

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13796

研究課題名(和文) スピン軌道トルク生成機構・磁化反転機構の理解の促進に基づいた材料・素子技術の構築

研究課題名(英文) Improve the understanding of the mechanism of spin-orbit torque induced magnetization reversal and construct the material and device technologies based on it

研究代表者

張 超亮 (Zhang, Chaoliang)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80807678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、磁気トンネル接合(MTJ)の面直電流で誘起されたスピン移行トルク(STT)を用いてSOT磁化反転をアシストする新しい方法(SOT&STT 磁化反転)が提案され、消費電力を大幅に低減できることが指摘されている。しかし、今まで実験では実証されていない。本研究は、SOT&STT-MTJ素子を試作し、世界初で200 psまでの高速領域で、STTとSOTの結合による無磁場磁化反転を系統的に調べた。その結果をシミュレーションと比較し、STTとSOTの効果の理解を深め、デバイス構造設計の指針を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、高性能なSOT-MTJ素子の材料設計、デバイス設計に関する系統的な理解が得られる。これらの知見を応用することで、製造が容易な構造で、高速動作、高信頼性、高い書き込み耐性を実現できるメモリ素子の実現が期待される。このため学术界に大きなインパクトを与える同時に、産業界へも高い貢献にもつながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Magnetoresistive random-access memory has attracted significant attention these years as a promising alternative to the current volatile random-access memory technologies. Since it stores information as the magnetization directions of ferromagnetic thin films in magnetic tunnel junctions (MTJs), no energy is required to retain bit information. Meanwhile, the schemes which can reverse the magnetization direction with lower power consumption and faster speed become extremely important. In this work, we systematically study the magnetization reversal via spin-transfer torque (STT) and spin-orbit torque (SOT) in the ultra-fast regime $200 \text{ ps} < t_p < 1 \text{ ns}$. We find that low-current fast switching can be achieved by modifying the combination of STT and SOT. Our findings are expected to provide clues for understanding the magnetization reversal mechanism with STT&SOT and eventually pave the way towards the nonvolatile spintronics device with high-speed and low-power-consumption performance.

研究分野：電子工学

キーワード：スピントロニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、磁気抵抗ランダムアクセスメモリなどの不揮発性スピントロニクス素子を用いた集積回路が、既存の半導体集積回路の消費電力や微細化限界などの課題を解決する手段として期待されている。その中で、Ta、W、Pt、PtMn などの非磁性重金属や反強磁性金属からなるチャンネル上に磁気トンネル接合(MTJ)を形成した三端子素子が提案され、情報の書き込みエラーの低減と高速動作が期待されることから、注目を集めている。MTJ は薄い絶縁体からなる障壁層を二つの強磁性体からなる記録層と参照層で挟んだ積層構造で構成され、デジタル2値情報の「1」と「0」が記録層中の磁化方向として記録される。情報を書き込む時、重金属チャンネルに印加した面内電流によって、MTJ の記録層中の磁化にスピン軌道トルク(SOT) を作用させることで記録層中の磁化方向を制御するため、三端子 SOT-MTJ 素子と呼ばれる。より高性能な SOT-MTJ 素子を実現するためには、SOT をより高効率に生成するか、あるいは他の機構を用いて SOT 磁化反転をアシストするかの二つのアプローチが考えられる。一つ目のアプローチについては、SOT をより有効的に誘起させるための材料の開発が不可欠である。そのため、「SOT はどのように生じているか、どのように磁化反転が誘起されているか」という学術的「問い」は重要である。二つ目のアプローチは、MTJ の面直電流で誘起されたスピン移行トルク(STT)を用いて SOT 磁化反転をアシストする新しい方法 (SOT&STT 磁化反転) を使う。計算からこの新しい磁化反転方法を用いた三端子 SOT&STT-MTJ は通常の MTJ 素子より、消費電力を大幅に低減できることが指摘されている。しかし、今まで実験では実証されていない。加えて「SOT と STT を併用する場合、磁化反転はどのように誘起されるか」という学術的「問い」の答えも不明確である。

