

平成 27 年 9 月 16 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820127

研究課題名(和文) ラッシュバ効果局所制御リング状磁性細線による循環型記録磁区電流駆動メモリ原理検証

研究課題名(英文) Current driven domain wall motion of the reflux type magnetic wires with symmetric and asymmetric magnetic wire

研究代表者

バンド(Bang, Do)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：40624804

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)：磁性細線上の磁壁の電流駆動において、ラッシュバ効果、スピンホール効果、ジャロシンスキー守谷効果などの界面効果が重要であり、Tb/Co多層膜上下層のPt層膜厚を変えた非対称構造磁性細線を作成し、電流による磁壁駆動を詳細に調べた(JAP2本に論文掲載)。昨年はSiO<sub>2</sub>層とPt層で非対称構造を作成したが、作成が複雑になり良好な還流磁性細線を作成できなかった。しかし、本年度上記Pt層の厚みの異なる構造を利用することで簡便に還流型磁性細線を作成することができた。この対称、非対称切り替え部での磁壁移動は素直に動くことを偏光顕微鏡観察で確認することができた。今後は、この動作安定性を向上する必要がある。

研究成果の概要(英文)：In the current driven domain wall motion on the magnetic wire, Rashba effect, spin Hall effect, Dzyaloshinskii Moriya effect are very important to control the domain wall. To create a reflux type magnetic wires, it is necessary to make a symmetrical structure and an asymmetric structure in the magnetic nanowire. When Pt and SiO<sub>2</sub> layers were used for the asymmetric structure, the domain wall motion at connecting part between the symmetric and the asymmetric wire of the reflux type magnetic wires did not move smoothly. It is considered due to the difference in level of the switching part. To avoid the problem, 2nm Pt layer and 5nm Pt layers were used for the asymmetric part. In this case, domain wall can move smoothly at the switching part of the new type reflux type magnetic wires. In the future, it is necessary to confirm the operation stability of the current driven domain wall motion.

研究分野：工学

キーワード：還流型磁性細線 磁壁電流駆動 スピンオービトロニクス 希土類遷移金属合金 対称・非対称構造  
スピンホール効果 ジャロシンスキー守谷効果 ラッシュバ効果

### 1. 研究開始当初の背景

IT 技術の急速な進展により、扱うデータ量は爆発的に増加しており、これに伴って IT 機器用電力量の急増が問題化している。半導体メモリは情報を電荷で蓄えるが、電荷はすぐに自然放電するので常に情報保持のために電力を必要とする。そこで、情報を永久に蓄えられる磁荷を情報記録媒体とする MRAM の研究が加速している。しかし、MRAM はメモリ構成が非常に複雑なため高コストである。そこで、IBM では MRAM の磁性体を磁性細線に伸ばした Racetrack memory を提案した。これは電子のスピントルクを利用して電流により磁気情報を駆動できるため 1 トランジスタの扱えるビット数が増え、ビットコストを大幅に低減できる。しかし、IBM は小さな外部磁界で容易に磁壁を制御できる FeNi 磁性細線で Racetrack メモリを駆動してみたが、磁壁駆動に必要な臨界電流密度 ( $J_c$ ) は  $1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$  と非常に大きいことを報告している。仮に、 $J_c$  を低減できても FeNi の保磁力は小さくメモリとしては利用できない。

そこで、当研究室では保磁力が大きく磁壁は磁界で動かないが、電流では容易に磁壁を駆動できるアモルファス TbFeCo 合金で磁性細線を作成し、 $J_c$  低減を大幅に低減できた。この電流による磁壁駆動の観察結果を図 1 に示した。この図からわかるように TbFeCo 上下層を Pt とした対称構造の場合には、電子のスピントルク効果で磁壁は電流と逆向きに動き、片側を SiO<sub>2</sub> とした非対称構造では Pt からのジャロシンス

