

令和元年6月20日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05419

研究課題名(和文)電界による磁壁駆動に関する研究

研究課題名(英文)Magnetic domain wall motion induced by electric field

研究代表者

小山 知弘 (Koyama, Tomohiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：60707537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：電界による磁壁駆動を目的として、電界効果を利用した磁壁ダイナミクス制御に関する研究を行った。得られた主な成果を以下にまとめる。1. ジャロシンスキー・守谷相互作用の電界変調を通じた高速磁壁移動の制御に成功した[Science Advances (2018)]。2. 磁化反転過程(磁壁移動型かニュークリエーション型か)に依存して保磁力の電界変調の符号が反転することを見出した。[Phys. Rev. B (2017)] 3. 電界誘起相転移と強磁性ゲート電極を組み合わせ外部磁場を印加することなく強磁性ワイヤ中への磁区書き込みを実証した。[Appl. Phys. express (2018)]。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度情報化社会を迎えた現在、電界効果を利用した磁壁移動制御は、磁気メモリのさらなる高速化・消費電力化を可能にする将来の基盤技術として期待されている。本研究成果は、メモリにおける電力消費のかなりの割合を占める情報書き込み動作の省エネ化に貢献し、を実用に要求されるレベルの高速磁壁移動をも電界で制御可能であることを示した点で社会的意義は大きい。また、高速磁壁移動の電界制御は世界初であるとともに、長らく未解決であった保磁力変化の符号反転に一つの答えを導き出したことは学術的に重要である。

研究成果の概要(英文)：Electric field control of magnetic domain wall (DW) has been investigated in this project. The main achievements of this study are listed as follows.

1. Electric control of fast DW motion via the modulation of Dzyaloshinskii-Moriya interaction has been demonstrated [Science Advances (2018)]. 2. It has been found that the sign of coercivity change by electric field depends on the magnetization process (DW propagation dominant or nucleation dominant) [Phys. Rev. B (2017)]. 3. Using electric field induced phase transition and ferromagnetic gate electrode, the magnetic domain writing without external magnetic field has been realized in ferromagnetic wire [Appl. Phys. express (2018)].

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁壁ダイナミクス 磁性の電界制御 強磁性薄膜

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁壁駆動を利用した磁気メモリは次世代スピンドバイスの有力候補の一つであり、情報量の爆発的増加に伴うストレージデバイスの容量限界・消費電力の増大という現代の情報化社会が直面する問題を解決できると期待されている。これまでは磁場や電流による磁壁移動が研究されてきたが、大きな電流を印加しなければならないという点が問題であった。一方で電界効果は、充放電時を除いて電流が流れないため省エネルギー磁気制御手法として期待されている。

2. 研究の目的

電界効果を利用した磁区導入・磁壁ダイナミクス制御を実証する。

3. 研究の方法

強磁性超薄膜をキャパシタ構造に微細加工した試料を用いる。電界印加下で異常ホール効果および直接磁区観察を行い磁壁ダイナミクスを調べる。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- ①. 100 m/s を超える高速磁壁移動の電界制御に成功した [Science Advances (2018)]。詳細な解析の結果、速度変化の原因がジャロシンスキー・守谷相互作用の電界変調によるものであることがわかった。高速磁壁移動の電界制御は世界初である。
- ②. 磁化反転過程(磁壁移動型かニュークリエーション型か)に依存して、電界による異方性変調符号が同じであるにもかかわらず保磁力変調の符号は反転することを見出した [Phys. Rev. B (2017)]。長らく未解決であった保磁力変化の符号反転に一つの答えを導き出したことは学術的に重要である。
- ③. 電界誘起相転移と強磁性ゲート電極を組み合わせて、外部磁場を印加することなく強磁性ワイヤ中への磁区書き込みを実証した。[Appl. Phys. express (2018)]。メモリにおける電力消費のかなりの割合を占める情報書き込み動作の省エネ化に貢献する成果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 50 件)

(代表的なものを抜粋)

