

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2016

課題番号：16K13658

研究課題名(和文)非磁性金属メタマテリアルを用いた光-電流-スピン流制御の検証

研究課題名(英文)Novel optical control of electric and spin current in non-magnetic metamaterials

研究代表者

松原 正和 (Matsubara, Masakazu)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50450648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機能性人工物質の創製により生み出される新規なスピントロニクス機能の開拓を目指した。具体的には、非磁性金属薄膜に光の波長以下のサイズの人工的な3回回転対称構造を導入することで、外場を印加することなく光の照射のみにより電流を生成し、その流れる方向を非磁性金属薄膜の2次元面内で360°自在に制御できることを明らかにした。これを発展させることで、光によるスピン流制御の新しい原理の開拓が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed to explore novel spintronics functionalities based on the creation of functional artificial materials (metamaterials). Specifically, by introducing an artificial three-fold rotational symmetric structure with a size less than the wavelength of light into the nonmagnetic metallic thin film, electric charge current is generated only by light irradiation without applying an external electric field. Its direction can be controlled by 360 degrees in the two-dimensional plane of the nonmagnetic metamaterials. By developing this idea, it is expected to open a new principle for generating and controlling spin current by light.

研究分野：光物性

キーワード：メタマテリアル 非線形光学効果 対称性 スピン流 光電流

## 1. 研究開始当初の背景

現代の高度に発達した情報化社会を支えているのは、電荷制御型の半導体エレクトロニクス技術である。しかしながら、デバイスの高密度化や演算処理の高速化は著しくその限界が予想され、次世代の高度通信・情報化社会構築に向け代替する新しい技術の開発が強く望まれている。このような中で、近年、電子が持つ電荷の自由度に加えてスピン(磁気)の自由度を積極的に利用する「スピントロニクス」が、電気・磁気デバイスの新しい駆動原理の創出や省エネルギー化技術の観点から注目を集め、これらに関する研究が世界的規模で進められている。スピントロニクス機能の多くは、電流のスピン版である「スピン流(スピンの流れ)」によって駆動される。スピン流を用いれば、超低損失な不揮発性磁気メモリーや量子情報伝送が実現可能になると期待されており、スピン流生成技術の開発が急務となっている。

## 2. 研究の目的

近年の微細加工技術の発展により、光の波長よりも小さな構造を持つサブ波長人工物質(メタマテリアル)を作製し、物質固有と考えられてきた光学応答を人工的に制御することが可能となっている。光と物質の相互作用はマクロに見れば物質の対称性が重要な役割を果たし、それを制御することで物質の(非線形)光学応答を意図的に制御することができる。

本研究では、従来に無い新しい原理により、対称性を制御した非磁性金属人工物質(非磁性金属メタマテリアル)において、非線形光学効果を用い光パルスにより電流を生成し、その伝搬方向を2次元面内で360°自在に制御する方法を提案する。また、その原理を実験的に初めて検証する。これにスピンホール効果を組み合わせることで、照射する光の偏光方向により自在にスピン流の生成・制御を可能とする新しい原理の開拓が期待される。

## 3. 研究の方法

本研究は1年間において、対称性を制御した非磁性金属メタマテリアルをデザイン・作製・評価し、光と物質の非線形相互作用を利用することにより外場を印加することなく光照射のみにより電流を生成し、その流れる方向を光の偏光方向により制御できることを実証するために、「4. 研究成果」で述べる手順で実験を行った。

## 4. 研究成果

### ① 非磁性金属メタマテリアル構造のデザイン・作製・評価

金属薄膜に人工的な3回回転対称構造を導

入することで、光電流を生成・制御可能な非磁性金属メタマテリアルを作製した。電磁波に対する共鳴エネルギー位置などの見積りに電磁場計算シミュレーションソフトウェアを用いることで、本研究で使用するレーザー波長(800 nm)で共鳴する構造のデザインを行った(図1)。