2. 研究の目的

本研究では高性能な SOT(&STT)-MTJ 素子の実現とのための学理の探求を目的し、具体的に以下の項目に焦点を絞り研究を進めた。(a) 高抵抗率 W/CoFeB/MgO の作製および SOT の評価。(b) 差分プレーナホール抵抗で面内磁気ドットにおける SOT 誘起磁化反転の測定と磁化反転電流の磁化容易軸方向依存性の評価。(c) 反強磁性体/強磁性体ヘテロ構造における SOT 誘起磁化反転を用いた人工ニューロンとシナプスの実現。(d) SOT 生成効率を評価する有効な方法の提案と実証。(e) SOT&STT 磁化反転の実証と反転機構の理解。

3. 研究の方法

(a) 高抵抗率 W/CoFeB/MgO の作製および SOT の評価：SOT 誘起磁化反転の反転電流を下げるため、高いスピンホール角を持つ材料が求められている。この研究では、スパッタリング法を用いて W/CoFeB/MgO ヘテロ構造を成膜した。そして、成膜中のガス流量と成膜パワーなどの条件を変えることで、タングステン抵抗率を高く変調できた。そして、このヘテロ構造を用いて、ホール素子に加工した。高調波測定法を用いて、それらの素子中の SOT を評価した。その後、SOT の生成効率とタングステン抵抗率との関係を調べ、その機構を議論した。

(b) 差分プレーナホール抵抗で面内磁気ドットにおける SOT 誘起磁化反転の測定と磁化反転電流の磁化容易軸方向依存性の評価：上記と同様な方法で、Ta/W/CoFeB/MgO から面内容易軸を持つ磁気ドットに作成した。それにおける SOT を高効率的に測定できる手法を提案し、SOT 誘起磁化反転の磁化用軸方向依存性を調べた。

(c) 反強磁性体/強磁性体ヘテロ構造における SOT 磁化反転を用いた人工ニューロンとシナプスの実現：スパッタリング法を用いて、Ta/Pt/PtMn/Pt/[Co/Ni]₂/Co/MgO/Ru ヘテロ構造を成膜し、マイクロメートルからナノメートルサイズのホール素子に加工した。そして、これらの素子で、

1s から 1ns までの電流パルスで SOT 誘起磁化反転のダイナミクスを系統的に調べた。スピン軌道トルク誘起磁化反転の特性を用いて人工ニューロンとシナプスへの応用を提案した。

(d) SOT生成効率を評価する有効な方法の提案と実証: 上記と同様な方法で、二つの代表的なヘテロ構造 W/CoFeB/MgO, Pt/Co/MgO からホール素子に加工した。これらの素子における SOT の有効磁場をスピントルク強磁性共鳴法で測定し、独創な方法で SOT の生成効率を評価した。その結果を他方法と比較し、この方法の有効性を証明できた。

(e) SOT&STT 磁化反転の実証と反転機構の理解: Ta/W/CoFeB/MgO/CoFeB のヘテロ構造をスパッタリング法で成膜し、電子線ビームリソグラフィとドライエッチングでナノメートルサイズの SOT&STT-MTJ 素子を試作し、SOT と STT の大きさと相対角度を MTJ や重金属チャンネルの膜構成で変調し、磁化反転動作と反転電流の依存性を系統的に調べた。そして、数値計算で磁化反転電流の理論値と実験値と比較し、SOT&STT 誘起磁化反転機構の理解を深めた。

4. 研究成果

(a) 高抵抗率 W/CoFeB/MgO の作製および SOT の評価: 本研究では、高抵抗率 W の実効的なスピンホール角(-0.62)を求めた。この数値は当時タングステンにおけるスピン軌道トルクの最大値であり、タングステンの抵抗率を増加させることで、スピンホール角を高めることを示した。そして、抵抗率とスピンホール角の関係から、SOT の起源について議論を行った。この知見で、今後スピン軌道トルク誘起磁化反転の反転効率を増加させることが期待されている。この成果は一流論文誌(Physical Review Applied)に発表した。

