

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02182

研究課題名（和文）空間対称性の破れの制御によるスピン軌道トルクの増強と3次元メモリへの展開

研究課題名（英文）Enhancement of spin orbit torque by introducing the broken inversion symmetry and development of 3-dimensional magnetic memory

研究代表者

加藤 剛志 (Kato, Takeshi)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：50303665

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では人工的に空間反転対称性を破ったGd/FeCo多層膜、Tb/Gd/FeCo多層膜の構造非対称性とSOT磁化反転臨界電流密度の相関を調べた。膜厚方向に層厚勾配を設けたGd/FeCo多層膜において、サンプルばらつきは見られるものの、層厚勾配を大きくすることでSOT磁化反転の臨界電流密度が低減する傾向が得られた。Tb/Gd/FeCo多層膜において、Tb層厚を増加により実効垂直磁気異方性が増大するにもかかわらず、SOT磁化反転の臨界電流密度が低減するという結果が得られた。Tb層厚増加により膜厚方向の構造非対称性が増加したことが原因である可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン軌道トルク（Spin orbit torque: SOT）は、Society 5.0を支える大容量磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）の新規磁化反転手法として期待されているが、磁化反転の臨界電流密度の低減が求められている。本研究ではメモリの機能を果たす磁性膜に膜厚方向の空間反転対称性の破れを人工的に導入し、この空間対称性の破れがスピン軌道トルク磁化反転の臨界電流密度を低減する可能性があることを示した。磁性膜の空間反転対称性の破れとスピン軌道トルクとの相関は未解明な部分も多く、今後も継続的に研究を進め、MRAMの飛躍的高密度化、低消費電力化を可能とする技術を探求する必要がある。

研究成果の概要（英文）：Spin Orbit Torque (SOT) switching is considered as a promising way of the next generation writing scheme of the magnetic random access memories. This study focused on the relationship between SOT switching current density and structural inversion symmetry of the magnetic materials, and Gd/FeCo multilayers with graded layered thickness and Tb/Gd/FeCo multilayers were investigated. The SOT switching current density of Gd/FeCo multilayers decreased with increasing the gradient of the layer thickness of the multilayer. Moreover, in Tb/Gd/FeCo multilayers, the SOT switching current density decreased with increasing Tb layer thickness, even though the effective perpendicular anisotropy increased. These results suggest the increase of the broken inversion symmetry along film normal direction decreases the SOT switching current density.

研究分野：磁性薄膜工学

キーワード：電子・電気材料 磁性材料 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道トルク (Spin orbit torque: SOT) 磁化反転は、磁性体に隣接する非磁性膜に電流を流すことで、それに直交する方向に発生するスピン角運動量の流れ (純スピン流) により磁化反転を行うというものである。SOT 磁化反転は既存のスピン移行トルク (Spin transfer torque: STT) 磁化反転に比べ 1/10 程度の消費電力で 10 倍高速に磁化反転できると考えられ、今後の Society 5.0 を支える大容量磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) などへの応用研究が進められている。SOT 磁化反転では瞬間的に非磁性体膜に STT 磁化反転と同程度の電流を流す必要があり、その低減が応用上の最重要課題となっている。これまで、重金属[1]やトポロジカル絶縁体[2]の利用、非磁性界面の酸化[3]などによる SOT 高効率化の研究が進められているが、スピン流を受けとる側の磁性層材料による SOT 高効率化の研究はほとんど進んでいない。

