

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 : 和光研究所 基幹研究所 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

我々は、光の波長より小さい金属微小アンテナをアレイ状に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できるメタマテリアルの研究を進めている。このメタマテリアルは、負の屈折率物質や光の周波数域で磁性を持つ物質といった「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、またその加工法として我々が開発した2光子還元法や自己組織化法の特性評価においては、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る、その計算規模は大きなものとなる。今年度も引き続き、本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幅 80nm、高さ 1  $\mu\text{m}$ の金属フィンを集積化した構造に光を照射した場合の、巨視的な電磁気学特性の変化を厳密結合波解析法 (RCWA法) を主に利用して計算した。さらに、金属フィンの幅と高さを変化させ、共振周波数への影響を調べた。

また、U字型に湾曲した金ナノロッドに光を照射した際に励起される局在モード表面プラズモンの励起特性を、Discrete Dipole Approximation (DDA)法を用いて、その光透過、反射、吸収特性等を計算することで評価した。そして実験結果と比較・検討した。

さらに、平坦な金表面にナノメートル厚みの透明バッファ層を介して金ナノリボン構造を積層した多層構造を利用した完全光吸収構造について、バッファ層の厚みや金ナノリボンの幅、厚みなどを変えながらその反射スペクトルをRCWA法で計算し、構造パラメー

タの最適化を行った。

3. 結果

金属ナノフィンの構造体の光学特性については、フィンの構造の周期に依存した表面プラズモンのバンドギャップ特性が存在し、そのバンドギャップ付近で極めて増強された共鳴局在場が生成されることが明らかになった。さらに、この構造体の近くに有機物が存在すると共鳴局在場の周波数や光の入射角度が変化することを見出し、この特性を利用することで、有機分子センサーへ応用できることを明らかにした。

U字湾曲金ナノロッドの局在プラズモン特性については、湾曲したロッドに直線偏光を照射すると、U字に平行な偏光を照射した場合 (Uに対して $\uparrow$ 方向の偏光) は、U字の弧長の半分の長さに対応する周波数領域にプラズモン共鳴が、またU字に垂直な偏光を照射した場合 (Uに対して $\rightarrow$ 方向の偏光) は、U字の全弧長の長さに対応した周波数にプラズモン共鳴が起こる事を確認した。

金ナノ構造を用いた完全光吸収体に関する計算では、透明バッファ層の厚みと、光吸収が顕著に現れる周波数との関係を明らかにするとともに、光吸収量を最大にする構造パラメータを求めることができた。

4. 今後の計画・展望

今後も引き続きこれらの計算機シミュレーションを行う。いずれの研究テーマにおいても、メタマテリアルの光学的な特性を評価するためには、ナノメートルスケールの構造体をミリメートル以上の大規模なスケールで高効率に数値解析する必要がある。そのため、計算機資源を最大限有効に活用できるように、計算プログラムの最適化を行いながら、メタマテリアルが実現しうる新奇な光機能の解明を目指す。

平成 24 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】

- Takuo Tanaka, "Self-organized assembling techniques for 3D metamaterials," RIKEN-Tsinghua University Joint Symposium (Tsinghua Univ., Beijing, China) (2012.10.22) (2012).
- Wakana Kubo and Takuo Tanaka, "Thin organic film solar cell combined with Au nanopillars," 7th Photonics Center Symposium Nanophotonics in Asia 2012 (Kanazawa Excel Hotel Tokyu, Kanazawa, Japan), p. P-37 (2012.9.18) (2012).
- Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Graphene for Infrared Plasmonics and Metamaterials," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.29) (2012).
- Ryoko Watanabe-Tamaki, Atsushi Ishikawa, and Takuo Tanaka, "DNA-Templating of Gold Nanoparticles towards Large-Scale Fabrication of Optical Metamaterials," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.29) (2012).
- Yukie Yokota and Takuo Tanaka, "Plasmonic properties of curved gold nanostructures," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.29) (2012).
- Katsusuke Shimazaki, Ryoko Watanabe-Tamaki, and Takuo Tanaka, "Infrared Transmittance Change of Au Nanoparticle - VO<sub>2</sub> Composite by Red Light Irradiation," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.29) (2012).
- Takuo Tanaka, "Self-organized assembling techniques for optical metamaterials," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.28) (2012).
- Wakana Kubo and Takuo Tanaka, "Plasmonic Nanostructures Fabricated by Nanocoating Lithography," The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum (Epocal Tsukuba, Tsukuba, Japan) (2012.6.28) (2012).
- Takuo Tanaka, "Towards three-dimensional isotropic metamaterials," 4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems (CIMTEC 2012) (Montecatini Terme, Italy) (2012.6.10) (2012).
- Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Plasmonic Properties of Graphene at Infrared Frequencies," 6th International Conference on Nanophotonics (ICNP2012) (Peking University, Beijing, China) (2012.5.29) (2012).
- Takuo Tanaka and Kanna Aoki, "Self-organized assembly of three-dimensional metamaterials," 6th International Conference on Nanophotonics (ICNP2012) (Peking University, Beijing, China) (2012.5.28) (2012).
- Takuo Tanaka, "Self-organized assembling of three-dimensional plasmonic metamaterials," The 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12) (Paris, France) (2012.4.19) (2012).
- Wakana Kubo and Takuo Tanaka, "Au Nanofins and Double-nanopillars fabricated by nanocoating lithography for practical plasmonic sensors," The 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12) (Paris, France) (2012.4.19) (2012).
- 田中拓男, "プラズモニック・メタマテリアルの作り方," 表面科学技術研究会 2013 光の常識を覆すものづくり ナノ表面と光の相互作用 (神戸大学 瀧川記念学術交流会館, 兵庫) (2013.1.22) (2013).
- 田中拓男, "光メタマテリアルとその加工技術," 新化学技術推進協会講演会 電子情報技術部会・MEMS 分科会 (2012.11.13) (2012).
- 田中拓男, 石川 篤, "光メタマテリアルの加工技術," 第 31 回マイクロファブリケーションシンポジウム&第 6 回超精密(ELID)技術会議 (2012.10.31) (2012).