(b) 差分プレーナーホール抵抗で面内磁気ドットにおける SOT 誘起磁化反転の測定と磁化反転電流の磁化容易軸方向依存性の評価: スピン軌道トルク誘起磁化反転の磁化容易軸方向依存性を調べることで、スピン軌道トルク誘起磁化反転の機構への理解を深めた。そして、SOT 誘起磁化反転を高速かつ低電流で行うための条件を明らかにした。この成果は一流論文誌(Physical Review Applied)に発表した。

(c) 反強磁性体/強磁性体ヘテロ構造における SOT 磁化反転を用いた人工ニューロンとシナプスの実現: Ta/Pt/PtMn/Pt/[Co/Ni]₂/Co/MgO/Ru ヘテロ構造における SOT 誘起磁化反転を 1s から 1ns までの電流パルス領域で系統的に調べた。その特性を用いて、人工ニューロンとシナプスへの応用するためのメモリストアーの実現は可能となり、SOT デバイスの新たな応用方向を示した。以上の成果は一流論文誌(Advanced Materials)に発表した。

(d) SOT生成効率を評価する有効な方法の提案と実証: スピン軌道トルク効率を決めるための有効な方法を提案し、二つの代表的な材料系でこの方法を実証した。以上の成果は一流論文誌(Physical Review Applied)に発表した。

