

メタマテリアルを用いた光－電流－スピン流 制御機構の開拓

所属：東北大学 大学院理学研究科

助成対象者：松原 正和

概要

近年注目を集め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ため、その生成・制御技術の開発が急務となっている。本研究では、対称性を制御したサブ波長人工物質（メタマテリアル）を創製することで、スピン流の生成・制御を可能とする新原理の検証を行った。その結果、光の波長よりも小さな3重回転対称性を持つメタマテリアルにおいて、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、その流れる方向をメタマテリアルの2次元面内で360°自在に制御することに成功した。この結果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を生成・制御できる新しい原理の開拓が期待される。

abstract

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 any external bias fields. 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 electric current and spin current by light.

研究内容

【背景と目的】

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。

本研究では、対称性を制御したサブ波長人工物質（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ゼロバイアス光電流を生成し、その流れる方向を光の偏光方向により自在に制御する新原理を検証・実証することを目的とした。これにスピ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電流とスピン流を生成・制御する新しい原理の開拓が期待される。

【結果】

① 非磁性金属メタマテリアルのデザイン・作製・評価

スピン軌道相互作用の大きな金（Au）や白金（Pt）などの非磁性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、ゼロバイアス光電流を生成・制御可能な非磁性金属メタマテリアルを作製した。試料作製は、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、電子線描画装置などを利用した。1 cm × 1 cm の大きさの SiO₂ 基板上に膜厚 5~40 nm の金（Au）あるいは白金（Pt）をスパッタ（金の場合には 2~3 nm 程度のクロム（Cr）を接着層として基板上にスパッタ）し、一辺が 480 nm の正三角形の穴を三角格子状に描画する（描画領域 250 μm × 250 μm）ことで3回回転対称性を持つ非磁性金属メタマテリアルを作製した。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 1）。

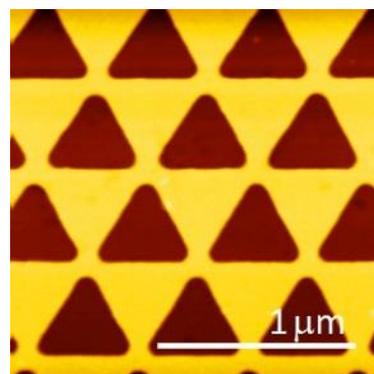


図 1 金（Au）の薄膜（膜厚~40 nm）上に作製した3回回転対称性を持つメタマテリアルのAFM像。

② ゼロバイアス光電流の生成・検出系の構築

空間反転対称性を持たない物質に光を照射した際にゼロバイアス直流電流が生じる現象は光ガルバノ効果と呼ばれる。今回、非磁性金属メタマテリアルにおいて光ガルバノ効果に由来するゼロバイアス光電流の大きさと方向を精度よく測定するための測定系を新たに構築した。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、入射光スポットの場所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ゼロバイアス光電流の生成・制御

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 100 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。レーザーのスポットの大きさは直径約 250 μm であり、これは人工構造を描画した領域の大きさと同程度である。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、光照射により誘起されるゼロバイアス光電流の大きさと方向を測定した（図 2(a)）。

図 2(b)-(d) に、金（Au）の 3 回回転対称メタマテリアルに垂直入射で光照射した際に、試料の x 方向と y 方向に流れる電流 J_x と J_y 、電流の大きさ $|J| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$ 、電流の流れる方向 $\theta_c = \tan^{-1}\left(\frac{J_y}{J_x}\right)$ をそれぞれ入射直線偏光の偏光方向 θ_ω の関数としてプロットした。図 2(b) より、 $J_x \propto \cos 2\theta_\omega$ 、 $J_y \propto -\sin 2\theta_\omega$ の関係が確認でき、光電流の大きさ $|J|$ は θ_ω に依存せず一定となる（図 2(c)）。また、 $\tan^{-1}\left(\frac{J_y}{J_x}\right) = -2\theta_\omega$ より、電流の流れる方向と入射直線偏光の偏光方向の間には、 $\theta_c = -2\theta_\omega$ の関係が成立する（図 2(d)）。この結果は、入射直線偏光の偏光方向を制御することで、3 回回転対

