

情報担体とその集積のための材料・デバイス・システム
2021 年度採択研究者

2021 年度 年次報告書

金井 駿

東北大学 電気通信研究所
助教

不確定性スピントロニクスデバイス

§ 1. 研究成果の概要

スピントロニクス確率ビットの時間平均応答の物理的因子の解明: スピントロニクス確率ビットにおける「時間平均応答」は、磁気エネルギーの作るポテンシャル障壁の外場応答を統一的に記述する Néel-Arrhenius 則に基づき予測が可能であるが、磁気エネルギーポテンシャルの電流により磁化にもたらされるスピン移行トルク(STT)に対する摂動項の実験的決定が困難であったため、これまで外場に対する時間平均応答を系統的に整理することができなかった。s-MTJ においては、不揮発性 MTJ においてアクセスできなかった緩和時間に直接アクセス可能であることを利用して Néel-Arrhenius 則を明らかにし(2-1-(a))、その時間平均応答の定式化を行った(2-1-(b))。[1]

2-1-(a) s-MTJ の STT 及び外部磁場に対するエネルギーポテンシャルの摂動を、STT スwitchング、強磁性共鳴、磁化測定、ランダムテレグラフノイズ測定を組み合わせる実験により実験的に明らかにした。電圧印加による界面磁気異方性の電界変調効果を用い、一次の一軸異方性定数 K_1 を制御した。垂直磁化容易軸を有する MTJ の場合、磁場及び電流に対する指数は、 K_1 及び二次の一軸異方性定数 K_2 の比が 0.25 を超える場合($K_2/K_1 > 0.25$)に 2、それを上回る場合($K_2/K_1 > 0.25$)に 3/2 であることを、分岐理論解析により理論的に導出することに成功した。[2, 3]

2-1-(b) 上記(a)において決定された外場(磁場及び STT)下の Néel-Arrhenius 則から、確率ビット向け MTJ の時間平均応答特性を定式化した。垂直 s-MTJ を用いた実験との対応から、以下を明らかにした。他の確率ビット同様、外場下での出力を決定づける信号(規格化された時間平均抵抗)は、それぞれシグモイド関数的な振る舞いをすることが実験的に知られていたが、ここでは Néel-Arrhenius 則にもとづいてその理論的裏付けを与えた。磁場に対する時間平均応答から、素子中で磁場に対して反応する、磁氣的に活性な体積を導出可能である。図 2 に、MTJ 素子の抵抗から求めた素子直径 D_{ele} と、磁氣的に活性な体積から求めた素子直径 D_{act} を示す。常に 13 nm 程度の差が生じていることが明らかになった。これは素子の端の 13 nm 程度の領域では、磁氣的には活性であるものの、STT に対して不感であることを示唆しており、ナノ・スケール素子における外場に対する新たな反転描像が明らかになった。また、電流に対する時間平均応答から、熱安定性を臨界電流で除した、性能指数を導出可能であることが明らかになった。性能指数は、不揮発性 MTJ において、パルス電流を導入し、STT パルス長に対する反転確率測定及び、磁場に対する反転確率測定から測定する必要があった。一方で、s-MTJ においては直流抵抗の印加電流依存性から測定可能であり、スループットが格段に異なる。一方で、この性能指数は磁気異方性は大きく関係しないことが理論的に分かっているため、s-MTJ から性能指数を求めることにより、不揮発性 MTJ の特性向上に有用な情報が高速に得られることが明らかになった。[4,5]

【代表的な原著論文情報】

[1] S. Kanai, K. Hayakawa, T. Funatsu, J. Igarashi, B. Jinnai, W. A. Borders, H. Ohno, and S. Fukami, "Superparamagnetic Tunnel Junctions with Nanosecond Relaxation Time for Probabilistic Computing," (oral) American Physics Society (APS) March Meeting 2022, Chicago, 2022/03/14-2022/03/18.

- [2] 金井駿, “スピントランスファトルク下に於ける磁気エネルギー障壁の実験的決定,” (invited) 令和3年度 東北大学 電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」, 東北大学電気通信研究所, 2022/01/28. (招待講演)
- [3] T. Funatsu, S. Kanai, J. Ieda, S. Fukami, and H. Ohno, “Local bifurcation with spin-transfer torque in superparamagnetic tunnel junctions,” *Nature Communications* 13, 4079 (2022). (オープンアクセス)
- [4] K. Kobayashi, W. A. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, S. Fukami, “Physical mechanism governing sigmoid curves of superparamagnetic tunnel junctions,” (poster) The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, online, 2021/10/25–2021/10/28.
- [5] K. Kobayashi, W.A. Borders, S. Kanai, K. Hayakawa, H. Ohno, and S. Fukami, “Time-averaged response of superparamagnetic tunnel junctions to magnetic field and current,” (poster) 40th Electronic Materials Symposium EMS-40, online, 2021/10/11–2021/10/13.