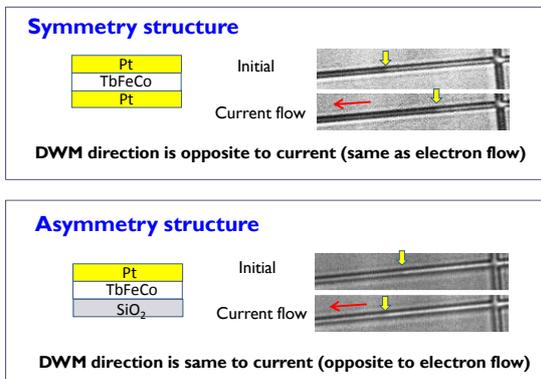


図 1 対称、非対称構造を有する TbFeCo 磁性細線における電流磁壁駆動の偏光顕微鏡観察結果

キー守谷効果やスピンホール効果により磁壁は電流方向に動くことを見出した。

### 2. 研究の目的

IBM の Racetrack メモリでは、図 2(a)に示すように電流で磁壁列を駆動しながら磁性細線に記録ヘッドで記録を行い、図 2(b)のように記録データを電流で駆動しながら再生ヘッドで読み出す。したがって、記録に有効に使える磁性細線の長さは半分となる。そこで、図 2(c)に示すように磁性差施栓をリング状に作成し、対称構造、非対称構造を取り入れると記録磁区列が電流に対し循環する方法を見出した。この磁壁循環型磁性細線の試作評価が本研究の目的である。

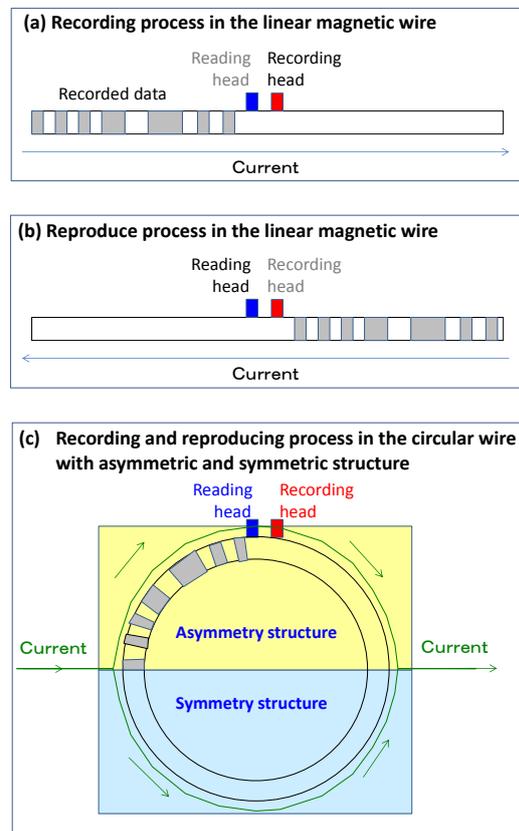


図 2 線状磁性細線への記録原理(a), 再生原理(b)磁性細線をリング状にし、半分を対称構造、残りの半分を非対称構造とし、その切り替え部に電流を印加する事で電流による駆動磁壁がリングを循環するイメージ

### 3. 研究の方法

磁性細線の作成方法を以下に述べる。酸化

被膜を有する Si 基板にレジストを塗布し、電子線描画装置を露光し、現像して細線パターンを作る。これを超高真空スパッタ装置にセットし、TbFeCo 磁性膜をスパッタ成膜する。その上に保護膜として Pt を 2nm 成膜して真空槽から取り出す。これを溶剤に浸してリフトオフすることで TbFeCo 磁性細線を作成した。これに電極を形成して磁壁の電流駆動実験を行った。

#### 4 研究成果

上記アイデアを実現するためには磁壁の移動速度を2つの領域で一致させることが重要になる。図3には、パルス電流と磁壁移動距離の関係を示す。観察には偏光顕微鏡を用いているため観察分解能が悪くエラーバーが大きい、概ねパルス幅と磁壁移動距離が比例関係にあることが確認できた。この傾きから磁壁移動速度を求めることができる。

