

学位論文の要約

題目 強磁性ナノ細線における磁壁電流駆動現象の機構解明

氏名 上田浩平

第 1 章 序論

本論文の主な研究課題は 2 つに区別される。1 つは、既に磁壁電流駆動の機構が明らかになっている対称構造を有する Co/Ni ナノ細線(Pt/[Co/Ni]/Pt)に着目している。具体的に、磁壁電流駆動の温度依存性を調査し、磁気特性[デビニング磁場、スピン分極率]とその物理機構の関係を明らかにすることである。他方は、新しい磁壁電流駆動現象が報告されている非対称構造を有する Co/Ni ナノ細線(MgO/[Co/Ni]/Pt)に着目している。具体的に、磁壁電流駆動の磁性層の膜厚依存性、外部磁場依存性、温度依存性を調査し、その物理機構の起源を明らかにすることである。2 つの Co/Ni 系に着目することで、磁壁電流駆動現象の機構解明を行う。

第 2 章 磁壁駆動に関する物理

磁壁が外部磁場と電流で駆動する物理について記述している。特に、4 章と 5 章の研究成果を理解する上で必要な磁壁電流駆動の物理とそれまでの実験などについて述べている。第 4 章で着目している磁壁電流駆動は伝導電子スピンと局在スピン間の角運動量移行によって起こる現象である。その時に生じるトルクは、一般的にスピントルクと呼ばれ、磁壁を電子方向に移動させる。一方、第 5 章では、新しい磁壁電流駆動現象について述べている。これは、磁性層に電流を流すことで生じる現象(スピントルク)とは異なり界面で起こる現象である。本章の最後には、本研究で磁壁駆動を検出するための異常ホール効果の物理について述べている。

第 3 章 試料作製および測定手法

実験に使用した垂直磁気異方性を有する対称構造および非対称構造を有する Co/Ni 多層膜の作製方法および微細加工、測定手法について説明する。第 4 章で使用した Co/Ni の上下に Pt が挿入された対称構造を有する多層膜は NEC デバイスプラットフォーム研究所で作製して頂き、成膜は DC マグネトロンスパッタを用いて行われた。また、第 5 章で使用した Co の上に MgO が挿入された非対称構造を有する多層膜はルネサスエレクトロニクスで作製して頂き、成膜は対称構造と同様に DC マグネトロンスパッタを用いて行われた。

微細加工は、本研究で用いた試料を電子線リソグラフィーによって素子パターンを描画し、スパッタ成膜およびアルゴンイオンミリングを用いて行われた。

測定手法に関しては、異常ホール効果を測定することで磁壁駆動の検出を行っている。低温における磁壁の電流駆動実験は東陽テクニカの低温プローバー装置を用いて行った。試料をプローブする時の装置は、超伝導マグネットを内蔵しているので面直方向に最大 2.5 T の磁場を印加することが可能である。また、室温での磁壁電流駆動実験において、面直方向に磁場を印加する際は東栄科学産業株式会社の垂直プローバー（最大磁場 0.8 T）を、面内方向に磁場を印加する際は同会社の全方位プローバーを用いた。

第 4 章 対称構造を有する Co/Ni 細線における磁壁電流駆動現象

Pt/[Co/Ni]/Pt 系では、断熱スピントルクが磁壁駆動を誘起し、その閾電流密度は細線形状で低減できることが示されている。それでもその閾電流密度は試料の発熱を無視できない程の電流密度であり、強磁性体の磁気特性に及ぼす影響が問題

である。詳細な磁壁電流駆動機構を理解するためには温度と磁壁電流駆動の関係を明確に理解することが求められる。そこで本研究では、磁壁電流駆動の温度依存性を調べることを目的とした。

磁性層の膜厚 5.1 nm で数百 nm の幅を有する試料を作製し、閾電流密度とデピニング磁場の温度依存性に着目して実験を行った。その結果、細線中の欠陥やラフネスに依存するデピニング磁場(外的ピニング)は低温で増大するが、閾電流密度は温度に依存しないことが分かった。これは、今まで盛んに研究されてきた面内磁化を有する NiFe の閾電流密度が外的ピニングに依存する結果と完全に異なる。一般的に、NiFe と比べ Co/Ni はその大きなデピニング磁場のために高い熱安定性をもつことが分かっている。そのために、垂直磁化 Co/Ni ナノ細線の磁壁電流駆動は、高い熱安定性と閾電流密度の低減の両立が可能であり、磁壁駆動を元にしたデバイスの材料として非常に有望である。

さらに、断熱スピントルクで誘起される磁壁移動速度の温度依存性を調査することで、スピン分極率の温度依存性を見積もった。これにより、100 K 程の低温から 530 K 程のキュリー温度に近い温度付近までの広範な温度領域のスピン分極率を決定できた。これは、磁壁電流駆動を用いた材料定数の新たな評価法を確立できたことを意味しており、非常に意義深い。

第 5 章 非対称構造を有する Co/Ni 細線における磁壁電流駆動現象

磁性層の膜厚が 1.2 nm の MgO/[Co/Ni]/Pt 系で、磁壁は電流方向に動くことが報告されている。しかし、この系において電流方向に動く機構は明らかになっていない。本研究では、非対称構造を有する Co/Ni ナノ細線における磁壁電流駆動の膜厚依存性、外部磁場依存性、温度依存性を調べその機構解明を目的とした。

磁性層の膜厚が 1.2 nm~8.4 nm の Co/Ni 多層膜を幅 220 nm のナノ細線に加工し、試料を作製した。磁壁電流駆動実験の膜厚依存性から、1.2 nm と 2.1 nm で磁壁は電流方向に移動し、6.6 nm~8.4 nm で磁壁は電子方向に移動することが分かった。この結果は、膜厚を厚くすることで同機構が界面の効果からスピントルクへと遷移していることを示唆している。さらに、電流または電子方向への磁壁駆動の起源を探るために外部磁場依存性を調べた。その結果、薄い膜厚でジャロシンスキー・守谷相互作用 [磁壁構造を決定するために有効磁場を生じる、(DMI)]とスピンホール効果が磁壁を電流方向に動かし、厚い膜厚で断熱スピントルクが磁壁を電子方向へと動かしていることが明らかになった。また、理論モデルを使い、非断熱トルク、スピンホール角と DMI の大きさを定量的に見積ることに成功した。

さらに、膜厚 2.1 nm の磁壁電流駆動の温度依存性を調べることで、閾電流密度とデピニング磁場が低温で増大することを観測した。この結果は、閾電流密度が温度とデピニング磁場に依存しない対称構造を有する Co/Ni ナノ細線と明確に異なっている。非対称構造を有する Co/Ni ナノ細線において、スピンホール効果を起源として誘起される磁壁駆動は、閾電流密度が外的ピニングで決定されていることを強く示唆するものである。

第 6 章 結論

これらの成果は、磁壁電流駆動研究において盛んに使用されてきた材料である Co/Ni 多層膜に着目したものである。また、その構造対称性を破ることで新たな磁壁電流駆動機構が出現することを示しており、その機構解明を行ったことで学術的に先駆的かつ意義深いものである。磁壁電流駆動現象を利用したメモリデバイスを実現するためには、複数磁壁電流駆動や書き換え耐久性の強化などまだまだ解決すべき問題が山積みである。本研究成果は、磁壁駆動機構と温度、断熱スピントルクの効果と界面の効果の相関を明らかにしているため、そうした課題を解決する糸口になるものとして位置づけられる。従って、磁壁電流駆動のみならずスピントロニクス全体の発展に少なからず貢献するものであると考えている。