

非対称ポテンシャルを用いたスピンドYNAMICS整流素子の 作製と物性制御

Development of the rectifying device for spin dynamics
using asymmetric potential

大谷 義近 (OTANI YoshiChika)

東京大学・物性研究所・教授



研究の概要

生体系における運搬機構であるポテンシャルラチェットを用いた整流機構（分子モーター）をスピントロニクス分野（ナノ磁壁制御やスピン流制御）に応用し、次世代磁気デバイスのための新しいパラダイムを理論と実験の両面から構築する。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：(A) 磁性 (E) 金属

1. 研究開始当初の背景・動機

生体系に特徴的な分子モーターの基本原則を応用した固体素子の実験研究は、世界的に見ても最近目覚ましい発展を遂げている。しかしながら、多くの研究はミクロな微粒子の力学的な運搬制御、イオンポンプ、電子または磁束量子の運動制御に集中している。本研究プロジェクトでは、電子スピンやナノ磁壁に着目し、ポテンシャルラチェットの原理を他に先駆けて適応することによりスピントロニクスデバイス研究に新しい方向付けを行う。

2. 研究の目的

(1) ナノ磁壁の運動方向に対して非対称なポテンシャルを導入することにより、振動磁場に対して一方向へ伝播する磁壁ラチェット素子の実現を目指す。

(2) スピン拡散長の長い金属素子に非対称なスピン散乱因子を導入することにより、振動電場に対して一方向へスピン流を生成するスピン流ラチェット素子の実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 本プロジェクトで購入したマイクロカー装置を用いてナノスケール領域の局所磁化測定を行い、磁性細線内の磁壁の核発生過程、あるいはナノ磁気リングの磁化過程を詳細に測定した。この結果を次節以降で述べる2次元電子ガス十字構造の曲がり磁気抵抗と比較して磁化過程との詳細な対応を調べた。

4. これまでの成果

(1) 高感度磁壁運動検出法の開発

まず、我々は半導体二次元電子ガスのパリスティックな伝導特性を用いた微小磁性素子中の磁壁運動を検出する手法を開発した。二次元電子ガス十字構造の抵抗（曲がり抵抗）は、十字構造内における磁性体からの漏れ磁場の空間分布に対応した変化を示す。我々は直径1ミクロン程度の磁気リング・ディスクにおける磁化過程を曲がり抵抗測定により明瞭に測定できることを示し、シミュレーションにより振る舞いを再現した。この手法は他にないユニークなものであり、非常に有効な磁壁運動の検出手段である [8]。

(2) 楕円リングにおける磁壁ラチェット駆動

磁壁の感じるポテンシャルエネルギーは細線の幅や曲率で変化するため、楕円リングにおいては磁壁の安定点・不安定点が存在する。ここに外部から振動磁場を重畳すると、楕円リング中の磁壁ペアが決まった向きに回転する。これはフラッシングラチェットによる整流機構に対応する。回転方向は振動磁場の角度により制御できる。楕円磁気リングを半導体二次元電子ガス十字構造上に作製し、交流磁場に対する磁壁ペアの振る舞いを調べたところ、磁壁ペアが特定方向に回転していることが分かった。この磁気素子中では外部揺らぎ（振動磁場）を特定方向への磁壁回転運動に変換しており、将来の磁気デバイスへ向けた概念的に新しい基礎技術としてインパクトを与えるものと考えている [4]。

(3) 磁気ゲートによる磁壁ピン止め制御

二本の磁性細線を垂直に近接させることにより、細線中の磁壁に対して実効的なポテンシャルを導入することを試みた。(1)で開発した曲がり抵抗測定手法を用いて、磁気的な相互作用によりピン止めが制御できるかどうかを調べた。磁性細線ペアが反平行磁化配置の方が平行配置より有意にピン止めが強いことが分かり、シミュレーションにより解析を行った。制御可能な新しい磁壁ピン止め手法として、応用上重要な発見である[7]。

