

課題名 (タイトル) :

## 光メタマテリアルの電磁場解析

利用者氏名 : ○田中 拓男\*, \*\*

所属 : \*田中メタマテリアル研究室

\*\*光量子工学研究領域 フォトン操作機能研究チーム

## 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

光メタマテリアルと呼ばれる波長よりも細かな人工構造を用いて物質の光学特性を制御する疑似光学材料について、その構造の設計と特性評価を行うために大規模な電磁気学計算が必要である。特に最近では、立体的な共振器構造を用いて光の入射角度に依存しない等方的な特性を持つメタマテリアルを開発すべく、その最適な構造の設計に電磁界シミュレーションを行っている。具体的には有限要素法 (FEM) や有限時間差分領域法 (FDTD), 厳密結合波解析法 (RCWA) などを計算機上で実施している。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

今年度は、赤外域の光波を効率良く吸収するメタマテリアル吸収体について、電磁界シミュレーションと試作実験とを繰り返しながらその最適な構造を求めた。シリコン基板表面に様に金薄膜をコートし、さらにこの上に MgF<sub>2</sub> 薄膜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メタマテリアル吸収体を試作し、このメタマテリアル構造の光学特性を FD-TD 法ならびに FEM 法を用いて計算した。

## 3. 結果

設計したメタマテリアル構造に赤外光を垂直に入射させると、金ナノリボンと金薄膜との間に局在型プラズモンが励起された。励起されるプラズモンモードの波長は、透明バッファ層の厚みで制御できることがわかった。励起されるいくつかのプラズモンモードのうち、最低次 (1 次) のモードは光の入射角が変化しても励起されつづけることが、さらに 2 次のモードは有機分子が持つ C-H の伸縮振動モードとほぼ等しい波長で励起さ

れることがわかった。また、数値計算で求めた反射スペクトルは実験結果と良い一致を示す事を確認した。これらの結果を用いて、メタマテリアル構造の最適化を行った。2 次モードは四重極子モードなので、本来は自由空間を伝播する平面波では直接励起することができないダークモードプラズモンである。そのため、このモードが励起されると光は反射されずに完全に吸収され、光メタマテリアルは完全吸収体として振る舞う事を明らかにできた。

さらに、このメタマテリアル吸収体の表面に有機分子が付着すると、分子の吸収波長とプラズモンの励起波長が等しいので両者間の相互作用が起こり、メタマテリアルの完全吸収体としてのバランスが崩れて付着した分子の吸収スペクトルと同じスペクトル形状の光が反射される事を見出した。この様子を分子を理想的な双極子としてモデル化して数値計算を行い、実験結果と良い一致をすることを確認できた。

## 4. HOKUSA I を利用しなかった理由と今後の計画・展望

上記メタマテリアルのスペクトル特性を計算する過程では、各波長毎にジョブを割り振って平行して計算を実行し、それぞれの計算結果を後で統合することでスペクトル情報を得ている。そのため、計算機 (CPU) の数に比例して並列性は上がり、計算時間は反比例して短くなって、大規模計算機システムの恩恵を最大限に利用できる研究テーマである。そこで、研究室で所有する計算機システムと計算機センターの計算機とを意識せずに自動的にジョブを割り当てるプログラムを作製して、これを用いて数値計算を実施していた。ところが、前システムの R I C C が停止した際に、一旦計算機センターの計算機にジョブを

割り当てる機能を停止し、HOKUSAI稼働後にその設定を戻すのを忘れていた。しかし計算結果は研究室の計算機から得られていたためジョブがHOKUSAIで実行されていない事に指摘を受けるまで気づいていなかった。

また、有限要素法については当研究室でライセンスを所有している商用ソフトをHOKUSAIで実行すべく環境整備について議論したが、ライセンスの管理方法について問題があり、今年度はHOKUSAIでのプログラムを稼働させることができなかった。

来年度はこれらの問題を解決し、HOKUSAIが持つ計算機資源を最大限活用して、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その光学特性の評価のための電磁界シミュレーションを実施する予定である。

平成 27 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

1) Atsushi Ishikawa and Takuo Tanaka, "Metamaterial Absorbers for Infrared Detection of Molecular Self-Assembled Monolayers," Scientific Reports 5, 12570 (DOI: doi:10.1038/srep12570) (2015).

