

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18084

研究課題名(和文)磁気トンネル接合を用いたナノ磁性体の磁化反転機構に関する研究

研究課題名(英文)A study on magnetization reversal of nano-magnet using magnetic tunnel junctions

研究代表者

佐藤 英夫 (Sato, Hideo)

東北大学・スピントロニクス学術連携研究教育センター・准教授

研究者番号：80599514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：直径20nm程度の磁気トンネル接合を用いて、ナノ磁性体の磁化反転機構に関する研究を行った。特にナノ磁性体の磁化反転機構と微細加工条件との関係について研究を進めた。その結果として、微細加工条件に依存してナノ磁性体の磁化反転の様子が変わることが明らかになった。また、マイクロマグネティックシミュレーションを用いることで、微細加工条件に依存して変化する磁化反転の様子が、素子端部に変質層が形成されることを仮定することで説明できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Magnetization reversal of nanomagnet has been studied by using magnetic tunnel junction with junction diameter of about 20 nm. In particular, the relationship between the magnetization reversal and device-processing conditions was studied. It was revealed that magnetization reversal of the nanomagnet changes depending on the device-processing conditions. It was also revealed that the change in the magnetization reversal can be explained by introducing reduction of magnetic anisotropy at the vicinity of the device edge by using micromagnetic simulation.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁化反転 磁気トンネル接合

## 1. 研究開始当初の背景

磁化反転現象は、強磁性体において観測される最も基本的な物理現象の一つであり、ハードディスクドライブや次世代のメモリである磁気メモリなどでは、情報を書き換える手段となる。強磁性体の磁化反転で最も単純なモデルは、全ての磁気モーメントが一斉に反転するものである。一般に磁性体の磁化は、磁気異方性によってその向きを拘束されているために、磁化を反転させる場合には、あるエネルギー障壁を越える必要がある。このエネルギー障壁は、記憶素子などの応用技術では、情報保持時間を決める。応用技術にとって高い注目を集めている磁化が面直方向を向く垂直磁化容易軸を有する場合には、磁化が上下を向いている場合にエネルギーが最も低く、磁化が真横を向いた場合にエネルギーが最も高くなり、エネルギー障壁は磁気異方性エネルギー密度  $K$  に磁性体の体積  $V$  を乗じた  $KV$  となる。しかし、実験的にエネルギー障壁を見積もるとその値よりもかなり小さい値が得られる[1]。これは、全磁気モーメントが一斉に反転する反転機構ではなく、例えば局所的な領域における磁気モーメントが最初に反転し、その後、磁気モーメントの向きが異なる境界領域に形成される磁壁と呼ばれるものが伝搬することで磁化反転が完了することに由来する。この場合には、局所的に反転した領域の体積  $V^*$  がエネルギー障壁を決めると予測され、エネルギー障壁は  $KV^*$  で表される。ここで局所的な領域のサイズは、材料の特性により決められることが知られている。上記のようなモデルに基づく、デバイスサイズが局所反転領域のサイズよりも大きい場合にはエネルギー障壁はほぼ一定であり、デバイスサイズが局所反転領域のサイズよりも小さくなるとエネルギー障壁が減少することが予測される。実際に参考文献[2]で報告されている実験結果を見ると、あるデバイスサイズよりも小さくなるとエネルギー障壁が減少していることが観測されている。以上のことから、デバイスサイズの微細化に伴い、磁化反転機構が変化することが示唆される実験結果は得られているものの、磁化反転機構を議論するためには、反転磁界に関する議論が不可欠であり、その部分に関しては未解明な部分が多く残されている。また、上述したエネルギー障壁の評価に関しても、磁化反転機構を理解していないと正しい値が得られないことから、磁化反転機構を理解することは、エネルギー障壁の評価にも極めて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、特に微細なデバイスサイズの磁気トンネル接合を作製し、その磁化反転機構を詳細に調べることによって、ナノ磁性体の磁化反転機構を明らかにする。これまでナノ磁性体の磁化反転機構に関する研究が多く行われてきたが、未だに未解明の部分が多

く残されている。特に、ナノスケールのデバイスを作製する際に必要とされる微細加工と磁化反転機構の関係については、その重要性は益々高まっているにも関わらず、理解が進んでいない状況である。本研究を通して、微細磁性体の磁化反転機構とプロセス条件の関係が明らかにされる。これらの知見は、磁化反転という磁性体に関する最も基礎的な物理に対する理解の深化に供されると共に、磁化反転現象を用いる応用技術にとっては、デバイス特性を支配する磁化反転機構に立脚してデバイス設計することにより、デバイス特性の向上にも活かされる。