## 平成 24 年度 RICC 利用報告書

- ・ 田中拓男, "光メタマテリアル - あり得ない光学材料," 光交流会 (2012.10.17) (2012).
- ・ 田中拓男, "3次元メタマテリアルの自己組織化作製法," 分子研研究会「新しい光の創成と物質科学—精密計測と操作への展開」(岡崎コンファレンスセンター, 分子研) (2012.10.11) (2012).
- ・ 久保若奈, 田中拓男, "金ナノピラー配列構造を利用した有機薄膜太陽電池," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 (2012.9.14) (2012).
- ・ 横田幸恵, 田中拓男, "湾曲金ナノロッドのプラズモン光学特性," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 (2012.9.14) (2012).
- ・ 玉木亮子, 石川篤, \*田中拓男 (講演は田中拓男), "石英基板に固定した金ナノ粒子のプラズモン共鳴吸収とその入射角依存性," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 (2012.9.13) (2012).
- ・ Takuo Tanaka, "Self-organized assembly of metamaterials," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 OSA Joint Meeting (2012.9.12) (2012).
- ・ Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Graphene for Infrared Plasmonic and Metamaterials," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 OSA Joint Meeting (2012.9.12) (2012).
- ・ Ryoko Watanabe-Tamaki, Atsushi Ishikawa, and \*Takuo Tanaka (Presented by T.Tanaka), "Plasmonic Properties of Gold Trimer Ring Fabricated DNA-Templating," 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 OSA Joint Meeting (2012.9.11) (2012).
- ・ 田中拓男, "光メタマテリアルをめざして," 電気学会フォトスピントロニクス委員会 (日本大学, お茶の水) (2012.7.27) (2012).
- ・ 田中拓男, "メタマテリアル, 光学特性とその応用," 日本技術士会化学部会講演会 (2012.7.26) (2012).
- ・ 田中拓男, "光メタマテリアル," 大阪科学技術センター フォトニクス技術フォーラム 次世代光学素子研究会 (大阪科学技術センター, 大阪) (2012.7.18) (2012).
- ・ 田中拓男, "光メタマテリアル," 電子情報通信学会 次世代ナノ技術に関する時限研究専門研究会 材料デバイスサマーミーティング 2012 (機械振興会館, 東京) (2012.6.22) (2012).
- ・ 玉木(渡邊)亮子, 田中拓男, 座古保, 前田瑞夫, "DNA テンプレートをを用いて作製した金ナノ粒子三量体リンク," 第 61 回高分子学会年次大会 (2012.5.29) (2012).
- ・ 田中拓男, "メタマテリアルの基礎と応用," 光産業技術振興協会 マンスリーセミナー (2012.5.15) (2012).
- ・ 久保若奈, 田中拓男, "金二重ナノフィンアレイ配列の共振波長のギャップ幅依存性," 第 59 回応用物理学関係連合講演会 (応物 2012 春) (早稲田大学, 東京) (2012.3.18) (2012).
- ・ 玉木(渡邊)亮子, 田中拓男, 座古保, 前田瑞夫, "DNA テンプレートをを用いて作製した金ナノ粒子三量体リングのプラズモン共鳴," 第 59 回応用物理学関係連合講演会 (応物 2012 春) (早稲田大学, 東京) (2012.3.18) (2012).
- ・ 田中拓男, "共振型 3 次元メタマテリアルの作製," 第 59 回応用物理学関係連合講演会 (応物 2012 春) (早稲田大学, 東京) (2012.3.15) (2012).
- ・ 島崎勝輔, 玉木(渡邊)亮子, 田中拓男, "金微粒子 - 二酸化バナジウム複合体における赤色光照射による赤外線透過率変化," 第 59 回応用物理学関係連合講演会 (応物 2012 春) (早稲田大学, 東京) (2012.3.15) (2012).
- ・ 田中拓男, "メタマテリアル 概要, 加工技術と応用," 第 2 回電磁メタマテリアル講演会 (東京大学, 東大) (2012.3.9) (2012).