

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13272

研究課題名(和文)強磁性薄膜中におけるスカーミオン観測の研究

研究課題名(英文)Studies of the observation of magnetic skyrmions in ferromagnetic thin films

研究代表者

山田 啓介(KEISUKE, Yamada)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：50721792

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):本研究では、スカーミオン(Sk)を室温で観測することを目的として垂直磁気異方性を有する強磁性体薄膜を用いてSk生成と観測を行った。(1) Co/Ni多層膜を用いた実験的研究では、細線中で磁区構造の移動を観測することはできたが、Skの移動を確認する段階までには至らなかった。(2) 数値シミュレーションを用いてCo/Ni多層膜におけるSk生成条件について研究を行い、Skが室温で安定して存在する条件を明らかにした。他の研究として(3) 十字型構造を持つ磁性細線の中心部分の磁化構造に依存したトポロジカルホール効果の大きさ調査(4)圧電基板LiNbO3上のNi細線内の磁区構造の変化について研究を行った。

研究成果の概要(英文):The observation of Skyrmion at room temperature were investigated using ferromagnetic thin films with perpendicular magnetic anisotropy. (1) In the experimental research using Co/Ni multilayer films, it observed the movement of the magnetic domain structures in magnetic wires, however it did not observed the Skyrmions. (2) In the research using numerical simulations, we investigated the nucleation and annihilation conditions of Skyrmions in Co / Ni multilayers and clarified the conditions that the Skyrmion exists stably at room temperature. As other research, we investigated that (3) the magnitude of the topological Hall effect depending on the magnetization structure in the cross-shaped magnetic wire, and that (4) the changing the magnetic domain structures in the Ni wire on the piezoelectric substrate LiNbO3.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スカーミオン 強磁性体薄膜 磁区

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスデバイスの消費電力の低減は、エコロジーを目指す社会へ貢献できることから、必須の研究課題である。現行のメインメモリ(DRAM)より消費電力を抑えることができる次世代メモリとして、磁性体を用いた磁気デバイスが研究されている。磁気デバイスを実現するためにナノ/マイクロスケールの強磁性体の磁区構造を利用した様々な研究が行われているが、中でもスカーミオンに現在注目が集まっている(図1)。スカーミオンは、渦状の磁化状態を持ち、直径が数十nmと小さく[]、移動ための駆動力が小さい[]などの特徴があるために小型化と低電力の特性を兼ね備えた新規磁気デバイスとして期待されている。今までにスカーミオンの観測は、絶縁磁性体(Cu₂OSeO₃)[]や金属強磁性薄膜(Ir/Fe)[]を用いて低温(T~58K以下)で行われてきたが、室温で観測した報告は無かった。また、室温でのスカーミオンの動的ダイナミクスの研究は、理論的には行われているが[]、実験的に行った報告は未だなかった。

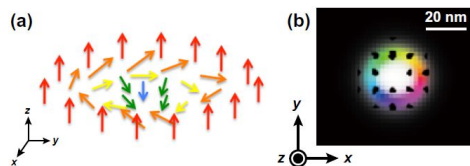


Fig. 1 (a)スカーミオンの概念図 (b)数値シミュレーションによるスカーミオンの磁化構造

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下である。(1)スカーミオンを実験的に室温で観測すること。(2)観測できたスカーミオンを外場(電流/電界)によって、動的制御すること。(3)スカーミオンの静的構造、動的ダイナミクスを考察するために数値シミュレーションを用いて構造やダイナミクスを明らかにすること。これらの研究を通して、新規磁気デバイス実現に向けて足がかりになる研究を行うことが目的である。

3. 研究の方法

(1) 実験的な観測：

強磁性薄膜作製と試料の微細加工：スパッタ装置を用いて垂直磁気異方性を有する膜を作製する。特に強磁性膜の上下の層にPtやInをスパッタすることで、界面にジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)が強く作用し、スカーミオンが容易に生成される。