## 3. 研究の方法

本研究では、ナノ磁性体の磁化反転機構を明らかにすることを目的に、プロセス条件が異なる 2 種類の磁気トンネル接合を作製し、その磁化反転機構を理解するために、保磁力の印加磁界角度依存性を測定した [3]。磁気トンネル接合の積層構造は、基板側から、 $\text{Ta}(5)/\text{Pt}(5)/[\text{Co}(0.34)/\text{Pt}(0.4)]_x6/\text{Co}(0.34)/\text{Ru}(0.4)/[\text{Co}(0.34)/\text{Pt}(0.4)]_x2/\text{Co}(0.34)/\text{Ta}(0.3)/\text{CoFeB}(1)/\text{MgO}/\text{CoFeB}(1.5)/\text{Ta}(5)/\text{Ru}(5)$  である。括弧内の数値は、設計膜厚で単位は  $\text{nm}$  である。 $\text{MgO}$  層の上の  $\text{CoFeB}$  層が自由層であり、 $\text{MgO}$  層より下の層で  $\text{Pt}$  バッファの上までが参照層である。電子線リソグラフィ、反応性イオンエッチング、イオンミリングを用いて、同積層膜を直径  $20 \text{ nm}$  程度の磁気トンネル接合に加工した。磁気トンネル接合は、作製後に  $300$  度で  $1$  時間、真空中で面直方向に  $0.4 \text{ T}$  の磁界を印加しながら熱処理を行った。

2 種類のプロセス条件で作製した磁気トンネル接合は、1. ミリング角度を  $0$  度に固定し、 $\text{MgO}$  障壁でミリングを止めたステップ構造、2. ミリング角度を  $40$  度に固定し、 $\text{Pt}$  バッファまでミリングを行った標準構造、を有する [4]。 $\text{MgO}$  障壁が  $\text{Ar}$  ミリングに曝されることで  $\text{CoFeB}/\text{MgO}$  構造の磁気異方性が劣化することが知られている [5]。また、 $\text{MgO}$  障壁でミリングを止めることで、参照層のサイズが自由層よりもかなり大きくできるために、参照層からの漏洩磁界の影響を低減できる。つまり、2 つの構造を有する磁気トンネル接合の特性を比較することで、参照層からの漏洩磁界とイオンミリングによる変質層が磁気トンネル接合の特性に与える影響を明らかにすることができる。

## 4. 研究成果

初めにステップ構造を有する磁気トンネル接合素子の抵抗—磁界曲線を様々な印加磁界角度で測定した結果を図 1 に示す。測定時の温度は、 $150 \text{ K}$  に固定した。いずれの印加磁界角度においても、ある磁界で低抵抗状態と高抵抗状態の間を遷移することが分かる。両状態を遷移する磁界から保磁力を決め、それと磁界印加角度を用いることで保磁力

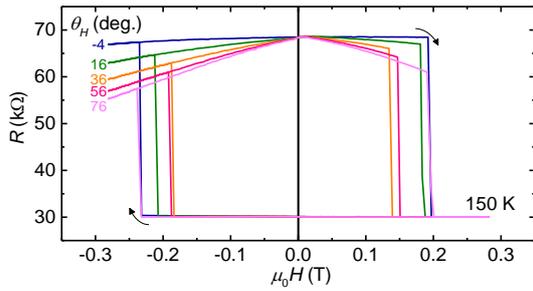


図1 直径 20 nm 程度のステップ構造を有する CoFeB/MgO 垂直磁化磁気トンネル接合の抵抗—磁界曲線の測定結果。色の違いは、印加磁界角度が異なる。測定は、150 K で行った。

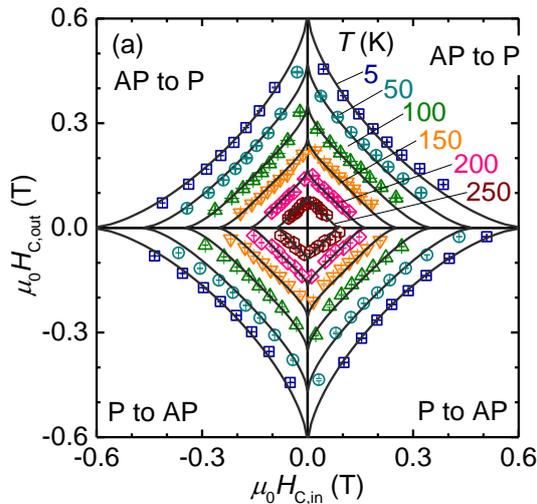


図2 直径 20 nm 程度のステップ構造を有する CoFeB/MgO 垂直磁化磁気トンネル接合の保磁力の印加磁界角度依存性の結果を直交座標で示した結果。色の違いは、測定温度の違いに対応する。図中のシンボルは実験結果で、実線はフィッティングの結果。

の印加磁界角度依存性を測定した。図2には、同構造の磁気トンネル接合の保磁力の印加磁界角度依存性の結果を直交座標形式で示した。色の違いは、測定温度の違いに対応する。実験結果はシンボルで示している。最も低い温度で測定した結果は、アステロイド曲線に酷似しており、一斉磁化反転モデルで磁化が反転していることが示唆される。温度上昇に伴い、アステロイド曲線の形状から離れていくことが分かる。温度上昇に伴う熱擾乱の影響を考慮した保磁力の印加磁界角度依存性[6]を実験結果にフィットした結果を図中の実線で示す。いずれの測定温度における実験結果もフィッティングで再現できていることが分かる。また、得られた磁気異方性の温度依存性の結果は、これまでの報告と一致していることが確認された。以上の事から、ステップ構造を有する直径 20 nm 程度の磁気トンネル接合では、一斉磁化反転が生じていることを明らかにした。次に、標準構造を有する直径 20 nm 程度の磁

