

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18849

研究課題名(和文) スピン軌道相互作用に基づく超高速ナノ電磁石の動作原理の開拓

研究課題名(英文) Investigation of ultra-high-speed electromagnet based on spin-orbit interaction

研究代表者

小山 知弘 (Koyama, Tomohiro)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：60707537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スピン軌道トルク(SOT)を動作原理とする新しいタイプの電磁石の提案・動作実証を行う。具体的には、ランダムな多磁区構造と単一磁区構造という状態間のSOTによるサブナノ秒スイッチングの可能性を検証した。研究機関内に、SOTによる多磁区状態/単磁区状態の変化を実証、強磁性体/非磁性体界面への酸化層導入によるSOTの増強を確認、ナノ秒の時間スケールにおいてもSOTによる磁化の安定化が可能であることを確認、という成果を得ることができた。これらにより、サブナノ秒SOT電磁石動作の実現にとって非常に重要な知見を得ることができたと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁石の使い方などというのは既に確立されており、性能を高めるための技術的な改良の余地しかないように思われるだろう。しかし本研究により、スピン軌道相互作用に基づく全く新しい電磁石の実現可能性が見えてきた。これにより、既存の技術では到底達成できないであろう「ピコ秒オーダーの超高速動作」、「十分な磁界出力特性を備えたナノサイズの超小型コイルレス電磁石」の可能性が期待できる。これは、「動作原理を大きく転換させることで、ありふれたデバイスにおける革新的な利用の仕方が生み出される可能性がある」ことを示している点で学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate the new operation mechanism of electromagnet based on the spin-orbit torque (SOT). The possibility that the sub-ns switching between multi-domain and single-domain states by SOT has been studied. The following results have been obtained; the change from multi-domain to single domain state by SOT has been demonstrated, enhancement of SOT by inserting oxidization layer into ferromagnet/heavy metal interface has been confirmed, stability of magnetic domain state by SOT in the nano-second time scale has been confirmed. These results provide us important information for realizing the electromagnet with sub-ns operation.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピン軌道相互作用 磁性薄膜 電磁石

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

「電磁石」はコイルに電流を流すことで必要な時だけ磁界を取り出すことができ、磁界方向の切り替えが必要な光アイソレータやモーターなどのデバイスにとっては必須の要素である。電磁石の使い方などというのは既に確立されており、性能を高めるための技術的な改良の余地がないように思われるだろう。申請者は、スピン軌道相互作用を用いることで磁石の多磁区・単磁区の状態間スイッチングに成功しており、これを用いて新しい電磁石の使い方を確立できるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

スピン軌道トルク(SOT)を動作原理とする新しいタイプの電磁石の提案・動作実証を行う。

### 3. 研究の方法

シリコン基板の上にスパッタ製膜した Co/Pt 垂直磁化膜を、ホールバー形状に微細加工した試料を用いる。磁化状態は異常ホール抵抗の測定を通して行った。超高速での磁気安定性を確認するために、高強度パルスレーザー装置を用いた。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は以下の通りである。

Co/Pt系を用いて室温よりやや高いキュリー温度(およそ370K)を持つ試料を作製し、350K付近において多磁区構造が安定となるような状況を作りだした。そこに直流電流を印加しながら異常ホール抵抗を測定したところ、電流強度に応じてホール抵抗が変化し、ある電流値以上では飽和するような様子が見られた(図1)。飽和状態から電流を印加したまま温度を300Kまで下げたところ、単磁区状態になっていることがわかった。これにより、SOTによる多磁区状態・単磁区状態の変化が実証された。

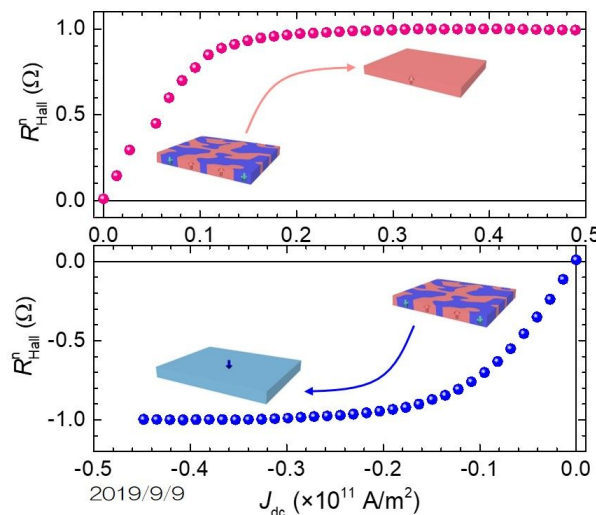


図 1: (上)異常ホール抵抗値の電流密度依存性。電流、すなわち SOT が無い場合は異常ホール抵抗がほぼ 0(多磁区状態)だが、電流とともに増加し単磁区状態の値で飽和する。(下)電流を逆方向に流した場合。

Co酸化層をCoとPtの間に挿入することで、SOTの大きさが数倍に増強されることがわかった。スピン流の注入効率ほとんど変化していないことから、この結果はラシュバ効果がSOTに寄与していることを示している可能性がある。より大きなSOTを得るために界面に異種元素の挿入が有効であることを示しており、材料設計における重要な指針となる結果である。

