

垂直磁化型磁壁移動メモリ用磁性細線の磁壁電流駆動観察

Observation of current induced magnetic domain wall in magnetic wire for domain wall motion memory with perpendicular anisotropy

大嶋 則和^a、小山 知弘^b、千葉 大地^b、小野 輝男^b、小嗣 真人^c、大河内 拓雄^c

Norikazu Ohshima^a, Tomohiro Koyama^b, Daichi Chiba^b, Teruo Ono^b, Masato Kotsugi^c, Takuo Ohkochi^c

^a日本電気株式会社デバイスプラットフォーム研究所、^b京都大学化学研究所、^cJASRI/SPring-8

^aNEC Corp、^bKyoto University、^cJASRI/SPring-8

概要：

次世代 MRAM(Magneto-resistive Random Access Memory)として有望な磁壁移動型メモリ開発の一環として、磁性細線中に形成される磁壁の電流駆動ダイナミクスを解明することを目的とした高分解能磁区観察を SPring-8、BL17SU 設置の SPELEEM(Spectroscopic Photoemission and Low Energy Electron Microscopy)で試みた。Co/Ni 垂直磁化膜を長さ 10 μ m、幅 100, 150, 200, 300nm の細線に加工し、電流磁場で磁壁を導入した。パルス幅、電流密度を変えて電流注入し SPELEEM で観察したところ、電流密度 1.0×10^{12} A/m²、幅 20、30、50nsec のパルス電流を注入した細線で磁壁移動が観察された。100,150,200nm 細線ではパルス幅と磁壁量が比例し、移動速度は約 60m/sec と見積もられた。これは、これまで報告されている電気的な測定結果と対応する速度である。また、磁壁先端形状を知るために高倍率観察を試みたところ、視野径 5 μ m ϕ としたとき観察可能であることが明らかになった。

1. 背景と研究目的：

磁壁電流駆動は、スピン電流と局在磁気モーメントとの角運動量受け渡しによって磁化回転が誘起されて生じる現象であり、新しいスピントロニクスの研究分野として実験、理論の側面から多くの興味を持たれている[1-11]。また、磁壁電流駆動を利用することによって磁気デバイスのスイッチング動作電力を低減できることが示唆されるため、デバイスへの応用が期待され、新しい方式のストレージやメモリが提案されている[12-14]。我々は磁性パターン中に形成した磁壁を二つのトランジスタからの電流で駆動する磁壁移動メモリを提案し、その実用化を進めている[12-13]。これまでに垂直磁化を有する細線で低電力での動作が可能であることを明らかにし[15,16]、Co/Ni 垂直磁化膜を加工した磁性細線で低電流かつ再現性の良い磁壁電流駆動を起こすことを見出した[10,11]。現在は、磁性細線について磁壁電流駆動ダイナミクスの解明を進めると同時に磁壁移動メモリへの適用を検討しているところである[17]。

磁壁電流駆動のダイナミクス解明には磁区を直接観察することが有効である。電流印加にともなう磁壁移動の量や磁区構造の変化を直接観察することにより、磁壁移動速度、磁壁移動時の磁化の回転挙動などを明らかにすることができるからである。電流による磁壁移動を抽出するためには、プローブによる磁気的な擾乱のない磁区観察方法が必要である。この目的を満たす手法のひとつが X 線磁気円二色性を利用した光電子顕微鏡(XMCD-PEEM)である[18-20]。すでに NiFe 磁性細線の磁壁電流駆動についても用いられており、その有効性が示されている[21]。我々もこれまでに、BL25SU に設置されている XMCD-PEEM 装置 PEEMSPECTOR を用いて、U 字あるいは H 字形状した細線幅 320nm、大きさ 1 μ m 程度の NiFe パターン中の磁壁移動が十分な分解能で観察できることを確認している[22]。ところが、現在検討中の Co/Ni 垂直磁化細線は幅 100-200nm であり、分解能が約 100nm の PEEMSPECTOR では観察に不十分である。そこで本課題ではより高

分解能な BL17SU に設置されている SPELEEM (Spectroscopic PhotoEmission and Low Energy Electron Microscope)を用いて磁区観察を試みた。その結果、SPELEEM で Co/Ni 細線の磁壁移動に関する基礎的なデータを得ることができた。本報告ではその結果について述べる。

