

博士論文(要約)

強磁性多層膜における非自明な
電流誘起スピン軌道トルクに関する研究

日比野 有岐

● 背景と目的

現代の高度な文明社会は、エレクトロニクス分野の発展によって支えられている。エレクトロニクスでは、電子の持つ「電荷」の自由度を利用しており、様々な機能性を有した電子デバイスが展開されてきた。一方、電子には電荷以外にも「スピン」の自由度を持っていることが知られている。近年、この電子の電荷とスピンの自由度を複合させることで、従来のエレクトロニクスを超えた機能性を持つ電子デバイスを開発しようとする「スピントロニクス」の研究が盛んに行われている。スピントロニクスの機能を用いたデバイスの中でも、強磁性体の「磁化方向」を情報の媒体とする磁気ランダムアクセスメモリ(Magnetic Random Access Memory: MRAM)は不揮発性メモリとしての特徴を持ち、既存の半導体メモリに代わる磁性体の省電力メモリ素子として期待されている。

MRAM の実用化において、電気的な情報の書き込み手法、つまり電氣的に磁化反転を行う技術の確立は大きな課題の一つである。磁化方向の制御方法には外部磁場およびスピン移行トルクを用いた手法等が提唱されているものの、省電力動作や高信頼性等を満した新たな磁化制御技術が求められている。本論文では、強磁性金属(Ferro-magnetic Metal: FM)と非磁性金属(Non-magnetic Metal: NM)の接合系(FM/NM)における電流誘起スピン軌道トルク(Spin-Orbit Torque: SOT)を用いた磁化制御技術に着目する。SOT は対象とする系の強いスピン軌道相互作用に由来したスピンの注入・蓄積によって強磁性体の磁気モーメントにトルクが働く現象であり、高信頼・高速動作を可能とする磁化反転技術として注目されている手法である。SOT の生成機構は、NM におけるスピンホール効果によるスピン注入や構造反転対称性の破れた FM/NM 界面におけるラシュバ効果によるスピン蓄積の機構が提唱されてきた。これらの機構では、注入・蓄積されるスピン分極方向は一定の軸方向に限定されている。一方で FM や FM/NM 界面に起因した新たなスピン流生成機構が理論的に提唱され始めた。これらの機構によって生成されるスピン流のスピン分極方向は強磁性体の磁化方向に依存する従来の機構とは異なる「非自明」な特徴を持っており、SOT を用いたデバイス設計に新たな自由度をもたらすことが期待されている。しかし、これらの機構による SOT の実験的観測例は数少なく、更なる調査・機構解明が求められている。また、SOT を用いた磁化反転を行うには 10^{11} から 10^{12} A/m² 程度の高い電流密度が要求されていることから、SOT の高効率化が要求されている。以上から本博士論文では、非自明なスピン流生成機構による SOT の観測・機構解明と SOT の高効率化を目的とした研究を行った。

本論文では7つの章から構成されている。第1章では、上記の MRAM の読み出し・書き込み手法の紹介および本研究テーマであるスピン軌道トルクの研究背景を述べ、本論文の目的を提示する。第2章および第3章では、本研究で用いた実験的手法を述べている。第2章では、サンプル・デバイス作製方法およびその磁気特性の評価方法について、第3章ではスピン軌道トルクの定量的評価方法について紹介している。第4章から第6章にかけては本論文の研究成果をまとめ、第7章にて全体の総括を行っている。

以下、研究成果に関する章についての概要を述べる。

● 第4章: Pt/Co 界面に由来した非自明なスピン軌道トルクの観測

非自明なスピン流生成機構として FM/NM 界面から生じるスピン軌道歳差効果に由来したスピン流生成機構に着目した。この機構にて生じるスピン流のスピン分極方向は、FM 層のスピン偏極電流が FM/NM 界面を透過する際に界面におけるスピン軌道相互作用に由来した散乱を受けて歳差運動することで生じるスピン流であり、そのスピン分極方向は FM 層の磁化方向と界面のスピン軌道相互作用によって生じる有効磁場の外積方向によって決定される。スピン軌道歳差効果による SOT の観測および定量的評価はほとんど報告例がない。また、これまではスピン軌道相互作用の弱い軽い元素の NM と FM を用いた界面における報告しかされていない。これらから、スピン軌道歳差効果による SOT の機構解明には更なる検証・調査が必要な状況である。よって、本研究ではスピン軌道相互作用の強い界面におけるスピン軌道歳差効果に着目し、それに起因した SOT の観測・定量評価を目的とした。本研究では、スピン軌道相互作用の強い界面として強い界面磁気異方性や界面ラシュバ効果の発現が提唱されている Pt/Co 界面を対象に実験を行った。

