

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600069

研究課題名(和文)磁性体/非磁性体ヘテロ構造におけるスピン新機能の開拓

研究課題名(英文)Exploration of new spin functionalities in magnetic/non-magnetic heterostructures

研究代表者

新田 淳作(Nitta, Junsaku)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00393778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用の磁性体磁化反転機構を解明するためラッシュバ効果が無視できるスピンホール効果のみ存在する対称な界面を有するPt/Co/Pt構造を作製した。Pt/Co/Pt構造では、スピンホール効果が生み出す電流-磁場の変換効率を見積もることに成功した。ラッシュバ効果が期待できる界面对称性の破れたAlO/Co/Ptヘテロ構造では、スピンホール効果とラッシュバ効果が共存していることを確認した。さらにCoとPtの膜厚を系統的に変化させたところ、Coが厚くなるとラッシュバ効果が優勢となりPtを厚くするとスピンホール効果が優勢になることを見いだした。

研究成果の概要(英文)：To clarify the mechanism of magnetization reversal, we made Pt/Co/Pt structures with inversion symmetry and AlO/Co/Pt structures with inversion asymmetry. In Pt/Co/Pt structures, we succeeded in evaluating conversion relation between current and magnetic field induced by spin Hall effect. We found that both Rashba and spin Hall effects coexist in AlO/Co/Pt structures. The Rashba effect is dominant with increasing Co thickness while the spin Hall effect is getting larger with increasing Pt thickness.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン軌道相互作用 ラッシュバ効果 スピンホール効果 電界制御

1. 研究開始当初の背景

磁性体の磁化を局所的かつ高速制御する手段として、スピンの流が運ぶ角運動量を用いたスピン・トランスファー・トルク (Spin Transfer Torque; STT) や電界を用いた磁化制御が注目を集めている。しかしながら、STT や電界制御による磁化制御は高電流密度、高電界が必要であり、半導体トランジスタで使用される電流密度、電界に比べて桁違いに大きい。一方、磁化反転を容易にする方法として近年、磁性体/絶縁体界面で生じるラッシュバ効果や磁性体/非磁性体金属界面で生じるスピンホール効果が着目されている。しかしながら、その起源は依然として不明のままである。ラッシュバ効果とスピンホール効果はどちらもスピン軌道相互作用を起源としているが、磁性体界面でスピン軌道相互作用がどのように生じるのかその原因は明らかにされていない。

2. 研究の目的

磁性体は、半導体とともに現在のエレクトロニクスを支える重要な材料である。しかしながら磁性体には不揮発性メモリー機能がなく、トランジスタなど高機能動作回路を構成することは不可能であった。本研究提案では、磁性体/絶縁体や磁性体/非磁性金属界面で生じるラッシュバ効果やスピンホール効果を生み出すスピン軌道相互作用の起源を解明し電界制御可能なスピン新機能磁性を開拓することを目的とする。

3. 研究の方法

ラッシュバ効果の無視できる構造反転対称な Pt/Co/Pt 構造と構造反転対称性の破れた AlO/Co/Pt 構造においてラッシュバ効果とスピンホール効果の起源を分離評価しスピン軌道相互作用の磁性体磁化反転機構を解明する。また、これらの電界制御性を確認するとともにスピン軌道相互作用に起因した磁性体のスピン新機能実現に向けた指針を構築する。このため、面直磁化を有す Pt/Co/Pt 構造、AlO/Co/Pt 構造の作製方法を最適化する。また、電流誘起スピン軌道有効磁場は既に確立された交流調和測定法を用いて評価する。本手法は資料に印加する電流密度が比較的小さく、熱の効果や電流によるエルステッド磁場の効果を無視できるため正確に有効磁場を求めることができる。

4. 研究成果

(1) ラッシュバ効果とスピンホール効果の起源分離

ラッシュバ効果とスピンホール効果の起源を分離評価しスピン軌道相互作用の磁性体磁化反転機構を解明するためラッシュバ効果が無視できるスピンホール効果のみ存在する対称な界面を有する Pt/Co/Pt 構造を作製し、Co が面直磁化を示すことを確認した。また、Co の界面が非対称な Pt/Co/AlO 薄膜の作製

方法に関する最適な垂直磁化を有する磁性薄膜を作製する条件を求めた (図1)。(Key Engineering Materials **616**, 247 (2014))

