

磁壁によるスピン波の位相制御とロジックインメモリへの応用

今村謙汰, 浦塚泰夫, 田中輝光, 松山公秀
(九州大学大学院 システム情報科学府)

Successive logic-in-memory operation in spin wave based devices with domain wall data coding scheme

K. Imamura, Y. Urazuka, T. Tanaka, K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

はじめに

スピン波の位相情報を利用した電荷レス情報伝送によるスピン波干渉型論理演算デバイスが提案されている 1). 近年, 磁壁通過によりスピン波の位相シフトが生じることが発見されており 2), 磁壁の有無を論理動作における入力値に対応させたスピン波干渉による論理演算の可能性が示されている 3). 本研究では, スピン波導波路を流れるスピン偏極電流の STT 効果および外部局所磁界の制御により, このデバイス中における磁壁の選択的転送を利用した論理入力値の書き換えをマイクロマグネティックシミュレーションで解析した. さらに, 論理入力値の書き換え動作から論理演算動作に至る連続機能動作をシミュレーションにより検証した.

計算方法

垂直磁化細線を想定した論理演算デバイスの計算モデルを Fig. 1 (a) に, デバイス左部の詳細図を Fig. 1 (b) に示す. 磁性細線中の磁壁位置制御およびスピン波による論理演算動作を LLG 方程式の数値計算により解析した. Fig. 1 (a) に示すように, 2本の導体線 (GE1, GE2) によりスピン波の励起を行い, 中央に配置した誘導検出器により干渉波を検出し論理動作を行った. スピン波の π rad 位相シフトを引き起こすネール磁壁対の有 (“1”) 無 (“0”) により, 論理入力値の符号化を行った. 磁性細線中の磁壁位置規定は, 幅 230 nm の磁気異方性局所変調 (ピンングサイト (PS)) により行っている. スピン偏極電流による STT 効果と Fig. 2 (b) に示すヘアピン状導体線が作る電流磁界を用いて PS1 中のネール磁壁対を PS0 へ転送し論理入力値 “11” から “01” への書き換えを行った.

計算結果

Fig. 2 (a) にスピン波励起時の出力電圧波形を示す. 初期入力値 “11” で磁壁が安定している場合の小さな出力電圧は論理出力値 “0” に対応している. この後, スピン波導波路を流れるスピン偏極電流による STT 効果, およびピンングサイト上に配置されたヘアピン状導体線が生じる電流磁界を用いて磁壁のディピンングとピンングを行った. Fig. 2 (b) に磁壁位置の時間遷移を示す. 1 対のネール磁壁対が PS1 から PS0 へ制御性よく転送されていることが確認された. データ書き換え後の論理入力値 “01” 時の出力電圧は, 初期論理入力 “11” の出力電圧値に比べ 18 倍程度大きな値となっている. この論理入力値 “01” 時の出力は論理出力値 “1” に対応する. 以上の結果より, 磁壁転送による論理入力値の書き換えと, スピン波干渉による排他的論理和動作との連続動作の可能性が示された.

参考文献

- 1) A. Khitun, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **111**, 054307 (2012)
- 2) R. Hertel, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 257202 (2004)
- 3) Y. Urazuka, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 17D505 (2014)

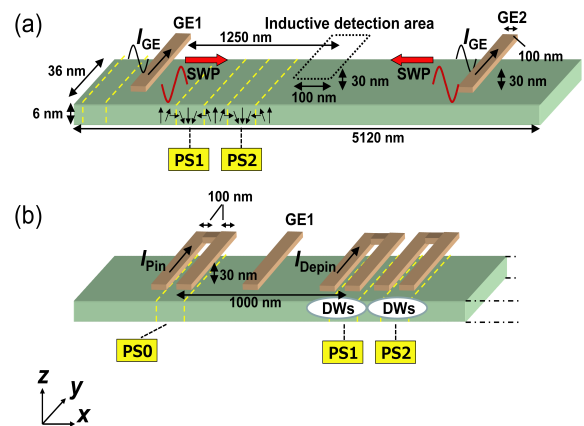


Fig. 1. (a) Schematic figure of perpendicularly magnetized nanowire with spin wave generator and detector. (b) Schematic figure of domain wall pinning sites (PS0, PS1, PS2) located at the left side of the perpendicularly magnetized nanowire

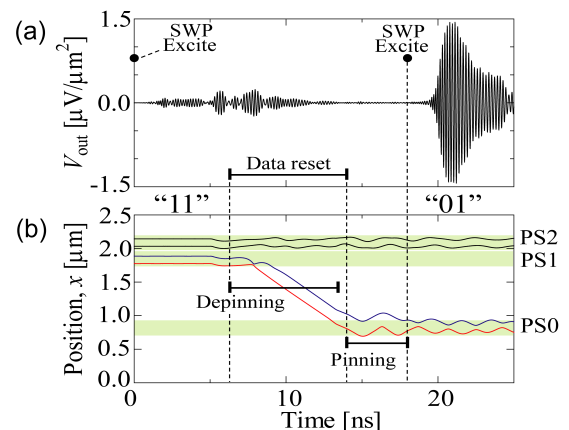


Fig. 2. (a) Inductively detected output voltage of interferometric spin wave packets. (b) Time transient of the two DW pairs driven by spin polarized currents.