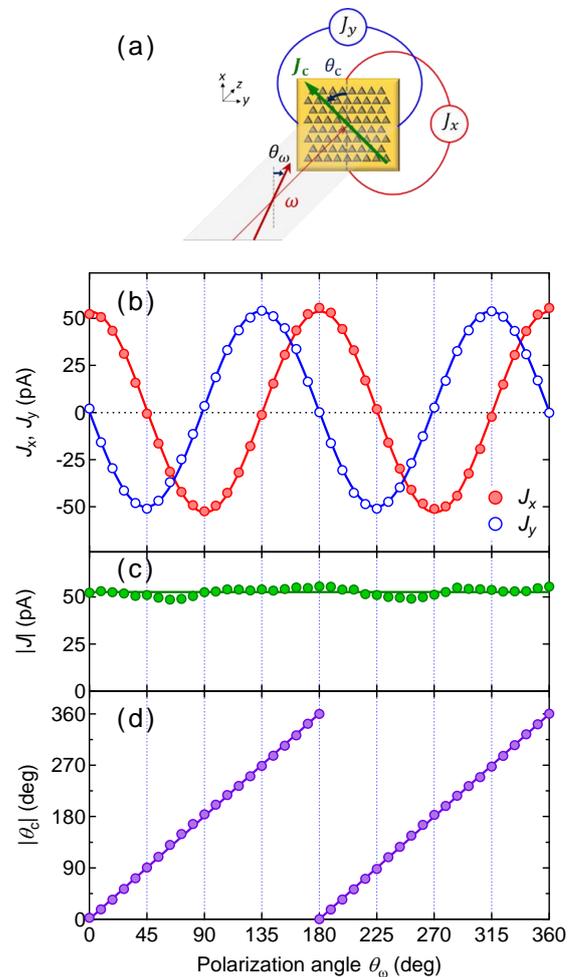


図 2 (a) ゼロバイアス光電流測定の実験配置。(b)-(d) 金（Au）の 3 回回転対称メタマテリアルにおけるゼロバイアス光電流の入射直線偏光角 (θ_ω) 依存性。(b) 光電流の x 方向成分 J_x と y 方向成分 J_y 。(c) 光電流の大きさ $|J|$ 。(d) 光電流の流れる方向 θ_c 。

称性を持つ非磁性金属メタ材料の2次元面内で生成されるゼロバイアス光電流の大きさを一定に保ったまま流れる方向を360°自在に制御できることを示している。

また、生成されるゼロバイアス光電流の大きさは入射光強度に比例し、入射光の円偏光度を変えて、そのスイッチング（オン・オフ）ができることも明らかになった（図3）。これらの結果は、非磁性金属メタ材料が持つ3回回転対称性から予想される振る舞いと完全に一致しており、本研究で提案する「対称性の人工的な設計による光電流の生成・制御」の実証に成功したと言える。

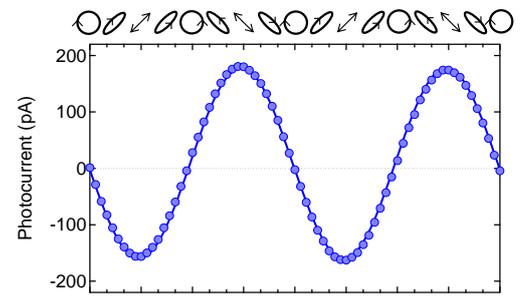


図3 ゼロバイアス光電流の入射光の円偏光度依存性。

次に、光パルスのスポットを試料上でスキャンし、非磁性金属メタ材料の2次元面内における光電流の空間分布をマッピングした。図4(a)と図4(b)に、 $\theta_\omega = 0^\circ$ と $\theta_\omega = 45^\circ$ においてマッピングした試料の x 方向に流れる電流 J_x の分布を示す。本来、 $\theta_\omega = 45^\circ$ では x 方向には光電流は生じないものの（図2(b)）、光のスポットを中心から上下にずらすと有限かつ逆向きの電流が流れることが分かった。これは、光照射による温度勾配によって発生した熱電効果由来の電流だと考えられる。この効果は入射光の偏光方向には依存しないため、 $\theta_\omega = 0^\circ$ のときも同様に観測される。純粋な光ガルバノ効果による寄与は、図4(a)と図4(b)の差分をとることで得られる。実際、図4(c)に示すように、このようにして求めた光電流分布は試料の中心部分において大きくなり、中心からずれるに従って小さくなる。

