

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13964

研究課題名(和文) スピン軌道トルクを用いた新規磁化制御方式の研究と3端子磁気メモリ素子への応用

研究課題名(英文) Study on a new spin-orbit torque induced magnetization switching scheme and its application to three-terminal memory devices

研究代表者

深見 俊輔 (Fukami, Shunsuke)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：60704492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：高性能低消費電力集積回路への応用が期待される新規磁化反転方式を提案し、その動作実証、及び物理的機構の解明、ならびに集積回路応用に向けた基盤技術の構築に取り組んだ。ここ数年盛んな研究が行われている、スピン・軌道相互作用を用いた磁化制御技術「スピン軌道トルク磁化反転」の新方式を考案し、閾電流密度を決める物理的因子やナノ秒ダイナミクスを明らかにした。またサブナノ秒での磁化反転や無磁場動作を実現した。これらによってスピン軌道トルク磁化反転技術の集積回路応用への学理・技術基盤が構築された。

研究成果の概要(英文)：A new magnetization switching scheme, which is expected to be applied to high-performance and ultralow-power integrated circuits, was proposed. Also, demonstration of its basic operation, elucidation of its physical mechanism, and establishment of technological basics for integrated-circuits applications have been addressed. This work has shown a new magnetization switching scheme utilizing spin-orbit interaction, so-called spin-orbit torque induced magnetization switching, and have clarified the factors governing the threshold current density and nano-second dynamics. The sub-ns, field-free magnetization switching has also been demonstrated. Through these researches, fundamental and technological basics of spin-orbit torque switching for the application to integrated circuits have been established.

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 スピン軌道トルク 集積回路

### 1. 研究開始当初の背景

磁性体の磁化の制御は磁気工学の根幹的技術の一つであり、長年に渡り多くのブレイクスルーがなされてきた。その中で近年盛んに研究され飛躍的な発展を遂げているのが、スピン・軌道相互作用を利用した磁化の制御技術である。スピン・軌道相互作用の大きな重金属層と強磁性体が積層されたヘテロ構造に膜面内方向に電流を導入すると、スピンホール効果やラッシュバ効果などによって強磁性体にスピンの蓄積し磁化にトルク（スピン軌道トルク：SOT）が働き、その大きさが十分に大きければ磁化反転が誘起される。強磁性ヘテロ構造における SOT 磁化反転は 2011 年に最初の観測例が報告され、その後多くの研究がなされている。これまでに実証されている SOT 磁化反転方式は図 1 (a), (b) に示される 2 つの方式に大別される。第一の方式（図 1(a)）では磁化容易軸は垂直（Z 軸）方向、第二の方式（図 1(b)）では面内 Y 軸方向を向いている。これらを用いて SOT 磁化反転の物理的機構の解明が進んでいるが、未だに閾電流密度を決める因子やナノ秒磁化ダイナミクスなどにおいて多くの未解明な点が残されている。また応用上は小さな電流密度で高速に磁化を反転できることが望ましいが、そのための素子の設計指針についても明らかにはなっていない。

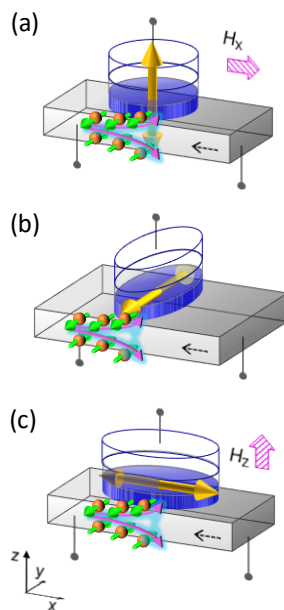


図 1: スピン軌道トルク磁化反転方式の模式図。(a), (b):旧方式 (Type Z, Type Y)。(c):本研究で提案した新方式 (Type X)。[S. Fukami et al., Nature Nanotechnology, 11, 621 (2016)]

### 2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では以下の 3 点を目的とした。第一の目的は、既存の 2 方式とは異なる新しい SOT 磁化反転方式（図 1 (c)）を提案し、その動作を実証することである。

