

令和元年6月20日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03853

研究課題名(和文) スピン軌道現象の光解析技術の構築

研究課題名(英文) Optical detection of spin orbit effects

研究代表者

林 将光 (Hayashi, Masamitsu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：70517854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光を使ってヘテロ構造のスピン軌道相互作用を評価し、新たな視点からスピン軌道効果を理解できる技術を構築し、スピン軌道相互作用と光の相関に関する学理を構築することが目的である。本研究では、磁気光学効果を高精度で検出できるシステムを開発し、非磁性/強磁性ヘテロ構造において電流印加によって強磁性層に作用するスピン軌道トルクや、非磁性層におけるスピン蓄積を評価できることを実証した。また、フォトガルバニック効果を利用して、金属層界面の特異な電子状態(ラッシュバ型電子構造)を検出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンホール角やスピントルク、ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさはスピン軌道効果をデバイスに応用する上での最重要パラメータであり、精緻な計測技術が必要不可欠である。本研究で構築した光解析技術により、スピン蓄積やスピン軌道トルク、界面の電子構造を精密に評価できることが明らかになった。今後はこの技術を利用して、様々な物質におけるスピン軌道効果を調査し、その起源解明に迫る。

研究成果の概要(英文)：We aim to develop a system that can evaluate spin orbit effects in thin film heterostructures using optical means. Through this project, we have developed an optical setup that can resolve extremely small changes of the magneto-optical signal that enables optical detection of spin orbit torque and spin accumulation. We have also demonstrated optical detection of Rashba-type electronic structure at metallic interfaces using the photogalvanic effect.

研究分野：電子スピン物性

キーワード：磁気光学効果 スピン軌道相互作用 光検出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用は、電子のスピン向きと波動関数の空間分布を結合するパラメータであり、様々な物性の起源となっている。たとえば、強磁性体の磁化の容易軸の向きを決定する「結晶磁気異方性」や、旋回性が統一されたカイラル磁気構造を誘起する「ジャロシンスキー・守谷相互作用」、非磁性体中に電流を流した場合の電子の移動方向がスピンの向きによって変化する「スピンホール効果」などはすべて、物質中のスピン軌道相互作用が誘起する現象である。これらの現象は一般的にスピン軌道相互作用が大きいとされる重い金属(5d 遷移金属等)を含む構造やヘテロ構造界面で確認され、「スピン軌道効果」と呼ばれている。

スピン軌道効果を利用して磁性体の磁化を効率的に制御できることが最近明らかになってきた。例えば重金属と強磁性層を含む薄膜ヘテロ構造では、膜面水平方向に電流を流すと、重金属層のスピンホール効果によって生成されたスピン流が強磁性層に流入し、界面でスピントルクが作用する結果、電流の向きや大きさによって強磁性層の磁化方向を制御することができる。スピン軌道効果を利用して、現在の主流技術であるスピン注入磁化反転とは仕様・用途が異なる高速3端子型スイッチング素子や大容量ストレージ素子の実現が期待されているが、実用化に向けては特に磁化操作に必要な電力の低減が求められている。

2. 研究の目的

重い遷移金属やそれを含むヘテロ構造の界面では大きなスピン軌道相互作用が発現し、スピンホール効果やジャロシンスキー・守谷相互作用などの「スピン軌道効果」を誘起する。これらの現象を利用して、効率的な電流駆動磁化制御技術の研究が盛んに行われているが、デバイス応用に向けて各効果の発現機構の解明が重要な課題となっている。スピン軌道効果を理解するため、これまで様々なアプローチが確立されてきたが、どの手法もそれぞれに課題を抱えている。特に、金属や界面の「スピン軌道相互作用」というこれまでの金属スピントロニクスにはなかったハンドルを評価する必要があるため、これまでとは異なったアプローチをとらなければ課題解決が難しいことが最近認識され始めている。そこで本研究は、光を使ってヘテロ構造のスピン軌道相互作用を評価し、新たな視点からスピン軌道効果を理解できる技術を構築し、スピン軌道相互作用と光の相関に関する学理を構築する。

