

スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動

Current-Driven Domain Wall Motion Due to the Spin-Transfer Effect

山口明啓・谷川博信・小野輝男・那須三郎・三宅耕作*・壬生 攻**・新庄輝也***

大阪大学大学院基礎工学研究科, 大阪府豊中市待兼山町 1-3 (〒560-8531)

*京都大学化学研究所, 京都府宇治市五ヶ庄 (〒611-0011)

**京都大学低温物質科学研究センター, 京都府宇治市五ヶ庄 (〒611-0011)

***国際高等研究所, 相模郡木津町木津川台 9-3 (〒619-0225)

A. Yamaguchi, H. Tanigawa, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake*, K. Mibu,** and T. Shinjo***

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560-8531

*Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, 611-0011

**Research Center for Low-Temperature and Materials Sciences, Kyoto University, Gokasho, Uji, 611-0011

***International Institute for Advanced Studies, 9-3 Kizugawadai, Kizu-cho, Soraku-gun, 619-0225

We report direct observation of current-driven domain wall (DW) motion by using a well-defined single DW in a micro-fabricated magnetic wire. Magnetic force microscopy was used to visualize the current-driven DW motion. We measured the depinning field of the DW and the critical electric current density for the current-driven DW motion at several pinning sites.

Key words: magnetic force microscopy, spin transfer, domain wall, spintronics

1. はじめに

Magnetoresistive Random Access Memory(MRAM)等のスピントロニクスデバイスでは, 磁化状態を制御することがキーテクノロジーとなる. 1996 年に Slonczewski によって理論的に示唆されたスピン注入磁化反転¹⁾は, 微細加工技術で作製された多層膜ピラー型構造^{2, 3)}やナノ細線⁴⁾あるいは多層膜のナノポイントコンタクト実験^{5, 6)}によって実験的に確認された. 高集積度の MRAM 等の微小デバイスではスピン注入による磁化反転が通常の外部磁場による磁化反転より有利になるとされている.

磁化状態を外部磁場ではなくスピン偏極電流によって制御するもう一つの方法として, この研究の主題である磁壁の電流駆動がある. 強磁性体の磁区の間には磁壁が存在し, そこでは磁気モーメントの方向が空間的に変化している. 強磁性体中のスピン偏極した伝導電子が磁壁を通過すると何が起こるだろうか? 磁壁を通過した前後で伝導電子のスピンの方向が変化することと系の角運動量保存則を考慮すれば, 伝導電子のスピン角運動量は磁壁に与えられことになる. したがって, スピン偏極伝導電子から磁壁にスピントランスファーが起きて磁壁が移動する. このことに始めて気がついたのは Berger^{7, 8)}である. 最近, Berger の理論を見直した理論的研究が報告されている^{9, 10)}.

Berger らはカー顕微鏡で強磁性体薄膜の磁壁の位置を直接観察する手法で磁壁の電流駆動現象を確認している^{11, 12)}. 磁気力顕微鏡(MFM)を用いた強磁性薄膜の磁壁の電流駆動観察も報告されている^{13, 14)}. 最近では, 単一磁壁についての実験報告もなされているが, いずれも定性的に磁壁の電流駆動の存在を示すにとどまっている^{15, 16)}. 我々は, 定量的実験結果を得ることを目的として, 磁区構造が制御された強磁性細線における磁壁の電流駆動につい

て MFM を用いて研究している¹⁷⁾.

本論文では, しきい電流密度近傍での磁壁の電流駆動を詳細に調べた結果を報告する. 本研究により, 以前の報告¹⁷⁾より低電流密度での磁壁移動速度を決定することができた. さらに, 細線中のピン位置とその位置におけるデピン磁場を測定し, その位置における磁壁の電流駆動しきい電流密度を測定した.

2. 実験方法

Fig. 1 に示す形状の試料を電子線リソグラフィーとリフトオフ法により, 熱酸化シリコン基板上に作製した. 試料の一方の端は磁壁の注入源であるダイヤモンド型のパッドに接続されている¹⁸⁾. もう一方の端はこの端から磁壁が生成しにくいように尖った構造にしてある¹⁹⁾. 緩やかに曲がった構造は, パッドから注入された磁壁の移動を停止させるための構造である²⁰⁾. 細線は $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ で厚みは 10 nm であり, 幅は走査型電子顕微鏡(SEM)観察から 240 nm と決定された. 電気抵抗ならびにパルス電流入力用の 4 つの電極は Cu で厚みは 20 nm である.