第三の方式においては面内 X 軸方向が磁化容易軸となり、垂直方向の外部磁場が印加されることで双方向の磁化反転が観測されると期待される。また第三の方式における磁化・スピン・外部磁場の対称性は第一の方式と類似し、一方で用いる材料は第二の方式と類似する。この性質を利用することで SOT 磁化反転の物理を解明する有用なツールとなることが期待される。本研究の第二の目的は、既存の磁化反転方式の素子を作製し、新方式 SOT 磁化反転素子の特性と比較することで SOT 磁化反転に関する物理的な理解を深めることである。そして第三の目的は、新方式の SOT 磁化反転素子を集積回路に実装するにあたって対処すべき諸課題への対策を明らかにすることである。

なお、本報告では便宜上、図 1 に示された 3 方式を、それらの磁化容易軸方向をもとに Type Z, Type Y, Type X と呼ぶこととする。

### 3. 研究の方法

図 2 に本研究で作製した新方式 Type X 構造の素子の構造を示す。10 nm の Ta が SOT を誘起する重金属層であり、その上に形成された 1.46 nm の CoFeB が強磁性磁化反転層である。図示した膜構成からなる磁気トンネル接合 (MTJ) 膜を高抵抗 Si 基板上に DC 及び RF マグネトロンスパッタリングにより堆積し、電子線描画とアルゴンイオンミリングによりナノスケールの素子を形成した。プロセス後に 300°C で 1 時間の熱処理を施した。

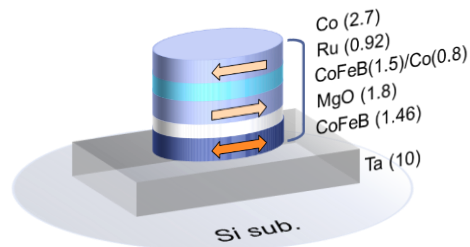


図 2: 作製した新構造 Type X スピン軌道トルク素子の構成 [S. Fukami et al., 2016 VLSI Symposia, T06-05]

SOT 磁化反転の測定の際は、DC 電流源またはパルスジェネレーターにより Ta チャネル層に電流を導入し、その後 DC 電流源と DC 電圧計を用いて MTJ 抵抗を測定した。すべての測定は室温で行った。

### 4. 研究成果

図 3 に作製した代表的な Type X 素子の SOT 磁化反転特性を示す。縦軸は MTJ 抵抗、横軸は印加したパルス電流の電流密度である。測定は -20 mT から +20 mT の範囲の様々な DC 外部磁場を印加しながら行った。図から分かるように垂直磁場が印加されたときに磁化反転に伴う MTJ の抵抗変化が生じている。また外部磁場の符号に応じて磁化反転方向が逆転している。これは磁化反転が SOT によって

誘起されていることを意味している。この結果から、本研究で提案した Type X 構造の SOT の新規磁化反転方式の動作実証ができたと言える。

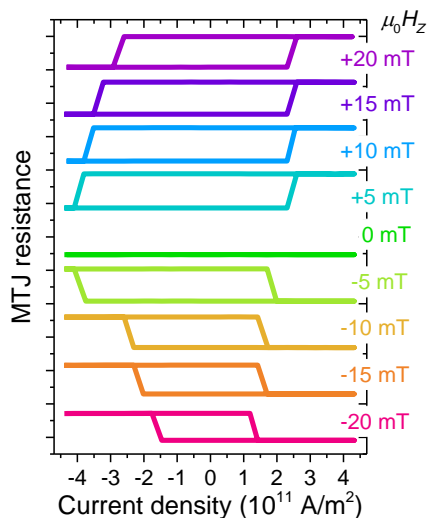


図3: 新構造 Type X スピン軌道トルク素子の垂直磁場下での電流による磁化反転特性 (MTJ 抵抗 vs 電流密度) の垂直磁場依存性 [S. Fukami et al., 2016 VLSI Symposia, T06-05]

新方式の SOT 磁化反転が観測できたことを受け、続いて従来の 2 方式と新方式の素子を同一の材料系 (Ta/CoFeB/MgO) を用いて作製し、その反転閾電流密度と実効異方性磁界を評価し、数値シミュレーションと比較することで、反転閾電流密度を決める物理的な因子について考察した。詳細な解析の結果、従来から知られていた磁化とスピンの両者に直交する方向に働くトルク (Slonczewski-like torque) に加え、従来はその影響が明らかではなかったスピンと平行方向に磁場が印加されたように働くトルク (Field-like torque) も閾電流密度に影響を与えていることが分かった。併せて、新構造 Type X 方式素子が高い熱安定性を有しながら低電流密度での磁化反転を誘起するのに有利であることもわかった。