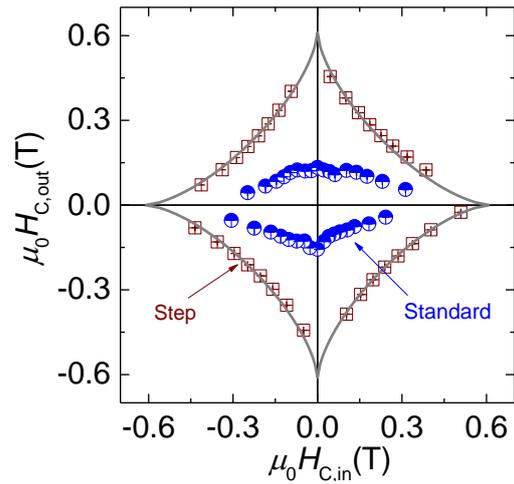


図3 直径 20 nm 程度のステップ構造と標準構造の保磁力の印加磁界角度依存性の結果。測定温度は 5 K で固定した。

気トンネル接合において、保磁力印加磁界角度依存性を測定し、同様の形式で纏めて比較した結果を図3に示す。ほぼ同じサイズの磁気トンネル接合を測定しているにも関わらず形状が大きく異なることが分かる。この原因を理解するために、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。冒頭に述べたように両構造では、参照層からの漏洩磁界の分布が大きく異なり、またデバイスエッジ部の変質層の影響が異なると予見される。シミュレーションを行った結果、参照層からの漏洩磁界はほとんど影響を及ぼしていないこと、標準構造でエッジ部に磁気異方性が小さくなっている部分を導入することで実験結果に近い結果が得られることを明らかにした。以上の結果は、学会発表①～③で報告すると共に、学術論文①で纏めた。

本研究では、ここで得られた知見を活かして、両構造における電流誘起磁化反転特性を調べることで、プロセス条件と応用上重要となる電流誘起磁化反転特性の関係も調べた。その結果については、現在、学術論文として纏めている段階である。

#### 参考文献

- [1] H. Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 042501 (2011).
- [2] H. Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 062403 (2014).
- [3] J. Igarashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **111**, 132407 (2011).
- [4] K. Miura *et al.*, Symp. VLSI Technol., Dig. Tech. Pap. **2011**, 214.
- [5] M. Hayashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100**, 192411 (2012).
- [6] W. F. Brown, Phys. Rev. **130**, 1677 (1963).
- [7] M. P. Sharrock and J. T. McKinney, IEEE Trans. Magn. **17**, 3020 (1981).

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 1 件)

J. Igarashi, J. Llandro, H. Sato, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetic-field-angle dependence of coercivity in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis," Appl. Phys. Lett. 査読有, Vol. 111, 132407, 2017  
DOI: 10.1063/1.5004968

[学会発表] (計 5 件)

- ① J. Igarashi, J. Llandro, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno, "Out-of-plane field dependence of switching current in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis at low temperature," 62nd Magnetism and Magnetic Materials (MMM), ED-12, Pittsburgh, PA, Nov. 6<sup>th</sup> - 10<sup>th</sup>, 2017.
- ② J. Igarashi, J. Llandro, H. Sato, S. Fukami, and H. Ohno, "Dependence of switching current on out-of-plane field in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis at low temperature," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 8a-A413-6, 福岡, Sep. 5<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup>, 2017.
- ③ J. Igarashi, E. C. I. Enobio, J. Llandro, H. Sato, S. Fukami, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetic field angle dependence of coercivity in a nano-scale CoFeB-MgO magnetic tunnel junction with perpendicular easy axis at various temperatures," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 14p-P10-39, 横浜, Mar. 14<sup>th</sup> - 17<sup>th</sup>, 2017.
- ④ J. Igarashi, E. C. I. Enobio, J. Llandro, H. Sato, S. Fukami, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetic field angle dependence of switching field in CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis at low temperature," 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, G-3-03, Tsukuba, Sep. 26<sup>th</sup> - 29<sup>th</sup>, 2016.
- ⑤ J. Igarashi, E. C. I. Enobio, H. Sato, S. Fukami, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetic field angle dependence of switching field in CoFeB-MgO magnetic tunnel junction with perpendicular easy axis," 第 35 回電子材料シンポジウム, Th1-23, 守山, July.

6<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup>, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 英夫(SATO, Hideo)

東北大学・スピントロニクス学術連携研究教育センター・准教授

研究者番号：80599514

(2) 研究協力者

五十嵐 純太 (IGRASHI, Junta)