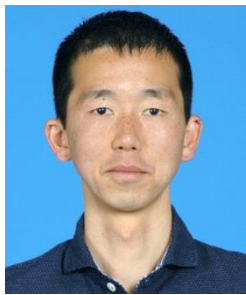


非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material



守谷 頼 (Rai MORIYA, Ph. D.)

東京大学生産技術研究所 助教

(Assistant professor, Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

American Physical Society 日本物理学会 応用物理学会

研究専門分野：半導体工学 磁性 ナノ材料物性

あらまし 強磁性体内には異なる磁気モーメントの方向を持った磁気ドメインが存在する。この磁気ドメイン間の境界面は磁壁と呼ばれる。磁壁の幅は、材料にもよるが 10~100 ナノメートル程度であり非常に小さい。最近このような磁壁を情報の記憶素子として活用し、不揮発メモリとして用いる研究が注目を集めている。磁性体は情報の保持期間が非常に長いという特徴を持ち、さらに上述のように磁壁は非常に小さいため高密度の情報記録に適している。このような磁壁を用いた不揮発メモリへの実現のためには、磁壁への情報の書き込み、読み出し方法の確立が重要である。本研究では、磁壁の読み出す方法の確立を目指し、その手法として磁性体を一切使わない非磁性体を用いた磁壁の検出に関しての実験を行った。異方性磁気抵抗効果を用いることにより、非磁性電極を用いてナノ秒の時間分解能で磁壁の運動を観測することに成功した。

1. 序論

近年の情報入力端末の市場は情報転送技術の向上により、i-phone, i-pad に代表されるような軽量かつ安価なポータブルデバイスへとその主力が移行してきている。このようなポータブルデバイスにおいては大型、低速なハードディスク (HDD) より小型、軽量で高速なフラッシュメモリが主に使用される。フラッシュメモリが動作する速度は現在 100 ミリ秒程度である。比較して、パソコンの中で最も高速で動作する中央演算処理装置 (CPU) の動作速度は 1 ナノ秒程度であり、これらの動作速度の間には 8 桁もの差がある。実際の端末内部では CPU とフラッシュメモリの間に何段階もの、情報を一時的に保存するためのメモリが配置されている。しかしこれらのメモリの中でも一番速度の遅いダイナミック・ランダム・アクセス・メモリ

(DRAM) の動作速度はおよそ 100 ナノ秒であり、フラッシュメモリとの間に大きな動作速度のギャップが存在する。この速度ギャップのために端末の情報処理速度は FLASH によって大きく限定されている。このギャップを埋めることができる 1 μ s 以下の高速動作と、フラッシュメモリ並の高記録密度、長寿命な不揮発メモリは近年“記録クラスメモリ”と呼ばれ、フラッシュメモリと DRAM の市場を全て置き換えるような産業技術として注目されている。

このような次世代の記録クラスメモリとして最も注目されているのが、IBM によって提唱された、磁気レーストラックメモリである[1]。レーストラックメモリの仕組みについては図 1 を用いて説明する。レーストラックメモリでは強磁性体細線中の磁気ドメインに情報を記録する。強磁性体細線には書き込み素子によって情報が磁化方向として記録される。異なる磁化方向を持つドメイン間の境界面が磁壁である。近年スピントルク効果という現象が発見され、強磁性細線に沿って電流を流すだけで電子が流れる方向に磁壁を移動させることが可能になってきた。磁壁を移動させた後、読み出し素子によって磁気ドメインに書き込まれた磁化情報を読み取ることにより、一組の書き込み、読み出し素子によって全ての磁気ドメインにアクセスできる特色を持つ。強磁性体細線の特長として 2 次元の面内方向だけでなく、3 次元すなわち面直方向にも細線

