

ナノワイヤに形成された連結したスキルミオン

西谷泰知¹, 本多周太^{1,2}, 伊藤博介^{1,2}

(¹関西大学, ²大阪大学)

The connected-skyrmions stabilized in a nanowire

Taichi Nishitani¹, Syuta Honda^{1,2}, and Hiroyoshi Itoh^{1,2}

(¹Kansai University, ²Osaka University)

はじめに

磁気スキルミオンは垂直磁化の磁性細線に形成される渦状の磁化状態である。スキルミオンは低電流で駆動できるためレーストラックメモリにおける情報担体などでの活用が期待されている。細線に2つのスキルミオンが形成されたとき、コア間の相互作用により反発し離れる¹⁾。ところが、時計回り渦と反時計回り渦などのように互いに逆向きのヘリシティを持つ2つのスキルミオンを接近させて設置した場合には、2つのスキルミオンが近づいた状態で渦を共有し安定する。最近、2つのスキルミオンが連結した磁化形状がナノドットやナノワイヤに安定することが示された^{2,3)}。また、2つ以上連結したスキルミオンも孤立したスキルミオンと同様に細線を流れるスピン偏極電流で駆動可能であった³⁾。連結したスキルミオンはスキルミオン間距離が小さいため、情報担体への活用でストレージ密度を増加できる。しかし、安定する距離などの特性は明らかになっていない。そこで、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて、ナノワイヤに形成された連結したスキルミオンの磁化特性を調べる。

計算方法

垂直磁気異方性を有する細線に形成された連結した2つのスキルミオンの磁化状態をランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式(LLG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た。細線のサイズを200 nm×50 nm×4.0 nmとした。細線に右回りに渦をもつスキルミオンと左回りの渦をもつスキルミオンを設置し、磁化状態を緩和させて安定な磁化状態を得た。2つのスキルミオンが逆向きのヘリシティを持つため、ジャロシンスキー守谷相互作用は導入しなかった。飽和磁化などの磁気パラメータを変えながらバイスキルミオンが安定する距離や形状を調べた。磁気パラメータを固定したままスキルミオン間を制御し静磁エネルギー、交換エネルギー、垂直磁気異方性エネルギーとスキルミオン距離依存性を検討する。

シミュレーション結果

細線の飽和磁化が $M_s = 396$ kA/m と 413 kA/m において、形成された連結したスキルミオンの磁化状態を Fig. 1 に示す。各スキルミオンの渦が逆向きのため、渦の一部を共有して2つのスキルミオンが連結して安定した。飽和磁化が大きくなるにつれて各スキルミオンのサイズが大きくなった。これは、孤立したスキルミオンと同じ性質である。また、各スキルミオンのコア間の距離が飽和磁化の増加とともに長くなり、また、渦の共有された領域の割合が減少した。各状態におけるエネルギーを比較したところ、渦を共有することによって交換エネルギーと垂直磁気異方性エネルギーが減少した。接近による静磁エネルギーの増加量よりもこれらのエネルギーの減少量が大きかったために、スキルミオンが連結して安定することが明らかとなった。しかし、2つのスキルミオン間距離をある値以上離れた状態から磁化状態を緩和させると、スキルミオンは近づかずに離れた。同じ向きの渦をもつ2つのスキルミオンの場合には、接近すると交換エネルギーが増加し、2つのスキルミオンが接近して安定する位置は得られなかった。