本研究では、磁性材料として重希土類 (HRE) -遷移金属 (TM) 合金系材料を用いる。HRE-TM 合金は HRE と TM の磁気モーメントが反平行に結合したフェリ磁性体であり、RE と TM のジャイロ磁気定数 (角運動量 A と磁気モーメント M の比) が異なることから、有限の磁化で角運動量補償が可能という非常にユニークな特徴を有する。近年、HRE-TM 合金において、角運動量補償による磁壁の移動速度の高速化[4]やバルク的な Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) の発現[5]など、SOT 磁化反転の高効率化に興味深い実験結果が報告されている。DMI は強磁性体中の対称性の破れに起因し、スピンの捻じれ状態を生み出す交換相互作用であり、バルク的な DMI は反転対称性の破れた B20 構造をもつ特殊な磁性材料に限られると考えられており、HRE-TM 系でのバルク DMI と SOT 磁化反転などとの相関は応用上も学術的にも大変興味深く、SOT 磁化反転の臨界電流密度低減の新たな手法となることが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は人工的に空間反転対称性を破った HRE-TM 合金、積層膜を利用し、角運動量、バルク DMI などと SOT 磁化反転との相関を明らかにし、SOT 磁化反転の高効率化の技術的指針を得ることにある。また、ここで得られた知見をもとに、超大容量で高速な 3 次元磁気メモリへの展開の可能性を探る。本研究で検討する HRE-TM 系合金はアモルファス構造であり、均質性の高い構造であるが、比較的広い組成範囲で工業応用上重要な垂直磁気異方性を得ることができる。すなわち応用上重要な特性を犠牲にせず、組成勾配などで材料内部の空間反転対称性を破ることができるユニークな材料と考えられる。空間反転対称性の破れに加え、HRE-TM 系材料は HRE と TM のモーメントが反平行に結合したフェリ磁性体であることから、工業応用上重要な磁化、保磁力などを調整できるだけでなく、角運動量という一般のフェロ磁性体では調整できないパラメータを調整できる。これは SOT 磁化反転など角運動量の授受を伴う特性に重要な役割を演じると考えられる。

3. 研究の方法

超高真空マグネトロンスパッタリング装置を用いて、Gd/FeCo 多層膜 (膜構成: 熱酸化膜付き Si 基板 / Ta(20) / [Gd($t_{Gd}+x \cdot n$) / Fe₉₀Co₁₀(1- $t_{Gd}-x \cdot n$)]₅ / SiN(5)) および Tb/Gd/FeCo 多層膜 (膜構成: 熱酸化膜付き Si 基板 / Ta(20) / [Tb(t_{Tb}) / Gd(0.5- t_{Tb}) / Fe₉₀Co₁₀(0.5)]₅ / SiN(5)) を積層した。膜構成の数字の単位は nm であり、Gd/FeCo 多層膜では人工的な層厚勾配 x (nm/Layer) を加えた。ここで、 n は層番号であり、 $n = -2, -1, 0, 1, 2$ である。Tb/Gd/FeCo 多層膜では Tb 層厚により膜厚方向の構造非対称性を調整した。作製した多層膜はマスクレス露光装置、Ar⁺イオンエッチング装置を用いて、3 μm ~ 20 μm 幅の Hall 効果測定用十字パターンに微細加工した。図 1 に微細加工後の素子の光学顕微鏡写真を示す。素子の異常 Hall 効果の測定は、膜面内方向に電流 30 ~ 100 μA を流し、電流に直交する電極から異常 Hall 電圧を検出した。SOT 磁化反転測定は、膜面内方向に外部磁界を印加し、パルス幅 10 μs ~ 1 ms のパルス電流を印加した後の異常 Hall 電圧を測定することで調べた。SOT の 2 成分であるダンピングライクトルク、フィールドライクトルクは膜面内方向に交流電流を流した際に発生する高調波成分の面内磁界依存性を測定することで評価した。なお、試料微細加工前の多層膜の磁気特性は、交番磁界勾配型磁力計、磁気光学 Kerr スペクトル測定装置により評価した。

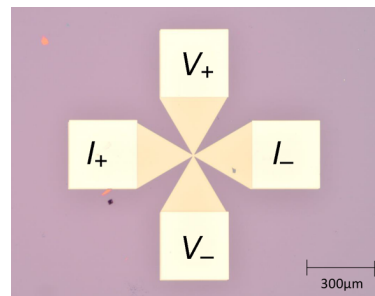


図 1 3 μm ~ 20 μm 幅の Hall 効果測定用十字パターンの光学顕微鏡像。

4. 研究成果

まず、Gd/FeCo 多層膜について、膜厚方向に層厚勾配のない ($x = 0$ nm/Layer) 多層膜について、SOT 有効磁界の Gd 層厚依存性と過去に我々のグループで報告した GdFeCo 合金の SOT 有効磁界の Gd 組成依存性[6]を比較する (図 2)。GdFeCo 合金の Gd 組成は多層膜の層厚比に変換

