

磁性細線における高速磁区形成シミュレーション

川那真弓、奥田光伸、宮本泰敬、宮下英一
(NHK 放送技術研究所)

Simulation for Rapid Formation of Magnetic Domains in Magnetic Nanowire

M. Kawana, M. Okuda, Y. Miyamoto, E. Miyashita

(NHK Science & Technology Research Labs.)

はじめに

NHK では将来のテレビ方式として 8K スーパーハイビジョン (SHV) の開発を進めている。フル解像度 SHV の非圧縮映像は転送レート 144 Gbps を超えるため、記録装置には大容量化に加えて飛躍的な高速化が要求される。近年、スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動現象が注目されており¹⁾、我々はこの現象を利用した小型かつ高速な非圧縮 SHV 記録装置の実現を目指している。これまでに既存の HDD 用磁気ヘッドを用いて磁性細線中の磁区形成 (記録)・駆動・磁区検出 (再生) を一連の動作で実証した²⁾。今回、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて主に磁区形成に着目して高速化の検討を行ったので報告する。

シミュレーション方法

磁区形成過程は、スピントルク項を追加した拡張 LLG 方程式を用いて計算を行った。磁性細線は、長さ 1.5 μm 、幅 60 nm、膜厚 20 nm でメッシュサイズは 4 nm 一定とした。磁性細線の磁気特性は、飽和磁化 200 emu/cc、異方性磁界 8.9 kOe とした。Fig. 1 に磁性細線と記録ヘッドのモデルを示す。磁性細線-記録ヘッド磁極間距離は 10 nm とし、細線の上部に配置した記録ヘッドの磁極から下向きに磁束が流れるよう、細線下部にも同形状の記録ヘッドを鏡像として配置した。細線の初期磁化方向は全て上向きとし、コイルに電流を印加することで下向き磁界を発生させた場合について、反転磁区の形成過程を計算した。

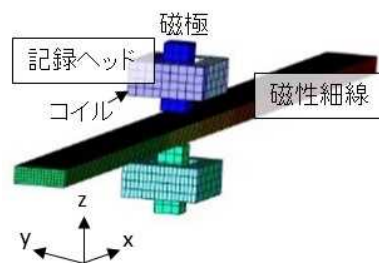


Fig. 1 Simulation model

シミュレーション結果と考察

Fig. 2 に磁性細線の直上に記録ヘッドを配置した場合 (上下記録ヘッドの磁極を結ぶ線と細線法線のなす角 0°) の磁区形成過程を示す。ヘッド磁界印加後 0.3 ns で反転磁区が核形成され、その後、反転磁区が拡大し安定化するまで 4 ns かかった。Fig. 3 に上下の記録ヘッドを細線の+y 方向、-y 方向にそれぞれ 30 nm ずらした場合 (上下ヘッドの磁極を結ぶ線と細線法線のなす角 56°) の磁区形成過程を示す。この場合には 0.01 ns で反転磁区が核形成され、0.3 ns の極短時間で磁区が安定化することがわかった。また、それぞれの場合において記録ヘッドの磁界分布を計算したところ、 0° の場合には z 方向成分のみで x、y 方向には磁界は分布しないが、 56° の場合には x、y 方向にもヘッド磁界が分布している結果が得られた。このことから、x、y 方向の磁界成分が z 方向への磁化反転をアシストすることによって、高速に磁区形成できたと考えられる。