2. 実験：

2-1. 試料

Fig.1 に観察試料の光学顕微鏡像を示す。異なる幅に形成した垂直磁化を有する Co/Ni 積層膜磁性細線とその両端の Au 電極で構成される。磁性細線幅は図の上から 200nm、100nm、150nm、200nm、300nm であり、長さは $10\mu\text{m}$ である。図の右側の電極①には全磁性細線上に幅 800nm の Au 細線を形成し、左側の電極②は左端の 200nm 細線以外がかかるように pad 状の Au を形成した。①の電極は電流注入と磁壁導入用を兼ねている。垂直磁化膜は Ta(3nm)Pt(1.6nm)/[Co(0.3nm)/Ni(0.9nm)]₄/Co(0.3)/Pt(1.6nm)/Ta(3nm)/Si 基板なる構成である。DC マグネトロンスパッタ法(MAGEST-T200 ULVAC 製)で作製した。磁性細線は、この膜にレジストを塗布後、電子ビーム露光および Ar イオンミリングで作成した。また、Au 電極は Cr を下地膜とし、磁性細線の上にリフトオフ法で形成した。

作製した細線に対して面直方向に 4kOe の磁場を印加して一方向に磁化を揃えた。次いで、①の電極に強いパルス電流を通じて細線端部に磁壁を導入した。最後に①②の経路にパルス電流を通じて導入された磁壁を駆動した。パルス電流の電流密度は $1 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、パルス幅は 20,30,50nsec とした。このとき、観察試料は並列回路となっているので、全ての磁性細線に同一の電流密度が印加されている。右端 200nm の細線には磁壁駆動時に電流が流れないので、①からのパルス電流磁場で形成された磁壁位置が確認できる。これをリファレンスとして磁壁移動距離を評価することができる。

2-2. 観察

磁区観察には大型放射光施設 SPring-8 の BL17SU (理化学研究所ビームライン) に設置されている ELMITEC 社製の SPELEEM 装置を用いた。Ni L-III ピーク (853.2eV) において右回り偏光、左回り偏光を用いた像を撮影し、簡便のため右回り偏光像と左回り偏光像の比をとることで磁区像を得た。視野径は $5\mu\text{m}\phi$ 、 $15\mu\text{m}\phi$ 、 $30\mu\text{m}\phi$ とした。

3. 結果：

Fig.2 に SPELEEM を使い、視野径 $30\mu\text{m}\phi$ で観察した磁区像を示す。①の電極に電流→磁場を与えて磁壁導入後、臨界電流密度に相当する $1 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ のパルス電流を幅 20nsec 注入した後の磁区パターンである。

100-300nm の電流注入した細線中には Au 電極から数 μm 程度の範囲で磁化反転に対応するコントラスト反転がみられ、磁壁電流駆動が観察されている。磁壁移動距離はパルス幅が長いほど、細線幅が狭いほど大きいことがわかる。一方、磁壁形成後に電流を注入していない 200nm 細線に明確な磁区コントラストはみられていない。

MFM(Magnet Force Microscopy)観察で Au 電極へのパルス電流によって磁壁が形成することを確認しているので、電流を通じないパターンで磁区が見えないのは電極近傍に形成されており十分な分解能で識別でき

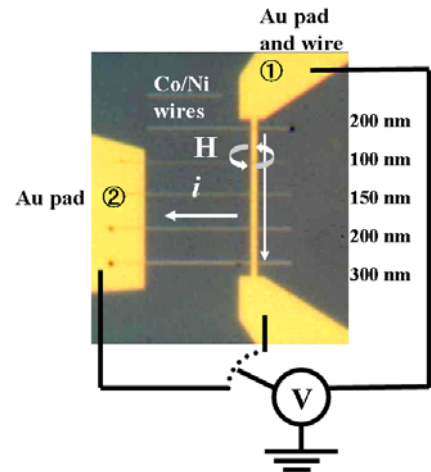


Fig.1 SPELEEM 用 Co/Ni サンプルの光学顕微鏡像と回路の模式図

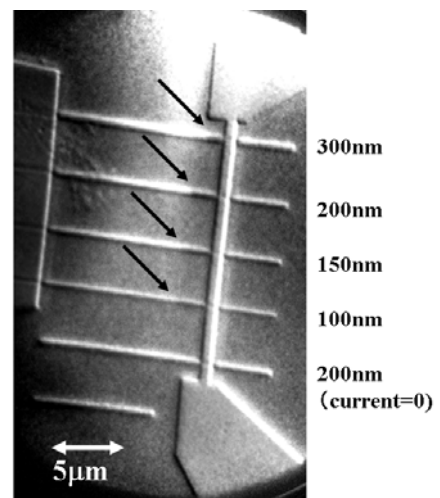


Fig.2 電流密度 $1 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、幅 20nm の電流パルスを印加した後の Co/Ni 細線の SPELEEM 像