実験は, 室温・大気中で行った. 実験に用いた MFM の探針は試料の磁化状態を極力乱さないために, CoPtCr コーティングの低モーメントの探針を用いた. 以下の実験結果で示される MFM 観察領域は Fig. 1 の網掛け領域である. また, 以下の MFM 観察はすべて無磁場下で行った.

3. 実験結果と考察

3.1 単一磁壁の閉じ込め

単一磁壁を細線中に閉じ込めるために, 以下の操作を行った. まず, 磁化を細線に沿った方向に単磁区化させるために Fig. 1(1. DW trap)に示すようにパッド付細線に対して 26 度傾けて面内に -1 kOe の磁場を印加した. 次に磁壁を注入するために, 先ほどと逆方向に +175 Oe の磁場を印加した. その後, 無磁場状態にて MFM 観察を行った結果を Fig. 2(a)に示す. 本研究では, MFM 観察像で得られる明るいコントラストは正磁荷からの漏れ磁場に対応している. 逆に暗いコントラストは負磁荷からの漏れ磁場に対応している. すなわち, Fig. 2(a)の磁壁は Fig. 2(b)に模式的に示された tail-to-tail 磁壁である. 明るいコントラストの head-to-head

磁壁と暗いコントラストの tail-to-tail 磁壁はそれぞれ逆の磁場印加過程で生成できる。

このとき生成した磁壁の内部構造を決定するために NIST²¹⁾から提供されているマイクロマグネティックスシミュレーター OOMMF を用いた磁区構造計算を行った。Ni₈₁Fe₁₉ を仮定して、飽和磁気モーメントの大きさを 1.08 T とした。セルサイズは、 $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ でダンピング定数は 0.1 とした。計算のモデルサイズは、長さ以外は実際の試料と同じである。様々な初期条件を仮定して無磁場下でもっとも安定な磁区構造として得られたのが Fig. 2(d) に示した渦構造であった。さらにこの磁区構造から MFM 像を計算した結果を Fig. 2(d) に示す²²⁾。高解像度の実際の MFM 観察像を Fig. 2(e) に示す。計算結果と実際の MFM 観察像はよく一致しており、実験で生成した磁壁は渦構造を持つことが分かった。

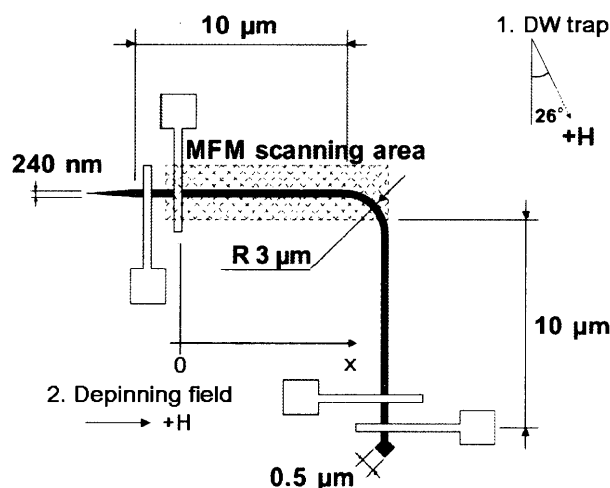


Fig. 1 Schematic illustration of a top view of the sample. One end of the L-shaped wire is connected to a diamond-shaped pad which acts as a domain wall (DW) injector, and the other end is sharply pointed to prevent nucleation of a DW from this end. The wire has four electrodes made of Cu. MFM observations were performed for the hatched area at room temperature. A magnetic field was swept along the axis of the sharply pointed wire when the depinning field was measured.

