

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03836

研究課題名(和文) 反強磁性結合をもつ3層構造薄膜のスキルミオンの発生と高速駆動に関する研究

研究課題名(英文) Study on generation and high-speed driving of skyrmion in the multilayered films with antiferromagnetic coupling

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)・准教授

研究者番号：50508405

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)：反強磁性結合により上下の強磁性層の磁化が反対を向く「強磁性層/非磁性層/強磁性層」の3層構造の細線で、微小な渦磁区構造の磁気スキルミオンバブル磁区(BD)の安定化を試みた。本研究では、BDの安定化に一般的に利用される界面ジャロシンスキー-守谷(DM)相互作用がなくても、反強磁性結合を用いることでBDが安定化でき、細線を流れる電流方向に対してBDを平行に移動できることをマイクロマグネティックシミュレーションを用いて実証した。また、反強磁性結合が大きな細線では界面DM相互作用が大きな細線と同様にネール磁壁が安定して存在し、スピン軌道トルクを与えると磁壁が高速で駆動することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反強磁性結合を有する細線では磁気スキルミオンバブル磁区(BD)が安定化でき、細線を流れる電流方向に対してBDが平行に移動できることを明らかにした。反強磁性結合を用いることでBDの安定性を自由に制御でき、また細線上のBDを電流で安定して駆動できるなど、本研究から得られた知見は磁気メモリーの研究に対して有益な情報を与えている。また、反強磁性結合を用いることで磁壁駆動の速度が上昇することが明らかになっており、この研究成果は磁壁駆動メモリーの省電力化・高速化に貢献すると考えている。

研究成果の概要(英文)：The stabilization of the skyrmion-like bubble domains (BDs) using antiferromagnetic interlayer exchange coupling (IEC) of "ferromagnetic /nonmagnetic /ferromagnetic" wires was investigated. Micromagnetic simulations clarified that the BDs can be stabilized using antiferromagnetic IEC in the wires without the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction and that the driven direction of the BDs via spin-orbital torque (SOT) can become parallel to the electric current direction. It was also found that the magnetic moment in the domain walls (DWs) depends on the antiferromagnetic IEC strength, and the stability of the Neel-type DW increases with an increase in the antiferromagnetic IEC strength. As a consequence of this stability, the SOT affects effectively on the magnetic moment of the DWs and the DW velocity increases. These results imply that the antiferromagnetic IEC can be applied for the stabilization of the BDs and the control of the DW velocity in magnetic domain-based memories.

研究分野：磁性物理学

キーワード：スピントロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

垂直磁化を有する強磁性層と重金属層が積層した「強磁性層/重金属層」からなる2層膜では、らせん磁性体で見られるスキルミオンに近い構造をもつ磁気スキルミオンバブル磁区(BD)という磁区構造が存在できる。BDとは磁気モーメントが強磁性薄膜の平面で渦を巻く微小な渦磁区構造であり、この磁区構造は強磁性層と重金属層の界面の空間対称性の破れにより生じる界面ジャロシンスキー-守谷(DM)相互作用で安定化されている。

細線状に加工した「強磁性層/重金属層」構造にBDを生成して細線に電流を流すと、伝導電子のスピンの影響でBDの位置が高速で移動する。また「強磁性層/重金属層」構造の細線の場合、重金属層を流れる電子のスピンホール効果により重金属層/強磁性層の界面付近にスピン蓄積が生じて、蓄積されたスピンの強磁性層に流れ込む。このスピンの強磁性層の磁気モーメントに与えることで、STTと同様にBDが移動する。そのため強磁性細線に生成したBDは細線を流れる電流を使って高速で移動できる。この現象はBDを「0」「1」のデジタルデータとして強磁性細線に記録・保存し、必要に応じて電流で読み取り素子に移動してデータを読み出す磁気メモリーに応用できる。

界面DM相互作用の大きさは「強磁性層/重金属層」構造に使用する材料で異なり、Ptを重金属層に用いた場合に最も大きくなることが報告されている。界面DM相互作用の大きさは材料固有の物性に依るところが大きいため、その大きさを制御する手法には限りがある。また、「強磁性層/重金属層」構造に生成したBDをSOTで移動すると、BDは電流方向と平行に進まず、電流方向に対して傾斜を持つことが知られている¹⁻²⁾。この傾斜によりBDが細線の中心軸からずれるため、磁気メモリーに利用する場合に問題となる。

