

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04536

研究課題名(和文) スピン軌道トルクRAMにおける新しい読み出しディスタート機構とその解決法の検討

研究課題名(英文) Study on new read-disturbance mechanism and its solution in Spin-Orbit Torque RAM

研究代表者

河原 尊之 (Kawahara, Takayuki)

東京理科大学・工学部電気工学科・教授

研究者番号：80416990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：提案している両方向読み出し方式SOT-RAM(10倍程度のディスタート低減可能)の実現に向け、材料パラメータ依存性、素子サイズ依存性、及びメモリセルアレイ抵抗依存性の検討を行った。いずれの材料パラメータ、素子形状でも提案方式のディスタート低減を確認できた。また、磁化渦を含む磁化状態解析から、自由層の左右の磁化にスピン流が作用して磁化が磁化渦を挟んで拮抗し合うことでディスタート低減を行っていることがわかった。更に、アレイ構造ではメモリセルの場所によって電流パスの抵抗が異なることの影響を調べた。この結果、1000個程度までは共通の配線に接続しても十分なディスタート低減を得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能なIoT時代に必須の理想的な不揮発性RAMとして、MRAMの開発が進んでいる。SOT-RAMは高速で耐久性、安定性に優れた次世代MRAMである。また、MRAMを採用することでコンピュータの構成要素をスタンバイ状態ではオフにして必要な時に瞬時に起動するノーマリーオフコンピューティングを実現できることから、より高速で信頼性が高く、エネルギー効率の優れたデバイスの開発につながる。このように、次世代の磁気メモリとして注目されるSOT-RAMに固有の課題を見出し、解決案を提示した本研究は、SOT-RAMの製品化に必須の技術であり、今後の応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to realize the proposed bidirectional reading method SOT-RAM (which can reduce the disturbance by about 10 times), we investigated the material parameter dependence, element size dependence, and memory cell array resistance dependence. We were able to confirm the reduction of the proposed method for any material parameter and element shape. In addition, from the magnetization state analysis including the magnetization vortex, it was found that the spin current acts on the left and right magnetization of the free layer, and the magnetizations antagonize each other across the magnetization vortex to reduce the disturbance. Furthermore, in the array structure, the effect of different current path resistance depending on the location of the memory cell was investigated. As a result, it was found that sufficient disrupt reduction can be obtained even if up to about 1000 wires are connected to common wiring.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：MRAM ディスタート低減 SOT-MRAM 両方向読み出し

## 1. 研究開始当初の背景

製品化が進むスピン注入メモリ (STT-RAM) の次世代として、スピン軌道相互作用を用いて書き込み電流を一桁低減できるスピン軌道トルク RAM (SOT-MRAM) の研究が注目されている。この技術では、読み出しは書き込みとは電流経路が異なるためディスタートも小さいと従来言われてきた。

しかしながら、本研究開始前に、この SOT-MRAM の読み出し時において、新しい誤動作 (読み出しディスタート) が起こることを見出し、それを一桁以上低減する方式を提案していた。新しい誤動作とは、読み出し時の重金属層電流によりスピン軌道相互作用が起こり、これがスピン流が発生し、誤書き込みが起こるといったものである。提案した低減方式とは、読み出し時の電流経路を重金属層の両側に向かうようにし、スピン流は発生するが向きが違うスピンを発生させて相殺し誤書き込みを起し難くする方式である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、この読み出しディスタート特性とその低減法の詳細検討をシミュレーションで行うことである。具体的には、本研究期間中に以下の3点についての検討を目的とした。

1. 材料 (磁化容易軸) 依存性 (2019 年度)、
2. 素子寸法依存性 (2020 年度)、
3. メモリアレーとしての寄生抵抗依存性 (2021 年度)。

## 3. 研究の方法

MRAM の読み出しディスタートの計算は、量子系に基づく確率動作を計算機実験として行う類の計算である。すなわち、時間と電流量を固定しては電流を複数回流し、何回が反転したかを数え、反転確率の電流量と印加時間依存性を調べる。