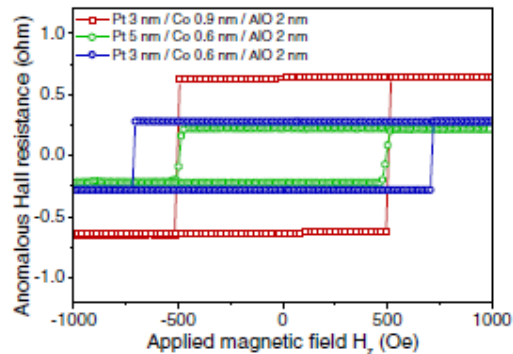


図1 作製した AlO/Co/Pt 構造の異常ホール効果。スパッタ条件を最適化することにより面直磁化を持つ Co 薄膜が作製できる。

(2) Pt/Co/Pt 構造におけるスピンホール効果の見積もり

次に Pt/Co/Pt 構造上下 Pt 層の膜厚を系統的に変化させスピンホール効果による有効磁場の評価を行った。電流誘起スピン軌道磁場は交流調和測定法を用いてスピン軌道有効磁場を評価した。その結果、スピンホール効果は面内に流す電流に比例し上下 Pt の膜厚が最も非対称な場合に大きくなることを確認し、スピンホール効果が生み出す磁場との変換効率を見積もることに成功した(図2)。

また、本 Pt/Co/Pt 構造においてはラッシュバ効果に起因した有効磁場は働いていないことを確認した。この結果は、界面の構造反転対称性が破れていないことから妥当な結果と結論できる。

(Jpn. J. of Appl. Phys. **53**, 04EM06 (2014))

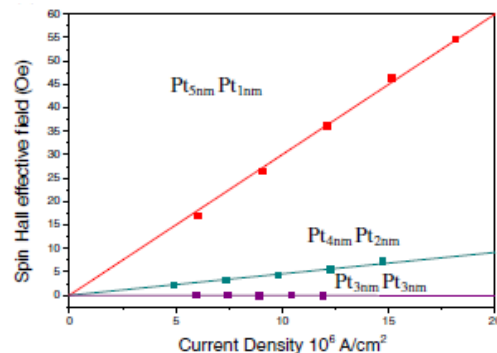


図2 Pt/Co/Pt 接合におけるスピンホール効果に起因した電流誘起有効磁場。上下 Pt の膜厚を非対称にするにつれ有効磁場が増加することが確認された。一方、上下対称な Pt 膜厚では電流誘起有効磁場は消失する。有効磁場の評価は交流調和測定法を用いた。

(3) AlO/Co/Pt ヘテロ構造における電流誘起有効磁場

またラッシュバ効果が期待できる界面对称性の破れた AlO/Co/Pt ヘテロ構造では、スピホール効果とラッシュバ効果が共存していることを確認した。さらに Co と Pt の膜厚を系統的に変化させると Co が厚くなるとラッシュバ効果が優勢となり Pt を厚くするとスピホール効果が優勢になることを見いだした。(Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DM05 (2015))

また、AlO/Co/Pt ヘテロ構造においてゲート電界により電流 - 有効磁場変換を変調できることを確認した。この結果は、絶縁体/磁性体/金属系においてもラッシュバ効果が重要な役割を果たしていることを示唆している。

(4) 磁性体薄膜の電界制御

電気二重層を用いた電界効果による磁化構造の変化を調べ、MgO/Co/Pt と AlO/Co/Pt 構造では電界効果により強磁性 - 常磁性転移を可逆的に生じさせることが可能であることを確認した(図3)。また、2つの接合において電界効果は同じで正の電圧を印加すると磁性が生じる方向に変化し負のゲート電圧は常磁性へと変化する。この結果は、従来報告されている結果と一致する。

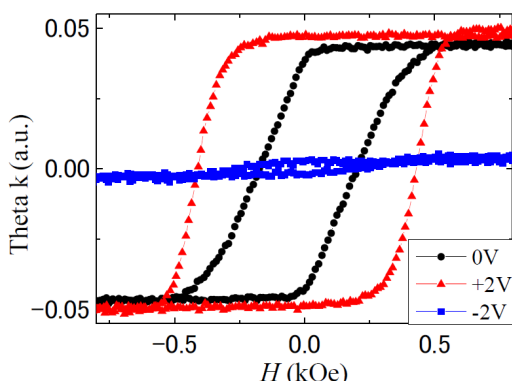


図3 MgO/Co/Pt 構造における強磁性 常磁性の電界制御。電気二重層を用いることにより磁性体 Co の磁化と保磁力が小さな電圧で変調できる。またこの強磁性 常磁性の電界制御は可逆的であることを確認した。

(5) まとめ

構造反転対称な Pt/Co/Pt 構造と構造反転対称性の破れた AlO/Co/Pt 構造を作製し有効磁場を評価することによりラッシュバ効果とスピホール効果を分離することに成功した。

これまで半導体ヘテロ構造で確立されてきたラッシュバ効果の電界制御が絶縁体/磁性体/金属系においても可能であることを見いだした。本研究で得られたラッシュバ効果による有効磁場の強さは、以前報告されたも

のに比べ小さくなっているが、これは熱の効果を除いたことにより正確な値が求められたことを示唆している。また、スピホール効果の強さも構造により制御可能であることが確認された。さらに界面の平坦性を向上されることによりさらに大きなスピ軌道相互作用に起因した有効磁場の生成が可能になってくるものと期待される。