2. 研究の目的

本研究では、「強磁性層/非磁性層/強磁性層」からなる3層構造で、非磁性層を介して上下の強磁性層の磁化が反対を向くことで安定する反強磁性結合に着目して、界面DM相互作用とは異なる方法でBDの安定化を試みた。

3. 研究の方法

(1) 反強磁性結合を有する細線における磁気スキルミオンバブル磁区の安定化と電流による駆動の検証

ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式に基づいたマイクロマグネティック・シミュレーションを用いて「強磁性層/非磁性層/強磁性層」構造におけるBDの安定性を調査した。このシミュレーションでは、2層の強磁性層で構成されて上下の強磁性層が互いに反強磁性結合をする多層膜構造の細線、および参照試料として用いる単層の強磁性細線の2種類のモデルを用意した。細線の線幅は100 nmで長さが375 nmであり、それぞれの細線を一辺が2.5 nmの立方体の微小なセルに分割して、微小なセルのゼーマンエネルギーやセル同士の交換相互作用、セルが持つ磁化に働くSOTなどを計算した。また、上下の強磁性層の層間で反強磁性的な磁気結合を導入することで、「強磁性層/非磁性層/強磁性層」構造の反強磁性結合を再現した。今回実施したシミュレーションでは界面DM相互作用は考慮していない。

本研究ではこれらの細線の中心に初期の磁区構造として1個のBDを与えてシミュレーションを実施して安定状態になる磁区構造を調べた。また、上部の強磁性層の上からSOTを与えたときのBDの挙動をシミュレーションにより調べた。

(2) 反強磁性結合を有する細線におけるネール磁壁の有効磁場の評価

界面DM相互作用を考えない場合、垂直磁化を持つ強磁性薄膜の細線を横断するように磁壁を生成すると、磁壁の中心の磁気モーメントは細線短手方向を向くほうが磁気エネルギーは小さくなるためブロッホ磁壁になる。一方で界面DM相互作用を考慮した場合、磁壁の中心の磁気モーメントは界面DM相互作用の効果により細線長手方向に向く傾向がある。そのため、界面DM相互作用が大きくなると磁壁の中心付近の磁気モーメントは細線長手方向に向くネール磁壁に近づく。本研究では、界面DM相互作用の効果で磁壁の中心の磁気モーメントが細線長手方向に向く傾向をネール磁壁の有効磁場に起因するとして、この有効磁場を測定することでBDの安定性に関わる界面DM相互作用を評価した。

本研究では以下の実験を行い、「強磁性層/非磁性層/強磁性層」構造の細線に生成した磁壁にかかるネール磁壁の有効磁場を評価して、反強磁性結合の大きさとネール磁壁の有効磁場の相関関係を調べた。熱酸化膜を有するシリコン基板上に電子線描画装置とスパッタ装置によるリフトオフ法を使って{Tb(0.37 nm)/Co(0.28 nm)}₄/Ru(*t*_{Ru})/{Co(0.28 nm)/Tb(0.37 nm)}₄/Pt(3 nm)構造の細線を作製した。{Tb/Co}₄層および{Co/Tb}₄層は垂直磁化を有する強磁性層であり、中間のRu層を介して反強磁性的または強磁性的な層間磁気結合が生じる。本研究では、非磁性中間層のRu層の膜厚 *t*_{Ru} を0.42~0.73 nmの範囲で変えることで層間磁気結合の大きさが異なる反強磁性結合

または強磁性結合をもつ細線を用意した。極力効果顕微鏡による磁気ヒステリシス測定から試料の層間磁気結合が反強磁性結合であるか強磁性結合であるか判断した。

「強磁性層/非磁性層/強磁性層」の上部の Pt 層はパルス電流を流した際に強磁性層に SOT を与えて、この SOT により強磁性層の磁壁は駆動する。これまでの研究から強磁性層に $\{Tb/Co\}_4$ 層や $\{Co/Tb\}_4$ 層を用いた細線では Pt 層から与えられる SOT が STT より磁壁の駆動現象で支配的であることがわかっている¹⁾。