スカーミオン観測：磁気力顕微鏡(MFM)または磁気光学カー効果(MOKE)顕微鏡を用いてスカーミオンの直接観測を行う。

(2) 数値シミュレーションを用いた検証：

数値シミュレーションを用いて、スカーミオンの磁化構造の確認、動的ダイナミクスの検

証を行い、実験結果に対する考察や設計を行う。

4. 研究成果

(1) 強磁性薄膜を用いたスカーミオン観測：

実験的に強磁性体膜を用いてスカーミオンの観測を試みた。結果的には、磁気バブル型の磁区は観測できたものの、スカーミオンと特定することはできなかった。

強磁性体薄膜として垂直磁気異方性を有する強磁性薄膜であるCo/Ni多層膜から構成される多層膜を用いた。強磁性体薄膜を微細加工により幅：数~数十、長さ：数十マイクロメートルの細線状に加工した。細線中央にSiO₂でキャップをし、細線部分に直径300~1200nmの円形の穴を空け、垂直方向から電流を流せるように電極(生成電極：Au=80nm)を付けた(図2)。生成電極部にパルス電流(10V, t_p = 50ns)を流すことで発生するエルステッド磁場(回転磁場)を利用し、スカーミオンを細線部で生成することを試みた。スカーミオン観測の方法は、生成電極部で生成されたスカーミオンを移動電極から印加した電流によりキャップが無い細線部まで動かし、その磁化構造をMOKE顕微鏡により観察する方法で行った。その結果、生成電極からのスカーミオン生成を観察することができなかったが、細線端にバブル磁区型の磁区構造が電流により移動することがわかった(図3)。この方法の問題点は、生成電極の加工精度が悪いために、スカーミオン生成のために使用したパルス電流が試料に上手く印加できていないことがわかった。他の原因は、スカーミオン生成に用いた強磁性体薄膜でスカーミオンが安定に存在することができない可能性あり、スカーミオンが強磁性薄膜で安定して存在する物質パラメータを探ることが必要になった。

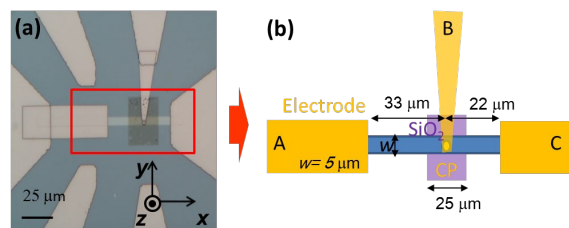


Fig. 2 (a) 試料構造 (b) 試料中心部の構造

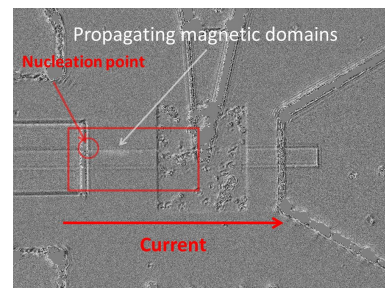


Fig. 3 MOKE 顕微鏡による磁区移動観察結果

(2) 数値シミュレーションによるスカーミオンの生成・消滅条件調査：

強磁性体薄膜である Co/Ni の物質パラメータ (特に DMI 定数 (D) と磁気異方性定数 (K_u)) を変化させ、スカーミオンが安定して存在する条件や磁場を印加した際の消滅条件について調べた (図 4)。その結果、スカーミオン構造が出現する条件は、Co/Ni 薄膜において室温で観測されている DMI 定数 (D) ~ 1.0 程度で、垂直磁気異方性定数 (K_u) が $4.4 \leq K_u \leq 6.0 \text{ Merg/cm}^3$ となった。この K_u 範囲は、解析式から求まる範囲とほぼ同程度になる一方、計算では DMI 値が小さい条件でスカーミオン消滅がする領域を求めることができた。また解析式で求めることができない、閾 DMI 定数 (D_c) 付近のスカーミオン直径を正確に求めることができた。さらに、磁気的エネルギーの計算によりメモリ応用に適したスカーミオンに必要な DMI 値を調査した。その結果、スカーミオン構造有無によるエネルギー差が無い条件とエネルギー変化量が $\Delta \geq 60$ を実現できる条件は、閾 D_c より 0.1 ほど小さい DMI 値がよいことがわかった。その際のスカーミオンの直径は、 $d \sim 105 \text{ nm}$ の直径であった。これらの結果は、Co/Ni 薄膜中のスカーミオン構造のメモリ応用に適した条件を示しただけでなく、スカーミオンを次世代不揮発性メモリとして用いる研究の設計に指針を与えることができた。