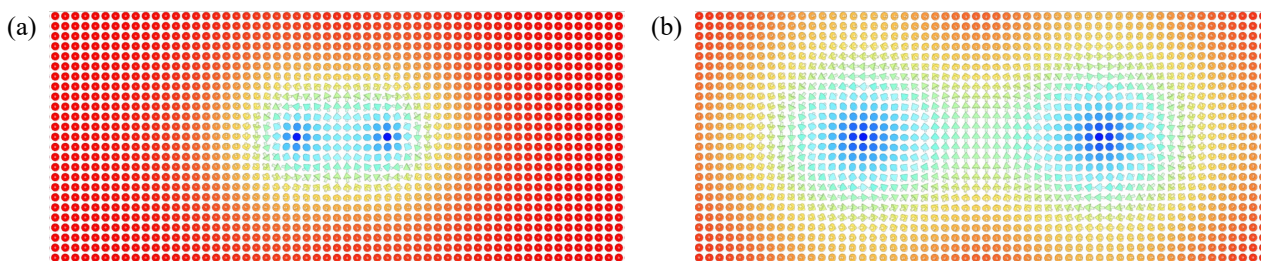


Fig. 1. Magnetic moments of the two-connected skyrmions stabilized in the nanowire with M_s of (a) 396 kA/m and (b) 413 kA/m.

参考文献

[1] M. Kato, et. al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 475002 (2022).

[2] Y. Yuan, et. al.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 435010, (2022).

[3] T. Nishitani, S. Honda, and H. Itoh: *Intermag 2023*, CS-15 (2023).

磁性薄膜パターンにおける磁性粒間交換結合強度と skyrmion 磁化構造の熱安定性の関係

大中秀斗, Xiaorui Ya*, 田中輝光
(九州大学, *Chongqing College of Electronic Engineering)

Relationship between the strength of inter-grain exchange coupling and the thermal stability of the skyrmion magnetization configuration in magnetic thin film patterns

Shuto Onaka, Xiaorui Ya*, Terumitsu Tanaka
(Kyushu Univ., *Chongqing College of Electronic Engineering)

はじめに

近年, 磁性体メモリとして利用可能なスキルミオンに関する研究が盛んに行われており[1,2], その磁化構造の熱安定性について報告例のあるものは, 完全な連続膜の場合[3]である. 一方で, 一般的には連続膜であっても薄膜は微細な磁性粒で構成されており, 粒間の交換結合強度は粒内よりも小さいことが知られている. 本研究では, 粒径 8 nm 程度の薄膜について, 磁性粒間交換結合強度を粒内交換結合強度より小さくした場合, また, 磁性粒の異方性磁界(H_k)・飽和磁化(M_s)に分散がある場合のスキルミオン磁化構造の熱安定性($\Delta E/k_B T$)について評価した.

シミュレーション手法

マイクロマグネティック計算には LLG 方程式を用いた. また, スキルミオンが崩壊する際のエネルギー障壁 ΔE の大きさはナジドエラスティックバンド法により求めた. シミュレートしたエネルギーの遷移過程は, 薄膜にスキルミオンが存在する状態から消失した状態までである. また, 磁化構造の初期状態は, 完全な連続膜において得られたサイズが 50 nm 程度のスキルミオンを粒径分散モデルに与え, 磁化を緩和させた状態である.

結果と考察

Fig.1 に, H_k, M_s の標準偏差 σ をともに 5% とし, 粒内交換結合強度に対する磁性粒間交換結合強度(A)を 10~100% とした際の $\Delta E/k_B T$ を示す. また, 磁化構造の初期状態を示す. Fig.1 より, A が小さいほどスキルミオン磁化構造の熱安定性が高くなることが分かる. これは, 粒間における交換定数の不均一さと H_k, M_s の分散により, 完全な連続膜の場合とは異なり磁壁部分の磁化の動きが制限されることが理由であると考えられる. また, 完全な連続膜におけるスキルミオンと Fig.1 の A=100% の場合のスキルミオンのサイズはほぼ等しかったが, 前者の $\Delta E/k_B T$ はおよそ 57, 後者はおよそ 68 であった. これより, 磁性粒の H_k, M_s に分散を与えると, 熱安定性が高くなると言える.

