

Energy Harvesting Based on Stress Induced Domain Wall Motion in Soft Magnetic Microwires

S.N. Piramanayagam,¹ S. Bhatti,¹ C. Ma² and X.X. Liu²

¹School of Physical and Mathematical Sciences, Nanyang Technological University, Singapore

²Department of Electrical and Computer Engineering, Shinshu University, Nagano, Japan.

Energy harvesting is getting significant interest due to the requirement of devices for the emerging internet-of-things (IoT) technology and their requirement of self-generation of power. As a supplement to solar energy based energy harvesting, generation of energy based on magnetic principles is useful. Domain wall propagation in ferromagnetic materials, as induced by stress and a pick-up voltage using coils has been investigated as an alternate form of energy harvesting. We have recently shown that power can be generated from mechanical vibrations in purely ferromagnetic structures. In this talk, we will highlight the details of micromagnetic simulation and experimental work.

For this work, we deposited soft magnetic FeCo films using facing targets sputtering (FTS). The fringing magnetic field from FTS was used to achieve a field-induced anisotropy. The use of suitable underlayers helped to reduce the coercivity of the films and to set the magnetization along the fringing field direction. Lithography was carried out in such a way to achieve microwires with an anisotropy in the orthogonal direction. Stress was applied and the change in the domain pattern was observed using bitter-pattern technique.

Figure 1 shows the changes in the domain pattern as a function of the applied stress. It can be noticed that the domains are densely packed when there was no stress applied. When the stress was increased slightly, the domains expanded. For higher values of stress, the domains disappeared completely. For practical applications, the stress could come from the bending of the substrates due to the picking up of ambient vibrations. For energy harvesting, the resultant change in the domain wall motion could lead to a change in flux and hence a voltage in the pick-up coil. We have made a prototype device with pick-up coil and have obtained voltage pulses of the order of 1 mV in a resistive load of 50 ohms.

In summary, the use of flexible substrates with low Young's modulus and a special magnetic stack enabled us to achieve significant magnetization rotation or domain wall motion even from ambient vibrations. We have exploited the rotation of magnetization or domain wall motion to induce voltages in the pickup coils.

References

1. Bryan, M. T., Dean, J. & Allwood, D. A. Dynamics of stress-induced domain wall motion. *Physical Review B* 85, doi:10.1103/PhysRevB.85.144411 (2012).

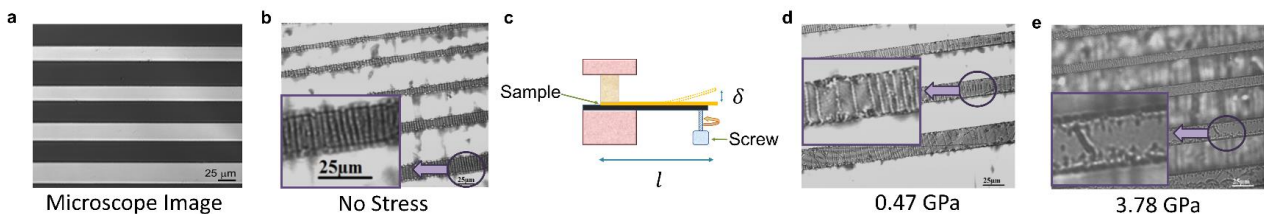


Fig 1. Domain wall images as observed by (a) optical microscope and (b,d,e) bitter-pattern technique (c) Illustration of application of stress, to induce domain wall motion.

FePt 薄膜における異常エッティングスハウゼン効果の可視化

関剛斎^{1,2,3}、井口亮³、高梨弘毅^{1,2}、内田健一^{2,3}
 (¹東北大金研、²東北大 CSRN、³物材機構)