することで図中に示している。GdFeCo 合金、Gd/FeCo 多層膜の交流電流密度で規格化したダンピングライク有効磁界 (H_{DL}/J_c) は Gd 層厚 0.5 nm 付近で極大をとっている。これは補償組成に近づくことで、有効磁界が大きくなっていることが分かった。また、交流電流密度で規格化したフィールドライク有効磁界 (H_{FL}/J_c) は補償組成をまたいで符号が反転することが分かった。GdFeCo 合金と Gd/FeCo 多層膜で磁化補償する Gd 層厚が異なるが、これは多層化したことが原因の可能性もあるが、補償組成は成膜条件に敏感であるため、これが有意な差かどうかはより詳細な検討が必要である。今回の結果からは、膜厚方向に層厚勾配のない ($x=0$ nm/Layer) Gd/FeCo 多層膜の SOT は GdFeCo 合金とほぼ同様であったと結論づけられた。

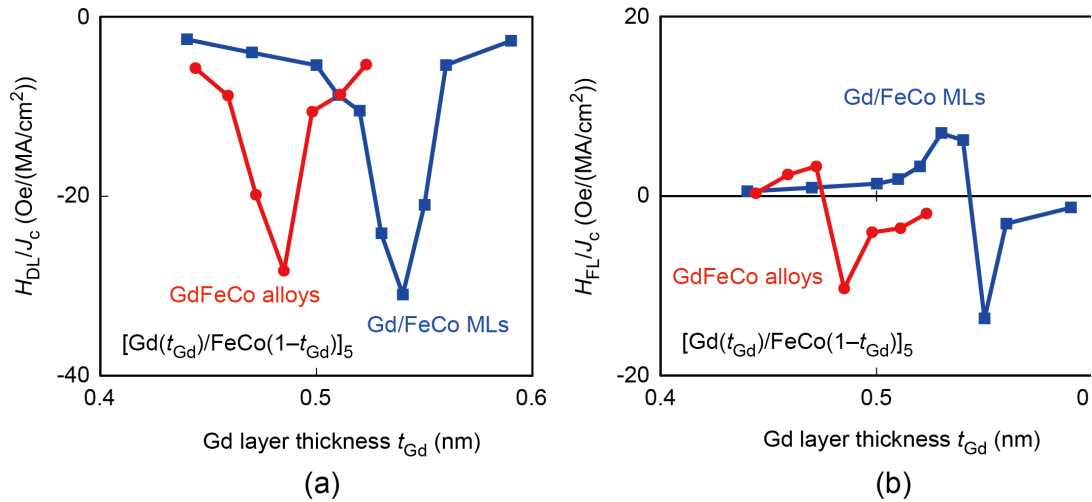


図 2 Ta(20)上に積層した $[Gd(t_{Gd}) / FeCo(0.5-t_{Gd})]_5$ 多層膜の(a)ダンピングライク SOT 有効磁場 (H_{DL}/J_c) および(b)フィールドライク有効磁界 (H_{FL}/J_c) の Gd 層厚依存性. 比較のため、Ta(20)上に積層した GdFeCo (5)合金膜の結果も載せている.

次に、膜厚方向に層厚勾配のある Gd/FeCo 多層膜の SOT 磁化反転を調べた。図 3 は $x=0.01 \sim 0.03$ nm/Layer と変化した際の SOT 磁化反転臨界反転電流密度 J_{sw} の面内磁場 H_x 依存性を示している。なお、中心の Gd 層厚は $t_{Gd} = 0.50$ nm である。まず、 J_{sw} の H_x 依存性の傾きは x の値に依存せずほぼ一定となっている。これは、各試料の磁化のばらつきが小さく、良質なサンプルが得られていることを示している。 $H_x = 0$ に外挿した際の J_{sw} はおおむね $11 \sim 12$ MA/cm² と同程度の値となっているが、 $x=0.02$ nm/Layer の場合が最小となっている。このような傾向は $t_{Gd} = 0.47$ nm, 0.53 nm の多層膜でも見られており、サンプルばらつきは見られるものの、膜厚方向に層厚勾配を大きくすることで J_{sw} が低減する傾向が得られており、膜厚方向の構造非対称性による SOT 磁化反転臨界電流密度の低減を示唆する結果が得られた。

