大, C-3-41, p. 159, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).

- [2] 川合, 柴山, 山内, 中野, プラズモニク導波路からなる3次元スリット型フィルタの特性改善, 信学総大, C-15-13, p. 215, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [3] 柴山, 光武, 山内, 中野, THz帯におけるクレッチマン型 SPR 導波路センサ, 信学総大, C-15-14, p. 216, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [4] 日下, 柴山, 山内, 中野, 全電磁界・散乱界領域分割法を適用した3次元 LOD-FDTD 法, 信学総大, C-15-15, p. 217, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [5] 柴山, 鈴木, 山内, 中野, 金属ナノ円柱の FDTD モデリングに関する一考察, 信学総大, C-15-16, p. 218, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [6] 山崎, 柴山, 山内, 中野, InSb クロスダイポールを用いた THz センサの解析, 信学総大, C-15-23, p. 225, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [7] 柴山, 鈴木, 山内, 中野, IMI 導波路を伝搬する表面プラズモンポラリトンのモード変換, 信学総大, C-15-24, p. 226, 2018年3月23日, 東京電機大学(東京).
- [8] 小内, チャカロタイ, キック, 鈴木, 柴山, GPU を用いた1次元周波数分散性 FDTD 法の高速化に関する検討, 信学総大, C-15-12, p. 214, 2018年3月22日, 東京電機大学(東京).
- [9] 伊藤, 柴山, 山内, 中野, 円筒座標系 ID-YM-BPM を用いた Segmented cladding fiber の固有モード解析, 信学総大, C-1-10, p. 10, 2018年3月21日, 東京電機大学(東京).
- [10] 柴山, 高橋, 山内, 中野, テラヘルツ帯における InSb コート誘電体円柱の FDTD 解析, 信学総大, C-1-3, p. 3, 2018年3月20日, 東京電機大学(東京).
- [11] 柴山, 吉原, 山内, 中野, センシング部に半導体を用いた THz SPR 導波路型センサ, 信学総大, C-3-5, p. 123, 2018年3月20日, 東京電機大学(東京).
- [12] 伊藤, 柴山, 山内, 中野, 円筒座標系半陰的 FDTD 法の開発と周波数依存型への拡張, 信学技報, vol. 117, no. 408, EST2017-91, pp. 93-97, 2018年1月25日, 姫路西はりま地場産業センター(兵庫県).
- [13] 川合, 柴山, 山内, 中野, GPU を用いた FDTD 法によるスタブ付きプラズモニク導波路型波長分波器の解析, 信学技報, vol. 117, no. 408, EST2017-92, pp. 99-103, 2018年1月25日, 姫路西はりま地場産業センター(兵庫県).
- [14] J. Shibayama, K. Yoshihara, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of the