(e) SOT&STT 磁化反転の実証と反転機構の理解: 世界初で 200 ps までの高速領域で、STT と SOT の結合による無磁場磁化反転を実証できた。その結果をシミュレーションと比較し、STT と SOT の効果の理解を深め、デバイス構造設計の指針を明らかにした。この成果は一流論文誌(Physical Review Applied)に発表し、その重要性で Editor's pick に選ばれた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, S. Fukami, Ohno Hideo	4. 巻 118
2. 論文標題 Field-free and sub-ns magnetization switching of magnetic tunnel junctions by combining spin-transfer torque and spin-orbit torque	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092406 ~ 092406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039061	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 M. Natsui, A. Tamakoshi, H. Honjo, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshiduka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, Y. Ma, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, T. Endoh, T. Hanyu	4. 巻 56
2. 論文標題 Dual-Port SOT-MRAM Achieving 90-MHz Read and 60-MHz Write Operations Under Field-Assistance-Free Condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Solid-State Circuits	6. 最初と最後の頁 1116 ~ 1128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSSC.2020.3039800	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 M. Natsui, A. Tamakoshi, H. Honjo, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshiduka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, Y. Ma, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, T. Endoh, T. Hanyu	4. 巻 1
2. 論文標題 Dual-Port Field-Free SOT-MRAM Achieving 90-MHz Read and 60-MHz Write Operations under 55-nm CMOS Technology and 1.2-V Supply Voltage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE Symposium on VLSI Circuits	6. 最初と最後の頁 1~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/VLSICircuits18222.2020.9162774	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 A. Okada, Y. Takeuchi, K. Furuya, C. Zhang, H. Sato, S. Fukami, H. Ohno	4. 巻 12
2. 論文標題 Spin-Pumping-Free Determination of Spin-Orbit Torque Efficiency from Spin-Torque Ferromagnetic Resonance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014040-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.014040	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 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, H. Ohno	4. 巻 31
2. 論文標題 Artificial Neuron and Synapse Realized in an Antiferromagnet/Ferromagnet Heterostructure Using Dynamics of Spin-Orbit Torque Switching	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1900636 ~ 1900636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201900636	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 Y. Takeuchi, C. Zhang, A. Okada, H. Sato, S. Fukami, H. Ohno	4. 巻 112
2. 論文標題 Spin-orbit torques in high-resistivity-W/CoFeB/MgO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192408 ~ 192408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5027855	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 Y. Takahashi, Y. Takeuchi, C. Zhang, B. Jinnai, S. Fukami, H. Ohno	4. 巻 114
2. 論文標題 Spin-orbit torque-induced switching of in-plane magnetized elliptic nanodot arrays with various easy-axis directions measured by differential planar Hall resistance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012410 ~ 012410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5075542	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35件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 M. Natsui, A. Tamakoshi, H. Honjo, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshiduka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, Y. Ma, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, H. Ohno, T. Endoh, T. Hanyu
2. 発表標題 Dual-Port Field-Free SOT-MRAM Achieving 90-MHz Read and 60-MHz Write Operations under 55-nm CMOS Technology and 1.2-V Supply Voltage
3. 学会等名 Symposia on VLSI Technology and Circuits (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, and H. Ohno
2 . 発表標題 Uniform artificial synapse and neuron based on spintronic devices
3 . 学会等名 17th RIEC International Workshop on Spintronics and 10th JSPS Core-to-Core Workshop on “ New-Concept Spintronic Devices ” (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, and H. Ohno
2 . 発表標題 Artificial Synapse and Neuron Based on the Dynamics of Spintronic Devices
3 . 学会等名 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio and H. Ohno
2 . 発表標題 Antiferromagnet/ferromagnet heterostructures as synapses and neurons
3 . 学会等名 SPICE Workshop on Antiferromagnetic Spintronics: from topology to neuromorphic computing (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Honjo, A. Nguyen Thi Van, T. Watanabe, T. Nasuno, C. Zhang, T. Tanigawa, S. Miura, H. Inoue, M. Niwa, T. Yoshizuka, Y. Noguchi, M. Yasuhira, A. Tamakoshi, M. Natsui, Y. Ma, H. Koike, Y. Takahashi, K. Furuya, H. Shen, S. Fukami, H. Sato, S. Ikeda, T. Hanyu, H. Ohno, T. Endoh
2 . 発表標題 First demonstration of field-free SOT-MRAM with 0.35 ns write speed and 70 thermal stability under 400 °C thermal tolerance by canted SOT structure and its advanced patterning/SOT channel technology
3 . 学会等名 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, S. Fukami and H. Ohno
2 . 発表標題 Magnetization reversal via the combination of spin-orbit torque and spin-transfer torque in sub-ns region
3 . 学会等名 17th RIEC International Workshop on Spintronics and 10th JSPS Core-to-Core Workshop on “ New-Concept Spintronic Devices ” (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, and H. Ohno
2 . 発表標題 Antiferromagnet/ferromagnet heterostructures for artificial neurons and synapses
3 . 学会等名 York-Tohoku-Kaiserslautern Research Symposium on “ New-Concept Spintronics Devices ” (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Efficient control of magnetization utilizing spin-orbit torque and spin-transfer torque
3 . 学会等名 York-Tohoku-Kaiserslautern Research Symposium on “ New-Concept Spintronics Devices ” (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, H. Ohno
2 . 発表標題 Antiferromagnet/Ferromagnet Heterostructures for Artificial Neurons and Synapses
3 . 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Associative memory operation using analog spin-orbit torque device
