

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17706

研究課題名(和文) 強磁性細線中のバブル磁区の電流駆動ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Study of current-induced dynamics of magnetic bubble domains in ferromagnetic wires

研究代表者

田中 雅章 (Tanaka, Masaaki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50508405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：円盤状のバブル磁区の電流駆動現象の応用のための調査と非磁性体のスピホール効果で生じたスピン流によるトルクが磁壁に与える影響を調べるために、強磁性体/非磁性体細線上のバブル磁区に対する電流印加実験を行った。バブル磁区の挙動は試料の飽和磁化の大きさに依存して変形するために安定した駆動が難しいことがわかった。またスピン流が与えるトルクは伝導に寄与する原子の磁気モーメントに働いていることがわかった。スピホール効果で生じたスピン注入によるバブル磁区の挙動はその磁壁構造により異なることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The current-induced dynamics of bubble domains in perpendicularly magnetized ferrimagnetic (transition-metal-rare-earth alloy) wires with Pt cap layers was investigated. It was found that the shape change of the bubble domains occurred by the current flow and that it is difficult to move the bubble domains by the current flow. We found that the bubble domains moved to the electric current direction with growing in oblique angles when the spin currents via spin Hall effect were induced. The oblique directions of the bubble-domain's growth in the wire with the transition-metal-dominant and rare-earth-dominant magnetizations were opposite with each other. Comparison between experimental results and micromagnetic calculations, in which the spin injection from the Pt layer was considered, implied that the spin currents via spin Hall effect provide spin transfer torque to the magnetic moment of transition metal layers more than that of rare-earth metal layers.

研究分野：磁性物理学

キーワード：スピントロニクス スピントランスファートルク スピホール効果

1. 研究開始当初の背景

強磁性細線に電流を流すと、伝導電子からスピントランスファートルクを受けて細線中の磁壁の磁気モーメントの向きが変わり、その結果電子流の方向に磁壁の位置が移動する。この現象は磁壁の電流駆動現象と呼ばれ、「0」「1」のデジタルデータに対応した磁壁を強磁性細線に記録・保存して、電流駆動で読み出すレーストラック・メモリーという新しい磁気メモリーへの応用が期待されている。

垂直磁化を持つ強磁性金属と非磁性金属が接合する多層膜細線では、その磁壁の電流駆動現象は単純ではなく、電子流と逆方向に駆動するなどスピントランスファートルクだけでは説明できない現象が報告されている。この現象は次に示す非磁性金属のスピホール効果で生成されたスピンの強磁性金属への注入により説明される。非磁性金属中に電子流が流れるとスピホール効果により強磁性金属との界面にスピン分極が生じる。スピン分極により強磁性体へスピン注入が生じると、磁壁の磁気モーメントがトルクを受ける。トルクを受けたときの磁気モーメントの動きは磁壁の構造によって異なり、電子流の逆方向への磁壁駆動など複雑な挙動を示す。

非磁性金属から強磁性体へのスピン注入でトルクを与えられたときの磁壁の磁気モーメントの挙動については不明な点が多く、その調査が必要があった。

2. 研究の目的

本研究では垂直磁化を持つ強磁性細線中に生成した円盤状のバブル磁区に対して電流を印加したときのバブル磁区の挙動を調べた。バブル磁区は細線の端に磁壁が存在しないため、細線の凹凸に起因する磁壁のピン留めが生じにくい。そのためレーストラック・メモリーに応用した際には電流による安定した磁区の駆動が期待できる。またバブル磁区は磁壁がトルクを受けて位置を変えたときにその変化がわかりやすいので、電流駆動現象を評価しやすい。

本研究では強磁性細線上に生成したバブル磁区の電流印加による挙動を調べ、応用のために電流によるバブル磁区の安定した駆動を試みた。また、スピホール効果によるスピン注入が強磁性体の磁壁に与える影響を調べるため、非磁性金属が接合する多層膜細線でバブル磁区の電流駆動実験を行い、強磁性細線の磁氣的性質とバブル磁区の挙動の相関関係を調べた。

3. 研究の方法

本研究で用いた強磁性細線の1つの極力効果顕微鏡像を図1に示す。試料は熱酸化皮膜を表面にもつシリコン基板に電子線描画装置とマグネトロン・スパッタリング装置を用いたリフトオフ法で作製した。実験に用