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

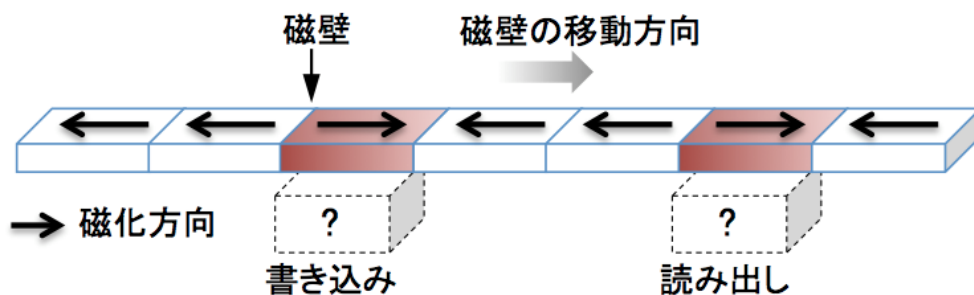


図1 磁気レーストラックメモリの原理

を伸ばすことが可能であるため情報の記録密度が大幅に向上させることが可能である。レーストラックメモリの実現のために最も大きな課題が磁気ドメインに記録された情報の読み出し方法である。これまでに研究されている読み出し技術では強磁性体材料を情報の読み出し素子に用いているため、読み出し素子と磁気ドメインの間の磁氣的結合に起因する書き込み情報の不安定化が問題となっていた。本研究では強磁性体を用いない磁気ドメインの検出方法の確立を目指して研究を行った。

研究目的でも述べたように、レーストラックメモリでは3次元に集積された強磁性体細線中の磁気ドメインに情報を記録する[図2(a)]。情報が記録された磁気ドメイン間の境界面(磁壁)をシフトさせることによって1つの書き込み、読み出し素子により全ての磁気ドメインにアクセスできる特色を持つ。レーストラックメモリの実現のために最も大きな課題が磁気ドメインに記録された情報の読み出し方法である。これまで磁気ドメインの読み出しには、図2(b)に示すようなトンネル磁気抵抗(TMR)効果を用いることが最も有効と考えられてきた[1]。TMR効果は磁気ドメイン内の磁化とセンサ層の磁化が並行か反平行かによって、素子に垂直に流れる抵抗の方向が変わる現象である。しかしながらこの方法は、図中赤の矢印で示すようなセンサ層と磁気ドメインの間の磁氣的結合により磁気ドメインの移動が影響を受ける事、また素子作製が非常に困難である事などの深刻な問題があり、全く新しい読み出し方法が求められていた。

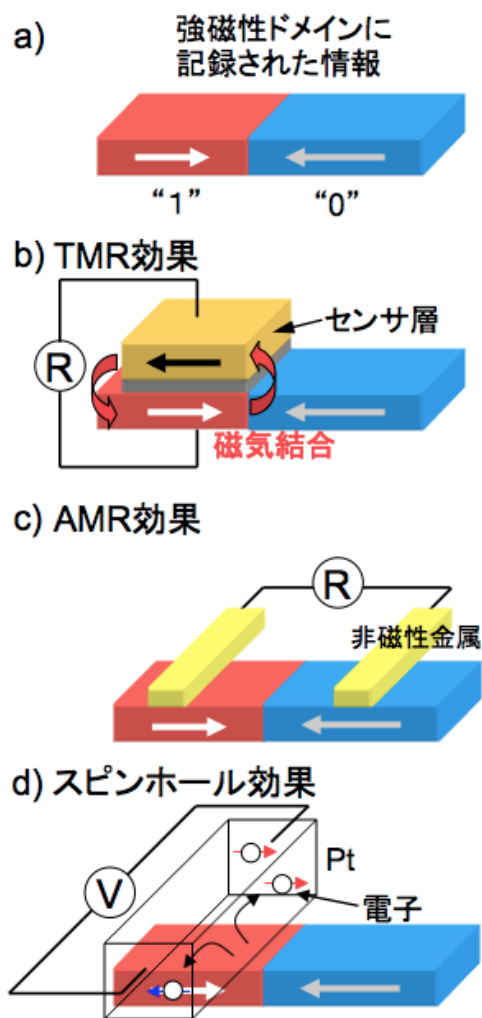


図2 磁気ドメインの読み出し方法

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

強磁性体には必ず異方性磁気抵抗 (AMR) 効果というものが存在するため、磁壁が存在すると強磁性体細線の抵抗は変化する。つまり細線の抵抗を測定するだけでも磁壁の有無は判断することができる。このことを利用して、今回筆者らは図 1(c)に示すような非磁性金属を用いて磁壁の AMR を測定することより、磁気ドメインの運動に影響を与えることなく、その移動を検出できることを提案しその実証実験を行った。また今後の展開として、スピンホール効果[2][3][4]という近年発見された効果を用いることによって、図 1(d)のように非磁性体金属の Pt と強磁性細線の接合を作るだけで、磁気ドメインの運動を電氣的に検出する手法を提案する。