3. 研究の方法

本研究では主に、磁気光学効果を利用してヘテロ構造に電流を流した際に生成されるスピン流、スピン蓄積と、磁化に作用するトルクを評価できる手法を開発する。直線偏光を試料に照射し、試料からの反射波の偏向を測定する。試料が強磁性体の場合、その磁化方向によって反射波の偏向面が変化するため、スピン軌道トルクの評価に利用する。試料が非磁性体の場合には、スピンホール効果などによって生成されたスピン流の向きや大きさを、反射波の偏向面の変化から推測する。また、ジャロシンスキー・守谷相互作用の起源とされるラシュバ型の電子構造を評価するため、円偏光を試料に照射し、試料に流れる電流をベクトル分解測定する。

4. 研究成果

初年度は薄膜ヘテロ構造の光解析技術を構築するための知見を得るために、磁気光学スペクトル測定を利用して、薄膜ヘテロ構造の Kerr 回転角や楕円率などの磁気光学応答を調べた。シリコン上に熱酸化膜(SiO₂)を堆積した基板に、厚さ1 nmの強磁性超薄膜とキャップ層を成膜し、可視光領域での Kerr 回転角と楕円率を測定した。その結果、シリコン基板上的酸化膜において多重反射が起こり、光の干渉効果によって磁気光学応答が変調されることがわかった。特に、1 nmの強磁性超薄膜に可視光領域の光を照射してもほとんどの光は透過してしまうため、通常 Kerr 効果はほとんど観測できないが、基板の熱酸化膜における多重反射を利用することで、

Kerr 回転角や楕円率を増幅し、そのスペクトル測定を精度良く行えることがわかった。これらの結果から、基板の酸化膜の膜厚を調整することで大きな磁気光学信号を得ることができるため、スピン蓄積などの微小信号測定に対しては有効である[Sumi *et al.*, Scientific Reports 8, 776 (2018)]。

2 年度目は薄膜試料のスピン軌道トルク測定を行った。W/CoFeB/MgO 薄膜(CoFeB 層の直容易軸は膜面水平方向)に DC 電流を流し、スピン軌道トルクによって傾いた磁化を磁気光学効果を通して測定した。大きな DC 電流を流すとジュール加熱による発熱効果が発生するため、できるだけ小さい電流で測定できることが好ましい。そのため、小さな電流印加時のわずかな磁化方向の変化も捉えることができる精度の高い磁気光学効果の測定系が必要となる。本研究で構築した測定系でスピン軌道トルクを測定した結果、印加電流とスピン軌道トルクの比例関係や、磁化の反転によるスピン軌道トルクの反転を確認できた。得られたスピン軌道トルクの大きさは他の手法を用いて評価した値と概ね一致した。さらに、 10^{10} A/m² 程度の電流密度でもジュール加熱による発熱効果が観測されたが、磁化応答と発熱効果の分離ができる測定手法を確立することに成功した[Marui *et al.*, Appl. Phys. Express 11, 5 093001 (2018)]。

3 年度目は、測定分解能の向上により、 10^{-8} rad 程度の精度を持つ磁気光学 Kerr 効果の測定系の構築に成功した。これにより、面直磁化を有する薄膜ヘテロ構造のスピン軌道トルクの測定に成功し、他の評価手段(スピン軌道トルクの電氣的測定)との比較を行うことが可能となった。さらに、スピホール効果やエデルシュタイン効果によって生成されたスピン蓄積を原理的に検知できる分解能を達成できているため、今後評価していく。

また、光 - スピン相互作用の新たな取り組みとして、半金属/金属ヘテロ界面のフォトガルバニック効果の測定を行った。フォトガルバニック効果とは、電子のスピンと運動量が結合したスピン・運動量結合バンドを有する試料に円偏光を照射すると、偏光の旋回性に依存する起電力が生じる効果である。Cu/Bi の 2 層構造で円偏光の旋回性に依存する大きな起電力が観測される一方、Cu や Bi の単層膜では同様の起電力はほとんど観測されなかった。これらの結果から、円偏光の旋回性に依存する起電力は Cu/Bi 界面で誘起され、その起源として界面に Rashba 型のバンドが存在していることが考えられる。ただし、今回用いた光のエネルギーは Bi のバンドギャップより 1 桁以上大きく、これまでバンドギャップ程度の光を励起に用いて円偏光の旋回性に依存する起電力が観測されてきた半導体やトポロジカル絶縁体におけるフォトガルバニック効果とはこの点で異なっており、今後起電力が生成される機構の解明が必要である [Hirose *et al.* Appl. Phys. Lett. 113, 222404 (2018)]。フォトガルバニック効果を利用することでジャロシンスキー守谷相互作用の起源とされるラシュバ型の電子構造を評価できるため、今後取り組む。また、磁気光学効果を用いて磁区観察を行い、以下の結果を得た。

