

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21960

研究課題名(和文)電子軌道制御を利用した新しい超低消費電力磁化スイッチング

研究課題名(英文) Novel ultra low-power magnetization switching using electron-orbital control

研究代表者

大矢 忍 (Ohya, Shinobu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：20401143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：ペロブスカイト酸化物ヘテロ構造LaSrMnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/LaSrMnO<sub>3</sub>において、15～200 mV程度の極低電圧かつ、0.01 A/cm<sup>2</sup>という従来の磁化反転方式に必要な電流密度の約8桁小さな電流密度で、磁化を膜面内で90度回転させることに成功した。  
オールエピタキシャル強磁性半導体GaMnAs単膜において、電流を流すだけで、磁化を反転できることを明らかにした。さらにGaMnAsの膜厚を変えた一連の試料で同様の測定を行ったところ、膜厚が15 nmの時に、スピントルク磁化反転現象においては世界最小である46,000 A/cm<sup>2</sup>で磁化を反転できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、実際に電子の軌道状態を電圧で制御することにより、磁化スイッチに必要な電圧値を人工的に制御して、超低消費電力磁化スイッチを実現できることを明らかにした。また、従来、スピン軌道トルク磁化反転の研究は、重金属層と強磁性層の2層膜の系で行われてきたが、GaMnAsのように、物質内部に大きなスピン軌道相互作用が存在し、大きなフェルミ面が存在するような物質においては、単膜に電流を流すだけで磁化反転を誘起出来ることを明らかにした。より単純な素子構造で簡単にかつ高効率に磁化反転ができる新たな可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We have successfully achieved in-plane 90-degree magnetization rotation in a perovskite heterostructure of LaSrMnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/LaSrMnO<sub>3</sub> with a small bias voltage of 15-200 mV and with an extremely small current density of 0.01 A/cm<sup>2</sup> which is around 8 orders of magnitude smaller than that needed for the magnetization reversal using the today's technique. Also, we have found that the magnetization rotation occurs only by applying a current in a single layer of the epitaxial ferromagnetic semiconductor GaMnAs. By measuring this effect for samples with various thicknesses, we have successfully reversed the magnetization with a current density only of 46,000 A/cm<sup>2</sup>, which is the smallest current density ever reported for the spin-orbit torque magnetization reversal, when the thickness of the GaMnAs layer was 15 nm.

研究分野：スピントロニクス、結晶工学

キーワード：スピントロニクス 磁化反転 トンネル磁気抵抗効果 電界効果 分子線エピタキシー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子スピン自由度を用いたエレクトロニクスデバイスの実用化において、強磁性体の磁化方向スイッチに必要な電力の低減は極めて大きな課題である。現在用いられているスピントランスマーケット方式等では、 $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$  程度の大きな電流密度が必要である。研究代表者らは、以前の研究で、磁性不純物を半導体にドーピングして作製した強磁性半導体 GaMnAs の量子井戸を用いた共鳴トンネルダイオードにおいて、状態密度の磁場方位依存性のバイアス電圧依存性を測定することによって、量子効果の観測に成功し、バイアス電圧を変えてフェルミレベルを量子準位と一致させた状態において、状態密度の磁場方位依存性の対称性が、他のバイアス電圧で得られる状態と異なることを初めて突き止めた。この現象は、GaMnAs の伝導において、バルク状態では  $d$  軌道の電子が支配的であるのに対して、量子井戸中の共鳴準位においては、 $p$  軌道の正孔が支配的であることに起因していると考えられる。

一方、研究代表者が進めているペロブスカイト酸化物の研究においても、LaSrMnO<sub>3</sub> を用いた磁気トンネル接合において、100 mV 程度の小さなバイアス電圧を印加するだけで、本来バルクでは 2 回対称である磁気異方性が 4 回対称になる特異な現象を初めて発見した。通常、LaSrMnO<sub>3</sub> においてはフェルミレベルには  $e_g$  軌道の電子が存在するが、トンネル障壁との界面の近傍では、結晶場の減少により  $t_{2g}$  軌道のエネルギーがフェルミレベルに近づいていることが明らかになっている。その結果、わずかなバイアス電圧の印加によって、電子の軌道が遷移することによってこのような現象が引き起こされたものと考えられる。これらの結果は、フェルミレベル近傍では、バイアス電圧により伝導に寄与する電子軌道を制御することができ、それにより、高効率な磁化制御ができる新たな可能性を示している。

