

学位論文の要約

題目 強磁性細線を用いた電流誘起磁壁回転現象の研究

氏名 平松 亮

第1章 序論

本研究の研究課題は主に2つに大別される。1つ目は電流誘起磁壁回転現象を明らかにすることである。具体的には、Co/Ni 細線に電流を印加することで細線内の磁壁にスピントランスファートルクを与え、磁壁が局在した状態での磁化の連続的な回転運動を検証する。2つ目は、ジャロシンスキー・守谷相互作用の強さを見積もることである。具体的には、ジャロシンスキー・守谷相互作用のために形成される 360° 磁壁構造の安定性とジャロシンスキー・守谷相互作用との関係を明らかにする。

第2章 磁壁移動に関する物理

本章では、本論文で扱う物理現象について記述している。まずは、本研究で取り扱っている磁壁について解説し、その後、電流あるいは磁場と磁壁との相互作用について述べている。電流あるいは磁場による磁壁移動を説明した後に、第4,5章で着目している磁壁回転現象について説明している。そして、第6章で着目しているジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)について説明し、磁壁とDMIとの相互作用について述べている。その後、本研究で用いたマイクロマグネティックシミュレーションについて説明し、最後に、本研究で磁壁移動の検出方法として用いた異常ホール効果について説明している。

第3章 試料作製および測定手法

本章では、本実験で用いた垂直磁気異方性を有する Co/Ni 多層膜の特性、作製方法、加工方法、および本実験で用いた測定方法について説明している。

特性、作製方法では、Co/Ni 多層膜が磁気異方性を有する起源を説明し、本研究で用いた Co/Ni 多層膜の磁気特性について述べている。加工方法ではまず、本研究で使用した装置について説明し、装置使用条件について述べている。次に、微細加工に用いたレジストについて説明し、その特性および塗布条件、後処理条件について述べている。最後に、レジストおよび装置を用いた実際の微細加工工程について述べている。測定方法では、本研究で用いた装置およびその周辺機器について説明し、電氣的測定で用いたプローブシステムについてその使用方法を述べている。

第4章 NiFe からの漏れ磁場を利用した磁壁のピンニング

本章および続く第5章では、スピントランスファートルクによる磁壁回転現象の実証を目的とした研究を記述している。強磁性体細線内の磁壁を他の強磁性体からの漏れ磁場を利用してピンニングする方法は、スピントランスファートルクによる磁壁回転のために必要な、磁壁を局在させる構造として提案されている。本章では、面内磁化 NiFe からの漏れ磁場を利用した垂直磁化 Co/Ni 細線内の磁壁のピンニングについて述べている。

試料として、垂直磁化 Co/Ni 多層膜をホールクロスを有する細線形状に加工し、作製した Co/Ni 細線の一部に局所的に長方形形状の $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{SiO}_2$ が積層された構造(NiFe 細線)を作製した。電氣的測定手法を用いて磁壁がホールクロスに到達するために要する磁場であるデピンニング磁場を測定し、磁気力顕微鏡を用いて NiFe 細線近傍の磁化状態を実空間観察した。

NiFe 細線がある試料ではない試料よりもデピンニング磁場が大きく、Co/Ni 細線の細線幅に関わらずほぼ一定の値となった。磁気力顕微鏡を用いた実空間観察から、NiFe 細線が単磁区化しており、磁壁が NiFe 細線近傍でピンニングされていることが確認された。これらの結果は、NiFe 細線からの漏れ磁場が磁壁のピンニングに有効に働き、ピンニングの強さは NiFe 細線からの漏れ磁場が支配的であることを示している。この成果は、磁壁回転素子に必要な磁壁を局在させる方法として、漏れ磁場を利用した磁壁のピンニング方法が有効であることを示すものである。

第5章 磁場と電流の同時印加による磁壁回転運動の誘起

電流によるスピントランスファートルクと磁場トルクが磁壁を反対方向に駆動させるように印加した時、磁壁が局在した状態で磁壁回転運動のみが誘起されることが理論的に予測されている。本章では、DC 電流を印加した状態で、デピンニング磁場以上の磁場を掃引した時のホール抵抗変化について述べている。また、電流と磁場の効果を考慮した磁壁運動方程式の1次元モデルとマイクロマグネティックシミュレーションによる解析で求めた磁壁ダイナミクスについて述べている。

本研究では、垂直磁化 Co/Ni 多層膜を細線幅 90 nm のホールクロス形状に加工した試料を用いた。最初に、磁場のみの磁壁駆動でデピンニング磁場を測定した。その後、電流を印加した状態で、電流による磁壁駆動方向とは反対方向に磁場を掃引して、各磁場でのホール抵抗を測定した。

ホール抵抗測定から、デピンニング磁場よりも十分大きい磁場を印加しても磁壁はホールクロス内に局在していることが分かった。この現象を解明するために、磁場と電流の効果を考慮した磁壁運動方程式の1次元モデルを解いた。その結果、磁場トルクとスピントランス

ファートルクが拮抗する時、磁壁が局在した状態で連続的な磁壁回転が誘起されることが分かった。さらに、マイクロマグネティックシミュレーションを用いた解析を行った。シミュレーション結果は実験結果を再現し、磁壁が局在している状態での連続的な回転運動を起こしていることが確認された。この成果は、電流と磁場を印加するだけという簡単な方法で、磁壁回転素子が実現可能であることを示すものである。

第6章 ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさの見積もり

近年、構造反転対称性が破れた強磁性体に発現するジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)が注目されている。DMIが存在すると、垂直磁化膜内の磁壁は磁化の向きが一意に決定された Néel 磁壁構造を形成する。強磁性細線内に磁壁が近接している場合、DMIのために安定構造として自発的に 360° 磁壁構造が形成される。本章では、DMIの強さと 360° 磁壁構造の安定性に着目し、安定性の指標である磁壁が対消滅する磁場の大きさと DMIの強さの関係から DMIを見積もることを目的に、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて解析を行った結果について述べている。

シミュレーションには MgO/Co/Ni/Co/Pt の積層構造を想定して、その物質パラメータを用いた。DMIの効果は、通常の磁気エネルギーに DMIによる反対称交換エネルギーを含めることでシミュレーションに取り入れた。初期状態として Co/Ni 細線内に2つの磁壁が 20 nm 離れて配置している状態を仮定した。この状態から垂直磁場を印加して、磁壁同士が対消滅する磁場(H_{annih})を求めた。このシミュレーションを Co/Ni 細線の細線幅、DMIの強さを変化させて行った。

DMIが十分強い場合、初期状態として配置した磁壁は自発的に 360° 磁壁構造をとることが確かめられた。また、垂直磁場を印加した時、隣接する磁壁は 360° 磁壁構造を保ったまま磁壁幅を狭め、最終的には磁壁同士が対消滅した。DMIの強さと H_{annih} の関係を調べた結果、 H_{annih} は DMIの強さに対して線形に増加し、細線幅にほとんど依存しないことが分かった。この成果は、 H_{annih} と DMIの間の線形性を利用することで、 H_{annih} の値から DMIの強さを見積もる新しい方法を与えるものである。

第7章 総括

第4章および第5章で述べた研究は、磁壁回転素子実現のための知見を与えるものである。第6章で述べた研究は、ジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)の大きさを決定するために有効な測定手法を提供するものであり、DMIの理解のために少なからず貢献するものである。