2. 背景

磁壁を用いたメモリに関する提案は古くからあったが、実用化に向けた研究が大きく発展したのはスピントルク効果の発見以降であろう[5]。スピントルク効果とは何かについての詳細は参考文献に譲るとして、この効果を用いると強磁性体に電流を流すだけでその磁化方向および磁壁の位置を制御することが可能となる。百ナノメートル以下の小さなサイズでは、スピントルク効果は磁場と比べてはるかに効率がよいため、メモリの高密度化には有利である。スピントルクを最大限に活用した不揮発磁気メモリが序論で紹介したレーストラックメモリであると言える。レーストラックメモ

リの基本原理は 2010 年に筆者を含む IBM のグループによって実験的に示された[6]。この時磁性体としてはパーマロイという磁化が薄膜面内方向を向いている材料を使用していたが、その後世界中の研究者により材料研究が進められ、薄膜面直方向に磁化が向いている垂直磁気異方性を持った材料が現在では主流になっている[7][8][9]。レーストラックメモリの書き込み、読み出しに関しても世界中で研究が進められているがこちらに関しては未だ発展途上であり、新しい手法の確立が望まれている状況である。

3. 方法と成果

これらの背景を踏まえ、本研究では非磁性体を用いた磁壁の運動の検出方法の確立を目指し研究を行った。強磁性体として NiFeCo を用い、NiFeCo 細線中の磁壁の移動速度とその細線形状との関連性に関する研究を行った。図 3 に作製した素子の電子顕微鏡写真を示す。Au 電極 c1 及び c2 はナノ細線へ直接接しており細線の電気抵抗を測定するために用いる。電極 c3~c8 とナノ細線との間には 50 nm の厚みの酸化アルミニウム (Al_2O_3) が挿入されており、電氣的にナノ細線と隔離されている。このようなデバイスを用いて NiFeCo 細線の長さを一定に保ちながら、その幅および厚みを変化させることにより細線中を運動する磁壁の移動速度を測定した。測定の手順を以下に示す[10]。

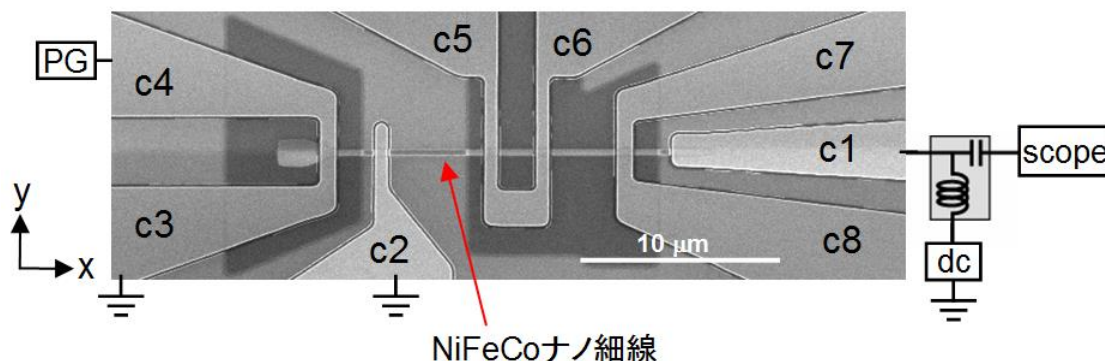


図3 ナノ細線デバイスの構造

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

- (1) $-x$ 方向に 700 Oe の磁場を印可し強磁性体の磁化を $-x$ 方向に飽和させる。
- (2) 磁場を細線と $+x$ 方向任意の値 (0 ~ 80 Oe) に設定する。この時に細線左端にあるパッド部分に磁壁が生成される。
- (3) パルス発振機 (PG) より、電流パルス (パルス幅 ~10 ナノ秒) を電極 c3 と c4 の間に流す。電流パルスによって電極の下には $+x$ 方向の磁場が発生し、パッド部分の磁壁がナノ細線内に注入される。
- (4) 細線内に注入された磁壁は外部磁場によって細線右端まで伝搬する。
- (5) 磁壁の異方性磁気抵抗効果により、ナノ細線の抵抗は磁壁が存在すると低下する。この抵抗の変化を電極 c1 に接続したリアルタイムオシロスコープを用いて測定することができる。図 4 に示すように、電極 c1 と c2 の距離 (~20 μm) をその間を移動するために要した時間で割ることにより磁壁の移動速度 v_{DW} が求められる。

