

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 日比野 有岐

背景と目的

近年、電子の「電荷」の自由度に加えて「スピン」の自由度を同時に用いて情報の読み出し・書き出しをはじめとしたデバイスに展開しようとする試みが盛んに行われている。この分野は「スピントロニクス」と呼ばれ、既存のエレクトロニクスに新たな機能性をもたらすものとして期待されている。中でも磁気トンネル接合素子を用いた磁気ランダムアクセスメモリ(Magnetic Random Access Memory: MRAM)は、強磁性体の磁化方向が情報を担う「不揮発性」メモリであることから、既存の半導体メモリに置き換わる省電力かつ高速動作なメモリとして期待されている。

スピントロニクスの大きな課題の一つとして電氣的な情報書き込み手法、つまり電氣的な磁化制御手法、の開発が挙げられる。本研究では、強磁性金属(FM)/非磁性金属(NM)の接合系における電流誘起スピン軌道トルクを用いた磁化制御に注目した。スピン軌道トルクは、系の強いスピン軌道相互作用に起因したスピン注入によって、強磁性体にトルクが生じる現象である。スピン軌道トルクの生成機構として、これまでNM層におけるスピンホール効果によるスピン注入や界面ラシュバ効果によるスピン蓄積が提唱されている。また、スピン軌道トルクの生成機構はスピンホール効果や界面ラシュバ効果にとどまらず、強磁性金属層やそのFM/NM界面に起因した非自明なスピン流生成機構およびスピン注入方法が理論的に提唱され始めている。本博士論文では、スピン軌道トルクの高効率化および非自明なスピン流生成機構によるスピン軌道トルクの観測およびその機構解明を目的として以下の研究を行った。

1. Pt/Co界面に由来したスピン軌道歳差効果の観測

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の有効磁場を受けて歳差運動することで生じるスピン流であり、生成されるスピン流のスピン方向はFM層の磁化方向の情報を反映している。このことから、スピン流のスピン方向を制御できる大きな特徴を持っている。ここでは、スピン軌道相互作用の強い界面(界面の有効磁場の大きいことが予想される)であるPt/Co界面に着目し、Pt/Co界面に由来したスピン軌道歳差効果の観測を試みた。Pt/Co界面によるスピン流から生じるスピン軌道トルクの検出層としてNiFe合金(Py)を接合したPy/Pt/Coの三層構造を作製し、Pyに働くスピン軌道トルクを定量評価した。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としての役割を担っている。交流輸送測定の結果、Py層にはPtから生じるスピンホール効果に由来したスピン軌道トルクの他に、スピンホール効果とは異なる対称性を有する非自明なトルクが共存して生じていることが明らかになった。この非自明なトルクは、Coの磁化方向に強く依存することおよび生じるトルクの対称性がスピン軌道歳差効果によるものと対称性が一致することから、Pt/Co界面から生じるスピン軌道歳差効果に由来していることが示唆された。更に、スピン軌道歳差効果によって生じるスピン軌道トルクはPt膜厚に対して指数関数的に減少する傾向が得られ、Pt層内でのスピン拡散を反映したものであることが示唆された。

2. 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における有効磁場が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。その結果、スピン軌道歳差効果によるスピン軌道トルクの大きさおよび符号は界面構造に強く依存することが明らかになった。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している。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。磁化反転には至らなかったものの、Co/Cu界面に起因したスピン軌道歳差効果によるスピン注入を示唆した現象が観測され、スピン軌道歳差効果を利用したスピン軌道トルク誘起垂直磁化反転への可能性を示した。

3. 自然酸化によるスピントルクの制御

スピントルク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スピントルクの影響を調査した。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、スピントルク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、系のスピントルクが向上していることを示唆している。定量的にスピントルクを評価した結果、酸化状態を導入することでスピントルクが高効率化していることを明らかにした。

結論

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トルク生成機構であるスピントルク歳差効果の輸送測定による観測に成功し、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、スピントルク歳差効果を利用したスピントルク磁化反転への可能性を見出した。

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