このシミュレーション手法で MRAM のチップとしての不良率を定量的に評価できる技術を持つ研究室は世界的にも少ない。

本研究では、上記手法を用いたシミュレーションによって、材料選択指針として磁化容易軸依存性の検討と、メモリセル設計及びスケージングの指針として素子サイズ依存性の検討と、高集積化アレー回路設計の指針としてメモリセルアレー抵抗依存性の検討を行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 SOT-MRAM の新読み出し方式

本研究の開始前に、提案した方式を図 1(b) に、従来方式の図 1(a) と共に示す。提案方式では、読み出し時に電流は重金属層において両側方向に流れている。重金属の両方向に同じ電流を流すことで、スピンホール効果によって逆向きのスピン流を発生させて、このスピン流のスピンとしての大きさを打ち消し合うことで、図 1(a) で起こっていた読み出しディスタートを無くすることができる。

### (a) 従来の読み出し経路 (b) 両方向読み出し方式

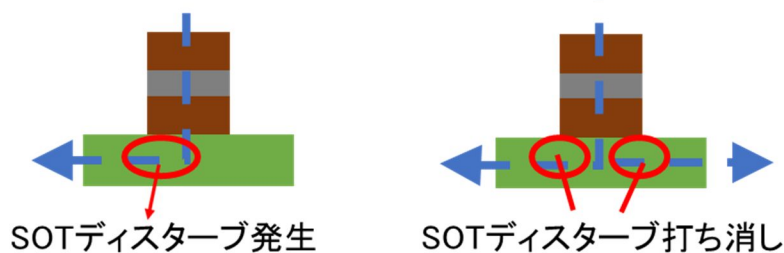


図 1 (a) 従来の SOT-MRAM 読み出し経路 (b) 提案した SOT-MRAM 読み出し経路

### 4.2 両方向読み出し方式 SOT-MRAM の材料依存性

提案した両方向読み出し方式 SOT-MRAM の実現にあたって、材料指針として強磁性材料に対する読み出しディスタート低減効果を評価した。SOT-MRAM 素子の強磁性層に、主要な強磁性体として磁気異方性の特徴が異なるパーマロイ、鉄、コバルトのパラメータを用いて比較する。鉄は立方晶で立方異方性、コバルトは六方晶の結晶構造で強い一軸異方性を示し、パーマロイは代表的な軟磁性材料であり磁気異方性エネルギーがかなり小さい。各強磁性材料について従来経路の SOT-MRAM および提案方法の読み出し電流に対する磁化反転確率を図 2 に示す。このとき読み出し時間は 5ns である。

