

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

2021 年度
年次報告書

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

§ 1. 研究成果の概要

本研究では、磁気回転効果によるマルチスケール角運動量変換現象を利用し、電流渦から磁気の流れ(スピン流)を生む傾斜材料(電気伝導度をナノスケールで傾斜変調させた非磁性金属複合膜)を開発する。

物体の回転運動とマクロな磁気が相互変換されることはアインシュタインらが約 100 年前に既に発見していたが、結晶格子や電子の局所的な回転運動と固体中の伝導電子のマイクロな角運動量(電子スピン)の角運動量変換については、微視的機構を含めて未解明な点が多い。固体デバイス中の様々な物質で生成可能な格子回転や電流渦をスピン流生成に利用できれば、希少金属のスピン軌道相互作用にスピン流生成を依存してきたスピンドバイスの材料設計自由度を飛躍的に向上できるだけでなく、これまで難しかった高電気伝導度物質を用いたスピン流生成も実現できるため、電子デバイスの省電力化に直結する。

本年度は、アモルファス半導体 Si と高電気伝導度金属 Al の組成比を膜厚方向でナノスケール傾斜させた Si/Al 傾斜材料を作製し、強磁性体に作用するスピントルク効率の傾斜幅依存性と、スピン流から電流への逆変換の有無を測定し、電流渦によるスピン流生成の微視的機構解明につながる傾斜材料特有の性質を調べた。また、表面弾性波の格子回転運動と磁化運動(電子スピンのコヒーレント運動)についても変換の相反性を定量化し、傾斜材料の結果と比較することにより、回転運動を与える系による磁気回転効果の相違点を調べた。その結果、表面弾性波の格子回転と電子スピンの角運動量変換は相反的であるのに対し、電流渦から電子スピンへの変換は極めて非相反的であることがわかった。この結果は、スピン軌道相互作用に由来する従来のスピン流生成機構では説明できない。電流渦によるスピン流生成の物理的メカニズム解明につながる新しい発見であると同時に、スピン流による磁化スイッチングの高効率化につながる工学応用の観点からも重要な結果である。

§ 2. 研究実施体制

(1) 能崎グループ(慶應義塾大学)

- ① 研究代表者: 能崎 幸雄 (慶應義塾大学 理工学部 教授)
- ② 研究項目
 1. 不均一スピン依存散乱効果を用いたスピン流生成の微視的機構解明
 2. 酸素・窒素反応性スパッタを用いた傾斜材料の作製
 3. 金属傾斜材料のスピン流生成とナノ構造・物質パラメータ依存性の解明
 4. 半導体傾斜材料を用いたスピン流生成とゲート制御

(2) 介川グループ(物質・材料研究機構)

- ① 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拠点 主幹研究員)
- ② 研究項目
 1. 膜構成・組成のナノスケール制御による傾斜材料の作製と技術移転
 - (1) 酸化・窒化による傾斜変調
 - (2) 異種物質の傾斜変調
 - (3) 固溶体エピタキシャル組成変調
 2. 傾斜材料のナノ構造、スピン輸送特性の評価
 3. 傾斜材料のスピン流を用いたナノ磁性体素子の作製とナノ磁性体磁化反転

(3) 渡邊グループ(慶應義塾大学)

- ① 主たる共同研究者: 渡邊 紳一 (慶應義塾大学 理工学部 教授)
- ② 研究項目
 1. 非一様スピン依存散乱の定量化に向けたレイリー波の光学的評価
 2. スピン流に由来するスピン蓄積信号の光検出法の開発
 3. 光を用いたキャリア変調によるスピン流の制御

(4) 柚木グループ(理化学研究所)

- ① 主たる共同研究者: 柚木 清司 (理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員)
- ② 研究項目
 1. 非一様系のスピン流シミュレータの開発
 2. 第一原理計算による傾斜材料のナノ構造と電子状態の数値解析
 3. スピン流シミュレータによる傾斜材料のスピン流計算と網羅的材料探索

【代表的な原著論文情報】

- 1) S. Tateno, Y. Kurimune, M. Matsuo, K. Yamanoi, and Y. Nozaki, “Einstein-de Haas phase shifts in surface acoustic waves”, Phys. Rev. B 104, L020404 (5 pages), 2021.
- 2) J. Fujimoto, W. Koshibae, M. Matsuo, and S. Maekawa, “Zeeman coupling and Dzyaloshinskii-Moriya interaction driven by electric current vorticity”, Phys. Rev. B 103, L220402 (* pages), 2021.
- 3) K. A. Sumihara, S. Okubo, M. Okano, H. Inaba, S. Watanabe. “Ultra-precise determination of thicknesses and refractive indices of optically thick dispersive materials by dual-comb spectroscopy”, Opt. Express 30 (2), pp. 2734–2747, 2022.
- 4) T. Fukuda, M. Okano, and S. Watanabe, “Interferogram-based determination of the absolute mode numbers of optical frequency combs in dual-comb spectroscopy”, Opt. Express 29 (14), pp. 22214–22227, 2021.
- 5) A. Iwasaki, D. Nishikawa, M. Okano, S. Tateno, K. Yamanoi, Y. Nozaki, and S. Watanabe, “Temporal-offset dual-comb vibrometer with picometer axial precision,” arXiv:2203.10242 (submitted to APL photonics).