### 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえると、状態密度を量子サイズ効果により離散化し、それらのエネルギーを人工的に設計したり、あるいはフェルミレベル近傍に複数の異なる軌道を有する高品質の単結晶強磁性ヘテロ界面を実現したりすることにより、電圧印加により、フェルミレベルをシフトさせることによって、磁化スイッチを誘起できる可能性がある。本研究では、このような手法により、磁化スイッチに必要な電圧値を「人工的」に制御して、超低消費電力磁化スイッチの実現を目指す。本研究により、将来的には磁化スイッチに必要な電力を無限小まで抑えられると期待される。

### 3. 研究の方法

半導体や酸化物からなる単結晶の強磁性ヘテロ構造を作製し、ヘテロ界面のフェルミレベル近傍に複数の互いに異なる電子軌道が存在する構造を探索し、低電力での磁化反転の実現を目指して研究を行った。

結晶成長は、すべて超高品質の薄膜が実現可能な分子線エピタキシー法を用いて行った。反射高エネルギー電子線回折を用いて高品質の表面が実現されていることを、また、透過型電子顕微鏡を用いて、原子レベルで急峻な界面を持つヘテロ接合が実現できていることを確認した。磁気トンネル接合の作製は、標準的なフォトリソグラフィやアルゴンミリング等を用いて行った。ペロブスカイト酸化物ヘテロ構造の作製に関しては、シャッター成長法と呼ばれる 1 層 1 層を化学量論比と結晶性を保ちながら成長する手法で成長を進め、原子レベルで急峻なヘテロ界面を得ることに成功した。以下の GaMnAs の成長については、格子定数が GaMnAs よりも大きな InGaAs バッファ層を導入して歪を印加することにより面直磁化 GaMnAs 薄膜を実現し実験に用いた。

### 4. 研究成果

- 高品質単結晶ペロブスカイト酸化物ヘテロ構造 LaSrMnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>/LaSrMnO<sub>3</sub> において、15 ~ 200 mV 程度の極低電圧かつ、 $10^{-2} \text{ A/cm}^2$  という現在のスピンドバイスで磁化反転に必要な電流密度の約 8 桁小さな電流密度で、磁化を膜面内で 90 度回転させることに成功した[L. D. Anh, T. Yamashita, H. Yamasaki, D. Araki, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya, "Ultralow-power orbital-controlled magnetization rotation using a ferromagnetic oxide interface", Phys. Rev. Applied (Letter) **12**, 041001 (2019).]. 本成果について理論的な検証を進めたところ、界面の結晶場の減少により、LaSrMnO<sub>3</sub> と SrTiO<sub>3</sub> の界面において  $e_g$  軌道と  $t_{2g}$  軌道が近接していることが明らかになった。外部磁場を面内の様々な方向に印加しながら測定した状態密度の異方性を、バイアス電圧を様々に変えて測定したところ、磁化回転が観測された電圧においては、その対称性が変化することが明らかになり、電子の軌道状態の変化が磁化反転を誘起していることが明らかになった。本成果については、プレスリリースを行い、日経プレスリリ

ー入、EE Times Japan、Optronics Online などにも取り上げられた。また、本研究に関して、5th Computational Chemistry (CC) Symposium -The Main Symposium of ICCMSE 2019-、Collaborative Conference on Materials Research (CCMR)、American Physical Society March Meeting 2020、American Physical Society March Meeting 2021 などから招待講演の依頼を受け、本研究を担当した Le Duc Anh 助教と協力して、講演を行った。