- three-dimensional surface plasmon resonance waveguide sensor in the THz region, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 1011, Singapore, November 21, 2017.
- [15] J. Shibayama, T. Tsubai, J. Yamauchi, and H. Nakano, Transmission characteristics of a terahertz waveguide with a slot-coupled cavity, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 1346, Singapore, November 21, 2017.
- [16] M. Ito, J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Eigenmode analysis using the imaginary-distance beam-propagation method based on Yee's mesh in cylindrical coordinates, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 799, Singapore, November 20, 2017.
- [17] J. Shibayama, T. Hara, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, A cylindrical LOD-FDTD method for the analysis of plasmonic devices, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 800, Singapore, November 20, 2017.
- [18] 柴山, 都梅, 山内, 中野, スロット結合された角型リング共振器を持つテラヘルツ導波路の透過特性, 信学ソ大, C-15-16, p. 175, 2017年9月14日, 東京都市大学(東京都).
- [19] 柴山, 吉原, 山内, 中野, テラヘルツ帯における SPR 導波路型センサの3次元解析(II), 信学ソ大, C-15-17, p. 176, 2017年9月14日, 東京都市大学(東京都).
- [20] 柴山, 原, 山内, 中野, Drude-Lorentz モデル解析のための周波数依存型円筒座標系 FLOD-FDTD 法, 信学ソ大, C-1-6, p. 6, 2017年9月13日, 東京都市大学(東京都).
- [21] J. Shibayama, H. Kawai, J. Yamauchi, and H. Nakano, Band-pass property of a three-dimensional slit-type plasmonic filter, The 17th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), MP21, pp. 63-64, Copenhagen, Denmark, July 24, 2017.
- [22] 柴山, 原, 伊藤, 山内, 中野, プラズモニクデバイス解析のための円筒座標系 LOD-FDTD 法, 信学技報, vol. 117, no. 141, OPE2017-21, pp. 55-60, 2017年7月20日, 帯広商工会議所(北海道).
- [23] J. Shibayama, R. Umezawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, Transmission characteristics of a sample holder using terahertz frequency selective surfaces, 16th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT), TA3-1, 全4頁, Seoul, Korea, June 27, 2017. [Best Paper Award]
- [24] 柴山, 川合, 山内, 中野, スタブを導入した3次元プラズモニク導波路による波長分波器の FDTD 解析, 信学総大, C-15-4, p. 201, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県).
- [25] 梅澤, 柴山, 山内, 中野, テラヘルツ周波数選択板を用いたサンプルホルダの広帯域透過特性, 信学総大, C-15-5, p. 202, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県).
- [26] 柴山, 山崎, 山内, 中野, InSb パッチとクロスダイポールを用いた THz フィルタの透過特性, 信学総大, C-15-6, p. 203, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県).
- [27] 柴山, 日下, 鈴木, 山内, 中野, LOD-FDTD 法による眼球モデルの解析, 信学総大, C-15-10, p. 207, 2017年3月23日, 名城大学(愛知県).
- [28] 柴山, 伊藤, 山内, 中野, 円筒座標系半陰的 FDTD 法を用いたファイバグレーティングの解析, 信学総大, C-1-13, p. 13, 2017年3月22日, 名城大学(愛知県).
- [29] J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Reformulations of implicit FDTD and beam-propagation methods using the fundamental scheme, IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 3A2.3, pp. 316-317, Kumamoto, Japan, March 10, 2017.
- [30] 柴山, 川合, 山内, 中野, 3次元プラズモニク導波路を用いた波長分波器の FDTD 解析, 信学技報, vol. 116, no. 390, EST2016-117, pp. 247-252, 2017年1月19日, 伊勢市観光文化会館(三重県).
- [31] 清水, 柴山, 山内, 中野, 試料槽を設けたテラヘルツ表面プラズモン共鳴導波路型センサの特性改善, 信学技報, vol. 116, no. 388, OPE2016-125, pp. 51-56, 2017年1月18日, 伊勢市観光文化会館(三重県).
- [32] J. Shibayama, R. Umezawa, J. Yamauchi, and H. Nakano, Basic study of an InSb grating filter in the terahertz region, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 3B2-3, pp. 576-577, Okinawa, Japan, Oct 24, 2016.
- [33] J. Shibayama, D. Kusunoki, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a metal disc-shaped terahertz surface wave splitter with a center rod, IEEE Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (IEEE APWC), pp. 93-94, Cairns, Australia, September 21, 2016.
- [34] 柴山, 伊藤, 山内, 中野, Fundamental 法を導入した簡素な円筒座標系 LOD-FDTD 法, 信学ソ大, C-15-10, p. 217, 2016年9月21日, 北海道大学(北海道).
- [35] 柴山, 川合, 山内, 中野, プラズモニク導波路のギャップ部を部分的に金属で満たした3次元スリット型フィルタの透過特性(II), 信学ソ大, C-15-15, p. 222, 2016年9月21日, 北海道大学(北海道).