同様の実験を Tb/Gd/FeCo 多層膜においても検討した。図 4 は Tb/Gd/FeCo 多層膜の(a)磁化および(b)磁気異方性の Tb 層厚 t_{Tb} 依存性を示している。Tb 層厚の増加により磁化および磁気異方性が増加している。図 4 (a)の Tb/Gd/FeCo 多層膜の磁化は、Tb の磁気モーメントが Gd より小さく、重希土類と FeCo の磁気モーメントが反平行に結合していることから説明できる。また、図 4 (b)の Tb/Gd/FeCo 多層膜の磁気異方性は、1 イオン異方性の大きな Tb 組成の増加により、多層膜平均の磁気異方性が増加していると解釈される。図 5 は Tb/Gd/FeCo 多層膜の SOT 磁化反転臨界反転電流密度 J_{sw} の面内磁場 H_x 依存性を示している。Tb 層厚は図中に示している。これから、Tb 層厚が増加することで、SOT 磁化反転の J_{sw} が減少していることが確認される。図 4 (b)でも示したように、 t_{Tb} の増加は磁気異方性の増加をもたらす。すなわち、 t_{Tb} の増加により磁化反転のエネルギー障壁が増大しているにもかかわらず、SOT 磁化反転の臨界電流密度が低減するという興味深い結果が得られた。これは、Tb 層厚増加により膜厚方向の構造非対称性が増加したことが原因である可能性があり、構造非対称性と SOT 磁化反転について、今後もより詳細に検討していく必要があることが明らかとなった。

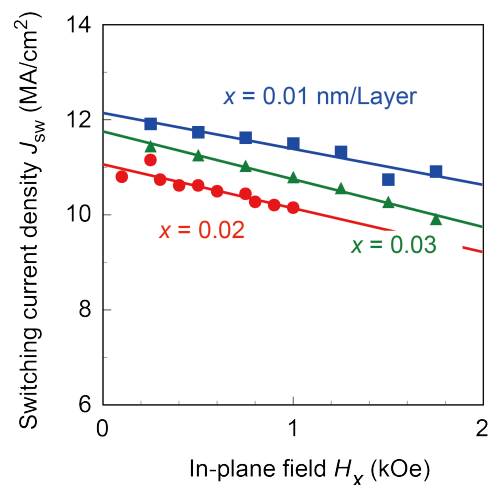


図 3 Ta(20)上に積層した $[Gd(0.50+x.n) / Fe_{90}Co_{10}(0.50-x.n)]_5$ 多層膜の SOT 磁化反転臨界反転電流密度 J_{sw} の面内磁場 H_x 依存性.