ナノ秒でのSOTによる磁化安定性の実証を行った。具体的には、ナノ秒レーザー光を用いて瞬間的に試料を発熱させるセットアップを構築し実験を行った。Co/Pt系材料においてSOTがない場合、5ナノ秒のレーザー照射に伴う多磁区構造の発生が確認された。しかしSOTが存在する状況下では、この多磁区状態の発生が見られず単磁区状態が維持されることがわかった。このことは、ナノ秒の時間スケールにおいてもSOTによる磁化の安定化が可能であることを示唆していると考えられ、サブナノ秒でのSOT電磁石動作の実現にとって非常に重要な知見である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koyama T., Ieda J., Chiba D.	4. 巻 116
2. 論文標題 Electric field effect on the magnetic domain wall creep velocity in Pt/Co/Pd structures with different Co thicknesses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092405 ~ 092405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5143970	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirai T., Koyama T., Chiba D.	4. 巻 101
2. 論文標題 Electric field modulation of exchange bias at the Co/CoOx interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.014447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ochi K., Hirai T., Ota S., Koyama T., Sekitani T., Chiba D.	4. 巻 58
2. 論文標題 Solid-state capacitor for voltage control of magnetism formed on a flexible substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 118003 ~ 118003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4de9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takiguchi Kosuke, Anh Le Duc, Chiba Takahiro, Koyama Tomohiro, Chiba Daichi, Tanaka Masaaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic/non-magnetic bilayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1134 ~ 1139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-019-0621-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Kab-Jin, Li Tian, Kim Sanghoon, Moriyama Takahiro, Koyama Tomohiro, Chiba Daichi, Lee Kyung-Jin, Lee Hyun-Woo, Ono Teruo	4. 巻 12
2. 論文標題 Possible contribution of high-energy magnons to unidirectional magnetoresistance in metallic bilayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063001 ~ 063001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab1b54	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Tanaka, T. Hirai, T. Koyama, and D. Chiba	4. 巻 11
2. 論文標題 Electric-field-induced magnetic domain writing in a Co wire	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 053005-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.053005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Sanghoon, Ueda Kohei, Go Gyungchoon, Jang Peong-Hwa, Lee Kyung-Jin, Belabbes Abderrezak, Manchon Aurelien, Suzuki Motohiro, Kotani Yoshinori, Nakamura Tetsuya, Nakamura Kohji, Koyama Tomohiro, Chiba Daichi, Yamada Kihiro. T., Kim Duck-Ho, Moriyama Takahiro, Kim Kab-Jin, Ono Teruo	4. 巻 9
2. 論文標題 Correlation of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction with Heisenberg exchange and orbital asphericity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1648-1~1648-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-04017-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ando Fuyuki, Yamada Kihiro T., Koyama Tomohiro, Ishibashi Mio, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Chiba Daichi, Ono Teruo	4. 巻 11
2. 論文標題 Microscopic origin of electric-field-induced modulation of Curie temperature in cobalt	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 073002 ~ 073002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.073002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa K., Hibino Y., Suzuki M., Koyama T., Chiba D.	4. 巻 98
2. 論文標題 Enhancement of spin-orbit torque by inserting Co <sub>x</sub> layer into Co/Pt interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020405-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.020405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Obinata Aya, Hirai Takamasa, Kotani Yoshinori, Toyoki Kentaro, Nakamura Tetsuya, Koyama Tomohiro, Chiba Daichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Electric field effect on magnetism in a MgO/Pd/Co system with a solid-state capacitor structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115122 ~ 115122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5039680	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ando Fuyuki, Ishibashi Mio, Koyama Tomohiro, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Chiba Daichi, Ono Teruo	4. 巻 113
2. 論文標題 Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 252402 ~ 252402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koyama Tomohiro, Nakatani Yoshinobu, Ieda Jun'ichi, Chiba Daichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Electric field control of magnetic domain wall motion via modulation of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 0265-1 ~ 0265-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aav0265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohkochi Takuo, Kim Kab-Jin, Kim Sanghoon, Yoshimura Yoko, Tanigawa Hironobu, Ohshima Norikazu, Koyama Tomohiro, Kotsugi Masato, Chiba Daichi, Ono Teruo, Kinoshita Toyohiko	4. 巻 58
2. 論文標題 Real-space and pulse-by-pulse analysis of domain wall creep induced by spin-Hall torque	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 023001 ~ 023001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aaf628	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 小山知弘
2. 発表標題 電界効果による磁壁ダイナミクスの制御
3. 学会等名 第5回 IEEE関西四国磁性研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山知弘
2. 発表標題 強磁性超薄膜における電界効果を利用した磁壁ダイナミクス制御
3. 学会等名 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会 (MRIS) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hibino, T. Koyama, D. Chiba
2. 発表標題 Detection of spin-orbit torques generated from interfacial spin-orbit scattering at Pt/Co interface
3. 学会等名 International Conference on Magnetism(ICM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hasegawa, Y. Hibino, T. Koyama, and D. Chiba
2. 発表標題 Enhancement of spin-orbit torque by oxidation layer insertion into Co/Pt interface
3. 学会等名 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS10) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Koyama, D. Chiba
2. 発表標題 Electric field modulation of magnetic domain wall velocity in Pt/Co/Pd structure
3. 学会等名 9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小山知弘
2. 発表標題 磁壁ダイナミクスの電界制御
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト発表会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

磁石の中を高速に伝播する " 磁気の壁 " の運動を電圧で制御することに成功  
[https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws\\_201812251037471597902553.html](https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_201812251037471597902553.html)



## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----