

## 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<sup>a</sup>, 小山 知弘<sup>b</sup>, 千葉 大地<sup>b</sup>, 小野 輝男<sup>b</sup>, 小嗣 真人<sup>c</sup>, 大河内 拓雄<sup>c</sup>

Norikazu Ohshima<sup>a</sup>, Tomohiro Koyama<sup>b</sup>, Daichi Chiba<sup>b</sup>, Teruo Ono<sup>b</sup>, Masato Kotsugi<sup>c</sup>, Takuo Ohkochi<sup>c</sup>

<sup>a</sup>ルネサスエレクトロニクス, <sup>b</sup>京都大学化学研究所, <sup>c</sup>JASRI/SPring-8

<sup>a</sup>Renesas Electronics Corp., <sup>b</sup>Kyoto University, <sup>c</sup>JASRI/SPring-8

次世代MRAMとして研究開発の進む磁壁移動型メモリの動作解析を目的とし、SPring-8、BL17SU設置のSPELEEMを用いた磁性細線の磁区観察による磁壁電流駆動現象の検証および磁壁移動ダイナミクス解析の研究を進めている。今期は、高コントラスト、高解像度な磁区観察可能な試料を検討し、磁壁移動速度の解析等をおこなった。磁性原子からの光電子強度および磁区コントラストと、磁性膜構成との関係を調べ、磁性膜を保護するTaキャップ層が薄いほど高いコントラストが得られることを見出した。Taキャップ層のないPt(1.6)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]<sub>4</sub>/Co(0.3)/Pt(1.6)/Ta(3)/基板なる構成の磁性膜を幅100-300nmの細線に加工し、磁区観察をおこなった結果、従来と比較して高いコントラストの磁区パターンを得ることができ、100nm細線で十分なコントラストの磁区観察が可能となった。パルス電流による磁壁移動観察、解析をおこない、電流密度 $1.4 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ で磁壁速度40m/secとなることを明らかにした。

#### 1. 背景と研究目的：

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、電子の方向に磁壁が動く現象を磁壁電流駆動という。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た研究がなされ[1-11]、またこれを利用したデバイス応用の検討が進められている[12-15]。

この現象が高速かつ低消費電力なメモリに有効であることに着目し、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ている[12-14]。これまでに、シミュレーションによって垂直磁化細線での低電力動作可能性を示し[16,17]、磁壁移動材料にCo/Ni垂直磁化膜を用いた磁性細線で電気的手法により低電流かつ再現性の良い磁壁電流駆動を確認した[10,11]。また、実際のメモリを想定した素子を作製し、動作検証をおこなった[14]。また、こうした研究と平行して、SPring-8、BL17SU設置のSPELEEM (Spectroscopic Photo Emission and Low Energy Electron Microscope)を用いた磁区観察により、代表的な磁壁移動材料であるCo/Ni細線に電流を通じたときの磁壁位置の変化を調べている。2009B期には100-300nm細線中の磁区観察が可能であることを示し、磁壁移動速度を見積もった。しかし、得られた磁区像はコントラストが低く、定量精度の高い解析は困難であった[18]。そこで、2010A期では高コントラストに磁区観察できる方法を検討することにした。磁区コントラストが得られない原因には、垂直磁化膜を保護するキャップ層Taが3nmと厚すぎることと、Co/Ni磁性層が約5nmと薄いことが考えられる。特に、キャップ層が厚い場合、CoやNiから放出された光電子を吸収散乱してしまうことが考えられ、光電子強度が低下する可能性がある。そこで、本課題ではキャップ層Taをつけずに垂直磁化膜を作製し、加工した細線パターンの磁区観察をおこなった。その結果、高いコントラストで磁区像を得ることが可能となり、高精度なダイナミクス解明への道筋をつけることができた。本報告ではその結果について述べる。

## 2. 実験：

### 2-1. 試料

Ta (x)/Pt(1.6nm)/ [Co(0.3nm)/Ni(0.9nm)]<sub>4</sub>/Co(0.3nm)/Pt(1.6nm)/Ta(3nm)/Si 基板 (x=0.0、1.0、2.0、3.0nm) なる構成の垂直磁化膜を DC マグネトロンスパッタ法 (MAGEST-T200 ULVAC 製) で作製した。

この磁性膜にレジスト塗布して電子ビーム露光し、Ar イオンミリングにより磁性細線に加工した。細線長さは 10 $\mu$ m、線幅は 100,150,200,300nm であり、細線両端には磁壁導入および電流注入に用いる Au 電極を形成した。電流注入と磁壁導入を兼ねた Au 電極は、磁性細線の片端側に直交する幅 500nm の細線とした。反対側の端部には pad 状の Au 電極を形成した。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。

まず、4kOe の磁場を面直方向に印加して細線を単磁区化する。その後、磁壁導入用 Au 細線の両端にパルス電流を流し、発生する磁場により磁性細線に磁壁を導入した。また、磁性細線両端の Au 電極に電流を通じて磁壁移動を誘起した。

### 2-2. 磁区観察

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。Co L-III ピーク (770eV) 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 $\mu$ m $\phi$ 、15 $\mu$ m $\phi$ とした。

## 3. 結果：

膜状態の Co および Ni の光電子スペクトル測定および磁区観察から、Ta 膜が薄い試料ほど光電子強度が強く、2009B 期で観察した Ta (3nm) キャップ付きの膜と比較して Ta をつけていない膜では光電子強度が 4-5 倍になること、磁区コントラストも強くなることあきらかになった。