続いて、新方式と旧方式の SOT 磁化反転のナノ秒ダイナミクスについて実験で調べた結果を示す。ここでは同一基板上に、従来の第二方式の構造 (Type Y) と新構造 (Type X) の素子を作製し、多数回のナノ秒電流パルス印加による磁化反転確率を評価した。ここで Type Y 構造ではスピンと磁化は共線上にあることから、従来から知られているスピン移行トルク磁化反転型のダイナミクスに従うことが予測される。図4に磁化反転確率のパルス電流密度依存性の測定結果を示す。パルス幅は 100 ns, 10 ns, 1 ns, 0.5 ns のそれぞれについて測定を行った。また Type X 構造の測定の際は垂直方向に +20 mT の外部磁

場を印加した。

従来型 Type Y 方式の磁化反転ではパルス幅が長いときには小さな電流密度で磁化反転が起こっているが、パルス幅が短くなると閾電流密度が増大し、1 ns, 0.5 ns のときには測定した電流密度の範囲では 100% の磁化反転が実現されていない。この傾向はスピン移行トルク磁化反転モデルから予測される結果と整合している。一方で新構造の Type X 方式では、パルス幅に依存せず 0.5 ns までほぼ同じ電流密度で磁化が反転していることが分かる。このようなダイナミクスは数値シミュレーションからの予測とも整合する。ここで観測された Type X 方式の振る舞いは、超高速での磁化反転を必要とする素子応用において非常に有用な性質である。また Type X 方式及び Type Z 方式の SOT 磁化反転は、従来のスピン移行トルクによる磁化反転とは本質的に異なる磁化ダイナミクスを示すこともこの測定から明らかになった。

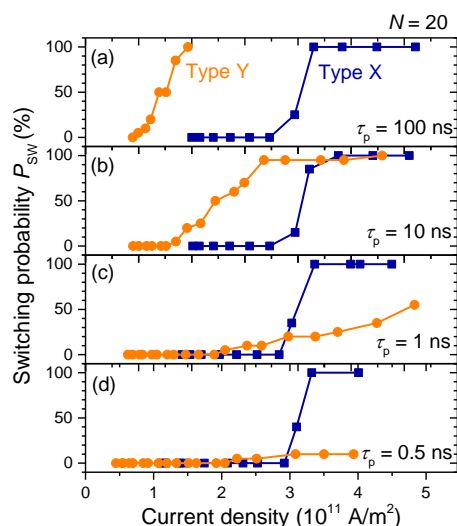


図4: 旧方式 (Type Y) と新方式 (Type X) の素子のナノ秒電流パルスによる磁化反転確率のパルス電流密度依存性 [S. Fukami et al., 2016 VLSI Symposia, T06-05]

図4に示した測定結果により、本研究で提案した新構造 Type X 方式の SOT 磁化反転が高速集積回路のメモリ素子への応用に有望なポテンシャルを有していることが分かった。当方式を集積回路に応用する上では、閾電流密度の低減、及び無磁場動作の二つが課題となる。そこで研究期間の後半ではこれらの二つの課題にも取り組んだ。

閾電流密度を低減することを目的とし、SOT 磁化反転特性のチャネル材料依存性を調べた。その結果、図2において 10 nm の Ta が用いられているチャネル層を Ta(7 nm)/W(3 nm) の積層構造とし、かつ W 層を低電力、高スパッタガス圧で堆積したときに閾電流密度を約半減できることが分かった。

また無磁場動作を実現するために、Type 方式の素子構造の改良を行った。図5に改良

素子の構造を模式的に示す。提案した Type X 方式の素子では磁化容易軸は X 軸方向を向いていたのに対して、改良構造では磁化容易軸が X 軸から角度  $\theta$  だけ傾いている。これによって蓄積されるスピンの磁化容易軸と平行成分を持つことでスピン単独で磁化反転方向を決めることが出来ると期待される。実際に  $\theta = +15, -15^\circ$  とした素子を作製して磁化反転を評価したところ、無磁場での双方向磁化反転動作が実現できた。

