

## 垂直磁化型磁壁移動メモリ用磁性細線の磁壁電流駆動その場観察 Observation of current induced domain wall motion in magnetic wires for domain wall motion memory with perpendicular magnetic anisotropy

谷川 博信<sup>a</sup>, 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>  
Hironobu Tanigawa<sup>a</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株式会社, <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

磁壁電流駆動ダイナミクスの解明および磁壁移動メモリの基本動作解析の一環として、SPELEEMを用いたCo/Ni垂直磁化細線中に形成した磁壁の電流駆動現象観察をおこなっている。2011A期は、同一素子における磁壁移動速度とばらつきについて議論するために、磁壁導入および磁壁移動のための電流印加がSPELEEM装置内にて行えるような測定環境を構築することを試みた。その結果、電流磁場を発生させることでCo/Ni細線内に磁壁を導入可能であることを実証した。観察にはBL17SU設置のSPELEEM装置を用いた。磁壁電流駆動観察については、放電による試料破壊によって磁壁移動観察にまでは至らなかったが、その原因は観察素子の近傍に絶縁体の領域が広いことであることを突き止めた。これらの実験結果を反映し、2011B期においてはSi基板の露出面積をなるべく小さくし、なおかつCo/Ni細線近傍の端子をコプレナー構造にした新しい素子で検討を進める。

キーワード： SPELEEM、垂直磁気異方性、磁壁電流駆動、その場観察

### 背景と研究目的：

磁壁を形成した磁性細線に電流を通じると、スピン電流と局在磁気モーメントとの間で角運動量が受け渡されて磁化が回転し磁壁が動く。この現象は磁壁電流駆動と呼ばれ、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。これまでに磁壁移動メカニズム[1-13]やデバイス応用[14-17]などの研究が幅広く進められ、多くの新しい知見が得られている。

サブミクロン細線中に形成した磁壁が臨界電流密度 $J_c$ 以上で移動をはじめ、その速度は電流密度に比例することが実験的に示されている[13]。この特徴は、素子の微細化により磁壁が低電流で高速に移動することをあらわし、メモリ適用への可能性を示している。こうした観点に立ち、我々は磁壁電流駆動現象のメモリ応用にむけた研究を進めている。これまでに、磁性細線の両端に接続した二つのトランジスタからの電流で細線中の磁壁を動かす書き込み方式のメモリを提案し[14-16]、Co/Ni垂直磁化細線による磁壁電流駆動を検証した[18,19]。また、模式的なデバイスを作製して低電力、高速MRAMの可能性を示している[10-16]。これと併せて、SPring-8、BL17SU設置のSPELEEM (Spectroscopic Photo Emission and Low Energy Electron Microscope)を用いてCo/Ni垂直磁化細線の磁区観察をおこない、磁壁電流駆動メカニズムの研究を進めている[20]。

2010B期には、複数の磁性細線素子を同一条件で作製し、同一条件で電流パルスを与えたときの磁壁移動速度を統計的に調べ、磁壁移動の平均速度とそのばらつきを解析した。同一基板上に作製した5-6個のCo/Ni垂直磁化細線素子に磁壁導入し、電流密度を $J=2.0 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ 、電流パルスを①10 ns $\times$ 1,3,6回の複数回、②10、30、60 nsの一回印加してその後の磁壁移動量を観察した。①の複数回パルス印加をした素子では磁壁移動速度が約35 m/s、ばらつきは約20%であり、電気特性評価の結果と対応した[20]。一方、②の単一の長いパルスで与えた場合、磁壁移動速度はパルス長とともに減少し、多磁区構造もみられた。安定した磁壁移動のためには昇温を抑制する短

パルス印加が有効であることがわかった。上記のように、同一形状素子における磁壁速度の『素子間ばらつき』においては検証が可能になったが、デバイス応用のためには同一素子内における磁壁速度の『自己ばらつき』の挙動を明らかにすることが必須であると考えられる。そこで本課題では、同一素子における磁壁移動速度とばらつきについて議論するために、SPELEEM 装置内において磁壁導入および磁壁移動のための電流印加が行えるような測定環境を構築することを試みた。本報告では、これらの検討結果について記述する。

## 実験：

### 1. 試料と実験環境

Si 基板上に、Pt(1.6nm)/[Co(0.3nm)/Ni(0.9nm)]<sub>4</sub>/Co(0.3nm)/Pt(1.6nm)/Ta(3nm)/基板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。この膜にレジストを塗布後、電子ビーム露光・イオンミリングにより磁性細線を形成した。Co/Ni 磁性細線の線幅は 150 nm である。磁性細線両端には、磁壁導入兼電流注入用の Ti/Au 細線 (幅 500 nm) と電流注入用の pad 状 Au 電極をリフトオフ法で形成した。作製された素子の概念図と光学顕微鏡観察像を Fig. 1 に示す。本実験においては、数 10 ns オーダーの短い方形波パルスを素子に印加する必要がある。なるべく同軸ラインを確保するために、SPELEEM 装置の preparation chamber 内で電流印加を行えるような環境を構築した。本環境を用いることで、Co/Ni 細線に 10 ns 程度の方形波パルスが印加可能となった。上記素子に約 2 kOe の磁場を面直方向に印加して細線を単磁区化した後、まず Ti/Au 電極の両端に 10 V、40 ns のパルス電圧を印加し、その際発生する局所磁場により磁壁を導入した。

