

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 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：25600011

研究課題名(和文) 垂直磁化強磁性体/半導体界面制御による新規磁化反転機構の創出

研究課題名(英文) Magnetization reversal by controlling a perpendicular magnetic layer / semiconductor interface

研究代表者

好田 誠 (Kohda, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00420000

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)：近年、極薄強磁性層/非磁性層に面内方向に電流を流すことで磁化反転できる新たな手法が発見された。スピン軌道相互作用の大きな材料を非磁性層に用いることで、電流方向と垂直にスピン流もしくはスピン軌道相互作用による有効磁場を発生させ強磁性体にスピントルクを与える手法である。本研究では極薄Co/Pt垂直磁化膜を用いてスピン軌道相互作用およびスピホール効果が磁化反転に与える影響について評価した。その結果、CoとPtの膜厚を系統的に変化させることでスピン軌道トルクの大きさを制御できることを明らかにし、スピホール効果によるスピン流と界面スピン軌道相互作用により実験結果を説明することができた。

研究成果の概要(英文)：Spin orbit interaction in Pt/Co/AlO is widely debated throughout reported literature with causes varying between the Rashba and spin Hall effect and measured strengths varying up to 2 orders of magnitude. To resolve the inconsistency, films of varying interlayer thicknesses as well as material compositions were fabricated, measured and corresponded to the associated spin orbit interaction origin based on theory. We confirmed the control of spin orbit torque by changing the thickness of Pt and Co layers. The measurement method of the present experiment addresses the errors associated with previous methods due to heating.

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 Co/Pt スピホール効果 磁化反転 垂直磁気異方性

1. 研究開始当初の背景

磁性体の磁化方向を情報記録として用いる磁気ランダムアクセスメモリ (Magnetic Random Access Memory: MRAM) が次世代不揮発メモリとして注目を集めており、その実現には磁化方向の高速・低消費電力制御が求められる。現在研究されている磁化反転手法は、電子スピンと磁化の間に働くスピントルクを用いた磁化反転であるが、 10^7A/cm^2 程度の大電流を必要とし、次世代不揮発メモリには、より低電流密度かつ高速な磁化反転手法が必要不可欠となる。

2009年に強磁性体/非磁性体界面に生じるスピン軌道相互作用が、磁化反転に応用できる可能性が理論的に示され (A. Manchon *et al.*, PRB (2009))、その後、垂直磁化 AlO/Co/Pt 構造を用いて、AlO/Co 界面のスピン軌道相互作用が生み出すスピントルクによる磁化反転が観測された (I. M. Miron *et al.*, Nature (2011))。しかし、異種材料界面にあらわれるスピン軌道相互作用は、本来 InGaAs など単結晶半導体ヘテロ接合で観測される物理現象であり、金属中にそのような効果が存在するのか、未だ分からない点が多い。さらに、スピン軌道相互作用の他に、Pt 薄膜におけるスピンホール効果がスピントルクを与えることも知られており、この2つの効果がどのように材料や構造に依存しているかが注目されていた。

2. 研究の目的

本研究では、強磁性/非磁性金属構造に着目し、界面におけるスピン軌道相互作用に起因したスピントルクそしてスピンホール効果に起因したスピントルクを有効磁場として定量的に評価する。材料は Co/Pt 構造に着目し各層の膜厚を変えることで、2種類のスピントルク効果がどのように変化するかを系統的に調べることで、その起源や高効率なスピン制御法に必要な指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

3種類の異なる構造を用いてスピン軌道相互作用が与えるトルクについて調べた。熱酸化 Si 基板上に Pt 3 nm / Co 0.6 nm / AlO 2 nm、Pt 5 nm / Co 0.6 nm / AlO 2 nm および Pt 3 nm / Co 0.9 nm / AlO 2 nm を作製し、電子ビーム描画により 5 μm サイズのホール素子にプロセスした(図 1)。Co と Pt 膜厚を系統的に変化させることで磁化にトルクを与える 2種類の有効磁場である Transverse field (H_T) と Longitudinal field (H_L) を制御した。外部磁場を印加した状態で交流電流を x 方向に印加しながら y 方向に生じる異常磁気抵抗効果を検出した。測定温度は全て室温である。