Fig.2 に磁性粒の H_k, M_s の各 σ を 5, 10, 20% とした場合の $\Delta E/k_B T$ を示す. Fig.2 より, H_k 及び M_s の σ が大きくなるほどスキルミオンの熱安定性が高くなることが分かる. これも Fig.1 と同様, 磁壁部分の磁化の動きが制限されることが理由であると考えられる. また, H_k の σ は 5~10%, M_s の σ は 10~20% の間で $\Delta E/k_B T$ に大きく影響を与えることが分かった.

参考文献

- [1] Gajanan Pradhan *et al.*, *JMMM*, **528**, 167805, (2021).
- [2] Raphael Gruber *et al.*, *nature communications*, **13**, 3144, (2022).
- [3] David Cortés-Ortuño *et al.*, *scientific reports*, **7**, 4060, (2017).

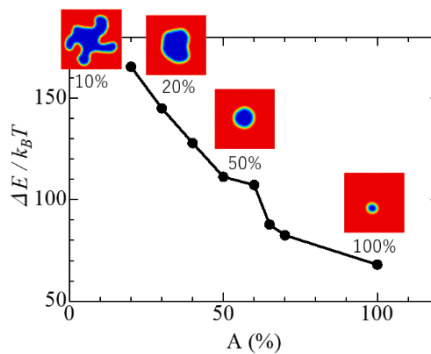


Fig. 1 Relationship between A and magnetization thermal stability.

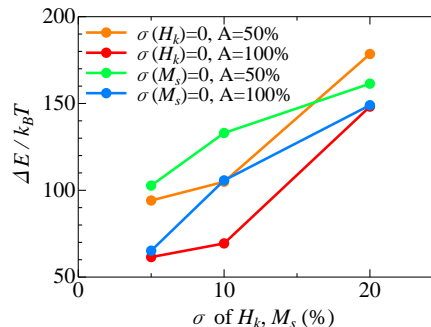


Fig. 2 Relationship between distribution of magnetic parameter and magnetization thermal stability.

磁気スキルミオンのブラウン運動における カイラルな回転のポラリティ依存性

三木颯馬¹⁻³、新村農文¹、後藤穰¹⁻³、田村英一¹⁻³、塩田陽一^{4,5}、
大兼幹彦⁶、Jaehun Cho⁷、Chun-Yeol You⁷、石川諒⁸、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³

(¹阪大基礎工、²阪大 OTRI、³阪大 CSRN、⁴京大化研、
⁵京大 CSRN、⁶東北大工、⁷DGIST、⁸アルバック協働研)

Polarity dependence of the chiral rotation in the Brownian motion of a single magnetic skyrmion

S. Miki¹⁻³, A. Shimmura¹, M. Goto¹⁻³, E. Tamura¹⁻³, Y. Shiota^{4,5},
M. Oogane⁶, J. Cho⁷, C. Y. You⁷, R. Ishikawa⁸, H. Nomura¹⁻³, Y. Suzuki¹⁻³

(¹Osaka Univ., ²OTRI-Osaka, ³CSRN-Osaka, ⁴Kyoto Univ.,
⁵CSRN-Kyoto, ⁶Tohoku Univ., ⁷DGIST, ⁸ULVAC, Inc.)

はじめに

磁気スキルミオンはトポロジカルに安定なスピン構造で粒子としてふるまう。そのトポロジカルな性質に由来したスキルミオンのダイナミクスとしてはジャイロ運動が挙げられ、例えば電流駆動によるスキルミオンホール効果¹やブラウン運動における回転成分の存在^{2,3}などが報告されている。スキルミオンのジャイロ運動の回転方向はスキルミオン数、すなわちスキルミオンのポラリティと密接に関係している。しかし拡散中の回転の方向はいまだ決定されていない。この回転方向の決定は科学的関心および新奇デバイスへの応用の観点からも必要不可欠である。したがって本研究では拡散における回転方向のポラリティ依存性を決定することを目的とする。

