

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	上田 浩平
論文題目	強磁性ナノ細線における磁壁電流駆動現象の機構解明		
(論文内容の要旨)			
<p>電流によって強磁性体中の磁壁を駆動する磁壁電流駆動現象の研究は、物理的な興味だけでなく、不揮発性磁気メモリへの応用の観点からも注目を集めている。磁壁電流駆動現象のメカニズムとして、磁性層に流れる伝導電子のスピンから局在スピンへの角運動量移行によるトルク (断熱スピントルク) が提案され、磁壁が電子の流れる方向へ移動することやその移動速度が、このメカニズムによって説明されてきた。しかし、最近、酸化物/強磁性体/非磁性体のような非対称構造の垂直磁化膜において、従来の断熱スピントルクによるメカニズムでは説明出来ない電子の流れに逆行する磁壁移動が報告された。本研究では、これらの矛盾した実験結果を理解するために、対象構造を有する Pt/[Co/Ni]/Pt 系と非対称構造を有する MgO/[Co/Ni]/Pt 系における磁壁電流駆動現象を系統的に研究することで、強磁性ナノ細線における磁壁電流駆動現象の機構解明を行った。</p>			
<p>対称構造を有する Co/Ni ナノ細線における磁壁電流駆動現象について</p> <p>対称構造を有する Co/Ni 細線において断熱スピントルクが磁壁の移動を誘起することが明らかになっている。その閾電流密度は内的ピニングによって決定され、細線形状により容易に低減できることが実現できる。それでも、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必要不可欠である。そこで、閾電流密度と磁壁移動速度の温度依存性を調べた。まず、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。このことから、垂直磁化 Co/Ni 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。その結果、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でスピン分極率を決定できた。</p>			
<p>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現象について</p> <p>磁性層の厚さが 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磁壁駆動機構が界面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、DMI とスピンホール効果が磁壁を電流方向に動かし、断熱スピントルクが磁壁を電子方向へと動かしている要因であることを明らかにした。また、従来のモデルを使い、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、閾電流密度を決定する要因が外的ピニングであることを強く示唆する結果である。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、「対称構造を有するCo/Niナノ細線における磁壁電流駆動現象」、「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現象」の2つの内容で構成されている。

対称構造を有する Co/Ni ナノ細線における磁壁電流駆動現象では、対象構造を有する Pt/[Co/Ni]/Pt 系において細線幅を変えた系統的研究を行うことで、断熱スピントルクによって磁壁が電子の流れる方向へ移動し、その閾電流密度(J_{th})は磁気異方性由来の内因性ピニングによって決定されることを示した。さらに、磁壁電流駆動現象の温度依存性を調べた結果、細線中の欠陥やラフネスに起因するデピニング磁場(外因性ピニング)は低温で大きく増大するが、 J_{th} は温度にほとんど依存しないことが明らかとなった。この結果は、温度依存性が小さい内因性ピニングによって J_{th} が決定されていることを支持するものである。内因性ピニングと外因性ピニングを独立に制御することで、 J_{th} の低減と高い熱安定性の確保の両立が可能であることを示唆しており、応用上も重要な意義を持つといえる。さらに、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(P)の温度依存性を 100 K からキュリー温度に近い 530 K の温度付近までの広範な温度領域において見積もった。このことは、スピントロニクス分野で重要な材料定数であるスピン分極率の新たな測定手法を確立したという点でも大きな意義を持つ。

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現象では、非対称構造を有するMgO/[Co/Ni]/Pt系を用いて、磁性層の膜厚が1.2 nm~8.4 nmの範囲で磁壁電流駆動の膜厚依存性実験を行った。その結果、磁性層の厚さが1.2 nmと2.1 nmでは磁壁は電子の流れに逆行する方向に移動し、6.6 nm~8.4 nmで磁壁は電子の流れる方向に移動することが分かった。つまり、磁性層の厚さによって磁壁移動方向が逆転することが明らかとなった。この結果は、厚い磁性層では従来の断熱スピントルクによって磁壁移動が起こるが、磁性層が薄い場合は界面の効果による新たな磁壁駆動メカニズムが支配的となることを示唆している。この界面における新たな磁壁駆動メカニズムの起源を探るために外部磁場依存性を調べた。その結果、Ptに流れる電流がスピンホール効果によって膜面垂直方向のスピン流を生じさせる。そのスピン流が界面におけるジャロシンスキー・守谷相互作用によってカイラリティが固定された磁壁に流入することで磁壁移動が起こることが明らかとなった。実験結果を理論モデルによって解析することで、非断熱スピントルク、スピンホール角とジャロシンスキー・守谷相互作用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た結果、 J_{th} とデピニング磁場はともに低温で増大することが明らかとなった。この J_{th} とデピニング磁場の間の強い相関は、非対称構造を有するCo/Niナノ細線でのスピンホール効果を起源とした磁壁駆動において、 J_{th} 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。以上の結果は、これまで謎とされてきた電子の流れに逆行する磁壁移動のメカニズムを明らかにしたものとして大きな意義がある。

以上のように、本研究の成果は電流駆動磁壁移動メカニズムの解明という点で学術的、技術的に大きな意味を持っており、スピントロニクスの分野の発展に大きく貢献したものと言える。したがって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行ない、その結果合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降