- 静磁結合した磁壁が効率よく電流駆動できることを実証 [del Real *et al.*, Nano Lett. 17, 1814 (2017)]
- カイラル磁壁の抵抗の大きさがジャロシンスキー守谷相互作用に依存することを解明 [Ishikuro *et al.*, Appl. Phys. Express 11, 5 073001 (2018)]
- Ir/Co 界面のジャロシンスキー守谷相互作用の符号が Pt/Co と同じであり、大きさも同等であることを報告[Ishikuro *et al.*, Phys. Rev. B 99, 134421 (2019)]
- ジャロシンスキー守谷相互作用が電流で変調できることを実証[Kato *et al.*, Phys. Rev. Lett. *in press*]

5 . 主な発表論文等

{ 雑誌論文 }(計 6 件)

Current-induced modulation of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction

N. Kato, M. Kawaguchi, Y.-C. Lau, T. Kikuchi, Y. Nakatani, M Hayashi

Phys. Rev. Lett. *in press*. 査読あり.

Dzyaloshinskii-Moriya interaction and spin-orbit torque at the Ir/Co interface

Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, N. Kato, Y.-C. Lau and M. Hayashi

Phys. Rev. B 99, 134421 (2019). 査読あり.

Circular photogalvanic effect in Cu/Bi bilayers

H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, M. Hayashi

Appl. Phys. Lett. 113, 222404 (2018). 査読あり.

Optical Detection of Spin-Orbit Torque and Current-Induced Heating

Y. Marui, M. Kawaguchi, M. Hayashi

Appl. Phys. Express 11, 5 093001 (2018). 査読あり.

Domain-Wall Resistance in Cofeb-Based Heterostructures with Interface Dzyaloshinskii-Moriya Interaction

Y. Ishikuro, M. Kawaguchi, Y. C. Lau, Y. Nakatani, M. Hayashi

Appl. Phys. Express 11, 5 073001 (2018). 査読あり.

Interference induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in ultrathin magnetic films

S. Sumi, H. Awano, M. Hayashi

Scientific Reports 8, 776 (2018). 査読あり.

[学会発表](計13件)

H. Hirose, N. Ito, M. Kawaguchi, M. Hayashi, Optically induced spin transport in semi-metal heterostructures, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月12日, 東京工業大学, 大岡山. (招待講演)

河口真志, 廣瀬葉菜, 丸井幸博, 林 将光, スピン軌道ヘテロ構造におけるスピン変換現象, 第220回研究会/第36回光機能磁性デバイス・材料専門研究会, 2018年11月22日, 中央大学, 東京. (招待講演)

M. Hayashi, Spin conversion effects in spin orbit materials, Kavli Institute for Theoretical Sciences: Collective Spin Dynamics in Nanostructures, 10/10/2018, Beijing, China. (招待講演)

M. Hayashi, Spin conversion effects in spin orbit heterostructures, SPIE Spintronics XI, 8/22/2018, San Diego, USA. (招待講演)

M. Hayashi, Charge and heat-spin conversions in spin orbit systems, The 5th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies (IcAUMS), 6/6/2018, Jeju, Korea. (招待講演)

M. Hayashi, Spin transport and magnetism in metallic superstructures, 15th RIEC International Workshop on Spintronics, 12/13/2017, Sendai, Japan. (招待講演)

M. Hayashi, Spin Hall magnetoresistance and spin orbit torques in metallic

heterostructures, SPIE Spintronics XI, 8/6/2017, San Diego, USA. (招待講演)

M. Hayashi, Spin Orbit Effects in Metallic Heterostructures, Gordon Research Conference -Spin Dynamics in Nanostructures-, 7/20/2017, Les Diablerets, Switzerland. (招待講演)

〔その他〕

ホームページ等

<http://qspin.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：栗野博之

ローマ字氏名：AWANO, Hiroyuki

研究協力者氏名：三谷誠司

ローマ字氏名：MITANI, Seiji

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。