実験方法

スパッタリング法により Si/SiO₂ sub. | Ta(5) | Pt(0.04) | Co-Fe-B(1.09) | Ta(0.18) | MgO(1.5) | SiO₂(3) (0内は nm) を成膜した。詳細な運動を観測するために 1000fps にて撮影可能な高速カメラを備えた磁気光学 Kerr 効果(MOKE)顕微鏡によってスキルミオンを観察した。トラッキングにより得られた軌跡から速度位置相関関数 $\langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle$ および $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ を計算しブラウン運動における回転成分の観測を試みた。

実験結果

Fig. 1 はスキルミオンのポラリティ (a) $p = -1$ および (b) $p = +1$ の場合での速度位置相関関数の解析結果である。十分時間が経過した後、 $\langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{x}(t) \rangle$ および $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ はそれぞれ拡散係数テンソルの対角項および非対角項に対応する。 $\langle (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{x}(t))_z \rangle$ の符号、すなわちスキルミオンの拡散中での回転の方向はポラリティ p の符号に依存する。この回転方向は以前我々が報告した結果[3]と一致する。また軌跡に対するフラクタル解析から、スキルミオンの拡散は低周波側では試料中の浅いポテンシャル揺らぎから、また高周波側にてピンングサイトから影響を受ける。本研究は本成果は JST CREST JPMJCR20C1、JSPS 若手研究 (23K13660)、科研費 基盤研究 S (JP20H05666)、特別研究員奨励費(23KJ1477)、文部科学省次世代 X-NICS 半導体創生拠点形成事業 (JPJ011438)、豊田理研スカラーの支援を受けたものである。

参考文献

- 1) S. Woo, *et al. Nat. Mater.* **15**, 501 (2016)
- 2) L. Zhao, *et al. Phys. Rev. Lett.* **125**, 027206 (2020)
- 3) **S. Miki**, *et al. J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 083601 (2021).

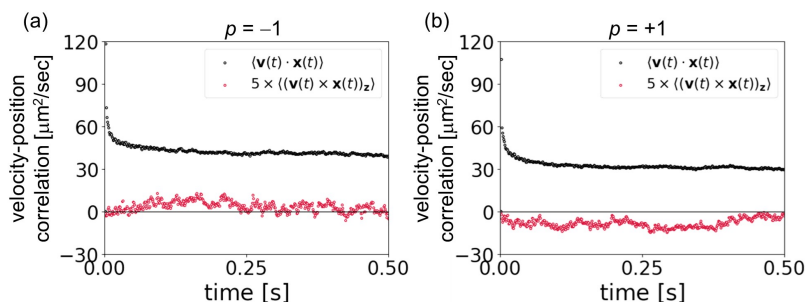


Fig. 1 Velocity-position correlation function with the polarity of (a) -1 and (b) +1

段差構造を導入した磁性細線における磁区駆動の磁気光学観察

加藤 大典、小倉 溪、高橋 真央、井口 義則、宮本 泰敬
(NHK 放送技術研究所)

Magneto-optical observation of recorded domain shift in magnetic nanowire memory with step trap-sites
Daisuke Kato, Kei Ogura, Mao Takahashi, Yoshinori Iguchi, Yasuyoshi Miyamoto
(NHK Science & Technology Research Labs.)

はじめに

将来の3次元映像用ストレージの実現を目指して、超高速転送が可能な磁性細線メモリの研究を進めている。確実なメモリ動作のためには記録ビットとなる磁区を一定長ずつシフトさせる必要があり、これまでラチェット構造等の狭窄部を周期的に導入した磁性細線において、磁気光学カー効果顕微鏡(MOKE)により磁壁電流駆動現象の評価を進めてきた^{1,2)}。一方でこの狭窄部は磁壁のトラップ力が強すぎ、多数の記録磁区をまとめてシフトさせる際に支障があった。今回、磁性細線に段差構造を周期的に導入することにより、その凹凸凹を単位として磁区のシフト長一定化を実現できる見込みを得たので報告する。