【国際会議などの予稿集、proceeding】

- 1) Takuo Tanaka and Atsushi Ishikawa, "High-sensitive molecular detection by metamaterial infrared absorber," The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PacifiChem2015) (Honolulu, Hawaii, USA) (2015.12.16) (2015).
- 2) Takuo Tanaka, "TBA," Optics&Photonics Taiwan, International Conference (OPTIC2015) (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan) (2015.12.4) (2015).
- 3) Takuo Tanaka, "TBA," Seminar in Academia Scinica, Taiwan (Academia Scinica, Taipei, Taiwan) (2015.12.3) (2015).
- 4) Takuo Tanaka, "Three-dimensional metamaterials for isotropic response," International Symposium on Optical Memory 2015 (ISOM2015) (Toyama International Conference Center, Toyama, Japan) (2015.10.5) (2015).
- 5) Takuo Tanaka, "Top-down and bottom-up fabrication techniques for isotropic metamaterials," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015) (BEXCO, Busan, Korea) (2015.8.24) (2015).
- 6) Takuo Tanaka, "Fabrication of Three-dimensional Metamaterials," The 1st International POSTECH Nanophotonics Workshop - Frontiers in Metamaterials and Plasmonics (POSTECH International Center POSTECH, Korea) (2015.8.24) (2015).
- 7) Yukie Yokota and Takuo Tanaka, "Plasmonic coupling of gold curvilinear nanorods with nanogap," SPIE Optics&Photonics 2015 (SanDiego Convention Center, SanDiego, USA) (2015.8.11) (2015).
- 8) Takuo Tanaka, "Three-Dimensional Isotropic Metamaterials And Their Fabrication Techniques," 5th Molecular Materials Meeting (M3) (ResortsWorldConventionCentre, Singapore, Singapore) (2015.8.3) (2015).
- 9) Thu H. H. Le and Takuo Tanaka, "Versatile fabrication of nanofluidic devices on CaF<sub>2</sub> substrate for ultra-sensitive infrared spectroscopic applications," 8th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (Vienna, Austria), pp. 336-337 (2015.7.14) (2015).
- 1 0) Takuo Tanaka, "Fabrication of Three-dimensional Metamaterials," The 36th Progress In Electromagnetics Research Symposium (Prague, Czech Republic) (2015.7.7) (2015).
- 1 1) Tomohiro Amemiya, Atsushi Ishikawa, Toru Kanazawa, Nobuhiko Nishiyama, Yasuyuki Miyamoto, Takuo Tanaka, and Shigehisa Arai, "Possibility of Permeability Control on InP-based Photonic Integration Platform," The International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2015) (Singapore, Singapore) (2015.6.28) (2015).
- 1 2) Takuo Tanaka, "Metamaterials," French-Japanese Seminar Emerging Materials for Optics (Embassy of France, Tokyo, Japan) (2015.6.3) (2015).
- 1 3) Takuo Tanaka, "Uniaxial-isotropic Metamaterials," The 7th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP7) (Jerusalem, Israel) (2015.5.31) (2015).
- 1 4) Tomohiro Amemiya, Zhichen Gu, Atsushi Ishikawa, Yuya Shoji, Pham Nam Hai, Masaaki

平成 27 年度 利用報告書

Tanaka, Tetsuya Mizumoto, Takuo Tanaka, and Shigehisa Arai, "Magneto-Optical Integrated Circuits by femtosecond laser modelling in YIG," The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 15) (横浜, Japan) (2015.4.24) (2015).

- 1 5) Yukie Yokota and Takuo Tanaka, "Plasmonic Coupling between Gold Curvilinear Nanorods and Straight Nanorods with controlling gap distance," The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 15) (横浜, Japan) (2015.4.23) (2015).