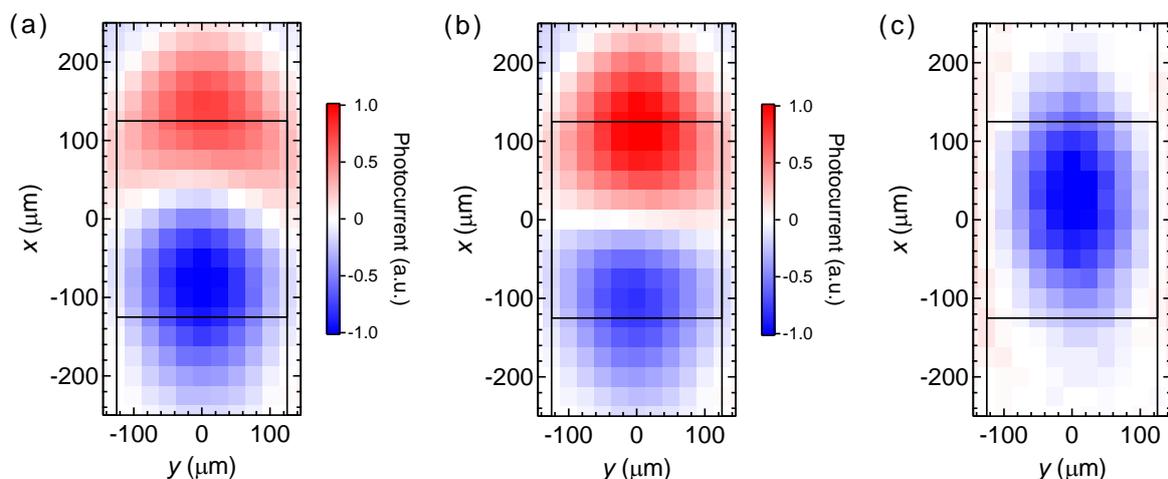


図4 金 (Au) の3回回転対称性メタ材料における光電流の x 方向成分 J_x の光照射位置依存性。(a) $\theta_\omega = 0^\circ$ 。(b) $\theta_\omega = 45^\circ$ 。(c) (a)と(b)の差分。

本研究ではこのように、光のスポットが正確に試料の中心に当たるように注意深く実験を行うことで、熱による電流の寄与を排除することができた。

【まとめ、今後】

本研究では、メタマテリアル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、人工的に導入した3重回転対称性を有する非磁性金属メタマテリアルにおいて、外場を印加することなく光パルスによりゼロバイアス光電流を生成し、その流れる方向を非磁性金属メタマテリアルの2次元面内で360°自在に制御できることを実験的に明らかにした。

このように、本研究で提案するゼロバイアス光電流の生成・制御に関する基礎原理を実証することができたため、次のステップとして、ゼロバイアス光電流の生成・方向制御とスピンホール効果を組み合わせ、光の偏光制御によるスピンの制御機構の検証・実証を行うための準備にとりかかった。これまでスピンの検出方法としては、逆スピンホール効果を用いて電圧に変換して測定する方法 [1] や、磁気光学効果を用いて実空間で観測する方法 [2] などが提案されている。本研究では、スピン検出の手法としてスピンホール磁気抵抗効果 [3,4] を用いた検証を行う。これにより、光パルスにより電流とともに生成・制御されたスピンの高感度検出を行う。現在、スピンを検出するために、白金 (Pt) と磁性ガーネット (YIG) からなる試料を作製し、スピンホール磁気抵抗効果を利用した実験の準備を開始している。本研究を引き続き推進することで、光による電流とスピンの生成・制御を可能とする新しい光スピントロニクス原理の開拓が期待される。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり多大なご支援を賜りました公益財団法人 住友電工グループ 社会貢献基金に厚く御礼申し上げます。今回の研究助成は、自らの研究グループを立ち上げ始めたばかりの私にとって大変貴重なものでした。ここに深く感謝申し上げます。

【引用文献】

- [1] E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).
- [2] Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Science **306**, 1910 (2004).
- [3] H. Nakayama, M. Althammer, Y.-T. Chen, K. Uchida, Y. Kajiwara, D. Kikuchi, T. Ohtani, S.

Geprags, M. Opel, S. Takahashi, R. Gross, G. E.W. Bauer, S. T. B. Goennenwein, and E. Saitoh, Phys. Rev. Lett. **110**, 206601 (2013).

[4] A. Brataas, Physics **6**, 56 (2013).

本助成に関わる成果物

[口頭発表]

- [1] 小林隆嗣, 富樫拓也, 加藤剛志, 岩田聡, 松原正和, 「磁性体人工ナノ構造を用いた磁気光ガルバノ効果の観測」, 第73回年次大会 (2018年3月22-25日)
- [2] 佐藤佳史, 櫻木俊輔, 石原照也, 松原正和, 「光第二高調波発生による磁性体ナノ構造中のトロイダルモーメントの検出」, 第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018年3月17-20日)
- [3] 小林隆嗣, 富樫拓也, 日置友智, 齊藤英治, 石原照也, 松原正和, 「非磁性金属メタマテリアル/YIG 積層膜における磁気応答光電流の観測」, 日本物理学会2018年秋季大会 (2018年9月9-12日)
- [4] 佐藤佳史, 櫻木俊輔, 石原照也, 松原正和, 「光第二高調波発生による磁性体ナノ構造中のトロイダルモーメントの検出」, 日本物理学会2018年秋季大会 (2018年9月9-12日)

[ポスター発表]

- [1] 小林隆嗣, 加藤剛志, 岩田聡, 松原正和, 「磁性体人工ナノ構造における磁気光ガルバノ効果の観測と空間マッピング」, 日本物理学会2018年秋季大会 (2018年9月9-12日)