このようにして磁壁の移動速度 v_{DW} とその外部磁場依存性を、異なる強磁性体細線の厚み (14 nm, 28 nm) および異なる細線幅 (300 nm~600 nm) に対して測定した結果を図 5 に示す。図中(a)~(d)が膜厚 14nm、(e)~(h)が膜厚 28 nm に相当する。また測定中に細線内に流している DC 電流の密度をそれぞれ図中に示している。測定結果より磁壁の移動速度は大きく細線の膜厚およびその幅に依存しているということがわかる。

この現象は 3 つの領域に分けられる[10][11]。それらは (A) 低磁場における磁壁の速度が外部磁場に対してほぼ比例して増加する領域、(B) 中磁場における外部磁場に対して速度が減少する領域、(C) 高磁場において再び速度が増加する領域、の 3 つの領域である。領域 (A) と (B) の間で磁壁の速度がピーク構造を持つ部分はウォーカーブレークダウン (WB) と呼ばれている[11]。WB より低磁場では磁壁はその構造を保ちながら外部磁場に沿って並進運動を行うのに対して、WB より高磁場では磁壁はその構造を変化させながら運動するため速度が低下する。

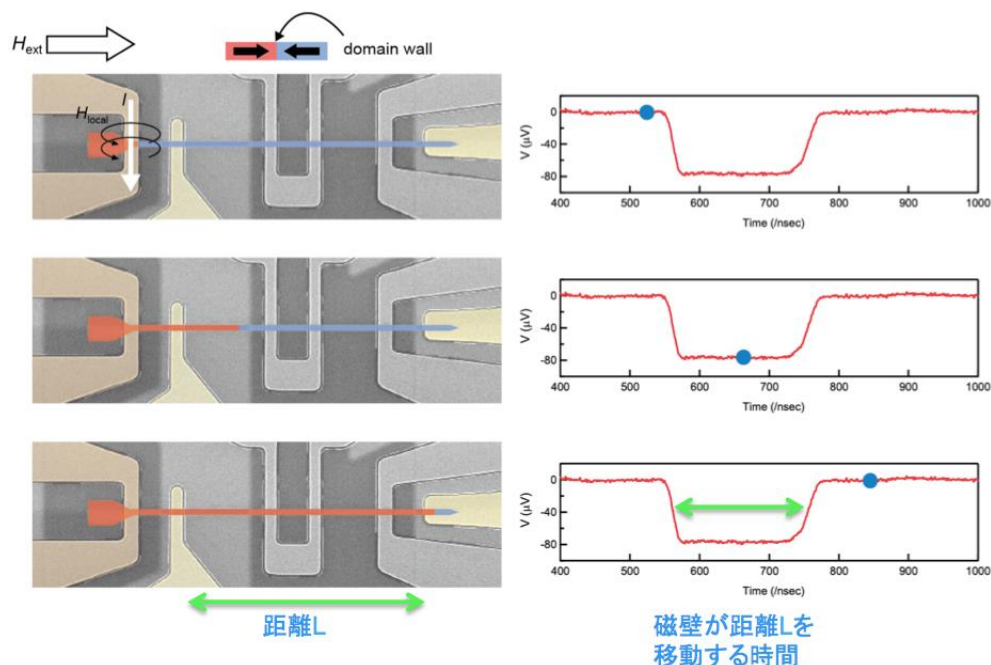


図 4 磁壁の移動速度の測定方法

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

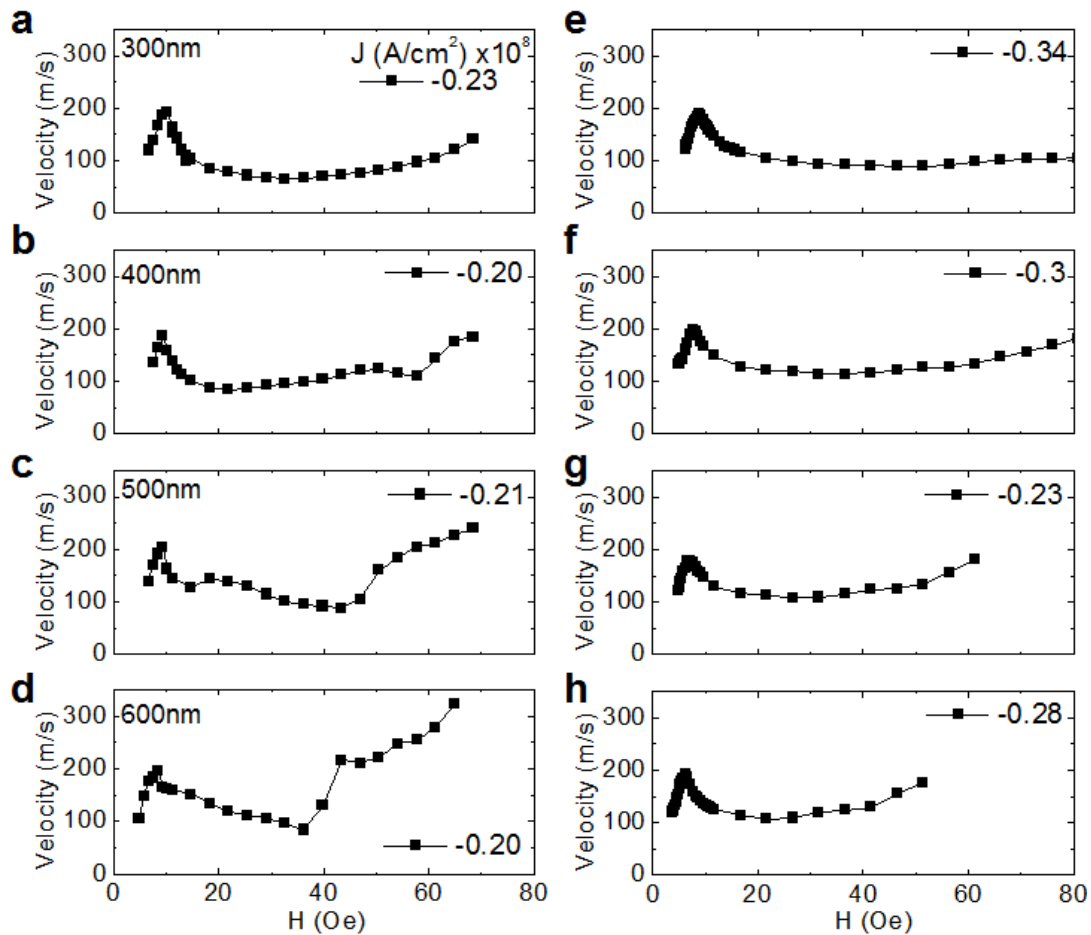


図5 NiFeCo 細線における磁壁の移動速度と外部磁場 H_x の関係
それぞれ膜厚が 14 nm (a-d) と 28 nm (e-h) の場合

このような WB の現象はこれまでに 1 次元モデルという解析的なモデルによって説明できることが知られている[11]。筆者らは WB を特徴付ける 3 つのパラメータに注目した。それらは (A) の領域における磁壁の移動度 μ と WB のピーク磁場 H_{WB} 、および WB における速度 v_{WB} である。これらは 1 次元モデルでは以下のようにあらわされる。