本研究成果は、学会発表 2 件と雑誌論文として発表を行った。

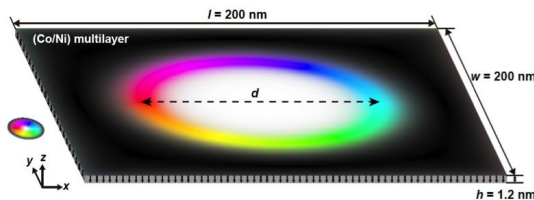


Fig. 4 計算に用いたスカーミオンの磁化構造

(3) 磁性十字型細線中の磁化構造に依存したトポロジカルホール効果の大きさ：

スカーミオンを持つ磁化構造は、トポロジカルな磁化構造の性質を有しているため、電流に対してトポロジカルホール効果が作用する系である。トポロジカルホール効果は、磁性薄膜などの内部の磁化構造によって誘起される内部磁場が電子に作用することで発生する。このトポロジカルホール効果が磁化構造で変化するかを調べるために、強磁性細線の十字型構造を用いて (特にその十字内の特に中心の磁化構造変化を用いて) (図 5)、トポロジカルホール効果の大きさについて数値シミュレーションにより調べた。

十字型構造の中心部の磁区構造は、放射型、反渦、一様型構造について調べた。その結果、トポロジカルホール効果は、異常ホール効果とは異なり、磁区構造中に現れる磁気渦コア

のポーラリティだけでなく、渦度に応じても変化した。それゆえ、十字型構造を持つ細線では、トポロジカルホール測定を行うことにより、ポーラリティ、渦度の両方を同時に検出できることがわかった。この結果は、これらの自由度を利用した新規多値メモリ開発への要素技術として指針を与えることができた。

本研究成果は、雑誌論文として発表を行った。

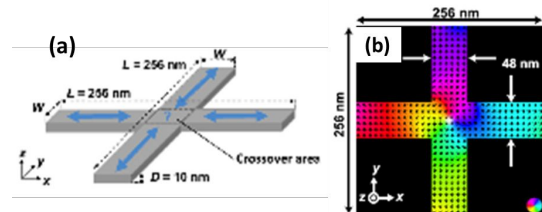


Fig.5 (a)十字型細線構造 (b) 反渦の磁化構造

(4) 厚電体基板に作製した磁性細線の磁区構造：

(本研究の内容は、スカーミオンに関する研究とは内容が異なるが、スカーミオンにおいても重要なパラメータである磁気異方性に関して調べた研究であるため、成果を述べる。)

DMI 効果は、強磁性体と非磁性体の界面で発現する。この効果は、界面において磁化にねじれを与える。この大きさは、DMI 定数と呼ばれる物質パラメータで大きさが与えられており、この物質パラメータは、磁気異方性定数と強く相関があることがわかっている。この研究では、強磁性体の多結晶 Ni を単結晶の圧電基板である LiNiO₃ 基板上に作製し、Ni 内の磁気異方性 (特に誘導磁気異方性) について調べた。実験方法は、SPRING-8 の XMCD - PEEM を用いた直接観察と異方性磁気抵抗効果に由来した磁気抵抗変化測定と数値シミュレーションを用いて磁化構造を調べた。

