

(論文内容の要旨)

近年、微細加工技術を駆使して作製された強磁性細線中の単一磁壁電流・磁場駆動現象が多種多様な測定方法で観測、解析されている。電流によって磁壁を移動させるためには、磁壁内部の磁化が立ち上がることによって発生する反磁界のトルクに打ち勝つスピントルクを必要とする。すなわち、ある一定以上の電流密度(しきい電流密度: J_{th})が必要であることが知られている。磁壁電流・磁場駆動実験において用いられる代表的な磁性材料は、面内磁化材料の鉄とニッケルの合金($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$:Permalloy)であるが、Permalloy 細線中磁壁のしきい電流密度は、 10^{12} A/m^2 という非常に大きな値であることが明らかになっている。このような高電流密度を強磁性細線に印加するために、試料の温度上昇による磁区構造の不安定性という問題が起こる。一方で、(Ga, Mn)As に代表される磁性半導体を用いた磁壁電流駆動実験においては、しきい電流密度が 10^9 A/m^2 と Permalloy に比べて 1000 倍も小さいが、キュリー温度が室温より低いために、室温での動作は現段階で不可能である。したがって MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) に代表されるデバイス実現という応用的観点から述べると、しきい電流密度を低減するためには新規材料の探索が必要不可欠であることは言うまでもない。そこで、新規材料として垂直磁気異方性を有する強磁性体を選択した。また、磁壁が内部構造の変化を伴いながら細線中を伝播する場合には、同じ条件化でも一様な運動をしない、すなわち確率的な事象が現れることも明らかになっており、磁壁移動と磁壁内部の運動との関係を解明するためにより詳細な実験、解析が必要である。

しきい電流密度を低減するために、垂直磁気異方性を有する強磁性体(CoCrPt 合金, Co/Ni 多層膜)を選択し、微細加工技術を駆使して作製された強磁性細線における単一磁壁の電流駆動現象について調べた。CoCrPt 細線中の磁壁電流駆動現象は、磁気力顕微鏡(MFM)を用いて実空間観測を行った。Co/Ni 細線中の磁壁電流駆動現象においては、異常ホール効果を利用した電氣的検出によって測定を行った。その結果として、Co/Ni 細線におけるしきい電流密度の線幅依存性を明らかにした。その結果、細線幅 73 nm においてしきい電流密度が $\sim 5 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ と見積もられたことから、Permalloy のしきい電流密度に比べて約半分に低減することにも成功した。また、細線幅 160 nm における磁壁速度を見積もった結果、電流密度の増加と共に磁壁速度は増加する傾向にあり、 $1 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ において 60 m/s であることが分かった。

Permalloy 細線における磁壁磁場駆動実験においては、磁壁移動確率が磁場の上昇によって減少するという、特有の振る舞いをすることを明らかにした。これらの現象のメカニズムを解明するために、マイクロマグネティクス計算を用いて実験で起こった磁壁の確率的な挙動を考察した。その結果、外部磁場による磁壁移動確率は、実験結果と計算結果が半定量的に一致した。外部磁場によって磁壁が移動し、途中で磁壁が停止する原因は Walker breakdown による磁壁の内部構造の変化と細線のエッジラフネスの双方が関与する動的なピンングであることを明らかにした。

(論文審査の結果の要旨)

強磁性体を微細加工技術によって磁区構造を制御し、強磁性細線中の単一磁壁を電流によって駆動させる研究は、理論・実験ともに現在世界中で盛んに行われている。その理由の 1 つとして、電荷とスピンの 2 つの自由度を用いて物性を制御するスピントロニクス技術が、電荷に基づいた従来のエレクトロニクスでは実現が困難であったデバイスを作製可能にすると期待されているからである。学位申請者は、これまで磁壁電流駆動実験で用いられてきた鉄とニッケルの合金(Permalloy)に成り代わる新規材料として、垂直磁気異方性を有する強磁性体を選択し、その細線中の磁壁電流駆動現象を観測した。さらに、Permalloy 細線中の磁壁磁場駆動現象においては、磁壁内部の運動が引き起こす確率的な事象について明らかにした。

CoCrPt 細線中の磁壁電流駆動実験の結果は、Permalloy に比べてデピニング磁場が 20 倍近く大きいにも関わらず、同程度の電流密度によって磁壁移動が可能であることを示している。垂直磁化材料での磁壁電流駆動が面内磁化材料のものよりも有利であることを示した点で、応用上、非常に重要な結果であると評価される。

Co/Ni 細線中の磁壁電流駆動実験においては、CoCrPt 細線での実験結果を踏まえた上で、試料構造を工夫することによって、しきい電流密度の細線幅依存性、磁壁移動速度の測定、さらにはしきい電流密度の低減も実証している。これらの実験結果は応用面で非常に重要なものであると同時に、垂直磁化を有する磁壁構造が 1 次元モデルでの記述が適応可能であることを示した点で、基礎的にも意義のある研究成果である。

Permalloy 細線中の磁壁磁場駆動実験においては、磁壁移動を礎としたスピントロニクスデバイスを操作する際に、磁壁内部構造の運動がデバイス制御に重要な役割を果たすことを示すことに成功している。

以上に述べた研究成果は、世界中で熾烈な競いをしている磁壁電流・磁場駆動現象の研究分野の中で、先駆的な結果であり、現在盛んに行われているスピン注入磁化反転や磁壁移動現象を利用した MRAM に関する研究などのスピントロニクス分野の発展に貢献するものと高く評価させる。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認めた。なお、申請論文に報告されている研究業績を中心としてこれに関連した研究分野について試問し、その結果合格と認めた。