

Nanoscaled magnetism probed by synchrotron-radiation spectromicroscopy

Tetsuro Ueno

National Institutes for Quantum Science and Technology, Hyogo 679-5148, Japan

Synchrotron radiation (SR) provides high-brilliance, energy-tunable, and polarization-controllable X-ray that is powerful probe for materials science. X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) spectroscopy using circularly polarized X-rays has been a popular experimental technique to investigate element-specific magnetic properties. By leveraging XMCD, variational techniques such as X-ray resonant magnetic reflectometry (XRMR) and X-ray-detected magnetic resonance (XFMR) are utilized to investigate layer-resolved magnetic properties or dynamics of spin precession. Magnetic contrast comes from XMCD is also utilized in X-ray magnetic imaging such as transmission X-ray microscopy (TXM) or scanning transmission X-ray microscopy (STXM). We performed XMCD-STXM experiment of several permanent magnet materials by using a STXM instrument at the Photon Factory, High-Energy Accelerator Research Organization (KEK)¹⁾. Magnetic domains of a commercial SmCo₅ magnet²⁾ and single-phase SmCo₅ magnet³⁾ are observed by STXM-XMCD. XMCD spectra in nanometer scale are obtained and element-specific spin and orbital magnetic moments are evaluated.

Synchrotron-radiation Mössbauer spectroscopy is another powerful technique to microscopic magnetism. By embedding a resonant isotope probe layer to atomic scale films, SR Mössbauer spectroscopy enables direct detection of local magnetic properties. Magnetic Friedel oscillation at the Fe(001) surface was observed by using *in situ* SR Mössbauer spectroscopy system developed at BL11XU of SPring-8⁴⁾.

New SR beamline for magnetic and spintronic materials BL-13U is now under construction at the latest SR facility of Japan, NanoTerasu in Sendai. BL-13U offers X-ray with wide energy range of 180–3000 eV and high-speed polarization switching⁵⁾. This beamline will provide opportunities for state-of-the-art spectromicroscopy experiments on nanoscaled magnetism.

References

- 1) Y. Takeichi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 013704 (2016).
- 2) T. Ueno *et al.*, The 40th Annual Conference on Magnetism in Japan, 7aB-5 (2016).
- 3) T. Ueno *et al.*, AIP Adv. **7**, 056804 (2017).
- 4) T. Mitsui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 236806 (2020).
- 5) Y. Ohtsubo *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **2380**, 012037 (2022).

Atomic-scale surface and interface magnetism based on ferromagnetic monatomic layer iron nitride

Toshio Miyamachi
(IMaSS, Nagoya Univ.)

A scanning tunneling microscopy (STM) is a unique tool to investigate surface structural and electronic properties of objects on the atomic scale. By utilizing tunneling current or voltage between the STM tip and sample, STM can also manipulate object's morphology and electronic states. Furthermore, STM allows to extract object's magnetic properties with atomic precision by coating the STM tip with magnetic materials (spin-polarized STM). We have conducted surface science researches and especially investigated atomic-scale spin related phenomena such as spin dynamics and stability of single atoms [1], multifunctional single molecule magnetic memory [2] by STM. In recent years, we extend our research to the fields of materials science and spintronics for practical purposes. Taking advantage of state-of-the-art STM techniques, we represent the first precise real-space determination of the wall width Nd₂Fe₁₄B hard permanent magnets by spin-polarized STM [3]. In addition, we reveal for artificial lattices composed of ferromagnetic Fe and antiferromagnetic Mn thin films that atomic-scale surface and interface characterizations by spin-polarized STM can be effectively connected to macroscopic magnetic properties to achieve a comprehensive understanding of magnetic properties of the whole system [4]. In relation to the above our research activities, in this talk, we introduce a combined work of STM and synchrotron x-ray absorption spectroscopy/x-ray magnetic circular dichroism (XAS/XMCD) of the systems based on iron nitride, which has high potential as next-generation rare earth free permanent magnets. The results demonstrate the importance of a complementary microscopic and macroscopic approach to fully understand surface and interface magnetism toward developing novel magnetic thin film materials.

<Sub-nanometer scale characterizations of point defects in monatomic layer iron nitride>

Iron nitride compounds in the iron rich phases such as Fe₁₆N₂ or Fe₄N, have been intensively studied as promising candidates for the rare-earth free permanent magnet due to their large magnetic anisotropy and room-temperature ferromagnetism. However, the impact of morphological changes of iron nitride from bulk to thin films on electronic and magnetic properties has been rarely identified. Furthermore, as the film thickness decreases down to atomic layers, spatial modulations of electronic and magnetic properties caused by microscopic structural changes become non-negligible. We have intended to fabricate a monatomic layer of iron nitride with the Fe₄N stoichiometry (Fe₂N) grown on Cu(001) and investigated its structural and electronic properties on the atomic scale by STM. We here experimentally discovered orbital selective tunneling effect by STM; the information on the orbital characters (e.g. s, p, d orbitals) of the surface electronic states can be separately extracted with atomic precision by the strict control of the STM tip-sample distance [5]. The results reveal the dominant role of microscopic electronic structures derived from the strong Fe-N bonding on the magnetism of Fe₂N. In addition, we find from sub-nanometer scale STM spectroscopy across a point defect on Fe₂N that the point defect modulates surface electronic states up to third nearest neighbor Fe atoms. In combination with the results of XAS/XMCD measurements and theoretical calculations, it is suggested that the point defect, which induces atomic-scale spatial modulation of electronic states of Fe₂N, acts as "functional core" and enhances the spin magnetic moment of surrounding Fe atoms.

<Fabrication of high-quality FeCo ordered alloy thin films assisted by nitrogen surfactant epitaxy>

An L1₀-type FeCo ordered alloy attracts much attention as a rare-earth free magnetic material due to its large magnetic anisotropy, large magnetic moment, and high Curie temperature. However, the L1₀ structure is a

non-equilibrium state of FeCo phase and hence even its fabrication method has not been established yet. The main problem could be caused by the atomic-scale disorder at the Fe/Co interface during growth processes. Thus, unambiguous microscopic characterizations of structural, electronic and magnetic properties of L1₀-FeCo are required toward realizing high-quality L1₀-FeCo thin films. To improve the quality of FeCo ordered alloy thin films, we intend to incorporate the nitrogen surfactant effect of monatomic layer iron nitride (Fe₂N) into the alternate atomic-layer Fe and Co deposition. In this method, the nitrogen surfactant effect of Fe₂N with high lateral lattice stability can effectively suppress the interdiffusion at the Fe/Co interface during the deposition and annealing processes, which results in atomically flat surface and interface. We have revealed the validity of the nitrogen surfactant epitaxy on the fabrication of high-quality L1₀-type alloy thin films for FeNi [2, 3]. In this work, we grow 1 monolayer (ML) Co on Fe₂N/Cu(001), which is the initial stage for the fabrication of FeCo ordered alloy thin films by means of nitrogen surfactant effects. The correlation between the structural changes at the Fe/Co interface and magnetic properties upon sample heat treatment up to 370, 570, 620, and 670 K is investigated by STM and XAS/XMCD. First, the XMCD signal of bare Fe₂N is element specifically extracted. We confirm that bare Fe₂N shows greater XMCD signal in the grazing geometry than that in the normal geometry, revealing its strong in-plane magnetic anisotropy as previously reported [7]. Adding 1 ML Co activates the nitrogen surfactant effect, leading to structural transformation from Co/Fe₂N/Cu(001) to CoN/Fe/Cu(001). Accordingly, the enhancement of the out-of-plane magnetization of the Fe layer is observed. The perpendicular magnetic anisotropy is further enhanced by annealing up to 570 K. Atomically-resolved STM observations reveal that, while ordering of the Fe/Co interface is improved up to the annealing temperature of 570 K, point defects appear at 620 K and the interdiffusion of Fe and Co atoms takes place at 670 K. Combining XAS/XMCD and STM observations, we find that the microscopic structural changes on annealing, which cannot be accessed by conventional macroscopic techniques such as low energy electron diffraction, dominantly determine the macroscopic magnetic properties of the whole system. The results demonstrate that the nitrogen surfactant epitaxy efficiently suppresses the interdiffusion at the Fe/Co interface and keep atomically flat surface/interface, and possibly reflect the intrinsic out-of-plane magnetization of L1₀ FeCo.

References

- 1) T. Miyamachi *et al.*, Nature **503**, 242-246 (2013).
- 2) T. Miyamachi *et al.*, Nat. Commun. **3**, 938 (2012).
- 3) T. Miyamachi *et al.*, Appl. Phys. Express **14**, 115504 (2021).
- 4) S. Nakashima *et al.*, Adv. Funct. Mater. **29**, 1804594 (2019).
- 5) Y. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 056802 (2016).
- 6) K. Kawaguchi *et al.*, Phys. Rev. Materials **4**, 054403 (2020).
- 7) Y. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 224417 (2017).

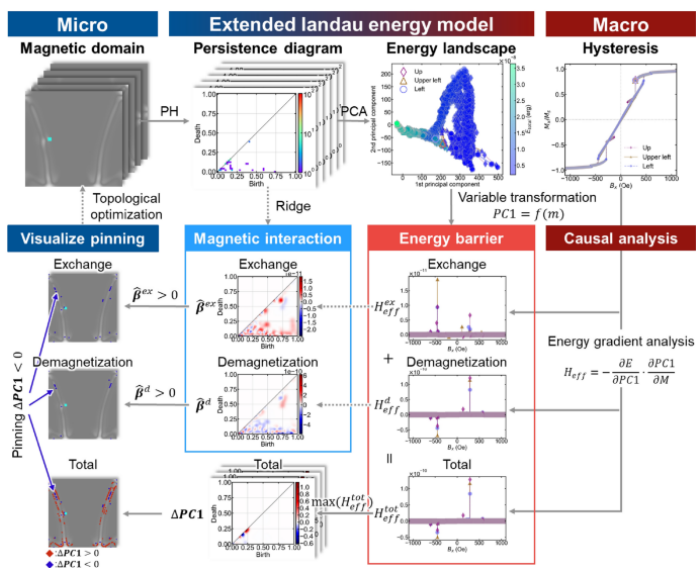
Automated interpretation of magnetic domain structure using feature extended Landau free energy model

Masato Kotsugi
(Tokyo University of Science)

Interpreting magnetic domain structure data is of paramount significance as it offers critical insights into the functionalities of a wide array of magnetic materials. This understanding is a cornerstone for designing next-generation electronic devices, capable of achieving both high-speed performance and low power consumption. However, the inherent complexity of interactions in nanoscale magnetic materials often poses daunting challenges. Understanding the underlying mechanisms or pinpointing specific locations through human observation is strenuous, often relegating device design to an iterative, trial-and-error process.

To circumvent these challenges, we have formulated an innovative "Extended Landau Free Energy Model". This model harmoniously blends the principles of topology and data science, thereby automating the interpretation of image data [1-6]. Through its application, we discerned that the anti-magnetic field effect predominantly steers the process of information recording in nanomagnets. The model has also enabled us to successfully visualize the spatial distribution of energy barriers that inhibit efficient information recording.

Building upon these findings, our model has further facilitated the proposal of a novel device structure, characterized by markedly reduced energy consumption. Endowed with high explanatory prowess and deeply rooted in the principles of physics, this machine learning model holds substantial promise. It is anticipated to be instrumental in elucidating the mechanisms of diverse materials where they currently remain undefined.



Reference

- 1) S. Kunii, K. Masuzawa, A. L. Foggiatto, C. Mitsumata & M. Kotsugi, Sci. Rep. 12, 19892 (2022)
- 2) A. L. Foggiatto, S. Kunii, C. Mitsumata & M. Kotsugi, Communications Physics 5, 277 (2022)
- 3) S. Kunii, A. L. Foggiatto, C. Mitsumata & M. Kotsugi, Sci. Tech. and Adv. Mater. Methods, 2 445-459 (2022)
- 4) C. Mitsumata, M. Kotsugi, J. Magn. Soc. Jpn, 46, (2022) pp. 90-96
- 5) K. Masuzawa, S. Kunii, A. Foggiatto, C. Mitsumata, M. Kotsugi, T. Magn. Soc. Japan. 6 (2022), 1-9.
- 6) T. Nishio, M. Yamamoto, T. Ohkochi, D. Nanasawa, A. Foggiatto, M. Kotsugi, Sci. Tech. and Adv. Mater. Methods, 2, pp 345-354, (2022)

Interfacial Imaging on Magnetic Junctions by Electron Microscopy

Atsufumi Hirohata,^{1,2} Kelvin Elphick,¹ David C. Lloyd¹ and Shigemi Mizukami²

¹ University of York, York YO10 5DD, United Kingdom

² Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

In spintronics, a large magnetoresistance (MR) ratio is a key parameter to achieve better performance in magnetic random access memory (MRAM) and a magnetic bipolar operation.¹⁾ Theoretically coherent tunnelling has been predicted to exceed 1,000% at room temperature.^{2),3)} However, experimentally recent demonstration of 631% tunnelling MR (TMR) ratio using a CoFe/MgO/CoFe(001) magnetic tunnel junction (MTJ) is the largest reported to date.⁴⁾ To investigate the origin of this departure, we categorised MTJs into four types; (a) polycrystalline, (b) epitaxial, (c) lattice softened and (d) lattice matched (without dislocations) MTJs.⁵⁾ We then characterised the differences in their interfaces using cross-sectional transmission electron microscopy (TEM) and non-destructive imaging by scanning electron microscopy (SEM).

We correlated their interfacial crystalline structures with their local magnetic properties, namely spin-polarised electron transport. The reduction in a TMR ratio was found to be caused by the density of interfacial dislocations and disorder. In our study, the minimum dislocation density has been achieved at a $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}/\text{MgO}$ interface. This has been achieved by the post-annealing of an amorphous junction rather than growing a junction epitaxially. On the other hand, a half-metallic ferromagnet has shown larger TMR ratios at low temperature but the presence of disordered phases formed at MgO interfaces induces large spin fluctuation with increasing temperature (see Fig. 1). For the improvement of the MR ratios, it is critical to eliminate such interfacial dislocations and disordering.

One approach is to use a ferromagnetic layer with soft lattice nature. We found a Co-Mn alloy can reduce the interfacial dislocation significantly against the MgO barrier, which is also found to hold soft lattice nature.⁶⁾ Our findings can be fed back to the growth and fabrication processes of MTJs for their optimisation and improvement.

The authors thank our fruitful discussion with Prof. Jun-ichiro Inoue. This work is partially supported by EPSRC (EP/V007211/1), JST CREST (JPMJCR17J5) and Royal Society International Exchange grants. S.M. thanks CSRN in CSIS at Tohoku University.

Reference

- 1) A. Hirohata, *Nat. Electron.* **5**, 832 (2022).
- 2) W. H. Butler *et al.*, *Phys. Rev. B* **63**, 054416 (2001).
- 3) J. Mathon and A. Umerski, *Phys. Rev. B* **63**, 220403(R) (2001).
- 4) T. Scheike *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 112404 (2023).
- 5) A. Hirohata *et al.*, *Front. Phys.* **10**, 1007989 (2022).
- 6) K. Elphick *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **16**, 054052 (2021).

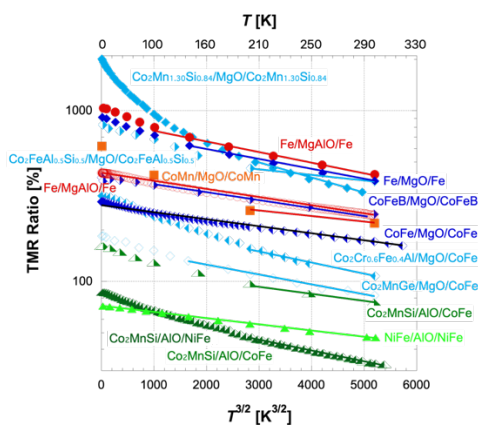


Fig.1 Temperature-dependence of TMR ratios of four types of MTJs.⁵⁾

Nanostructure characterization of magnetic materials by SEM/TEM/APT

Taisuke Sasaki, Jun Uzuhashi, Tadakatsu Ohkubo

(Research Center for Magnetic and Spintronic Materials, National Institute for Materials Science)

For the development of high-performance magnetic materials, microstructure control is effective in improving microstructure-sensitive properties such as coercivity, magnetization, magnetoresistance (MR) ratio, *etc.* Because the microstructures that influence properties could exist over a wide range of micro to atomic scales, their direct visualization requires the complementary use of different microscopy techniques. This talk will present examples of microstructural analysis of neodymium magnets, current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistive (CPP-GMR) devices, and nanocrystalline soft magnets, using scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), and atom probe tomography (APT), and discuss how an in-depth understanding of the microstructure is effective in proposing guiding principles for the enhancement of the important properties in applications.

(1) Nd-Fe-B magnets - Coercivity enhancement by grain boundary diffusion (GBD) process¹⁾

GBD process is a way to improve the coercivity with minimal use of heavy rare-earth (HRE) elements. The coercivity enhancement is attributed to the HRE-rich shell formed on the surface of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ grains, Fig. 1. However, the coercivity enhancement has been limited to ~ 2 T when the HRE-free sintered magnets are treated with the Dy-GBD process. We clarified the formation mechanism of the HRE-rich shell through SEM and TEM analyses and learned that further coercivity enhancement is expected by increasing the HRE content in the HRE-rich shell. Then, we applied the two-step GBD process, originally proposed in the study of hot-deformed magnets, to demonstrate a high coercivity of 2.8 T in a fine-grained sintered magnet.

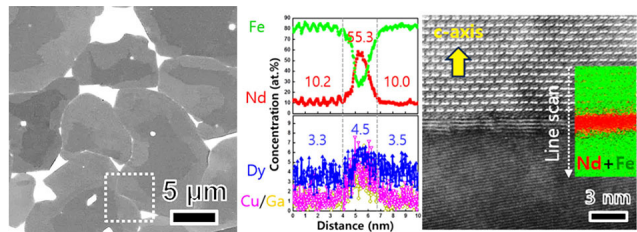


Fig. 1: SEM image showing HRE-rich shell formation on $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ grain surface and HAADF-STEM and EDS elemental map of a sintered magnet treated with Dy-GBD.

(2) Influence of sample shape on APT analysis of soft magnetic nanocrystalline materials²⁾

APT can map out the elemental distribution in nanoscale in 3D. However, the laser irradiation conditions significantly affect the mass resolution because the laser-assisted field evaporation occurs. Recently, we found that the laser conditions, the material's thermal conductivity, and the tip geometry, such as tip radius and taper angle, affect the quantitatively. I will show an analysis result of soft magnetic nanocrystalline material and the technique to improve the quantitatively.

(3) CPP-GMR devices - Effect of atomic-scale interfacial structure on the banding matching and MR properties

Electronic band matching at the interface between ferromagnetic and nonmagnetic metals affects the spin-dependent transport properties such as the giant magnetoresistance (GMR) effect. Jung *et al.* found the insertion of very thin 0.21-nm-thick NiAl layers at the $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ (CFGG)/Ag interfaces leads to an increase in MR ratio⁴⁾. We analyzed the CFGG/Ag interfaces with Ni insertion using STEM/EDS analysis and revealed the interface structure in atomic scale, *i.e.*, the Co atoms in a second termination layer from the Ag interface are replaced with Ni monolayer, Fig. 2⁵⁾. The proposed structure is implemented into first-principles calculations of ballistic transmittance and revealed that substituting the Co termination layer with Ni improved electronic band matching of majority spin electrons.

As such, microstructure analysis reveals the effects of micro- to even atom-level microstructure on properties, allowing the design of higher-performance magnetic materials.

Reference

- 1) Z. Wang *et al.*, *Acta Materialia* **248** (2023) 118774.
- 2) J. Uzuhashi *et al.*, *Ultramicroscopy* **247** (2023) 113704.
- 3) Jung *et al.*, *Applied Physics Letters* **108** (2016) 102408.
- 4) Bükler *et al.*, *Physical Review B* **103** (2021) L140405.

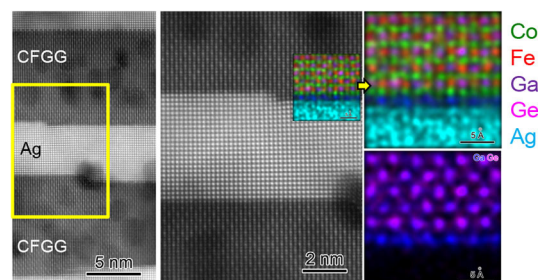


Fig. 2: HAADF-STEM image of a CFGG/Ag/CFGG pseudo-spin valve and atomic-resolution EDS elemental map.

Voltage-control of magnetization dynamics by using topological insulators

Takashi Komine and Takahiro Chiba*
(Ibaraki Univ., *Tohoku Univ.)

The voltage control of magnetic properties is both fundamentally and technologically important for next generation magnetic devices such as magnetoresistive random-access memories (MRAMs) and spin-wave-based logic devices. Voltage control of magnetic anisotropy (VCMA) in magnets promises energy-efficient reversal of magnetization in MRAMs by means of the so-called voltage torque. The voltage control of magnetic damping is also desirable to increase the performance of spin-wave-based logic gates and magnon-based transistors.

Herein, we theoretically study the voltage control of magnetic anisotropy by using a contact of three-dimensional topological insulators (TIs). We formulate a uniaxial magnetic anisotropy¹⁾ and effective damping constant²⁾ at the ferromagnet/TI interface as a function of an applied voltage³⁾. We proposed the field-effect-transistor (FET)-like devices which consists of TI and magnetic-topological-insulator (MTI) as shown in Fig. 1. We also demonstrate a reversal of magnetization by using the TI-based voltage-control of magnetic properties. This device realizes magnetization switching via spin-orbit torque (SOT) and VCMA which originate from 2D-Dirac electronic structure. We theoretically investigate influences of electronic circuit delay, noise, and temperature on write-error-rate (WER) in voltage-controlled magnetization switching operation of an MTI-based device by means of the micromagnetic simulation⁴⁾. We reveal that the device operation is extremely robust against circuit delay and signal-to-noise ratio. We demonstrate that the WER on the order of approximately 10^{-4} or below is achieved around room temperature due to steep change in VCMA as shown in Fig. 2. Also, we show that the larger SOT improves thermal stability factor. This study provides a new perspective for developing voltage-driven spintronic devices with ultra-low power consumption.

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (Grants No. 20H02196, 22K14591, 22H01805, 20K03814, 18KK0132) from the Japan Society for the Promotion of Science, by the Spintronics Research Network of Japan (Spin-RNJ). This work was partially performed under the Research Program of “Dynamic Alliance for Open Innovation Bridging Human, Environment and Materials” in “Network Joint Research Center for Materials and Devices”.

References

- 1) T. Chiba and T. Komine, *Phys. Rev. Appl.* **14**, 034031 (2020).
- 2) T. Chiba, A. O. Leon, and T. Komine, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 252402 (2021).
- 3) T. Chiba, A. O. Leon, and T. Komine, *The 240th Topical Symposium of the Magnetic Society of Japan/The 95th Technical Meeting on Nanomagnetism*, (2022).
- 4) T. Komine and T. Chiba, *Appl. Phys. Lett.* (submitted).

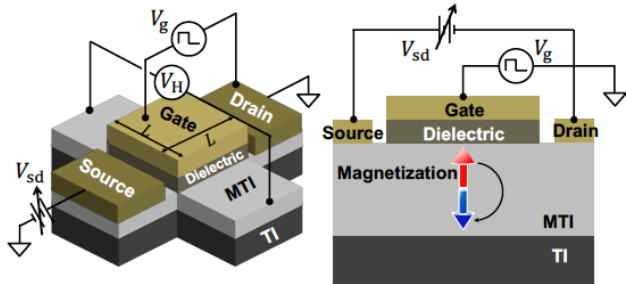


Fig. 1 Schematic illustration of an MTI-based device with a FET-like structure consisting of magnetic-TI (MTI) and TI film.

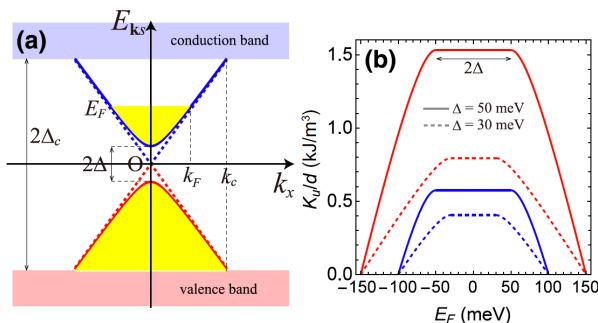


Fig. 2 (a) Massless (dashed line) and massive (solid line) surface state dispersions, (b) Scaled magnetic anisotropy energy K_u/d as a function of Fermi level E_F for different values of bulk gap and surface gap.

磁性元素を添加した SnSe 薄膜における異常ネルンスト効果

和田和己、宮町俊生、水口将輝
(名古屋大)

Anomalous Nernst effect in SnSe thin films doped with magnetic elements

Kazuki Wada, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi
(Nagoya Univ.)

はじめに

異常ネルンスト効果 (ANE) は、熱磁気効果の一つであり 異常ネルンスト効果の起電力発生方向が熱流方向に垂直であるという特異性から、その素子設計を工夫することにより高性能な熱電素子への応用が可能になると期待されている¹⁾。しかしながら、実用的な応用に結実した研究例は報告されていないため、新たな材料の開発が求められている。本研究では、大きなゼーベック係数をもつ半導体として知られる SnSe に磁性元素である Fe を添加した薄膜を作製し、その物性を調べ、異常ネルンスト効果の観測を試みた。

実験方法

スパッタリング法により、酸化被膜付き Si 基板上に Fe 元素を添加した SnSe 薄膜を成膜した。Fe は DC マグネトロン方式で、SnSe は RF マグネトロン方式でスパッタした。成膜後、150°C においてアニール処理を1時間施した。Fe に印加するパワーを調整することにより、Fe と SnSe の組成を変化させた試料を室温で作製した。X 線回折 (XRD) により各試料の結晶構造を、振動試料型磁力計 (VSM) により磁気特性を測定した。また、物理特性測定システム (PPMS) により各試料のホール効果、ゼーベック効果、ネルンスト効果の測定を室温で行った。

実験結果

XRD の測定の結果、Fe の添加によって SnSe (200), SnSe (400) の回折ピーク位置にシフトが見られ、Fe が SnSe の結晶格子に内包されていることが示唆された。VSM による磁気特性の評価の結果、Fe の含有率が 7.8% 以下の試料では自発磁化が観測されなかったが、含有率が 11.5% 以上の試料では自発磁化が観測され、Fe の含有率が増加するにつれ自発磁化も大きくなる傾向がみられた。また、特定の Fe の含有率の試料において、異常ホール電圧、異常ネルンスト電圧が観測された。図 1 に Fe の含有率が 23.5% の試料におけるネルンスト電圧 (V_{xy}) の測定結果を示す。試料の磁化曲線と対応するネルンスト電圧曲線が得られた。講演では、Fe の含有率と物性の関係についても詳細に議論する。

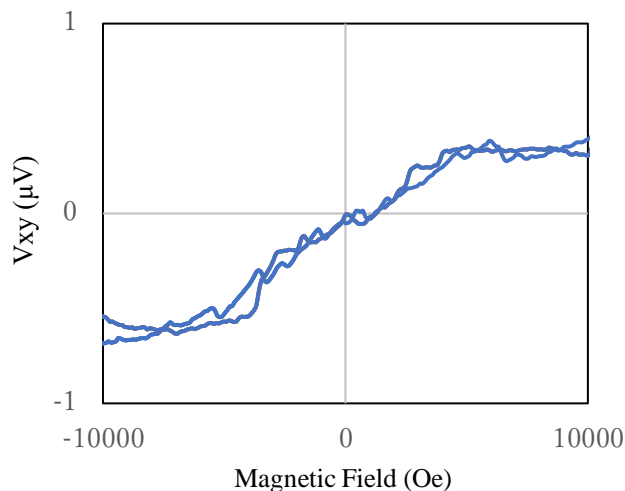


Fig.1 V_{ANE} as a function of magnetic field for $Fe_{23.5}(SnSe)_{76.5}$ thin film with the thickness of 100 nm.

参考文献

- 1) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **20**, 262 (2019).

FePt 薄膜における異常ネルンスト効果の電界制御

吉田颯稀、宮町俊生、水口将輝
(名古屋大学)

Electric field control of anomalous Nernst effect in FePt thin films

S. Yoshida, T. Miyamachi, M. Mizuguchi
(Nagoya Univ.)

はじめに

磁気メモリのようなスピントロニクスデバイスの動作には電流が必要であり、動作時の電力消費が大きいという問題がある。そこで、小さな消費電力で動作するスピントロニクスデバイスの開発にあたり、電界効果トランジスタ (FET) と同様の原理で電界を印加することで磁性材料の特性を制御するという手法が注目されている。バルクの金属では印加した電界は自由電子によって遮蔽されるが、表面の数原子層は電界の効果を受けるため、表面積と体積の比が大きい厚さ数 nm の金属超薄膜においては電界効果による特性制御が可能である。本研究では、強磁性超薄膜の異常ネルンスト効果 (anomalous Nernst effect: ANE) を電界印加により制御することを目的とした。強磁性材料として、 $L1_0$ 型構造をとった際に大きな一軸磁気異方性を持つ硬磁性材料であり、電界効果による磁気特性の変調が報告されている FePt を選択した^{1,2)}。また、試料との間に形成される電気二重層を利用して小さな外部電圧から巨大な電界を発生させることを目的とし、電界を印加するゲート電極の材料には常温で液体として存在する塩であるイオン液体を使用した。イオン液体を利用して FePt 超薄膜にゲート電界を印加した際の ANE の変化を調べた。

実験方法

MgO(001)単結晶基板上にマグネトロンスパッタリング法で MgO バッファ層 40 nm、FePt 2 nm を成膜した。FePt の $L1_0$ 型構造への規則化を促すために、FePt 成膜時および成膜後に 250°C での熱処理を施した。作製した試料はフォトリソグラフィと Ar イオンエッチングによってホールバー形状に加工した。その上にイオン液体 (TMPA⁺-TFSI) のフィルムを貼り付け、表面に Au 50 nm を蒸着してゲート電極を作製した。試料の結晶構造解析は X 線回折 (XRD) 装置を用いて行った。磁気特性評価は磁気光学カー効果 (MOKE) および磁気特性測定システム (MPMS) を用いて測定した。異常ホール効果 (anomalous Hall effect: AHE) および ANE は物理特性測定システム (PPMS) を用いて室温で測定した。試料の磁化、AHE、ANE の測定時には、磁性体中に電子が蓄積する方向にゲート電界を印加した。

実験結果

XRD の測定の結果、FePt 薄膜は $L1_0$ 型規則構造になっていることが確認された。また、MOKE 測定の結果、試料は垂直磁化膜になっていることが分かった。MPMS による磁化測定の結果、ゲート電界の増加に伴って試料の磁化が増加することが確認された。また、その変化は可逆的であった。異常ホール電圧および異常ネルンスト電圧の測定を行った結果、両者の大きさにゲート電界による変調が確認された。講演では、ゲート電界依存性などについて詳細に議論する予定である。

本研究の実験にあたり、大阪大学 小山知弘氏、千葉大地氏、電力中央研究所 小野新平氏に御協力いただいた。本研究の一部は、物質・デバイス領域共同研究拠点における共同研究である。

参考文献

- 1) M. Weisheit, S. Fähler, A. Marty, Y. Souche, C. Poinsignon, and D. Givord, *Science* **315**, 349 (2007).
- 2) T. Seki, M. Kohda, J. Nitta, and K. Takahashi, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 212505 (2011).

Fe/Pt 金属人工格子における横型熱電変換の性能指数

山崎匠¹, 平井孝昌², 八木貴志³, 内田健一^{1,2}, 関剛斎^{1,2}, 高梨弘毅^{1,4}

(¹東北大金研, ²NIMS, ³産総研, ⁴ASRC, 原子力機構)

Figure of merit for transverse thermoelectric conversion in Fe/Pt metallic superlattices

T. Yamazaki¹, T. Hirai², T. Yagi³, K. Uchida^{1,2}, T. Seki^{1,2}, and K. Takanashi^{1,4}

(¹IMR, Tohoku Univ., ²NIMS, ³AIST, ⁴ASRC, JAEA)

はじめに

横型熱電変換は温度勾配に対し垂直な方向に電場が生じる現象であり、接合部の無い単純な素子構造により出力を増強できるという、従来型の熱電変換にはない特長を有する[1]。磁性体中に生じる現象としては異常ネルンスト効果が挙げられる。横型熱電変換性能の評価指標である無次元性能指数 ZT ($= S_T^2 \sigma_{yy} / \kappa_{xx}$) は横熱電能 S_T (x 方向に与えた温度勾配と y 方向に発生した電場 E_y の比)、電気伝導率 σ_{yy} 、熱伝導率 κ_{xx} によって決定される。金属人工格子では S_T が增大することが知られており[2,3]、また、界面の存在により積層方向に κ_{xx} を抑制できる可能性があるため、 ZT の増大に繋がり得る。しかし、これまでに金属人工格子の κ_{xx} を評価した報告例はなく、 ZT の定量評価もなされていない。そこで本研究では時間領域サーモフレクタンクス法 (TDTR) [4]により金属人工格子の膜厚方向の κ_{xx} を計測する。さらに、熱流束法による横型熱電効果計測[5]や4端子法と組み合わせることで S_T および ZT を評価する。

実験結果

スパッタリング法を用いて SrTiO₃(STO)(001)基板および Quartz 基板上に N ($=50, 100, 200$) を変化させた Fe(2 nm)/[Pt(t_{Pt})/Fe(t_{Fe})] _{$\times N$} 人工格子を室温積層した。ここで、全ての N に対し Fe/Pt 人工格子全体の膜厚がおおよそ一定になるよう、 t_{Fe} と t_{Pt} を変化させた。加えて、Fe と Pt の共蒸着により FePt 合金膜も参照試料として作製した。TDTR 用の試料にはトランスデューサー層の Al 膜を最上層に成膜した。反射高速電子線回折法より STO 基板上的 Fe/Pt 人工格子がエピタキシャル成長していることを確認した。

κ_{xx} を TDTR により、 σ_{yy} をホールバー形状に微細加工した試料を用いた 4 端子法により計測し、それぞれの N 依存性を調査した。 κ_{xx} と σ_{yy} は N の増加に伴い単調に減少する傾向を示し、 κ_{xx} は $N = 200$ で最小値を示した。また、STO 基板と Quartz 基板上的試料間の値を比較すると、 κ_{xx} は基板に依存した違いが顕著でないのに対し、 σ_{yy} は全ての N において STO 基板上的試料の方が Quartz 基板上的試料より高い値を示した。これは、 κ_{xx} において電子熱伝導率が支配的だとすると、Fe、Pt 各層におけるエピタキシャル膜と多結晶膜の電子散乱の寄与の差が膜面内方向と膜厚方向とで異なっていることを示唆している。

面内磁化配置の S_T を熱流束法により評価した。面内磁化配置における Fe/Pt 人工格子中の横型熱電効果には異常ネルンスト効果とスピンゼーベック効果の寄与が含まれる。熱流束法では、印加した熱流束 $-j_q$ で規格化した E_y が得られる。 $S_T = \kappa_{xx} E_y / (-j_q)$ より、TDTR で計測した κ_{xx} を用いることで S_T を見積もることが可能となる。 S_T の N 依存性を調べたところ、 S_T は N の増加に伴い単調に増加し、 N が大きい領域では STO 基板上的試料の方が Quartz 基板上的試料と比べて大きくなる傾向が得られた。また、 ZT も N の増加と共に上昇する結果となった。講演では、 S_T の N 依存性の起源について詳細に議論する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP18H05246, JP22K20495), JST CREST (JPMJCR17I1), および JST ERATO (JPMJER2201) の支援を受けて行われた。

参考文献

[1] K. Uchida and J. P. Heremans, *Joule* **6**, 2240 (2022). [2] K. Uchida *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 094414 (2015). [3] T. Seki *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, L020402 (2021). [4] D. G. Cahill, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 5119 (2004). [5] A. Sola *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 46752 (2017).

アモルファス TbFeCo 磁性薄膜における熱電テンソルの組成依存性

小峰啓史, 安藤亮* (茨城大, *茨城高専)

Composition dependence of thermoelectric tensor in amorphous TbFeCo magnetic thin films

Takashi Komine, Ryo Ando* (Ibaraki Univ., *NIT, Ibaraki College.)

1 はじめに

近年、磁性材料における熱とスピンの相互作用が着目され、異常ネルンスト効果が活発に議論されている¹⁾。我々は、これまでに希土類-遷移金属アモルファス合金である TbFeCo 垂直磁気異方性薄膜の輸送特性について研究を行い、異常ネルンスト効果と異常ホール効果が補償組成を挟んで同様に符号反転することを明らかにした²⁾。しかし、異常ネルンスト効果の大きさを決定する熱電テンソルの組成依存性は十分に調べられていない。本研究では、Tb 量を変えて作製した TbFeCo 垂直磁気異方性薄膜の熱電特性に寄与する各輸送特性から熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を算出し、熱電テンソルの組成依存性を報告する。

2 実験方法

RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて、ガラス基板上に AlN(25nm)/Tb-Fe-Co(50nm)/AlN(5nm) を積層することで試料を作製した。輸送特性に対する膜組成の影響を正しく評価するために、電極を磁性膜に対して点接触するように配置した³⁾。膜面垂直方向に磁場を印加しながら、素子両端に 0 から 10K の温度差を付与し、温度差方向に生じるゼーベック電圧、および、磁場印加方向と温度差方向に直交する方向に生じる異常ネルンスト電圧を測定することで、温度差に対する傾きから、ゼーベック係数 S_{xx} と異常ネルンスト効果に相当する Off-diagonal thermopower(ODT) S_{yx} を算出した。また、同じ素子において電気抵抗率 ρ_{xx} 、異常ホール抵抗率 ρ_{yx} を評価した。

3 結果と考察

ゼーベック係数 S_{xx} 、及び、ODT S_{yx} の Tb 量依存性を Fig.1 に示す。ゼーベック係数 S_{xx} は、TM-rich に向かうにつれて単調に増加する。一方、ODT S_{yx} は補償組成を挟んで符号反転し、この符号が異常ホール係数と一致することは以前の報告²⁾と同様である。

熱電現象を含む一般化されたオーム則より、ゼーベック係数 S_{xx} 、ODT S_{yx} は、抵抗率テンソル $\underline{\rho}$ 、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を用いて以下のように表すことができる。

$$S_{xx} = \rho_{xx}\alpha_{xx} + \rho_{xy}\alpha_{yx},$$

$$S_{yx} = \rho_{yx}\alpha_{xx} + \rho_{xx}\alpha_{yx}$$

熱電現象を記述する輸送係数としては、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ が本質的であると考え、測定した物性値を用いることで、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を算出した。測定値を元に算出した熱電テンソルの対角成分 $|\alpha_{xx}|$ 、非対角成分 $|\alpha_{yx}|$ の Tb 量依存性を調べた結果を Fig.2 に示す。Tb 量の減少に伴い、 $|\alpha_{xx}|$ 、 $|\alpha_{yx}|$ が単調に増加することがわかる。伝導度のべき乗則 $\sigma_{yx} = \lambda\sigma_{xx}^{2-n}$ を仮定して、Mott 公式と比較すると、Tb 量減少に伴い、指数 n が $n = 1$ から $n = 0$ に推移することが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金 (No. 20H02196, 22H01805, 18KK0132) の支援により行われました。ここに深謝します。

References

- 1) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **20**, 262, (2019).
- 2) R. Ando, T. Komine, and Y. Hasegawa, *J. Elec. Mater.* **8**, 3570-3575 (2016).
- 3) R. Ando, T. Komine, *AIP Adv.* **8**, 056326 (2018).

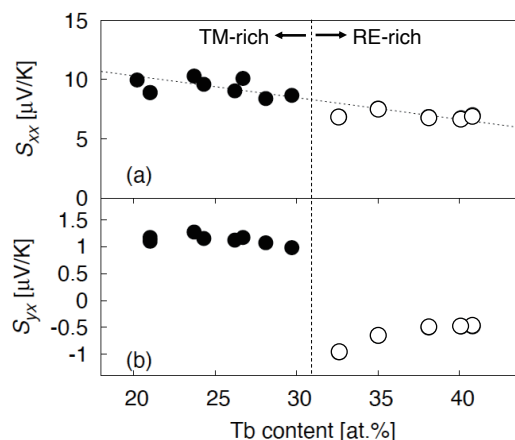


Fig. 1 Composition dependence of (a) Seebeck coefficient, and (b) off-diagonal thermopower (ODT) in Tb-Fe-Co thin films.

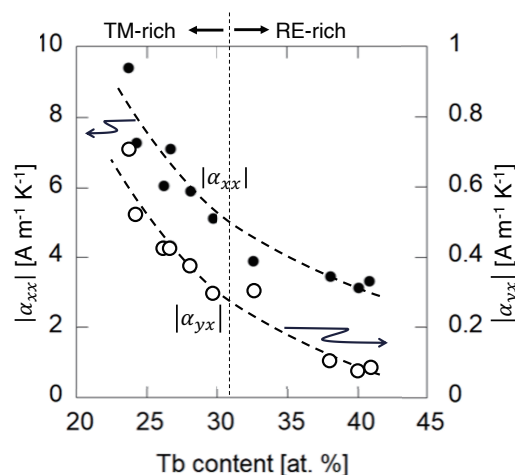


Fig. 2 Composition dependence of thermoelectric tensor in Tb-Fe-Co thin films.

GdFeCo フェリ磁性多層薄膜における異常ネルンスト電圧

小林祐希¹, 北澤楓太¹, 笠谷雄一², 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Anomalous Nernst voltage in GdFeCo ferrimagnetic multilayer thin film

Yuki Kobayashi¹, Fuuta Kitazawa¹, Yuichi Kasatani², Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate school of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに

温度勾配と磁化に共に直交する方向に電界が生じる異常ネルンスト効果を示す金属強磁性体(FM)を用いた[FM/FM]_n積層構造では、隣接磁性金属層間の磁気交換結合の有無による異常ネルンスト電圧の変調など単層膜とは異なる電気輸送現象の発現が期待される。金属層の電氣的導通による異常ネルンスト効果に起因する短絡電流の生成も考えられる。我々はこれまでに、GdFe フェリ磁性薄膜における異常ネルンスト係数 S_{ANE} の符号反転を含む組成依存性や電気輸送現象に関する物理定数との相関につき報告してきた¹⁾。本報告では、磁性金属の積層構造において生じる異常ネルンスト電圧の検出を目的として、GdFeCo を積層し横電圧検出端子部で上下層を短絡したフェリ磁性多層薄膜における検討を行った。

実験方法

GdFeCo フェリ磁性単層薄膜と GdFeCo フェリ磁性多層薄膜における異常ネルンスト電圧につき比較検討を行う。多層膜は磁性層(A層とB層)の保磁力が異なり、かつ垂直磁化膜となるように設計した。また磁気交換結合の分断を目的に5 nm厚のSiN中間層を挿入した。単層膜は多層膜の磁性層(A層)の合金組成と等しく、かつ総磁性層膜厚が等しくなるように設計した。このような単層膜: SiN(60 nm) / Gd₂₂Fe₆₈Co₁₀(20 nm) / SiN(5 nm) / Si sub., および二層膜: SiN(60 nm) / A層: Gd₂₂Fe₆₈Co₁₀(10 nm) / SiN(5 nm) / B層: Gd₂₇Fe₆₄Co₉(10 nm) / SiN(5 nm) / Si sub. をマグネトロンスパッタ法で作成した。これらの試料に対して膜面垂直(z)方向に外部磁界 H を印加し、膜面内(x)方向に温度勾配 $\nabla_x T$ を与え、電圧検出端子部で上下層を短絡し膜面内(y)方向の電圧 V_{yx} を測定した。

実験結果と考察

温度勾配が無いとき、および-20 K/cmのときの V_{yx} の外部磁界依存性を Fig. 1 に示す。単層膜・二層膜ともに $\nabla_x T = -20$ K/cm で V_{yx} の外部磁界に対するヒステリシス曲線が測定された。単層膜は2種の値に、二層膜は4種の値(V_a, V_b, V_c, V_d)に V_{yx} が離散化した。温度勾配が無いとき V_{yx} は外部磁界に依らず一定であることから、 V_{yx} は確かに温度勾配に起因する電圧であることを確認した。本試料系と同様の磁性層と SiN 中間層を有する GdFeCo フェリ磁性多層薄膜の磁気光学応答の外部磁界依存性も4値に離散化することが報告されている²⁾。二層膜試料を構成する各層はそれぞれ垂直磁化膜であり、保磁力の異なる上下層の組み合わせから4状態が存在し外部磁界の掃引により状態遷移するが、各磁化状態に対応し V_{yx} が4値を取ることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(21K04184)の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) Y. Kobayashi *et al.*, *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 34-39 (2023).
- 2) S. Terashita *et al.*, 第39回 日本磁気学会学術講演会概要集, 10pD-11 (2015).

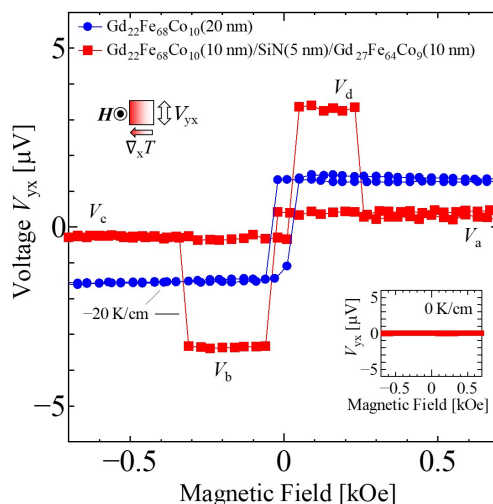


Fig.1 External magnetic field dependence of voltage V_{yx} of GdFeCo single/multi layer thin films.

巨大異常ネルンスト効果を示す Fe₃Ga 薄膜のスピンド分極バンド構造の観測

大和田清貴、中西楓恋、黒田健太、宮本幸治、奥田太一、
周偉男*、磯上慎二*、増田啓介*、桜庭裕弥*、木村昭夫
(広島大、*物材機構)

Unraveling spin-polarized band dispersions of Fe₃Ga thin films exhibiting a giant anomalous Nernst effect

K. Ohwada, K. Nakanishi, K. Kuroda, K. Miyamoto, T. Okuda,
W. Zhou*, S. Isogami*, K. Masuda*, Y. Sakuraba* and A. Kimura
(Hiroshima Univ., *NIMS)

はじめに

熱電変換材料は、排熱エネルギーから直接電気エネルギーへ変換が可能であることから、環境問題を解決するキーマテリアルの一つである。なかでも磁性体で発現する異常ネルンスト効果(ANE)は、熱勾配に対し垂直に起電力を発生するため、柔軟なデバイス応用が可能であるとして大きな注目を浴びている[1]。一方で、ANEで発生できる起電力は1Kあたり0.1μVオーダーであったが、最近Fe_{0.68}Ga_{0.32}薄膜において起電力が純Feに比べ2桁大きな2.4μV/Kに達することが報告された[2]。更に規則化したD0₃相Fe₃Gaでは起電力が4μV/Kに達し、これはバンド構造内に発生する仮想磁場(ベリー曲率)に起因する内因性効果が原因であると示唆されている[3]。この巨大ANEが内因性効果によって引き起こされているかどうかを確かめるためには、まずFe₃Gaのバンド構造にアプローチする必要があるが、これまでは第一原理計算を主体とした議論が行われてきた。一方、ベリー曲率をもとにした横熱電伝導度 α_{xy} はフェルミ準位(E_F)の位置に敏感に変化し、数十meV程度のエネルギーシフトで符号まで変わってしまうことがある。このことから、内因性機構の有無を判定するには、バンド構造を実験的に可視化し実際の E_F の位置を把握した上で、 α_{xy} との対応関係を明らかにする必要がある。角度分解光電子分光(ARPES)は物質のバンド構造を直接可視化できる実験手法としてよく知られるが、その高い表面感性から、へき開が可能な二次元系に適用が限定されていた。一方、Fe₃Gaはその高い3次元性のためへき開が困難で、これまでARPESを用いた実験は皆無であった。さらに、バルク試料の場合残留磁化が残らない場合が多く、スピンド分解ARPES(Spin-ARPES)実験には適さない。

実験手法と結果

そこで本研究では、物質・材料研究機構にて超高真空マグネトロンスパッタリング法を用いてD0₃相Fe₃Ga薄膜を成膜し、超高真空スーツケースを用いて広島大学HiSORに移送することにより、試料を大気にさらすことなく(Spin-)ARPES実験を行った。入射光のエネルギー($h\nu$)を60-100eVの範囲で変化させARPES測定を行うことにより、面直波数と $h\nu$ との関係を見出した。Fig.1は $h\nu=60$ eV(p 偏光)でのARPESイメージである。 E_F を横切る特徴的なバンド α と、 E_F から測って約1.2eV下から E_F に向かって分散する構造 β などいくつかのバンド分散が観測された。いくつかの面内波数($k_{||}$)についてスピンド分解エネルギー分布曲線を観測したところ、 α と β は少数スピンドバンドと帰属された。さらに第一原理計算との比較から、実際の E_F は計算値に比べ+30meVのずれがあることもわかった。計算で得られたベリー曲率をもとに久保公式から得られた α_{xy} が、ちょうど実験で得られた E_F で増大することがわかった。その α_{xy} の増大はブリルアンゾーンのL点を囲む領域に現れる大きなベリー曲率に起因することが明らかとなった。

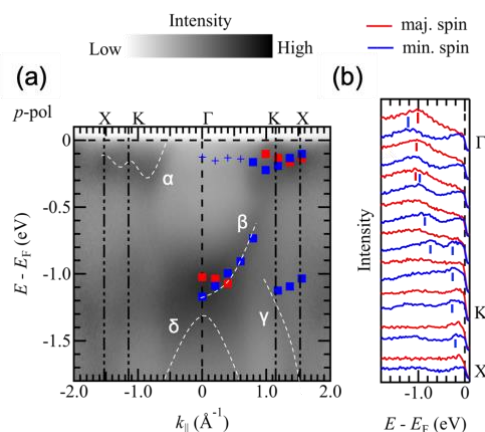


Fig.1: (a) ARPES image and (b) spin-resolved energy distribution curves at $h\nu=60$ eV along Γ KX line measured with p -polarized light.

参考文献

- 1) K. Uchida, W. Zhou, and Y. Sakuraba, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 140504 (2021).
- 2) H. Nakayama *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 114412 (2019).
- 3) A. Sakai *et al.*, *Nature* **581**, 53 (2020).

Ge をドーブした Co 薄膜における異常ネルンスト効果

辻本卓哉¹, 藤田武志², 宮町俊生¹, 上田茂典³, 水口将輝¹

(名古屋大学¹, 高知工科大学², 物質・材料研究機構³)

Anomalous Nernst effect in Ge-doped Co thin films

Tsujimoto Takuya¹, Takeshi Fujita², Toshio Miyamachi¹, Shigenori Ueda³,

Masaki Mizuguchi¹

(Nagoya Univ.¹, Kochi Univ. Tech², NIMS³)

はじめに 新規熱電変換デバイスへの応用として異常ネルンスト効果 (anomalous Nernst effect: ANE) に注目が集まっている^[1]。一般的に ANE は温度勾配と磁化の外積方向に電圧が生じるため、従来のゼーベック効果よりも自由度の高いデバイス設計が可能となる。一方で、ANE はその変換効率の低さが問題となっており、一般的な強磁性体である Fe や Co でのネルンスト係数 (S_{xy}) は $0.3 \mu\text{V/K}$ 程度である。熱電変換などのデバイス化に向けてはおよそ $20 \mu\text{V/K}$ 以上の変換効率が必要とされており、近年では S_{xy} の大きな材料の探索や、ナノ構造の導入による ANE の増大などの研究が盛んに行われている。これまでに Co に MgO をドーブした薄膜において、ANE の増大を報告した^[2]。そこで本研究では、ドーブする材料を絶縁体から半導体に変えた薄膜における熱磁気特性の調査を目的とし、Co に Ge をドーブした薄膜を作製してその ANE を調べた。

実験方法 MgO(001) 基板上にマグネトロンスパッタにより組成の異なる $\text{Co}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄膜を室温で 5 種類作製した ($x = 0, 0.13, 0.17, 0.24, 0.35$)。ANE を含む磁気輸送特性を物理特性測定システム (PPMS) を用いて測定した。また、試料の電子状態を SPring-8 に設置された硬 X 線光電子分光測定装置により測定した。

実験結果 図 1 に示すように、Ge の添加量の増加に伴い ANE は増大し、Ge 濃度 $x = 0.24$ で最大値を示した。続いて、成膜後のアニール効果も調べた。 $x = 0.24$ の試料を 200°C および 400°C でアニールしたところ、ANE は増大し、 400°C でアニールした試料において $1.1 \mu\text{V/K}$ のネルンスト係数を確認した。硬 X 線光電子分光測定の結果より、試料のアニールにより、フェルミレベル近傍の電子状態が変調されたことがわかった。この電子状態の変化がネルンスト係数の増大に寄与している可能性が示唆された。

参考文献

- [1] H. Sharma, M. Mizuguchi *et al.*, *Sci. Rep.*, **13**, 4425 (2023).
 [2] P. Sheng, M. Mizuguchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 142403 (2020).

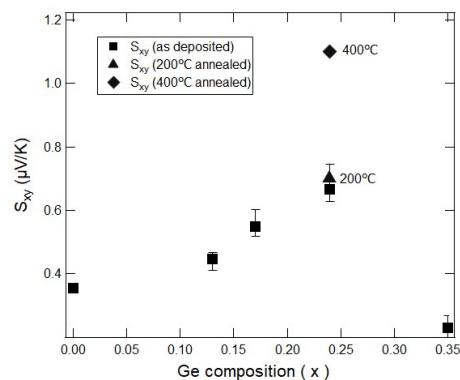


Fig.1. Ge composition and annealing temperature dependence of S_{xy} for Ge-doped Co thin films.

ダブルマグネット型マスター媒体によるバースト信号の転写特性

小峰啓史 (茨城大)

Printing characteristics of burst signals by using double magnet mater media

Takashi Komine (Ibaraki Univ.)

1 はじめに

磁気転写は、ハードディスクにサーボ信号を高速、安価に書き込む技術として期待されている。しかし、従来構造のマスター媒体¹⁾では、高保磁力を有するエネルギーアシスト磁気記録媒体に適用するのに十分な記録磁場を得ることが困難であった。近年、30 kOe 程度の高保磁力を有する媒体に対しても適用可能なダブルマグネット型マスター媒体 (Double Magnet Master, DMM) を提案し、規則的なパターンの転写において、従来マスター媒体よりも磁気転写特性が著しく向上することを示した²⁾。一方、サーボ信号はバースト信号やアドレス信号のような非周期の信号列で構成されているが、非周期的なパターンの転写特性は明らかではない。本研究では、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて、DMM によるバースト信号の転写特性を調べた。

2 計算方法

マスター磁性膜の計算モデルを Fig.1 に示す。バースト信号として AB バーストを想定した。AB バーストでは、基準周波数に対する On-Track 信号が Cross-Track 方向で変化することを利用して、位置決め誤差信号 (Position Error Signal, PES) を取得し、磁気ヘッドを On-Track に調整する。AB バーストの計算モデルを Fig.1 に示す。DMM 磁性膜には、ハード膜として $L1_0$ -FePt を、ソフト膜に FeCo を用いた Soft Double Magnet (SDM) を想定し、ソフト膜とハード膜の間に磁気分離層 1 nm を設けた。また、トラック幅を 50 nm, DMM と記録媒体の磁気的スペーシングを 2 nm とした。初めに、マイクロマグネティックシミュレーションにより、転写磁場 H_p 印加時のマスター磁性膜磁化を計算し、記録層に印加される記録磁場 H^r を計算した。計算した記録磁場を用いて転写シミュレーションを行い、転写された磁化状態から転写特性を評価した。媒体には、粒径 4.6 nm の六角柱セルで構成されるグラニューラー媒体を想定し、媒体保磁力は約 10 kOe である²⁾。

3 結果および考察

DMM 転写の場合、転写磁場印加時でも、ハード磁性膜の磁化が反転しないため、ソフト磁性膜とハード磁性膜の作る静磁場が重畳される。バースト部でも記録磁場の差 ΔH_z^r は約 15 kOe と従来マスター媒体に比べて大幅に増強される。転写磁場を 8.5 kOe としてバースト信号を転写した媒体の磁化分布を Fig. 2 に示す。Fig.2 から、ビット長を 10 nm としてもバースト信号形状を反映して、信号が明瞭に転写できることがわかる。また、ビット長が 10 nm, 20 nm いずれの場合でも、A, B バーストの Off-Track 部では初期磁化が保持されている。特に、バーストの Off-Track 部のように比較的長ビットな信号でも、所望の転写状態が得られたことから、DMM 転写により明瞭な PES が得られると期待される。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人フジクラ財団研究助成の支援により行なわれました。ここに深謝致します。

References

- 1) Nurul Sheeda *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3676-3678 (2009).
- 2) Takashi Komine, *IEEE Trans. Magn.* **58**, 3200105 (2021); *IEEE Trans. Magn.* **58**, 3200905 (2022); *AIP Adv.* **13**, 025310 (2023).

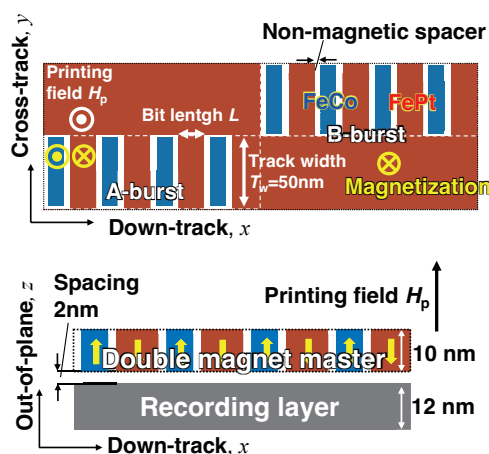


Fig. 1 Schematic illustrations of conventional master and double magnet master media for servo burst.

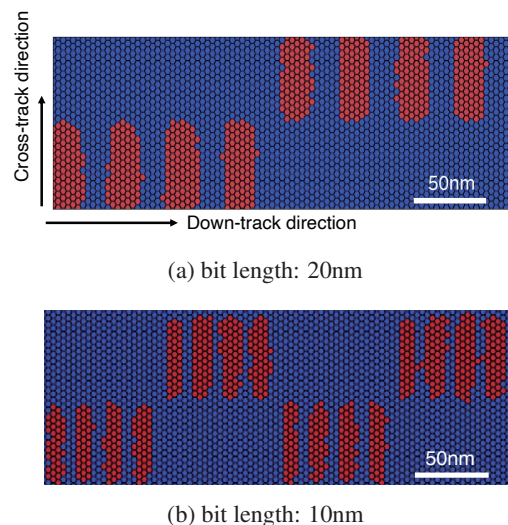


Fig. 2 Printed magnetization distributions of burst signals with bit lengths of (a) 20 nm and (b) 10 nm.

微小 Pt / Fe 薄膜から形成される FePt 微粒子の磁化状態

清水雄太¹, 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Magnetization state of FePt fine particles formed from micro Pt / Fe thin films

Yuta Shimizu¹, Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに

次世代の高密度記録媒体として $L1_0$ -FePt ナノ磁性微粒子群が注目されている。我々は長く熱酸化 Si 基板上に積層した Pt / Fe 連続二層膜への短時間の急速昇降温熱処理 (RTA : Rapid Thermal Annealing) による分離・凝集を伴う粒子化と $L1_0$ 規則合金化を行う手法を検討している¹⁾。近年新たに RTA の前段階に微細加工を行う手法を提案し、粒子サイズの低分散化及び周期配列化や微細加工サイズと微粒子への形態変化についても報告してきた^{2), 3)}。本研究では RTA 前の薄膜の孤立微小化を施すことで積層原子量比 (膜厚比) に応じた各微粒子形成とその磁化状態を検討した (Fig. 1)。低分散粒子形成条件にて作製した試料に対し磁気力顕微鏡 (MFM) を用いた形状・磁気像観察により形成微粒子の磁区の単一化や異方性について議論する。

実験方法

微細加工にて熱酸化 Si 基板上に孤立微小 Pt / Fe 薄膜群を作製し RTA を施し観察した。孤立微小 Pt / Fe 薄膜は Fig. 1(a) に示すように総積層膜厚 3.75 nm (Fe 1.64 nm, Pt 2.11 nm) の Pt / Fe 薄膜を DC マグネトロンスパッタリングにて作製した後、一辺 100 nm の正形状を 200 nm 周期の電子線描画設計にてリフトオフによりパターン加工を施した。その後、到達真空度 $<1.0 \times 10^{-3}$ Pa の雰囲気下で、最高到達温度 590 °C の RTA を施した。この試料を走査型電子線顕微鏡 (SEM) により粒子形状を確認し、磁気力顕微鏡 (MFM) で形状・磁気像を観察する。

実験結果

SEM 観察像を Fig. 2(a) に示す。平均粒径約 60 nm 周期 200 nm の規則配置微粒子群の形成を確認した。これよりいずれの形成微粒子も積層膜厚比に対応した組成を有すると考えられる。

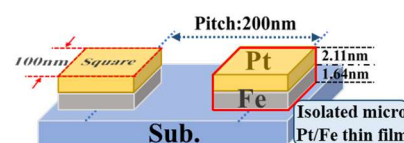
次に磁場印加を施すことなく MFM での形状・磁気像の観察を行った。結果を Fig. 2 (b), (c) に示す。形状像でも SEM 像と同周期の規則配列を確認した。更に同位置での磁気像を観察すると多くの粒子位置において二値化した濃淡部が観察されたことから、単磁区化及び膜面垂直方向に磁化した粒子が多く出現しているものと考えられる。以上から本形成手順により特殊な単結晶基板や結晶配向誘導下地層等を用いることなく膜面垂直方向に磁化容易軸を持つ粒子が形成できる可能性を示した。

謝辞

本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構の助成により行った。また日本大学理工学研究所研究員の笠谷雄一氏に微細加工の実現に際してご協力頂いた。

参考文献

- 1) Y. Itoh, et al. : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 12, 8040 (2004).
- 2) T. Naeki, et al. : *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues), **3**, 1 - 6 (2019).
- 3) Y. Shimizu, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto : *The Papers of, Technical Meeting on "Magnetics", IEE Japan.* MAG-22-144 (2022).



(a) Pre-Patterning



(b) Particulation by RTA

Figure 1 Overview of sample preparation methods

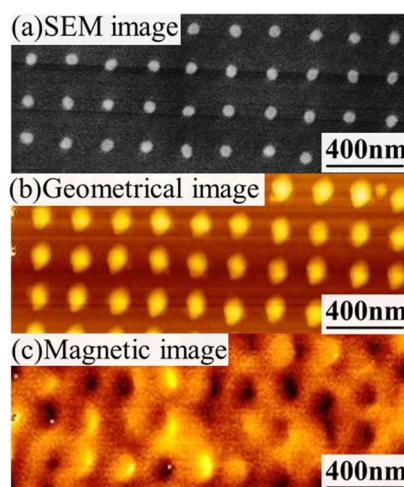


Figure 2 Particle observation image by SEM and MFM

マイクロ波アシスト磁化反転時のエネルギー障壁

水谷聡志, 菊池伸明, 畑山正寿, 島津武仁, 岡本 聡
(東北大)

Energy barrier height for microwave assisted switching
S. Mizutani, N. Kikuchi, M. Hatayama, T. Shimatsu, and S. Okamoto
(Tohoku Univ.)

はじめに マイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave assisted switching : MAS) においては, GHz 帯のマイクロ波磁場により磁化を励起することで反転磁場を低減させる. Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式の解析からアシスト効果の大きさ ΔH はジャイロ磁気定数 γ を用いて $\Delta H = 2\pi f_{rf}/\gamma$ であらわされ, マイクロ波磁場の周波数 f_{rf} に比例する. 実験でも周波数 f_{rf} に比例したアシスト効果が報告されているが, その比例係数は報告によりおおきなばらつきがある[1,2]. 我々のグループではこの挙動が熱活性の影響で説明できることを指摘した[2]. ところが, 熱活性の影響を取り込むには, マイクロ波磁場下でのエネルギー障壁の見積には煩雑な数値計算が必要であり, 様々な条件下での反転磁場の予測は困難であった. 本研究では, マイクロ波磁場下での熱揺らぎを考慮した反転磁場の近似式の導出を試み, 数値計算や実験結果との比較を行った.

方法と結果 マイクロ波磁場下でのエネルギー障壁高さ $\Delta\epsilon$ は Suto の方法に基づき計算した[4]. 計算では直流磁場 $h_{dc} = H_{dc}/H_k$, マイクロ波磁場 $h_{rf} = H_{rf}/H_k$, マイクロ波磁場周波数 $\omega_{rf} = 2\pi f_{rf}/\gamma H_k$ は異方性磁場 H_k を用いて規格化した. 無磁場中のエネルギー障壁を E_0 として $\Delta\epsilon = \Delta E/2E_0$ である. Fig. 1 に, $h_{rf} = 0.042$ の場合の計算結果を一例として示す. 磁化反転時のエネルギー障壁高さと緩和時間は 1 対 1 に対応するため, 図中の $\Delta\epsilon$ の等高線は一定の熱揺らぎ (温度・時間) の下での反転条件そのものとなる. つまり, これらの等高線の近似式が得られれば, 熱揺らぎを含めた MAS 挙動の簡便な予測・評価が可能となる. 本研究では臨界周波数 ω_c と, 臨界周波数以下の領域での等高線を直線で近似した式の導出を試みた. まず, $h_{rf} = 0.01 \sim 0.1$ の様々な h_{rf} に対して Fig. 1 と同様な計算を行った. 次に, 得られた結果を用いて臨界周波数 ω_c を $\Delta\epsilon$, h_{rf} の, 直流磁場 h_{dc} を $\Delta\epsilon$, h_{rf} , ω_{rf} を表す近似関数を導出した. Fig. 2 に, 近似関数により得られた ω_c を○で, ω_c 以下での h_{dc} の値を直線として, $\Delta\epsilon = 0 \sim 0.2$ の範囲について Fig. 1 と同様な数値計算の結果を重ねて示す. マイクロ波磁場振幅は, それぞれ(a)0.0315, (b)0.087 である. いずれにおいても, 数値計算の結果とよく一致し, 最も誤差の大きな臨界周波数近傍でも予測される反転磁場の誤差は 4%程度が得られた. 当日は数式の詳細および実験結果との比較についても議論する.

謝辞 本研究の一部は科研費(21H01791)および ASRC の補助によって行われました.

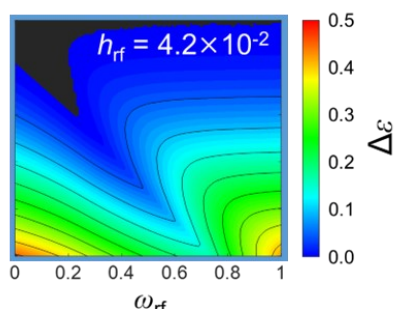


Fig. 1 The effective energy barrier height $\Delta\epsilon$

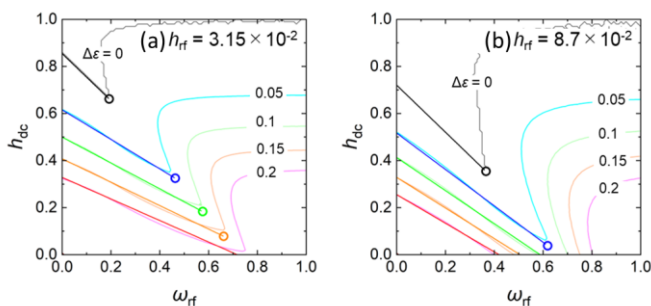


Fig. 2 Comparison between approximated function and numerical calculation for (a) $h_{rf} = 0.0315$ and (b) 0.087

参考文献

- [1] S. Mizutani et al. Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SB1012 (2023) [2] N. Kikuchi et al., Phys. Rev. B **105**, 054430 (2022).
[3] H. Suto et al., Phys. Rev. B. **91**, 094401 (2015).

CoPt-oxide グラニューラ薄膜の酸化物材料設計指針

齋藤美玖, 大橋栄久, 橋本篤志
(株式会社レゾナック・エレクトロニクス)

Design direction of oxide in CoPt granular thin film for perpendicular recording media

M. Saito, H. Ohashi, A. Hashimoto
(Resonac Electronics Corporation)

背景

垂直磁気記録媒体の磁気記録層は、CoPt 磁性粒子を酸化物粒界が取り囲むグラニューラ構造を有している。高記録密度化のためには CoPt 磁性粒子の磁性を損なうことなく磁気分離を促進し、かつ CoPt 磁性粒子が良好にコラム成長することが必要である。そのような構造の実現のためには、粒界材料として用いる酸化物材料の設計が極めて重要である¹⁾²⁾。本発表では、磁気特性および記録再生特性の観点から、CoPt-oxide グラニューラ薄膜における酸化物材料の設計指針を考察する。

実験方法

DC マグネトロンスパッタ装置を用いて、ガラス基板上に CrTi/ NiW/ Ru/ CoPt-(xA-yB)/ C の層構成で試料を作製した。ここで、A、B は、SiO₂, TiO₂, B₂O₃, Nb₂O₅, Ta₂O₅, Cr₂O₃, Co₃O₄, CuO, SnO₂ から選ばれる酸化物である。また、x、y は酸化物 A と酸化物 B の体積比であり、x+y=100% である。磁気ヒステリシスループは極 Kerr 装置、飽和磁化 M_s は振動試料型磁力計 (VSM)、磁気異方性エネルギー K_u は磁気トルク計を用いて評価を行った。

結果と考察

Fig.1 に、CoPt-(xA-yB)の酸化物材料として、A=SiO₂ を選択し、B として種々の酸化物を用いた場合の、酸化物 B 量に対する H_c の変化を示す。酸化物の組み合わせによっては H_c がある酸化物 B 量で極大値をとるもの (B=TiO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅, Cr₂O₃) が存在することがわかる。これはすなわち、CoPt-(xA-yB)グラニューラ膜の磁気特性は、酸化物 A と酸化物 B それぞれ単体を用いた時の磁気特性からは予想できない、ということの意味している。またこれらの試料の磁気トルクの結果から、 H_c は H_k と関連していることがわかった。このことは、酸化物の組み合わせにより H_k が増大する可能性があることを示唆している。発表当日は、これらの試料の構造解析の結果も踏まえ、垂直磁気記録媒体の磁気記録層としての CoPt-oxide グラニューラ膜の酸化物設計指針を考察する。

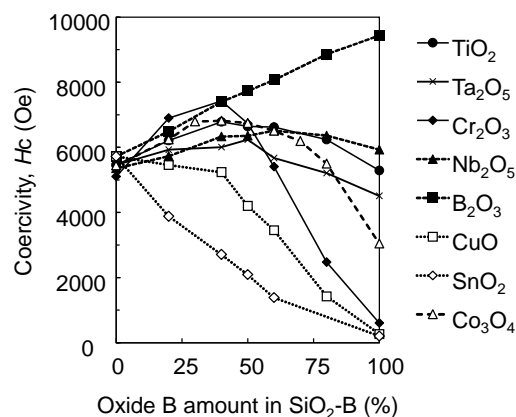


Fig.1 Oxide-B dependence of H_c for various oxide-B materials.

参考文献

- 1) K. K. Tham et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 07MC06 (2016)
- 2) K. K. Tham et al., *AIP Advances* 8 (5): 056510 (2018)

Mitigation method of mode hopping effect on NFT protrusion measurement

A. Sakoguchi, M. Furukawa, S. Nishida, R. Nishikura and K. Tasaka
Western Digital Technologies GK, Fujisawa, 252-0888, Japan

In hard disk drives (HDDs), head media spacing is controlled dynamically by using thermal flyheight control (TFC) heater. To achieve narrow head media spacing without contact, it's necessary to measure several types of protrusions in the head accurately and set appropriate TFC power to the TFC heater. Heat-assisted magnetic recording (HAMR), which is a leading technology to improve the areal density in HDDs, has a few nanometers of protrusion in near field transducer (NFT) in the head. NFT provides localized heat from the laser diode to the media. It enables to write into the high magnetic anisotropy media. In our previous works, we have proposed a NFT protrusion measurement method named burst writing scheme (BWS) from the spin-stand experiments¹⁾. In the development of BWS measurements in HDDs, we found unintentional read back amplitude drop in a small ratio of heads and it caused an estimation error of NFT protrusion. In this study, we investigated a root cause of amplitude drop and developed a mitigation method. HAMR drives, which rotation speed was 7200 rpm, was used in experiments. BWS measured the increase of read back amplitude with reducing head media spacing by applying TFC power. Since the time constant of NFT protrusion is more than 60 microseconds¹⁾, there is a difference of the amount of NFT protrusion between the write start and after several hundred microseconds from the start of writing. NFT protrusion of steady-state writing was fully protruded since read back amplitude after about 500 microseconds from the start of writing was measured. On the other hands, burst writing used read back amplitude under the condition that NFT protrusion was negligibly small since write duration of burst writing was only about 300 nanoseconds. Average amplitude measured at several locations in the media was used for NFT protrusion calculation to mitigate media modulation effect. We defined that NFT protrusion is a difference of TFC power between two writing modes at the same amplitude. In the BWS measurements with a large number of heads, few heads showed unintentional read back amplitude drop in steady-state writing. From the simultaneous measurements of read back amplitude and NFT temperature²⁾, it's found that laser mode hopping caused read back amplitude drop. Since mode hopping had good repeatability, mode hopping happened at the same timing from the start of writing in the measurements at several locations. Therefore, average of read back amplitude also dropped due to mode hopping. To mitigate amplitude drop, we developed a new method of steady-state writing which uses average amplitude of one revolution continuous writing. Since there were several laser modes in one revolution continuous writing, average amplitude of several laser modes mitigated the amplitude drop by mode hopping. Fig.1 shows the BWS curve of the head in which amplitude drop was observed with conventional steady-state writing method. By using average amplitude in one revolution continuous writing, read back amplitude drop in steady-state writing curve was successfully mitigated.

Reference

- 1) S. Xiong *et al.*, IEEE Trans. Magn., **54**, 8 (2018) 1-7
- 2) S. Rajauria *et al.*, U.S. Patent 10 283 145 B2 (2019)

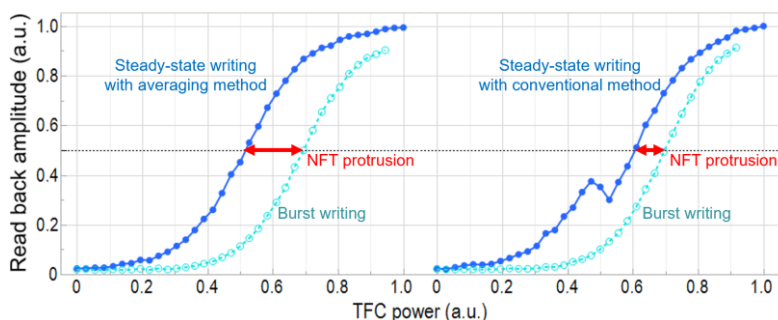


Fig.1 BWS curve with two steady-state writing methods: average of one revolution continuous writing method and conventional method.

Fe(110)上の Mn 超薄膜に生じるストライプ構造

山田豊和^{1,2}, 稲見栄一³, クリューガー ピーター^{1,2}
(1.千葉大院工 2. 千葉大キラル研 3. 高知工科大)

Stripe structures in ultrathin Mn films on Fe(110)

T. K. Yamada^{1,2}, E. Inami³, and P. Krüger^{1,2}

(1&2. Chiba Univ., 3. Koch Univ. Tech.)

はじめに

強磁性と反強磁性の界面では、交換バイアスなどユニークな磁性が発現する。そのため、強磁性と反強磁性の界面での各原子層間の磁気結合は、1990年代以降、スピン偏極走査電子顕微鏡 (spin-polarized SEM) やスピン偏極走査トンネル顕微鏡 (spin-polarized STM) を用いて精力的に研究された¹。

中でも、最も理想的で単純な系として、強磁性 bcc-Fe(001) ウィスカ単結晶上の bct-Mn(001) 超薄膜の研究がある²。この系では、Mn 原子は Mn 単層膜内では強磁性結合し、層と層の間では 180 度結合する。一方で、第一原理計算を用いて、この層間磁気結合を正しく再現することは困難を極める。原因の一つは、計算手法により Fe/Mn 界面のスピン構造は容易に変化するためである。

本研究で我々は、bcc(001)系を bcc(110)系に変えた際、Mn 膜内のスピン構造はどのような変化するか探った。その結果、新たな一次元ストライプ構造を発見したので報告する。

実験手法

本研究は全て超高真空・低温・走査トンネル顕微鏡 (STM) 装置を用いて実施した。高純度な Fe(110) ウィスカ単結晶³ を準備槽で Ar スパッタと加熱を繰り返し清浄化と平坦化を行った。基板表面に 50 nm 以上の大きな Fe(001) 原子テラスを得た。この表面に Mn 原子層をエピタキシャル成長した。作製した試料は、超高真空を保持したまま、原子分解能を有する STM 装置に移動し低温 (78 K) に冷却し STM 観察を実施した。試料の局所電子状態密度 (LDOS) は、走査トンネル電子分光法 (STS) を用いてその場測定した。さらに、第一原理計算を用いて Mn/Fe(110) の安定なスピン構造と原子構造を探った。

実験結果

清浄な Fe(110) 表面で得た原子像から結晶方向を確認した。Mn 一層目は $\langle 110 \rangle$ 方向に選択的に伸びるようにエピタキシャル成長した。この Mn 膜表面上で STS 像を計測した。STS 像は Mn 膜の中で一次元的なストライプ構造を示した。この周期長は Fe(110) 基板の周期性を比例していた。当初、Mn 原子が hollow site と bridge site に分布し表面再構成したのかと考えた。しかし、第一原子計算結果より、Fe 上の Mn は $p(1 \times 1)$ 構造が最適と判明した。なにがストライプ構造の原因か。複数の可能性のある Mn/Fe(110) の磁気構造を計算した。その結果、Mn 単層膜内の Mn 原子間の磁気結合により原子位置が面直方向にずれることで最安定になることが明らかとなった。つまり、ストライプ構造は Mn 原子間の非線形な磁気結合に由来する。詳細を報告する。

参考文献

- 1) J. Unguris, R. J. Celotta, and D. T. Pierce, Physical Review Letters, 67 (1991) 140-143.
- 2) T. K. Yamada, et al., Physical Review Letters, 90 (2003) 056803: 1-4.
- 3) T. K. Yamada, et al., Surface Science, 603, (2009) 315-319.

組成変調による Cu 添加 Mn₄N 薄膜の室温下磁化補償の実証

旗手 蒼、雨宮 健太*、都甲 薫、未益 崇
(筑波大、*高エネルギー加速器研究機構(KEK))

[はじめに] Mn₄N は小さな磁化と垂直磁気異方性を併せ持つため、電流駆動磁壁移動を利用したデバイスの候補材料として注目されている。Mn₄N 系混晶では不純物の添加量を制御することで、特定の組成で磁化がゼロとなる磁化補償という特異な現象も確認されている^[1]。この磁化補償は磁壁移動の効率の爆発的な向上に寄与する。Ni 添加 Mn₄N では磁化補償組成付近で 3,000 m/s (電流密度 1.2×10^{12} A/m²) という、磁場を使わない条件では世界最速の記録を達成した^[2]。今回、バルク結晶で磁化補償が示唆されていた Cu 添加 Mn₄N (Mn_{4-x}Cu_xN)^[3] に注目し、分子線エピタキシー法を用いて高品質な Mn_{4-x}Cu_xN 薄膜を作製した。さらに、試料振動型磁力計 (VSM) を用いた磁化測定および X 線磁気円二色性測定 (XMCD) による磁気構造の評価を行い、Mn_{4-x}Cu_xN 薄膜の磁化補償を実証した。

[実験方法] 分子線エピタキシー法により SrTiO₃ [STO] (001) 基板上へ約 23 nm Mn_{4-x}Cu_xN ($x = 0.0-0.5$) 薄膜を作製した。作製した薄膜に対し、磁場を面直に印加して振動型磁力計 (VSM) による室温での磁化測定を行った。薄膜の磁気構造は、KEK Photon Factory BL-16 にて 5 T の磁場を印加しながら軟 X 線を照射し、室温での Cu の L_{2,3} 吸収端における X 線吸収分光 (XAS)・XMCD 測定を行い評価した。なお、磁場/軟 X 線は面直方向から約 55° 傾いた方向 (magic angle) から印加/照射した。また、XAS・XMCD の信号は蛍光収量法により取得した。

[結果] STO 基板上に作製した Mn_{4-x}Cu_xN 薄膜の組成 x に対する飽和磁化の変化を Fig. 1 に示す。組成 x に対して飽和磁化が減少していき、 $x = 0.3-0.5$ で極小値を示している。 $x = 0.4$ に関しては磁化が著しく小さくなり、VSM では計測することができなかった。そのため、 $x \sim 0.4$ では反平行な磁気モーメント同士の大部分が打ち消しあっていると考えられる。続いて、Mn_{4-x}Cu_xN ((a) $x = 0.3$, (b) $x = 0.4$) 薄膜の Cu-L_{2,3} 吸収端における XAS・XMCD を Fig. 2 に示す。プロファイルは L₃ 吸収端における XAS で正規化した。XAS プロファイルに関して、この 2 つの組成で大きな違いが見られなかった。これは、添加された Cu の価数が変化していないことを示唆している。XMCD プロファイルに関して、Fig. 2(a) では 934 eV、955 eV にそれぞれ正、負のピークが現れた。一方で、 $x = 0.4$ では、それら 2 つのピークの符号反転が起きた。XMCD プロファイルのピークの符号は、その原子の磁気モーメントの配列を反映していると考えられる。そのため、Cu を加えていくと、 $0.3 \leq x \leq 0.4$ 間の点で Cu の磁気モーメントが反転するといえる。以上のように磁化補償を示唆する、磁化の極小値および磁気モーメント (または XMCD プロファイル) の反転が確認されたため、Mn_{4-x}Cu_xN 薄膜が室温で組成による磁化補償を示すと結論付けた。

[謝辞] XAS および XMCD 測定は、放射光科学諮問委員会 (課題番号 2022G036) の承認を得て実施いたしました。

[参考文献] [1] T. Komori *et al.*, *J. Appl. Phys.* **127**, 043903 (2020). [2] S. Ghosh *et al.*, *Nano Lett.* **21**, 2580 (2021).

[3] R. Zhang *et al.*, *Acta Mater.* **234**, 118021 (2022).

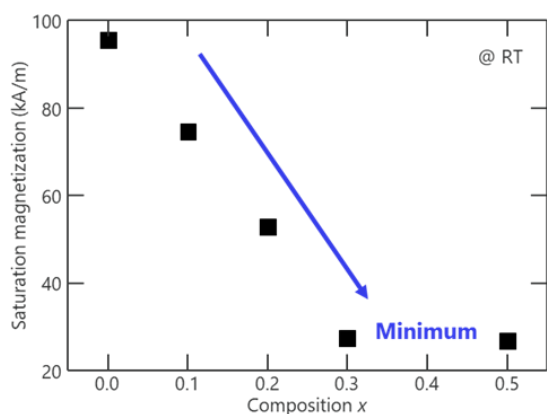


Fig. 1. Composition dependence of saturation magnetization.

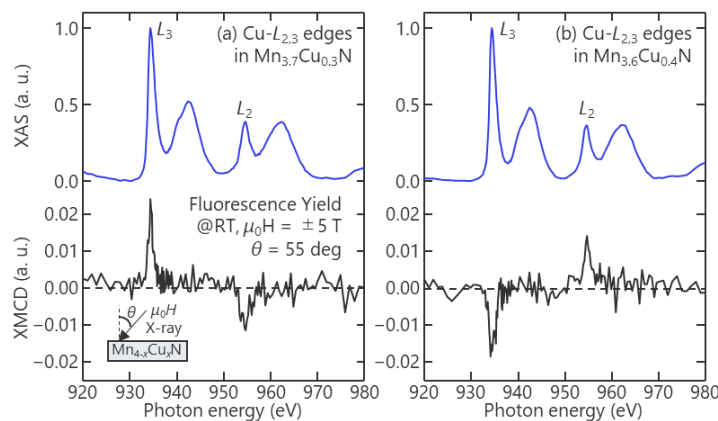


Fig. 2. XAS and XMCD spectra in (a) Mn_{3.7}Cu_{0.3}N and (b) Mn_{3.6}Cu_{0.4}N films at Cu-L_{2,3} edges (XAS are standardized.)

Cr(001)超薄膜の反強磁性磁区形成とスピンプラストラクション

川越 毅、菅 滋正*
(大阪教育大学、阪大産研*)

Antiferromagnetic domain formation and spin frustration in ultrathin Cr(001) film

Takeshi Kawagoe, and Shigemasa Suga*
(Osaka Kyoiku University, SANKEN Osaka University*)

はじめに

我々は、層状反強磁性 Cr(001)薄膜表面で観測されるらせん転位によるスピンプラストラクション (SF) の詳細を、スピン偏極 STM (SP-STM) で調べている。Cr(001)薄膜ではらせん転位密度がバルク Cr(001)表面の 100 倍以上あるため、多彩な SF¹⁾ が観察される。今回、これまで磁気像観察が困難であった 10 原子層 (1.44 nm) 厚 Cr(001)薄膜の成長方法改善に挑戦した結果、明瞭な磁気像観測に成功したので報告する。

実験結果と考察

SP-STM 観察は、超高真空中 ($< 2 \times 10^{-9} \text{Pa}$)・室温で Fe/W 探針を用いて行った。Fig.1(a)に Cr(001)薄膜 (10 原子層) の SP-STM (磁気) 像を示す。白線、赤丸は同時に観測した形状像から得られた単原子ステップとらせん転位の位置を示し、また黄・青の磁気コントラストは面内磁化 $\langle 100 \rangle$ 方向を示す。磁気像では (1) 1 原子層異なるごとに磁化方向が反転する層状反強磁性に加え、(2) 2 個のらせん転位間 (左上 A)、(3) 3 個のらせん転位を結ぶ領域 (真ん中下 B) での SF が観測された。これまで膜厚 3 nm 以上の Cr(001)薄膜で、層状反強磁性が室温で観測¹⁾されているが、1.44 nm (10 原子層) 厚であっても室温で依然として層状反強磁性が観測された。さらに (4) 右側の C 領域 (黒長方形) では、これまで観測されたことのない SF が観測された。Fig. 1(b)にその高分解能磁気像を示す。詳細な解析を行った結果、隣接する 2 組のらせん転位によって生じた量子化軸が 90 度回転した反強磁性磁区である [Fig. 1(c)] と推定し、マイクロマグネティックシミュレーションによる検証²⁾も行った。反強磁性体では静磁エネルギーが無視できるため、その磁区形成過程には不明な点が多いが、スピン偏極 STM 観測から、反強磁性磁区形成メカニズムに関する知見が得られたと考えている。講演では、薄膜作成法・Cr(001)薄膜表面モフォロジーの詳細なども報告する。

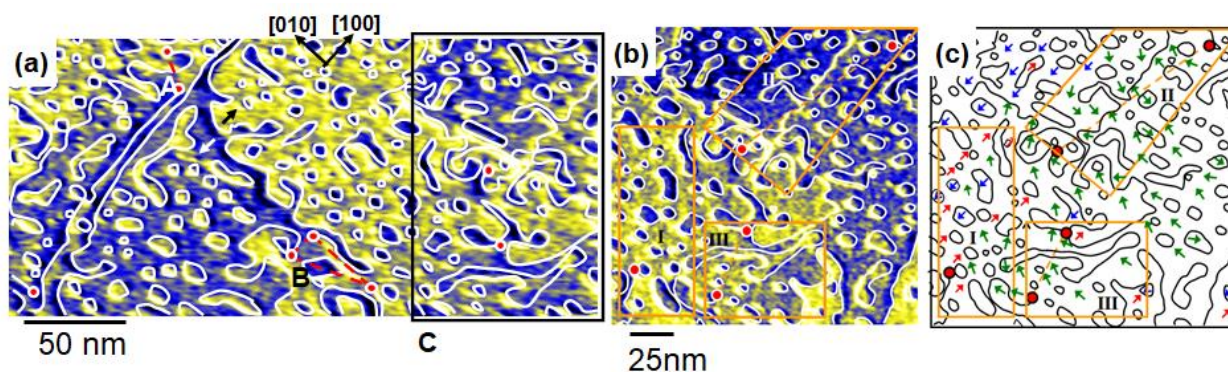


Fig. 1 (a,b) Magnetic images of Cr(001) films (a:290 nm × 138 nm, b: 170 nm × 160 nm) Monatomic steps and screw dislocations are indicated in by white lines and full red circles, respectively. (c) The derived magnetic structure of the Cr (001) film surface from the intensity of the dI/dV map of (b). The small arrows represent the directions of the local magnetization.

参考文献

- 1) T. Kawagoe, et al., J. Appl. Phys. **93**, 6575 (2003), Phys. Rev. **B71**, 014427 (2005), Phys. Rev. Lett. **95**, 207205 (2005), Phys. Rev. **B 103**, 085427 (2021).
- 2) T. Kawagoe and S. Suga, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, 045003 (2023).

GdFe系フェリ磁性薄膜における 磁性体界面近傍磁化量へのCo置換効果

北澤楓太¹, 宋嘉浩¹, 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Co substitution effect on the amount of magnetization near the magnetic interface
in GdFe-based ferrimagnetic thin films

Fuuta Kitazawa¹, Yoshihiro Sou¹, Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., ² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに 磁性薄膜材料の更なる微細・多層膜化が求められているスピントロニクスデバイスでは、結晶性のみならず、隣接する異種層間の交換相互作用や磁気双極子結合など、ヘテロ界面近傍磁気構造への理解が重要となる。我々は組成比や温度により静・動特性が大きく変化し、全光型磁化反転等が報告されている希土類 (RE) 遷移金属 (TM) 合金 GdFeCo フェリ磁性薄膜において、同一組成比で物性値となる磁気静・動特性の大きな膜厚依存性¹⁾について報告しており、RE-TM 合金薄膜内界面近傍領域での異質な磁気特性につき検討を進めている。本報告では界面近傍磁化に注目し、同一の RE-TM 組成比となる GdFeCo および GdFe 薄膜磁化値の膜厚依存性から、界面近傍磁化量への Co 置換効果について検討を行った。

実験方法 測定試料として、DC・RF マグネトロンスパッタ法により作製した試料群 A : SiN (5 nm) / Gd₂₅Fe_{65.6}Co_{9.4} (t nm) / SiN (60 nm) / glass sub. (t = 10, 15, 20, 30, 60) と、試料群 B : SiN (5 nm) / Gd₂₅Fe₇₅ (t nm) / SiN (60 nm) / glass sub. (t = 5, 10, 15, 20, 30)を用いる。本試料群に対し、振動型磁力計 (SQUID-VSM) により飽和磁化 M_S を、He-Ne レーザー ($\lambda = 632$ nm) により Faraday 回転角 θ_F を測定し、またその膜厚依存性を $M_S \cdot t$ で評価を行った。

結果 Fig.1 に 300 K での M_S の測定結果を示す。試料群 A, B ともに磁性層膜厚が 10~20 nm の間で磁化補償状態をとるような同様の傾向が見られた。また厚膜側では試料群 A, B ともに同程度の M_S となった。次に M_{TM} に由来する磁気光学応答を計測可能な本波長で、 θ_F の測定結果を Fig. 2 に示す。 θ_F の符号関係より膜厚の減少につれ、試料群 A では磁性層膜厚 15~20 nm の間で、試料群 B では 10~15 nm の間において、磁場に対して優勢となる副格子磁気モーメントが RE から TM へ変化したことを確認した。以上を踏まえて導出した $M_S \cdot t$ の膜厚依存性を Fig. 3 に示す。ここで $M_S \cdot t$ の符号は全膜厚で副格子磁化ベクトルの向きを同一とし RE 優勢の場合に正となるよう対応させている。 $M_S \cdot t$ は先行研究¹⁾に基づき内部磁化 M_v emu/cc と界面近傍磁化 M_{sf} emu/cm² を仮定して次のように表現した。

$$M_S \cdot t = M_v t + 2M_{sf} \quad (1)$$

式 (1) を用いて検討を行うと、約 10% の Co 置換において M_v は同程度であるのに対し、 $2M_{sf}$ は約 21% 増加した。以上よりバルク磁化値から想定されるよりも大きな界面近傍磁化量への影響が存在する事と、これにより、Fig.1 に示すように正味の磁化値が薄膜領域での大きな組成依存性の主要因となることが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費(21K04184)の助成を受けたものである。

参考文献

1) Y. Futakawa et al. : *IEE Jpn, Technical Meeting on "Magnetics"*. MAG-17-150 (2017).

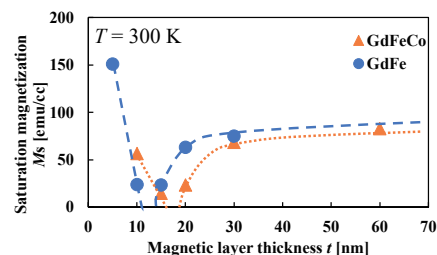


Fig.1 Dependence of M_S on Magnetic layer thickness for Sample A and B

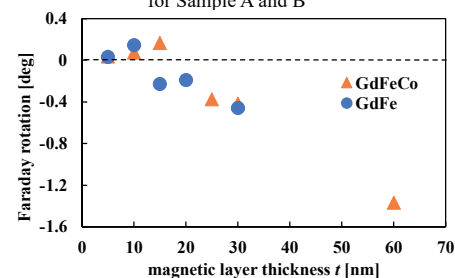


Fig.2 Dependence of Faraday rotation on magnetic layer thickness for Sample A and B

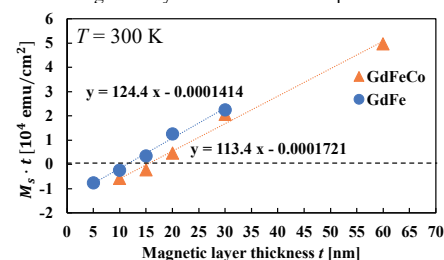


Fig.3 Dependence of $M_S \cdot t$ on magnetic layer thickness for Sample A and B

異なる温度での GdFe 薄膜の異常ホール抵抗・縦抵抗の膜厚依存性

宋 嘉浩¹, 北澤 楓太¹, 小林祐希¹, 笠谷 雄一², 吉川 大貴², 塚本 新²
 (¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Film thickness dependence of anomalous Hall resistance and longitudinal resistance
 of GdFe thin films at different temperatures

Yoshihiro Sou¹, Fuuta Kitazawa¹, Yuki Kobayashi¹, Yuichi Kasatani², Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²
 (¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,
² College of Science and Technology, Nihon Univ)

はじめに GdFeに代表される希土類遷移金属 (RE-TM) アモルファス合金フェリ磁性体はスピントロニクスへの発展に向け多くの基礎検討が行われている。特に異常ホール効果 (AHE) は微細高速磁化応答検出機構への応用や電気伝導・磁気構造の特性検討の手段に活用されている。RE-TM アモルファス合金薄膜では異なる温度依存性を持つ副格子磁化にも起因し、その磁気異方性の議論や磁化の高速応答に特異な磁気秩序につき議論^{1,2)}が続いており、更なるそのミクロスコピックな電気伝導特性は不明な点も多い。本研究では、同質の合金を有しながら磁気特性が膜厚により変わる RE-TM 薄膜(GdFe)の ρ_{xx} , ρ_{xy} につき実験的に検討を行った。**実験方法** マグネトロンスパッタリング法により作製した SiN (5 nm) / Gd₂₅Fe₇₅ (t nm) / SiN (60 nm) / Si sub. ($t = 5, 10, 15, 20, 30$) に対し、膜面垂直 z 方向に 5 kOe の外部磁場を掃引し、膜面内 x 方向に 1 mA の直流電流を印加したときの、 x 方向の電圧 (縦電圧) および y 方向の電圧 (ホール電圧) を四端子計測により測定した。測定した電圧から各温度・各膜厚での縦抵抗率 ρ_{xx} およびホール抵抗率 ρ_{xy} を算出、評価した。本試料群は磁気光学ファラデー効果および磁化測定から $t = 10 \sim 15$ nm の間において、優勢な副格子磁化が変わることを確認した。

実験結果 Fig. 1 に各温度での縦抵抗率 ρ_{xx} の膜厚依存性を示す。膜厚減少に対し ρ_{xx} は単調に増加した。また、すべての膜厚で同程度の温度依存性を示した。次に Fig. 2 に各膜厚に対する異常ホール抵抗率 ρ_{xy} を示す。すべての試料温度において ρ_{xy} は連続的に変化する傾向を確認した。特に 100 K では ρ_{xx} の膜厚依存性と同様に膜厚の減少につれ ρ_{xy} が増加し、特に $t = 15$ nm 以下でその増加量が大きくなる。一方、 ρ_{xx} の温度依存性に比べ、 ρ_{xy} は膜厚減少につれ大きな温度依存性を示すことが明らかとなった。また、300 K ではいずれの膜厚でも ρ_{xy} は同等の値を示す。

ρ_{xx} の膜厚依存性より界面付近に内部領域より高抵抗な領域の存在が示唆され、膜厚方向に不均一な構造が存在すると考えられる。また、RE-TM 合金薄膜の検討において界面近傍領域に磁気特性の異なる領域が存在することを報告している¹⁾。 ρ_{xy} においても膜厚の減少につれ温度依存性が増加することから、界面近傍での異常ホール効果への寄与が内部領域と異なることを示すものと考えられ、アモルファスフェリ磁性体特有の界面近傍の磁気秩序に起因するものとして示唆される。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(21K04184)の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) Y. Futakawa et al., *IEE Japan., Technical Meeting on "Magnetics"*. MAG-17-150 (2017).
- 2) T. Iisaka et al., 第 42 回 日本磁気学会学術講演概要集. 12pB-6 (2019)

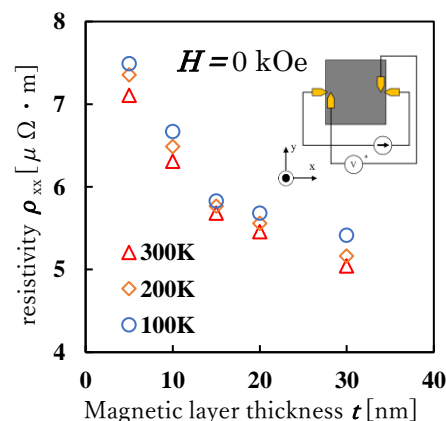


Fig.1 Film thickness dependence of resistivity ρ_{xx}

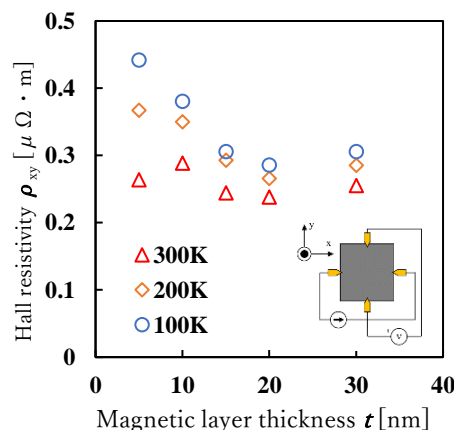


Fig.2 Film thickness dependence of Hall resistivity ρ_{xy}

CoPc/ γ' -Fe₄N 有機-無機ハイブリッド界面における構造の粗さと 磁気結合の相関

小野広喜¹, 梅田佳孝¹, 吉田海仁¹, 筒井健三郎¹, 山本航平², 石山修², 横山利彦²,
水口将輝¹, 宮町俊生¹
(¹名大, ²分子研)

Correlation between roughness and magnetic coupling at CoPc/ γ' -Fe₄N
organic-inorganic hybrid interface

H. Ono¹, Y. Umeda¹, K. Yoshida¹, K. Tsutsui¹, K. Yamamoto², O. Ishiyama², T. Yokoyama²,
M. Mizuguchi¹, T. Miyamachi¹
(¹Nagoya Univ., ²IMS)

はじめに

有機分子材料はスピン軌道相互作用が小さくスピン散逸が小さいことからスピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。効率的に有機分子のスピンを制御するために磁性金属との相互作用を利用することが考えられ、今までに様々な研究がなされてきた。有機分子と磁性金属の界面スピン状態は磁気結合のみならず、界面の局所的な構造にも影響を受ける。よって、ミクロな構造と磁気結合の相関を理解することが重要だが、その詳細はほぼ明らかになっていない。本研究では大表面かつ原子スケールで均一に薄膜を作製できる γ' -Fe₄N の組成を持つ窒化鉄と二次元平面構造であるコバルトフタロシアニン(CoPc)を用いて有機-無機ハイブリッド界面のミクロな構造と電子・磁気状態の相関を解明することを目的とした。

実験方法

Cu(001)表面に N⁺イオンボンバードメント処理を行った後、鉄を室温蒸着して約 350°C で加熱をすることにより窒化鉄 2 原子層を作製した。その後、窒化鉄表面に CoPc 分子 1~3 分子層を室温で積層することにより CoPc/ γ' -Fe₄N ハイブリッド薄膜を作製し、表面構造の CoPc 膜厚依存性を LEED 観察により調べた。UVSOR BL4B にて面直配置(NI)、面内配置(GI)において Fe、Co の L 吸収端の XAS/XMCD 測定及び N の K 吸収端の XAS 測定を行うことにより界面の電子・磁気状態を調べ、CoPc/窒化鉄 2 原子層の界面磁気結合状態の CoPc 分子蒸着量及び磁化方向依存性を評価した。

実験結果

Co の L 吸収端の XAS/XMCD の結果から CoPc 分子を約 1 分子層蒸着したときに Co MCD のシグナルが見られ、窒化鉄 2 原子層との界面磁気結合を介して CoPc が磁化していることが確認された。しかしながら、CoPc をさらに積層していくと NI と GI で傾向が異なり、NI では Co MCD シグナルが減少する一方、GI では Co MCD シグナルは維持されており、2、3 分子層目の CoPc 分子の磁気結合強度は面直と面内方向で異なることが分かった。LEED 観察から 1、2、3 分子層の全ての層で CoPc が規則的な配列をしていないことを確認した。これらの結果から CoPc 分子層の構造の乱れに対する磁気結合強度には角度依存があることが示唆される。さらに、CoPc 中の Co の磁化曲線や N の K 吸収端 XAS の結果から分子の配列が乱れた構造と界面磁気結合の相関について議論をする。

参考文献

[1] Y. Takahashi *et al.* Phys. Rev. B **95**, 224417 (2017).

C₇₀分子を用いた有機-無機ハイブリッド薄膜の界面磁気状態

¹吉田海仁, ¹小野広喜, ¹梅田佳孝, ¹筒井健三郎, ³山本航平, ³石山修,
¹松尾豊, ³横山利彦, ^{1,2}水口将輝, ^{1,2}宮町俊生
 (¹名大院工, ²名大未来研, ³分子研)

Interfacial magnetic coupling in C₇₀-based organic-inorganic hybrid thin films

¹K. Yoshida, ¹H. Ono, ¹Y. Umeda, ¹K. Tsutsui, ³K. Yamamoto, ³O. Ishiyama, ¹Y. Matsuo,
³T. Yokoyama, ^{1,2}M. Mizuguchi, ^{1,2}T. Miyamachi
 (¹Sch. Eng. Nagoya Univ., ²IMaSS. Nagoya Univ., ³IMS)

はじめに

有機分子材料はスピン軌道相互作用が小さくスピン散逸が起こりづらいことからスピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。特に、磁性金属基板と有機分子から構成される有機-無機ハイブリッド界面においてそのスピンを制御することは新規磁気状態の創出につながるため、近年盛んに研究が行なわれている。本研究では有機分子材料として高い電気伝導性を示すナノ炭素材料 C₇₀ 分子に着目し、強磁性 Co ナノ島と形成する C₇₀/Co ハイブリッド界面に新規磁気状態を発現させ、その起源を明らかにすることを目的とする。C₇₀ 分子は長軸と短軸を持つ異方的な分子構造をとり、化学結合の変化に伴い磁気結合状態が変化することが期待される。

実験方法

まず、Cu(111)単結晶上に Co を蒸着して Co ナノ島を成長させた。その後、C₇₀ 分子を 1~3 分子層 Co ナノ島に蒸着して C₇₀/Co ハイブリッド界面を作製し、その構造と電子・磁気状態を低速電子線回折(LEED)および X 線吸収分光法/X 線磁気円二色性(XAS/XMCD)により調べた。XAS/XMCD 測定は分子科学研究所 UVSOR BL4B にて超高真空・強磁場下にて行った。

実験結果

LEED 観察による表面構造観察の結果、Co ナノ島は Cu(111)上にエピタキシャル成長し、C₇₀ 分子蒸着前後で格子定数に変化は見られなかった。次に XAS/XMCD 測定を行い、C₇₀ 分子蒸着前後の Co ナノ島の磁気モーメントを外部磁場±5 Tにおける XAS/XMCD スペクトルから算出し、磁化曲線を Co XAS の L₃ 端ピーク強度の印加磁場依存性をプロットすることにより得た。結果、C₇₀ 分子蒸着前の Co ナノ島は先行研究同様、面内容易磁化であることがわかった^[1]。さらに、Co ナノ島の磁化曲線の C₇₀ 膜厚依存性を調べた結果、C₇₀ 分子の蒸着量の増大に伴う面直磁気異方性の増大が観測された。LEED 観察の結果と併せ、Co ナノ島に現れた磁気状態の変化は C₇₀/Co ハイブリッド界面における磁気結合に主に起因していると考えられる。

[1] M. Zheng et al, J. Phys.: Condens. Matter, 12, 783 (2000).

磁束変調型磁気ギヤの損失のトルク・速度依存性に関する実験的検証

朝雛えみり, 中村健二
(東北大学)

Experimental Verification of Loss Dependence on Torque and Speed in Flux-modulated-type Magnetic Gear

E. Asahina, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

近年, 出力密度向上を目的に超高速モータの開発が盛んに行われているが, これを減速する機械式ギヤには本質的に摩擦や発熱の問題がある。そのため, 非接触で増減速可能な磁気ギヤに注目が集まっている。このような背景から, 先に筆者らは, 80,000 rpmで動作可能な磁束変調型磁気ギヤの解析設計・試作試験を行った¹⁾。

本稿では, 本磁気ギヤの損失のトルクおよび速度依存性について, 3次元有限要素法 (3D-FEM) と実験試験によって検討を行ったので報告する。

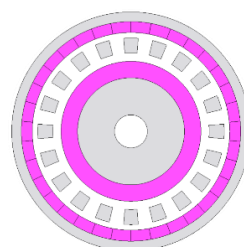
超高速磁気ギヤの損失特性

Fig. 1に, 今回使用する磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。本磁気ギヤのギヤ比は6.667であり, 入力軸は内側回転子, 出力軸はポールピースである。また, 入力側の最高回転数は80,000 rpmである。

Fig. 2に, 3D-FEMで算出したトルク対損失特性を示す。同図から, 本磁気ギヤの損失は速度のみに依存し, トルクには依存しないことがわかる。

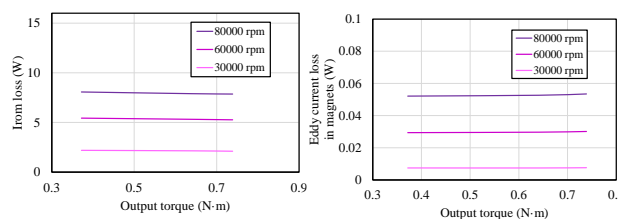
Fig. 3に, 試作した超高速磁気ギヤの外観を示す。ポールピースホルダやケースなどは, 漏れ磁束などによる渦電流の発生を防ぐため, すべてCFRP (炭素繊維強化プラスチック) で製作した。

Fig. 4(a)に実験システムを示す。磁気ギヤ (MG)の入力側にはスイッチトリラクタンスモータ (SRM)を接続し, 出力側にはトルクメータを接続した。実験では, SRMを5000 rpm, 10,000 rpmで回転させ, トルクを0.1 N·mから0.4 N·mまで変化させた。同図(b)に磁気ギヤの損失の実測値を示す。ここで損失の実測値は, 本システムで測定した全損失から, SRM単体で運転したときの損失を引くことで算出した。この図を見ると, 5000 rpm, 10,000 rpm両回転数において損失は, 計算結果と同様, トルクにはほとんど依存しないことがわかる。なお, 本研究の一部はJSPS科研費JP23KJ0189および東北大学AIE卓越大学院プログラムにより支援された。



Gear ratio:	6.667
Axial length:	20 mm
Diameter:	44 mm
Shaft diameter:	6 mm
Inner gap length:	1.5 mm
Outer gap length:	1 mm
Material of inner magnet:	Sintered Nd-Fe-B
Material of outer magnet:	Bonded Nd-Fe-B

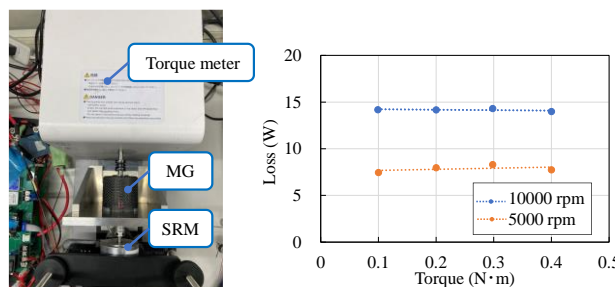
Fig. 1 Specifications of a prototype ultra-high-speed flux-modulated-type magnetic gear.



(a) Iron loss (b) Eddy current loss in magnets
Fig. 2 Calculated loss characteristics of the prototype magnetic gear.



(a) Inner rotor (b) Pole-pieces (c) Magnetic gear
Fig. 3 Appearance of the prototype magnetic gear.



(a) Experimental system (b) Measured loss characteristics.
Fig. 4 Experimental system and measured loss characteristics of the prototype magnetic gear.

参考文献

- 1) E. Asahina, K. Mitsuya, K. Nakamura, Y. Tachiya, Y. Suzuki, K. Kuritani, *J. Magn. Soc. Jpn. Special Issues*, 7, 85 (2023).

高速 SR モータの瞬時トルク制御に関する基礎検討

岡田 篤弥, 中村 健二
(東北大学)

Basic Examination of Instantaneous Torque Control for High-speed SR Motor

A. Okada, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

スイッチトリラクタンس (SR) モータは、構造が単純で堅牢、安価で熱に強いという特長を有する。一方、両突極構造に由来してトルクリプルが大きく、振動・騒音が大きいという課題がある。

上述の課題に対して先行研究では、瞬時相トルク分配制御 (IPTDC) が提案され¹⁾、小型電気自動車用インホイール・ダイレクトドライブ SR モータのトルクリプルや振動・騒音を低減可能であることが実証された。ただし、本モータの回転数はおおよそ 1,000 rpm 以下であり、回転数 10,000 rpm を超える SR モータに適用された事例はない。

そこで本稿では、先に電動工具用に開発された最高回転数 20,000 rpm の高速 SR モータ²⁾ に対して、IPTDC の適用を試みたので報告する。

IPTDC のシミュレーション結果

Fig. 1 に、制御対象とした SR モータの諸元を示す。本モータの動作回転数は約 10,000~20,000 rpm、定格トルクは 0.1 N·m である。

Fig. 2 に、先行研究で提案された IPTDC の概念図を示す。IPTDC は、励磁相切り替え時に生じるトルクの谷を無くすため、切り替え前後の 2 つの相の合計トルクを指令値に追従させることで、リプルを低減する制御法である。本稿では、MATLAB/Simulink を用いて、IPTDC を Fig. 1 の高速 SR モータに適用した場合のシミュレーションを行った。

Fig. 3 にトルクの計算波形を示す。通常励磁と IPTDC とともに回転数は 15,000 rpm、平均トルクは 0.02 N·m である。この図を見ると、IPTDC により励磁相切り替え時のトルクの落ち込みが抑制され、リプルが低減されていることがわかる。今後は実機による検証を行う予定である。

参考文献

- 1) H. Goto, A. Nishimiya, H. J. Guo, A. Honda, and O. Ichinokura, *COMPEL*, **29**, 173 (2010).
- 2) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).

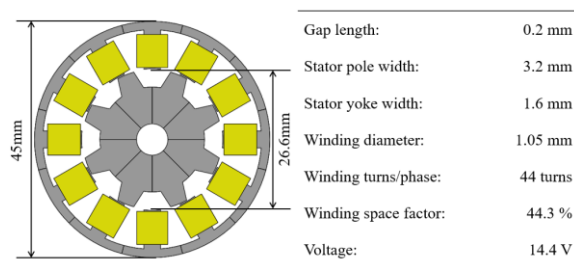


Fig. 1. Specifications of high-speed SR motor²⁾.

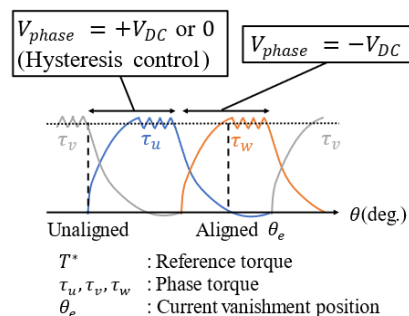


Fig. 2. Schematic diagram of IPTDC.

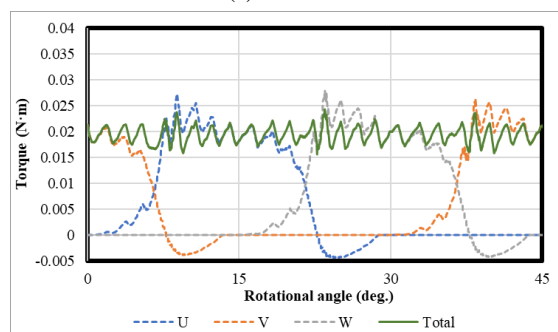
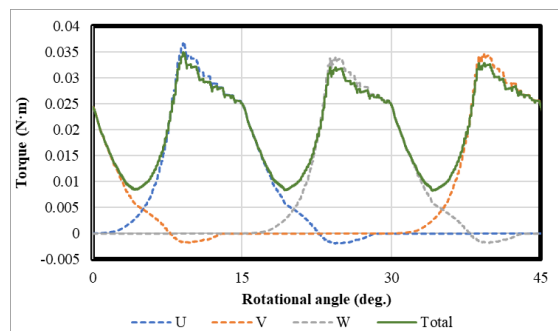


Fig. 3. Calculated torque waveforms of high-speed SR motor.

分布巻埋込磁石モータのリラクタンストルク向上のための フラックスバリア形状に関する検討

田村一樹, 中村健二, *成瀬賢哉, *萱野雅浩
(東北大学, *愛知製鋼)

Flux Barrier Shape for Reluctance Torque Improvement of Distributed-Winding Interior Permanent Magnet Motor

Kazuki Tamura, Kenji Nakamura, *Kenya Naruse, *Masahiro Kayano
(Tohoku University, *Aichi Steel)

はじめに

埋込磁石 (IPM) モータは、小型高出力・高効率であることから、様々な分野で利用が広がっている。一方、フラックスバリアは内部に収めるネオジム焼結磁石の形状に合わせる必要があるため、リラクタンストルク最大という観点でバリア形状を最適化することは容易ではない。そこで本稿では、分布巻 IPM モータを考察対象とし、形状自由度の高いネオジムボンド磁石の利用を前提に、リラクタンストルクを向上可能なフラックスバリア形状について、種々検討を行ったので報告する。

最適な回転子フラックスバリアの探索結果

Fig. 1 に、考察に使用した分布巻 IPM モータの諸元を示す。Fig. 2 に、最適化を行ったフラックスバリア形状の一例を示す。同図に示した平板 1 層形と円弧 2 層形の他に、V 字 1 層形、円弧 1 層形、円弧 3 層形の 5 種類の異なるフラックスバリアを有する回転子について、最適寸法の探索を行った。加えて、Fig. 3 に示すように、磁束線の特徴を捉え、楕円弧状のフラックスバリアについても、最適寸法の探索を行った。なお、解析には 2 次元有限要素法 (2D-FEM) を用い、さらにリラクタンストルクのみに着目するため、磁石は取り除き、代わりに磁気ブリッジを省くことで、磁石磁束による磁気ブリッジの磁気飽和を考慮した。

Fig. 4 に、最適化後の楕円弧状 2 層のフラックスバリア形状を示す。また、Table. 1 には各フラックスバリアにおけるリラクタンストルクの最大値と、その時の d 軸インダクタンス L_d 、 q 軸インダクタンス L_q 、突極比を示す。この表を見ると、楕円弧 2 層形が最もリラクタンストルクが大きいことがわかる。すなわち、リラクタンストルク向上には磁束線の特徴を捉えたフラックスバリア形状が最適であることが明らかとなった。

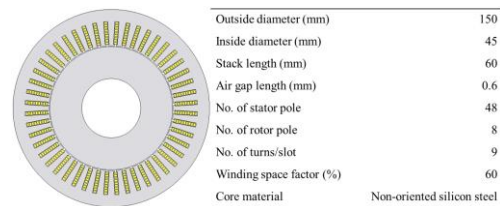


Fig. 1. Specifications of distributed-winding IPM motor.

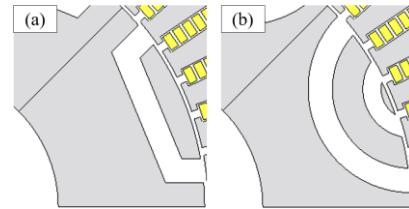


Fig. 2. Flux barrier shapes for comparison, (a) Flat-shape, 1 layer, (b) Arc-shape, 2 layers.

Parameter (mm)	Variable name	Search range	
		Min	Max
Depth of flux barrier	d_1	0.1	12.15
Inner radius of the second layer	d_2	6	18.2
Outer radius of the first layer	d_3	12.15	24.2
Inner radius of the first layer	d_4	12.15	24.2

Fig. 3. Parameters to be optimized in elliptical arc shape, 2 layers.

Parameter (mm)	Variable name	Optimum value (mm)
Depth of flux barrier	d_1	3.4
Inner radius of the second layer	d_2	14.1
Outer radius of the first layer	d_3	18.0
Inner radius of the first layer	d_4	21.7

Fig. 4. Optimized barrier shape in elliptical arc shape, 2 layers.

Table 1 Maximum value of reluctance torque, q -axis & d -axis inductance, and saliency ratio of each flux barrier shape.

Model	Maximum reluctance torque (N · m)	d -axis inductance (mH)	q -axis inductance (mH)	Saliency ratio
Flat-shape, 1 layer	18.96	0.48	1.31	2.75
Arc-shape, 2 layers	19.52	0.39	1.20	3.05
Elliptical arc shape, 2 layers	24.10	0.38	1.47	3.86

ネオジム磁石とフェライト磁石を有する 集中巻埋込磁石モータの磁石配置に関する検討

尾花輝哉, 中村健二
(東北大学)

Magnet Arrangement of Concentrated-Winding Interior Permanent Magnet Motor
with Nd-Fe-B and Ferrite Magnets
T. Obana, K. Nakamura
(Tohoku University)

はじめに

埋込磁石 (IPM) モータは、永久磁石を回転子鉄心内部に埋め込んだモータの総称である。IPM モータは、マグネットトルクに加えてリラクタンストルクも利用できるため、高出力・高効率なモータとして、様々な用途に応用範囲を拡大し、適用機器の省エネルギー化に大きく貢献している。この IPM モータにおいて、レアアースの使用量削減や小型化が期待されている。

本稿では、IPM モータにおいてレアアース量を増やすことなくトルクを向上させることを目的として、フェライト磁石を併用した集中巻 IPM モータの磁石配置について、2次元有限要素法 (2D-FEM) を用いて検討したので報告する。

フェライト磁石併用 IPM モータの磁石配置

Fig. 1 に、本稿で基準とした集中巻 IPM モータを示す。3相8極12スロットの集中巻モータであり、家電・民生品等で一般的に用いられているものである。本稿では、この IPM モータの固定子構成は変えずに、Fig. 2(a)~(f)に示すような6種類の異なる磁石配置を有する回転子について、トルク特性を算定した。解析条件は、回転数 9000 rpm、電流実効値 15 A とした。なお、2D-FEM には、(株)JSOL 製の電磁界解析プログラムである JMAG Designer 21.0 を用いた。

Table 1 に、各磁石配置におけるトルクの最大値を示す。同表より、Fig. 2(a)および(b)の磁石配置のトルクが大きく、基準モータから約 0.3 N・m 向上した。

次いで、Fig. 3 に磁石配置(a)および(b)について減磁解析を行った結果を示す。解析条件は定格電流の3倍である 45 A とした。同図より、磁石配置(a)は1, 2層目ともに中央のフェライト磁石が大きく減磁していることがわかる。一方、磁石配置(b)では2層目両端のネオジム磁石の端部がわずかに減磁している

のみである。したがって、トルク向上と減磁耐力の観点から見て、磁石配置(b)が最適な磁石配置であるといえる。今後は、速度-トルク特性や効率などについても比較・検討を行う予定である。

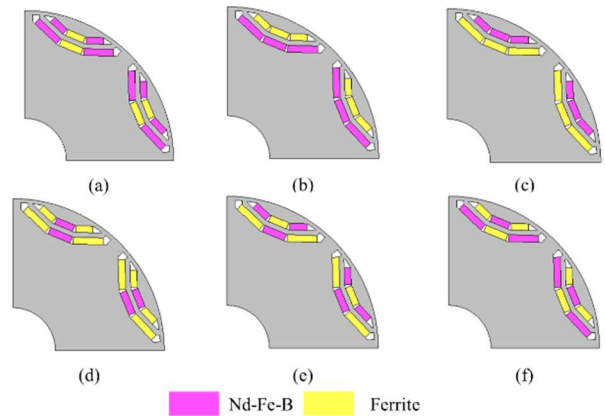


Fig. 2 Magnet arrangement for comparison.

Table. 1 Comprison of the maximum torque of each magnet arrangement.

Model	Maximum torque (N・m)	Model	Maximum torque (N・m)
Reference motor	3.56	(d)	2.66
(a)	3.91	(e)	3.01
(b)	3.84	(f)	3.66
(c)	3.21		

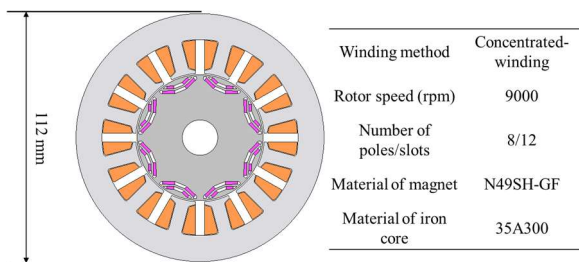


Fig. 1 Specifications of a reference IPM motor.

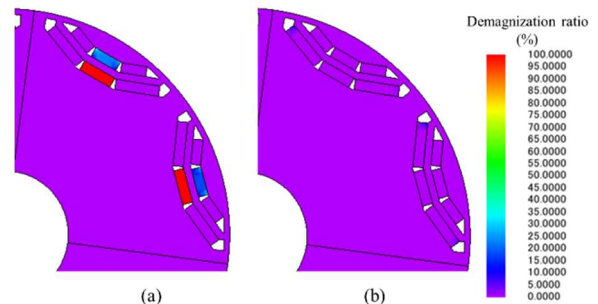


Fig. 3 Comparison of contour diagrams of the irreversible demagnetization ratio.

小型 EV 用インホイール・アキシアルギャップ型 SR モータの 駆動領域拡大に関する検討

西海悠介, 中澤貫太, 中村健二 (東北大学)

Drive Range Expansion of In-Wheel Axial-Flux SR Motor for Compact EV

Y. Nishigai, K. Nakazawa, K. Nakamura (Tohoku University)

はじめに

先に筆者らは, アキシアルギャップ型のスイッチトリラクタンス (SR) モータの試作評価と, インホイール駆動方式の小型電気自動車 (EV) への適用を行い, 実証走行に成功した¹⁾。一方で, 従来のモータ制御手法である瞬時相トルク分配制御 (IPTDC) では, 高速回転時に出力トルクが低下し, 車両としての運転領域が狭いことが明らかになった。

そこで本稿では IPTDC を改良し, 従来固定されていた通電区間を回転速度やトルクに応じて柔軟に変化させる通電区間可変制御²⁾に加え, さらに高速・高負荷域まで駆動領域を拡大することを目指し, 平均トルクに着目した制御法について検討を行った。

各種トルク制御手法の比較

Fig. 1 に, 考察に用いたアキシアルギャップ型 SR モータを示す。本 SR モータを制御対象として, 従来の IPTDC, IPTDC の通電区間を柔軟に変化させる通電区間可変制御, そして瞬時トルクではなく, 平均トルクを指令値に追従させる平均トルク制御を適用した場合の速度-トルク特性, 並びにトルク波形を算定して比較を行った。なお, シミュレーションには MATLAB/Simulink を用いた。

Fig. 2 に, IPTDC と通電区間可変制御のトルク波形を示す。この時の回転数とトルクは 400 rpm, 60 N·m である。IPTDC では励磁切り替え時にトルクの谷が生じて指令値に追従できていないが, 通電区間可変制御では追従できていることがわかる。

Fig. 3 は, 通電区間可変制御と平均トルク制御のトルク波形の比較である。この時の回転数とトルクは 800 rpm, 40 N·m である。この図を見ると, 平均トルク制御では, より高速領域まで指令値どおりの平均トルクを発生できていることがわかる。

Fig. 4 に, 速度-トルク特性の比較を示す。同図(a)が従来の IPTDC の結果であり, 同図(b)が平均トルク制御と通電区間可変制御を組み合わせた場合の結果である。これらの図より, 提案制御により駆動領域が大幅に拡大したことがわかる。

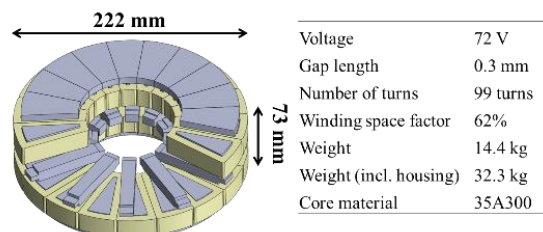
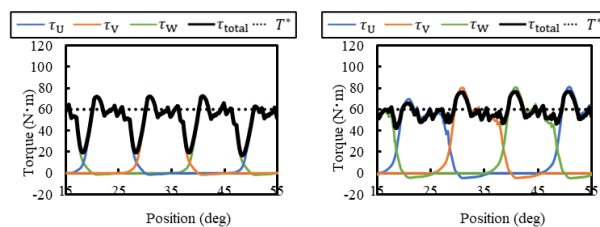


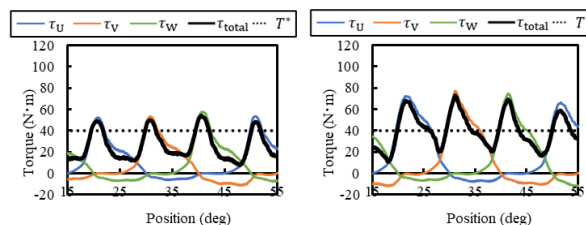
Fig. 1 Specifications of Axial-Flux-type SR motor.



(a) IPTDC

(b) Variable commutation period control

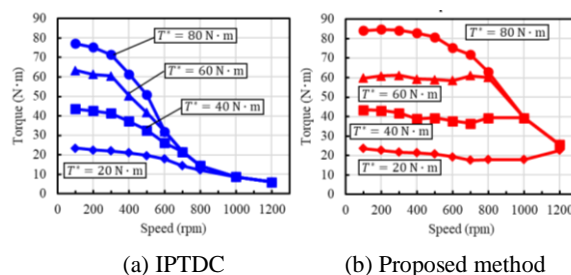
Fig. 2 Comparison of torque waveforms at 400 rpm, 60 N·m.



(a) Variable commutation period control

(b) Average torque control

Fig. 3 Comparison of torque waveforms at 800 rpm, 40 N·m.



(a) IPTDC

(b) Proposed method

Fig. 4 Comparison of calculated speed-torque characteristics of IPTDC and the proposed method.

参考文献

- 1) 高瀬圭祐, 後藤博樹, 一ノ倉理, 電気学会 マグネティクス研究会資料, MAG-17-2 (2017)
- 2) 中澤寛太・中村健二, 電気学会回転機研究会資料, RM-22-114 (2022)

磁束変調型磁気ギヤの空隙磁束密度波形の分析

岡崎晃洋, 角 貴則, 中村健二, *進士智一, *武田啓司
(東北大学, *TDK 株式会社)

Examination of Air Gap Flux Density Waveforms of Flux-Modulated-type Magnetic Gear

A. Okazaki, T. Sumi, K. Nakamura, *T. Shinji, and *K. Takeda
(Tohoku University, *TDK Corporation)

はじめに

磁気ギヤは非接触で増減速可能であるため、機械式ギヤと比較して、振動や騒音が小さく、保守性に優れる。その中でも磁束変調型磁気ギヤは、トルク密度と効率が高く、実用化が最も期待されている¹⁾。磁束変調型磁気ギヤの最大トルクやトルクリプルなどは、内外2つの空隙内の磁束分布に強く依存することから、空隙磁束密度波形を正確に把握することは極めて重要である。

そこで本稿では、内外2つの空隙磁束密度波形を同時に観測可能な測定系を構築し、測定された空隙磁束密度波形とその周波数成分について、有限要素法 (FEM) の結果と比較検証したので報告する。

空隙磁束密度波形の測定結果

Fig. 1 に、磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。内側回転子の極対数が4、外側回転子の極対数が22であることから、ギヤ比は5.5である。

Fig. 2 に、磁気ギヤの空隙磁束密度波形の測定系の外観を示す。試作ギヤは、様々な構成での空隙磁束密度波形の測定を行うため、内外回転子とポールピースが自由に着脱可能な構造となっている。また、基板を介して円盤に取り付けられたホールセンサを試作ギヤ内外の空隙に挿入し、円盤ごとホールセンサを回転させることで、2つの空隙の任意の位置角の磁束密度を同時に測定することができる。

Fig. 3(a) に、内側回転子磁石の磁束がポールピースによって変調された後の外側空隙磁束密度波形の測定結果を示す。併せて、同条件の2D-FEMおよび3D-FEMの算定結果を示す。同図より、内側回転子の極対数に由来する4次成分をベースにして、そこに高調波成分が重畳していることがわかる。同図(b)は、各々の波形を高速フーリエ変換 (FFT) した結果である。この図を見ると、外側回転子に同期し、トルク伝達に寄与する22次成分の振幅が、基本波である4次成分の次に大きいことがわかる。

参考文献

K. Atallah and D. Howe, **37**, 2844 (2001).

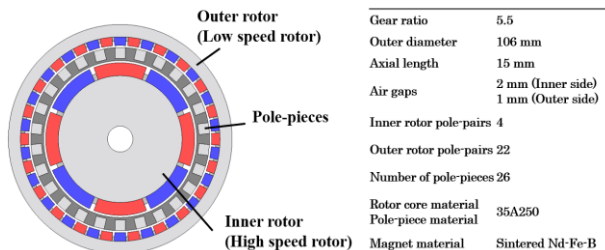


Fig. 1. Specifications of flux-modulated-type magnetic gear.

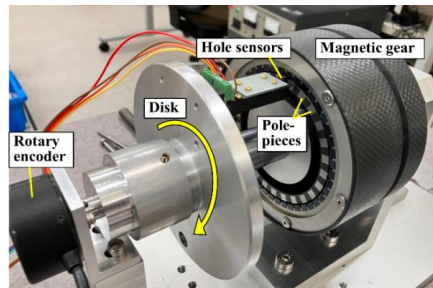
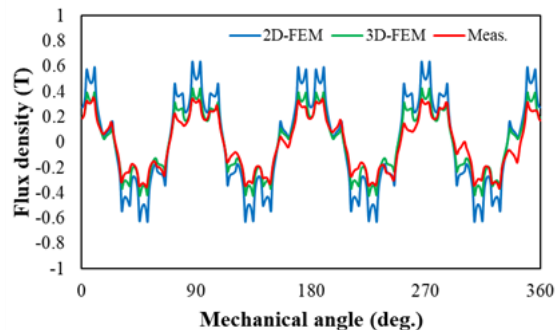
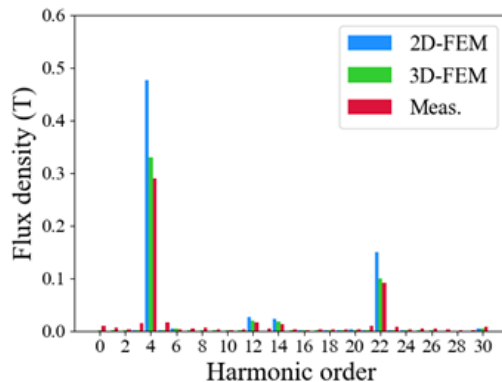


Fig. 2 Measurement system for air gap flux density waveforms.



(a) Air gap flux density waveforms



(b) Frequency components

Fig. 3 Air gap flux density waveforms and their frequency components.

RNAに基づく昇圧リアクトル機能を有するモータの出力特性算定に関する検討

張磊*, 吉田征弘, 櫻井将, 半田修士, 田島克文
(秋田大学)

Calculation for Output Characteristic of Motor Structure with Boost Reactor Function Based on RNA

L.Zhang, Y.Yoshida, S.Sakurai, N.Handa, K.Tajima
(Akita Univ.)

はじめに

近年、省エネルギーと温室効果ガス排出量の削減対策の一つとして世界の石油消費量の約6割を占める自動車の電動化が進んでいる¹⁾。しかしながら、ガソリン車と比べ、モータを使用した電気自動車の短い航続距離が課題となっている。電気自動車の駆動系は主にバッテリー、インバータ、モータから構成され、近年昇圧コンバータの導入によってシステムの全体損失を減少した報告がある²⁾。本稿では、駆動システムの小型軽量化に着目し、モータ昇圧コンバータを用いたモータ駆動システムにおいて、昇圧用リアクトルとモータを一体化した構造（以下、磁気デバイス一体構造モータ）を提案し、リラクタンسネットワーク解析（RNA）にて同体格のSPMモータと基礎特性の比較を行ったので報告する。

提案モデルの諸元と特性検討

Fig.1 にベースモデルである従来のSPMモータの形状を示す。直径215 mm、コイルエンドを含む積厚が108 mm、積層電磁鋼板を使用したコアの積厚は60 mmである。

Fig.2 に提案した磁気デバイス一体構造モータを示す。ベースモデルの固定子バックヨークを圧粉磁心を用いたボビン型リアクトルに置き換えることで、昇圧コンバータユニットにおけるリアクトル容積をゼロにすることが可能となる構造である。提案モデルにおいて軸長は108 mm、リアクトルコイルはモータ固定子のバックヨーク部に10ターン巻かれている。ギャップ長、磁石の厚み、体格などのパラメータはベースモデルと同一としている。

Fig.3 にバッテリー、昇圧コンバータ、インバータからなる提案モデルの駆動回路を示す。バッテリー電圧が300 V、コンバータのデューティ比が0.5と想定する。比較対象であるベースモデルは三相交流電流源駆動とし、RNAによって解析した最大相電流270AにおけるN-T特性をFig.4に示す。

Fig.4を見ると、低速領域において提案モデルの出力はベースモデルより低いですが、弱め界磁制御を用いた高速領域において提案モデルは出力向上が可能であることが明らかになった。

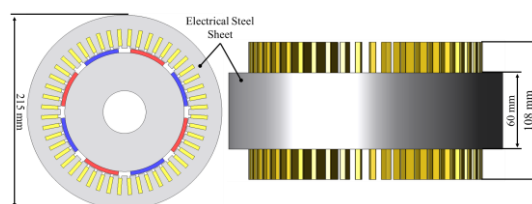


Figure 1. Structure of Base model.

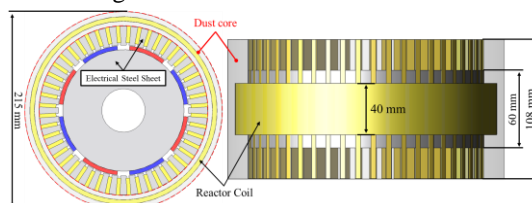


Figure 2. Structure of Proposed model.

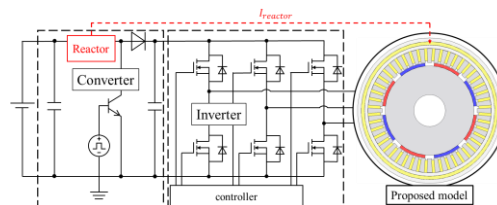


Figure 3. Drive circuit of the Proposed model.

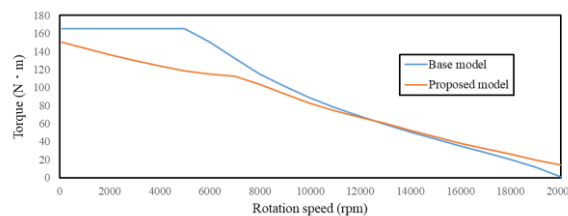


Figure 4. Comparison of N-T characteristics.

参考文献

- 1) International Energy Agency: "World energy balances Overview", pp.17 (2019)
- 2) 水谷良治: 「ハイブリッド自動車用モータの技術変遷」, 電気学会誌, Vol.138, No.5 pp.288-291 (2018)

Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた高トルク IPMSM に関する検討

武田一真¹, 吉田征弘¹, 吉田理恵², 阿部将裕², 多田秀一², 山本宗生², 田島克文¹
(秋田大学¹, 日亜化学工業²)

A Study on High Torque IPMSM Using Sm-Fe-N Bonded Magnet

K Takeda¹, Y. Yoshida¹, R. Yoshida², M. Abe², S. Tada², M. Yamamoto², K. Tajima¹
(Akita Univ.¹, Nichia corporation²)

はじめに

PM モータの多くには、強力なネオジウム焼結磁石が用いられており、その原料には、保磁力を向上させるために、重希土類であるジスプロシウム (Dy) が含まれている。Dy は高コスト、供給が不安定、採掘や精錬に環境破壊を伴う等の問題があるため、近年、永久磁石モータの省レアアース、脱レアアース化が求められており、筆者らは、ボンド磁石を用いた重希土類フリーモータの検討が進めている¹⁾。

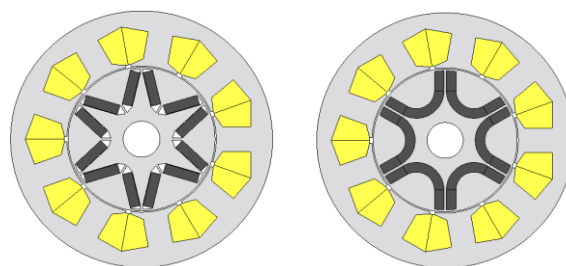
本項では、Dy フリーであるサマリウム鉄窒素 (Sm-Fe-N) ボンド磁石を用いたモータで、ネオジウム焼結磁石を用いたモータに匹敵するトルク特性を目指し、有限要素法を用いてトルク特性を算定した。

解析結果

Fig.1 (a) に高トルクを目的とした、比較対象である V 字型にネオジウム焼結磁石を配置した IPMSM 形状を、Fig.1 (b) に提案する U 字型に Sm-Fe-N ボンド磁石を配置した IPMSM 形状を示す。使用する磁石の残留磁束密度は、ネオジウム焼結磁石が 1.27 T、Sm-Fe-N ボンド磁石が 0.86 T である。また、モータ外径は 107 mm で、コイルは集中巻でティース当たり 75 ターンである。なお、ボンド磁石は磁性粉末を樹脂と混合した磁石であり、回転子コアに射出成型することができるため、本検討では、Sm-Fe-N ボンド磁石をロータに射出成型した回転子を想定してトルク特性を計算した。

Fig.2 に電流位相角とトルクとの関係を、Fig.3 に最大トルク位相角時のトルク波形を示す。U 字配置と V 字配置は共に電流位相角 15° で最大トルクとなった。このとき、U 字配置の平均トルクは 6.01 N·m、V 字配置の平均トルクは 6.36 N·m となり、トルクの差は 5.5% となった。

本検討より、回転子の磁石配置を V 字型から U 字型に変更して磁石表面積の向上とフラックスバリア部の漏れ磁束を除去することで、Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたモータで、ネオジウム焼結磁石を用いたモータに迫るトルクを出力できることが示された。



(a) V-shaped model. (b) U-shaped model.
Fig.1 Sectional view of motors used in consideration.

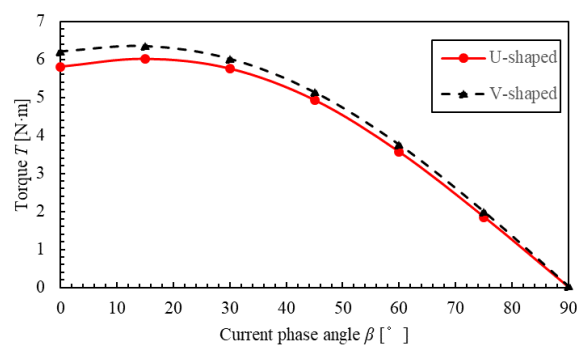


Fig.2 Torque-Current phase angle characteristics.

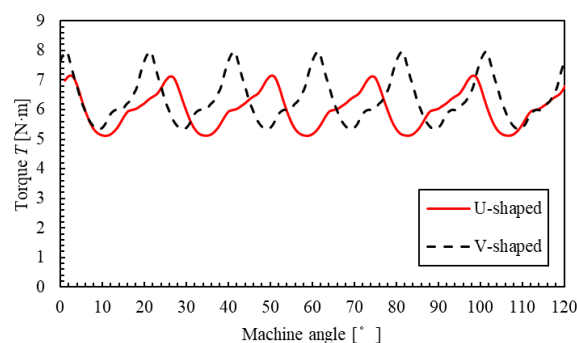


Fig.3 Torque characteristics at maximum Torque.

参考文献

- 1) 塚田裕太, 吉田征弘, 田島克文, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 7, No. 1, pp. 73-79 (2023)

3 kVA 級永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの解析設計

会津翔太, 中村健二, *大日向敬, *有松健司
(東北大学, *東北電力)

Design and Analysis of 3 kVA Orthogonal-Core-type Variable Inductor with Permanent Magnets

S. Aizu, K. Nakamura, *T. Ohinata, and *K. Arimatsu

(Tohoku University, *Tohoku Electric Power Co., Inc.)

はじめに

可変インダクタは、電力用コンデンサと組み合わせることで電力系統に並列に接続することで、無効電力補償型の電圧調整装置として応用できる。先に筆者らは、直交磁心型可変インダクタの直流制御磁束の磁路に永久磁石を挿入することで、無制御時にもある一定の大きさの無効電力を発生することができる、新しい可変インダクタを提案した。これにより、本可変インダクタは制御電流を正負に変化させることで、コンデンサレスで無効電力を実効的に遅れから進みまで線形かつ連続的に制御できる。

本稿では、本可変インダクタの試作試験を行うために、3 kVA 器の解析設計を行ったので報告する。

3 kVA 級永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの特性

Fig. 1 に、本検討で用いた永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタと永久磁石の諸元を示す。先行研究の 1.67 kVA 器¹⁾をベースにして、3 kVA 器にサイズアップしたものであり、磁石はネオジウム焼結磁石を採用した。

本稿ではリラクタンスネットワーク解析 (RNA) を用いて、永久磁石の厚みを種々変化させたときの無効電力制御特性と主巻線電流歪み率を算定した。

Fig. 2 に、解析に用いた直交磁心型可変インダクタの 3 次元 RNA モデルを示す。

Fig. 3(a)に、無効電力制御特性の算定結果を示す。同図の制御幅を見ると、磁石厚は 1~5 mm 程度が適当であると考えられる。同図(b)は、定格換算した主巻線電流歪み率の算定結果である。この図を見ると、磁石厚 1~5 mm の範囲であれば、歪み率は 5% 以下であり、要求仕様を満足していることがわかる。

今後は、本可変インダクタの試作試験を行う予定である。

参考文献

- 1) 会津, 中村, 大日向, 有松, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 7, No. 1, pp. 67-72 (2023)

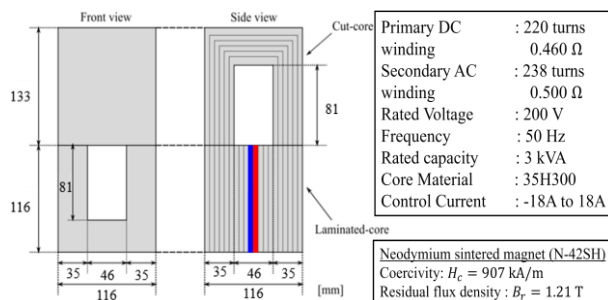


Fig. 1 Specifications of 3 kVA orthogonal-core-type variable inductor and permanent magnet.

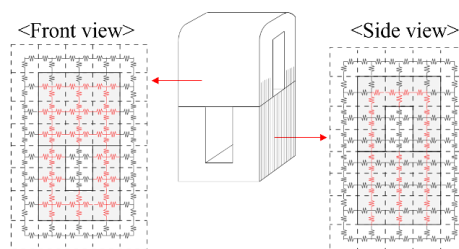
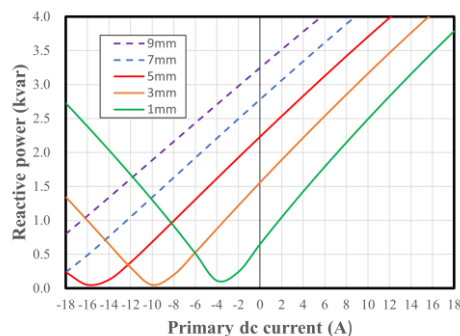
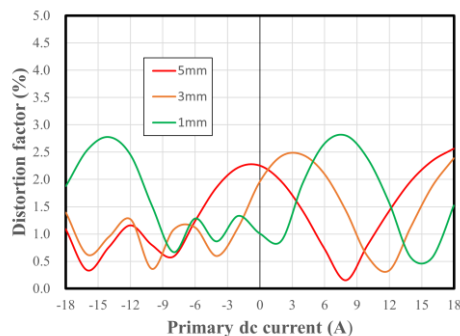


Fig. 2 Three-dimensional RNA model of orthogonal-core-type variable inductor.



(a) Reactive power characteristics



(b) Distortion factor of the secondary ac current

Fig. 3 Calculated characteristics of the variable inductor.

鉄系メタルコンポジット磁心リーケージトランスを用いた LLC-L 共振型 DC-DC コンバータの試作

宮田涼平, 依田克之, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎
(信州大学)

Fabrication of LLC-L resonant DC-DC converter using Fe-based composite magnetic core leakage transformer

Ryohei Miyata, Katsuyuki Yoda, Toshitaka Minamisawa, Makoto Sonehara, Toshiro Sato
(Shinshu University)

1.はじめに

パワーエレクトロニクス主回路電流検出シャント抵抗モジュール用絶縁型 DC-DC コンバータ (4~6 V 入力, 5 V・30 mA 出力) のへの適用を目的にリーケージトランスを試作し, 10MHz 帯スイッチング LLC-L 共振型 DC-DC コンバータに適用した. トランスは PCB ベースのプレーナトランスであり, 二種類の鉄系メタルコンポジット磁心材料を組み合わせて作製した.

2.LLC-L 共振型 DC-DC コンバータの回路構成

本研究では, Fig.1 に示すようにトランス二次側の漏れインダクタンスを考慮した LLC-L 共振型 DC-DC コンバータとして各回路パラメータを算出した^[1]. このコンバータは負荷変動が小さいシャント抵抗モジュールへの実装を想定しており, 固定周波数で駆動させ, リニアレギュレータによって出力電圧を制御する方式を採用した.

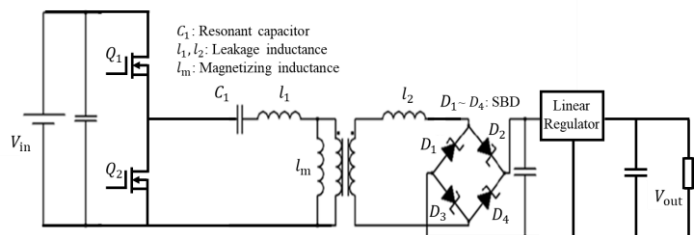


Fig.1 Circuit diagram of LLC-L resonant converter

3.リーケージトランスの構造と諸特性

Fig.2 に試作したリーケージトランスの外観と断面模式図を示す. トランス巻線の導体ラインは銅導体厚 35 μm の四層プリント基板を用いた. 磁心材料には低透磁率・低損失の等方性 Fe-Si 多結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジットシートをインダクタンス調整用としてコイル側面及び上部に採用した. また, 面水平方向に高透磁率の鉄系ナノ結晶扁平粉末/シリコン樹脂コンポジットシートを磁気シールド用として最外層に配置した.

Fig.3 にリーケージトランスの二次側開放時のインダクタンスと Q 値の周波数特性を示す. 共振回路の $l_1 C_1$ 直列共振周波数である 20 MHz での目標値は, インダクタンス 604 nH, Q 値 10 以上, 結合係数 0.9 に対し, 測定値はインダクタンス 593 nH, Q 値 7.47, 結合係数は 0.846 と Q 値が低いもののほぼ目標値を満たした, 学術講演会では, このトランスを LLC-L 共振型 DC-DC コンバータへ実装した場合の評価結果についても報告する.

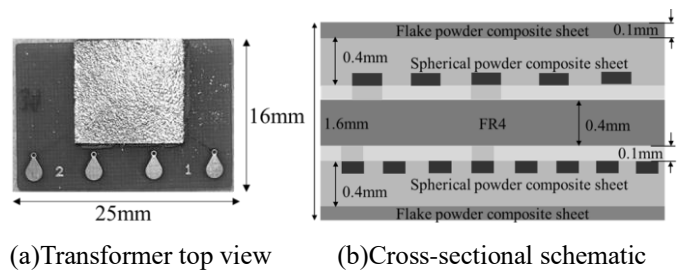


Fig.2 Structure of Planer Power Inductor

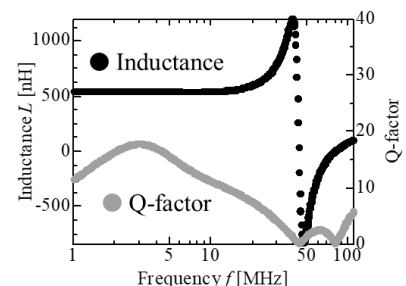


Fig.3 Inductance & Q-factor vs. frequency.

参考文献

- 1) 傳田隆之, 佐藤鴻全, 佐幸孝昭, 南澤俊孝, 佐藤敏郎, 曾根原誠, “リーケージトランスを用いた LLC-LC 共振型 DC-DC コンバータの基礎検討” 第 43 回日本磁気学会学術講演会, 27pA-13 2019.09

ナノ構造と磁性材料

宝野和博

NIMS

Nanostructure and Magnetic Materials

K. Hono

NIMS

磁性材料の特性は微細構造によって大きく変化する。その端的な例が保磁力であり、同じ強磁性化合物を主相として使った材料であっても、その保磁力は微細組織によって大きく変化する。永久磁石、軟磁性材料、磁気記録媒体、スピントロニクス素子開発は、主相となる強磁性相を持つ *intrinsic* な磁気特性をデバイスで引き出せるように微細構造を制御していく過程である。例えば $L1_0$ -FePt は高い結晶磁気異方性を持つ安定な化合物として知られてはいたが、2008年に我々が FePt-C でナノ粒子構造を実現するまで[1]、誰が FePt を HAMR 媒体として使えると真剣に思っていただろうか？この例にみられるように、磁性体を磁性材料として応用するには材料とそれを用いたデバイスの微細構造と異相界面をマイクロから原子レベルのマルチスケールで解析・制御し、磁気特性や磁気伝導特性を最適化する必要がある。

本講演では私自身の研究者としての原点となったアトムプローブによるナノ結晶軟磁性材料 FINEMET のナノ結晶メカニズムの研究[2]に遡り、ナノ解析が材料開発にいかにか有用かを例示する。FePt 薄膜の保磁力の研究から FePt-C 系 HAMR 媒体開発への展開 [3]、ナノコンポジット磁石研究で感じた理論予測と現実の乖離 [4]、Nd-Fe-B 焼結磁石の結晶粒界の原子レベル解析[5]、その知見を応用した Dy フリー高保磁力 Nd-Fe-B 磁石開発[6]、ホイスラー合金の規則化とスピン分極率の評価と理論との乖離[7]、それを用いた多層膜の界面制御による磁気抵抗の限界への挑戦 [8]、 $SmFe_{12}$ 系磁石の可能性[9]などに例示し、磁性・スピントロニクス材料開発におけるナノ構造解析の重要性を語る。

参考文献

- 1) A. Perumal, Y. K. Takahashi and K. Hono, APEX, 1, 101301 (2008).
- 2) K. Hono et al. Acta Mater. 47, 997 (1999).
- 3) L. Zhang et al. JMMM, 322, 2658 (2010), JAP, 109, 07B703 (2011).
- 4) W. B. Cui, Y. K. Takahashi and K. Hono, Adv. Mater. 24, 6530 (2012).
- 5) H. Sepehri-Amin et al. Acta Mater. 60, 6061 (2012), T. T. Sasaki et al. Acta Mater. 61, 269 (2016).
- 6) H. Sepehri-Amin et al. Scripta Mater. 63, 1124 (2010), Acta Mater. 61, 662 (2013).
- 7) T. M. Nakatani et al. JAP 52, 737 (2004), T. M. Nakatani et al. JAP 96, 168 (2010).
- 8) T. Nakatani, JAP 126, 173904 (2019).
- 9) A. K. Srinithi et al. Acta Mater. 256, 119111 (2023).

非金属材料におけるスピントロニクス機能の開拓と その外場制御

Pioneering of spintronic functions of non-metallic materials and its control by external fields

Masashi Shiraishi

(Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Japan.)

スピントロニクスは1988-89年頃に拓かれた比較的新しい研究分野である[1-3]。新しい研究分野はいつの時代も魅力的であり多くの研究者を魅了する。さらにスピントロニクス機能が発現する材料プラットフォームとして、草創期の(バルク状)金属から幸いにもすぐに無機半導体が仲間入りし、21世紀になると分子やトポロジカル量子物質、さらに2次元系や超薄膜金属もプラットフォームに仲間入りしている。このように多様な材料プラットフォームでスピントロニクス機能が発現することは、様々なバックグラウンドを持つ研究者が参入する大きな魅力となる。

本講演では、私自身の研究バックグラウンドから読み解いたスピントロニクスの魅力と、異分野からの参入者に「優しい」スピントロニクスの魅力を述べながら、スピントロニクスにおける絶対的エース物質であるバルク金属を扱わず、非主流派物質である非金属材料に光をあてながら楽しんできた研究について、その一端を紹介して若い学生・研究者の皆さんに自由に(好き勝手に)心の赴くままに研究することの楽しさをお話したいと思います。

Reference

- 1) M.N. Baibich, A. Fert et al., Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988).
- 2) G. Binasch, P. Grünberg et al., Phys. Rev. B39, 4828 (1989).
- 3) 今の学生さんには、1988年とはソウルオリンピックが開催されて東京ドームができた遠い昔、としか認識されていないと思いますが、大学2年の時に発見された効果が分野を拓いた、という意味で私にはごく最近の出来事に思えてしまいます。さらに大学時代は1900年代初頭に開拓された素粒子論、企業研究者時代には1950年代に勃興した半導体トランジスタやレーザという古めかしい分野を専門にしていただけに、スピントロニクスの新鮮さと魅力は私には傑出したものに映りました。

新機能スピントロニクス素子の開発と革新的情報処理への展開

深見 俊輔

(東北大・通研/CSIS/CIES/WPI-AIMR、稲盛科学研究機構)

Development of new-functional spintronic devices and its application to innovative information processing

Shunsuke Fukami

(Tohoku University, Inamori Research Institute for Science)

我々の生活を支えるコンピューティング技術は Moore の法則のもとで年々指数関数的に発展してきた。数年前からは AI, IoT, DX などの進展によりコンピュータに求められる性能の増加のペースが明らかに増しており、ここ最近の生成系 AI の出現によりこの先そのペースは一段と増すものと予測されている。本講演では、我々磁気工学分野の研究者がこのような社会的要請に対してどのように貢献できるか、講演者らの最近の研究を紹介しながら議論したい。

今後のコンピューティング技術への要請は、以下に述べる課題へとブレイクダウンできる。

一つ目は計算性能を向上させながら消費電力を低減する技術の確立である。これに向け、磁気工学分野は不揮発性スピントロニクスメモリ素子で貢献できる。AI 処理は多数の積和演算によって実行され、大量のメモリアクセスを伴う。つまりメモリアクセスの高速化、低消費電力化が重要となる。不揮発性スピントロニクスメモリ素子は配線間に形成でき、高速な AI 処理に適した Near-memory computing や In-memory computing などの発展的なアーキテクチャとの相性が良く、また待機時に電力を消費しないことから電力効率にも優れる。講演者らは最先端 CMOS プロセスへの適用を目指し、10 nm を下回るような領域で高い性能（書込み、読み出し、保持）を有した極微細磁気トンネル接合素子[1-3]や、最先端 CMOS と同じ周波数で動作する超高速スピントロニクス軌道トルク素子[4-6]などの研究開発を進めている。

二つ目は古典コンピュータが苦手とするタスクを効率的に処理する新概念技術の確立である。古典コンピュータは単純な四則演算に落とし込める問題を得意とする一方で、組合せ最適化や機械学習、量子計算などの計算論的複雑性の高い問題には多くの計算時間と電力を要する。量子コンピュータはこのような問題への解決策になるものと期待されているが、実現に向けての道のりは平坦ではない。講演者は、磁気工学の原理に立脚し、古典でも量子でもない、その中間に位置するコンピューティング技術の開拓に取り組んでいる。上述のような計算論的複雑性の高い問題を古典コンピュータで扱う際、乱数を用いたアルゴリズムの利用が有効であることが知られている。古典コンピュータは質の良い乱数を生成することを苦手とする一方で、スピントロニクス素子の熱ゆらぎ現象を利用することでこれが可能となる。講演ではこの思想に基づき構築した「確率論的コンピュータ (P コンピュータ)」を用いて行った組合せ最適化[7], ボルツマン機械学習[8], 量子計算[9]の原理実証を紹介する。

本研究は内閣府 ImPACT プログラム、JST-OPERA (JPMJOP1611), JST-CREST (JPMJCR19K3), 文科省 XNICS (JPJ011438), 科研費 (19H05622)などの支援の下で行われた。

参考文献

- 1) K. Watanabe et al., Nat. Comm. **9**, 663 (2018).
- 2) B. Jinnai et al., IEEE IEDM, 24.6.1 (2020).
- 3) B. Jinnai et al., IEEE IEDM, 2.6.1 (2021).
- 4) S. Fukami et al., Nat. Nanotechnol. **11**, 621 (2016).
- 5) H. Honjo et al., IEEE IEDM, 28.5.1 (2019).
- 6) M. Natsui et al., IEEE J. Sol.-Sta. Cir. **56**, 1116 (2021).
- 7) W. A. Borders et al., Nature **573**, 390 (2019).
- 8) J. Kaiser et al., Phys. Rev. Appl. **17**, 014016 (2022).
- 9) A. Grimardi et al., IEEE IEDM, 22.4.1 (2022).

MgO barrier layer thickness dependence of electrical $1/f$ noise in magnetic tunnel junctions

Yupeng Wang¹, Muftah Al-Mahdawi², Zhenhu Jin³, and Mikihiro Oogane^{1,2}

¹Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

²CSIS, Tohoku University, Sendai, 980-8579, Japan

³State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100090, China

The investigation of noise characteristics in magnetic tunnel junctions (MTJs) holds significant scientific and technological importance for magneto-resistance (TMR) sensors based on MTJs. This is due to the anticipated application of TMR sensors in bio-magnetic field detection, attributed to their advantages such as high sensitivity and low cost. For the application of bio-magnetic field sensors, $1/f$ noise serves as a performance-limiting factor in the low-frequency range. The exact cause of $1/f$ noise remains uncertain, but it is generally believed to be associated with the quality of the MTJ films and disturbances in the magnetization and magnetic domain walls in the ferromagnetic layers. The thickness of the MgO barrier layer in the MTJs may potentially impact the thin film quality and the electron tunneling process. Therefore, this study investigates the relationship between the low-frequency $1/f$ electric noise in MTJs with various thickness of the MgO barrier layer.

MTJ films with different MgO barrier layer thicknesses were deposited using a magnetron sputtering system. The MgO barrier thicknesses (t_{MgO}) were set to 1.0 nm, 1.2 nm, 1.4 nm, 1.6 nm, and 1.8 nm, respectively. Figure 1(a) illustrates the dependence of the tunnel magneto-resistance (TMR) ratio on the MgO barrier thickness. Starting from the sample with $t_{\text{MgO}} = 1.2$ nm, the TMR ratio increases with an increase in the MgO barrier thickness. At $t_{\text{MgO}} = 1.6$ nm, the TMR ratio was saturated, exceeding 200%. On the other hand, as depicted in Figure 2(b), the noise power density S_V at 10 Hz initially decreases with an increase in t_{MgO} , reaching the lowest noise level at $t_{\text{MgO}} = 1.4$ nm. Thereafter, it increases with further increases in t_{MgO} . The potential causes of variations in the noise level could be attributed to changes in film quality resulting from the variation in MgO barrier thickness. This could include the occurrence of lattice defects or pinholes, among other phenomena, leading to metallic conduction processes other than the Δ_1 electron tunneling. Further investigation is required to determine the specific reasons behind these effects and their impact on the noise characteristics.

Acknowledgements This work was supported by JST SPRING, Grant Number JPMJSP2114, X-nics project, CSIS, and CIES in Tohoku University.

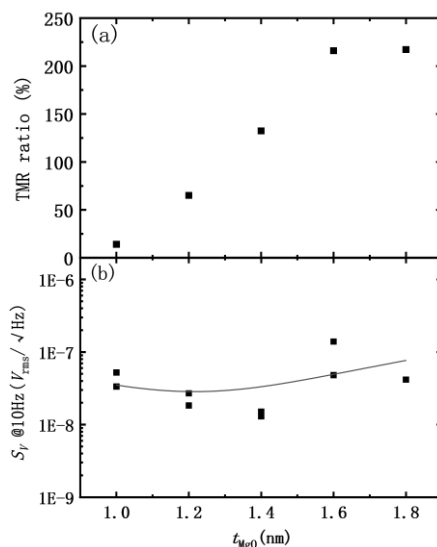


Fig. 1 MgO barrier thickness (t_{MgO}) dependence of (a) TMR ratio and (b) Noise power density (S_V) at 10 Hz.

フェリ磁性体 GdCo 薄膜における非局所スピン輸送測定

伊藤智也¹、船田晋作¹、桑野恭輔¹、杉浦達¹、塩田陽一^{1,2}、森山貴広³、小野輝男^{1,2}
(¹京大化研、²京大 CSRN、³名大工)

Non-local spin transport measurement in ferrimagnetic GdCo thin films

T. Ito¹, S. Funada¹, K. Kuwano¹, I. Sugiura¹, Y. Shiota^{1,2}, T. Moriyama³,
and T. Ono^{1,2}

(¹ICR, Kyoto Univ., ²CSRN, Kyoto Univ., ³Department of Materials Physics, Nagoya Univ.)

はじめに

スピン波スピン流は電流と違いジュール熱の発生がないという利点を有する一方、距離に応じて散逸する非保存流であるため、長距離伝播が困難である。しかし近年、2次元的な磁気秩序を有する反強磁性体において、「スピン超流動」とよばれる超低散逸なスピン流伝導機構が理論的に予測されている[1,2]。一方でフェリ磁性体は、2つの副格子磁化の大きさが等価となる磁化補償温度 T_M において、反強磁性体と類似する状態を示す。加えて、外部磁場によるスピントロップ転移によって2次元的な磁気秩序が誘起されることから、スピン超流動の実現が期待される材料である。今回我々は、外部磁場による磁気秩序の制御のもと、フェリ磁性体 GdCo/Pt 二層膜において非局所測定を行うことで、スピン超流動の観測を試みた。

実験方法

熱酸化処理した Si 基板上に Gd₂₉Co₇₁(5)/Pt(5) (単位: nm) を DC スパッタリング法で成膜後、測定用に素子加工を行った。Gd₂₉Co₇₁層はGdとCoを適当なパワーでコスパッタリングすることにより成膜されており、磁化測定の結果 T_M は 200 K 付近であることが確認された。Pt層はキャップ層としての役割と、スピン流と電流を双方向に変換するスピンスースとしての役割を担っている。この素子において Fig. 1(a) に示すように、電流印加方向を軸に外部磁場を回転させながら (β スキャン)、A-B 間に電流を流し C-D 間の電圧を検出した。

実験結果

Fig. 1 (b)に注入-検出端子間距離 $8\mu\text{m}$ の素子における β スキャンでの非局所シグナルを示す。印加した磁場は 3 T であり T_M 近傍であればスピントロップ転移を誘起できる。ここでみられる変調は主にリーク電流由来のスピンホール磁気抵抗効果 (SMR) [3,4] とスピントロップ転移によって説明可能である。一方で、磁化補償温度 T_M においてのみ現れるプラトー領域に関しては、SMR の寄与に加えてスピン流伝搬によるシグナル変調が生じていることが示唆される。

当日はこの結果の解析に加え、距離依存性から導かれるスピン超流動の可能性についても詳細に議論する予定である。

参考文献

- 1) E. B. Sonin, Adv. Phys. **59**, 181 (2010).
- 2) S. Takei and Y. Tserkovnyak, Phys. Rev. Lett. **115**, 156604 (2015).
- 3) W. Zhou *et al.*, Phys. Rev. Mater. **2**, 094404 (2018).
- 4) D. Chen *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, 014402 (2022).

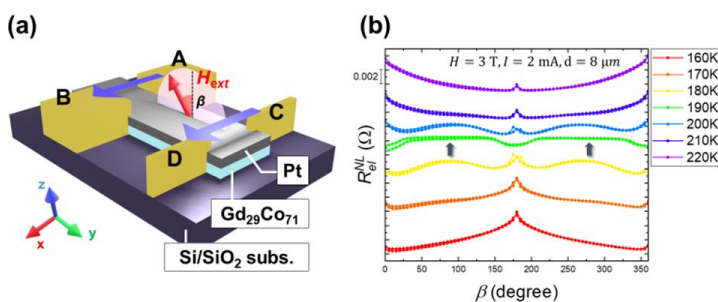


Fig. 1 (a) Schematic illustration of measurement setup for non-local measurement rotating applied magnetic field about the x -axis. (b) Non-local resistance under an applied magnetic field of 3 T over a wide range of temperatures for β -scan. T_M is about 190 K, where plateau signal can be observed.

Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/GeSn 接合の スパッタリング法による作製と結晶性と磁性の評価

河原林雄大、國吉望月*、竹内将人*、石川諒*
(大和大理工、*アルバック協働研)

Structural analysis and magnetic properties of Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/GeSn junction deposited by sputtering method
Y. Kawaharabayashi, *M. Kuniyoshi, *M. Takeuchi, *R. Ishikawa
(Faculty of Science and Engineering, Yamato Univ., *ULVAC, Inc.)

研究背景

ホイスラー合金/Ge 接合は、ホイスラー合金から Ge に高効率なスピン注入が可能であることから、半導体スピントロニクスを実現する上で重要である。また、Ge は引っ張り歪みを加えることで直接遷移化することができ、歪み Ge を用いたスピン LED 応用も提案されている。歪み Ge と同様に、Ge は Sn を添加することでも直接遷移化でき、光・スピンデバイスとして応用することが期待されるが、ホイスラー合金と GeSn の接合については十分に調べられていない。そこで、本研究では、Si 基板上に Ge バッファ層を 2 段階成長法により成膜し、その上に GeSn 薄膜とホイスラー合金である Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}(CFAS)を積層した接合を作製し、結晶性評価と磁性の評価を行った。また、本研究では、Ge ならびに GeSn 成膜に一般的に用いられる MBE 法や CVD 法を用いずに、すべての層をスパッタリング法を用いて成膜している。

実験方法

スパッタリング法を用いて、フッ酸により洗浄した Si(111)基板上に Ge バッファ層を基板温度 350°C(Low Temperature-Ge : LT-Ge)および 600°C(High Temperature-Ge : HT-Ge)として、それぞれ 30 nm および 70 nm 成膜を行った。その後、基板温度 300°C、膜厚 200 nm の GeSn 層(Sn 組成 5 at%)を堆積させ、その上に、CFAS を室温で 25 nm 積層した。X 線回折法(XRD)を用いて結晶構造を評価し、走査電子顕微鏡法(SEM)を用いて結晶表面の評価を行った。また、振動試料型磁力計(VSM)を用いて磁性評価も行った。

実験結果

はじめに CFAS を積層していない GeSn/HT-Ge/LT-Ge について評価した。Fig.1 は XRD の 2θ - θ スキャンの結果である。Ge もしくは GeSn(111)と Si 基板のピークのみが確認され、その他の結晶面からの回折ピークは確認されなかった。よって、Si(111)基板上の GeSn/HT-Ge/LT-Ge はエピタキシャル成長している可能性が高い。Fig.2 に GeSn 表面の SEM 観察像を示す。(111)表面に特有の三角形の構造やボイドがみられ、格子レベルで平坦な GeSn 表面の実現には至らなかった。Fig.3 に CFAS/GeSn/HT-Ge/LT-Ge の磁化曲線を示す。飽和磁化は 4 μ_B /f.u.程度であり、保磁力が 10 mT 程度であった。MBE で作製した同一の接合と比べ、スパッタリング法で作製したものは飽和磁化の値が小さくなり、保磁力が大きくなっていることが分かった。講演では、より詳細な結晶性と磁性の関係について報告する予定である。

本研究は、JSPS 科研費 23K13660 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Y. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Applied **8**, 014007 (2017).

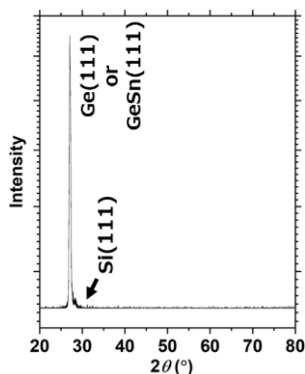


Fig.1 The XRD pattern of the GeSn/HT-Ge/LT-Ge/Si(111).

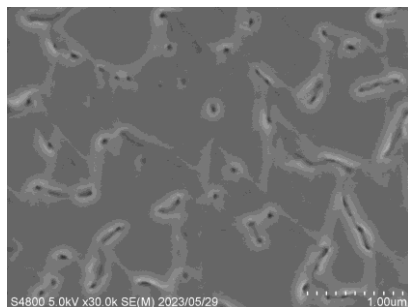


Fig.2 SEM image of GeSn surface.

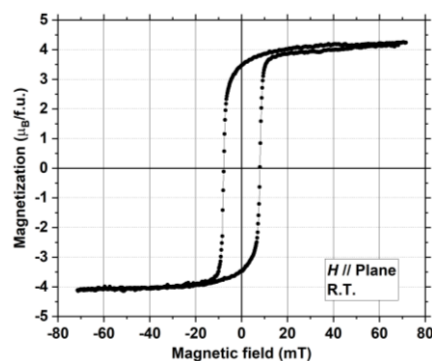


Fig.3 M - H curve at room-temperature of CFAS/GeSn junction.

Co₂Mn(Al,Ga)薄膜における異常ホール効果と異常ネルンスト効果の評価

菅原聖威, 山ノ内路彦, 植村哲也
(北海道大学)

Characterization of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in Co₂Mn(Al,Ga) thin films
Kiyotake Sugawara, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura
(Hokkaido University)

1. はじめに

近年 IoT を支えるセンサーの需要が高まる中、異常ホール効果(AHE)と異常ネルンスト効果(ANE)を利用した3次元磁場センサーが注目されている¹⁾。Co基ホイスラー合金のCo₂MnAl(CMA)やCo₂MnGa(CMG)は磁性ワイル半金属であることが指摘され、バルクにおいてその特異なバンド構造に起因した比較的大きなAHEやANEが報告されている²⁻⁴⁾。しかしながら、AHEとANEの評価は個別に行われ、特に薄膜においては、両者の相関をはじめ、基本的な特性についても十分には明らかになっていない。本研究では、CMAとCMG、さらにはそれらを混合したCMAG薄膜のAHE及びANEの特性評価を行った。

2. 実験方法

MgO(001)単結晶基板上に、厚さ30 nmの(Co₂Mn_{0.91}Al_{0.99})_{1-x}(Co₂Mn_{0.81}Ga_{0.65})_x薄膜(x=0, 0.38, 0.48, 0.55, 1)をコスパッタ法により600°Cで成長した。続いて、作製したCMAG薄膜をホールバーに加工した後、Fig.1に示すように、(a)磁場を面直に掃引、または、(b)面内で回転させながら、横抵抗率(ρ_{yx})および縦抵抗率(ρ_{xx})を測定した。CMAGの磁化が面直方向を向いた時に得られる抵抗率から異常ホール角 θ_{AH} ($=\rho_{yx}/\rho_{xx}$)を算出した。一方、磁化がチャネル方向を向いたときに得られる ρ_{yx} からプレーナーホール効果による寄与を差し引いた横抵抗率成分 $\rho_{yx}^{(AN)}$ に対し、 $\rho_{yx}^{(AN)}/\rho_{xx}J$ で定義される K_{ANE} をANE効果の効率の指標とした¹⁾。ここで、 J はチャネル方向に印加した電流密度である。 J によるジュール熱を起因とした熱勾配を仮定すると、 K_{ANE} は異常ネルンスト係数に比例する量に対応する。

3. 結果および考察

Fig. 2にCMAG薄膜の θ_{AH} 及び K_{ANE} の x 依存性を示す。 θ_{AH} の値の x 依存性は比較的小さく、得られた θ_{AH} の値はおよそ10%程度となった。一方、 K_{ANE} は x に大きく依存し、 $x=0.55$ の膜において最大値となった。以上より、CMAG薄膜では比較的大きなAHEとANEが同時に発現することが明らかとなった。

参考文献

- 1) J. Shiogai et. al., Commun. Mater. **2**, 102 (2021).
- 2) P. Li et. al., Nat. Commun. **11**, 3476 (2020).
- 3) K. Manna et. al., Phys. Rev. X. **8**, 041045 (2018).
- 4) A. Sakai et. al., Nat. Phys. **14**, 1119-1124 (2018).

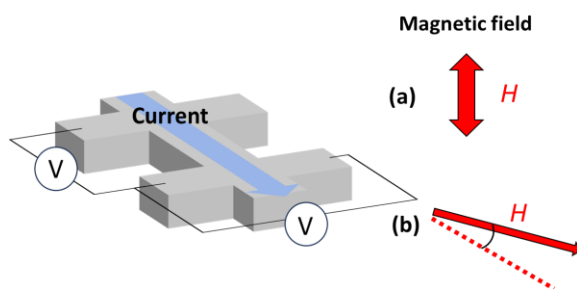


Fig.1. Measurement systems for (a) AHE and (b) ANE.

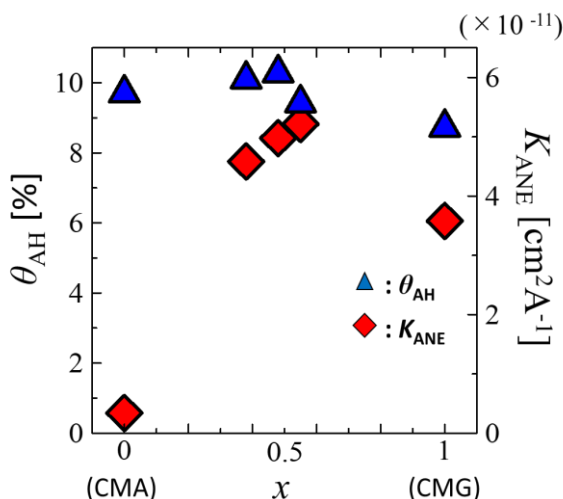


Fig.2. The value of θ_{AH} and K_{ANE} as a function of x in the CMAG thin film at room temperature.

凹凸構造を利用した異常ネルンスト型熱流センサの高感度化

今枝寛人, 小田切美穂, 坂本美雨, 鷺見聡, 栗野博之, 田辺賢士 (豊田工業大学)

Sensitivity improvement of a heat flux sensor based on anomalous Nernst effect by uneven structure

H. Imaeda, M. Odagiri, M. Sakamoto, S. Sumi, H. Awano and K. Tanabe

(Toyota Technological Institute)

はじめに

熱流センサは温度センサとは異なり、熱エネルギーの流れをベクトル量として検知することができるため熱マネージメントの要素技術として期待されている。特に異常ネルンスト効果 (ANE) [1]を利用した熱流センサは、安価でフレキシブルな熱流センサになることが期待されている[2]。熱流センサの高感度化には、熱流 $[W/m^2]$ あたりの起電力 V_{ANE} を増大させる必要があり、 V_{ANE} は材料パラメータである S_{xy} と強磁性体内部の温度勾配 ∇T に比例する。従来の研究では S_{xy} の向上を目指した材料探索が行われていたが、強磁性体の構造を工夫し ∇T の向上を目指しても高感度化が実現可能である。強磁性体内部の熱流密度を考えると、強磁性体構造の幅が狭く、高さ(厚さ)が高い細線構造(高アスペクト比構造)がより大きな ∇T を生み出すことが期待される。そこで我々は基板に作製された凹凸構造上に強磁性膜を成膜することで、高アスペクト比構造の作製に挑戦し、熱流センサの高感度化の研究を行った。強磁性膜には Co、GdFe、GdFeCo を用い、材料依存性についても評価した。

実験方法および結果

まずナノインプリント法を用いて、プラスチック基板上表面に 2, 5, 10 μm の凹凸構造を作製した。次に SiN(10 nm)/Co(Gd₂₂Fe₇₈, Gd₂₁Fe₅₇Co₂₂)(20 nm)多層膜を、マグネトロンスパッタを用いてこの凹凸構造の上に成膜することで、凹凸部側面に高アスペクト比構造を作製した (Fig. 1)。Fig. 1 の挿入図はそのときの断面 SEM 画像である。本素子を用いて、熱流あたりの起電力を評価した (Fig. 2)。Co の場合、凹凸高さが増加するほど、熱流あたりの起電力が増加しており、平坦構造に比べておおよそ 10 倍の高感度化に成功した。一方で GdFe 及び GdFeCo の場合、熱流あたりの起電力が単調増加とはならなかった。この原因は、熱伝導率の差と凹凸部上下面に成膜された薄膜による影響で説明できる。

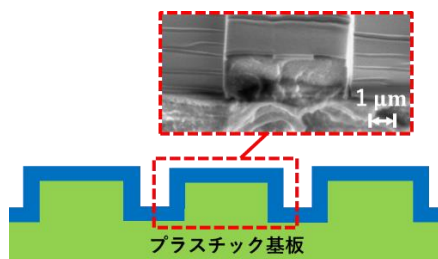


Fig. 1 凹凸構造 (挿入図は SEM による断面観察図)

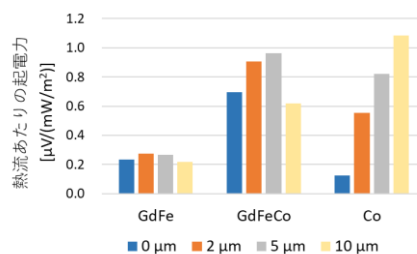


Fig. 2 各材料の V_{ANE} と凹凸高さの関係

参考文献

[1] M. Mizuguchi et al., Sci. Tech. Adv. Mater. 20, 262 (2019).

[2] W. Zhou and Y. Sakuraba, Appl. Phys. Express 13, 043001 (2020).

謝辞 この研究はパロマ環境技術開発財団の助成を受けて行われたものです。

電圧制御によるスキルミオンの相変化

笠川未来翔¹、三木颯馬¹⁻³、橋本拳^{1,2}、石川諒⁴、後藤穰¹⁻³、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³
 (大阪大学¹、大阪大学 CSRN²、大阪大学 OTRI³、アルバック協働研⁴)

Phase transition of skyrmion by applying voltage

M.Kasagawa¹, S.Miki¹⁻³, K.Hashimoto^{1,2}, R.Ishikawa⁴, M.Goto¹⁻³, H.Nomura¹⁻³, Y.Suzuki¹⁻³
 (Osaka Univ.¹, CSRN-Osaka², OTRI-Osaka³, ULVAC, Inc.⁴)

はじめに

近年、磁気スキルミオンは室温付近でブラウン運動を示すことから、超低消費電力のブラウンian計算機の情報キャリアの候補として期待されている[1, 2]。このようなデバイスを実現するためには、スキルミオンの電圧制御が欠かせない。スキルミオンの電圧制御の先行研究として、直流電圧印加によるスキルミオンのゲート操作[3, 4]や拡散[5]、生成消滅の制御[6]が報告されている。しかし、DMI 変調もあり、単なる VCMA 効果だけではなく、その微視的機構はまだ明らかでない。そこで本研究では、スキルミオンの電圧効果の機構解明の糸口を探し、スキルミオンの生成消滅やダイナミクスの電圧依存性について調べた。

実験方法

スパッタリング法により Si/SiO₂ 基板/Ta/Co₁₆Fe₆₄B₂₀/Ta/MgO/SiO₂、及び Si/SiO₂ 基板/Ta/Pt/Co₁₆Fe₆₄B₂₀/Ta/MgO/SiO₂ の 2 種類の積層構造を作製した。ここでは、DMI を上げるために Pt を挿入した。そして、これらの試料の上に Cr(1 nm)/Au(5 nm) の超薄膜電極を形成した。Fig. 1 は作製したデバイスの構造である。それぞれの試料の面直方向に電圧を印加しながら、MOKE 顕微鏡で Kerr ヒステリシスの電圧変化やスキルミオンの拡散を観察した。

実験結果

スキルミオンの温度と電圧の相関について、スキルミオンの生成温度は正電圧で下がり、負電圧で上がる。発表当日は電圧ヒステリシスや温度-電圧の相関、及び交流電圧印加時の拡散係数の周波数依存性について議論する。本研究は JSPS 科研費基盤研究 S(JP20H05666)、科研費若手研究(23K13660)、特別研究員奨励費(23KJ1477)及び CREST (JPMJCR20C1)、次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)の助成を受けたものである。

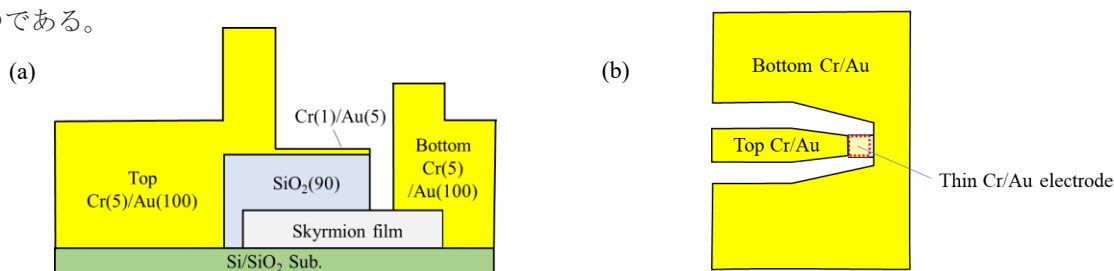


Fig. 1(a) Cross sectional view and (b) top view of sample configuration (nm)

- [1] Y. Jibiki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **117**, 082402 (2020), [2] K. Raab *et al.*, Nature Communications, **13**, 6982 (2022), [3] K.Hashimoto *et al.*, MMM, EOC-06, Minneapolis (2022), S.Miki *et al.*, Intermag, HOD-14, Sendai (2022), [4] C. Fillion *et al.*, Nature Communications, **13**, 5257 (2022), [5] T. Nozaki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **114**, 012402 (2019), [6] R.Ishikawa *et al.*, Appl Phys. Lett, **121**, 252402 (2022)

スキルミオンの高密度と高速動作を目指した界面エンジニアリング

○(M1)佐藤根 隆太¹, 黒川 雄一郎¹, 湯浅 裕美¹
(九州大学¹)

Numerical study on skyrmion transport with small size and high speed

○Ryuta Satone¹, Yuichiro Kurokawa¹, Hiromi Yuasa¹
(Kyushu Univ. ¹)

背景

近年、重金属層に隣接する磁性層中のスキルミオンは、そのナノサイズと微小電流による高速転送により、新しい情報キャリアとして注目されている。しかし、典型的な例では、サイズと電流を大きくすると転送速度が大きくなるというトリレンマがある[1,2]。一方で、二層間の界面に高スピニングコンダクタンス材料の超薄膜を挿入することで転送速度を高めることができる[3]。しかしながら、挿入した磁性層によってスキルミオンの維持に必要なジャロシンスキー・守谷相互作用 (DMI) の大きさが変化することが予想される。そこで本研究では、スキルミオンに対しスピン流を注入した際の磁化の挙動を MuMax3[4]を用いてシミュレーションし、DMI およびスピンミキシングコンダクタンスがスキルミオンの生成と安定、転送に与える影響を求める。

計算方法

スキルミオンの転送は、磁化の挙動を記した LLG 方程式を解くことによってシミュレートされる。磁性体は CoFeB を想定し、各種パラメータは Table 1 に示したものを使用する。スピンミキシングコンダクタンスは重金属層のスピンホール角とともに電流分極に作用するため、電流分極の値を変化させた。

parameter	value
Saturation magnetization (A/m)	1.0×10^6
Magnetic anisotropy (J/m ³)	6.8×10^5
Stiffness constant (J/m)	1.0×10^{-11}
Current density (A/m ²)	1.0×10^{11}
Cell size (nm)	2×2×1
External magnetic field (mT)	90
Current Polarization	0.1~0.3

結果

Table 1

Fig.1(a)はスピンミキシングコンダクタンスを固定し、外部磁場と DMI 係数を変化させた場合の転送速度と直径の関係を示し、Fig.2(b)は電流分極を 0.1 から 0.3 に変化させた場合の DMI 係数に対する転送速度の変化を示している。スピンミキシングコンダクタンスの変化がない場合は速度に応じて直径が大きくなったが、スピンミキシングコンダクタンスを変化させた場合は速度が上昇したのに対し、スキルミオンの直径は変化しなかった。このことから、界面のスピンミキシングコンダクタンスを上昇させることでスキルミオンのトリレンマを打破する可能性が示された。

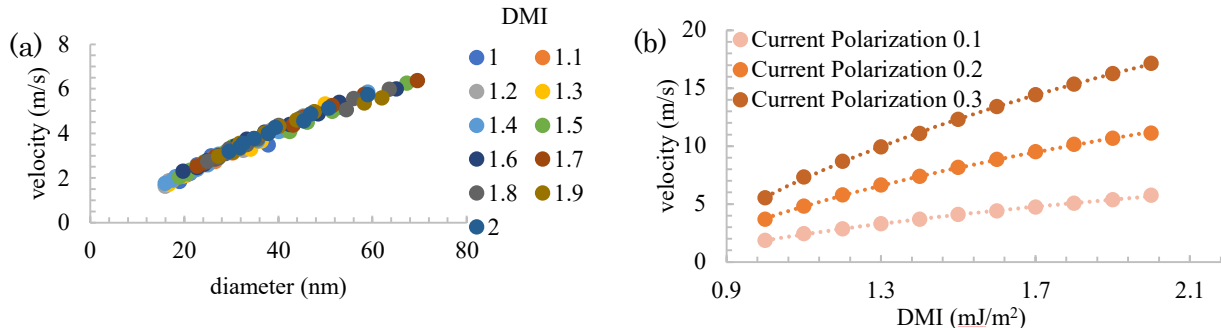


Fig. 1 (a)Skyrmion transport velocity dependence on diameter. (b)Skyrmion transport velocity dependence on DMI magnitude.

参考文献

[1]T.H.R. Skyrme, *Nucl. Phys.*, 31, 556, 1962. [2] S. Li, *et al, Mater. Horiz.* 8, 854, 2021. [3] X. Jia, *et al. Europhys. Lett.* 96, 17005, 2011. [4]A. Vansteenkiste, *et al. AIP Adv.*, 4, 107133, 2014.

スキルミオン間の情報の流れの評価

江本紘汰¹、森弘樹¹、石川諒²、三木颯馬^{1,3,4}、後藤穰^{1,3,4}、野村光^{1,3,4}、田村英一^{1,3,4}、鈴木義茂^{1,3,4}
(大阪大学¹、アルバック協働研²、大阪大学 OTRI³、大阪大学 CSRN⁴)

Evaluation of information current between skyrmions

K. Emoto¹, H. Mori¹, R. Ishikawa², S. Miki^{1,3,4}, M. Goto^{1,3,4}, H. Nomura^{1,3,4}, E. Tamura^{1,3,4}, and Y. Suzuki^{1,3,4}

(Osaka Univ.¹, ULVAC,Inc.², OTRI-Osaka³, CSRN-Osaka⁴)

はじめに

磁気スキルミオンとは固体中かつ室温で観察できるトポロジカルに安定な渦状のスピンの配向を示す準粒子である。スキルミオンは斥力相互作用¹⁾を利用することで、低電力消費で動作する演算素子への応用が期待されている。しかしスキルミオン同士の情報の流れはその確率的な振る舞いから不明確とされている。スキルミオンの情報の流れの評価は素子の性能評価において極めて重要であり、我々はその評価のためにスキルミオン間の相互情報量²⁾に注目した。相互情報量とは二つの確率的なデータの相互依存を表す量である。本研究では、スキルミオンのブラウン運動の観測からスキルミオン同士の情報の流れを評価した。

実験・解析方法

本研究ではセルオートマトン型素子を作製した。熱酸化シリコン基板上にマグネトロンスパッタリング法により Ta (5.0 nm)|Co₁₆Fe₆₄B₂₀(1.2 nm)|Ta(0.22 nm)|MgO(2.0 nm)|SiO₂(3.0 nm)からなるスキルミオン膜を成膜し、その表面にリフトオフ法で正方形の SiO₂(0.083 nm)膜を追加成膜した。このような試料では追加成膜した領域内にスキルミオンを閉じ込めることができる

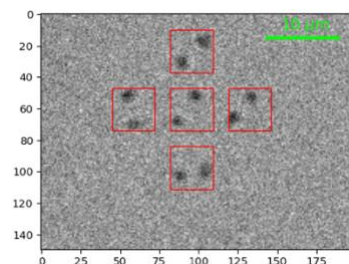


Fig.1 Skyrmions confined in the pattern

箱内に2つのスキルミオンを閉じ込め、斥力相互作用によってスキルミオンの取りうる対角配置を2状態として取り扱う。スキルミオンのブラウン運動の軌跡を確率的なデータとして扱い、箱間のスキルミオン同士の相互情報量を求める。箱間の情報伝達の可能性は示されており¹⁾、本素子の中央の箱の状態が周囲の箱の状態の多数決によって決められる設計である。Fig.1は作製した素子の磁気光学カー効果顕微鏡観察像であり、5つの箱に2つずつスキルミオンが閉じ込められている。

結果

素子観測は磁気光学カー効果顕微鏡で26.5°Cで行い、125fpsで撮影を行なった。Fig.2は1000フレーム分の5つの箱に閉じ込めた2つのスキルミオンのブラウン運動をトラッキングした結果の図である。今回16000フレーム分のデータを取得することに成功した。当日はスキルミオン同士の相互作用の定量評価の結果についての議論を行う。本研究はJSPS 科研費JP20H05666、23K13660及びJST、CREST、JPMJCR20C1の助成を受けた物である。

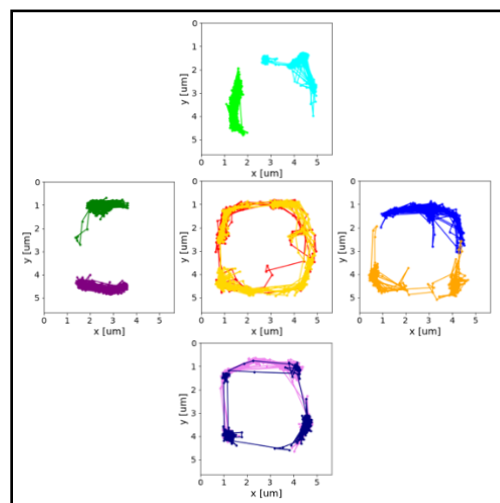


Fig.2 Trajectory of Skyrmions

参考文献

- 1)R.Ishikawa, et al., Appl. Phys. Lett. 119, 072402 (2021)
- 2)T.Sagawa and M.Ueda, New J. Phys. 15 125012(2013)
- 3)Y.Jibiki, et al., Appl. Phys.Lett. 117, 082402 (2020)

磁気スキルミオンのブラウン運動を用いた Merge, Fork 素子のシミュレーションによる提案

今西弘人¹、三木颯馬¹⁻³、後藤穰¹⁻³、田村英一¹⁻³、野村光¹⁻³、鈴木義茂¹⁻³

(¹大阪大学、²阪大 OTRI、³阪大 CSRN)

Proposal of Merge and Fork circuits using the Brownian motion of magnetic skyrmions by micromagnetic simulation

H.Imanishi¹, S.Miki¹⁻³, M. Goto¹⁻³, E. Tamura¹⁻³, H. Nomura¹⁻³, Y. Suzuki¹⁻³

(¹Osaka Univ., ²OTRI-Osaka, ³CSRN-Osaka)

はじめに

スキルミオンとは磁性薄膜中に発生するトポロジカルに守られた磁気構造の一種で、粒子としてふるまう。室温下でブラウン運動をすることや電圧による制御が可能であることから、確率計算機などへの応用が期待されている。中でも我々は、スキルミオンをトークンとしたブラウン計算機^{1,2)}への応用を目指している。ブラウン計算機を構成する回路素子のうち Hub は実証されており³⁾。Ratchet についてもスキルミオンの一方向性運動を実験にて観測した⁴⁾。しかし、回路のリセットを必要としない Conservative-join (C-join) は実証が難しい。そこでリセットを用いる素子である 2 つの入力に対し 1 つの出力を行う Merge 素子、1 つの入力に対し 2 つの出力を行う Fork 素子によって C-join を代替することができることから²⁾、実証をより簡単に行えるのではないかと考えた。本研究では、Merge, Fork 素子の実証に向けたマイクロマグネティックシミュレーションによる Merge, Fork 素子の動作確認を目的とする。

シミュレーション方法

本研究では、室温 (300K) を想定する。磁気異方性エネルギー障壁によって設計した回路中にスキルミオンを閉じ込める。昨年の講演にて報告⁵⁾した C-join の形状に倣い、Merge では、2 つの入力ポケットで出力ポケットを囲み、出力方向に向けて反発力が働くように設計した。Fork では、2 つの出力ポケットを囲む必要があるため、入力ポケットを引き伸ばして囲み、それぞれのポケットの出力方向に反発するように設計した。

シミュレーション結果

Fig. 1(a) は 0ns での Merge における初期状態を示す。入力されるスキルミオンがブラウン運動により入力ポケットに入り、膨張する。その後待機しているスキルミオンが入力スキルミオンとの反発相互作用によりエネルギーポケットから押し出される。Fig. 1(b) は 106ns 経過後の結果であり、回路が機能したことが分かる。また、Fork についても回路が機能することを確認した本講演では回路のエネルギーおよびその計算から見積もられる計算時間についても議論する。本研究は JSPS 科研費基盤研究 S(JP20H05666)、特別研究員奨励費(23KJ1477)及び CREST (JPMJCR20C1)、次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) F. Peper, *et al. J. Emerg. Technol. Comput. Syst.* **9**(1), 1 (2013)
- 2) L. J. Fei, *et al. Physica D* **428**, 133052 (2021)
- 3) Y. Jibiki, *et al. Appl. Phys. Lett.* **117**, 082402 (2020)
- 4) S. Miki *et al.* MMM conference, EOC-06, Minneapolis (2022), R. Ishikawa *et al.*, JSAP Spring meeting, 6a-D419-10, Tokyo (2023)
- 5) S. Miki *et al.* MSJ meeting, 06aB-8 Nagano (2022)

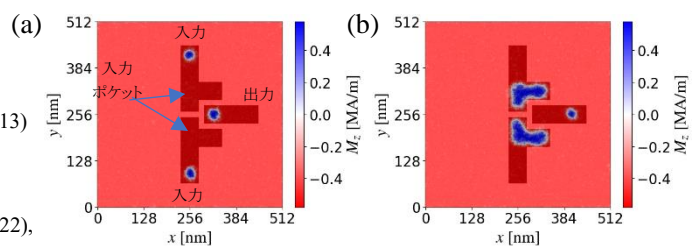


Fig. 1 simulation results at (a) 0 ns (b) 106 ns.