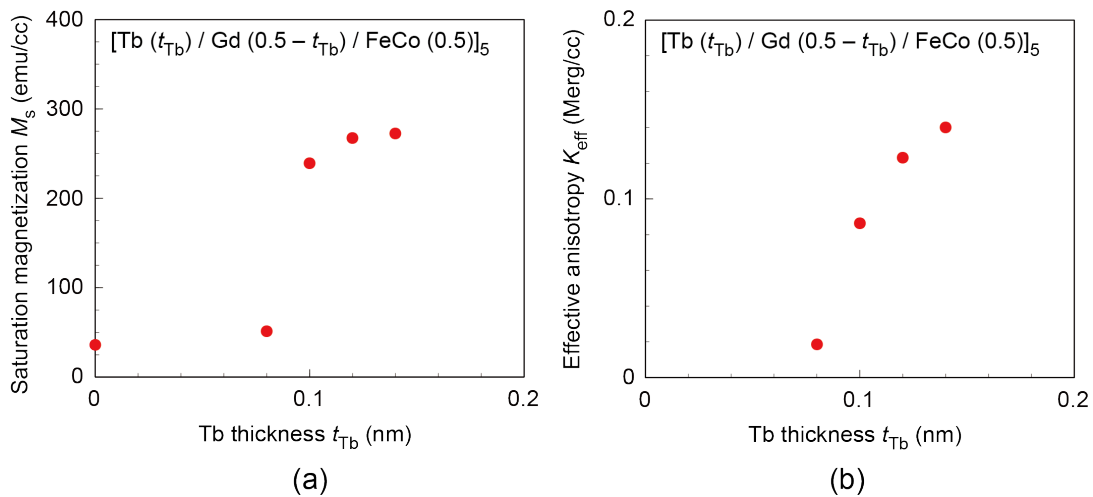


図4 $[Tb(t_{Tb})/Gd(0.5-t_{Tb})/FeCo(0.5)]_5$ 多層膜の(a)磁化および(b)実効垂直磁気異方性の Tb 層厚依存性.

参考文献

- [1] L. Liu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 036601 (2011).
- [2] A. R. Mellnik *et al.*, Nature **511**, 449 (2014).
- [3] T. Gao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 017202 (2018).
- [4] K. -J Kim *et al.*, Nature Mater. **16**, 1187 (2017).
- [5] D -H Kim *et al.*, Nature Mater. **18**, 685 (2019).
- [6] K. Kawakami *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, SEEF01 (2019).