Visualization of Anomalous Ettingshausen Effect in an FePt thin film

T. Seki^{1,2,3}, R. Iguchi³, K. Takashi^{1,2}, and K. Uchida^{2,3}
 (¹IMR, Tohoku Univ., ²CSRN, Tohoku Univ., ³NIMS)

はじめに

異常ネルンスト効果 (Anomalous Nernst Effect: ANE) と異常エッティングスハウゼン効果 (Anomalous Ettingshausen Effect: AEE) は、強磁性体における熱磁気効果として古くから知られている現象である¹⁾。磁化 (M) と温度勾配 (∇T) の外積方向に電圧を生じさせる現象が ANE であり、AEE では電流 (J_c) と M によって ∇T が現れる。これら熱磁気効果はエネルギーハーベスティング技術としての応用可能性から注目を集めており、特に ANE はバルク、薄膜を問わず様々な物質において研究が進められている。一方で、AEE の研究報告はバルク強磁性体を対象としたものに限られており^{2,3)}、強磁性薄膜における AEE の観測は皆無である。また、スピン流 (J_s) と M の相互作用を起源としたスピンペルチエ効果 (Spin Peltier Effect: SPE)^{4,5)} と AEE の対称性の違いについても実証はなされておらず、温度変調のメカニズムを理解するためにも両者の寄与を明確に区別することが重要である。そこで本研究では、ロックインサーモグラフィ法⁵⁻⁷⁾を用いることで、FePt 薄膜試料における AEE の可視化を行った^{8,9)}。AEE と SPE の対称性の違いを明確にすることを目指し、さらに、AEE で誘起される温度変調のプロファイルを明らかにすることを目的とした。

実験結果

AEE を可視化するための薄膜試料として、SrTiO₃ (100) 基板上にエピタキシャル成長させた FePt (001) 薄膜を用いた。超高真空対応マグネトロンスパッタ装置により 10 nm 厚の FePt 層を 350°C で成長させた後、微細加工プロセスにより FePt 層を 500 μ m 幅のコの字形状素子へと加工した。交流の J_c を素子に印加しながら赤外線カメラによる熱画像をロックイン検出することで、ジュール熱の寄与を取り除いた温度変化分の振幅および位相情報を得た。また、AEE と SPE の対称性を調べる目的で、参照試料としてイットリウム鉄ガーネット (YIG) 基板上に 10 nm 厚の Pt 層を成膜した YIG/Pt 素子も作製した。

素子面内方向に磁場を印加する IM 配置では、FePt 素子および YIG/Pt 素子ともに J_c の極性に依存した発熱および吸熱が観測され、類似のロックイン熱画像が得られた。一方で、面垂直方向に磁場印加した PM 配置では、FePt 素子でのみ明瞭な温度変調が観測された。PM 配置における熱画像の違いは、AEE と SPE の対称性の違いから理解することができ、FePt 素子では AEE が主要なメカニズムとなっており、YIG/Pt 素子における温度変化は SPE によって生じていることが実験的に示された。また、AEE の温度変調プロファイルを詳細に調べた結果、温度変調の空間分布が IM 配置と PM 配置で大きく異なっていることが明らかとなった。数値計算と比較した結果、熱源の分布と基板への放熱を考慮することで実験結果を再現できることがわかった⁸⁾。

参考文献

- 1) S. R. Boona *et al.*, *Energy Environ. Sci.* **7**, 885 (2014).
- 2) P. W. Bridgman, *Phys. Rev.* **24**, 644 (1924).
- 3) E. H. Hall, *Phys. Rev.* **26**, 820 (1925).
- 4) J. Flipse *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 027601 (2014).
- 5) S. Daimon *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 13754 (2016).
- 6) Y. Hirayama *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 163901 (2017).
- 7) K. Uchida *et al.*, *Nature* (2018) doi: 10.1038/s41586-018-0143-x.
- 8) T. Seki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 152403 (2018).
- 9) T. Seki *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* (accepted).

レーストラックにおけるスカーミオン電流駆動のシミュレーション解析

右田 幸大¹、山田 啓介²、仲谷 栄伸¹¹電気通信大学 情報理工学研究科、²岐阜大学 工学部

Computer simulations of a Skyrmion motion in a racetrack

Koudai Migita¹, Keisuke Yamada², Yoshinobu Nakatani¹¹Graduate school of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications²Faculty of Engineering, Gifu University

はじめに

スカーミオンはトポロジカルな安定性を持ったナノスケールの磁化構造であり、非常に小さな電流での駆動が可能であることからスカーミオンを用いたレーストラックメモリの研究が注目されている[1,2]。レーストラックメモリではスピン電流の注入などによってスカーミオンを駆動させながらデータの読み書きを行うため、スカーミオンが存在しやすいポジションをつくることで位置制御を行うことが重要である。本研究では、イオン照射によって垂直磁気異方性を変化[3]させた磁性細線におけるスカーミオンの駆動についてマイクロマグネティックシミュレーションを用いて調査した。