4. 研究成果

面直方向に磁場を印加した異常ホール効

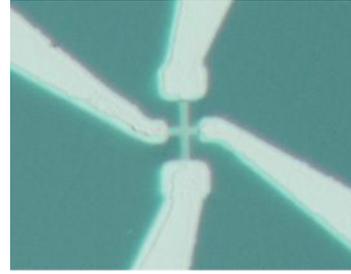


図 1. Co/Pt 構造のデバイス写真

果測定により 3種類全ての Pt/Co 薄膜において面直磁気異方性を有することを確認した。異常ホール抵抗値は Pt 3 nm / Co 0.9 nm において 0.68Ω 、Pt 3 nm / Co 0.6 nm で 0.28Ω 、Pt 5 nm / Co 0.6 nm では 0.22Ω となった。この異常ホール抵抗値の違いは Pt および Co を流れる電流の分流比で理解することが出来る。Pt 5 nm / Co 0.6 nm の場合、流れる電流の大部分は Pt 層に流れるため低い異常ホール抵抗値を示すが、Pt 3 nm / Co 0.6 nm では Pt 膜厚が減少するため Co 層を流れる電流比が増大し抵抗値が増大した。さらに、Pt 3 nm / Co 0.9 nm においては Co 膜厚増大に伴い抵抗値がさらに増大している。観測されたホール抵抗には異常ホール抵抗 R_{AHE} とプレーナホール抵抗 R_{PHE} の 2成分が含まれており、面内方向 x 方向に 3kOe の外部磁場を印加した場合、2つの寄与の比 $R_{\text{PHE}}/R_{\text{AHE}}$ は 0.23 (Pt 3 nm / Co 0.9 nm)、 0.32 (Pt 3 nm / Co 0.6 nm)、 0.16 (Pt 5 nm / Co 0.6 nm)であった。磁場を x 方向もしくは y 方向に印加し、交流電流の変調周波数 ω と 2ω の周波数成分を同時に検出することで Transverse field (H_T) と Longitudinal field (H_L) を分離して評価することができる。図 2(a)、2(b)に磁場を x 方向に印加した場合、図 2(c)、2(d)に磁場を y 方向に印加した場合の Pt 5 nm / Co 0.6 nm における V_{ω} と $V_{2\omega}$ を示す。どちらも 2ω の周波数成分は磁場に対して線形変化を示し、 ω の周波数成分は磁場の 2 乗に比例した変化を示した。異なる交流電圧値を印加し測定を行い印加電流密度に対する $V'_{2\omega y}/V''_{\omega y}$ および $V'_{2\omega x}/V''_{\omega x}$ を評価することで Pt 3 nm / Co 0.9 nm、Pt 3 nm / Co 0.6 nm および Pt 5 nm / Co 0.6 nm における H_T と H_L を見積もることができる。その結果、 H_T は 355.86 、 56.75 、 $34.04 \text{ Oe cm}^2/10^8 \text{ A}$ また H_L は 190.70 、 71.02 、 $106.39 \text{ Oe cm}^2/10^8 \text{ A}$ となった。Pt 3 nm / Co 0.6 nm および Pt 5 nm / Co 0.6 nm における H_L および H_T の変化は以下の説明で理解することが出来る。Pt 膜厚減少に伴う H_L の減少は、Pt 膜厚が薄い場合スピンホール効果により上下方向に流れるスピン流が一部キャンセルされるため、スピンホール効果に伴うトルクが Pt 3nm では減少する。一方 H_T の増大は、Co 層により多くの電流が流れるため Pt/Co