- [36] 梅澤, 柴山, 山内, 中野, テラヘルツ周波数選択板を用いたサンプルホルダの透過特性, 信学ソ大, C-15-7, p. 214, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道).
- [37] 清水, 柴山, 山内, 中野, 試料槽を設けたテラヘルツ SPR 導波路型センサの解析, 信学ソ大, C-15-8, p. 215, 2016年9月20日, 北海道大学(北海道).
- [38] 柴山, 山内, 中野, Fundamental 法を用いた陰的 FDTD 法とビーム伝搬法の簡略化, 信学技報, vol. 116, no. 212, EST2016-51, pp. 241-245, 2016年9月9日, 石垣市商工会館 (沖縄県).
- [39] J. Shibayama, M. Ito, J. Yamauchi, and H. Nakano, Efficient implicit FDTD algorithm in cylindrical coordinates, URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC'16), S-B9a-3, pp. 1399-1401, Seoul, Korea, August 25, 2016. [invited]
- [40] J. Shibayama, T. Yamazaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, Three-dimensional analysis of a THz filter with InSb square patches, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 1778, Shanghai, China, August 9, 2016.
- [41] J. Shibayama, Y. Kusaka, J. Yamauchi, H. Nakano, and Y. Suzuki, Development of an LOD-FDTD method for the analysis of the Cole-Cole model, Progress in Electromagnetic Research Symposium, p. 1781, Shanghai, China, August 9, 2016.
- [42] J. Shibayama, K. Shimizu, J. Yamauchi, and H. Nakano, Treatment of the boundary between two different dispersion models for the frequency-dependent FDTD analysis, The 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), TH1A-01, pp. 169-170, Kaohsiung, Taiwan, July 28, 2016. [invited]
- [43] J. Shibayama, M. Itoh, J. Yamauchi, and H. Nakano, Analysis of a metal disc-type terahertz surface wave splitter using the cylindrical LOD-FDTD method, The 16th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), ThA3, pp. 201-202, Sydney, Australia, July 14, 2016.
- [44] J. Shibayama, H. Kawai, J. Yamauchi, and H. Nakano, Numerical investigation of a three-dimensional stub-type plasmonic filter, The 16th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), MP20, pp. 67-68, Sydney, Australia, July 11, 2016.
- [45] J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, Terahertz sensors and splitters using surface plasmon polariton propagation properties, Energy Materials Nanotechnology Meeting on Terahertz (EMN), C16, pp. 48-49, San Sebastian, Spain, May 16, 2016. [invited]
- [46] 山内, 本田, 柴山, 中野, 光波帯における誘電体ナノロッドアンテナ, 信学総大, B-1-126, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [47] 和田, 柴山, 山内, 中野, プラズモニック導波路のギャップ部を部分的に金属で満たした3次元スリット型フィルタの透過特性, 信学総大, C-3-56, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [48] 柴山, 清水, 山内, 中野, コアを基板に埋め込んだテラヘルツ SPR 導波路型センサの解析, 信学総大, C-15-13, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [49] 柴山, 川合, 和田, 山内, 中野, 3次元スタブ型プラズモニックフィルタの特性改善, 信学総大, C-15-16, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [50] 柴山, 楠, 山内, 中野, 金属円盤型テラヘルツ表面波分割器に挿入したロッドによる反射波低減の効果, 信学総大, C-15-18, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [51] 柴山, 日下, 山内, 中野, 鈴木, Cole-Coleモデル解析のための Z 変換を用いた LOD-FDTD 法, 信学総大, C-15-20, 2016年3月18日, 九州大学(福岡県).
- [52] 柴山, 伊藤, 山内, 中野, 円筒座標系 LOD-FDTD 法を用いた金属円盤型テラヘルツ表面波分割器の解析, 信学総大, C-1-5, 2016年3月16日, 九州大学(福岡県).
- [53] 柴山, 梅澤, 山内, 中野, InSb グレーティングによるテラヘルツフィルタの FDTD 解析, 信学技報, vol. 115, no. 434, EST2015-118, pp. 169-174, 2016年1月28日, 神戸市産業振興センター (兵庫県).
- [54] 柴山, 梅澤, 山内, 中野, 無反射層を付加したテラヘルツ分光フィルタの FDTD 解析, 信学ソ大, C-15-1, 2015年9月10日, 東北大学(宮城県).
- [55] 柴山, 清水, 山内, 中野, テラヘルツ帯における SPR 導波路型センサの3次元解析, 信学ソ大, C-15-2, 2015年9月10日, 東北大学(宮城県).
- [56] 柴山, 伊藤, 山内, 中野, 時間方向1次及び2次精度 LOD-FDTD 法を用いたテラヘルツ表面波分割器の解析, 信学ソ大, C-1-12, 2015年9月9日, 東北大学(宮城県).
- [57] 和田, 柴山, 山内, 中野, 基板付き3次元スリット型バンドパスフィルタの透過特性, 信学ソ大, C-3-10, 2015年9月8日, 東北大学(宮城県).
- [58] 和田, 柴山, 山内, 中野, プラズモニックギャップ導波路からなるバンドパスフィルタの3次元 FDTD 解析, 信学技報, vol. 115, no. 213, EST2015-57, pp. 23-28, 2015年9月3日, 石垣島大濱信泉記念館 (沖縄県).

- [59] J. Shibayama, D. Kusunoki, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency splitting of spoof surface plasmon polariton waves with a metal disc-type device, IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Ottawa, Canada, (全3頁), August 13, 2015.
- [60] J. Shibayama, K. Shimizu, J. Yamauchi, and H. Nakano, Surface plasmon resonance sensing in the THz regime, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), p. 481, (Prague, Czech Republic), July 6, 2015.
- [61] J. Shibayama, D. Kusunoki, J. Yamauchi, and H. Nakano, Power evaluation of a metal disc-shaped terahertz surface wave splitter, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), p. 474, (Prague, Czech Republic), July 6, 2015.
- [62] J. Yamauchi, K. Ohno, J. Shibayama, and H. Nakano, Basic studies of optical nanoantennas, The 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp. 220-221, Bali Island, Indonesia, July 2, 2015.
- [63] J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, FDTD analysis of several terahertz devices using surface plasmon polariton waves, The 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp. 222-223, Bali Island, Indonesia, July 2, 2015.
- [64] J. Shibayama, Y. Wada, J. Yamauchi, and H. Nakano, Frequency-dependent FDTD analysis of plasmonic band-pass filters, The 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp. 10-11, Bali Island, Indonesia, July 1, 2015.
- [65] 柴山, 清水, 山内, 中野, テラヘルツ帯における表面プラズモン共鳴導波路型センサの数値解析, 信学技報, vol. 115, no. 33, EST2015-1, pp. 1-6, 2015年5月15日, 法政大学 (東京).

〔図書〕(計 1 件)

- [1] H. Nakano, J. Shibayama, and J. Yamauchi, Metamaterial-based antennas and a metamaterial-based terahertz frequency splitter, The World of Applied Electromagnetics, Chap. 7, pp. 159-181, Springer International Publishing, August 2017.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu-web.i.hosei.ac.jp/Profiles/17/0001656/profile.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴山 純 (SHIBAYAMA, Jun)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：40318605