

高速磁化反転技術の開発と省エネルギー動作デバイス応用

—高速動作不揮発性磁気メモリの実現に向けて—

1. 研究の目的

磁気メモリは不揮発性のメモリである。磁気メモリでは情報担体として磁化の向きが用いられている。したがって、情報を速く書き換えるためには高速な磁化反転が必要である。また、メモリを低消費電力で動作させるためには、低消費電力な磁化反転が必要である。低消費電力で強磁性金属の磁化を反転させる方法として強磁性体に接続された重金属配線を用いたスピン軌道トルク法(SOT法)がある。この方法では、重金属に電流が流れるとキャリア電子がスピンホール効果によってスピン偏極する。偏極したスピンの純スピン流として重金属に注入され、重金属の磁化を反転させる。我々は二つの重金属配線を用いた補助書込SOT法を提案した。補助書込SOT法では、先に補助書込用の重金属配線から主書込用の重金属配線とは異なる向きのスピンの強磁性体へ注入される。主書込では、強磁性体の磁化を目的の向きに反転させるためのスピン(目的の向きに向けたスピン)が注入される。従来型SOT法では主書込のみのため、強磁性体の磁化は反転するが、磁化反転の初動が小さく、磁化反転に要する時間が長かった。補助書込によって磁化反転の初動を増大させることで磁化反転を高速化できる。

(1) 補助書込SOT法による高効率磁化反転

補助書込SOT法は数値シミュレーションによって従来型SOT法に対して優位性が示された後、実証実験によって磁化反転に必要な電流量や反転時間の低減が確認された。しかし、電流の印加条件(パルス形状、時間等)、磁性体の形状、書込線の幾何配置等と磁化反転特性との相関は理論・実験ともに未解明である。更なる高速・低消費電力化にはこのような知見が重要となる。そこで複数の条件下における理論解析と実験の相互比較を行う。具体的には以下のような目的で研究を行う。低消費電力での高速な磁化反転手法を確立することが最終目標である。

- ① 補助書込SOT法における磁化反転過程の解析。
- ② 理論と実験における磁化反転特性の相違を評価。
- ③ 高精度な理論予測が可能なシミュレーション手法を構築。

(2) スピンホール効果による強磁性体へのスピン注入の検討

重金属に電流が流れるとき伝導キャリアにスピンホール効果が作用する。伝導キャリアのアップスピンとダウンスピンがそれぞれ逆向きに曲がり、スピンの偏極する。強磁性体と重金属の界面では偏極したスピンの純スピン流として強磁性体へ注入される。注入スピンの量が多いほど高速に磁化が反転される。しかし、重金属や強磁性体の材料パラメータと注入スピンの量との関係は明確ではない。したがって、これらの関係を明らかにする。具体的には以下のような目的で研究を行う。

- ① スピンホール効果によるスピン注入の解析
- ② 高効率なスピン注入の提案

2. 研究の計画

(1) 補助書込SOT法による高効率磁化反転

① 数値シミュレーションによるアプローチ

補助書込SOT法をスピン注入による磁化反転トルクの効果を導入したランダウーリフシツギーバート方程式に基づいたマイクロマグネティクスモデルによりシミュレーションする。強磁性体として膜厚が5nmで長辺の長さが20nm、100nm、500nmの直方体のFeNi合金(パーマロイ)を想定する。SOT法によるスピン注入のトルクには、接合界面からの距離でスピンの指数関数で減衰しながら磁化へトルクを与える純スピン流注入モデルを用いる。強磁性体のスピン拡散長は2nmとする。補助書込電流の印加時間や主書込電流とのタイミングや各スピン注入量を変更して磁化反転に必要な時間や消費電力をサンプリングし低電力で高速に磁化反転できるように最適化する。

② 実験によるアプローチ

パーマロイやCoFeBなどの複数種類の強磁性体において磁化反転を実施し、系統的な

理解を目指す。強磁性体のサイズを変更して実験する。磁化反転に必要な電流値を探索し、磁化反転に要する電流値で整理する。更に書込電流のパルス時間、補助書き込み電流と主書き込み電流の間のタイミング、試料温度等をパラメータとして系統的に検証する。得られた情報をシミュレーションによる解析にフィードバックし、実験と解析との差違を補正・定式化し高精度な理論予測を可能にする。

(2) スピンホール効果による強磁性体へのスピン注入の検討

半導体デバイス特性の数値解析で用いられる電気伝導の計算手法に、伝導キャリアのスピン依存性、スピン散乱の効果、重金属におけるスピンホール効果を導入して、スピンの流れを計算し、重金属から強磁性体へ注入されるスピンの流れを解析する。