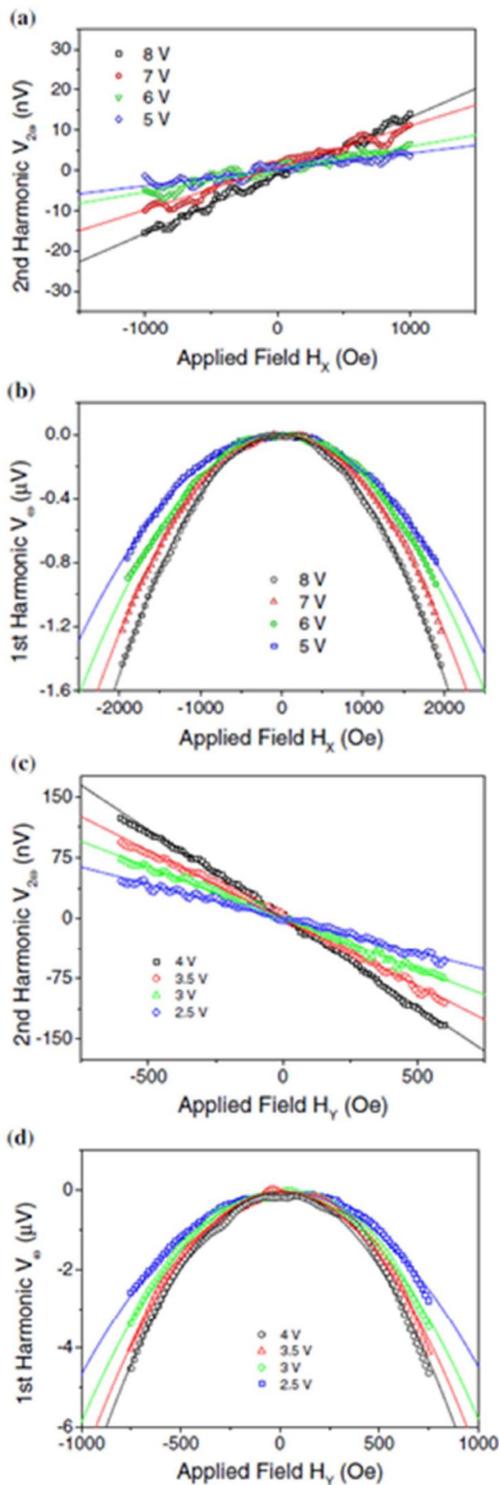


図 2(a), (b)磁場を x 方向に印加した場合、(c), (d)磁場を y 方向に印加した場合の Pt 5 nm / Co 0.6 nm における交流電流の変調周波数 ω と 2ω の周波数成分に起因する電圧 V_{ω} と $V_{2\omega}$

界面におけるスピン軌道相互作用がより効率的に作用したためだと考えられる。Pt 3 nm / Co 0.9 nm においては Co 層膜厚増大に伴い結晶性が改善され H_L および H_T とともに増大したと推測するが、詳細については今後さらなる検討が必要である。

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 5 件)

- 著者名: T. Yang, M. Kong, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta.
論文標題: Layer thickness dependence of spin orbit torques and fields in Pt/Co/AIO trilayer structures
雑誌名: *Japanese Journal of Applied Physics* **54**, 04DM05-1-04DM05-6 (2015).
DOI:10.7567/JJAP.54.04DM05
査読有
- 著者名: R. Ohsugi, J. Shioyai, Y. Kunihashi, M. Kohda, H. Sanada, T. Seki, M. Mizuguchi, H. Gotoh, K. Takanashi and J. Nitta.
論文標題: Comparison of electrical and optical detection of spin injection in L10-FePt / MgO / GaAs hybrid structures
雑誌名: *Journal of Physics D: Applied Physics* **48**, 164003-1-164003-6 (2015).
DOI:10.1088/0022-3727/48/16/164003
査読有
- 著者名: Y. Saiga, K. Mizunuma, Y. Kono, J.-C. Ryu, H. Ono, M. Kohda, and E. Okuno.
論文標題: Platinum thickness dependence and annealing effect of the spin-Seebeck voltage in platinum/yttrium ion garnet structures
雑誌名: *Applied Physics Express* **7**, 093001-1 - 093001-4 (2014).
DOI: 10.7567/APEX.7.093001
査読有
- 著者名: T. Yang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta.
論文標題: Platinum layer thickness dependence of spin-Hall induced effective field in Pt/Co/Pt structures
雑誌名: *Japanese Journal of Applied Physics* **53**, 04EM06-1-04EM06-5 (2014).
DOI: 10.7567/JJAP.53.04EM06
査読有
- 著者名: T. Yang, Z.Q. Wang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi, and J. Nitta.
論文標題: Perpendicular Magnetic Anisotropy in Pt/Co/AIO Trilayer Structures Depending on AIO Thickness and Fabrication Method
雑誌名: *Key Engineering Materials* **616**, 247-251 (2014).
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.616.247
査読有

〔学会発表〕(計3件)

1. 発表者名: J. C. Ryu, A. Sasaki, J. Shiogai, M. Kohda and J. Nitta.
発表標題: Thickness dependence of spin relaxation in MgO/Pt/GaAs layers
Solid State Devices and Physics, September 25-26 (2013). Hilton Fukuoka (福岡)
2. 発表者名: T. Yang, Z. Q. Wang, M. Kohda, T. Seki, K. Takanashi and J. Nitta.
発表標題: Perpendicular magnetic anisotropy in Pt/Co/AIO trilayer structures depending on AIO thickness and fabrication method
Solid State Devices and Physics, September 25-26 (2013). Hilton Fukuoka (福岡)
3. 発表者名: J. C. Ryu, A. Sasaki, J. Shiogai, M. Kohda and J. Nitta.
発表標題: Thickness dependence of spin relaxation in thin Pt on GaAs
The Electronic Materials Symposium (EMS) July 11- 12 (2013). ラフォーレ滋賀 (滋賀)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

なし

○取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotaib/kohda.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

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