以上の結果は、時間的・空間的にスピ軌道相互作用を変調することによりスピンの向きに依存した電磁気力を生み出すことが可能となり、絶縁体/磁性体/金属系で新たなスピ機能を創出できることを示唆している。

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 4件)

1. R. Ohsugi, J. Shiogai, Y. Kunihashi, M. Kohda, H. Sanada, T. Seki, M. Mizuguchi, H. Gotoh, K. Takanashi, and J. Nitta, "Comparison of electrical and optical detection of spin injection in $L1_0$ -FePt / MgO / GaAs hybrid structures, J. Phys. D: Appl. Phys. **48** (2015) 164003-1 -5

[10.1088/0022-3727/48/16/164003](https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/16/164003)

2. T. Yang, M. Kong, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta, "Layer thickness dependence of spin orbit torques and fields in Pt/Co/AlO trilayer structures", Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DM05-1 -6 (2015)

[10.7567/JJAP.54.04DM05](https://doi.org/10.7567/JJAP.54.04DM05)

3. T. Yang, Z.Q. Wang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta, "Perpendicular Magnetic Anisotropy in Pt/Co/AlO Trilayer Structures Depending on AlO Thickness and Fabrication Method", Key Engineering Materials **616**, 247-251 (2014)

[10.4028/www.scientific.net/KEM.616.247](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.616.247)

4. T. Yang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta, "Platinum layer thickness dependence of spin-Hall induced effective field in Pt/Co/Pt structures", Jpn. J. of Appl. Phys. **53**, 04EM06-1 -5 (2014)

[10.7567/JJAP.53.04EM06](https://doi.org/10.7567/JJAP.53.04EM06)

以上の論文は全て査読有り

[学会発表](計 8件)

1. Minsik Kong, Tim Yang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta, "Layer thickness dependence of spin-orbit torques and fields in Pt/Co/AlO trilayer", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015年3月11日 - 14日、東海大学 神奈川

2. R. Ohsugi, J. Shiogai, M. Kohda, Y. Kunihashi, H. Sanada, T. Seki, Y. Sakuraba, M. Mizuguchi, H. Gotoh, T. Sogawa, K. Takanashi, and J.

Nitta, "Perpendicularly polarized spin injection and transport in FePt/ MgO / n-GaAs structure with optical Hanle effect measurements", The 19th Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors) Dec, 16th (2014), University of Tokyo, Tokyo

3. T. Yang, M. Kong, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta, "Layer Thickness Dependence of Spin Orbit Torques and Fields in Pt/Co/AIO Trilayer Structures", Solid State Devices and Materials 2014, Sept. 8-11th (2014), International Congress Center, Ibaragi

4. R. Ohsugi, J. Shiogai, M. Kohda, Y. Kunihashi, H. Sanada, T. Seki, Y. Sakuraba, M. Mizuguchi, H. Gotoh, T. Sogawa, K. Takanashi, and J. Nitta, "Optical detection of lateral spin transport in an $L1_0$ -FePt / MgO / n-GaAs perpendicular spin injection device", PASPS VIII (8th International Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids), July 28th (2014), Washington D.C., USA

5. T. Yang, M. Kohda, and J. Nitta, "Spin orbit torques in perpendicularly magnetized Pt/Co structures", International Workshop on Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure, March 10th-11th (2014), Iwanumaya Miyagi

6. T. Yang, M. Kohda, and J. Nitta, "Measurement of effective magnetic field via spin Hall effect in a Pt/Co/Pt trilayer structure", International Conference on Solid State Devices and Materials, Sept. 24th-27th, (2013), Hilton Fukuoka Japan

7. R. Ohsugi, J. Shiogai, M. Kohda, Y. Kunihashi, H. Sanada, T. Seki, Y. Sakuraba, M. Mizuguchi, H. Gotoh, T. Sogawa, K. Takanashi, and J. Nitta, "Optical Kerr detection and electrical detection of spin injection in perpendicularly magnetized $L1_0$ -FePt / MgO / GaAs structures", SpinTech VII (7th International Conference on Spintronics and Quantum Information Technology) July 28th (2013), Chicago, USA

8. 大杉 廉人, 好田 誠, 国橋 要司, 眞田 治樹, 後藤 秀樹, 寒川 哲臣, 関 剛斎, 水口 将輝, 高梨 弘毅, 新田 淳作, "面直磁化 $L1_0$ -FePt/MgO構造からGaAsへの電氣的スピン注入とその空間分解カー測定", 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 9月16日 (2013), 同志社大学 京都

〔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〕

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~ko/taib/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新田 淳作 (NITTA, Junsaku)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00393778

(3) 連携研究者

好田 誠 (KOHDA, Makoto)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00420000