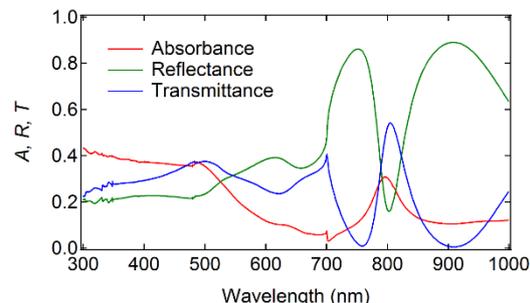


図1 透過率(T)、反射率(R)、吸収(A)スペクトルの電磁場計算シミュレーション結果。

試料作製は、研究室で所有するイオンビームスパッタ装置、イオンビームエッチング装置などを用いて行い、それ以外の微細加工は東北大学西澤潤一記念研究センターにある共用装置(電子線描画装置)を利用した。作製した試料の評価を研究室で所有する原子間力顕微鏡(AFM)等で行い、設計通りの構造を作製することに成功した(図2)。

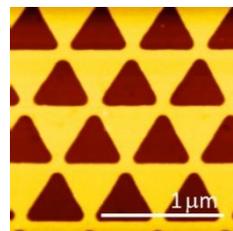


図2 金の薄膜(膜厚~40 nm)上に作製した3回回転対称性を持つメタマテリアル構造のAFM像。

### ② 光電流測定系の構築

光の照射により生成される電流の大きさや方向を測定するために新規な光学系を構築した。これにより、光電流の励起強度依存性、入射直線偏光の偏光角度依存性、円偏光度依存性の測定などが可能となった。

### ③ 非磁性金属メタマテリアルにおける光電流の測定

フェムト秒チタンサファイアレーザー(波長: 800 nm、パルス幅 130 fs、繰り返し周波数: 80 MHz)から出た光を光チョッパーで1 kHz程度の周波数に落とし、試料(非磁性金属メタマテリアル)を励起した。試料の上下・左右方向に取り付けた電極間に流れる電流をロックインアンプで検出することにより、誘

起される光電流の大きさと方向を測定した (図 3(a)).

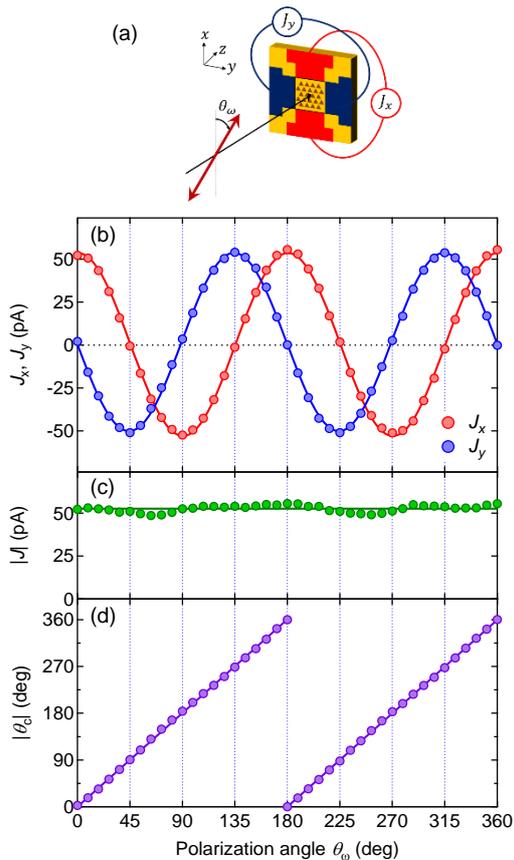


図 3 (a) 実験配置。(b)-(d) 光電流の入射直線偏光角 ( $\theta_\omega$ ) 依存性。(b) 光電流の  $x$  方向成分  $J_x$  と  $y$  方向成分  $J_y$  (c) 光電流の大きさ  $|J|$  (d) 光電流の流れる方向  $\theta_c$