ていないためと考えられる。

そこで、電極①で形成した磁壁が Au 細線の端部に形成されていると考え、磁区像から磁壁移動距離を見積もった。導入したパルス幅との関係をプロットした結果を Fig.3 に示す。線幅 100nm、150nm、200nm の試料では磁壁移動距離は電流パルス幅に対して、線形に増加することが示されている。傾きから磁壁移動速度は約 60m/sec と見積もられ、細線幅によらずほぼ一定である。これらの値は、電流による磁壁移動を異常ホール効果で電氣的に検出した結果と対応し、また LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert-langevin equations)シミュレーションによる予測とも対応する[11]。一方、細線幅 300nm ではパルス幅が 20-30nsec と短い範囲では直線的に増加し 50nsec になると移動量が增加する。電流パルス幅に対する磁壁移動距離は直線的にならず、速度がパルス幅に依存して変化している。直線性のある 20-30nsec の範囲では約 30m/sec と見積もられ、200nm 以下の細線よりも遅くなっている。これは、臨界電流密度近傍の電流を通じたため磁壁移動量が細線の磁気異方性の影響を受けたことによると考えている。こうした現象がどのような場合に顕著に起こるかについては、データの再現性も含めて今後詳細に検討する予定である。

電流駆動にともなう磁壁形状変化は、ダイナミクスを解析する上で重要である。そこで、高倍率の磁区観察を試みた。Fig.4 にその一例として電流密度 $1.4 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、パルス幅 20nsec を印加した幅 300nm の細線を視野径 $5 \mu\text{m}$ で観察した磁区像を示す。左側先端部分が先に進んだ三角形形状の磁壁が形成されていることがわかる。先端形状としてはこのほかに平坦なもの、中心付近でとがったものなど細線によって異なるパターンが確認された。これは磁壁電流駆動による先端部分が変化することを示唆する結果である。シミュレーションとの比較により磁壁移動の過程を予測できる可能性を示している。ただし、本課題で得られた像はコントラストが不十分であり、形状の詳細についての議論は難しい。また磁壁形状の印加電流に対する依存性も得ることができなかったことから、今後、よりコントラストの高くとれる試料を作成し、細線幅や電流注入条件に対する系統的な観察をおこなう予定である。

4. まとめ：

パルス幅、電流密度を変えて電流注入した Co/Ni 垂直磁化細線の磁区を SPring-8、BL17SU 設置の SPELEEM で観察した。電流密度 $1.0 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、幅 20、30、50nsec のパルス電流を注入した幅 100、150、200、300nm の細線で磁壁移動が観察された。100、150、200nm 細線ではパルス幅と磁壁量が比例し、移動速度は約 60m/sec と見積もられた。これは、これまで報告されている電氣的な測定結果と対応する速度である。一方、300nm 細線では、パルス幅の短い 20nsec、30nsec での磁壁移動量が少なく 50nsec で急増した。これは 200nm 以下の細線とは異なる挙動であり、臨界電流密度近傍で起こる変化と考えられる。また、磁壁先端形状を知るために高倍率観察を試みたところ、視野径 $5 \mu\text{m}$ としたとき観察可能であることが明らかになった。

今後、よりコントラストの高くできる細線試料を作製し、電流密度、パルス幅を系統的に変化させたときの磁壁位置、磁壁構造を詳細に観察することにより、磁壁電流駆動のダイナミクスを調べていく予定である。

謝辞：

SPELEEM 観察に協力いただき、有意義な議論していただいた SPring-8 木下豊彦氏、渡辺義夫氏に感謝します。また成膜には NEC 五十嵐忠二氏にご協力を得ました。ここに感謝します。