本研究では強磁性体に Ni と Fe の合金のパーマロイ(Py)と Co を用いた Py/Pt/Co の三層構造を作製し、Py に働く SOT を交流輸送測定の手法を用いた定量評価を行った。ここでは、Pt/Co 構造は磁化が垂直方向にピンされた磁化固定層かつスピン流生成源として、面内磁化層の Py はトルクの検出層としてそれぞれ役割を担っている。輸送測定の結果、Py 層には Pt から生じるスピンホール効果に由来した SOT に加え、従来のスピンホール効果や界面ラシュバ効果の機構とは異なる対称性を有する非自明な SOT を観測した。生じるトルクの対称性(注入されるスピン分極方向の対称性)および膜厚依存性をはじめとしたいくつかの検証実験を通して、この非自明なトルクが Pt/Co 界面に由来したスピン軌道歳差効果に由来したものであることを明らかにした。

● 第5章: スピン軌道歳差効果の界面構造制御

スピン軌道歳差効果は界面でのスピン軌道相互作用に由来した有効磁場によって、その符号および大きさを決定していることが理論的に示唆されている。このことを踏まえ、FM/NM 構造において NM 層の材料を選択することで界面構造制御を行い、それによるスピン軌道歳差効果の影響を調査した。第4章にて用いた三層構造を採用し、交流輸送測定を行った結果、スピン軌道歳差効果による SOT の大きさおよび符号は界面構造に強く依存することを明らかにした。この結果は、スピン軌道歳差効果が界面効果に由来したものであることを強く示唆する結果である。Co/Cu および Co/Pt 界面にて生じるスピン軌道歳差効果は第一原理計算による理論的予想と比較して符号と大小関係が一致することを確認した。また、界面構造制御の結果を踏まえ、スピン軌道歳差効果による無磁場下での垂直磁化反転の実証を試みた。磁化反転の実証には至らなかったものの、Co/Cu 界面のスピン軌道歳差効果に

由来したスピン注入を示唆した磁化反転の挙動が観測され、スピン軌道歳差効果を利用した SOT 誘起垂直磁化反転への可能性を示した。

● 第 6 章: 表面酸化によるスピン軌道トルクの高効率化

SOT の高効率化を目指し、強磁性金属表面に酸化状態を施した系における SOT の影響を調査した。Pt/Co の Co 表面に酸化状態を導入することで、磁化方向の安定性を決める磁気異方性が 2 倍以上向上したことに加え、SOT による磁化反転の閾電流密度を低減できることを明らかにした。通常、系の磁気異方性の高いほど磁化反転に困難なることから、本結果は酸化状態導入によって、系の SOT の生成効率が向上していることを示唆している。系に生じる SOT の定量的評価を行った結果、酸化状態を導入することでスピン軌道トルクが高効率化していることを明らかにした。

● 全体の総括

強磁性金属/非磁性金属の接合系において、界面に由来した非自明なスピン流生成機構であるスピン軌道歳差効果の交流輸送測定による観測とその定量評価に成功し、その大きさ・符号が界面構造に強く依存することを初めて解明した。また、スピン軌道歳差効果を利用したスピン軌道トルク磁化反転への可能性を見出した。

スピン軌道トルクの高性能化に関する研究では、強磁性金属層表面への酸化状態導入によって、トルク効率および磁気異方性が向上できることを示した。この結果は、高安定性と高制御性を両立した MRAM デバイスへの応用が期待される。

本博士論文は、スピン軌道トルクに新たな生成機構の提唱をするとともにスピン軌道トルクを用いた MRAM デバイスの実用化に向けた指針を示すものである。