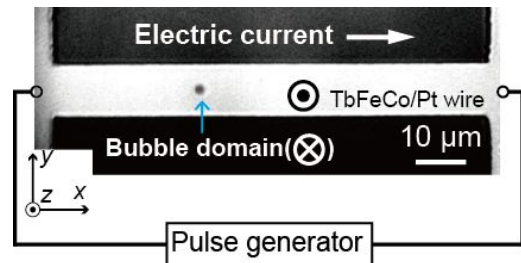


図1 本研究で使用した強磁性細線上に生成した下向き磁化を持つバブル磁区の極力効果顕微鏡像。

いた細線は線幅が10~40μm、長さ80μmの試料で、多層膜の構造はTbFeCo(10nm)/Ptまたは{Tb/Co}₇/Ptである。強磁性体の上部にはPt層を成膜した。Pt層はスピホール角の絶対値が大きく、スピホール効果による大きなスピン注入源として働く。強磁性体には垂直磁化を持つTbFeCo合金または{Tb/Co}₇積層膜を用いた。これらの材料は3d遷移金属(Transition Metal: TM)のCo、Feと4f遷移金属(Rare-Earth Metal: RE)のTbで構成された広義の強磁性体のフェリ磁性体(スペリ磁性体)であり、TM原子の磁気モーメントとRE原子の磁気モーメントが互いに逆方向を向いている。そのためTbFeCo合金の組成及び{Tb/Co}₇積層膜のTbとCoの膜厚を変えることで、その飽和磁化などの磁氣的性質を変えることができる。また、磁化の主体となる原子がTM原子のTMドミナント試料とRE原子のREドミナント試料を用意できる。またRE原子の磁気モーメントの温度依存性はTM原子の磁気モーメントに比べて大きい。そのため低温ではREドミナントの試料でも、温度を上げるとRE原子の磁気モーメントが消失して磁化補償温度で磁化が0になり、それ以上の温度ではTM原子の磁気モーメントが優勢なTMドミナントの試料になる。以上のように今回用いた強磁性体は組成・温度により磁氣的性質を変えることができるので、磁氣的性質が異なる強磁性体上のバブル磁区の電流駆動実験が可能になる。

垂直方向に外部磁場を印加した状態で細線の中心にパルスレーザーを照射して加熱することで図1のように直径が2μm程度のバブル磁区を生成した。

100 ns から 10 ms のパルス電流を図1の+x方向に流した前後の磁区の位置・形状の変化を極力効果顕微鏡像で調べて、電流印加によるバブル磁区の挙動を評価した。

本研究では主に2つの課題に対して実験を行った。まずバブル磁区の安定した電流駆動の可能性を調べるために、室温で低飽和磁化の40 emu/cm³および高飽和磁化の200 emu/cm³をもつTbFeCo合金を用いたTbFeCo/Pt細線を作製して、電流印加によるバブル磁区の挙動を調べた。つぎにスピホ

ール効果によるスピン流でトルクを与えられた際の磁壁の磁気モーメントの挙動を調べるために、室温付近に磁化補償温度を持ち、1つの試料でTMドミナント状態とREドミナント状態が用意できる $\{Tb/Co\}_7/Pt$ 細線を作製して、それぞれの状態で電流印加実験を行いバブル磁区の挙動を調べた。

4. 研究成果

TbFeCo合金の飽和磁化が 40 emu/cm^3 と 200 emu/cm^3 のTbFeCo/Pt細線上の下向きの磁化を持つバブル磁区の電流印加による挙動を図2に示す。 40 emu/cm^3 の細線では電流印加でバブル磁区が消失して 200 emu/cm^3 の細線では電流印加でバブル磁区が電子流と逆(+x)方向に、+y方向への傾斜を持って伸びる。ランダウ・リフシッツ(LL)方程式を使ったマイクロマグネティクス・シミュレーションで、強磁性体の飽和磁化とバブル磁区の電流による挙動を調べた。シミュレーションではy方向への傾斜は見られないが、低飽和磁化の強磁性細線ではバブル磁区が消失して高飽和磁化の細線ではバブル磁区が伸びるなど形状変化に関して定性的に実験と同じ結果が得られた。またシミュレーションではある飽和磁化の細線でのみバブル磁区の形状を維持して駆動できることがわかった。