3.2 電流駆動特性

Fig. 3(a)・(g)はパルス幅 0.5 μs 、電流密度 $10.6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ のときの tail-to-tail 磁壁の電流駆動を 1 パルス毎に MFM 観察を行った結果である。図中の白矢印は電流方向を示している。磁壁の移動方向は電流方向に対して逆方向であり、電流方向を逆転させれば磁壁の移動方向も反転した。磁壁の移動距離は電流方向に依存せず、ほぼ一定であった。この実験結果から、1 パルスあたりの平均磁壁移動距離が $1.1 \pm 0.58 \mu\text{m}$ とわかった。したがって、この実験における磁壁の移動速度は 2.2 m/s であった。この結果は以前の報告¹⁷⁾の低電流密度側を補足するものである。

Head-to-head 磁壁の電流駆動方向も電流方向と逆向きであることを確認した。電流による磁壁の駆動となる原因は、スピントランスファー効果以外に、電流による誘導磁場、ジュール熱によ

る影響ならびに Hydromagnetic domain drag force が考えられる。まず、head-to-head 磁壁ならびに tail-to-tail 磁壁の移動方向が電流方向に常に逆向きであることから、誘導磁場で磁壁を動かしている可能性はない。ジュール熱による影響では、印加した電流方向に対して磁壁が必ず逆向きに動いている実験事実を説明できない。本研究で用いた試料の厚みは 10 nm と非常に薄いことから Hydromagnetic domain drag force の影響はないと考えられる²³⁾。以上のことから、本研究で観察された磁壁の電流駆動現象は、スピントランスファー効果に起因していると考えられる。

3.3 デピンング磁場としきい電流密度の関係

磁性細線内には様々な深さのピンングポテンシャルがランダムに分布していると考えられる。これらのピンング位置から外部磁場によって磁壁がデピンングする磁場と電流駆動によって磁壁が動き出すしきい電流密度との関係を求めた。そのために、まず細線内に存在するピンングポテンシャルの位置とそのデピンング磁場を測定した。

今回の実験では、磁壁を無磁場下で Fig.1 に示す原点近傍まで電流駆動で移動させてから、磁場 (5 Oe) を Fig. 1(2. Depinning field) で示された方向に印加した。磁場を印加し、無磁場状態に戻してから MFM 観察を行った。その前後で磁壁の細線内部の位置を測定した。磁場印加で磁壁が停止した位置をピンング位置とした。デピンング磁場はピンング位置から磁壁が移動したときの外部磁場とした。磁場の大きさは、約 5 Oe ずつ増大させた。磁壁位置は、磁壁の中心位置とした。観察領域に含まれる Cu 端子の端を原点とし湾曲部分方向を x 軸の正の方向とした。実験における位置測定の測定誤差は、 $\pm 50 \text{ nm}$ 程度である。

4 つのピンング位置について、そのデピンング磁場としきい電流密度を測定した結果を Table 1 に示す。[] 中の数字は、測定回数を示す。しきい電流密度測定を行う際の磁壁の移動方向はデピンング磁場の方向と同じにした。Table 1 は無磁場での結果である。我々以外のグループで無磁場での磁性細線中の磁壁の電流駆動を報告しているのは、Vernier らのグループだけである¹⁵⁾。彼らは、厚さ 5 nm、幅 120 nm の Ni₈₁Fe₁₉ 細線のしきい電流密度を $6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ と Table 1 の結果より若干小さい値を報告している。無磁場での電流駆動の電流による発熱の影響を調べる目的でパルス幅は 5 μs と 0.5 μs の場合を調べたが、しきい電流密度のパルス幅依存性は認められなかった。ただし、ジュール熱による熱活性の寄与の有無を議論するためには、より短いパルスでの実験とジュール熱による試料温度変化のシミュレーションを行う必要がある。

Table 1 の結果から、デピンング磁場が約 1.5 倍程度変化しても、しきい電流密度は約 1 割程度しか変化しないことがわかる。このことは、電流による磁壁駆動と磁場によるデピンングとは質的に異なるものであることを示唆している。多々良と河野は、ピンングが弱い場合は電流駆動のしきい電流密度が磁化困難軸方向の異方性エネルギー (K_1) に比例することを理論的に示している。⁹⁾ 本研究で用いた結晶磁気異方性が小さい Ni₈₁Fe₁₉ 細線の場合は、試料形状が K_1 を決定する。したがって、Table 1 のしきい電流密度の変化は、磁性細線幅の揺らぎを反映している可能性がある。

Table 1 Relation between the depinning field and the critical current density for the current-driven DW motion at four pinning sites.