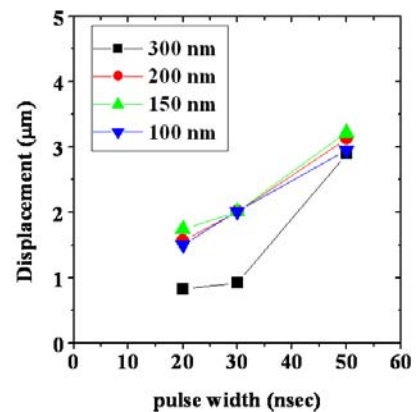


Fig.3 SPLEEM像から求めた磁壁移動量と電流パルス幅の関係(電流密度 $1 \times 10^{12} \text{A/m}^2$)

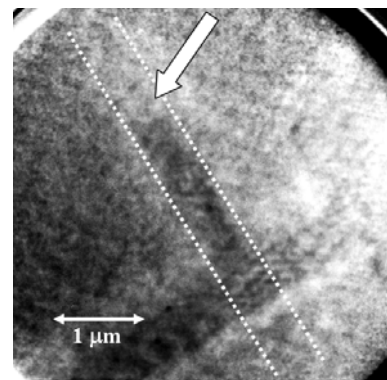


Fig.4 高倍率で観察した300nm幅細線の磁区像

参考文献：

- [1] L. Berger, *J. Appl. Phys.* **55**, 1954 (1984).
- [2] G. Tatara and H. Kohno, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 086601 (2004).
- [3] Z. Li and S. Zhang, *Phys. Rev. B* **70**, 024417 (2004)
- [4] A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 077205 (2004).
- [5] M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, and H. Ohno, *Nature* **428**, 539 (2004).
- [6] N. Vernier, D. A. Allwood, D. Atkinson, M. D. Cooke and R. P. Cowburn, *Europhys. Lett.*, **65**, 526 (2004)
- [7] M. Hayashi, L. Thomas, Ya. B. Bazaliy, C. Rettner, R. Moriya, X. Jiang, and S. S. P. Parkin, *Phy. Rev. Lett.* **96** 197207 (2006).
- [8] M. Kläui, C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, W. Wernsdorfer, G. Faini, E. Cambril, L. J. Heyderman, F. Nolting, and U. Rüdiger, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 106601 (2005).
- [9] H. Tanigawa, K. Kondou, T. Koyama, K. Nakano, Shinya Kasai, N. Ohshima, S. Fukami, N. Ishiwata, and T. Ono, *Appl. Phys. Express* **1**, 011301 (2008).
- [10] T. Koyama, G. Yamada, H. Tanigawa, S. Kasai, N. Ohshima, S. Fukami, N. Ishiwata, Y. Nakatani, and T. Ono, *Appl. Phys. Express* **1**, 0101303 (2008).
- [11] H. Tanigawa, T. Koyama, G. Yamada, D. Chiba, S. Kasai, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, and T. Ono, *Appl. Phys. Express* **2**, 053002 (2009).
- [12] H. Numata, S. Tahara, *Technical Digest of Intermag 2006*, HQ-03.
- [13] H. Numata, T. Suzuki, N. Ohshima, S. Fukami, K. Nagahara, N. Ishiwata, and N. Kasai, *Tech. Dig. VLSI Symp 2007*, 232 (2007).
- [14] S. S. Parkin: U.S. Patent 309 6 834 005 (2004).
- [15] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata *J. Appl. Phys.* **103**, 07E718 (2008).
- [16] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata, *IEEE Trans. Mag.* **44**, 2539 (2008).
- [17] S. Fukami, T. Suzuki, K. Nagahara, N. Ohshima, Y. Ozaki*, S. Saito, R. Nebashi, N. Sakimura, H. Honjo, K. Mori, C. Igarashi, S. Miura, N. Ishiwata, and T. Sugibayashi, *Tech. Dig. VLSI Symp 2009*, (2009).
- [18] たとえば木下豊彦 *固体物理* **40**, 13 (2005).
- [19] J. Stöhr, Y. Wu, B. D. Hermsmeier, M. G. Samant, G. R. Harp, S. Koranda, D. Dunham, and B. P. Tonner, *Science* **259**, 658, (1993).
- [20] J. Stöhr and H. C. Siegmann, “Magnetism” (Springer Berlin Heidelberg 2006), p. 461.
- [21] M. Kläui, U. Rüdiger, D. Backes, L. J. Heyderman, F. Nolting, C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, T. Kasama, R.E. Durin-Borkowski S. Cherifi, and A. Locatelli, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 212510 (2006)
- [22] 大嶋則和ほか 平成 18 年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書 87.