飽和磁化の大きさによるバブル磁区の挙動の違いは、強磁性細線の静磁エネルギーで説明できる。大きな飽和磁化の強磁性細線は静磁エネルギーが大きいため、エネルギーを下げるためにバブル磁区を拡大しようとするので電流印加でバブル磁区は拡大する。一方で小さな飽和磁化の強磁性細線は静磁エネルギーが小さいので、磁壁の存在で上昇する交換エネルギーを下げるために電流印加でバブル磁区が縮小して消失する。本研究の

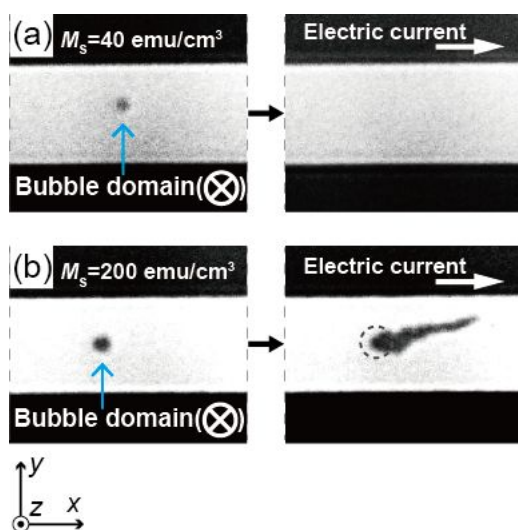


図2 飽和磁化 M_s が(a) 40 emu/cm^3 と(b) 200 emu/cm^3 のTbFeCo/Pt細線上のバブル磁区の電流印加による挙動。

結果からバブル磁区の電流印加による挙動は強磁性体の飽和磁化が強く影響していることがわかった。また今回の試料構造ではバブル磁区の安定した電流駆動が難しいことがわかった。

図2のようにバブル磁区が電流印加で電子流と逆(+x)方向に+y方向への傾斜を持って伸びたことから、今回用いた試料ではPtのスピンホール効果で生じたスピン流が磁壁の電流駆動で支配的であることがわかる。同様の実験を上向きの磁化を持つバブル磁区でも実施したところ、電子流と逆(+x)方向に駆動するが、傾斜の方向は-y方向であり、磁化方向の違いにより傾斜方向が逆になった。y方向への変化は他のグループで実施した通常の磁区に対する研究でもいくつか報告があるがその詳細は調べられていない。そこで、スピンホール効果で生じたスピン流によるバブル磁区のy方向への傾斜に関する調査を行った。

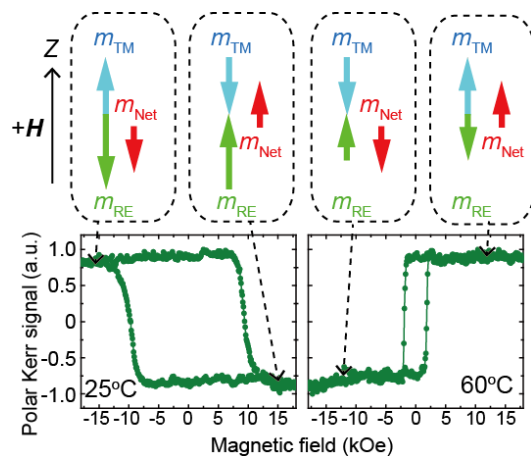


図3 $\{Tb/Co\}_7/Pt$ 積層膜の 25°C (REドミナント状態)と 60°C (TMドミナント状態)での極カー効果測定によるヒステリシスループ。

$\{Tb/Co\}_7/Pt$ 積層膜の 25°C と 60°C の極カー効果測定の結果を図3に示す。極カー効果測定ではCoの磁気モーメントの向きに対応した曲線を描くので、 25°C はREドミナント状態であり、 60°C はTMドミナント状態である。また 25°C ~ 60°C の間に磁化が0になる補償温度を持つ試料であることがわかる。REドミナント状態とTMドミナント状態の細線上のバブル磁区の電流印加による挙動を図4に示す。図4(a),(b)はそれぞれ 25°C (REドミナント状態)での下向き、上向き磁化を持つバブル磁区の結果である。どちらも電子流と逆方向に傾きを持って変形するが、傾く方向は逆になる。図4(c),(d)はそれぞれ 60°C (TMドミナント状態)での下向き、上向き磁化を持つバブル磁区の結果である。 25°C の結果と比較すると図3(a)と(c)ではともに下向きの磁化をもつバブル磁区であるが、それぞれ傾斜方向が逆である。