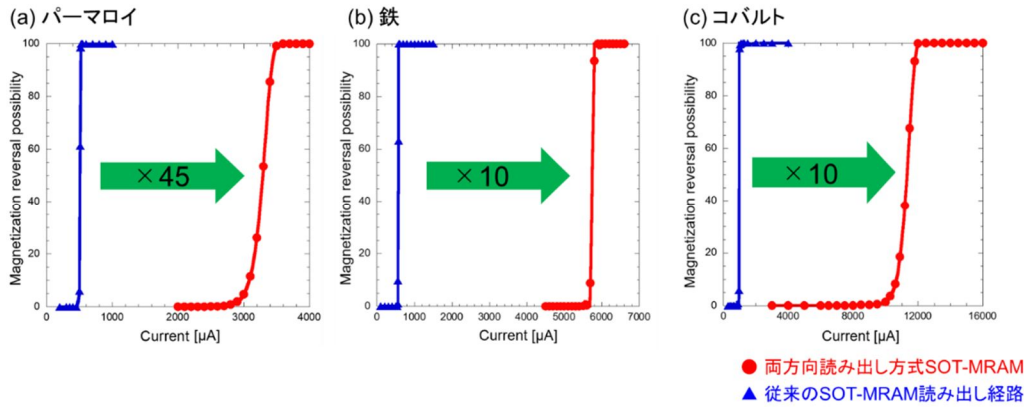


図2 両方向読み出し方式 SOT-MRAM における材料依存性

図2より、検討した3種の強磁性材料全てについて、両方向読み出し方式の読み出しディスタープは、従来方式と比較して一桁以上低減している。したがっていずれの強磁性材料でも提案方式のディスタープ低減は有効である。また、強磁性層の磁気異方性の軸が多軸かの違いは関係なく、磁気異方性エネルギーに依存して磁化反転に要する電流が増加していた。提案方式のディスタープ低減の効果としてはパーマロイのみ45倍と大きく効果が見られたが、これは軟磁性材料であるパーマロイの保磁力の小ささが原因だと考えられる。強磁性層の保磁力が小さいと、フリー層はスピン流の影響を受けやすく磁化反転が容易に起こる。したがって従来の読み出し経路では読み出しディスタープが発生しやすい。一方、提案方式では読み出しディスタープを打ち消す前提から、特別に保磁力の大小による影響は受けないと考えられる。

#### 4.3 両方向読み出し方式 SOT-MRAM の素子サイズ依存性

両方向読み出し方式 SOT-MRAM の実現に向けて、メモリセル設計及びスケールングを目標として、様々な素子サイズに対する読み出しディスタープ低減効果を評価した。この検討を必要とする理由としてスピン拡散長の影響があると当初は考えた。スピンは十分長い距離を移動すると、スピン軌道相互作用や電子間相互作用によってスピンの保存されなくなる。この状態が生じる距離をスピン拡散長という。提案方式では重金属層の左右で逆向きのスピン流を作り出し、それを互いに打ち消し合うことでディスタープ低減を発揮するが、素子に流す電流方向である素子幅  $X$  がある程度長くなると、スピン拡散長の限界によりこのスピン流の打ち消し合いに限界が生じると考えられる。すなわち提案方式では、スピン拡散長によって読み出しディスタープ低減効果を減じてしまう可能性がある。ここで固定層の磁化の向きを  $Y$  軸とし、磁性体膜の面内を  $X$ - $Y$  とする。これに垂直に  $Z$  軸とする。提案方式の素子サイズの限界を調べるため、まず磁化反転電流に対する固定層の磁化の向きと垂直な素子幅  $X$  依存性を評価した。

素子幅  $Y=30\text{nm}$  と固定し、素子幅  $X=30, 45, 60, 90, 120, 150, 180\text{nm}$  に対する磁化反転確率を求めた。その結果から従来の読み出し経路および提案方式について各素子幅に対する磁化反転電流を求め、図3に示した。続いて、素子幅  $Y$  依存性については素子幅  $X=30\text{nm}$  に固定し、素子幅  $Y=30, 45, 60, 90, 180\text{nm}$  のときの磁化反転確率を求めた。その結果から従来の読み出し経路および提案方式について各素子幅に対する磁化反転電流を求め、図4に示した。

図3において、青で示す点は従来の読み出し経路における磁化反転電流、赤で示す点は提案方式の磁化反転電流を示しており、どの素子幅についても提案方式の磁化反転電流が大きいことから、提案方式で読み出しディスタープが低減されたことがわかった。従来経路の結果に着目すると、磁化反転電流は  $X < 90\text{nm}$  では比例して大きくなり、 $X > 90\text{nm}$  ではほぼ一定の大きさを示した。一方提案方式の磁化反転電流は  $X < 90\text{nm}$  では反比例して小さくなり、 $X > 90\text{nm}$  ではほぼ一定の大きさとどまった。ここでシミュレーションで磁化反転の様子を観察すると、提案方式では必ず自由層の左端から磁化反転が起こることが確認できた。提案方式のディスタープ低減の際に自由層に発生していた磁化渦を含む磁化状態から、自由層の左右の磁化にスピン流が作用して磁化が磁化渦を挟んで拮抗し合うことでディスタープ低減を行っていることがわかった。重金属層の左方向へと流れる電流はスピンホール効果によって自由層の初期磁化方向と反対の  $+y$  方向のスピン流を生成するため、左側から先に磁化反転が起こる。提案方式では素子幅  $X$  が長くなるほど、自由層の端で左右の磁化を打ち消しづらくなる。そのため端から磁化反転が起こりやすくなり、左端から磁化反転が起こる。これは素子幅  $X$  に依存して提案方式の磁化反転電流が小さくなっている理由であり、スピン拡散長が影響したと考えられる。従来経路と提案方式の結果が違ったのはこれが理由だと考えている。