$$\mu = \frac{v_{DW}}{H} = \frac{\gamma \Delta}{\alpha}$$

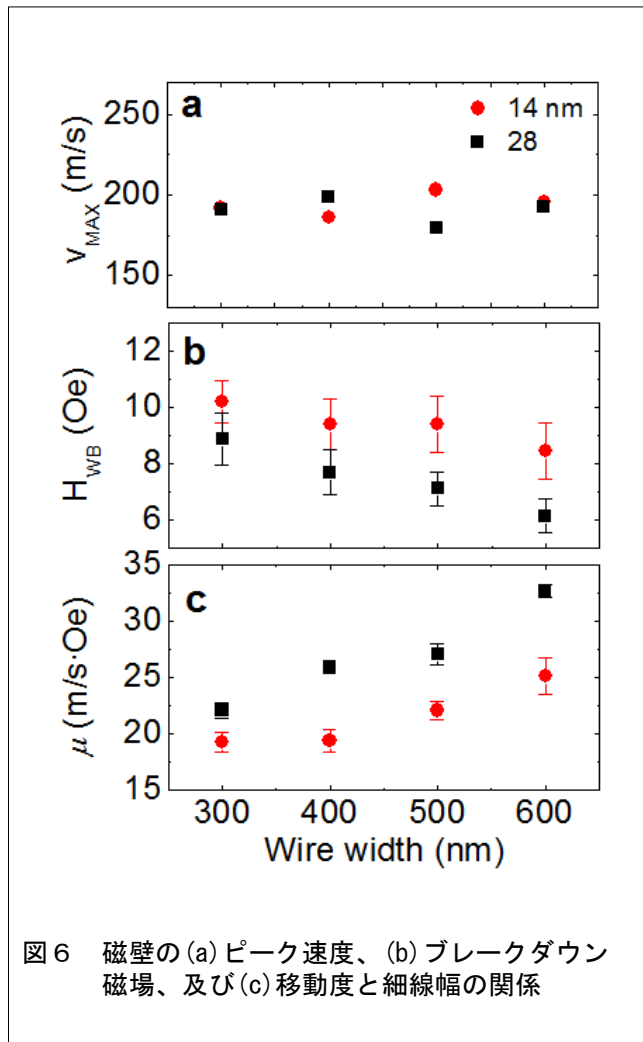
$$H_{WB} = \frac{\alpha H_{\perp}}{2}$$

$$v_{WB} = \frac{\gamma \Delta H_{\perp}}{2}$$

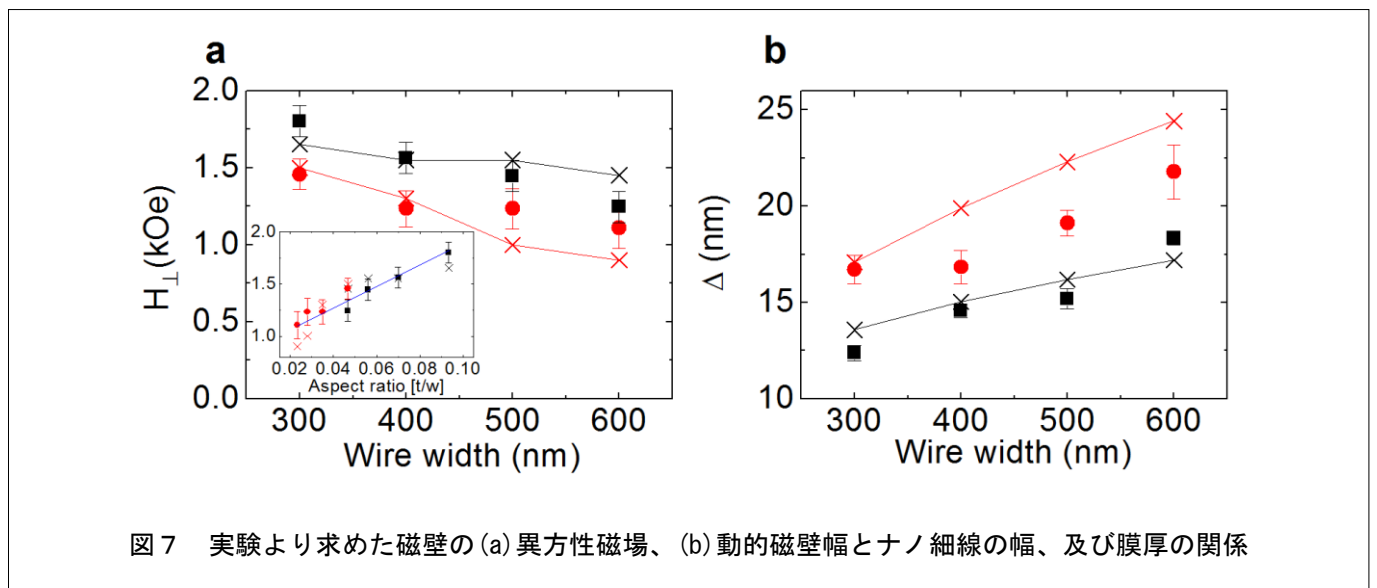
ここで α はギルバートダンピング定数、 γ はジャイロ磁気定数、 Δ は動的磁壁幅[12]、 $H_{\perp}$ は磁壁の異方性磁場である。実験より得られたこれらのパラメータを図 6 に示す。ここでダンピング定数 α はそれぞれの膜厚に対して $\alpha=0.015$ (14 nm thick), 0.01 (28 nm thick) を用いた。この値と実験データを用いて Δ と $H_{\perp}$ を求めた結果を図 7 に示す。それぞれ細線の形状に対して増加または現象している。この 2 つのパラメータが細線の幅に関して逆の依存性を示すため、 v_{WB} は細線の形状に対してほとんど依存性を示さないことがわかる[図 6(a)]。