- ・ 強磁性半導体 GaMnAs の量子ヘテロ構造において量子効果を用いた磁化反転を誘起出来るか、検討を進めた。GaMnAs 量子井戸における明瞭な量子サイズ効果が観測され、電流電圧特性の2回微分特性において明瞭な振動現象が観測された。また、磁気異方性が変調されていることを示唆する磁場方位依存性が観測された(応用物理学会発表予定)。
- ・ オールエピタキシャル強磁性半導体 GaMnAs 単膜に電流を流すだけで、 $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 位の極めて小さな電流密度で磁化を反転できることを明らかにした[M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya and M. Tanaka, "Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet", Nat. Commun. **10**, 2590 (2019).]。電流を様々な結晶方位に流して、本低電力磁化反転現象の起源を探ったところ、この磁化反転が Dresselhaus 型のスピン軌道相互作用に起因していることが明らかになった。この効果は、結晶の反転対称性の破れに起因するもので、本研究の場合は GaMnAs に印加されている歪に起因しているものと考えられる。本成果報告においては、プレスリリースを行い、日経プレスリリース、テックアイ技術情報研究所、日本の研究.com、OPTRONICS ONLINE、大学ジャーナル、academist Journal、EE Times Japan などに取り上げられた。本成果については、国際学会である SPIE Nanoscience + Engineering (2019)(米国 サンディエゴ)で招待講演を行った。国際学会の一般講演としては、M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya, and M. Tanaka, "Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly-magnetized ferromagnetic semiconductor GaMnAs", 2019 Joint MMM-Intermag, (Washington D. C., USA, 2019 年 1 月 18 日)、M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya, M. Tanaka, "Highly efficient spin-orbit torque switching in a single GaMnAs thin film with perpendicular magnetic anisotropy", 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), E-6-05, (名古屋大学 2019 年 9 月 5 日) Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Highly efficiently spin-orbit torque magnetization switching in a perpendicularly magnetized ferromagnetic-semiconductor single layer: Damping like torque and field like torque", 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM), BC-08 (Las Vegas, USA, 2019 年 11 月 4-8 日) などの講演を行った。また、国内学会としては、第 80 回応用物理学会秋季学術講演会(2019.9)、第 24 回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-24 2019.9) 等で講演を行った。
- ・ さらに GaMnAs の膜厚を変えた一連の試料で同様の測定を行ったところ、膜厚が 15 nm の時に、スピントルク磁化反転現象においては世界最小である  $4.6 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> の電流密度で磁化を反転できることを明らかにした[M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, S. Ohya, and M. Tanaka, "Suppression of the field-like torque for efficient magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet", Nature Electronics **3**, 751-756 (2020).]。磁化反転においては、磁化を面に倒す作用をもつフィールドライクトルクを適切に制御することが重要である。GaMnAs 薄膜においては Mn 濃度の深さ方向の揺らぎにより、膜内に不均一な磁場が生じている。GaMnAs の膜厚を変えることにより、この電流誘起磁場の大きさが変化し、フィールドライクトルクを適切に打ち消すことができ、その結果として高効率の磁化反転が実現できたと考えられる。本研究により、物質の内部に大きなスピン軌道相互作用が存在し、かつ電流が不均一に流れる磁石物質を用いて、その膜厚を制御することにより、磁化反転の妨げとなりうるフィールドライクトルクを大幅に抑制できることが明らかになった。本研究は 40 K の低温で行ったが、それは GaMnAs の強磁性転移温度が室温以下であることが理由であり、本質的な問題ではない。室温で強磁性を示し、その内部に大きなスピン軌道相互作用が存在し、電流が不均一に流れる物質が存在すれば、同様の効果が室温で得られることが期待される。本研究により、今後、より低電力で磁化反転できる新たな材料開発および素子開発が加速していくものと考えられる。本成果の発表ではプレスリリースを行い、日経プレスリリース、日本の研究.com、UTokyo FOCUS、Nature Research Device & Materials Engineering Community、Optronics Online、日刊工業新聞などに取り上げられた。国際学会 SPIE Nanoscience + Engineering Spintronics XIV (オンライン)で 2021 年 8 月に招待講演を行う予定である。国際学会としては、M. Jiang, H. Asahara, S. Ohya and M. Tanaka, "Electric field control of spin-orbit torque switching in a spin-orbit ferromagnet single layer", American Physical Society March Meeting 2021, J36.00004, (Online, 2021 年 3 月 17 日) 国内学会としては、第 68 回応用物理学会春季学術講演会(2021 年 3 月)で発表を行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 L. D. Anh, T. Yamashita, H. Yamasaki, D. Araki, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultralow-power orbital-controlled magnetization rotation using a ferromagnetic oxide interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Applied (Letter)	6. 最初と最後の頁 041001/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.12.041001	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. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya and M. Tanaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 2590/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-10553-x	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 M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, S. Ohya, and M. Tanaka	4. 巻 3
2. 論文標題 Suppression of the field-like torque for efficient magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Electronics	6. 最初と最後の頁 751-756
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41928-020-00500-w	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16件（うち招待講演 8件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Ohya, L. D. Anh, T. Yamashita, H. Yamasaki, D. Araki, M. Seki, H. Tabata, and M. Tanaka