図4においては、どの素子幅についても提案方式の磁化反転電流が大きいことから、提案方式で読み出しディスタープ低減を確認できた。従来経路・提案方式共に磁化反転電流は比例して大きくなり、素子幅  $Y$  に依存していた。閾値電流密度の理論式と一致して、素子幅  $Y$  に比例している。素子幅  $Y$  が大きくなると形状磁気異方性が働いて自由層の磁化の向きはより強固になるため、この結果が示すように磁化を切り替えるのに必要な電流は大きくなる。

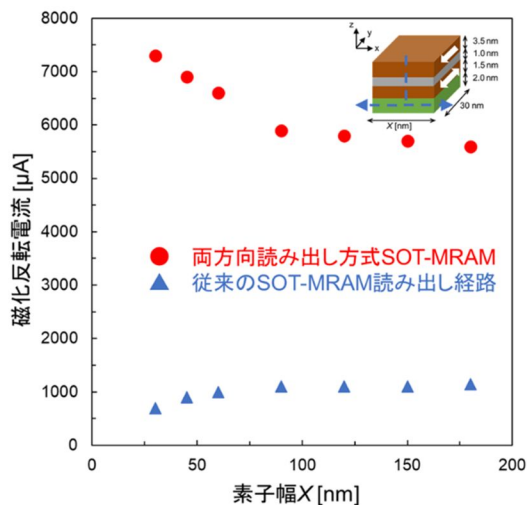


図3 磁化反転電流の素子幅 X 依存性

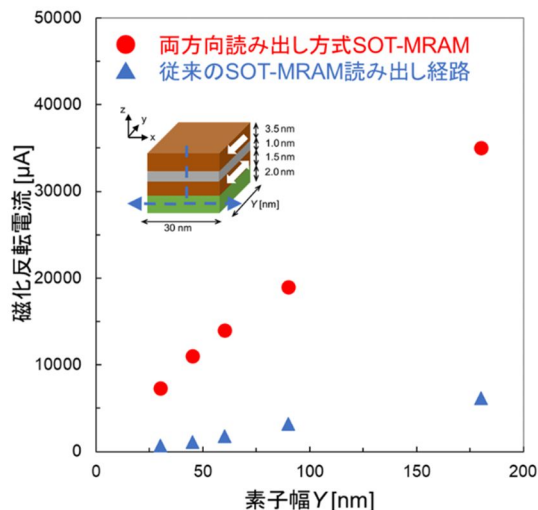


図4 磁化反転電流の素子幅 Y 依存性

#### 4.4 両方向読み出し方式 SOT-MRAM のメモリセルアレー抵抗依存性

提案方式は電流を重金属層の両方向に流し、重金属層左右に同じだけのスピンの生成を行ってディスタブ低減を行うことから、重金属層左右に流れる電流の大きさは等しいことを前提としている。しかし図5のようなアレー構造を考えると、重金属層の両サイドは2つの異なるビット線へと繋がっている。メモリセルの場所によっては2つの電流経路の配線抵抗が大きく異なってしまう恐れがある。図5に示すように、分割されたアレーにおいて、ひとつのアレーにはビット線方向に  $n$  個のメモリセルが含まれ、また2つのビット線の電源が逆位置に設置するワーストケースを想定した。ビット線のシート抵抗値を  $170\text{m}\Omega/\text{sq}$  とし、MOSのオン抵抗は理想スイッチとして無視して考えた。セル数を  $n$ 、一つのセル長を  $1[\mu\text{m}]$  とすると全体の配線長  $L[\mu\text{m}]$  は  $L=nl$  で表すことができる。青の点線で囲まれたメッシュ部分が一つのメモリセルを示す。