{Tb/Co}₇多層膜は磁化補償温度の前後で磁化の主体となる原子が入れ替わるので、図3のように同じ下向きの磁化を持つバブル磁区でも25°CではTbの磁気モーメントが下を向いており、60°CではCoの磁気モーメントが下を向いている。このことからスピントルクは、すべての原子ではなく特定の原子の磁気モーメントに働くと考えられる。

スピントルク効果によるトルクがどの原子の磁気モーメントに働いているか調べるためにLL方程式を使ったマイクロマグネティクスシミュレーションを実施した。ここでは簡単のため、フェロ磁性体でバブル磁区内のすべての磁気モーメントが一方向を向いているモデルで計算している。図5の+x方向に電流が流れたときに上部Pt層のスピントルク効果で+y方向のスピントルクが注入される。図5(a),(b)に+y方向のスピントルクが注入されたときの下向き、上向きの磁化を持つバブル磁区の挙動を示す。バブル磁区は電子流と逆方向に傾斜を持って駆動して、その傾斜がそれぞれ逆方向になっている。この結果を図4の{Tb/Co}₇多層膜での実験と比較すると、60°CでTMドミナント状態の結果と定性的にあっている。このことからPt層からのスピントルクはCoの磁気モーメントにトルクを与えてい

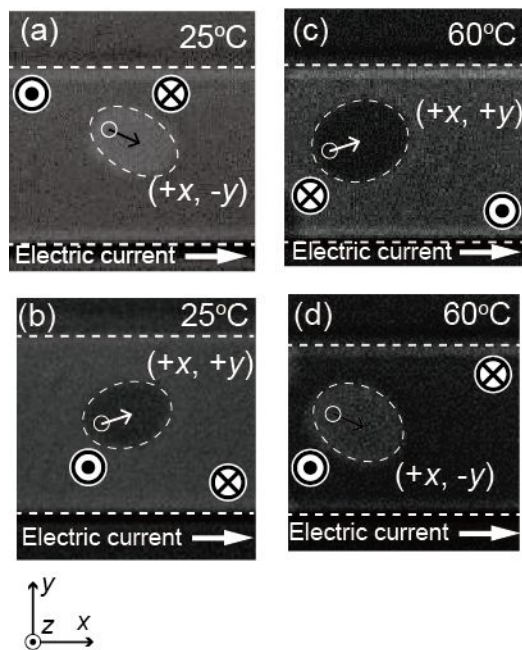


図4 {Tb/Co}₇/Pt 積層膜細線に生成したバブル磁区の電流印加による挙動。(a)(b)25°Cでの下向き、上向き磁化を持つバブル磁区。(c)(d)60°Cでの下向き、上向き磁化を持つバブル磁区。初期のバブル磁区の形状は実線の白丸で、電流印加後のバブル磁区の形状は破線白丸で示す。

ることが示唆される。{Tb/Co}₇多層膜の場合、4f遷移金属のTbの伝導バンドはフェルミ面から離れているため3d遷移金属のCoが主に伝導に寄与している。そのためにスピントルクがCoの磁気モーメントに大きく影響したことが考えられる。

スピントルク効果で生じるスピントルクによるバブル磁区の挙動と磁壁内部の磁気モーメントの構造との相関関係をシミュレーションで調べた。バブル磁区の磁壁構造は、磁壁で磁気モーメントがねじれるときに磁気モーメントが円盤の中心に向けてねじれるネール磁壁状構造と、円周方向に向けてねじれるプロット磁壁状構造の2種類が考えられる。それぞれの磁壁構造を持つバブル磁区に対してシミュレーションを行ったところ、磁壁構造により、バブル磁区の移動方向が異なることがわかった。図4の{Tb/Co}₇/Pt構造のバブル磁区はネール磁壁状構造の結果と定性的にあっているので、{Tb/Co}₇/Pt構造のバブル磁区はネール磁壁状構造を持つと考えられることがわかった。