細線の強磁性層に Pt 層から SOT が与えられた場合、ネール磁壁では磁壁の中心付近の磁気モーメントはトルクを受けてその角度が変わり、その結果として磁壁の位置が移動する。そのためネール磁壁に近い磁壁は駆動速度が速くなる。一方で、ブロッホ磁壁では SOT を受けても磁壁の中心付近の磁気モーメントの角度は変わらないため、ブロッホ磁壁に近い磁壁は駆動速度が遅くなる。また、完全なブロッホ磁壁では SOT を受けても磁壁が駆動しないため磁壁速度がゼロになる。そのため、磁壁の速度を測定することで磁壁の中心の磁気モーメントの状態を知ることができる。

磁壁を持つ細線に外部磁場を印加すると、磁壁の中心の磁気モーメントは外部磁場の影響で磁壁構造が変わる。細線の長手方向に外部磁場を印加することで磁気モーメントの向きを変えて、磁気モーメントが短手方向を向くブロッホ磁壁にすると SOT を与えても磁壁が駆動しないため磁壁速度がゼロになる。本研究では、磁壁速度の外部磁場依存性を測定して磁壁速度がゼロになる外部磁場を見積もった。そしてこの磁場をネール磁壁の有効磁場 H_L とした。

本研究では細線に磁壁を生成したのち、細線長手方向に外部磁場を印加した状態でパルス電流を流した。極力効果顕微鏡を用いてパルス電流を流す前後の磁壁位置の観察を行い、パルス電流の印加時間と磁壁の移動距離から磁壁の速度を見積もった。様々な Ru 層膜厚をもつ細線の磁壁速度の外部磁場依存性を調べて磁壁速度がゼロになる磁場 H_L を見積もり、 H_L の Ru 層膜厚依存性を調べた。また、マイクロマグネティック・シミュレーションを用いて反強磁性結合でネール磁壁が安定する機構の解明を行った。

(3) 反強磁性結合を有する細線における磁壁速度の評価

「強磁性層/非磁性層/強磁性層」構造の非磁性中間層に Rh を用いた $\{Tb (0.56 \text{ nm})/Co (0.34 \text{ nm})\}_4/Rh(t_{Rh})/\{Co (0.34 \text{ nm})/Tb (0.56 \text{ nm})\}_4/Pt (3 \text{ nm})$ を作製した。この構造では、Rh 層の膜厚 t_{Rh} を 1.20~2.93 nm の範囲で変えることで強さが異なる反強磁性結合・強磁性結合をもつ細線を用意した。極力効果顕微鏡による磁気ヒステリシス測定から、Rh 膜厚が 1.2 nm 以下や 2.8 nm 以上の細線では強磁性結合を、1.3~2.5 nm の細線では反強磁性結合を示すことがわかった。また、Rh 層膜厚が 1.6 nm と 2.2 nm 付近では反強磁性結合が極大になることがわかった。

本研究では(2)と同様に、細線にパルス電流を流すことで強磁性層に SOT を与えて細線中の磁壁の駆動を行い、無磁場中における磁壁の駆動速度を測定した。様々な Rh 層膜厚の細線で、パルス電流の電流密度を変えて磁壁の駆動速度の測定を行い、各電流密度での磁壁速度の Rh 膜厚依存性を評価した。また、マイクロマグネティック・シミュレーションを用いて、反強磁性結合の大きさの変化による磁壁速度の変化の原因を調べた。

4. 研究成果

(1) 反強磁性結合を有する細線における磁気スキルミオンバブル磁区の安定化と電流による駆動の検証

参照試料として用意した単層の強磁性細線に初期条件として BD を与えてマイクロマグネティック・シミュレーションを行うと、BD は消失して単磁区構造になることがわかった。界面 DM 相互作用がある場合は界面 DM 相互作用により BD のねじれ部分の磁気エネルギーが下がるため BD が安定化できるが、界面 DM 相互作用を考慮しないシミュレーションでは交換エネルギーを下げるために BD が消失したと考えられる。

反強磁性結合を持つ細線の上下 2 層の強磁性層に初期条件として BD を与えた場合、BD は消失せずに安定できることがわかった。上下 2 層の強磁性層に形成した BD は互いに磁気モーメントは逆方向を向くため、上下層の磁気モーメントの間で磁気エネルギーが小さくなり、更に静磁気相互作用により磁気エネルギーが小さくなるため、BD のねじれ部分が安定化できたと考えられる。以上の結果から、反強磁性結合を用いることで界面 DM 相互作用がなくても BD が安定化できることがわかった。