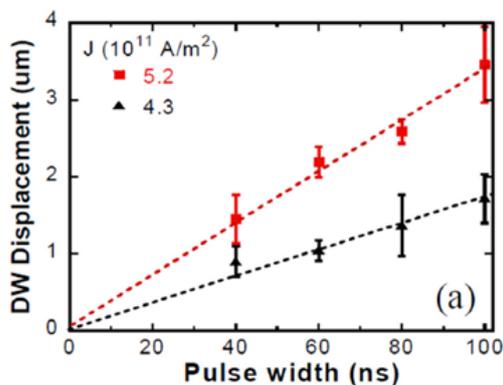


図3 印加電流密度を代えた時の印加パルス電流幅と磁壁移動距離の関係

そこで、TbFeCo 磁性細線で対称構造、非対称構造を作成し、電流密度と磁壁移動速度の関係を調べた結果を図4に示す。この結果から、非対称構造の方が  $J_c$  が小さく、かつ磁壁移動速度が速い事が判る。したがって、対称、非対称領域に同じ電流密度の電流を印加すると対称領域で磁区列が渋滞する事になり問題となる。これを回避するためには、対称 Pt 層の厚みを2つの領域で磁壁移動速度を一

致させるよう調整すればよい。

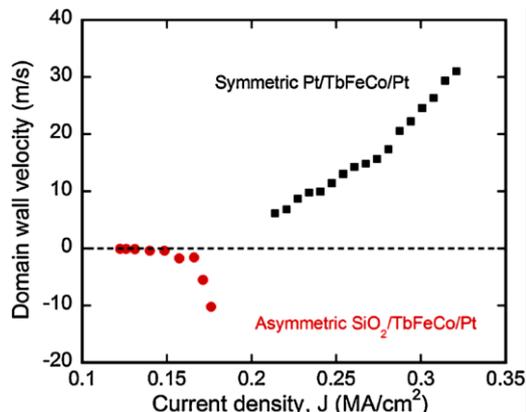


図4 TbFeCo 磁性細線の対称構造、非対称構造における印加電流密度と磁壁移動速度の関係。

次に、このような関係が TbFeCo 磁性細線を Tb/Co 多層膜に代えて磁壁駆動実験を行ってみた。実験結果を図5に示す。この場合、対称、非対称構造での磁壁移動速度に差がない結果が得られた。これは磁壁循環型磁性細線メモリを作るために理想的な結果である。また、Tb/Co 多層膜の磁壁移動速度は TbFeCo 合金より速い。

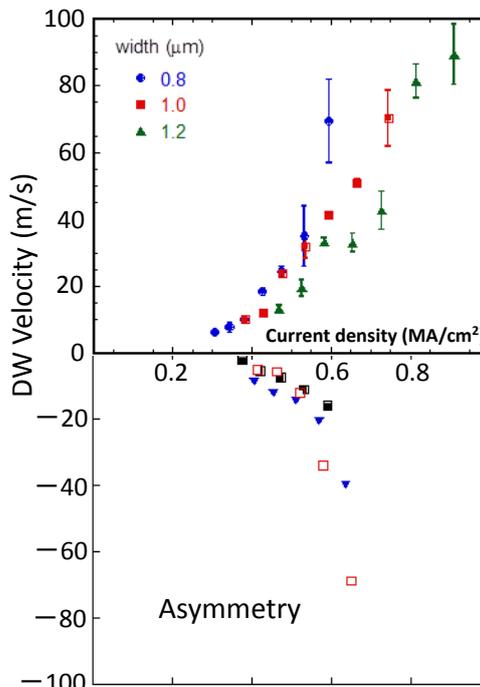


図5 対称、非対称 Tb/Co 多層膜磁性細線における磁壁駆動電流密度と磁壁移動速度の関係

なお、対称構造では上下層の Pt 層からの界面効果が互いに打ち消すので、磁壁の電流駆動は伝導電子のスピントルク効果により磁壁は電流と逆向きに動く。しかし、非対称構造では片側の Pt 層からの界面効果（ジャロシンスキー守谷効果及びスピンホール効果）で磁壁は電流と同方向に移動すると考えられる。そこで、磁性細線方向に面内磁界を印加してジャロシンスキー守谷効果を増強、あるいは低減することによる磁壁駆動電流と磁壁移動速度の関係を図 6 に示した。