図 3(b)-(c)に、光照射により試料の  $x$  方向と  $y$  方向に流れる電流  $J_x, J_y$ 、電流の大きさ  $|J|$ 、電流の流れる方向  $\theta_c$  をそれぞれ入射直線偏光の偏光方向 ( $\theta_\omega$ ) の関数としてプロットした。この結果は、入射直線偏光の偏光方向を制御することで、生成される電流の大きさを一定に保ったまま流れる方向を  $360^\circ$ 自在に制御できることを示している ( $|\theta_c| = 2\theta_\omega$ )。また、入射光の強度や円偏光度によっても、流れる電流の大きさを制御できることも明らかになった。

この結果にスピンホール効果を組み合わせることで、光によるスピン流制御の新しい原理の開拓が期待される。

今後は、今回立ち上げた装置や非磁性金属メタマテリアル作製技術を用いて、より効率的な光電流を生成するメカニズムの探索や、光照射により誘起されたスピン流の測定を行うことで、新しい光スピントロニクス原理の検証を行う。

## 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 2 件)

- ① P. Jain, A. Stroppa, D. Nabok, A. Marino, A. Rubano, D. Paparo, M. Matsubara, H. Nakotte, M. Fiebig, S. Picozzi, E. S. Choi, A. K. Cheetham, C. Draxl, N. S. Dalal, and V. Zapf, Switchable electric polarization and ferroelectric domains in a metal-organic-framework, npj Quantum Materials, 査読有, 1, 2016, 16012/1-6, DOI:10.1038/npjquantmats.2016.12
- ② S. Manz, M. Matsubara, T. Lottermoser, J. Büchi, A. Iyama, T. Kimura, D. Meier, and M. Fiebig, Reversible optical switching of antiferromagnetism in  $\text{TbMnO}_3$ , Nature Photonics, 査読有, 10, 2016, 653-656, DOI: 10.1038/nphoton.2016.146

[学会発表] (計 7 件)

- ① 岩田健吾, 矢野春菜, 松原正和, 中川勝, 石原照也, サブ波長三角孔を配列したAl薄膜の光誘起横起電力, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ② 松原正和, Sebastian Manz, 木村剛, Manfred Fiebig, スパイラル磁性強誘電体 $\text{TbMnO}_3$ におけるマルチフェロイックドメインの光スイッチング, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ③ 富樫拓也, 辻翔太, 石原照也, 松原正和, 3 回回転対称メタマテリアルにおける光電流の生成及び制御, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ④ 佐藤佳史, 辻翔太, 富樫拓也, 石原照也, 松原正和, 「非反転対称磁性体メタマテリアルによる第二高調波発生」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学 (大阪府豊中市)
- ⑤ 岩田健吾, 矢野春菜, 富樫拓也, 松原正和, 中川勝, 石原照也, 非対称ユニットセルをもつアルミニウムメタマテリアルの光整流効果, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016/9/13-16, 金沢大学 (石川県金沢市)
- ⑥ 辻翔太, 富樫拓也, 石原照也, 松原正和, 磁性体メタマテリアルにおける非線形光学応答, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016/9/13-16, 金沢大学 (石川県金沢市)
- ⑦ M. Saikawa, Y. Hachiya, K. Iwata, M. Matsubara, and T. Ishihara, Second harmonic generation from sub-wavelength triangular hole array in Au thin film, The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 2016/7/25-28, Malaga

(Spain)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

プレスリリース

① 2016年8月18日

「夢の多機能電子素材マルチフェロイック物質を光で制御する新手法を発見 ー次世代メモリデバイス等への応用時の、新制御方法として期待ー」

メディア報道

① 2016年9月2日, 日経産業新聞 (8面)

「光で電気の性質を制御 東北大など次世代メモリーに道」

② 2016年8月19日, OPTRONICS online

「東北大ら、マルチフェロイック物質の光制御に成功」

ホームページ

<http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/matsubara/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 正和 (MATSUBARA, Masakazu)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50450648

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし