

2023 年度年次報告書

実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新

2019 年度採択研究代表者

能崎 幸雄

慶應義塾大学 理工学部

教授

ナノ構造制御と計算科学を融合した傾斜材料開発とスピンドバイス応用

主たる共同研究者:

介川 裕章 (物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究センター グループリーダー)

柚木 清司 (理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員)

渡邊 紳一 (慶應義塾大学 理工学部 教授)

研究成果の概要

本研究では、力学的な回転運動と磁気相结合する磁気回転効果を電流の局所的な回転(渦度)に拡張し、磁気の流れ(スピン流)を生み出すメカニズムを解明する。物質を選ばずに生成可能な原子や電子の運動に伴う渦度をスピン流生成に利用できれば、物質固有のスピン軌道相互作用が不可欠だったスピン流生成材料開発の自由度が飛躍的に向上する。さらに、従来とは全く異なる原理に基づくスピン流生成法であるため、電気伝導度とスピン流生成効率の相反要求を満足する材料開発が可能となり、スピン流デバイスの省電力化につながる。そこで、固体中に電流の渦度を効率的に生成するため、電気伝導度をナノスケールで変化させた傾斜材料を開発している。本年度は、傾斜材料のスピン流生成機構の微視的メカニズムを解明するため、スピントルク効率の最大化条件の精密調査を行った。その結果、界面で組成傾斜が見られる材料ではスピントルク効率が極大となる傾斜幅が存在するのに対し、界面で層状分離が見られる材料では分離領域の幅の増加に対してスピントルク効率が線形増加することを初めて発見した。また、電流渦によるスピン流生成を裏付けるため、電気伝導度勾配を逆向きにした傾斜材料を作製し、スピントルク効率の符号が反転することを確かめた。さらに、原子の運動に付随した渦度と電子スピンの結合メカニズム解明に向けて、結晶配向度依存性の調査や、磁気弾性波の干渉効果イメージングを行った。また 3 端子 MRAM への実装に向けてナノ傾斜チャンネル上へ強磁性トンネル接合(MTJ)の作製を目指し、新型(111)の断面ナノ構造観察によりその特異な結晶成長様式を明らかにした。Si/Al 傾斜材料と LiTiO-TiO ナノ傾斜構造に対して電流による垂直磁化スイッチング実証実験を行い、電流誘起磁化スイッチングが実現することを確認した。

【代表的な原著論文情報】

1. K. Maezawa, S. Fujii, K. Yamanoi, Y. Nozaki, and S. Watanabe, "Spatiotemporal visualization of a surface acoustic wave coupled to magnons across a submillimeter-long sample by pulsed laser interferometry", *Phys. Rev. Appl.* **21**(4), 044047 (2024).
2. C. He, K. Masuda, J. Song, T. Scheike, Z. Wen, Y. Miura, T. Ohkubo, K. Hono, S. Mitani, and H. Sukegawa, "Nano-crystal domains in Co-based fcc(111) epitaxial magnetic junctions and their impact on tunnel magnetoresistance", *Acta Mater.* **261**, 119394-1~14 (2023).
3. J. Song, C. He, T. Scheike, Z. Wen, H. Sukegawa, T. Ohkubo, Y. Nozaki, and S. Mitani, "Charge-to-spin conversion in fully epitaxial Ru/Cu hybrid nanolayers with interface control", *Nanotechnology* **34**, 365704-1~10 (2023).
4. K. Tang, C. He, Z. Wen, H. Sukegawa, T. Ohkubo, Y. Nozaki, S. Mitani, "Enhanced orbital torque efficiency in nonequilibrium Ru₅₀Mo₅₀(0001) alloy epitaxial thin films", *APL Mater.* **12**, 031131-1~7 (2024).
5. H. Nakayama, T. Horaguchi, C. He, H. Sukegawa, T. Ohkubo, S. Mitani, K. Yamanoi, and Y. Nozaki, "Spin-torque generation using a compositional gradient at the interface between titanium and tungsten thin films", *Phys. Rev. B* **107**, 174416 (9 pages) (2023).