(4) 磁壁ピン止め離脱の制御

楕円リングにおける磁壁ペアは振動磁場に対して対を成して同期した回転をすることが期待されるが、実際の試料においては

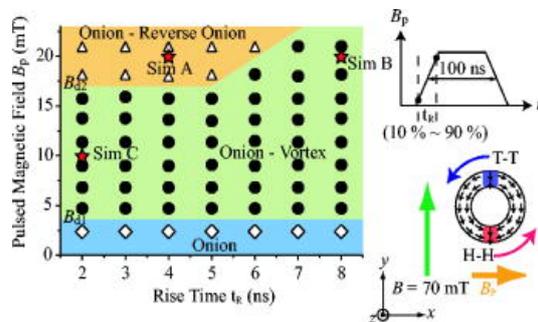


図2: 磁化反転様式の印加磁場強度及び立ち上がり時間依存性。図中△はオニオンから反転オニオン、●はオニオンから渦、◇は無変化を示す。右上の内装図は印加磁場パルスの形(と定常磁場(緑)とパルス磁場(黄)の印加方向)。

必ず非対称性が存在するためピン止め離脱に時間差に起因する磁壁の衝突による対消滅が起こる。この対消滅を避けるためのパルス磁場印加タイミングの条件を実験的に求めた。この条件は(2)の楕円リングの実験に有用であり、GHz帯の高周波磁場の印加により磁壁ペアの連続回転振動を誘導することが可能であることを示唆する[2]。

(5) スピン流制御法の開発

拡散伝導から生じるスピン流の制御法に主眼を置き研究を遂行した。スピン緩和の難易度の指標であるスピン抵抗を考慮することにより、3次元的にスピン流回路を設計する手法を確立した。このデザイン手法を用いて作製したスピン流注入素子を用いてナノ磁性体の磁化反転[9]、磁壁の核発生[6]、スピンホール効果[1, 3]の検証実験に世界に先駆けて成功した。

5. これまでの進捗状況と今後の計画

ナノ磁壁のラチェット駆動に関しては、駆動条件も押さえられたので、検証実験を今年度完了させる予定である。

スピン流ラチェット素子については、これまでに得られた知見に基づいてスピン流

に対するラチェットポテンシャルの付加方法と素子化を引き続き検討する。

6. これまでの発表論文等

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- (1) "Evolution of the spin Hall effect in Pt nanowires: Size and temperature effects," L. Vila, T. Kimura and **Y. Otani**, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 22 6604-1~4 (2007).
- (2) "Controlled depinning of domain walls in a ferromagnetic ring circuit," M. Hara, T. Kimura and **Y. Otani**, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 242504-1~3 (2007).
- (3) "Room temperature reversible spin Hall effect," T. Kimura, **Y. Otani**, T. Sato, S. Takahashi and S. Mae kawa, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 156601-1~4 (2007).
- (4) "Rotational dynamics of paired nano-domain walls confined in an elliptical ring," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and **Y. Otani**, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 2451~2452 (2007).
- (5) "Magnetization process in a ferromagnetic disk measured by a semiconductor two-dimensional electron gas," M. Hara and **Y. Otani**, *J. Appl. Phys.* **101**, 056107-1~3 (2007).
- (6) "Domain wall nucleation assisted by nonlocal spin injection," T. Kimura and **Y. Otani**, *J. Phys. D: Appl. Phys.: Special Issue* **40**, 1285~1288 (2007).
- (7) "Control of domain wall pinning by a switchable magnetic gate," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and **Y. Otani**, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 1925 04-1~3 (2006).
- (8) "Detection of magnetic state in a nano-scale ferromagnetic ring by using ballistic semiconductor two-dimensional electron gas," M. Hara, J. Shibata, T. Kimura and **Y. Otani**, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 082501-1~3 (2006).
- (9) "Switching magnetization of nanoscale ferromagnetic particle using nonlocal spin injection," T. Kimura, **Y. Otani** and J. Hamrle, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 037201-1~4 (2006).

ホームページ

<http://www.riken.jp/lab-www/nanomag/indexjpn.html>