3 . 学会等名 SPICE Workshop - Spintronics meets Neuromorphics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque switching in nanoscale devices, physics and material engineering
3 . 学会等名 KITS Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Analog spintronics device for artificial neural networks
3 . 学会等名 The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Neuromorphic computing with analog spin-orbit torque devices (Invited)
3 . 学会等名 The 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, C. Zhang, B. Jinnai, and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque switching device for high-performance and low-power integrated circuits
3 . 学会等名 The 23rd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Analog spin-orbit torque devices for artificial neural networks
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Magnetism (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Neuromorphic computing with analog spin-orbit torque device
3 . 学会等名 Workshop on Spintronics and Nanomagnetism for Neuromorphic Computing (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, W. A. Borders, A. Kurenkov, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Spintronic analog memory for neuromorphic computing
3 . 学会等名 14th International Conference on Modern Materials and Technologies (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Fukami, C. Zhang, W. A. Borders, A. Kurenkov, S. DuttaGupta, and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque switching and its applications, from high-speed memory to artificial neural network
3 . 学会等名 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, K. Furuya, Y. Takahashi, B. Jinnai, C. Zhang, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Engineering of spin-orbit torques in W/CoFeB/MgO heterostructures for efficient control of magnetization
3 . 学会等名 2nd Tohoku/SG-SPIN Workshop in Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Sub-ns switching by combining SOT and STT in MTJ devices
3 . 学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Furuya, Y. Takeuchi, C. Zhang, B. Jinnai, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Relationship between spin-orbit torque switching efficiency and W resistivity in W/CoFeB/MgO
3 . 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, S. Fukami and H. Ohno
2. 発表標題 Sub-ns and low-power magnetization switching by combination of spin-orbit torque and spin-transfer torque
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takahashi, Y. Takeuchi, C. Zhang, B. Jinnai, S. Fukami and H. Ohno
2. 発表標題 Spin-orbit torque-induced switching of in-plane magnetized elliptic nanodots detected using planar Hall effect
3. 学会等名 16th RIEC International Workshop on Spintronics and 8th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Zhang, S. Fukami, S. DuttaGupta, H. Sato and H. Ohno
2. 発表標題 Time and spatial evolution of spin-orbit torque-induced switching in W/CoFeB/MgO
3. 学会等名 16th RIEC International Workshop on Spintronics and 8th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Takahashi, Y. Takeuchi, C. Zhang, B. Jinnai, S. Fukami, and H. Ohno
2. 発表標題 Spin-orbit torque switching in in-plane nanomagnets characterized by planar Hall effect
3. 学会等名 NIMS Academic Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 B. Jinnai, C. Zhang, A. Kurenkov, M. Bersweiler, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque switching in perpendicular-magnetized Co/Pt multilayers
3 . 学会等名 NIMS Academic Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Takahashi, Y. Takeuchi, C Zhang, B. Jinnai, S. Fukami and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque induced switching of in-plane nanomagnet arrays evaluated through differential planar Hall effect
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, K. Furuya, Y. Takahashi, C Zhang, A. Okada, B. Jinnai, H. Sato, S. Fukami and H. Ohno
2 . 発表標題 Spin-orbit torque in W/CoFeB/MgO heterostructures, Wide-range W resistivity dependence
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, C. Zhang, A. Okada, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Extended harmonic Hall measurement of spin-orbit torques in high-resistivity-W/CoFeB/MgO
3 . 学会等名 7th Workshop of the Core-to-Core Project Tohoku-York-Kaiserslautern (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Takeuchi, C. Zhang, A. Okada, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Harmonic measurement of current induced spin-orbit torques in high-resistivity-W/CoFeB/MgO
3 . 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Okada, Y. Takeuchi, K. Furuya, C. Zhang, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Determination of spin-orbit torque by spin-torque ferromagnetic resonance free from spin-pumping
3 . 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Furuya, Y. Takeuchi, C. Zhang, B. Jinnai, Y. Takahashi, S. Fukami, and H. Ohno
2 . 発表標題 Enhancement of spin-orbit torque in W/CoFeB/MgO by controlling W resistivity
3 . 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Miyasaka, T. Saino, C. Zhang, S. Fukami and H. Ohno
2 . 発表標題 Evaluation of write-error rate of spin-orbit torque induced magnetization switching
3 . 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Furuya, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, C. Zhang, A. Okada, B. Jinnai, S. Fukami and H. Ohno
2. 発表標題 Enhancement of spin-orbit torque efficiency in W/CoFeB/MgO by engineering W resistivity
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Zhang, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, S. Fukami, and H. Ohno
2. 発表標題 Magnetization switching combining spin-orbit torque and spin-transfer torque
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 Magnetoresistance effect element and magnetic memory device	発明者 S. Fukami, C. Zhang et al.	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、9941468	取得年 2018年	国内・外国の別 外国

〔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

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