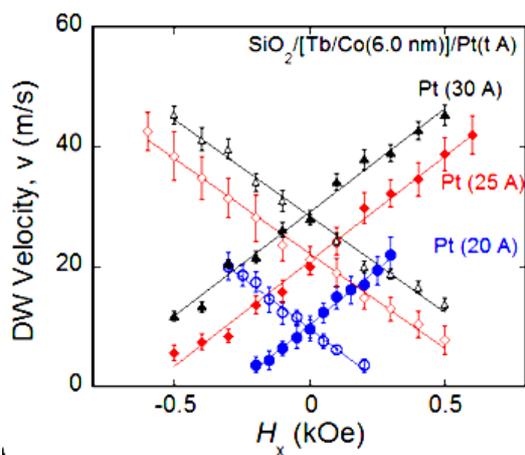


図 6 非対称 Tb/Co 磁性細線において、細線方向に外部磁界 ( $H_x$ ) を印加した場合の磁壁駆動電流密度と磁壁移動速度の関係。

作製した細線幅は磁性層の厚みに比べて圧倒的に大きいので通常できる磁壁はブロッホタイプである。しかし、ジャロシンスキー守谷効果 (DMI) が発生するとこれをネールタイプに変化させる。したがって、 $+H_x$  を印加するとネール磁壁がより強固になりスピンホール効果で磁壁は高速に電流方向に移動することが確認できた。逆に磁界 ( $-H_x$ ) を印加するとネール磁壁は弱まりスピンホール効果が効かなくなり磁壁は動かなくなる。これを DMI 磁界と呼ぶが、Pt25 Å の場合の DMI 磁界は  $-0.7 \text{ kOe}$  程度である。この効果は Pt 層が厚くなるほど大きくなってお

り、Pt30 Å ではまだ飽和しない。

図 7 には、リング状磁性細線の対称、非対称境界部における電流磁壁駆動効果を調べた結果を示す。当初、非対称領域には  $\text{SiO}_2$  を利用していたが、対称、非対称領域での磁壁移動をそろえることが難しく、図 7 に示すように TbFeCo の両側に設ける Pt 層の厚みの差で対称、非対称構造を形成した。図 7(a) では、対称構造の細線上に 2 つの磁壁を導入し、電流で一方向に動く様子がわかる。一方、図 7(b) では Pt 層を一部 3nm とすることで非対称構造になり電流を印加すると 2 枚の磁壁は互いに逆方向に移動できた。すなわち、電極をこの境界部に設けて電流を印加すると 2 枚の磁壁は循環するように動くことになる。

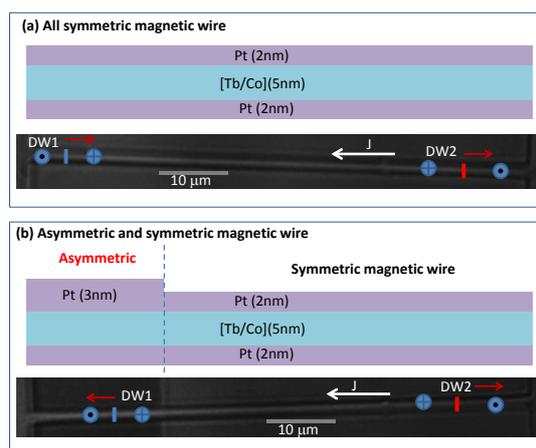


図 7 対称構造型磁性細線 (a)、対称構造と非対称構造の共存した磁性細線 (b) における電流磁壁駆動の観察結果

このように、磁性細線の材料や構成 (対称、非対称構造) で電流による磁壁移動速度やパルス電流密度の関係を明らかにし、同一細線内に対称、非対称領域を形成し、磁壁移動メカニズムが異なっても速度を調整することや、駆動電流密度を調整できることを示した。更に、詳細設計する事により磁壁循環型磁性細線性能を向上できるものとする。