1. A. Obinata, Y. Hibino, D. Hayakawa, T. Koyama, K. Miwa, S. Ono, and D. Chiba, Electric-field control of magnetic moment in Pd, Scientific Reports 5, 14303 (2015).
2. Y. Hibino, T. Koyama, A. Obinata, K. Miwa, S. Ono, and D. Chiba, Electric-Field Modulation of Magnetic Anisotropy in Perpendicularly Magnetized Pt/Co Structure with a Pd Top Layer, Applied Physics Express 8, 113002 (2015)
3. Y. Wakabayashi, H. Fujii, T. Kimura, O. Sakata, H. Tajiri, T. Koyama, and D. Chiba, Confirmation of no Structural and Chemical Changes in Curie Temperature Variable Co Ultrathin Films by Electric Field, Zeitschrift für Physikalische Chemie 230, 569-575 (2015).
4. H. Kakizakai, F. Ando, T. Koyama, K. Yamada, M. Kawaguchi, S. Kim, K.-J. Kim, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Switching local magnetization by electric-field-induced domain wall motion, Applied Physics Express 9, 063004 (2016).
5. T. Hirai, T. Koyama, A. Obinata, Y. Hibino, K. Miwa, S. Ono, M. Kohda, and D. Chiba, Control of magnetic anisotropy in Pt/Co system using ionic liquid gating, Applied Physics Express 9, 063007 (2016).
6. F. Ando, H. Kakizakai, T. Koyama, K. Yamada, M. Kawaguchi, S. Kim, K.-J. Kim, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Modulation of the magnetic domain size induced by an electric field, Applied Physics Letters 109, 022401 (2016).
7. Y. Hibino, T. Koyama, A. Obinata, T. Hirai, S. Ota, K. Miwa, S. Ono, F. Matsukura, H. Ohno, and D. Chiba, Peculiar temperature dependence of electric-field effect on magnetic anisotropy in Co/Pd/MgO system, Applied Physics Letters 109, 082403 (2016).

8. T. Kanaki, T. Koyama, D. Chiba, S. Ohya, and M. Tanaka, Spin-dependent transport and current modulation in a current-in-plane spin-valve field-effect transistor, *Applied Physics Letters* 109, 152403 (2016).
9. D. Hayakawa, A. Obinata, K. Miwa, S. Ono, T. Hirai, T. Koyama, and D. Chiba, Dielectric and magnetic characterizations of capacitor structures with an ionic liquid/MgO barrier and a ferromagnetic Pt electrode, *AIP Advances* 6, 115305 (2016).
10. K. T. Yamada, T. Koyama, H. Kakizakai, K. Miwa, F. Ando, M. Ishibashi, K.-J. Kim, T. Moriyama, S. Ono, D. Chiba, and T. Ono, Electrical control of superparamagnetism, *Applied Physics Express* 10, 013004 (2016).
11. T. Koyama, Y. Guan, Y. Hibino, M. Suzuki, and D. Chiba, Magnetization switching by spin-orbit torque in Pt with proximity-induced magnetic moment, *Journal of Applied Physics* 121, 123903 (2017).
12. T. Koyama, Y. Guan, and D. Chiba, Investigation of spin-orbit torque using current-induced magnetization curve, *Scientific Reports* 7, 790 (2017).
13. J. Okabayashi, T. Koyama, M. Suzuki, M. Tsujikawa, M. Shirai, and D. Chiba, Induced perpendicular magnetization in a Cu layer inserted between Co and Pt layers revealed by x-ray magnetic circular dichroism, *Scientific Reports* 7, 46132 (2017).
14. H. Kakizakai, K. Yamada, F. Ando, M. Kawaguchi, T. Koyama, S. Kim, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Influence of sloped electric field on magnetic-field-induced domain wall creep in a perpendicularly magnetized Co wire, *Japanese Journal of Applied Physics* 56, 050305 (2017).
15. Y. Guan, T. Koyama, and D. Chiba, Current-induced magnetic domain wall motion in Pt/Co/Pd and Pd/Co/Pt structures with opposite sign of Dzyaloshinskii-Moriya interaction, *AIP Advances* 7, 085123 (2017).
16. T. Koyama, and D. Chiba, Influence of the magnetization reversal mechanism on the electric field modulation of coercivity in Pt/Co structures, *Physical Review B* 96, 224409 (2017).
17. Y. Hayashi, Y. Hibino, F. Matsukura, K. Miwa, S. Ono, T. Hirai, T. Koyama, H. Ohno, and D. Chiba, Electric-field effect on magnetic anisotropy in Pt/Co/Pd/MgO structures deposited on GaAs and Si substrates, *Applied Physics Express* 11, 013003 (2017).
18. T. Hirai, T. Koyama, and D. Chiba, Control of magnetism by electrical charge doping or redox reactions in a surface-oxidized Co thin film with a solid-state capacitor structure, *Applied Physics Letters* 112, 122408 (2018).
19. K. T. Yamada, M. Suzuki, A.-M. Pradipto, T. Koyama, S. Kim, K.-J. Kim, S. Ono, T. Taniguchi, H. Mizuno, F. Ando, K. Oda, H. Kakizakai, T. Moriyama, K. Nakamura, D. Chiba, and T. Ono, Microscopic Investigation into the Electric Field Effect on Proximity-Induced Magnetism in Pt, *Physical Review Letters* 120, 157203 (2018).
20. Y. Tanaka, T. Hirai, T. Koyama, and D. Chiba, Electric-field-induced magnetic domain writing in a Co wire, *Applied Physics Express* 11, 053005 (2018).
21. T. Kanaki, H. Yamasaki, T. Koyama, D. Chiba, S. Ohya, and M. Tanaka, Large current modulation and tunneling magnetoresistance change by a side-gate electric field in a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field effect transistor, *Scientific Reports* 8, 7195 (2018).
22. M. Ishibashi, K. T. Yamada, Y. Shiota, F. Ando, T. Koyama, H. Kakizakai, H. Mizuno, K. Miwa, S. Ono, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Electric field effect on exchange interaction in ultrathin Co films with ionic liquids, *Applied Physics Express* 11, 061501 (2018).
23. F. Ando, K. T. Yamada, T. Koyama, M. Ishibashi, Y. Shiota, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Microscopic origin of electric-field-induced modulation of Curie temperature in cobalt, *Applied Physics Express* 11, 073002 (2018).