[Co/Pd]磁性細線における電流駆動磁区の磁気抵抗変化による検出

奥田光伸^{1,3}、宮本泰敬^{1,2}、宮下英一¹、斎藤信雄¹、林直人¹、中川茂樹³
 (¹NHK、²(一財)NHK エンジニアリングシステム、³東京工業大学)

Detection of Current Driven Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowire by Magneto-Resistive Change

M. Okuda^{1,3}, Y. Miyamoto^{1,2}, E. Miyashita¹, N. Saito¹, N. Hayashi¹ and S. Nakagawa³

(¹NHK, ²NHK Engineering System, inc., ³Tokyo Institute of Technology)

はじめに

近年、磁性細線における磁壁の電流駆動に関する研究¹⁾に注目が集まり、レーストアクセルメモリ²⁾に代表されるような新しい原理のメモリなどが提案されている。この磁性細線を並列に複数配置し、それぞれの磁性細線を HDD のデータトラックのように扱うことができれば、並列アクセスによる超高速磁気記録デバイスを実現することが期待される³⁾。そこで我々は[Co/Pd]垂直磁化磁性細線中の磁区をパルス電流により駆動させることによって記録・再生を実現する研究を進めている。今回、TMR センサを用いた表面磁区観察装置である nano-MDS (Magnetic Domain Scope for wide area with nano order resolution)⁴⁾を用いて、TMR センサ直下を移動する磁区の磁化方向をリアルタイムに検出することができたので報告する。

実験方法

イオンビームスパッタ法および電子線リソグラフィにより、表面熱酸化 Si 基板上に[Co/Pd]垂直磁化多層膜を堆積し、磁性細線の上部が基板より 40 nm 程度露出した構造の試料を作製した。細線幅は 150 nm、細線長は 20 μm とした。作製した磁性細線の保磁力はおよそ 630 Oe であった。細線の両端には Cu 電極を形成し、電流を印加できるようにした。その後、作製した細線について nano-MDS により表面の磁区状態の観察を行うとともに、パルス電流を印加することにより磁区を駆動させ、細線上 30 nm にオントラックさせた TMR センサにより細線の磁化方向の変化を観察した。

実験結果

Fig.1 は作製した磁性細線の(a)残留磁化状態での nano-MDS 像と(b)パルス電流印加後の nano-MDS 像である。試作した磁性細線に平行して、測定位置原点マーカ (長さ 1 μm) が図示してある。明領域 (赤) が上向きの磁化方向の磁区、暗領域 (青) が下向きの磁化方向の磁区を表しており、+15 mT ~ -9 mT の磁束密度を持つ磁区が形成されていた。この細線にパルス幅 50 ns、電流密度 $6.3 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ のパルス電流を右側から左側に向かって複数回印加することにより、(b)に示すように細線中の複数の磁区をまとめて移動させることができた。磁区は電流の向きとは反対方向に約 200 nm 移動した。左側から右側に向かって電流を印加したときには磁区はそれぞれ左に向かって動いた。

さらにこの磁性細線上に nano-MDS の TMR センサをオントラックさせパルス電流を印加したところ、センサ直下を横切る磁区の磁化方向の変化に伴って磁気抵抗値が変化し、その磁化状態を推定できることがわかった。講演では磁化方向のリアルタイム検出についても報告する。

参考文献

- 1) H. Tanigawa *et al.* : *Appl. Phys. Express*, **2**, 053002 (2009).
- 2) S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas : *Science*, **320**, 190 (2008).
- 3) Y. Miyamoto, M. Okuda and E. Miyashita : *J. Inst. Image Inform. TV. Engnr.*, **68**, 1, J34 (2014).
- 4) T. Chikamatsu, A. Ogawa and T. Mizuno : *Magnetics Japan*, **6**, 6, 357 (2011).

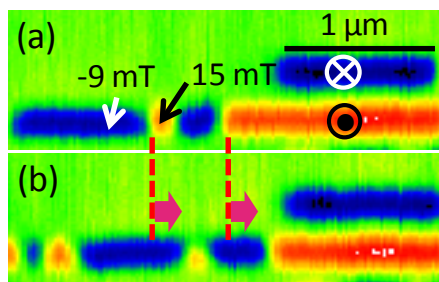


Fig.1 (a) Remanent nano-MDS image and (b) nano-MDS image after application of pulse current, for [Co/Pd] nanowire.