Dark areas indicate circuit drawn by the anisotropy energy

スキルミオンによる情報入力素子の作製

石川諒、後藤穰*、野村光*、鈴木義茂*

(アルバック協働研、*阪大基礎工、*阪大 CSRN、*阪大 OTRI)

Fabrication of information input device by skyrmion

R. Ishikawa, *M. Goto, *H. Nomura, *Y. Suzuki

(ULVAC Inc., *Osaka Univ., *CSRN-Osaka, *OTRI-Osaka)

研究背景

スキルミオンはトポロジカルに保護された磁極粒子であり、固体中に安定に存在する^{1,2)}。スキルミオンは次世代の情報担体としての応用が期待されており、スキルミオンを利用したレーストラックメモリ³⁾やロジック⁴⁾が提案されている。これらの応用とは別に、スキルミオンが固体中でブラウン運動する性質を利用した確率的計算や省エネルギー計算といった応用も提案されている。我々のグループでは磁性連続膜上でスキルミオンを任意の位置に閉じ込める回路⁵⁾やブラウン運動するスキルミオン間の反発的な相互作用を利用したセルラーオートマトン型素子⁶⁾などをこれまでに開発してきた。ブラウン運動するスキルミオンを利用した計算機において、情報の入力部分にはスキルミオンの運動を外部から制御する方法が必要である。本研究では、スキルミオンを外部制御し、セルラーオートマトン型素子に情報を入力する手法を実験的に検討した。

実験方法

本研究では、マグネトロンスパッタリング法により Ta/Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Ta/MgO/SiO₂ 接合を作製した。その上に SiO₂ と Ta の 2 層構造を部分的に成膜することでスキルミオン回路を形成した。さらに、傾斜した磁気的なポテンシャルを誘起するために、追加で SiO₂ を 50nm 成膜し、その上に電極を形成した。Fig.1 (a) に示すように電極は 100nm の厚い Ta 層と 2nm の薄い Ta 層から成る。この上部電極に電流を流すとき、二つの電極間には電位差が生じている。この電位差により、面直方向には傾斜した磁気的なポテンシャルが形成される⁷⁾。この傾斜したポテンシャルは電圧の極性により任意の方向に傾けることができ、スキルミオンの位置を自由に操るために利用可能である。Fig.1(b) は作製した素子のスキルミオン回路の部分のみを示したものである。スキルミオンのペアにより情報を表現するセルラーオートマトン型素子の多数決回路の 1 つの入力を外部から制御できるようにデザインされている。Fig. 1(a) に示しているように、電極の下に配置されたスキルミオン回路は長方形の中央をくびれさせた形状をしている。これはブラウン運動では超えられない障壁をスキルミオン回路に実装するためであり、外部から電圧をかけたときのみブラウン運動+電圧によるエネルギーでスキルミオンが障壁を超え、状態 (回路の右側にいるか左側にいるか) が変化することを狙っている。この方法により、より省電力な入力素子の実現が期待できる。

実験結果

Fig. 1 (c) は作製した素子を MOKE 顕微鏡により観察した像である。任意の場所にスキルミオンを閉じ込めることが可能であり、デザイン通りに電極を配置することに成功した。しかし、スキルミオンの個数がセルラーオートマトン型素子に必要な各セルに 2 つずつとなっていない。試料作製条件の最適化および電圧による外部制御等を含めて講演当日は報告する。

本研究は、JSPS 科研費 20H05666、23K13660 及び JST、CREST、JPMJCR20C1 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) T. H. R. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962)
- 2) U. K. Röbler, *et al.*, Nature **442**, 797 (2006)
- 3) A. Fert, *et al.*, Nat. Nanotechnol. **8**(3), 152 (2013).
- 4) X. Zhang, *et al.*, Sci. Rep. **5**, 9400 (2015).
- 5) Y. Jibiki, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 082402 (2020)
- 6) R. Ishikawa, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 072402 (2021)
- 7) Kakizakai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **56** 050305 (2017)

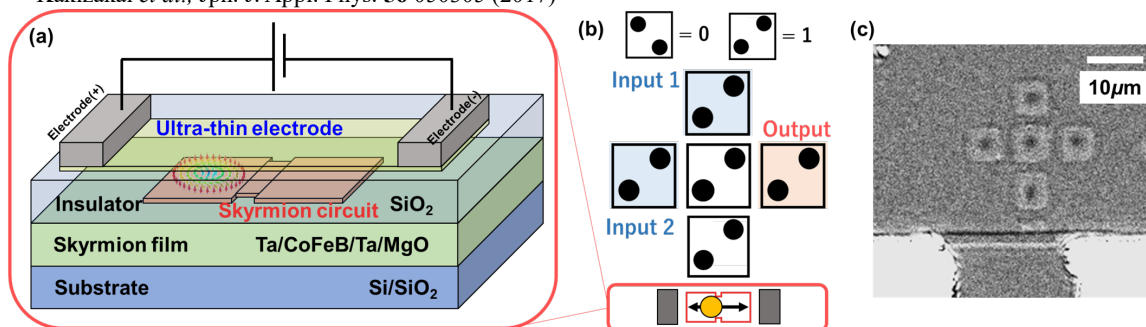


Fig. 1(a) Schematic of the input device configuration (b) Skyrmion cellular automaton with controllable input proposed in this research (c) MOKE microscope image of the device.

LiNbO₃(0001)基板上での Cr₂O₃(0001)エピタキシャル薄膜の作製

中村圭伸¹, 豊木研太郎^{1,2,3}, 中谷亮一^{1,2,3}, 白土 優^{1,2,3}
(阪大工¹, 阪大先導的学際研究機構(OTRI)², 阪大 CSRN³)

Fabrication of epitaxial Cr₂O₃(0001) thin film on LiNbO₃(0001)

Yoshinobu Nakamura¹, Kentaro Toyoki^{1,2,3}, Ryoichi Nakatani^{1,2,3}, and Yu Shiratsuchi^{1,2,3}
(Dept. Mater. Sci. & Eng., Osaka Univ.¹, OTRI, Osaka Univ.², CSRN, Osaka Univ.³)

はじめに 反強磁性 Cr₂O₃ 薄膜は電気磁気効果を利用することで、ネールベクトルの電界反転が可能であり¹⁾、また、電気磁気効果と界面電場に起因する表面磁化によりネールベクトルを電氣的に検出することが可能な材料である。一方、ネール温度はバルクにおいて 307 K であり、薄膜化によって低下する²⁾ことから、ネール温度の上昇が課題とされている。Cr₂O₃ 薄膜においては、下地層とのエピタキシャル歪み (*c/a*) によって、ネール温度が変化することが示されているが^{2,3)}、*c/a* とネール温度の相関については統一見解が得られていない。我々は、これらの課題に対して、圧電基板上に Cr₂O₃ 薄膜をエピタキシャル成長させることで、ネール温度を外場によって変調することを試みている。本研究では、圧電材料である LiNbO₃(0001)基板上に Cr₂O₃(0001)エピタキシャル薄膜を作製した結果について報告する。

実験方法 試料作製には DC マグネトロンスパッタリング法を用いた。試料構成は、Pt(2 nm)/Cr₂O₃(8 nm)/LiNbO₃(0001)-subs.とした。基板の熱処理条件は大気中 1000 °Cとし、Cr₂O₃の製膜温度は 300~500 °Cとした。構造評価には、高速電子回折法(RHEED)、および X 線回折法(XRD)を用いた。

実験結果 Fig. 1 および Fig. 2 に、400 °Cで製膜した Cr₂O₃ 薄膜の RHEED 像 (電子線入射方向 // [1120]) と XRD プロファイル(*q* // *c*-axis)を示す。RHEED 像には、Cr₂O₃のコランダム構造を示す 3 倍周期の回折像が観察された。また、XRD プロファイルには、Pt-cap 層、Cr₂O₃層、および両層界面の干渉効果に起因する Laue フリンジが観察され、良好な結晶性かつ平坦な界面を持つ薄膜が作製されたものと考えられる。LiNbO₃は、真空中・高温条件では、Li 欠損により LiNb₃O₈が生成し、回折ピークや表面構造の乱れが生じると報告されているが⁴⁾、本研究での薄膜作製条件ではこうした劣化は観察されず、いずれの製膜温度においても Cr₂O₃薄膜のエピタキシャル成長が確認された。500°Cまでの製膜温度条件では基板への影響は軽微であることが示唆される。講演では、試料のネール温度や他の基板上への製膜試料の測定結果を加えての報告を予定している。

参考文献

1) X. Wang, Y. Shiratsuchi *et al.*, AIP Advances 12, 035216 (2021). 2) X. Wang, Y. Shiratsuchi *et al.*, Appl.Phys.Lett. 121, 182402(2022). 3) P. Makushko *et al.*, Nature Comm. 13, 6745 (2022). 4) V. Polewczyk *et al.*, J. Magn. Magn. Mater, 515, 167257(2020).

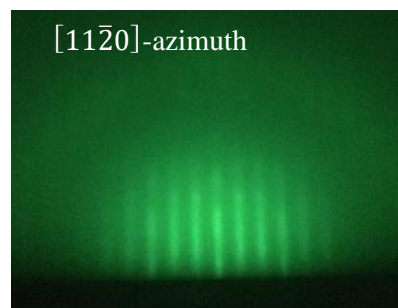


Fig.1 LiNbO₃ 基板上に製膜した Cr₂O₃ 薄膜の RHEED 像

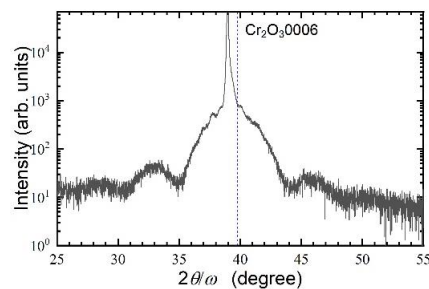


Fig.2 Cr₂O₃ 製膜温度 400°Cの試料の XRD プロファイル(*q* // *c*-axis)

層間反強磁性 Mn(001)超薄膜を用いた原子層磁石の開発

関温杜¹, 柏木知弥¹, 山田豊和^{1,2}
(1.千葉大院工 2.千葉大キラル研)

Growth of layered magnet prepared on ultrathin Mn(001) films
H. Seki¹, T. Kashiwagi¹ and T. K. Yamada^{1,2}
(1&2. Chiba Univ)

はじめに

原子層磁石は単原子層の厚さの剥離できる二次元磁石である。Fe, Cr, Mn のような 3d 遷移金属単原子膜の上下をカルコゲン元素やハロゲン元素でコーティングした構造である。しかし、非常に薄いため、原子磁気モーメントが熱揺らぎにより不安定化する。Fe₃GeTe₂, CrBr₃ などの原子層強磁性磁石のキュリー温度は 100 K 以下である。本研究ではキュリー温度が室温よりはるかに高い Mn/Fe(001)系を用いることにより、室温でも機能する原子層磁石の開発を目指す。

本研究では、Mn 単層膜を S でコーティングし、Mn 原子層磁石を開発する。超高真空環境下のその場にて、スピン偏極走査トンネル顕微鏡 (spin-polarized STM)を用いて磁気構造を探る。カルコゲン元素として S, Se, Te があるが、Se と Te は強い毒性を有するため本研究では硫黄 S を用いた。

Fe(001)ウイスカ上の bct-Mn(001)超薄膜を用いた。Mn スピンは単層膜内で強磁性結合し、層間で反強磁性 180°結合している¹⁾。Fe と Mn の界面では合金化が起きやすく、Mn 膜の磁気構造に影響を与える。Mn 膜中の Fe 濃度は膜厚が大きいほど小さくなる¹⁾。本研究では Fe 濃度が小さい 3 ML 以上の Mn 超薄膜を使用した。

実験手法

本研究は全て室温・超高真空 STM装置(5×10^{-8} Pa) で実施した。Fe(001)ウイスカの清浄化と平坦化は、準備槽での Ar⁺スパッタと基板温度 560 °C加熱を約 200 時間行い実現した。Fe(001)ウイスカの清浄化、平坦化の後に、Mn (純度 99.999%) を蒸着して多層膜を製膜した(1 Å/min)。試料の局所電子状態密度 (LDOS)は走査トンネル電子分光法 (STS) を用いた。Mn(001)膜表面への S コーティングは FeS₂ (純度 99.9%) を用いて行った。FeS₂ 粉をアルミナ坩堝に入れ超高真空内で加熱した(坩堝温度 553 K)。S 昇華を質量分析器で確認した(S peak 位置 mass 32)。スピン偏極 STM を実施するために磁性探針を超高真空内で作製した。非磁性 W 探針先端の曲率半径を大きくし酸化膜を除去するため、W 探針を 40 W(= 0.5 kV × 80 mA)でフラッシングした。この清浄 W 探針先端に Fe を 5 nm 蒸着した (0.83Å/min×60 min)。

結果

清浄な Fe(001)原子テラス(40 - 80 nm)上に、5 monolayers (MLs) Mn 蒸着した(8Å)。Mn 超薄膜表面では層成長した。Mn(001)表面はスピン偏極 LDOS ピークをフェルミ準位上+0.7 eV 近傍に持つことを確認した。一方、SP-STS 像は、層間磁気コントラストを+0.2 V に示した。この Mn 超薄膜上に S をコーティングして Mn 単原子層を製膜することで原子層磁石の開発を目指す。また、現在並行して行っている角度分解スピン偏極 STM の開発についても報告する。

参考文献

- 1) T. K. Yamada, et al., Microscopy Research and Technique, 66:93-104 (2005)
- 2) T. K. Yamada, et al., Surface Science, 516 (2002) 179-190

コンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子の磁気 1 次反転曲線特性

LI HUI, 松尾咲琴, 小林悟, 川村遼
(岩手大学理工)

Magnetic first-order reversal curves for concave Fe₃O₄ nanoparticles

S. Matsuo, H. Li, S. Kobayashi, R Kawamura
(Iwate Univ.)

はじめに

近年、磁気ハイパーサーミアにおいて高い発熱効率を実現するために磁性ナノ粒子の形状効果を考慮した研究が注目されている¹⁾。特に、 $\langle 111 \rangle$ 方向に異方的に粒子成長したコンケーブ型ナノ粒子では、球状及びキューブ型粒子と異なる磁化反転過程が観測²⁾されており、より高い発熱特性が期待される。本研究では、粒子サイズを 25~51nm まで系統的に変えたコンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子について、磁気一次反転曲線(FORC)特性の温度変化及び粒子サイズ依存性を通し、磁化過程の異方的形状効果を詳しく調査したので報告する。

実験方法

Fe 前駆体であるオレイン酸鉄、オレイン酸ナトリウム、オレイン酸、トリオクチルアミンを用いて約 340°C で加熱・保持し粒子サイズ(d)の異なるコンケーブ型 Fe₃O₄ ナノ粒子を合成した。合成した $d=25$ から 51nm までのコンケーブ型ナノ粒子を 4 試料、 $d=23$ nm のキューブ型粒子を 1 試料について、TEM による形態評価、X 線回折による結晶構造解析、SQUID 磁束計による FORC 測定 ($T=10\sim 300$ K、最大磁場 $H=5$ kOe、反転磁場及び磁場ステップ $\Delta H_r = \Delta H = 20\sim 250$ Oe) を行った。

実験結果

Fig.1(a), 1(b)にそれぞれ、 $d=51\pm 7$ nm(cc-51)と $d=25\pm 6$ nm(cc-25)のコンケーブ型ナノ粒子の TEM 像と $T=10$ K における FORC 図を示す。両試料において、2 つの FORC 分布ピークが低温で現れること、特に cc-25 では FORC 分布ピークの一つが原点付近に位置していることを見出した。また、cc-25 とほぼ同サイズの $d=23\pm 3$ nm(cb-23)のキューブ型ナノ粒子では、 $T=10$ K において FORC 分布ピークは 1 つのみ観測された。このことから、2 つの FORC 分布ピークの発現はコンケーブ型ナノ粒子特有のものだと考えられる。OOMMF を用いたマイクロマグネティック計算から、形状による FORC 図の違いは、磁気エネルギーが安定な方向がコンケーブ型は $\langle 111 \rangle$ 、キューブ型は $\langle 100 \rangle$ 方向であることに起因すると解釈できる。従って、コンケーブ型粒子では、 $\langle 111 \rangle$ 方向に段階的に磁化配向することで、FORC 分布ピークが複数観測されたと考える。また、 $T=10$ K から温度を上昇すると、2 つの FORC 分布ピークは原点側にシフトし、やがて単一ピークとなるが、粒子サイズが小さいコンケーブ型ナノ粒子では、 $T=50$ K 程度の高い温度まで 2 ピークが観測された。この結果は、小さな粒子の方がより異方的形状効果の寄与が大きいことを示す。

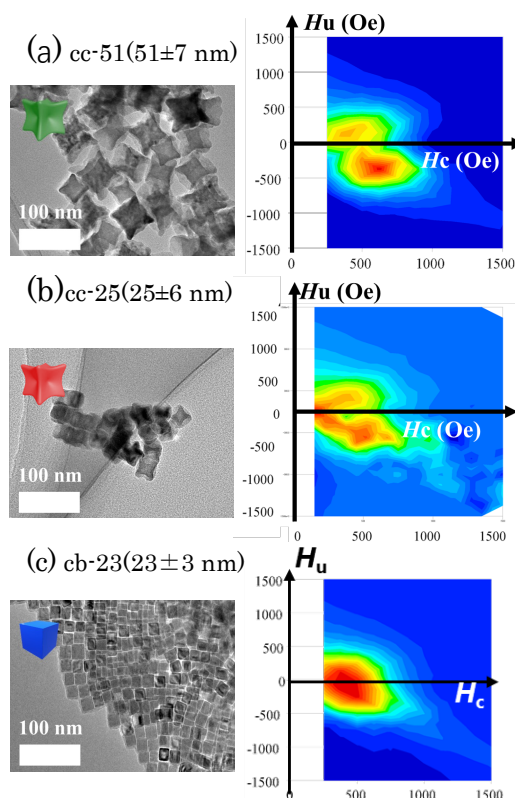


Fig.1 TEM image and FORC diagram at $T=10$ K for (a) cc-51, (b) cc-25, (c) cb-23.

参考文献

- 1) Z. Nemati et al., *J. Phys. Chem. C*, 120 (15), 8370–8379 (2016)
- 2) S.Matsuo, S.Kobayashi, 第 46 回磁気学会概要集.07aPS-14 (2022)

hcp 及び fcc-CoO ナノ粒子の磁気特性と表面効果

立花聡音、堀田侑里、高橋和也、野田千晶、小林悟
(岩手大学)

Magnetic properties and surface effects of hcp and fcc-CoO nanoparticles

T. Tachibana, Y. Hotta, K. Takahashi, C. Noda, S. Kobayashi

(Iwate Univ.)

はじめに

磁気冷凍技術は、磁場を利用して磁性体が発熱・吸熱する（磁気熱量効果、以降 MCE と呼ぶ）ことで、従来の冷凍技術と比較して理論的にエネルギー効率が高いとされている。さらに、冷媒ガスやコンプレッサーが不要であるため、環境に優しいという特性から注目を集めている。特に、磁性体がナノ粒子の形状をしている場合、デバイスへの組み込みや複合材料への加工といった多様な応用が可能である。表面磁気異方性が大きい Co を含むナノ粒子では、表面スピン凍結による大きな MCE が報告されている。本研究では、六角錐状 hcp 及びナノフラワー状 fcc-CoO 粒子に焦点を当て、結晶相及び形態が磁気特性とその表面効果に与える効果について調査したので報告する。

実験方法

前駆体としてコバルト(III)アセチルアセトナートとオレイルアミンを用いた。Ar 雰囲気中で 135°C で 5 時間加熱後、250°C まで急昇温・3 時間保持し自然冷却させた²⁾。試薬のモル比、反応時間を調整することで、粒子サイズを制御した。SQUID 磁化測定装置を用いて M-T 曲線、M-H 曲線を測定した。XRD を用いて、結晶相の同定と粒子ドメインサイズの評価を行った。

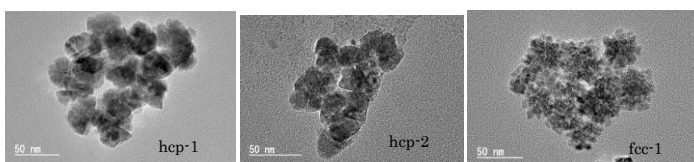


Fig.1: TEM image of hcp-CoO, fcc-CoO sample.

結果及び考察

Fig1 に合成した 3 試料(hcp-1, hcp-2, fcc-1)の TEM 像を示す。hcp-1 は六角錐状、hcp-2 はより細かな六角錐形状を有している。XRD より六角錐状試料は hcp-CoO、フラワー型試料は fcc-CoO であることを確認した。Fig2 に hcp-1 及び fcc-1 のゼロ磁場冷却(ZFC)、磁場中冷却(FC)条件下における M-T 曲線を示す。ZFC 及び FC 条件の M-T 曲線が広温度範囲で一致しないこと、 $T=10\text{K}$ 以下で磁化が急激に増大することが分かった。また、 $T=2\text{K}$ において磁気ヒステリシスを両試料で確認した(Fig.2 挿入図)。この結果は、反強磁性 CoO コア表面における非補償スピンによる強磁性の発現を示唆している。更に、磁化曲線の詳細な温度依存性から磁気エントロピー変化($-\Delta S$)を見積もったところ、fcc-1 では $-\Delta S$ は $T=6\text{K}$ で極大値 0.05J/K/kg を示すのに対して、hcp-1, hcp-2 では両試料とも $T=10\text{K}$ 近傍でピークを示し、その最大値はそれぞれ約 0.13J/K/kg , 2.2J/K/kg であった。この結果は、粒子表面のスピン凍結に伴う磁気エントロピー変化が試料形態に強く依存することを示唆している。

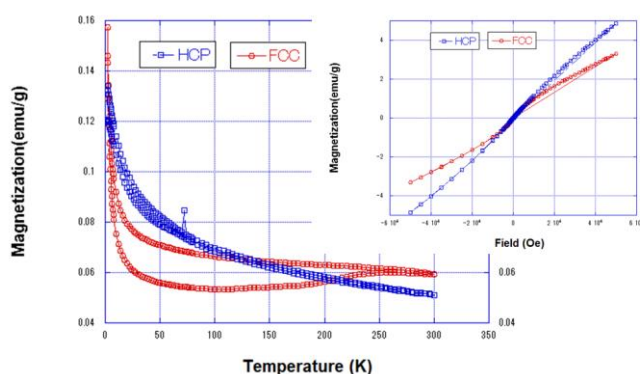


Fig. 2: M-T curve at $H=1000\text{ Oe}$ for hcp-1 and fcc-1 samples. The inset shows M-H curves.

Reference

- 1) P. Podder et al., J. Phys. Chem. C, vol.111, 14060 (2007).
- 2) K. M. Nam et al., Angew. Chem. Int. Ed., vol.47, 9504 (2008).

磁気渦構造を持つ中空構造 Fe_3O_4 粒子の磁気加熱特性

秋山 遥¹, Ton That Loi¹, 桑波田 晃弘¹, 藪上 信¹, 小林 悟² (¹東北大学, ²岩手大学)

Magnetic heating properties of hollow Fe_3O_4 particles with magnetic vortex structure

Haruka Akiyama¹, Ton That Loi¹, Akihiro Kuwahata¹, Shin Yabukami¹, Satoru Kobayashi²

(¹Tohoku University, ²Iwate University)

1. はじめに

磁気ハイパーサーミアに用いる磁性粒子である Fe_3O_4 粒子は、形状や粒径等の形態を変化させることで磁性体の加熱効率が向上すると報告されている^[1]。特に、中空構造を持つ球状の粒子は、磁気渦構造の安定^[2]により粒子の凝集による加熱効率の低下が抑制されるため、高い加熱効率が期待できる。本研究では、粒子の外径を系統的に変化させた中空構造を持つ Fe_3O_4 粒子の加熱効率を測定し、加熱効率の高い粒子の形態について報告する。

2. 実験方法

本実験では、塩化鉄六水和物、酢酸アンモニウム及びエチレングリコールを用いてソルボサーマル法にて試料を作製した^[2]。XRD の解析結果から得られた試料が Fe_3O_4 であると同日し、SEM と TEM を用いた測定により中空構造を持つことを確認した後、粒子の外径と内径、粒度などの形態を計測した。また、SQUID VSM を用いて試料の磁気特性を測定した。

次に、磁界印加実験^[3]により、各試料の加熱効率を測定した。本実験系は、加熱器具 Easy Heat、加熱用コイル、光ファイバ温度計で構成される。まず、親水化処理を施した Fe_3O_4 粒子を水に分散させた 1 mg/mL の濃度の溶液を用意した。その溶液を 2 mL のマイクロチューブにそれぞれ 1 mL ずつ入れ、加熱用コイルの中心に設置した。加熱用コイルは内径 30 mm、外径 42 mm、ピッチ 32 mm の 4 回巻きである。それぞれの試料が 45°C に達するまで 300 A で 322.1 Oe、270 kHz の磁界を印加し、光ファイバ温度計で温度変化を計測することで、内径がほぼ等しく外径の異なる 3 種類の磁性粒子 (外径: 400 nm, 530 nm, 720 nm) を以後 H400, H530, H720 とする) の加熱効率を比較した。

3. 実験結果

Fig.1 に磁界を印加したときの磁性粒子の温度変化応答を示す。磁界を 300 秒間印加した時の磁性粒子の温度は、H400, H530, H720 についてそれぞれ 13.5 °C, 9.3 °C, 7.0 °C 上昇した。また、温度変化は線形的であり、外径が小さい粒子ほど傾きは大きくなった。

また、SQUID VSM で測定した磁気特性を用いて求めた直流の磁気ヒステリシス損失は 300 Oe において、H400, H520, H720 についてそれぞれ 1551.70 emu Oe/g, 924.72 emu Oe/g, 640.79 emu Oe/g だった。

SAR は磁界印加後 60 秒後までの温度変化の値を用いて計算すると、それぞれ 274.5 W/g, 206.7 W/g, 159.8 W/g となった。Fig. 2 は SAR とヒステリシス損を粒子の外形サイズに対して示したものである。磁

気ヒステリシス損失と SAR は粒子サイズの増大により減少し、明瞭な相関関係が見られた。磁性粒子の粒径が大きくなるにつれて加熱効率は低下した。

4. まとめ

中空構造を持つ外径の異なる 3 種類の Fe_3O_4 粒子に磁界を印加し、磁気加熱の実験を行うことで、空洞の径が等しい場合、粒径が小さい粒子ほど加熱効率は高くなった。今後は、医療応用を見据え、さらに粒径の小さな粒子の加熱効率を測定し、磁気ハイパーサーミアに適した粒子の形態を検討する。

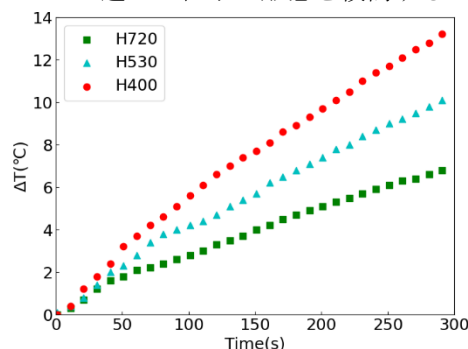


Fig.1 Temperature rise of different size hollow nanoparticles under $H=322.1$ Oe, $f=270$ kHz.

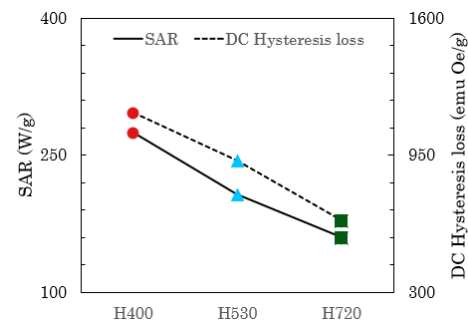


Fig.2 SAR value and magnetic hysteresis loss depending on hollow nanoparticle size.

参考文献

- [1] E. A. Périgo, et al., Applied Physics Reviews 2, 041302 (2015)
- [2] M. Chiba, et al., J. Mag. Mag. Mater. vol. 512 (2020) 167012
- [3] A. Shikano, et al., T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 6, 100-104 (2022)

謝辞

本研究は、JST ASTEP (JPMJTM22AB)、テルモ財団 (受付番号 22-II 1011)、科研費基盤 C の成果である。

面直方向に濃度勾配を持つ GdFe 薄膜の特性評価

水野淳平、栗野博之、田辺賢士 (豊田工業大学)

Characterization of GdFe thin films with a concentration gradient in the perpendicular direction

J. Mizuno, H. Awano and K. Tanabe (Toyota Technological Institute)

はじめに

近年のスピン트로ニクス分野において、磁性超薄膜に対する非対称な多層膜構造が注目されている。これは非対称交換相互作用であるジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) が、人工的に制御できるためである。ごく最近新しい研究の流れとして、非対称な多層膜構造ではなく、面直方向に濃度勾配を持つ薄膜が注目されている。このような薄膜の場合、磁性超薄膜を使うことなしに、DMI[1-2]やスピンホール角[3]を制御できる可能性がある。しかしこれらの研究報告は極めて少なく、濃度勾配の制御方法の確立や濃度勾配と磁気特性の関係など、多くの課題が残っている。そこで本研究では、様々な濃度勾配の作製を見越して、コスパッタ法のカソードパワーを成膜中にリアルタイムで制御する手法を確立し、本手法で作製された GdFe 合金薄膜の特性評価を行った。

実験方法と結果

Fig. 1 に示すように、SiO₂を持つ熱酸化 Si 基板上に Pt (5 nm)/ g-GdFe(20 nm)/SiN (5 nm)の構造を持つ試料を、マグネトロンスパッタ装置で作製した。g-GdFe は面直方向に濃度勾配 (gradient) を持つ GdFe を表す。①22.1 から 25.4at% (②25.4 から 22.1at%) まで濃度勾配をつけた。g-GdFe 膜は、カソードパワーをリモート制御したコスパッタ法を用いた (Fig. 2)。作製した薄膜に対して、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (EDX) を用いて薄膜全体の Gd の濃度を、Kerr 効果測定装置を用いて薄膜の保磁力を測定した。測定された組成、保磁力の関係を Fig. 3 に示す。EDX によって計測された濃度はサンプル①②で大きな違いはなく、①23.4at% と②23.9at%で、濃度勾配の平均値程度であり、うまく成膜できていることが分かる。また保磁力についても、どちらも 80 Oe 程度の大きさになった。この結果を、一様な組成膜 (22.1, 23.8, 24.9, 25.4at%) と比較すると、勾配膜は一様膜と大きな違いがないことが明らかになった。このことは、Pt 界面を変調しながら、同程度の保磁力を持つ材料でデバイス作製が可能になることを意味している。

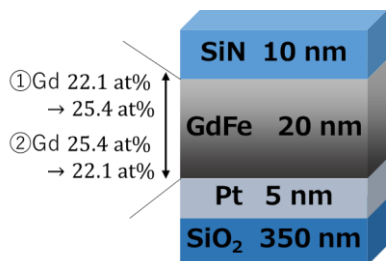


Fig. 1 試料構造

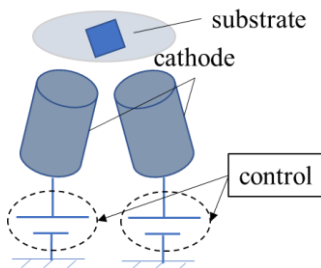


Fig. 2 リモート制御のイメージ

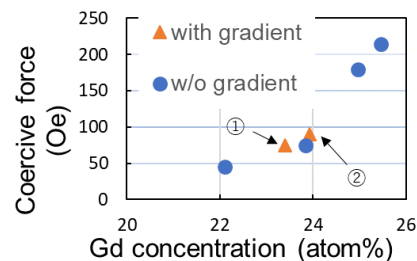


Fig. 3 Gdの組成と保磁力の関係

参考文献

- [1] D. H. Kim et al., Nature Materials **18**, 685 (2019).
- [2] Z. Zheng et al., Nature Communications **12**, 4555 (2021).
- [3] D. Céspedes-Berrocal et al., Advanced Materials **33**, 2007 (2021).