24. A. Obinata, T. Hirai, Y. Kotani, K. Toyoki, T. Nakamura, T. Koyama, and D. Chiba, Electric field effect on magnetism in a MgO/Pd/Co system with a solid-state capacitor structure, AIP Advances 8, 115122 (2018).
25. F. Ando, M. Ishibashi, T. Koyama, Y. Shiota, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film, Applied Physics Letters 113, 252402 (2018).
26. T. Koyama, Y. Nakatani, J. Ieda, and D. Chiba, Electric field control of magnetic domain wall motion via modulation of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Science Advances 4, 0265 (2018).

〔学会発表〕（計 61 件）

（代表的なものを抜粋）

1. “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”、電子情報通信学会 MRIS 研究会、東北大学電気通信研究所、(2019).
2. "Electric field modulation of magnetic domain wall velocity in Pt/Co/Pd structure", 9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2018, Rheingoldhalle Mainz, Mainz (Germany), (2018).
3. "Electric field effect on magnetic domain wall motion in Pt/Co/Pd structures", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京都新宿区, (2018).
4. "Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film.", International Conference on Magnetism(ICM2018), San Francisco Marriott Marquis Hotel, San Francisco (U.S.A), (2018).
5. “Manipulation of magnetic domain and domain wall using electrical current”, EMN Meeting CCGW&CCSD, Jedu, Korea (2017).
6. "Voltage control of magnetism in ion-gated Co/Pt with surface oxidation", SpinTECH9, 福岡国際会議場, 福岡県福岡市, (2017).
7. "Electrically controlled magnetism in ferromagnetic Pt", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市, (2017).
8. "Control of magnetic domain structure using spin orbit torque", Junjiro Kanamori Memorial International Symposium, 東京大学本郷キャンパス小柴ホール, 東京都文京区, (2017).
9. "Electric field effect on exchange interaction in ultrathin Pt/Co film", 62st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, The David L. Lawrence Convention Center, Pittsburgh (U.S.A), (2017).
10. “Magnetization switching and domain wall motion induced by current-induced torque in perpendicularly magnetized materials”, EMN Spintronics Meeting, Las Vegas, USA (2016).

11. "Deformation of magnetic domain structure in ultrathin Co/Pt film induced by electric field", International Symposium on Metallic Multilayers 2016, MIC-aulan, Polacksbacken, Sweden (Uppsala), (2016).
12. "Determination of spin-orbit torque effective field from magnetic domain wall creep velocity", 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都目黒区 (2016).
13. "Bistable magnetization switching induced by the spin-orbit torque in Pt/Co/Pd structure against the thermal disturbance", 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ,新潟県新潟市, (2016).
14. "Electric field control of magnetic moment in palladium", Magnetics and Optics Research International Symposium 2015, Penang, Malaysia (2015).
15. "Dependence of Curie temperature on the thickness of Pt layer in Co/Pt system", 20th International Conference on Magnetism(ICM), Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain (2015).

〔図書〕 (計 1 件)

- 1 .磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術 第8章第5節 電流印加による強磁性/重金属接合膜の磁区構造制御、小山知弘 ((株)技術情報協会, 東京都, 2018)

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/tkparone>

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/se/>

6. 研究組織

※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。