傾斜電界印加による磁壁駆動シミュレーション

村山 創、山田 啓介、仲谷 栄伸
電気通信大学、情報理工学研究科

Computer simulation of a Domain Wall Motion by a Slope Electric Field

Soh Murayama, Keisuke Yamada, and Yoshinobu Nakatani

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

はじめに

現在、磁壁駆動型デバイスは、省電力化を担う磁気記録装置として注目されている[1]。磁壁駆動型デバイスでは、磁壁駆動の制御に外部磁界を印加する手法や、スピン偏極した電流を注入する手法が用いられている。これらの手法は、磁壁駆動のための閾電力が多く、その低減が課題となっている。近年、閾電力を低減する新たな手法として、電界印加による磁壁駆動方式が提唱されている[2, 3]。本研究では、磁性細線に傾斜電界を加えた時の磁壁駆動について、マイクロマグネティックシミュレーションより調査した。

実験結果

磁性細線のサイズは、 $200\text{ nm} \times 60\text{ nm} \times 3.9\text{ nm}$ とした。材料定数はCo/Ni多層膜の値を用い、飽和磁化 660 emu/cm^3 、異方性定数 4.1 M erg/cm^3 、交換スティフネス定数 1.0×10^6 、損失定数 0.02 とした[4]。電界効果は、異方性定数が変調する効果とした[5]。傾斜電界効果は、図1のように、磁性細線に対し異方性定数を線形に減少させることで実現し、線形減少量を ΔK_u ($\text{erg/cm}^3/\text{nm}$)と定義した。図1は、 $\Delta K_u = 1000\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ の場合で、左端($x = 0\text{ nm}$)で磁気異方性の減少率を 0% とし、右端($x = 200\text{ nm}$)で減少率 5% を表している。磁壁の初期位置は、細線中心 ($x = 100\text{ nm}$)とした。

シミュレーションの結果、傾斜電界印加 ($\Delta K_u = 500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$)によって、磁壁が異方性減少方向 ($x > 100\text{ nm}$)へ移動することを確認した。この時、磁壁移動速度は 1100 cm/s であった。図2は、各 ΔK_u における磁壁移動速度を示す。 ΔK_u が $500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ までは磁壁の移動速度が単調に増大した。それ以後は、磁壁の移動速度が急激に減少する Walker breakdown と同様の現象が見られた。図2に、各外部磁界印加 (H_{ext})による磁壁移動速度を示す。それぞれの磁壁移動速度を比較すると、 $\Delta K_u = 500\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$ の傾斜電界は、 $H_{\text{ext}} = 2\text{ Oe}$ の磁界に相当することが分かった。

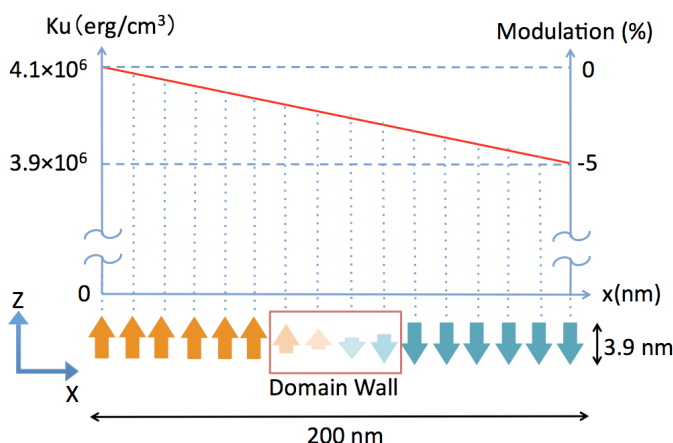


Fig. 1 Schematic of the slope electric field at $\Delta K_u = 1000\text{ erg/cm}^3/\text{nm}$

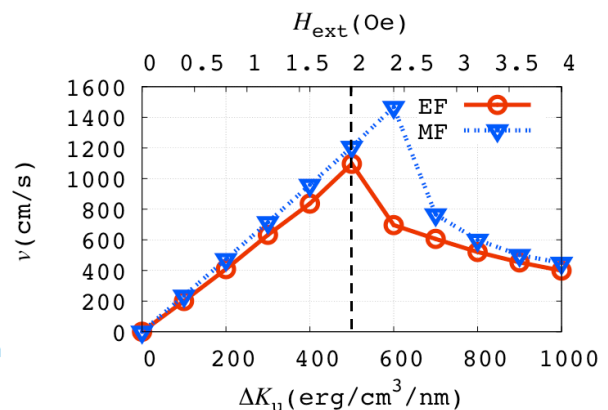


Fig. 2 Domain-wall velocity as a function of the magnetic field and the slope electric field