反強磁性結合を持つ細線に生成した BD を SOT で駆動した場合、単層の強磁性細線の BD の駆動で見られる電流方向に対する傾斜成分はなく、電流の方向に対して平行に駆動できることがわかった。この原因は、上下の強磁性細線に存在する BD の駆動の電流方向に対する傾斜方向が常に逆になるためと考えられる²⁾。BD を SOT で駆動したときの傾斜方向は、BD のカイラリティなどにより異なる。反強磁性結合を持つ細線では、上下の強磁性細線に存在する BD の磁気モーメントの向きが常に逆になるため、傾斜して進む効果が相殺されたと考えられる。そのため反強磁性結合を有する細線では、電流方向に対して磁気スキルミオンバブルを平行に駆動で

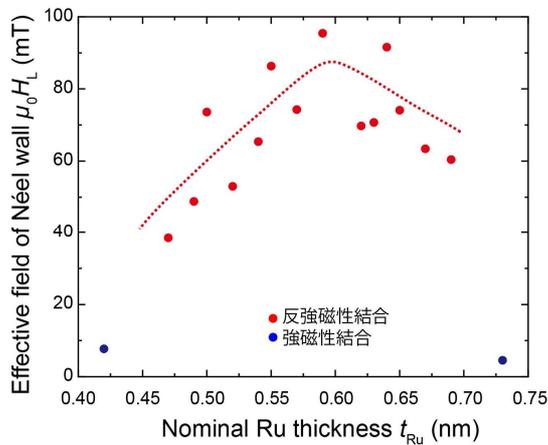


図1 磁壁中心の磁気モーメントにかかる
細線長手方向の有効磁場 H_L の Ru 膜厚依存性

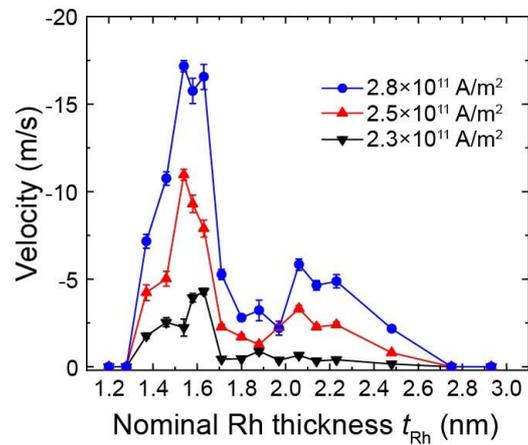


図2 磁壁速度の Rh 膜厚依存性

き、磁気メモリーに応用した場合に有利であることがわかった。

(2) 反強磁性結合を有する細線におけるネール磁壁の有効磁場の評価

磁壁の駆動速度の外部磁場依存性の測定結果から見積もったネール磁壁の有効磁場 H_L の Ru 膜厚依存性を図 1 に示す。赤丸が反強磁性結合、青丸が強磁性結合の細線である。Ru 膜厚が 0.47 nm の場合 H_L は 40 mT 程度であるが、膜厚を増やしていくと H_L が上昇して、Ru 膜厚が 0.6 nm 付近で H_L は 90 mT 程度になった。さらに Ru 膜厚を増やすと H_L は低下していく傾向を示した。一方で、Ru 膜厚が 0.42 nm や 0.73 nm の強磁性結合を有する細線では H_L が 10 mT 以下であり、反強磁性結合を有する細線に比べて小さいことがわかった。一般的に「強磁性層/Ru/強磁性層」の多層膜では Ru 膜厚が 0.6 nm 付近で反強磁性結合の大きさが極大になることが知られている。以上の結果から、反強磁性結合が大きいほど細線に生成した磁壁のネール磁壁の有効磁場が大きくなることがわかった。

反強磁性結合を有する細線の磁壁にかかるネール磁壁の有効磁場をマイクロマグネティック・シミュレーションで調べた。シミュレーションでは、実験と同様に反強磁性結合が大きいほどネール磁壁の有効磁場が大きくなることがわかった。磁気モーメントの外部磁場に対する拳動から、上下の強磁性層の磁気モーメントが反平行状態を維持しようとするため外部磁場の影響が小さくなり、そのため H_L が大きくなることがわかった。このように反強磁性結合を持つ細線では、外部磁場に対する影響が小さくなりネール磁壁が安定することがわかった。