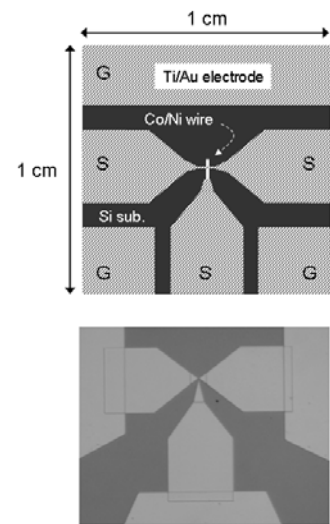


Fig.1 作製した試料の概念図と光学顕微鏡像

### 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 (779eV) 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 20  $\mu\text{m}\phi$  とした。

## 結果：

Fig. 1 の試料に、基板垂直方向に約 2 kOe の外部磁場を印加した後、SPELEEM 観察したときの像を Fig. 2(a) に示す。白斜線で覆われた部分は Ti/Au 電極部である。Co/Ni 細線中の磁化は、コントラストが一樣であることから同一方向となっていることが確認できる。この状態から、Ti/Au 電極(電極 B から A)に 10 V(約 90 mA)、パルス幅 40 ns のパルス電流を印加した後の観察像を Fig. 2(b) に示す。Ti/Au 電極付近に発生した電流磁場の影響によって、電極周辺部のコントラストが黒色から白色に変化しており、Co/Ni 細線内に磁壁が導入されていることが観察された。磁壁の初期位置は、電極端から約 400 nm であり、2010B 期に行われた SPELEEM 装置外にて磁壁導入を行ったときの結果と一致する。Fig. 2(b) に示したように、Co/Ni 細線内に磁壁を導入した状態から Ti/Au 電極(電極 C から A)にパルス電流を印加して磁壁移動実験を試みたが、装置内の放電による試料破壊が起こり、磁壁移動観察を行うまでには至らなかった。試料破壊の主な原因は、観察素子の近傍に絶縁体の領域が広く、

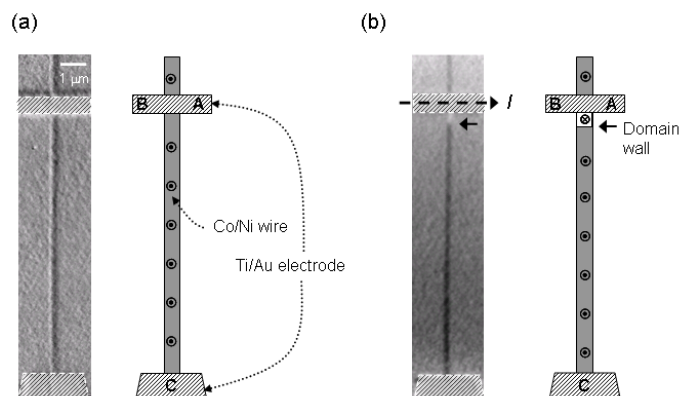


Fig.2 パルス電流印加による磁壁導入前後の SPELEEM 観察像  
(a)単磁区状態、  
(b)磁壁導入後( $I=90 \text{ mA}$ ,  $t=40 \text{ ns}$  方形波パルス印加後)

電界集中が起こったことが主な原因として考えられる。これらの実験結果を反映し、2011B 期においては Si 基板の露出面積をなるべく小さくし、さらに Co/Ni 細線近傍の端子をコプレーナ構造にした新しい素子で検討を進める。

#### 謝辞：

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

#### 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. Klau, C. A. F. Vaz, J. A. C. Bland, W. Wernsdorfer, G. Faini, E. Cambril, L. J. Heyderman, F. Nolting, and U. Rudiger, 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] T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, K. Kondou, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, Nature Materials **10**, 194 (2011).
- [13] T. Koyama, D. Chiba, K. Ueda, H. Tanigawa, S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, N. Ishiwata, Y. Nakatani, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. **98**, 192509 (2011).
- [14] H. Numata, S. Tahara, Technical Digest of Intermag 2006, HQ-03.
- [15] H. Numata, T. Suzuki, N. Ohshima, S. Fukami, K. Nagahara, N. Ishiwata, and N. Kasai, Tech. Dig. VLSI Symp 2007, 232 (2007).
- [16] 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).
- [17] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science **320**, 190 (2008).
- [18] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata, J. Appl. Phys. **103**, 07E718 (2008).
- [19] S. Fukami, T. Suzuki, N. Ohshima, K. Nagahara, and N. Ishiwata, IEEE Trans. Mag. **44**, 2539 (2008).
- [20] N. Ohshima, T. Koyama, H. Tanigawa, M. Kotsugi, T. Ohkouchi, D. Chiba, and T. Ono, Journal of Phys: condensed matter **23**, 382202 (2011).