そこで、Co、Ni の光電子強度が最も強い Ta キャップをつけない Co/Ni 垂直磁化膜を幅 100、150、200、300nm の細線に加工して磁壁を導入し、磁区像を観察した。Fig.1 に示したように 100-300nm の細線中いずれにもコントラストの反転する領域があり、磁区の導入されていることが明確に観察された。

以上の結果を踏まえて Ta キャップ層のない垂直膜を、Fig.2 に示した幅 150nm、長さ 10 $\mu$ m の細線に加工した。

この素子は、途中短部から 7 $\mu$ m の位置に Ta からなる磁壁検出用ホールバーが形成されている。この試料は電気的な磁壁移動検出に用いられるデバイス構成であり、今回の磁区観察は、事前に電流駆動を確認したものについてのみおこなった。

Fig.3 に観察例を示す。Fig.3 (a) は磁壁導入のみ、Fig.3 (b) は電流密度を  $1.4 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、パルス幅を 20nsec として電流を通じた後の磁区像である。Fig.3 (a) には Au 電極から約 200nm に磁気コントラスト変化がみられる。これは、Au に通じた電流による磁場で形成された初期の磁壁を示している。今回、同一条件で磁壁を導入した試料 3 点を観察したところ、いずれも Au 電極から 200-300nm の範囲に磁壁が形成されていた。再現性よく磁壁導入ができていると考えられる。Fig.3 (b) は Au 端部から 1000nm の位置に磁壁がある。Fig.3 (a) と比較すると磁壁位置が電子の流れる方向に移動しており、電流により磁壁が移動したことがわかる。磁壁位置はパルス幅とともに増加している。Fig.3 (a) の初期磁壁位置との差分をとり、パルス幅で割ることで磁壁移動速度を求めると約 40m/sec となった。これは、2009B 期で報告した 60m/sec とは異なる。ただし、2009B 期の実験では磁区コントラストが弱くて磁壁位置の測定精度が低かったこと、磁壁を導入しただけの細線には磁区が観察されなかったため磁

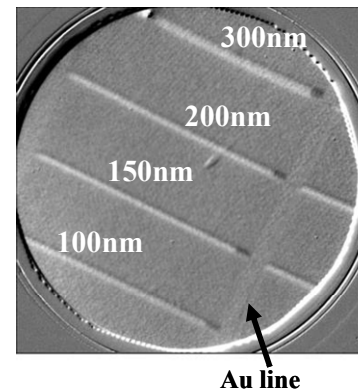


Fig.1 TaキャップをつけないCo/Ni 細線中に形成された磁区の観察結果

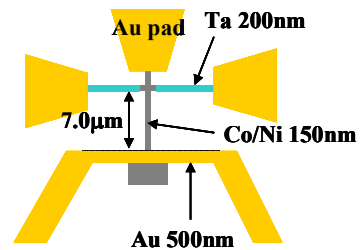


Fig.2 磁壁電流駆動観察試料の模式図

壁位置を Au 電極端部と仮定したこと、という測定上の問題点がある。また、今回作製した細線には Ta キャップがないため非磁性導体を通過した電流の発生する磁場分布が変化し、磁壁移動に影響を与えたことなどが考えられる。

今回の検討により、高いコントラストで Co/Ni 細線の磁区を観察することが可能となった。今後は電流密度やパルス幅を系統的に変化させ、磁壁電流駆動ダイナミクスについて詳細に検討をおこなう予定である。

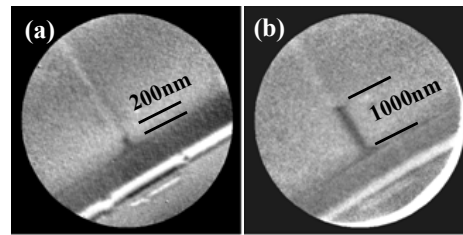


Fig.3 磁壁導入と電流による磁壁移動の観察例  
 (a) Au細線の電流磁場による磁壁導入後の磁区像  
 (b) 磁壁導入後、電流密度 $J=1.4 \times 10^{12} \text{A/m}^2$ 、幅20nsecのパルス電流印加後の磁区像

#### 4. まとめ：

磁壁電流駆動検討のため、磁性細線中軸を高いコントラストで観察するための試料検討をおこなった。Pt(1.6)/[Co(0.3)/Ni(0.9)]<sub>4</sub>/Co(0.3)/Pt(1.6)/Ta(3)/基板なる構成の垂直磁化膜で細線を作製することにより、高コントラストの磁区観察が可能となった。Au 電極に通じたパルス電流による磁場で導入した磁壁は電極から 200-300nm の位置に形成されることを確認した、また、磁性細線に電流を通じたときの磁壁移動観察および解析から、電流密度  $1.4 \times 10^{12} \text{A/m}^2$  で磁壁速度 40m/sec となることがわかった。今後、電流密度、パルス幅を系統的に変化させて磁壁位置、磁壁構造の観察をおこない、磁壁電流駆動のダイナミクスを調べる予定である。

#### 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。

#### 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, Phys. Rev. Lett. **96** 197207 (2006).
- [8] M. Klauui, C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, W. Wernsdorfer, G. Faini, E. Cambril, L. J. Heyderman, F. Nolting, and U. Ru'diger, 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. 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, 230 (2009).
- [15] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science **320**, 190 (2008).
- [16] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata J. Appl. Phys. **103**, 07E718 (2008).
- [17] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata, IEEE Trans. Mag. **44**, 2539 (2008).
- [18] 大嶋則和ほか 平成 21 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 p.73.