強磁性ハイエントロピー合金薄膜の作製と磁気伝導特性の評価

鈴木 和也^{*,**}, 高梨 弘毅^{*,**}

(*原子力機構 先端基礎研究センター, **東北大 材料科学高等研究所)

Fabrication of ferromagnetic high-entropy alloys thin films and evaluation of magneto-transport properties

Kazuya Suzuki^{*,**}, Koki Takanashi^{*,**}

(¹JAEA ASRC, ²Tohoku University AIMR)

はじめに

ハイエントロピー合金 (HEA) は、優れた力学特性、耐熱性、耐食性、耐照射性などから大きな注目を集めているが、そのほとんどは構造材料としての応用を指向した研究である。HEA は空間対称性が局所的に破れた系の集合体であり、スピン軌道相互作用が顕在化し、従来合金には見られない特異な磁気伝導特性が生じる可能性を有している。特にスピントロニクス分野が得意とするナノスケールで高度に構造制御されたナノ積層薄膜の作製方法を適用することにより HEA 材料の研究に新たな展開が期待される。本研究では、室温よりも高いキュリー温度を示す FeNiCoCuPd 合金¹⁾に着目し、スパッタリング法による薄膜作製とその薄膜の結晶構造、磁気特性、磁気伝導特性について報告する。

実験方法

薄膜の作製は、8 元カソードを備える超高真空スパッタリング装置 (到達圧力 $\sim 10^{-7}$ Pa) を用いた。熱酸化膜付シリコン基板上に Fe₅₀Co₅₀、Ni、Cu、Pd ターゲットを膜組成が均等になるように出力制御しながら同時にスパッタすることにより Fe₃₃Ni₃₄Co₃₃、Fe₂₅Ni₂₅Co₂₅Cu₂₅、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ 合金薄膜 (30 nm) を作製した。このとき、成膜温度は室温である。試料は、X 線回折による構造評価、VSM による磁気特性評価を行った。

実験結果

Figure 1 に Fe₃₃Ni₃₄Co₃₃、Fe₂₅Ni₂₅Co₂₅Cu₂₅、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ (30 nm) 試料の X 線回折法による θ - 2θ スキャンのプロファイルを示す。基板由来のピークを除くとすべての試料において fcc 相 (111) および fcc 相 (002) のピークが得られていることから (111) 方位に優先配向した fcc 単相膜が得られていると考えられる。また、FeNiCo に Cu と Pd を添加しても左右対称な (111) ピークと明瞭なピークシフトを示していることから、FeNiCo 合金に Cu および Pd を添加しても顕著な相分離は生じておらず、Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu₂₀Pd₂₀ 薄膜は均一な HEA 状態となっていると考えられる。そして、FeNiCo のモル比を固定し、Cu と Pd のモル比率を変えた Fe₂₀Ni₂₀Co₂₀Cu_{40-x}Pd_x (0<x<40) 薄膜を作製したところ、等モル比資料と同様に fcc 相単相が得られた。講演では詳細に加えて、これらの試料における異方性磁気抵抗効果や異常ホール効果などの基本的なスピン依存伝導特性についても報告する。

参考文献

1) Primoz Kozelj et al. Adv. Eng. Mater. 2019, 21, 1801055

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21K18180 の助成を受けたものです。

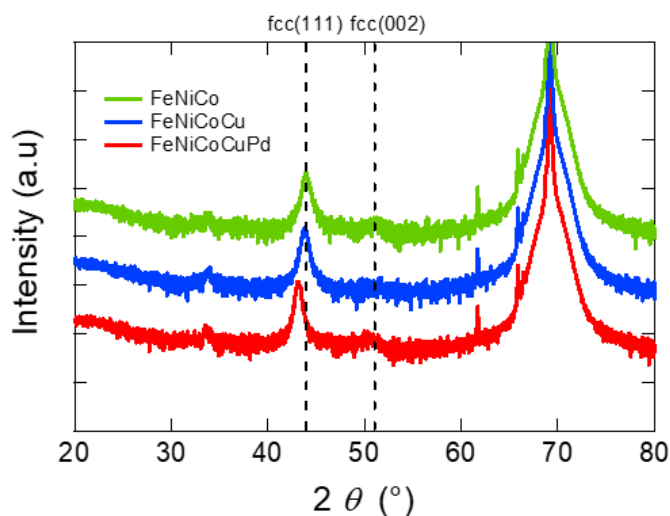


Figure 1 The XRD profiles of FeNiCo, FeNiCoCu, FeNiCoCuPd(30 nm) thin films.

垂直型強磁性トンネル接合のためのエピタキシャル MgAl₂O₄/L₁₀-FePt(001)構造の作製

金澤 朋希^{1,2}、T. Scheike¹、埋橋 淳¹、大久保 忠勝¹、介川 裕章¹、三谷 誠司^{1,2}、柳原 英人²
(¹物質・材料研究機構、²筑波大学)

Fabrication of epitaxial MgAl₂O₄/L₁₀-FePt(001) stacks for perpendicular magnetic tunnel junctions
T. Kanazawa^{1,2}, T. Scheike¹, J. Uzuhashi¹, T. Ohkubo¹, H. Sukegawa¹, S. Mitani¹, H. Yanagihara²
(National Institute for Materials Science¹, Univ. of Tsukuba²)

背景

強磁性トンネル接合 (MTJ) はハードディスクの磁気ヘッドや、不揮発性磁気メモリ (MRAM) の記憶素子として利用されている。今後、MRAM の高密度化による半導体メモリの一部置き換えを実現するためには、nm スケールへ MTJ 微細化が必要である。現在 MRAM 用の垂直磁化 MTJ (p-MTJ) では、CoFeB/MgO 界面に誘起される垂直磁気異方性 (PMA) が利用されているが、MTJ 微細化により十分な熱安定性を確保することが困難になっている。この問題の解決のため、極めて高い磁気異方性 (~70 Merg/cm³) を示す L₁₀ 型 FePt(001) が p-MTJ の磁性層として有望である[1,2]。しかし、FePt と MgO バリアとの 10% 近い大きな格子不整合があることから高品位な MTJ の作製が困難である。本研究では、高品位 FePt 系 MTJ の実現のため、MgO よりも格子整合性がよいスピネル (MgAl₂O₄ 系材料) をバリアとして用い、その上に Fe と Pt の交互原子積層により垂直磁化を持つ FePt(001)エピタキシャル層を 400 度以下のプロセスで実現した。

実験方法

超高真空マグネトロンスパッタリングを用い MgO(001)基板//Cr 下地(60)/Mg (0.2)/Mg₆₇Al₃₃ (0.7)/酸化/Fe (1)/Pt (0.65)/[Fe (0.35)/Pt(0.65)]_{x4}/Ru(2) (単位: nm) 積層を作製した。エピタキシャル Mg-Al-O (MAO) バリア作製には Mg/MgAl 積層の自然酸化を用いた[3]。FePt 層作製には Fe と Pt は交互積層と加熱・冷却プロセスを組み合わせ、MTJ 積層に適した平坦な垂直磁化膜の実現を目指した。磁化測定に振動試料型磁力計 (VSM) 及び超電導量子干渉素子 (SQUID)、結晶構造評価に X 線回折 (XRD) 及び環状暗視野走査透過型顕微鏡 (ADF-STEM) を用いた。平坦性評価には原子力顕微鏡 (AFM) を用いた。

実験結果

Fe/Pt 多層膜成膜時の加熱・冷却プロセスの最適化により比較的平坦な FePt(001)層の成長を確認した。Fig. 1 に Cr/MAO/FePt 近傍の断面 ADF-STEM 像を示した。Cr と MAO はほぼ完全に格子整合しており、MAO の上下界面は極めて平坦である。その上にエピタキシャル成長した FePt(001)層が確認できる。FePt は部分的に規則化し Fe と Pt が交互に原子配列した L₁₀ 構造が得られていることがわかる。作製に比較的低い温度 (400 度以下) を用いたことから L₁₀ 規則度は 0.2 程度と低いものの、高い角型比を持つ垂直磁化膜が得られた。保磁力は約 800 Oe、異方性エネルギーは 9~10 Merg/cm³ と見積もられ、p-MTJ のフリー層に適した特性を有していることがわかった。FePt と格子整合性が比較的良好な MAO バリアを導入することで、L₁₀ 合金を用いた高性能 p-MTJ への展開が期待される。本研究の一部分は JSPS 科研費 21H01750 及び 22H04966 により行われた。

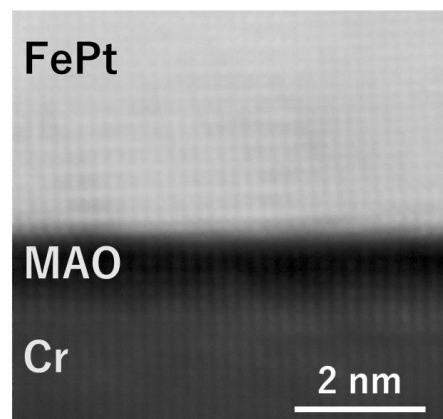


Fig1. Cross-sectional ADF-STEM images of epitaxial Cr/MAO/FePt(001).

参考文献 [1] M. Yoshikawa *et al.*, IEEE Trans. Magn. **44**, 2573 (2008). [2] Y. Taniguchi *et al.*, IEEE Trans. Magn. **44**, 2585 (2008). [3] H. Sukegawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 142409 (2013).

[Co/Ni] 多層膜/Pt/Fe ヘテロ構造における磁気ダンピング異常

泉統真*, 久田優一*, 小森祥央*, 井村敬一郎***, 谷山智康*

(* 名大理, ** 名大教養)

Anomalous ferromagnetic damping in [Co/Ni] multilayer/Pt/Fe heterostructures

T. Izumi*, Y. Hisada*, S. Komori*, K. Imura***, T. Taniyama*

(*Dept. Phys., Nagoya Univ., **ILAS, Nagoya Univ.)

1 はじめに

近年、強磁性体の磁化の歳差運動が空間を動的に伝播するスピン波の低消費電力スピントロニクスデバイス応用が脚光を浴びている。スピン波をスピントロニクスデバイスにおいて利用するためにはスピン波の長距離伝播が必要とされ、その実現には磁気ダンピングの小さい材料をいかに作製するかが重要な課題となる。磁化の歳差運動を記述する方程式として、Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式がよく知られており、磁気ダンピングは Gilbert ダンピング定数により特徴づけられる。強磁性共鳴 (FMR) は、共鳴線幅 ΔH と共鳴周波数 f_{res} の線形関係から、強磁性体の Gilbert ダンピング定数を推定する強力なツールとして広く利用されており、垂直磁気異方性 (PMA) を持つ [Co₉₀Fe₁₀/Ni] 多層膜において、面内磁場印加時に ΔH と f_{res} の非線形関係などの興味深い物性が見出されている¹⁾。今回我々は、[Co/Ni] 多層膜/Pt/Fe ヘテロ構造において、[Co/Ni] 多層膜の PMA の強さに依存した ΔH と f_{res} の異常な負の相関を見出したので報告する。

2 結果および考察

Pt(3)/[Co(*t*)/Ni(0.6)]₈/Pt(10)/Fe(30) 多層膜を分子線エピタキシー法により MgO(111) 上に成長した。ここで、括弧内の数字は nm 単位の膜厚を表す。Fig. 1 に Co 層膜厚 $t = 0.4$ 及び $t = 0.8$ に対する磁化の面直 (OP) 磁場依存性を示す。 $t \leq 0.4$ のヘテロ構造では、低磁場領域で [Co(*t*)/Ni(0.6)] 多層膜の PMA による明確な角型のヒステリシスが見られるのに対して、 $t > 0.4$ のヘテロ構造では、膜厚とともに PMA が減少する傾向が見られる。

これらの Co 層の厚さの異なるヘテロ構造に対して、coplanar waveguide とベクトルネットワークアナライザを用いて FMR 測定を行い、 ΔH を算出した。 $t = 0.4$ 及び $t = 0.8$ の Co 膜厚のヘテロ構造に対する ΔH と f_{res} との関係を図 2 に示す。PMA が弱い $t = 0.8$ の試料では、 ΔH は f_{res} の増加とともに線形に増加する。一方で、PMA が強いヘテロ構造 ($t = 0.4$) では、 f_{res} の増加とともに ΔH が線形に減少する。一般に、磁性体の FMR 線幅 ΔH は、 $\Delta H = 2\pi(2mc/ge)\alpha f_{res} + \Delta H_0$ の関係に従うことが知られている²⁾。ここで α は Gilbert ダンピング定数、 ΔH_0 は磁気的不均一性などに起因する線幅の広がりを表す。この関係に基づいて、 α を算出すると、 $t = 0.8$ のヘテロ構造において、 $\alpha = 3.8 \times 10^{-2}$ が得られる。一方で、強い PMA を持つヘテロ構造 ($t = 0.4$) では、 ΔH と f_{res} との関係が負の傾きを持つ異常な振る舞いを示し、結果として負の Gilbert ダンピング定数を持つことが示唆される。この負の Gilbert ダンピング定数の異常な挙動の物理起源については、現時点で十分に理解がなされていないが、Fe 層の磁化の歳差運動が、Fe モーメントと垂直磁化多層膜 [Co/Ni] との間に生じる磁気的相互作用を介してアンチダンピングされている可能性が示唆される。当日は負のダンピングパラメータの物理起源について、より詳細に議論する。

本研究の一部は日本学術振興会科研費 (21H04614)、JST CREST (JPMJCR18J1)、JST FOREST (JPMJFR212V) の助成を受けて行われています。

References

- 1) J. M. Shaw et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 062406 (2014).
- 2) T. Usami et al.: *AIP Adv.*, **11**, 045302 (2021).

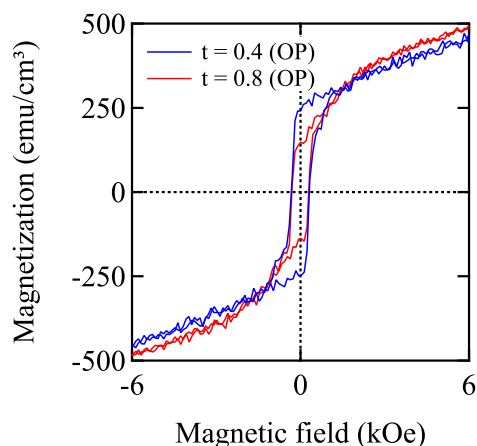


Fig. 1 MH curves for $t = 0.4$ with large PMA and $t = 0.8$ with small PMA.

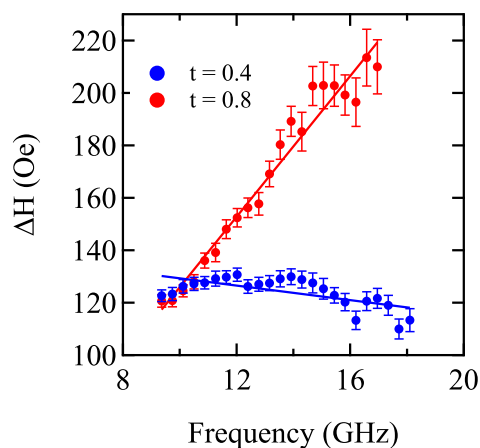


Fig. 2 ΔH vs. f_{res} for $t = 0.4$ and 0.8 .

磁性ナノワイヤを用いたリザーバにおけるノード状態取得法の検討

前田貴大¹, K. Hon¹, 久保田均², 後藤穰^{1,3,4}, 鈴木義茂^{1,3,4}, 野村光^{1,3,4,5}

(¹阪大基礎工, ²産総研, ³阪大 CSRN, ⁴阪大 OTRI, ⁵東北大 SRIS)

Node-state detection method for magnetic nanowire reservoir

T. Maeda¹, K. Hon¹, H. Kubota², M. Goto^{1,3,4}, Y. Suzuki^{1,3,4}, and H. Nomura^{1,3,4,5}

(¹Osaka Univ., ²AIST, ³CSRN Osaka, ⁴OTRI -Osaka, ⁵Tohoku Univ.)

近年、様々な系を用いた物理リザーバが提案されている。その中で我々は、ナノ磁性細線を用いたリザーバに注目している。本リザーバは磁化の向きをノード状態に用い、回転磁場によりノード状態を更新する。これまでに、マイクロマグネティック・シミュレーションを用いて STMC (Short Term Memory Capacity)、PCC (Parit Check Capacity) がそれぞれ 5 程度の値を得られることが予測されている¹。本リザーバを実験的に実装する際、ノード状態の読み取り手法が問題となる。先行研究ではノード状態は特定の領域の磁化を平均かした値を用いていた。しかしながら、カー効果顕微鏡等を用いた実際の計測では、磁化状態は、磁化の空間分布に対して重み付け平均をかけた結果として得られる。この様な値をノード状態に用いた際、リザーバの STMC、PCC が低下するか否かは不明である。そこで本研究では、マイクロマグネティック・シミュレーションにより得られた磁化状態に対してガウシアンフィルタをかけ、より計測結果に近いノード状態を用いた場合に STMC、PCC がどのように変化するかを検討した。

図 1(a)に磁性ナノワイヤを用いたリザーバの磁化状態の一例を示す。ここでは磁化の x 成分のみを可視化している。図 1(b)には、半値幅 400 nm のガウシアンフィルタを適用後の磁化状態の一例を示す。ガウシアンフィルタをかけることで、磁壁等の細部が確認できなくなっている。ガウシアンフィルタを適用した磁化の向きをノード状態に用い、学習・評価をした結果を図 2 に示す。これらの結果から、STMC、PCC はそれぞれ約 5 と 3 となった。従って、非線形演算能力が低下するものの、カー効果顕微鏡像を用いることで磁性ナノワイヤを用いたリザーバのノード状態を読みとることが可能であることが確認できた。本研究は JSPS KAKENHI 20H05655 の助成を受けて行われました。

参考文献

- 1) K. Hon, et al., Appl. Phys. Lett. 120, 022404 (2022).

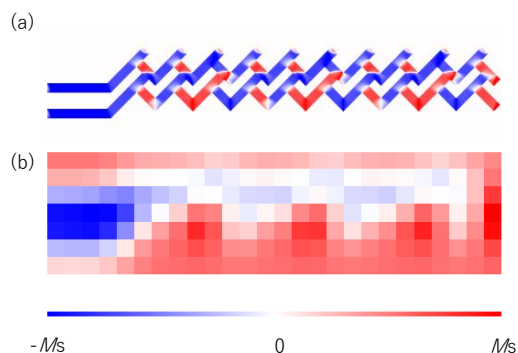


Fig. 1 (a) typical image of x component of magnetization of magnetic nano-wire reservoir and (b) blurred image with Gaussian filter.

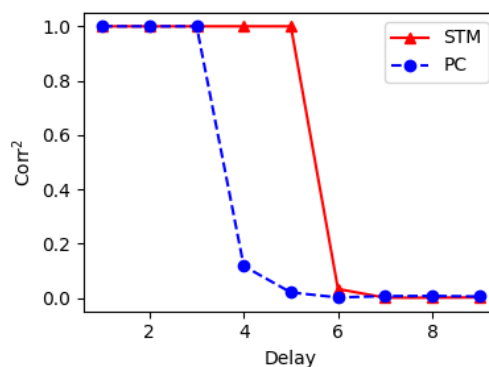


Fig. 2 Correlation between teacher data and predicted data with STM task (red) and PC task (blue) with different delay.

レーザー光を用いた 500 m/s 高速磁壁移動リアルタイム検出

鈴木紀行、和井内琴理、野村航平、Mojtaba Mohammadi、鷺見聡、田辺賢士、栗野博之
(豊田工業大学)

Real-time detection of 500 m/s high-speed domain wall motion using laser

N. Suzuki, K. Wainai, K. Nomura, M. Mohammadi, S. Sumi, K. Tanabe and H. Awano
(Toyota Technological Institute)

はじめに

レーストラックメモリは既存メモリに比べ記録速度の大幅向上およびビットコストの大幅低減が期待されている。この実現に向け、記録磁区の極小化や磁壁移動の高速化が目指されている[1]。しかし磁壁移動の報告は多数あるが、記録信号検出の報告はほとんどない。一般的に信号検出には TMR ヘッドが考えられているが、製作が大変で配線も問題となる。一方簡易な手法として配線不要のレーザー光が考えられるが、従来の光磁気記録の再生速度は最速 50 m/s であり 500 m/s で信号検出した報告がない。そこでレーストラックメモリの光による磁壁移動のリアルタイム検出に挑戦した。

実験方法

本実験では Figure 1 の通り偏光顕微鏡を用いて試料の磁化状態を確認するとともに、同じ対物レンズを通して波長 780 nm のレーザーを細線試料上に集光する。この反射を検光子およびアバランシェフォトダイオード (APD) を通して信号検出することで、電流誘起による磁壁移動を観測した。なお測定には熱酸化膜付き Si 基板上に Pt (5 nm) / Gd₂₂Fe₇₈ (20 nm) / SiN (10 nm) を積層した幅 3 μm、長さ 120 μm の細線試料を用いた。

実験結果

Figure 2 に電流密度 3.44×10^{11} A/m²、パルス幅 10 ns のパルス電流印加における磁壁移動の検出信号波形を示す。レーザーのスポット径が 1.42 μm であることからスポット径内の有効信号を抽出し磁壁移動を算出した結果、移動前後の磁壁位置からの算出結果と概ね一致し、約 500 m/s の磁壁移動のリアルタイム検出が可能になった。

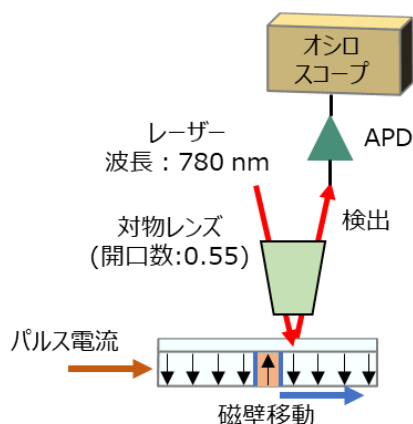


Figure 1 レーザー光による磁壁移動検出法

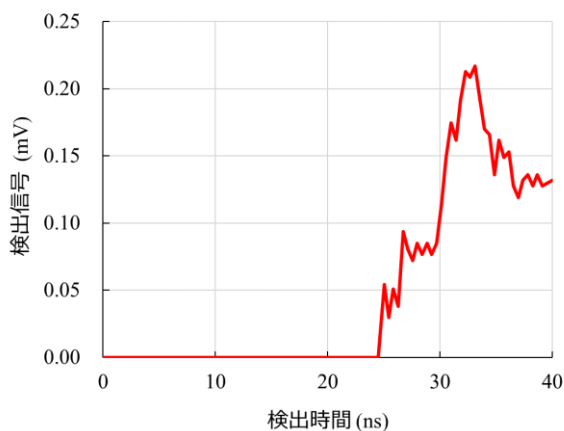


Figure 2 レーザー光による磁壁移動リアルタイム検出信号

参考文献

[1] S. Ranjbar et al., Materials Advances 3, 7028-7036, 2022.

LIFT 法による磁性膜の作製

福田樹*, 東倅主, 田原楽飛, 山下昂洋, 柳井武志, 福永博俊, 中野正基 (長崎大学)

Preparation of magnetic films by LIFT technique

I. Fukuda*, H. Kosuke, G. Tahara, A. Yamashita, T. Yanai, H. Fukunaga, and M. Nakano (Nagasaki Univ.)

はじめに

希土類系磁石膜は、主にスパッタリング法や PLD 法等により作製されてきた[1][2]。しかし、いずれの方法においても、硬磁気特性を得るには、基板加熱やポストアニーリングによる高温での熱処理が必要である。将来的に、有機材料を用いた MEMS への希土類系磁石膜の利用を鑑みると、磁石膜の低温創製が望まれる。本研究では、上記の動機以外にデバイスの製造工程の簡略化を鑑み、室温での磁石膜創製とパターン転写を実現することを目標として、LIFT(Laser Induced Forward Transfer)法での磁石膜の成膜を試みた[3]。本稿では、磁石膜と共に Fe 膜を用い、転写におけるレーザ照射条件の最適化を中心に検討したので報告する。

実験方法

最初に LIFT 法のターゲットを作製した。PLD 法を用い、約 6.5 rpm で回転させた Fe ならびに Nd_{2.4}Fe₁₄B 合金に波長 355 nm の Nd : YAG レーザを照射し、成膜時間 40 min, 高真空中(10⁻⁴ Pa 程度)にて、松浪ガラス (S1111)を 10 mm 角に切り出した基板の上に、①Fe 膜と②Nd-Fe-B 系磁石膜を成膜した。②の試料のみ成膜後に熱処理を施した。次に、LIFT 法の手順として、上記 2 種類のターゲットのガラス基板側から上述のレーザを照射し、各ターゲットに対向する Ta 基板(40 μm 厚)に堆積させた。その際、レーザの行路を制御するため、ガルバノミラーを用い、約 10 Pa の真空中、ターゲットと基板間の距離 : 0.1 mm にて成膜した。

実験結果と考察

レーザーパワーを 0.3W に固定し、Fe 膜による LIFT 法の実験を最初に検討した。Fig. 1 に堆積した Fe 膜の面積とターゲット厚さの関係を示す。いずれの試料 (Fe film No.1, No.2) も、ターゲット厚さの増加に従い堆積される面積が低下し、10 μm 厚を超えた領域で堆積が困難となる。レーザの照射条件は異なるものの、佐野らの報告では、1 μm 以下の Ni 膜をターゲットにした結果であったのに対し、本実験では 10 μm までの厚膜でも LIFT 法により堆積できることがわかった。

Fig. 1 の結果を下に、レーザーパワーを 0.3~0.7 W まで増加させながら、約 15 μm 厚の Nd-Fe-B 系磁石膜をターゲットとし、LIFT 法を試みた。成膜後の写真(一部 : SEM 写真) を Fig.2 に示す。レーザーパワー : 約 0.7 W では連続的に、約 0.4 W ではドット状に堆積される。更に、各試料の Nd と Fe の比率がターゲットの値と近く、組成転写性が良いことを確認した。今後、磁気特性の評価や結晶構造の観察を進める予定である。

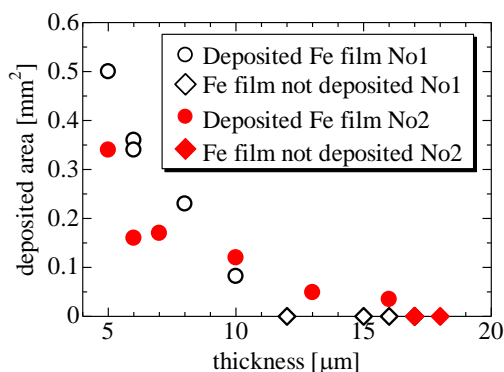


Fig. 1 Deposition area as a function of the thickness of targets (Fe films) in LIFT technique.

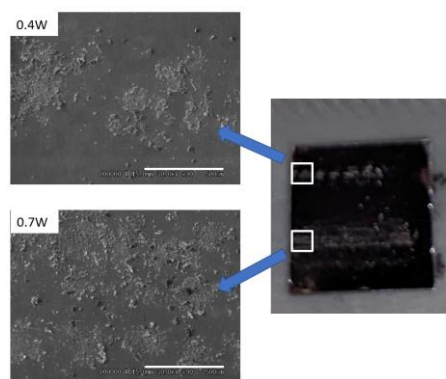


Fig. 2 Photos (Left :SEM images) of samples prepared by LIFT technique using Nd-Fe-B films.

参考文献

- [1] R. Fujiwara, T. Shinshi, and E. Kazawa, Sens. Actuators A, vol. 220, pp. 298-304, 2014.
- [2] M. Nakano, K. Higuchi, H. Yamaguchi, I. Fukuda, A. Yamashita, T. Yanai, T. Shinshi, and H. Fukunaga, AIP Adv., vol. 13, pp. #025131, 2023.
- [3] 佐野 智一, 廣瀬 明夫, J-STAGE スマートプロセス学会誌 2013 年 2 巻 4 号 pp. 192-196, 2013.

機械学習を用いた磁区画像からの TbCo 合金薄膜の磁気異方性の推定

渡辺章斗、久野栞、栗野博之、田辺賢士 (豊田工業大学)

Estimation of magnetic anisotropy from a magnetic domain image in TbCo alloy films
using machine learning

A. Watanabe, S. Kuno, H. Awano, and K. Tanabe (Toyota Technological Institute)

はじめに

磁性分野の研究開発では、成膜した薄膜の磁気特性を評価するために、磁気パラメータの測定実験が初めに行われる。それらの中には、ジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) 定数のような測定が難しかったり、計測に時間が掛かったりするパラメータも存在する。そこで、我々はより簡便なパラメータ測定法を確立するために、薄膜に現れる迷路状の磁区構造に注目した[1]。磁区構造は全磁気エネルギーが極小となるように決定されるため、磁区画像には磁気パラメータに関する情報が含まれていることが予想される。これまでの先行研究では、強磁性体薄膜における DMI 定数や飽和磁化などのパラメータ推定が報告されている[1-3](図 1)。昨年度の応用物理学会において、我々はフェリ磁性体である TbCo を用いて、組成推定が可能であることを報告した[4]。しかし、補償点を越えた RE-rich 組成は、うまく推定できないことも明らかになっている。そこで本研究では、組成ではなく、より磁区画像に影響を与える可能性がある保磁力の推定を行った。

実験方法および結果

スパッタリング法によって $\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ nm})/\text{Tb}_x\text{Co}_{1-x}(t)/\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ nm})$ の多層膜を Si 基板上に作製した。TbCo 組成比は垂直磁化膜になる条件を選択し、11 種類の組成比の異なる薄膜を用意した。Kerr 効果測定を行い、保磁力を評価した。MOKE 顕微鏡を用いて 1 つの薄膜につき 100 枚の磁区画像を撮影し、機械学習を行った。その結果、測定値と機械学習によって推定された値との間におおよそ比例関係がみられた (図 2)。この結果は、MOKE 顕微鏡で撮影した磁区画像には、フェリ磁性体であっても磁気異方性、特に保磁力に関する情報が含まれていることを明らかにしている。

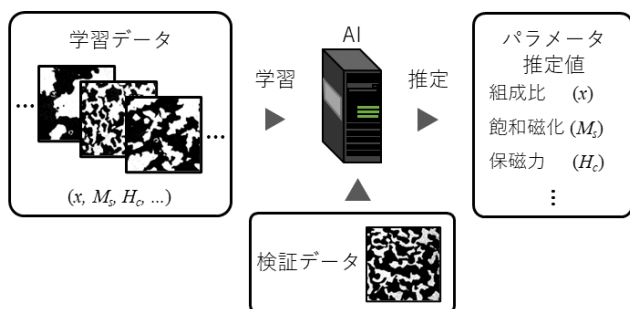


図 1. 研究の概念図

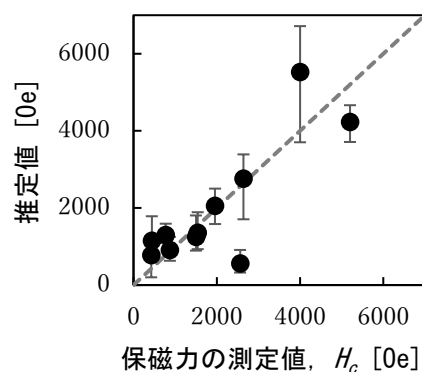


図 2. 保磁力の測定値と推定値の関係

参考文献

- [1] M. Kawaguchi et al., npj Computational Materials 7, 20 (2021).
- [2] D. Wang et al., Advanced Science 7, 2000566 (2020).
- [3] H. Y. Kwon et al., Science Advances 6, eabb0872 (2020).
- [4] 久野ら、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 2022 年 9 月