(3) 反強磁性結合を有する細線における磁壁速度の評価

Rh を中間層とする反強磁性結合及び強磁性結合を持つ細線の無磁場における磁壁駆動速度を測定した。細線に流すパルス電流の電流密度を 2.3×10^{11} A/m²、 2.5×10^{11} A/m²、 2.8×10^{11} A/m² と変えた場合の磁壁駆動速度の Rh 膜厚依存性を図 2 に示す。Rh 膜厚が 1.2 nm や 2.8 nm の強磁性結合を持つ細線では磁壁は駆動しなかった。一方で反強磁性結合を示す Rh 膜厚が 1.3 nm~2.5 nm の試料では磁壁は駆動し、電流密度が大きくなると磁壁速度が早くなることがわかった。また、Rh 膜厚により磁壁駆動速度が異なり、Rh 膜厚が 1.6 nm や 2.2 nm 付近で磁壁速度が極大になることがわかった。極力効果顕微鏡による磁化測定から求めた反強磁性結合の大きさが、Rh 膜厚が 1.6 nm や 2.2 nm 付近で極大になることを考えると、反強磁性結合が大きな細線では、磁壁速度が早くなることがわかった。

反強磁性結合を有する細線の磁壁に SOT が与えられたときの磁壁の速度をマイクロマグネティック・シミュレーションで評価した。シミュレーションでは、実験結果と同様に反強磁性結合が大きな細線では磁壁速度が速くなることがわかった。この原因は、磁壁中心の磁気モーメントの向きが反強磁性結合の大きさに依存して変わり、大きな反強磁性結合を持つ細線ほどネール磁壁に近い磁壁構造になったためである。そのため、大きな反強磁性結合を持つ細線ほど SOT が効率的に磁壁駆動に働き磁壁速度が速くなったと考えられる。

引用文献

- 1) M. Tanaka, S. Sumitomo, N. Adachi, S. Honda, H. Awano, and K. Mibu, AIP Adv., 7, 055916 (2017).
- 2) S. Honda and M. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 98001 (2017).

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 0件）

1. 著者名 Tanaka Masaaki, Shimazaki Musashi, Ohmasa Tatsuuro, Suzuki Takafumi, Honda Shunsuke, Honda Syuta, Awano Hiroyuki, Mibu Ko	4. 巻 128
2. 論文標題 Stabilization of Neel-type domain walls in multilayered magnetic wires using antiferromagnetic interlayer exchange coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 063902 ~ 063902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013481	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 Honda Syuta, Sugahara Takamasa, Tanaka Masaaki	4. 巻 53
2. 論文標題 Current-induced linear motion of antiferromagnetically coupled skyrmion-like bubble domains stabilized without Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 435001 ~ 435001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aba14f	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 Suzuki Takafumi, Tanaka Masaaki, Ohmasa Tatsuuro, Honda Shunsuke, Honda Syuta, Awano Hiroyuki, Mibu Ko	4. 巻 565
2. 論文標題 Correlation between interlayer exchange coupling and domain wall velocity in multilayered magnetic wires	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 170218 ~ 170218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2022.170218	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中雅章, 鈴木隆文, 大政達郎, 本田俊輔, 本多周太, 粟野博之, 壬生攻
2. 発表標題 反強磁性結合する強磁性多層膜細線に生成した磁壁の電流駆動速度の非磁性中間層膜厚依存性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木隆文、阿部大悟、新實史也、田中雅章、本多周太、粟野博之、壬生攻
2. 発表標題 反強磁性結合を有する磁性細線における磁壁移動速度と反強磁性結合の強さの相関関係の調査
3. 学会等名 第80回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部大悟、新實史也、杉野真健、田中雅章、本多周太、粟野博之、壬生攻
2. 発表標題 非磁性重金属層と強磁性層の界面状態がスピン注入効率に与える影響
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Sugino, D. Abe, F. Niimi, T.Suzuki, M. A. Tanaka, S. Honda, H. Awano
2. 発表標題 Effect of Interfacial Co Thickness in Nonmagnetic-heavy-metal/Ferromagnetic-metal Wires on the Electric-current-driven Phenomena of Magnetic Domain Walls
3. 学会等名 ICMFS-2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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