2. 発表標題 Ultra-low power bias-driven magnetization switching by quasi-Fermi level control at an interface of a perovskite-oxide-based magnetic tunnel junction
3. 学会等名 5th Computational Chemistry (CC) Symposium -The Main Symposium of ICCMSE 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinobu Ohya, Le Duc Anh, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Anomalous magnetic behavior observed at ferromagnetic perovskite-oxide interfaces and its application to efficient magnetization rotation
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Le Duc Anh, Takashi Yamashita, Noboru Okamoto, Hiroki Yamasaki, Daisei Araki, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
2. 発表標題 Efficient bias-driven magnetization control by orbital selection at a La <sub>0.67</sub> Sr <sub>0.33</sub> MnO <sub>3</sub> interface
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2020, R19.00001 (Virtual) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大矢忍, Le Duc Anh, 関宗俊, 田畑仁, 田中雅明
2. 発表標題 強磁性酸化物界面における超低消費電力磁化スイッチング
3. 学会等名 第3回 CSRN-Tokyo Workshop 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大矢忍, Le Duc Anh, 荒木大晴, 金田真悟, 関宗俊, 田畑仁, 田中雅明
2. 発表標題 オールエピタキシャルペロブスカイト酸化物ヘテロ構造を用いた新しいスピン機能の創製
3. 学会等名 スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点 2019年度 年次報告会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Le Duc Anh, Takashi Yamashita, Hiroki Yamasaki, Daisei Araki, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
2. 発表標題 Efficient bias-driven magnetic-field-free magnetization switching by orbital selection at a La <sub>0.67</sub> Sr <sub>0.33</sub> MnO <sub>3</sub> /SrTiO <sub>3</sub> interface
3. 学会等名 26th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Le Duc Anh, Takashi Yamashita, Noboru Okamoto, Hiroki Yamasaki, Daisei Araki, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
2. 発表標題 New functionalities at oxide interfaces: Ultralow-power magnetization switching by orbital selection and high-mobility two-dimensional hole/electron transport
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinobu Ohya, Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Efficient spin-orbit-torque magnetization switching in a spin-orbit ferromagnetic-semiconductor (Ga,Mn)As single layer
3. 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering Spintronics XIV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大矢忍、Le Duc Anh、金田真悟、荒井勝真、徳永将史、 関宗俊、田畑仁、田中雅明
2. 発表標題 オールエピタキシャル単結晶ヘテロ接合を用いた新スピン機能創成
3. 学会等名 物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya, M. Tanaka
2 . 発表標題 Highly efficient spin-orbit torque switching in a single GaMnAs thin film with perpendicular magnetic anisotropy
3 . 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
2 . 発表標題 Highly efficiency spin-orbit torque magnetization switching in a perpendicularly magnetized ferromagnetic-semiconductor single layer: Damping like torque and field like torque
3 . 学会等名 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Jiang, H. Asahara, S. Ohya and M. Tanaka
2 . 発表標題 Electric field control of spin-orbit torque switching in a spin-orbit ferromagnet single layer
3 . 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
2 . 発表標題 Spin-orbit torque magnetization switching in a perpendicularly magnetized ferromagnetic-semiconductor single layer: Damping like torque and field like torque
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 Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shoichi Sato, Shinobu Ohya and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Extremely efficient magnetization switching using Dresselhaus spin-orbit coupling by suppressing the filed-like term
3. 学会等名 第24回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-24)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Jiang, H. Asahara, S. Ohya, and M. Tanaka
2. 発表標題 Electric field control of spin-orbit torque magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet single layer
3. 学会等名 第25回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miao Jiang, Hirokatsu Asahara, Shinobu Ohya and Masaaki Tanaka
2. 発表標題 Electric field control of spin-orbit torque magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet (Ga,Mn)As single layer
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学 大学院工学系研究科 総合研究機構 大矢研究室  
<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/ohya/>

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
---------	---------