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material



筆者らはさらに、これらの得られたパラメータ Δ と $H_{\perp}$ をマイクロマグネティックシミュレーションと呼ばれる有限要素法解析の結果と比較した[13]。筆者らは実験の細線と同じ膜厚と細線幅、さらに NiFeCo の飽和磁化を用いて計算を行った。ギルバートダンピング定数 α はどの場合も 0.01 を用いた。動的磁壁幅 Δ は定常状態で得られる磁壁の構造から、磁壁の異方性磁場 $H_{\perp}$ はシミュレーション中における WB の磁場から求めた。これらの結果を図 7 に実線で示している。図からわかるように、実験結果とシミュレーションの結果は良い一致を示している。マイクロマグネティックシミュレーションにおいては NiFeCo の材料パラメータと細線の形状の情報から系のエネルギーを計算している。このことは、実験で得られた Δ と $H_{\perp}$ は、細線の形状特に断面の形状から説明ができるということになる。つまり、磁場下での磁壁の運動においてはギルバートダンピングおよび細線形状の両方が大きく影響しているということを示している。低磁場での移動速度の最大値は形状には依存しないことがわかった。しかしながら、低磁場での移動度すなわち外部磁場に対する磁壁の移動速度の増加率は細線の形状に大きく依存していることがわかる。細線の膜厚に対して幅を大きくとることで移動度をより大きくできるため、より低い磁場で大きな磁壁の移動速度が得られることが期待できる。



非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

4. 将来展望

今回の研究の結果、強磁性細線中における磁壁の運動には2つの要素が大きく影響を与えていることがわかった。それらは(1)強磁性体の断面形状によって決定される磁壁の磁気異方性エネルギー、および(2)強磁性体のギルバートダンピング定数、である。次の展開として、スピン軌道相互作用の大きい非磁性体Ptと強磁性体の接合を作製しスピンホール効果を用いて磁壁の移動を検出する方法について述べる。強磁性体を用いなくて磁気ドメインを検出するためには、磁気ドメインの磁化情報、すなわち磁化の向いている方向によって、非磁性に生ずる電気的信号が変化するという特徴を持った現象を活用しなければならない。近年、発見されたスピンホール効果はこのような要請を満たしている。スピンホール効果は電子のスピン軌道相互作用に起因しており、伝導電子がそのスピンの方向に応じて異なる方向に散乱される現象である。この逆過程である逆スピンホール効果を用いると、非磁性材料に注入された電子のスピン偏極の向きによって、材料の端に起電力が生じる。この効果を利用することにより、強磁性体ではなくスピン軌道相互作用の大きな非磁性体を用いて細線中の磁気ドメインの運動を検出できると期待される。この手法は、スピン軌道相互作用の大きな非磁性体(Pt)と強磁性細線の単純な接合構造を作るだけで磁気ドメインの読み出しが可能となること、さらに非磁性体を用いるため強磁性ドメインの運動を全く妨げないこと、といった長所がある。スピンホール効果を用いた磁壁移動検出のためのデバイス構造を図8に示す。電流を $+I \rightarrow -I$ に流すとNiFeの中でスピン偏極された電子が、Ptへ注入される[図8(a)]。このときPt電極の両端の $+V, -V$ の間の電圧を測定するとスピンホール効果により電圧が発生する[2][3][4]。スピンホール起電力は電極直下の磁気ドメインの方向に依存するため[図8(a), (b)]、Ptの起電力を測定することで磁気ドメインの情報を読み出すことが可能となる。このようなスピンホール効果をドメインの検出に用いるというアイデアはこれまでに報告例がない。この手法では以下に示す長所がある。