## 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 5 件)

- [1] Do Bang, H. Awano “High efficiency of the spin-orbit torques induced domain wall motion in asymmetric interfacial multilayered Tb/Co wires”, *J. Appl. Phys.*, 117, 17D916 (2015) 査読有
- [2] Do Bang, H. Awano “Domain wall motion in Tb/Co multilayer wire with a large domain wall depinning field”, *J. Appl. Phys.*, 115, 17D512 (2014) 査読有
- [3] Do Bang, Hiroyuki Awano, “Reversal of Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wires : Size Dependence ”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 123001 (2013) 査読有
- [4] Do Bang, Hiroyuki Awano, “Current Induced Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wire in presence of Rashba field”, *IEEE. Trans. Mag.* 49, 4390 (2013) 査読有
- [5] Do Bang, and Hiroyuki Awano, “Size effect of domain wall magneto resistance in ultrathin TbFeCo wires”, *Korean Phys. Soc.* 62, 1933 (2013) 査読有

[学会発表] (計 15 件)

1. “Enhancement of spin Hall effect induced torques for current driven magnetic domain wall motion: Extrinsic spin Hall effect”, B. Do, and H. Awano, 51<sup>th</sup> International Magnetism Conference, GT-07, (2015)
2. “High efficiency of the spin-orbit torques induced domain wall motion in asymmetric interfacial

multilayered Tb/Co wires”, D. Bang and H. Awano, 59<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, GS-15, (2014)

3. “Current and field-induced Magnetic Domain Wall Motion in Tb/Co Multilayer in the Presence of Spin-orbit Coupling induced Torques”, Do Bang and Hiroyuki Awano, 50<sup>th</sup> International Magnetism Conference, GR-13, (2014)
4. “Investigation of current driven domain wall motion for RE-TM magnetic wire device. (C18)” Hiroyuki Awano, and Do. Bang, Energy Materials Nanotechnology Fall 2013, Orland, USA, p124 (2013) (Invited).
5. “Manipulation of domain wall motion in TbFeCo wires by spin-orbit induced Rashba and Spin Hall Effects” Do Bang, and Hiroyuki Awano, Magnetism and Optics Research International Symposium MORIS’ 2013, Omiya, Japan, Tu-P-12, p46 (2013).
6. “Current driven domain wall study of amorphous RE-TM magnetic wire (M6)” Hiroyuki Awano, and Do Bang, Asia Pacific Data Storage Conference APDSC’ 2013, Hualien, Taiwan(2013).(Invited)
7. “Current-induced domain wall motion in Tb/Co-based multilayer wires : Effect of layerd structure (AU-12)” Do Bang, and Hiroyuki Awano, 58<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials MMM’2013, Denver, USA (2013))
8. “Temperature estimation of TbFeCo

magnetic nanowire by using Hall effect measurement. (QD-09)” Masaya Kawamoto, Do Bang, and Hiroyuki Awano, The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013, Taichung, Taiwan(2013)). (\*24)

9. “Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy of ultrathin Tb-Fe-Co films with Pt underlayers. (MO-9)” D. Bang, and H. Awano, The 8<sup>th</sup> International Symposium on Metallic Multolayers MML’ 2013, Kyoto, Japan (2013)).
10. “Reversal of Domain Wall Motion in Perpendicularly Magnetized TbFeCo Wires : Size Dependence. (RB-02)” D. Bang, and H. Awano, The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013, Taichung, Taiwan(2013)).
11. “Study on Pt buffer-improved perpendicular magnetic anisotropy of TbFeCo nanowires by extraordinary Hall effect. (BQ-13)” H. Awano, and D. Bang, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013).
12. “Current-induced domain wall motion in perpendicular magnetized Tb-Fe-Co wire in presence of Rashba field. (DC-01)” D. Bang, and H. Awano, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013)).
13. 「Domain Wall motion study for TbFeCo magnetic wire memory」 Hiroyuki Awano, and Do Bang, 第 37 回日本応用磁気学会学術講演会シ

ンポジウム 3pB-2, 北海道大学、2013 年 9 月 (招待講演)

14. 「補償組成近傍 TbFeCo 薄膜のスピン偏極率」伊藤誠、小峰啓史、杉田龍二、上野秀俊、山口克彦、Do Bang, 栗野博之 第 37 回日本磁気学会学術講演会 5pC-6, 北海道大学 (2013)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者 バン ド  
(Do Bang)

豊田工業大学・大学院工学研究科・研究員  
研究者番号：40624804

(2) 研究分担者  
( )

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：