

課題名 (タイトル) :

プラズモニック・メタマテリアルの電磁気学的解析

利用者氏名 : 田中 拓男

所属 : 田中メタマテリアル研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

光の波長より小さい金属微小共振器構造をアレイ状に 3 次元的に配列させることで、物質の誘電率や透磁率などの電磁気学的 (光学的) 特性を人工的に操作した疑似物質であるメタマテリアルに関する研究を進めている。このメタマテリアルは、負の屈折率物質のように「自然界には存在し得ない特性」を持つ物質を人工的に作り出す技術として、基礎科学的な興味だけに留まらず、新奇な光学素子の実現を目指した幅広い範囲において注目を集めている研究分野である。このメタマテリアルの構造設計やその電磁気学的特性の評価においては、3 次元的空間内での光波の強度分布や位相を精密に計算する必要があり、その計算規模は大きなものとなる。今年度も引き続き、この研究テーマを実行するために必要となる電磁場計算を行う目的で RICC を利用した。

2. 具体的な利用内容、計算方法

シリコン基板表面に電子線描画法を用いて金のナノリボン構造を作製し、その後シリコン基板を反応性イオンエッチング法で等方的にエッチングする。金ナノリボンがシリコン基板から剥離すると、金ナノリボンの残留応力でナノリボンが湾曲してシリコン基板表面に垂直に直立するナノリング構造が自己組織的に形成される。このナノリングを磁場成分が貫くように光を入射すると、ナノリングは光の磁場成分と共鳴相互作用を起こす。また、このナノリングは、それと平行な方向に振動する電場成分とも相互作用する。これらの相互作用の結果、リング付近の電束密度ならびに磁束密度が変化を受け、実効的な誘電率ならびに透磁率が変化する。このナノリングを用いたメタマテリアルの共振器の光学特性を、FEM 法を用いて計算した。

また、昨年に引き続き、広い周波数帯域の光を完全に吸収する、広帯域完全黒体の光学特性を数値計算により行った。具体的には、ハイドロシリコン基板上に透明バッファ層を挟んで、金ロッドを周期的に集積

化した構造に光を照射した場合の光反射特性を厳密結合波解析法 (RCWA 法) を利用して計算した。金構造の幅、長さ、高さ、配列周期、さらに、金ロッドとシリコン基板との間のバッファ層の膜厚と、金ロッドアレイに励起される表面プラズモン共鳴の Q 値や共鳴周波数の関係を計算した。

3. 結果

メタマテリアルを構成するナノリング構造については、リングを含む平面に垂直に磁場成分が印加されるように光を照射すると、磁場共鳴に伴う高次のプラズモンモードが励起されることを確認した。また、計算にて求めた透過スペクトルが実験結果と良い一致を示す事を確認し、実験データと数値計算結果との比較から、メタマテリアルが示す実効誘電率、実効透磁率の波長分散を求め、それらを用いて実効屈折率を算出した。その結果、周波数 30THz 付近において、真空よりも低い 0.35 の屈折率が実現できることを確認した。

完全吸収体に関する計算では、幅 $1 \mu\text{m}$ 、長さ $5 \mu\text{m}$ の金属ロッド構造を使うと、金ロッドとその鏡面像との間に四重極子モードのプラズモンが励起され、両者の相互作用の結果、赤外域の反射光が減少する事を確認した。この結果は、実験結果と良い一致を示した。

4. 今後の計画・展望

今後も引き続きメタマテリアルならびにプラズモニックデバイスの構造設計ならびに特性評価のための計算機シミュレーションを行っていく予定である。

平成 26 年度 RICC 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

- 1) Takuo Tanaka, "Isotropic metamaterials," Japan-Singapore International Workshop on Nanophotonics, Plasmonics and Metamaterials (Nanyang Technological University, Singapore, Singapore) (2014.12.12).
- 2) Takuo Tanaka, "Optical Metamaterials," The 2nd RIKEN-SJTU Workshop on Energy and Environment (理研, 和光) (2014.11.18).
- 3) Takuo Tanaka, "Combination of top-down and bottom-up techniques for isotropic metamaterials," 7th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology (IWAMSN2014) (Ha Long City, Vietnam) (2014.11.5).
- 4) Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Metamaterial-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy," 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 OSA Joint Meeting (2014.09.20).
- 5) Yukie Yokota, Quan Sun, Kosei Ueno, Yasutaka Matuo, Hiroaki Misawa, and Takuo Tanaka, "Visualization of Plasmonic Coupled mode of Gold Curvilinear Nanorods and Straight Nanorods by Photoemission Electron Microscopy," 第 75 回応用物理学会秋季講演会 OSA Joint Meeting (2014.09.19).
- 6) Takuo Tanaka and Atsushi Ishikawa, "Fabrication of Isotropic Infrared Metamaterials," The 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics(Metamaterials 2014) (Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark) (2014.8.27).
- 7) Takuo Tanaka, Atsushi Ishikawa, Che-Chin Chen, and Din Ping Tsai, "Isotropic Infrared Metamaterials," SPIE Optics&Photonics 2014 (SanDiego, USA) (2014.8.17).
- 8) Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Background-suppressed surface-enhanced molecular detection by metamaterial infrared absorber," SPIE Optics&Photonics 2014 (SanDiego, USA) (2014.8.17).
- 9) Wakana Kubo and Takuo Tanaka, "Enhancement in conversion efficiency of organic photovoltaic devices by plasmonic nanostructure," SPIE Optics&Photonics 2014 (SanDiego, USA) (2014.8.17).
- 10) Laurent Olislager, Branko Kolaric, Wakana Kubo, Takuo Tanaka, Renaud A. L. Vall e, Philippe Emplit, and Serge Massar, "Plasmon-assisted transmission of frequency-bin entangled photons," 21st Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO2014) (Brussels, Belgium) (2014.6.24).
- 11) Shoichi Kubo, Tatsuya Tomioka, Takuya Uehara, Masaru Nakagawa, Morihisa Hoga, and Takuo Tanaka, "Fabrication of Sprit-Ring Resonator Arrays towards Visible Frequency Metamaterials by Monolayer-Assisted Nanoimprint Lithography," META2014 (Nanyang Technological University, Singapore, Singapore) (2014.5.23).
- 12) Takuo Tanaka, Che-Chin Chen, Atsushi Ishikawa, Yu-Hsiang Tang, Ming-Hua Shiao, and Din Ping Tsai, "Isotropic metamaterials," META2014 (Nanyang Technological University, Singapore, Singapore) (2014.5.22).
- 13) Wakana Kubo and Takuo Tanaka, "Thin Organic Solar Cell with Au Nanodots," META2014 (Nanyang Technological University, Singapore, Singapore) (2014.5.22).