

スキルミオンブラウン素子の作製技術に関する研究

後藤 穰*

Research for Fabrication Technology of Skyrmion Brownian Devices

Minori GOTO*

Skyrmion is topological spin texture that exhibit Brownian motion in solid states. It has attracted research interest in terms of realizing a device that utilizing stochastic behavior and investigating new physical phenomena. However, skyrmion that exhibits Brownian motion is sensitive to changes in magnetic properties and is easily affected by aging variation. For instance, although skyrmion appears in a sample immediately after fabrication, it sometimes disappears after few weeks. This characteristic prevents the reproducibility experiment and affects device stability. In this study, we demonstrated that aging variation can be suppressed by annealing in air for only 3 min, which is an easy and rapid method. We investigated the change in the magnetic properties by annealing and air exposure and found that the main mechanism of aging variation is oxidation of the sample surface. The magnetic properties of samples with Pt and thick SiO₂ capping were analyzed, and we demonstrated that aging variation can be suppressed by avoiding surface oxidation. Our work accelerates the research of fundamental physics regarding skyrmion Brownian motion and of device applications utilizing stochastic system.

1. 研究背景

スキルミオンは固体中で粒子の様に振る舞うトポロジカルなスピン構造である(図1)。スキルミオンはスピントロニクス技術を利用することで高効率制御・検出が可能であるため、情報の記録・演算を担う媒体として注目されている。スキルミオンは室温でブラウン運動を示す⁽¹⁻⁷⁾ことも知られており、外部からエネルギーを供給せずに運動するため、情報熱力学で知られる熱力学限界に近い極めて小さなエネルギー消費で情報の演算・伝搬が可能と期待されている。

こうした背景から、スキルミオンのブラウン運動を示す磁性薄膜の作製技術は重要である。一方、ブラウン運動を示すスキルミオンは磁気特性の変化に敏感で、経時変化の影響を受けやすい。例えば、スキルミオンは作製直後のサンプルでは発現するが、数週間後には磁気特性の微弱な変化により消失することがある(逆に、はじめスキルミオンが見られなかったが、数週間後に現れることもある)。この経時変化は、再現性の実験を妨げ、デバイスの安定性に影響を及ぼす。このような経時変化を抑えるには、一般に真空中でのアニールが有効な方法である。ただし、この方法では、デバイスをアニールして室温まで冷却するのに数時間かかることが多く、実験の効率が制限される。空气中アニールは短時間で済むが、空气中アニールが経時変化や磁気特性に対してどのように影響するか調べられていなかった。本研究では、ホットプレートを用いて短時間(3分間)空气中でアニールすることにより、経時変化を抑制できることを実証した⁽⁸⁾。

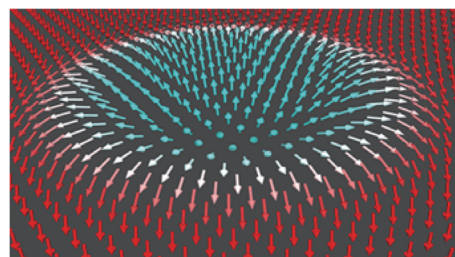


図1 スキルミオンの概念図。

ベクトルはスピンの方向を表し、青と赤は膜面垂直方向の上向きと下向きのスピンを表す。

2. 実験

本研究では、3種類のサンプルを作製した。基本となるサンプル構造は熱酸化Si基板 | Ta(5.9) | Co₁₆Fe₆₄B₂₀(1.2) | Ta(0.27) | MgO(1.6) | SiO₂(2.9) (単位はnm) であり、20°Cでマグネトロンスパッタリング(Canon ANELVA、大阪大学のE-880S-M)を用いて製膜した。このサンプルを用いて、アニール無しとアニール有り(150°C、200°C、250°Cの温度で空气中3分間)のサンプルを作製した。基本サンプル以外の2種類はSiO₂層を厚膜化、あるいは基本サンプルの上部にPtを製膜したが、この報告書では紙面の都合上基本サンプルのみ言及する。アニールにはホットプレート(アズ

2023年3月3日 受理

* 豊田理研スカラー

大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻

ン、阪大TH-900)を用いた。図2に極磁気カー効果(MOKE)顕微鏡(NEOARK、大阪大学BH-782P-OSU)を用いて室温で観察したサンプルの画像を示す。温度はヒーター表面の設定温度である。図2(a)~(d)は作製直後の磁気像であり、200°C以上でアニールした試料では磁区構造が観察された。これは、アニールにより磁化容易軸が面内から膜面垂直方向に変化したためである。次に、各サンプルを2週間以上大気暴露した結果を図2(e)~(h)に示す。製造直後のサンプル(図2(a)および2(b))と比較して、アニール無しのサンプル(図2(e))および150°Cでアニールしたサンプル(図2(f))でメイズドメインが現れた。アニール温度が200°Cの場合(図2(g))、メイズドメインの幅は小さくなった。これらの結果は、200°C以下の温度でアニールされたサンプルが経時変化を示すことを示している。しかし、250°Cでアニールしたサンプル(図2(h))では、作製直後のサンプル(図2(d))と同様のメイズドメインが観察された。これは250°Cで焼鈍することにより経時変化が大幅に抑制されることを示している。