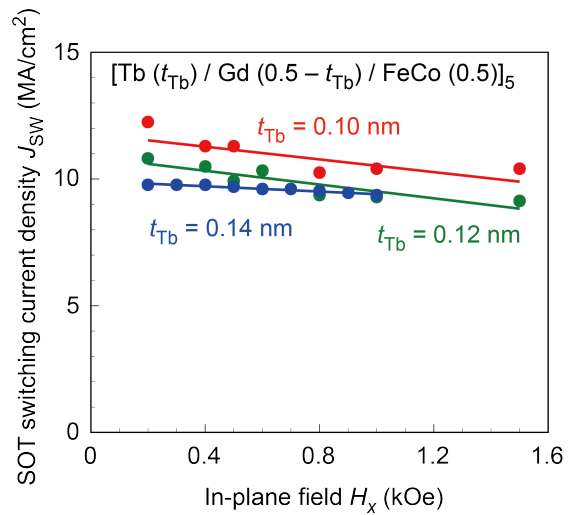


図5 Ta(20)上に積層した $[Tb(t_{Tb})/Gd(0.5-t_{Tb})/FeCo(0.5)]_5$ 多層膜の SOT 磁化反転臨界反転電流密度 J_{sw} の面内磁場 H_x 依存性.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Kamiya, D. Oshima, S. Iwata, T. Kato	4. 巻 45
2. 論文標題 Perpendicular Anisotropy and Damping of MBE-grown MgO-Fe/Au(001) and Au/Fe/Au(001) Trilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 96-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2107R005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Iwata, T. Kato, D. Oshima	4. 巻 45
2. 論文標題 Crystal Structure and Magnetic and Magneto-optical Properties of CoPt, MnPt ₃ , CrPt ₃ , MnAl and MnGa Films with Ordered Phase and Their Bit-patterned Media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 118-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2109RV001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 A. Sakoguchi, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata	4. 巻 58
2. 論文標題 Electric-field modulation of perpendicular magnetic anisotropy and damping constant in MgO/Co/Pt trilayers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetism	6. 最初と最後の頁 4200105-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3083078	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 Yamamoto Sh., Gorbunov D. I., Akai H., Yasumura H., Kotani Y., Nakamura T., Kato T., Mushnikov N. V., Andreev A. V., Nojiri H., Wosnitza J.	4. 巻 101
2. 論文標題 Element- and orbital-selective magnetic coherent rotation at the first-order phase transition of a hard uniaxial ferrimagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174430-174430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174430	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 Miwa Y., Oshima D., Kato T., Iwata S.	4. 巻 44
2. 論文標題 MnGa Film with (001) Texture Fabricated on Thermally Oxidized Si Substrate Using CoGa Buffer Layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 117 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2009R003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Liu Yang, Hisamatsu Yuki, Sharmin Sonia, Oshima Daiki, Iwata Satoshi, Kato Takeshi, Sekiba Daiichiro, Kita Eiji, Yanagihara Hideto	4. 巻 39
2. 論文標題 Topotactic crystal structure transformation from spinel ferrite to wustite in epitaxial Fe ₃ O ₄ films via Kr ion irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology A	6. 最初と最後の頁 033403 ~ 033403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0000885	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 D. Oshima, R. Mitsuhashi, N. Ikarashi, T. Kato, M. Nagao	4. 巻 13
2. 論文標題 Fabrication of beta-Mn type CoZnMn(001) film on MgO single crystal substrate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025331-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000488	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 S. Yanai, D. Oshima, S. Takahashi, Y. Hirayama, T. Kato	4. 巻 62
2. 論文標題 Spin Orbit Torques in Ferrimagnetic Gd/FeCo Multilayers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SB1004-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac8f52	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15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 A. Sakoguchi, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata
2. 発表標題 Electric-field modulation of perpendicular magnetic anisotropy and damping constant in MgO/Co/Pt trilayers
3. 学会等名 INTERMAG 2021 Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kato, W. Zhao, D. Oshima, S. Iwata
2. 発表標題 Thermally assisted switching of MRAM cell using hybrid memory layer with different Curie temperatures
3. 学会等名 International Conference n Processing and Manufacturing and Advanced Materials 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Zhao, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata
2. 発表標題 Effect of high TC interface layer in high TC/ low TC hybrid memory layer on thermally assisted spin-transfer-torque switching
3. 学会等名 The 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 趙望臻, 加藤剛志, 大島大輝, 岩田聡
2. 発表標題 高TC/低TCハイブリッド層を用いた熱アシストSTT磁化反転における界面高TC層の影響
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 趙望臻, 加藤剛志, 大島大輝, 岩田聡
2. 発表標題 高TC/低TCハイブリッド層のスピン移行トルク磁化反転における界面高TC層の影響
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Zhao, T. Kato, D. Oshima, Y. Sonobe, S. Takahashi, S. Iwata
2. 発表標題 Thermally assisted STT switching of hybrid memory layer consisting of low TC CoPd/Pd and high TC Co/Pd multilayers
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Kamiya, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata
2. 発表標題 Perpendicular anisotropy and damping of MgO/Fe/Au trilayers with broken inversion symmetry
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙望臻, 加藤剛志, 大島大輝, 園部義明, 高橋茂樹, 岩田聡
2. 発表標題 [CoPd/Pd]/[Co/Pd]ハイブリッドメモリ層の熱アシストSTT磁化反転
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 砂古口藍子, 大島大輝, 岩田聡, 加藤剛志
2. 発表標題 MgO/Co/Pt積層膜における磁気異方性およびダンピング定数の電界効果
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Seguchi, D. Oshima, T. Kato
2. 発表標題 Magnetization Dynamics of GdFeCo/Cu/FeCo Trilayers Triggered by Ultrashort Pulsed Laser
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yanai, D. Oshima, S. Takahashi, Y. Hirayama, T. Kato
2. 発表標題 Spin Orbit Torques in Ferrimagnetic Gd/FeCo Multilayers
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kato
2. 発表標題 Current Induced Magnetization Switching for Ultra-high Density Memory Devices
3. 学会等名 2nd International Conference on Magnetism and Its Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Oshima, R. Mitsuhashi, N. Ikarashi, T. Kato, M. Nagao
2. 発表標題 Fabrication of beta-Mn type CoZnMn(001) film on MgO single crystal substrate
3. 学会等名 The 67th Annual Conferenc on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢内峻介, 大島大輝, 高橋茂樹, 平山義幸, 加藤剛志
2. 発表標題 Ta上に積層したGd/FeCo多層膜のスピン軌道トルク
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 潘達, 曹哲, 大島大輝, 加藤剛志
2. 発表標題 垂直磁化SAF固定層を用いたCPP-GMR膜の電流誘起磁化反転
3. 学会等名 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ(MRIS)研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 磁気メモリ素子及び磁気メモリ装置	発明者 園部義明, 加藤剛志	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-167193	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気メモリ装置, 磁気メモリ素子の制御方法, および制御プログラム	発明者 本多周太, 加藤剛志, 大島大輝, 園部義明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-020242	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究 分 担 者	大島 大輝 (Oshima Daiki) (60736528)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------