計算条件

材料定数は PtCo の値を用い、飽和磁化 $M_s=580 \text{ emu/cm}^3$ 、磁気回転比 $\gamma=1.76 \times 10^7 \text{ rad/(s} \cdot \text{Oe)}$ 、交換ステイフネス定数 $A=1.5 \mu \text{ erg/cm}$ 、損失定数 $\alpha=0.3$ 、非断熱項 $\beta=0.3$ 、DMI 定数 $D=3.0 \text{ erg/cm}^2$ 、磁気異方性定数は図 1 のように $K_u=8.0$ または 7.5 Merg/cm^3 とした[2]。磁性細線の大きさは $490 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 0.4 \text{ nm}$ とした。このような磁性細線にスカーミオンを 1 つ配置し、スピン電流を印可して+x 方向に駆動させるシミュレーションを行った。スピン電流はパルス幅 $t_p \text{ ns}$ だけ流した後電流を切り、スカーミオンが停止する位置を調査した。

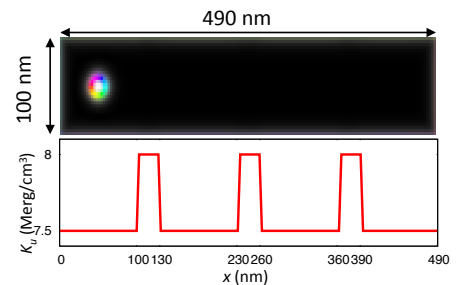


Fig.1 Schematic of the magnetic nanowire and anisotropy.

結果

図 2 に電流密度 $J=50 \text{ MA/cm}^2$ 、パルス幅 $t_p=2\sim 14 \text{ ns}$ におけるスカーミオンの中心位置の時間変化を示す。図 2 より、電流を切った後スカーミオンは K_u が高い領域を避けるように動き、 K_u が低い領域の中心に移動してから静止していることがわかった。よって K_u が低い領域の中心をビットポジションとして定めることができる。図 3 に電流密度とパルス幅によるスカーミオンの静止位置の変化を示す。 $J=30 \text{ MA/cm}^2$ 以下の場合、スカーミオンは K_u が高い領域がピンングサイトの役割を果たし移動できないことがわかった。 $J=50 \text{ MA/cm}^2$ 以上の場合、スカーミオンはピンングされることがなく、パルス幅によって静止位置が変化していることがわかった。

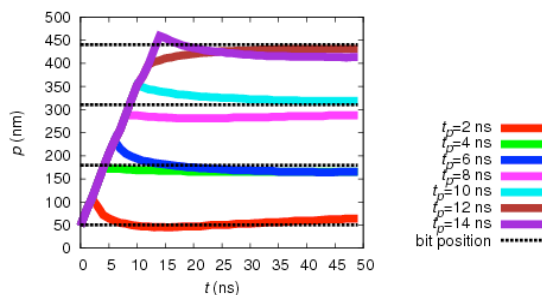


Fig.2 The trajectories of the Skyrmion at various pulse width for $J=50 \text{ MA/cm}^2$

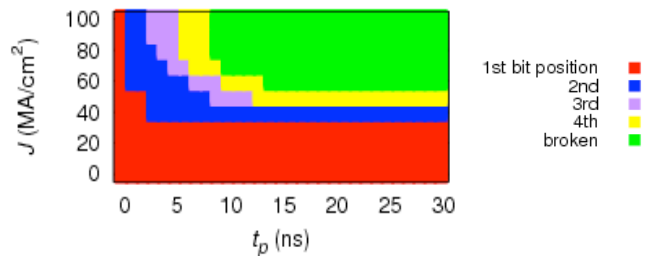


Fig.3 Stopped position of a Skyrmion at various current J and pulse width t_p

参考文献

- [1] T. H. R. Skyrme, Proc. Roy. Soc. Lond. A 31, 556(1962) [2] J. Sampaio, et. al., Nat. Nano. 8, 839 (2013)
 [3] C.T.Rettner, et.al., Appl.Phys. Lett., 80, 279 (2002)

ナノマグネット・リカレントニューラルネットワークにおける 短期記憶能力と非線形演算能力

鎌開雄規, 野村 光, 古田大志, 鈴木義茂, 中谷亮一

(阪大)

Short term memory and non-linearity in nanomagnet recurrent neural network

Y. Kuwabiraki, H. Nomura, T. Furuta, Y. Suzuki, R. Nakatani

(Osaka Univ.)