Pinning position (μm)	Depinning field (Oe)	Critical current density ($\times 10^{11} \text{ A/m}^2$)*	Critical current density ($\times 10^{11} \text{ A/m}^2$)**
1.10	57.6 ± 21.0 [5]	9.1 ± 0.1 [2]	8.9 [1]
1.60	87.5 ± 10.6 [2]	10.1 ± 0.4 [2]	10.2 [1]
3.25	90 [1]	9.4 [1]	-
3.55	95 [1]	9.8 [1]	9.8 [1]

[] : Number of measurements, * : Pulse duration 5 μs , ** : Pulse duration 0.5 μs .

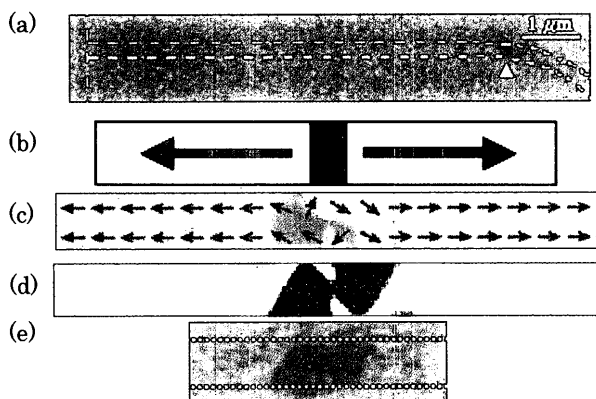


Fig. 2 (a) MFM image after the introduction of a DW. DW is imaged as a dark contrast, which corresponds to the stray field from negative magnetic charge. (b) Schematic illustration of a magnetic domain structure inferred from the MFM image. DW has a tail-to-tail structure. (c) Result of micromagnetics simulation (vortex DW). (d) MFM image calculated from the magnetic structure shown in Fig. 2(c). (e) Magnified MFM image of a DW.

今後この点を明らかにするためには、しきい電流密度の磁性細線幅依存性を調べる必要がある。

4. まとめ

磁気構造がよく制御されたサブミクロン磁性細線において、単一磁壁の電流駆動現象を MFM 観察で直接確認した。パルス電流の大きさ、時間、極性を制御することで磁壁位置を制御できることを示した。この結果は、最近提案された磁壁移動を利用したスピントロニクスデバイス^{24, 25)}を磁場ではなく電流によって駆動することが可能であることを示している。しきい電流密度近傍での磁壁の電流駆動を詳細に調べた結果、以前の報告¹⁷⁾より低電流密度での磁壁移動速度を決定することができた。細線内のランダムに分布する磁壁のピンニング位置を確認し、その位置におけるデピンニング磁場としきい電流密度を測定した。その結果、デピンニング磁場の分布に比べてしきい電流密度の分布はかなり小さいことがわかった。このことは、しきい電流密度が磁壁のピンニングポテンシャルに鈍感であることを示唆し、多々良と河野の理論⁹⁾を支持する結果となった。しきい電流密度の磁性細線幅依存性等を調べる