3. 研究の成果

(1) 補助書込SOT法による高効率磁化反転

① 数値シミュレーションによるアプローチ

補助書込用の純スピン流を数ナノ秒だけ流した後に主書込用の純スピン流を流し始め、磁化の反転時間をシミュレーションした。その結果、補助電流の印加時間が長すぎると反転時間が増加してしまうこと、つまり補助電流の印加時間に最適値があることが明らかになった。また、磁化反転過程での磁化の挙動を従来型SOT法と比較した。強磁性体の長さが20nmと100nmの場合の磁化反転においては、補助書込SOT法と従来型SOT法のどちらも単磁区に近い磁区形状を保ったまま磁化が反転した。ところが、強磁性体の長さが500nmの場合には、従来型のSOT法と補助書込SOT法とで反転時間だけでなく磁化反転過程も大きく異なった。従来型のSOT法においては、強磁性体の様々な箇所から磁化反転が疎らに起こり磁化が反転したのに対し、補助書込SOT法では磁性体の長辺端から磁化反転が起こり始め、単磁区(もしくは二つの磁区)に近い磁区形状を保ったまま磁化が反転した。この結果は、大きなサイズの強磁性体の磁化反転において、補助書込SOT法のほうが、反転確率が高いことやサンプル依存性が少ないことを示唆する。

② 実験によるアプローチ

おおよそ100nm、500nm、1000nmの長さの直方体のパーマロイを用いて磁化反転実験を行なった。補助書き込み用の電流と主書き込み用の電流を同時に流し始め、ある時間(横軸)で補助電流を止め、磁化の反転時間(縦軸)を理論予測した。その結果、補助電流の印加時間が長すぎると反転時間が増加してしまうこと、つまり補助電流の印加時間に最適値があることが明らかになった。これは数値シミュレーションによる結果と定性的に一致した。

(2) スピンホール効果による強磁性体へのスピン注入

スピンに依存したドリフト拡散法により重金属/強磁性体多層膜における重金属から強磁性体へのスピン注入量を解析可能にした。ドリフト拡散法には、ドリフト電流と拡散電流に加えてスピン拡散の効果と重金属配線のスピンホール効果を導入した。解析の結果、重金属の電気伝導度や強磁性体のスピン拡散長の減少で重金属へのスピン注入量が増加し、強磁性体の電気伝導度や重金属のスピン拡散長の増加で重金属へのスピン注入量が増加することが明らかになった。また、重金属の膜厚が重金属のスピン拡散長の3倍程度の長さよりも薄い場合、強磁性体へのスピン注入量が減少した。この低膜厚による注入量の減少は、重金属と強磁性体の接合における形状の変化で改善されることを明らかにし、改善案を提案した。

4. 研究の反省・考察

磁化反転のシミュレーションと実験を比較すると、定性的には整合する結果が得られた。しかし、実験において補助書込SOT法を用いることによる磁化反転に必要な電力量の従来型SOT法からの減少量にばらつきが大きかった。この原因はシミュレーションからは考察できておらず、より詳細な検討が必要である。

5. 研究発表

(1) 学会誌等

- ① Y. Yamaki, **S. Honda**, H. Itoh, “Spin injection into ferromagnetic metal from heavy metal owing to spin Hall effect”, Science and Technology Reports of Kansai University, vol. 64, pp. 51-59 (2022).
 - ② Y. Kaiya, **S. Honda**, H. Itoh, and T. Ohsawa, “Depth-dependence of magnetization at a ferromagnet edge under the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction”, Science and Technology Reports of Kansai University, vol. 64, pp. 61-72 (2022).
 - ③ K. Itoh, **S. Honda**, T. Suemasu, “Transition metal nitrides and their mixed crystals for spintronics”, Nanotechnology, vol. 33, pp. 062001-1 – 21 (2022).
 - ④ 特願2021-63691、**本多周太**、“磁化制御デバイス及び磁気メモリ装置”、(2021年4月2日).
 - ⑤ 特願2021-63692、**本多周太**、“磁化制御デバイス及び磁気メモリ装置”、(2021年4月2日).
 - ⑥ 特願2022-007392、**本多周太**、“磁気素子および磁気メモリ装置”、(2022年1月20日).
- (2) 口頭発表
- ① 家登正堯、大澤友克、**本多周太**、“強磁性多層構造による電流駆動型磁気メモリの安定動作”、第28回電気学会山梨・静岡東部支所研究発表会、YS.28-02、(2021年11月30日).
- (3) 出版物
- ① なし