このアレー抵抗依存性を評価するために、重金属層の左右の抵抗値が  $c$  [%]: 100% になるようにその都度電流経路を変えて検証した。この比率を重金属層の左右に流れる電流比として、従来の読み出し経路および提案方式について電流比  $c$  に対する磁化反転電流を求め、結果を図6に示した。SOT-MRAM は  $X=90\text{nm}$ 、 $Y=30\text{nm}$  の素子サイズを用いている。

提案方式は従来経路の10倍以上の磁化反転電流で十分にディスタブ低減効果を発揮したとすると、図6に示す黒線より上の磁化反転電流で有効なメモリセルとなる。電流比  $c$  が 85~90% 以上のとき有効である。したがって両方向読み出し方式は、重金属層に繋がる2つの配線抵抗比は 85~90:100 までギャップがあっても確実にディスタブ低減する。配線幅に  $W=100, 200, 400\text{nm}$  の3つを適用し配線抵抗を算出した結果、配線抵抗比が 85~90:100 では表1に示すメモリセル数で有効なアレー構造を作ることができることがわかった。提案方式では配線幅 400nm ではひとつのアレーについて1000個程度までメモリセルを並べることができる。

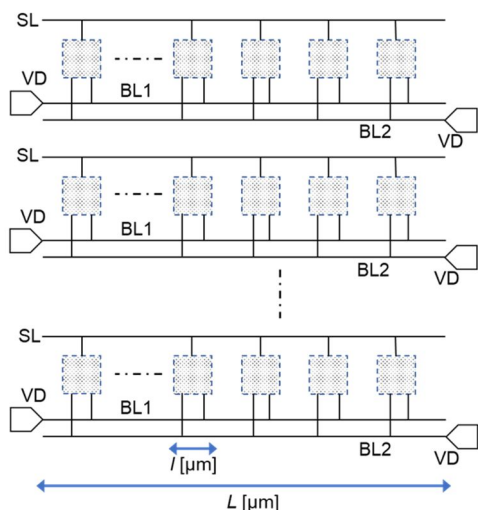


図5 両方向読み出し方式のアレー構造

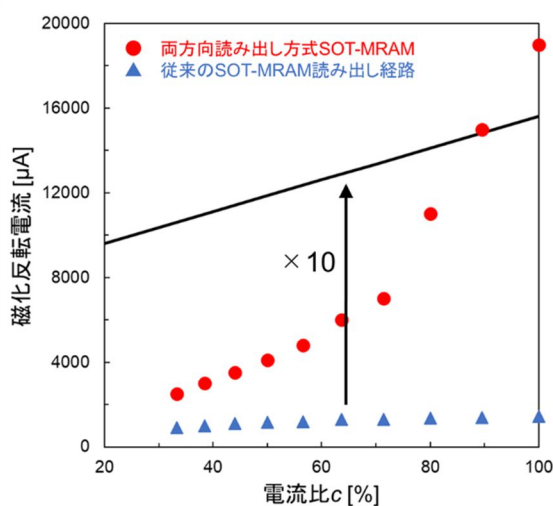


図6 左右に流れる電流の比に対する磁化反転電流

表1 両方向読み出し方式のアレー構造で有効なセル数

配線幅 $W$ [nm]	メモリセル数 $n$
100	232 ~ 349
200	464 ~ 698
400	928 ~ 1396

#### 4.5 まとめ

SOT-MRAM の読み出し信頼性を向上させる新たな読み出し経路を持つ両方向読み出し SOT-MRAM により、磁化反転電流としては従来経路より 10 倍程度のディスタート低減を可能となった。この両方向読み出し方式 SOT-MRAM の実現に向け、材料依存性、素子サイズ依存性とメモリセルアレー抵抗依存性の検討を行った。