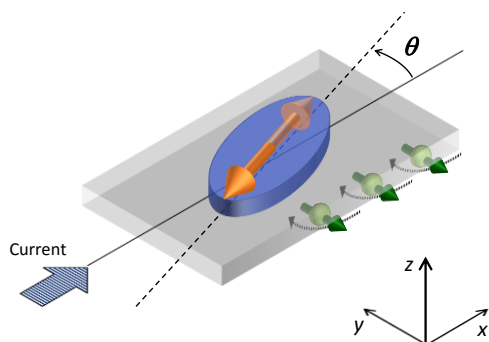


図 5: 無磁場磁化反転が可能な新方式素子の改良構造 [S. Fukami et al., 2016 VLSI Symposia, T06-05]

上述の通り、当研究期間での一連の研究によって新方式の SOT 磁化反転の基本動作が実証でき (図 3)、それを用いて閾電流密度を決める因子やナノ秒磁化反転ダイナミクス (図 4) などの SOT 磁化反転の物理的機構についての理解を深めることが出来た。さらに最初に動作実証した新方式の素子の材料や構造を改良することで集積回路に応用する上で課題となる閾電流密度の低減や無磁場動作を実現することにも成功した。

このように当研究によって SOT 磁化反転の物理を解明し、また低消費電力集積回路応用のための基盤技術を構築することが出来た。当研究は、現在は内閣府「革新的研究開発推進 (ImPACT) プログラム」に引き継がれ、当磁化反転素子の更なる性能向上、300 mm 基板上への集積化に向けた基盤技術の構築、ならびにそれらを統合した集積回路動作実証に向けた研究開発に取り組んでいる。

## 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 2 件)

- ① S. Fukami and H. Ohno “Magnetization switching schemes for nanoscale three-terminal spintronics devices,” Japanese Journal of Applied Physics (査読有) vol. 56, 0802A1 (2017).
- ② S. Fukami, T. Anekawa, C. Zhang, and H. Ohno, “A spin-orbit torque switching scheme with collinear magnetic easy axis

and current configuration,” Nature Nanotechnology (査読有), vol. 11, pp. 621-625 (2016).

[学会発表] (計 24 件)

- ① S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno, “Three-Terminal Spintronics Devices for Integrated Circuits,” The 7th IEEE International Nanoelectronics Conference 2016 (IEEE INEC2016) (招待講演), 2016/5/9-11, Chengdu (China).
- ② 深見俊輔、張超亮、姉川哲朗、Samik DuttaGupta、Aleksandr Kurenkov、大野英男:「スピン軌道トルク磁化反転とその集積回路応用」日本磁気学会第 208 回研究会 (招待講演)、2016/6/9、中央大学駿河台記念館 (東京都千代田区)。
- ③ S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, T. Anekawa, and H. Ohno, “Current Status and Future Outlook of Three-Terminal Spintronics Devices,” 2016 Spintronics Workshop on LSI (招待講演), 2016/6/13, Honolulu (USA).
- ④ S. Fukami, T. Anekawa, A. Ohkawara, C. Zhang, and H. Ohno, “A sub-ns three-terminal spin-orbit torque induced switching device (Invited),” 2016 Symposia on VLSI Technology and Circuits (査読有), 2016/6/13-17, Honolulu (USA).
- ⑤ S. Fukami, C. Zhang, T. Anekawa, A. Ohkawara, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno, “Spin-orbit torque induced switching for high-speed and reliable memory devices,” Core-to-Core International Workshop Kaiserslautern-Sendai-York (招待講演), 2016/6/22-24, Kaiserslautern (Germany).
- ⑥ A. Ohkawara, T. Anekawa, C. Zhang, S. Fukami, and H. Ohno, “Spin-orbit torque induced switching in three-terminal devices with a Ta/W channel,” 第 35 回電子材料シンポジウム (EMS) (査読有)、2015/7/6-8、ラフォーレ琵琶湖 (滋賀県守山市)。
- ⑦ 深見俊輔、姉川哲朗、大河原綾人、張超亮、大野英男:「3 端子スピン軌道トルク磁気メモリ素子—高速低消費電力不揮発性集積回路の実現を目指して—」電気情報通信学会 ITE-IST/SDM/ICD 研究会 (招待講演)、2016/8/1-3、中央電気倶楽部 (大阪府大阪市)。
- ⑧ S. Fukami, C. Zhang, T. Anekawa, A. Ohkawara, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno, “Three-terminal spin-orbit torque switching devices,” SPIE – Spintronics IX (招待講演), 2016/8/28-9/1, San Diego (USA).
- ⑨ S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, T. Anekawa, A. Ohkawara, and H. Ohno, “Three-terminal spintronics

devices with spin-orbit torque induced switching for ultra-low power and high-performance integrated circuits,” 第 40 回日本磁気学会学術講演会 (招待講演)、2016/9/5-8, 金沢大学 (石川県金沢市) .