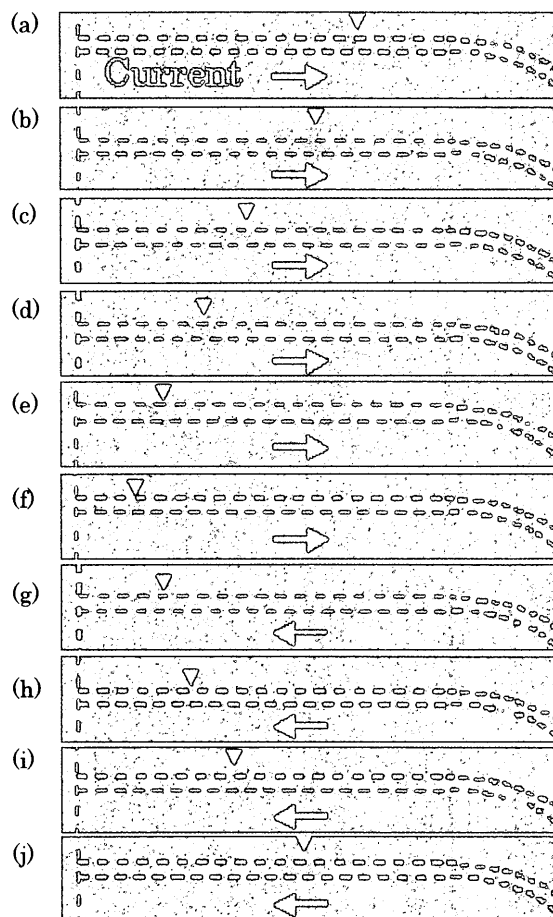


Fig. 3(a) – (j) Successive MFM images with one pulse applied between each consecutive image. The current density and the pulse duration were $10.6 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ and 0.5 μs , respectively.

ことで理論を検証し、しきい電流密度を低減することが今後の課題である。

謝辞 多々良源氏、河野浩氏、鈴木義茂氏、湯浅新治氏の各氏には有益な議論をしていただいた。本研究は、文部科学省・中核的拠点形成プログラム (COE,10CE2004「多元環境下の強相関電子相」と12CE2005「元素科学」)、文部科学省・科学技術振興調整費「ナノスピントロニクスデザインと創製」および文部科学省・21世紀 COE プログラム「物質機能の科学的解明とナノ工学的創出」の支援のもとで行われた。

文 献

- 1) J. Slonczewski: *J. Magn. Magn. Mater.*, **159**, L1 (1996).
- 2) J. A. Katine, F. J. Albert, R. A. Buhrman, E. B. Myers and D. C. Ralph: *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 3149 (2000).
- 3) J. Grollier, V. Cros, A. Hamzić, J. M. George, H. Jaffrès, A. Fert, G. Faini, J. Ben Youssef and H. Legall: *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3663 (2001).
- 4) J. -E. Wegrowe, D. Kelly, Ph. Guitienne, Y. Jaccard and J. -Ph. Ansermet: *Europhys. Lett.*, **45**, 626 (1999).
- 5) E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie and R. A. Buhrman: *Science*, **285**, 867 (1999).
- 6) M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W. -C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi and P. Wyder: *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 4281 (1998); **81**, 493(E) (1998).
- 7) L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **55**, 1954 (1984).
- 8) L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **71**, 2721 (1992).
- 9) G. Tatara and H. Kohno: *cond-mat/0308464*.
- 10) X. Waintal and M. Viret: *cond-mat/0301293*.
- 11) P. P. Freitas and L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **57**, 1266 (1988).
- 12) C. -Y. Hung and L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **63**, 4276 (1988).
- 13) L. Gan, S. H. Chung, K. H. Aschenbach, M. Dreyer and R. D. Gomez: *IEEE Tran. Magn.* **36** 3047 (2000).
- 14) H. Koo, C. Krafft and R. D. Gomez: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 862 (2002).
- 15) N. Vernier, D. A. Allwood, D. Atkinson, M. D. Cooke and R. P. Cowburn: *cond-mat/0304549*.
- 16) J. Grollier, P. Boulenc, V. Cros, A. Hamzić, A. Vaurès, A. Fert and G. Faini: *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 509 (2003).
- 17) A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu and T. Shinjo: *cond-mat/0309124*.
- 18) K. Shigeto, T. Shinjo, and T. Ono: *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2815 (1999).
- 19) T. Schrefl, J. Fidler, K. J. Kirk and J. N. Chapman: *J. Magn. Magn. Mater.*, **175**, 193 (1997).
- 20) D. A. Allwood, N. Vernier, G. Xiong, M. D. Cooke, D. Atkinson, C. C. Faulkner and R. P. Cowburn: *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4005 (2002).
- 21) <http://math.nist.gov/oommf/>.
- 22) H. Saito, J. Chen and S. Ishio: *J. Magn. Magn. Mater.*, **191**, 153 (1999).
- 23) L. Berger: *J. Appl. Phys.*, **49**, 2156 (1978).
- 24) J. J. Versluijs, M. A. Bari and J. M. D. Coey: *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 026601 (2001).
- 25) D. A. Allwood, G. Xiong, M. D. Cooke, C. C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier and R. P. Cowburn: *Science*, **296**, 2003 (2002).

2003 年 10 月 23 日受理, 2004 年 1 月 15 日採録