- (1) 非磁性のPt金属を用いるため強磁性ドメインの運動を全く妨げない。
- (2) 非常に単純な、Ptと強磁性細線の接合構造で磁気ドメインの読み出しが可能となる。
- (3) あらゆる強磁性体に適用可能である。

今回、得られた磁性細線の形状と速度に関する知見を生かして今後さらに非磁性体を用いた磁壁の運動の検出方法の研究が進んでいくことが期待される。

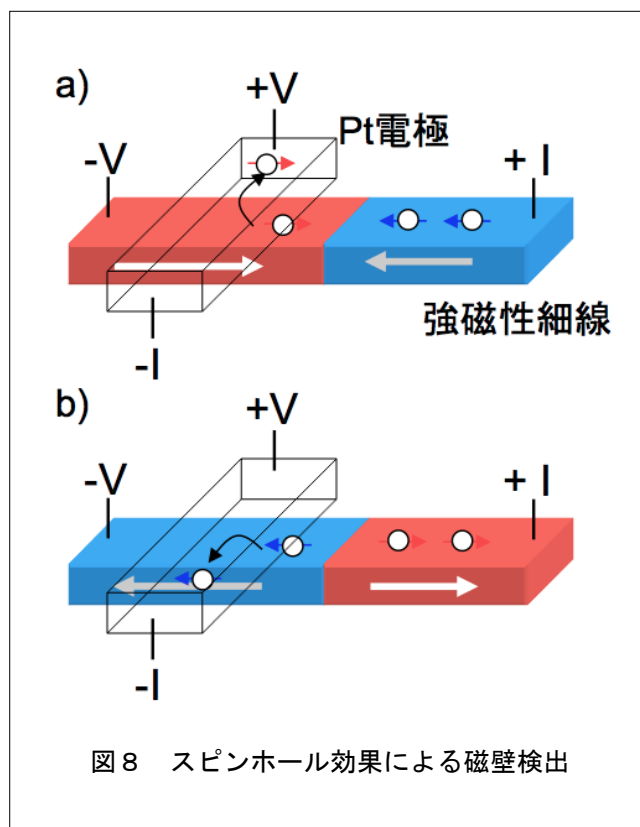


図8 スピンホール効果による磁壁検出

参考文献

- [1] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* **320** 190 (2008).
- [2] E. Saitoh, *Appl. Phys. Lett.* **88** 182509 (2006).
- [3] T. Kimura, Y. Otani, T. Sato, S. Takahashi, and S. Maekawa, *Phys. Rev. Lett.* **98** 156601 (2007).

非磁性体を用いた強磁性体細線中の磁壁移動の検出

Detection of magnetic domain wall motion by using non-magnetic material

- [4] S. O. Valenzuela and M. Tinkham, *Nature* **442** 176 (2006).
- [5] D. C. Ralph and M. D. Stiles, *J. Magn. Magn. Mater.* **320** 1190 (2008).
- [6] M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner, and S. S. P. Parkin, *Science* **320** 209 (2008).
- [7] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. Parkin, *Nature Nanotech.* **8** 527 (2013).
- [8] KoyamaT, UedaK, K. J. Kim, YoshimuraY, ChibaD, YamadaK, J. P. Jamet, MouginaA, ThiavilleA, MizukamiS, FukamiS, IshiwataN, NakataniY, KohnoH, KobayashiK, and OnoT, *Nature Nanotech.* **7** 635 (2012).
- [9] S. Fukami, M. Yamanouchi, S. Ikeda, and H. Ohno, *Nature Commun.* **4** (2013).
- [10] M. Hayashi, L. Thomas, Y. B. Bazaliy, C. Rettner, R. Moriya, X. Jiang, and S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.* **96** 197207 (2006).
- [11] N. Schryer, *J. Appl. Phys.* **45** 5406 (1974).
- [12] Y. Nakatani, A. Thiaville, and J. Miltat, *J. Magn. Magn. Mater.* **290-291** 750 (2005).
- [13] LLG Micromagnetic Simulator developed by Mike Scheinfein, llgmicro.home.mindspring.com.

この研究は、平成22年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成23～24年度に実施されたものです。