近年、ニューラルネットワークを用いた人工知能は目覚ましい成果を上げている。ディープラーニングなどの現在の人工知能の多くは、recurrent neural network (RNN)¹⁾ と呼ばれるニューラルネットワークを利用しており、計算機によりこの RNN の状態を計算している。RNN は、情報を保持する多数のノードから構成されており、ノード間には情報のやり取りを行うノード間非線形結合が定義されている。また、このノード間結合によりノード間にはクロズドループを持つ部分も存在する。このクロズドループにより、RNN は現在の情報だけでなく、過去の情報をも含んだ機械学習を可能としている。しかしながら、クロズドループを含む系の状態を計算機により計算する場合、多くの計算リソースを必要とする。現在、ディープラーニングにおける計算機の消費電力は無視できない程増大しており、その消費電力を低減させることが急務となっている。

RNN の消費電力を低減させることを目的にニューラルネットワークを何らかの物理現象で置き換える試みがなされている。これまでに RNN を拡張した reservoir computer (RC)²⁾ を用い、光を利用した RC³⁾、磁性ドットのダイナミクスを使用した RC⁴⁾ などが報告されている。いずれの手法も MHz から GHz 程度の周波数帯で動作する。このため、音声認識や異常振動検出といった低周波数での用途には周波数を変換して使用する必要があり、別途計算リソースを必要とする。そこで我々は、より低周波の信号を直接扱うことのできる磁性ドットアレイを用いた RNN, nanomagnet RNN (NM-RNN) を提案している⁵⁾。これまでに、NM-RNN は短期記憶能力ならびに非線形演算能力を有することが明らかとなっている。しかしながら、NM-RNN のノード数と短期記憶能力ならびに非線形演算能力との関係は未だ明らかとなっていない。そこで本研究では、マクロスピシミュレーションを用い、NM-RNN のノード数に依存した短期記憶能力と非線形演算能力との関係を明らかにすることを目的とする。

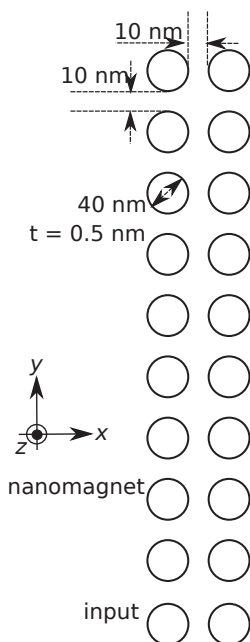


Fig. 1 Schematic top view of typical nanomagnet recurrent neural network

図 1 に NM-RNN の一例を示す。本研究では、 N 行 2 列の NM-RNN を用いる。図 1 に示した NM-RNN は、 10×2 個の磁性ドットから構成されている。それぞれの磁性ドットは、垂直磁化膜から構成され、磁性ドット間には静磁気相互作用が働く。この静磁気相互作用により、ノード間にはクロズドループが形成される。本研究では、静磁気相互作用として、磁気双極子相互作用を仮定した。また、 z 軸方向に磁化容易軸をもつとし、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次の Runge-Kutta 法にて解くことにより、各磁性体の磁化の安定状態を計算した。

本研究では、NM-RNN の性能を評価するためバイナリタスクを利用した。各磁性ドットの磁化の x 成分を NM-RNN の各ノードの状態とした。情報の入力には、ランダムに生成した“0”もしくは“1”の情報を使用した。NM-RNN の状態の更新には、情報が $+y$ の向きへと流れる様、各磁性ドットの磁気異方性定数を変化させた。

その結果、磁性ドットの数を $+y$ 方向に増加させると短期記憶能力を向上させることが明らかとなった。一方で、非線形演算能力の向上は、短期記憶能力の向上と比較し緩やかなものとなった。より高性能な NM-RNN の実現には、素子の構造を変更することにより非線形演算能力を向上させることが必要となる。

本研究は総務省による委託研究「次世代人工知能技術の研究開発 II 人間の脳の演算処理メカニズムに倣った脳型演算処理技術の研究開発」のもと実施されました。

References

- 1) H. T. Siegelmann and E. D. Sontag: *Appl. Math. Lett.*, **4**, 77 (1991).
- 2) H. Jaeger: *techreport GMD – German National Research Institute for Computer Science*, 148 (2001).
- 3) K. Vandoorne, P. Mechet, T. V. Vaerenbergh, M. Fiers, G. Morthier, D. Verstraeten, B. Schrauwen, J. Dambre and P. Bienstman: *Nature Comm.*, **5**, 3541 (2014).
- 4) J. Torrejon, et al.: *Nature*, **547**, 428 (2017).
- 5) 野村光, 中谷亮一, ペーパー フェルディナンド, 田村英一, 三輪真嗣, 後藤稯, 鈴木義茂: 応用物理学会春季講演大会 18p-D104-4 (2018).