- ⑩ S. Fukami and H. Ohno, “Nonvolatile Spintronics Devices for Integrated Circuit Applications,” MAINZ Summer School “New Direction in Spintronics Research,” (招待講演) 2016/10/9-16, Shanghai (China).
- ⑪ S. Fukami, A. Kurenkov, W. A. Borders, T. Kanemura, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno, “Magnetization Switching by Spin-Orbit Torque in an Antiferromagnet-Ferromagnet Bilayer System,” 61th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (招待講演), 2016/10/31-11/4, New Orleans (USA).
- ⑫ S. Fukami, A. Kurenkov, W. A. Borders, T. Kanemura, T. Anekawa, A. Ohkawara, C. Zhang, S. DuttaGupta, and H. Ohno, “Spin-orbit torque switching for integrated circuits: from sub-ns memory to artificial intelligence,” 14th RIEC International Workshop on Spintronics (招待講演), 2016/11/17-19, Tohoku University (Japan).
- ⑬ S. Fukami and H. Ohno, “Analog Spintronics Device Based Artificial Neural Network,” Dagstuhl Seminar 17061 “Wildly Heterogeneous Post-CMOS Technologies Meet Software,” (招待講演) 2016/2/5-10, Dagstuhl (Germany).
- ⑭ S. Fukami, T. Anekawa, C. Zhang, and H. Ohno, “Proposal and demonstration of a new spin-orbit torque induced switching device,” IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG2015) (査読有), 2015/5/11-15, Beijing (China).
- ⑮ 姉川哲朗、張超亮、深見俊輔、大野英男：「スピン軌道トルク磁化反転のパルス幅依存性」、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 (査読無)、2015/9/13-16、名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市) .
- ⑯ S. Fukami, H. Sato, and H. Ohno, “Spintronics memory devices for ultralow-power and high-performance integrated circuits,” 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2015) (招待講演), 2015/9/27-30, Sapporo (Japan).
- ⑰ T. Anekawa, C. Zhang, S. Fukami, and H. Ohno, “A three-terminal spin-orbit torque device with a new configuration,” International Workshop: Spintronics (13<sup>th</sup> RIEC International Workshop on Spintronics) (査読有), 2015/11/18-20, Sendai (Japan).

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称：磁気抵抗効果素子、及び磁気メモリ装置

発明者：深見俊輔、張超亮、姉川哲朗、大野英男、遠藤哲郎

権利者：東北大学

種類：特許

番号：PCT/JP2015/71562

出願年月日：2015/7/29

国内外の別：外国

名称：磁性積層膜、磁気メモリ素子、磁気メモリ、及びその製造方法

発明者：深見俊輔、張超亮、大河原綾人、渡部杏太、大野英男、遠藤哲郎

権利者：東北大学

種類：特許

番号：特願 2016-112242

出願年月日：2016/6/3

国内外の別：国内

名称：磁性積層膜、磁気メモリ素子、磁気メモリ、及びその製造方法

発明者：深見俊輔、張超亮、大河原綾人、渡部杏太、大野英男、遠藤哲郎

権利者：東北大学

種類：特許

番号：PCT/JP2017/11283

出願年月日：2017/3/21

国内外の別：外国

[その他]

① 日経産業新聞 2016/3/30 朝刊 8 面  
「記憶速く電流 1/5—東北大が半導体メモリー」

② 日刊工業新聞 2016/4/13 朝刊 27 面  
「低電流で 10 倍高速動作—東北大 磁気メモリー開発」

③ 日経産業新聞 2016/6/15 朝刊 8 面  
「消費電力 1/100 メモリー開発—東北大、CPU 組み込みで 磁気素子、処理速く」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深見 俊輔 (FUKAMI, SHUNSUKE)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：60704492