参考文献

- [1] S. S. P. Parkin, *et. al.*, Science **320**, 190 (2008). [2] A. J. schellekens, *et. al.*, Nat. Commun. **3**, 848 (2011).
[3] D. Chiba, *et. al.*, Nat. Commun. **3**, 888 (2012). [4] T. Koyama, *et. al.*, Appl. Phys. Exp. **1**, 101303 (2008).
[5] M. Weisheit, *et. al.*, Science **315**, 349 (2007)

磁性多層膜を有する微小ドットの磁気力顕微鏡による磁化状態操作

岩城圭亮、野村光、中谷亮一

(大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻)

Magnetization manipulation method for nanodots with magnetic multilayer by magnetic force microscopy

K. Iwaki, H. Hikaru, and R. Nakatani

(Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University)

近年、磁性量子セルラーオートマタ(MQCA: magnetic quantum cellular automaton)をはじめとする微小磁性体を用いたデバイスは、次世代を担う情報処理デバイスの有力な候補として注目を集めている。MQCA等の基礎的研究では、各磁性体の磁化情報を任意に制御することが不可欠となる。我々はこれまでに、磁気力顕微鏡(MFM: magnetic force microscope)を利用し、磁性体の磁化状態を制御する手法を提案してきた[1]。しかしながら、これまでの手法では、基板表面に二次元的に配置された微小磁性体のみを磁化状態の制御対象としており、磁性多層膜を有する微小磁性ドットへの磁化状態制御手法は未だ確立されていない。そこで、本研究では、磁気力顕微鏡を用い、磁性多層膜からなる磁性ドットの各磁性層の磁化状態を制御する手法を確立することを目的とする。

磁気力顕微鏡には、日立ハイテクサイエンス社製の

MFM(SPA-300HV)へLabVIEW FPGA/Real Time OSを用いて開発した独自の制御装置を追加したものを用いた。また、磁気力探針には、市販のSI-MF40を用いた。磁化状態制御の対象として、電子線リソグラフィ法、イオンビームスパッタリング法、リフトオフ法を用い、Si基板上にNi-20at.%Fe(20 nm)/SiO₂(40 nm)/Ni-20at.%Fe(20 nm)/Au(3 nm)からなる磁性ドットを作製した(Fig. 1)。この試料に対し、任意のx-y座標において、探針・基板表面間距離 d_z を制御することで磁化状態制御を実施した。磁性ドットの磁化状態の初期化ならびに、磁化状態制御のための補助磁場として、外部磁場をy軸に沿って印加した[Fig. 1(b)]。磁性ドットの磁化状態の画像化には、磁性ドットの磁化への影響を十分に抑えるため、高さ一定モードMFMを用いた。

Figure 2 (a), (b)に、磁性状態制御前後の磁気力顕微鏡像を示す。Fig. 2 (a)で得られていた明瞭なコントラストが、Fig. 2 (b)では消失している。このことから、上部磁性層の磁化の向きと、下部磁性層の磁化の向きが反平行となり、互いに漏洩磁場を打ち消し合っていると考えられる。また、Fig. 2 (c)に磁化状態制御の際に取得された、MFMの位相遅れ信号の探針・基板表面間距離依存性を示す。Fig. 2 (c)から、上部の磁性層が反転した後も、下層の磁性層の磁化の向きは反転していないことがわかる。

以上の結果より、MFMを用いることで、磁性多層膜からなる磁性ドットの各磁性層の磁化を任意に制御できることが明らかとなった。本手法は、近い将来実現が期待されている、磁性多層膜からなる三次元MQCAに関する研究において欠かすことのできないツールとなる。

1) H. Nomura and R. Nakatani, *Appl. Phys. Express*, **4**, 013004 (2011).

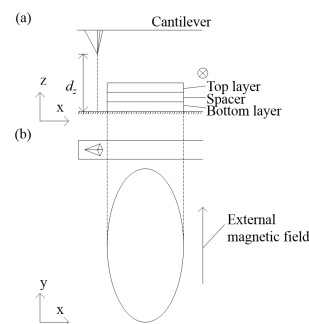


Fig.1 Schematic (a) front view and (b) top view of cantilever and nano dot.

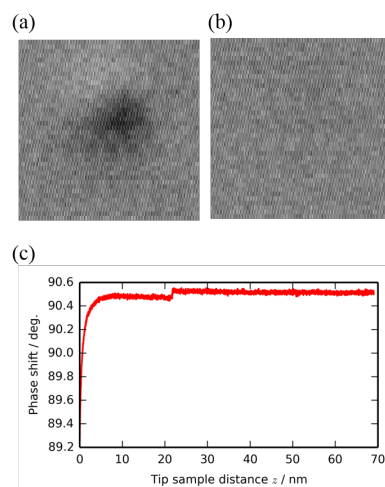


Fig. 2 MFM images of (a) initial state and (b) magnetization manipulation result of nano dot. (c) Force curve measurement result during the magnetization manipulation.