検討した 3 種の強磁性材料全てについて、両方向読み出し方式の読み出しディスタートは一桁以上低減していた。したがっていずれの強磁性材料でも提案方式のディスタート低減は有効だった。パーマロイのみ 45 倍と大きく効果が見られたが、これは軟磁性材料であるパーマロイの保磁力の小ささが原因だと考えられる。

素子サイズ依存性の検討について、検証したいずれの素子形状でも提案方式のディスタート低減を確認できた。しかし素子形状によってディスタート低減の効果は大きく異なった。磁化反転電流は SOT-MRAM の閾値電流密度の理論式と一致する結果になると考えられたが、スピンの向きである  $Y$  方向の素子サイズ依存性のみが理論式通りの結果となり、他の形状では理論式に反する結果になった。電流方向に素子サイズが大きくなると提案方式ではスピン流の打ち消し合いが起こりづらくなり、ディスタート低減効果が減少した。

回路設計の面から両方向読み出し方式 SOT-MRAM のアレー構造に関する検討を行った。ビット線の電源が逆位置のワーストケースを想定することで提案方式の読み出し信頼性を担保した場合に、ひとつのアレーについて 1000 個程度のメモリセル数を並べることが可能だと分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yuwa Kishi, Akihiro Yamada, Mengnan Ke, and Takayuki Kawahara	4. 巻 58
2. 論文標題 Examination of Magnetization Switching Behavior by Bi-Directional Read of Spin-Orbit-Torque MRAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3154025	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akihiro Yamada, Yuwa Kishi, and Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Bi-directional read method to reduce SOT-specific read disturbance for highly reliable SOT-MRAM
3. 学会等名 IEEE 14th International Memory Workshop (IMW 2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiro Yamada, Yuwa Kishi, Mengnan Ke, Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Magnetization Switching Behavior in Bi-directional Read of Spin Orbit Torque MRAM
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuwa Kishi, Akihiro Yamada, Mengnan Ke, Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Evaluation of Device Size and Array Resistance Dependence in Read Disturbance Reduction Effect by Bi-directional Read SOT-MRAM
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiro Yamada, Yuwa Kishi, Mengnan Ke, Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Examination of Magnetization Switching Behavior by Bi-directional Read of Spin Orbit Torque MRAM
3. 学会等名 IEEE/AIP 2022 Joint MMM-Intermag Conference (2022 Joint) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuwa Kishi, Akihiro Yamada, Mengnan Ke, and Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Evaluation of Read Disturbance Reduction Effect by SOT-MRAM Bi-directional Read on Device Size Dependence
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2021 (Intermag 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuwa Kishi, Keisuke Tabata, Mengnan Ke, and Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Evaluation of Read Disturbance Reduction Effect by Bi-directional Read on Ferromagnetic Material Properties of SOT-MRAM
3. 学会等名 IEEE/AIP 2020 Magnetism and Magnetic Materials Conference (MMM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Kawahara
2. 発表標題 Annealing Processing and Emerging Non-volatile Memory for AI Chips
3. 学会等名 33rd IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

・実スピンと電子回路スピンによる低電力・高性能コンピュータ  
<https://www.youtube.com/watch?v=Nz179x-K9Qo>

・プレスリリース 2022.03.17  
スピン軌道トルクメモリに固有の読み出し障害を克服する新たな読み出し方式を開発  
~超低消費電力型デバイス実現に向けた新たな一歩~  
[https://www.tus.ac.jp/today/archive/20220317\\_3801.html](https://www.tus.ac.jp/today/archive/20220317_3801.html)

・プレスリリース英文 2022.03.17  
Making Memory Serve Correctly: Fixing an Inherent Problem in Next-Generation Magnetic RAM  
[https://www.tus.ac.jp/en/mediarelations/archive/20220317\\_3801.html](https://www.tus.ac.jp/en/mediarelations/archive/20220317_3801.html)

・スピン軌道トルクRAM (磁気抵抗メモリ) 両方向読み出し方式の提案と磁化スイッチングふるまい解明  
[https://youtu.be/1-ffzDoq\\_z0](https://youtu.be/1-ffzDoq_z0)

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