本研究では、バブル磁区の安定した電流駆動による応用への可能性の調査と非磁性体のスピントルク効果で生成したスピントルクが磁壁の磁気モーメントへ与える影響を調べるために、TbFeCo/Ptや{Tb/Co}₇/Ptの細線上のバブル磁区に対する電流印加実験を行った。バブル磁区は試料の飽和磁化の大きさに依存して成長や消滅などの挙動を示して安定した駆動が難しいことがわかった。また、スピントルク効果によるスピントルクが与えるトルクは、試料全体の磁化方向には

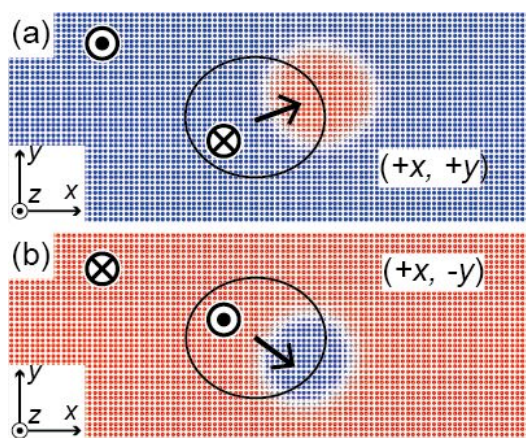


図5 スピントルク効果によるスピントルクで駆動するバブル磁区のLL方程式によるシミュレーション結果。初期のバブル磁区の形状は実線の黒丸で示す。+x方向に電流が流れて上部Pt層のスピントルク効果による+y方向のスピントルクが注入されるとして計算している。

依存せず、伝導に寄与する Co の磁気モーメントに影響していることがわかった。スピンホール効果によるスピン注入はバブル磁区の磁壁構造により、その影響が異なることがわかった。 $\{Tb/Co\}_7/Pt$ 構造のバブル磁区は磁壁で磁気モーメントが円盤の中心に向けてねじれる構造と考えられることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

M. A. Tanaka, H. Kanazawa, S. Sumitomo, S. Honda, K. Mibu, and H. Awano, "Current-induced dynamics of bubble domains in perpendicularly magnetized TbFeCo wires", Applied Physics Express, vol. 8, p.p. 073002_1-4 (2015).

M. A. Tanaka, S. Sumitomo, N. Adachi, S. Honda, H. Awano, and K. Mibu, "Electric-current-induced dynamics of bubble domains in a ferrimagnetic Tb/Co multilayer wire below and above the magnetic compensation point", AIP Advances, vol. 7, p.p. 055916_1-5 (2017).

S. Honda and M. A. Tanaka, "Micromagnetic investigations of Neel- and Bloch-type skyrmion dynamics induced by spin Hall effect of cap layers", Japanese Journal of Applied Physics", vol. 56, p.p. 98001_1-3 (2017).

〔学会発表〕(計15件)

M. A. Tanaka, H. Kanazawa, S. Sumitomo, S. Honda, K. Mibu, and H. Awano, "Electric-current-induced dynamics of bubble domains in TbFeCo wires of various compositions with different cap layers", 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, 2015年7月9日.

M. A. Tanaka, S. Sumitomo, N. Adachi, S. Honda, K. Mibu, and H. Awano, "Electric-current-induced dynamics of bubble domains in ferrimagnetic Tb/Co multilayer wires below and above the magnetic compensation point", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, New Orleans, 2016年11月1日.

M. A. Tanaka, H. Hamada, M. Shimazaki, S. Honda, H. Awano, and K. Mibu, "Study on interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in ferromagnetic/ nonmagnetic/ ferromagnetic/ nonmagnetic layered wires with interlayer antiferromagnetic coupling", 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Pittsburgh, 2017年11月8日.

(その他12件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：磁気素子、磁気素子を製造する方法、および磁気メモリ装置

発明者：本多周太，田中雅章

権利者：関西大学，名古屋工業大学

種類：特許(通常)

番号：特開2017-168514

出願年月日：平成28年3月14日

国内外の別：国内

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 雅章 (MASAAKI TANAKA)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50508405