実験方法および結果

Fig.1 に示す段差構造付磁性細線メモリを作製するべく、イオンビームスパッタとレーザーリソグラフィーにより、段差高 4 nm、段差周期 6 μm の SiN からなる段差構造を表面熱酸化 Si 基板上に設置し、その後 Pt(3 nm)/[Co(0.35 nm)/Tb(0.85 nm)]₄ からなる垂直磁化膜を幅 3 μm 、長さ 60 μm の磁性細線としてパターン形成した。さらに SiO₂(25 nm)/SiN(3 nm) からなる層間絶縁層を介して、磁性細線の直交方向に幅 6 μm の Ta/Au/Ta 金属線(全厚 150 nm) からなる記録素子を形成した。試作デバイスの光学顕微鏡像を Fig.2 に示す。Fig.3 は磁区の記録とシフトの様子を順次観察した MOKE 像であり、暗状態が上向き、明状態が下向きの磁化方向に対応する。最初に 1 kOe の外部磁界により磁性細線を上向きに初期化し(a)、以下の手順で記録・シフトの様子を確認した。まず記録素子の下から上に波高値 50 mA、パルス幅 10 μs の記録電流を印加し、誘起された電流磁界によって記録素子の右側に下向き磁区を記録した(b)。次に 2.5 mA、10 μs の駆動電流を磁性細線に印加してこの磁区を右方向へシフトさせた後、-50 mA、10 μs の記録電流を印加して2つ目の上向き磁区を記録した(c)。同様な手順で先行2磁区をシフトさせ、3つ目の下向き磁区を記録した(d)。最後に、先行3磁区をシフトさせ、4つ目の上向き磁区を記録した(e)。以上、複数の記録磁区をまとめてシフトできる見通しを得た。現状はシフト後の磁区長に若干のバラつきが見られ駆動電流等の最適化は必要なものの、段差構造は磁性細線メモリの記録・シフト制御に有効と考えられる。当日はこれらの詳細を報告する。

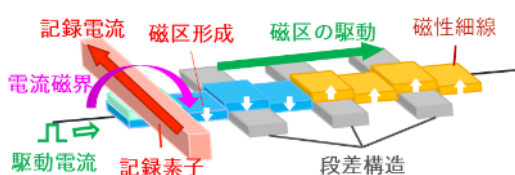


Fig.1 Magnetic nanowire memory with step trap-sites

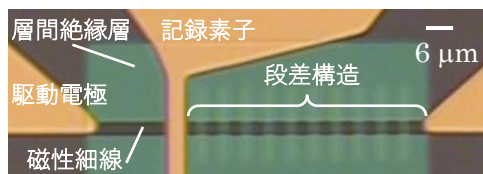


Fig.2 Fabricated magnetic nanowire memory with step trap-sites

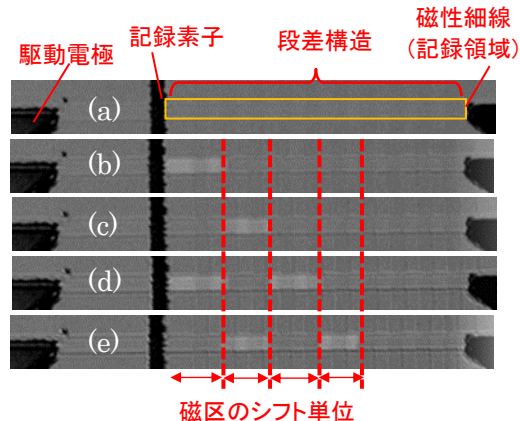


Fig.3 Differential images of magneto-optical microscope for memory operation

参考文献

- 1) M. Takahashi *et al.*: MMM2022, IPA-05 (2022) 2) 高橋ほか: 応物 2022 秋季学術講演会, 21a-P02-21 (2022)