図 6 に SPRING-8 の XMCD - PEEM を用いた直接観察の結果について示す。Ni 細線と LiNiO₃ 基板の結晶方位 (OL) 方向が直角の配置の時に縞状磁区構造が観察できた。磁区幅は、細線幅を狭くすると、狭くなっていくことがわかった。また細線方向と OL 方向が平行配置の時は、縞状磁区構造が観察されにくいことがわかった。数値シミュレーションを用いて縞状磁区構造の幅を実験と計算結果を比較することで、誘導磁気異方性の大きさを見積もった。さらに Ni 細線の磁気抵抗効果について調べ、磁性細線中に存在する縞状磁区構造の印加磁場依存性や磁気抵抗効果の OL 方向依存性について調べることで、Ni 細線内に生成される縞状磁区構造の磁化変化過程について明らかにした。

本研究成果は、学会発表 2 件と雑誌論文として 2 件の発表を行った。

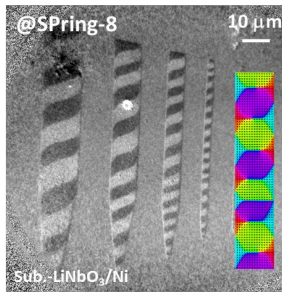


Fig. 6 縞状磁区の観察結果と数値計算結果

<引用文献>

- X. Y. Yu, et al., Nature **465**, 901(2010).
 X. Y. Yu, et. al., Nat. Commun. **3**, 988(2013).
 S.Seki, et. al., Science **336**,198(2012).
 N. Romming, et. al., Science **341**,636 (2013).
 J. Iwasaki, et. al., Nat. Nanotech. **8**, 742(2013).
 J. Sampaio, et. al., Nat. Nanotech. **8**, 839(2013).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件): 全て査読有

Y. Yamaguchi, T. Ohkochi, A. Yasui, T. Kinoshita, and K. Yamada, "Heterojunction-induced magnetic anisotropy and magnetization reversal of Ni wires on LiNbO₃ substrate", J. Magn. Magn. Mat. Vol. 453, 2018, pp. 107-113.

Y. Yamaguchi, T. Ohkochi, A. Yasui, T. Kinoshita, and K. Yamada, "Control of Domain Structure in Artificial Ni Wires Fabricated on an LiNbO₃ Substrate", IEEE Trans. Magn. Vol. 53, No. 11, 2017, pp. 8108504-1-4.

K. Tanabe, and K. Yamada, Appl. Phys. Lett. "Electrical detection of magnetic states in crossed nanowires using the topological Hall effect", Vol.110, No. 13, 2017, pp. 132405-1-5.

K. Yamada, S. Hozumi, and Y. Nakatani, "Examination of the stability of skyrmion structures in perpendicularly-magnetized Co/Ni films", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 56, No. 5, 2017, pp. 053003-1-4.

[学会発表](計 4 件)

A. Yamaguchi, K. Ueda, T. Nakajima, Y. Utsumi, T. Ohkochi, A. Yasui, T. Kinoshita, and K. Yamada, "Strain-induced magnetic properties of micro-scale artificial

magnets on ferroelectric LiNbO₃ substrate", 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, AH-01

山口明啓, 上田洸右, 中島武憲, 内海裕一, 山田啓介, 「強誘電体基板上に作製した微小磁性体の輸送現象特性」第41回・日本磁気学会・学術講演会、19pA-17

S.Hozumi, K. Yamada, and Y. Nakatani, "Examination of stability of skyrmions structure in Co/Ni multilayer films" The 4th International Conference of Asian Union of Magnetism Societies, Tainan, Taiwan, PE-06

穂積繁, 山田啓介, 仲谷栄伸, 「Co/Ni 多層膜におけるスカーミオン構造の安定性の検討」, 第72回年次大会 日本物理学会 17aS-PS-33

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山田 啓介 (YAMADA, Keisuke)
 岐阜大学 工学部 助教
 研究者番号: 50721792

(2)研究協力者

仲谷 栄伸 (NAKATANI, Yoshinobu)
 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授
 小野 輝男 (ONO, Teruo)
 京都大学 理学研究科 教授
 山口 明啓 (YAMAGUCHI, Akinobu)
 兵庫県立大学 工学部 准教授
 田辺 賢士 (TANABE, Kenji)
 豊田工業大学 准教授