これらのサンプルに膜面垂直方向の磁場を印加すると、すべてのサンプルにスキルミオンが現れ、ブラウン運動が観察された(図2(i)~(l)の黒い点)。アニール温度が200°C以下の場合(図2(i)~(k))、スキルミオンのサイズが減少し、スキルミオンの密度が増加する。これにより、磁化の面内成分が増加し、磁化が垂直方向に向きにくくなる。一方、250°Cのアニール温度では(図2(l))、スキルミオンのサイズが増加し、スキルミオンの密度が減少する。これにより、磁化の面内成分が減少し、磁化が垂直方向に向きやすくなる。これらスキルミオンやドメイン幅の変化は、垂直磁気異方性とDzyaloshinskii-Moriya相互作用によって引き起こされる。前者はドメイン幅を増加させ、後者は減少させる。大気暴露やアニールによって酸素が侵入するとこれら磁気特性が変化する。そのため、上記の様な磁区構造変化が生じたと考えられる。

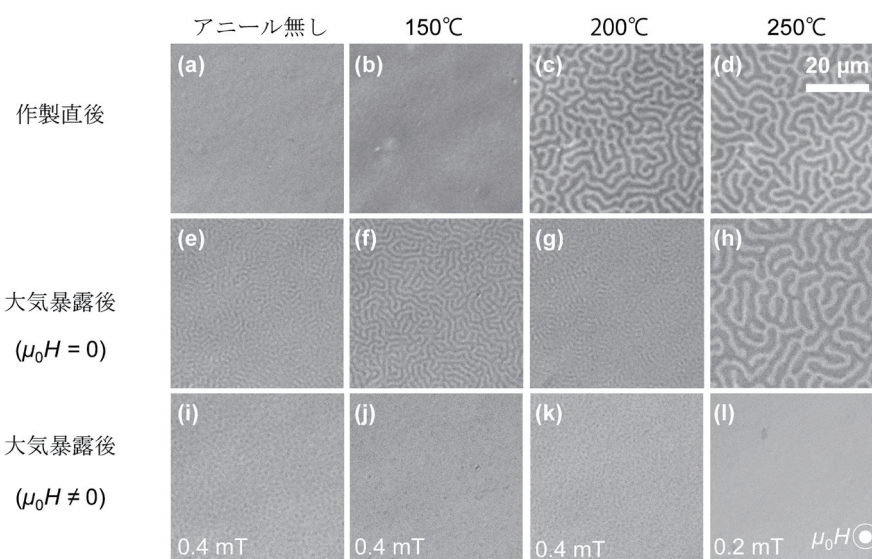


図2 MOKE顕微鏡で観察した磁性薄膜の磁区パターン。

行は、異なるアニール条件(アニールなし、アニール有りで温度150°C、200°C、250°C)を表し、列は経時変化を表す。(a-d)作製直後(磁場無し、アニール無し・有り)。(e-h)2週間以上大気暴露後(磁場無し、アニール無し・有り)。(i-l)2週間以上大気暴露後(磁場有り、アニール無し・有り)。膜面垂直方向の外部磁場はスキルミオン形成に最適な強度を印加した。

3. まとめと結論

本研究では、大気暴露とアニールによるスキルミオン膜の磁気特性の変化を実験的に調べた。大気暴露とアニールによる磁気特性の変化は、表面からの酸素の侵入によるものであることが明らかとなった。空气中250°C以上で3分間アニールすることにより、経時変化を抑制できることがわかった。この方法は真空を必要とせず、短時間で実施できるため、実験の高効率化に貢献する。また、本報告書では割愛したが、これらのサンプルにPtキャップを製膜、あるいはSiO₂キャップ層膜厚を10 nmとしたサンプルでは、表面からの酸化が防がれるため、経時変化が抑制される。これらの成果は、スキルミオンのブラウン運動に関する基礎物理の研究や、確率系を利用したデバイス応用の研究に貢献する。

REFERENCES

- 1) T. Nozaki, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **114** (2019) 012402.
- 2) J. Zázvorka, *et al.*, *Nat. Nanotechnol.*, **14** (2019) 658.
- 3) Y. Jibiki, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **117** (2020) 082402.
- 4) M. Goto, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **536** (2021) 167974.
- 5) R. Ishikawa, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **119** (2021) 072402.
- 6) S. Miki, *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **90** (2021) 083601.
- 7) R. Ishikawa, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **121** (2022) 252402.
- 8) M. Goto, *et al.*, *AIP. Adv.*, **13** (2023) 025216.