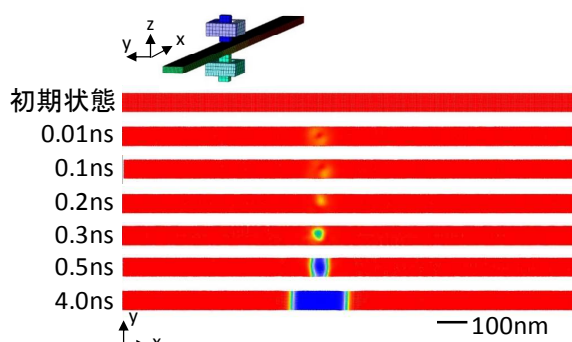


Fig.2 Time-dependent change of magnetic

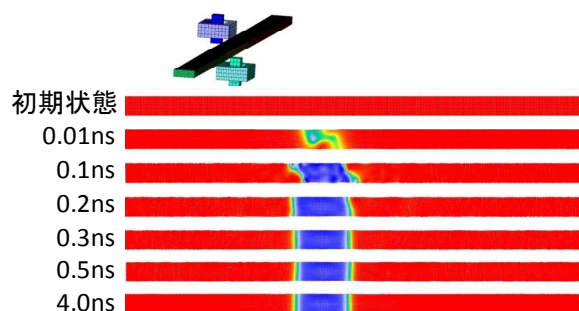


Fig. 3 Time-dependent change of magnetic domain formation at an angle between recording head and nanowire of 56°

参考文献

- 1) S. S. P. Parkin et al. : Science, 320, 190, (2008)
- 2) 奥田光伸ほか : 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 9aC-11, p.130 (2015)

Micromagnetic simulation of domain wall propagation along meandering magnetic strip with spatially modulated material parameters

Zhaojie Zhang, Terumitsu Tanaka, Kimihide Matsuyama
(Department of electronics, ISEE, Kyushu Univ.)

Introduction

Well controlled two-dimensional propagation of domain walls (DWs) enables sophisticated functional design in various DW based devices, including the race track memory. The local modification of magnetic properties, fabricated with the ion irradiation for example [1], is a possible way without geometric constrictions to create pinning sites for DWs. In the present study we propose a meandering propagation truck for DWs by using magnetic strip with pinning sites (PSs) as above, and demonstrate possibility of high density integration exceeding 100 Gbit/cm² by micromagnetic simulations.

Numerical model

A schematic of a magnetic strip with periodic pinning sites (PS) is shown in Fig. 1. PSs were numerically modeled by the gradual parabolic reduction of the saturation magnetization M_s and the related perpendicular anisotropy K_u ($\propto M_s^2$). The modification coefficient r ($= (M_s - M_{s,min})/M_s$) was defined as a measure of pinning intensity. The following structural parameters were assumed in the simulation: thickness $d = 5$ nm, width $W = 40$ nm. Length of PS (L_1) and the value of r were preliminarily optimized as 20 nm and 0.3, respectively, so that the energy barrier height ΔE for the pinned DW satisfy the practical data stability requirement ($> 60 k_B T$). Standard material parameters for a Co/Ni multilayer were adopted: $M_s = 600$ emu/cm³, $K_u = 1.3 \times 10^4$ erg/cm³, $\alpha = 0.02$. Magnetic strip was discretized into 2-D dipole array and the LLG equation was numerically integrated with a finite differential method.

Results and discussions

Snap shots of the propagating DW are shown in Fig. 2. The observed significant DW bending can be associated with the inhomogeneous current distribution and the geometrical local pinning at the corner. Fig.3 demonstrates successful bit-by-bit DW propagation along a meandering strip, where the DW is driven by pulsed currents with 1.0 ns width and 3.0 ns interval. The DW was stabilized inside the PS after the pulse end, accompanied with subtle positional fluctuation caused by the residual momentum dissipation. Typical error modes of excessive and delaying propagation are also shown in the figure. The current amplitude margin for the bit propagation along straight part and around corner can be well matched by optimizing the PS interval L_2 and the corner distance dL as 60 nm and 0 nm, respectively. The practical current amplitude margin is $J = 2.4 \times 10^8$ A/cm² $\pm$ 37.5 % for the whole bit-by-bit propagation, as presented in Fig.4.

Reference

[1] A. Vogel et al., IEEE Trans. Mag., 46, 1708 (2010).

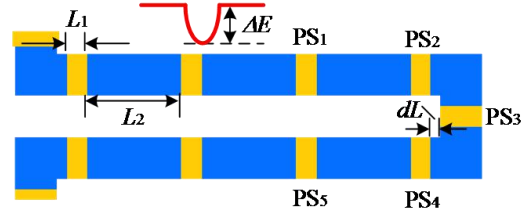


Fig.1. Schematic of numerical model for a DW propagation truck with pinning sites.

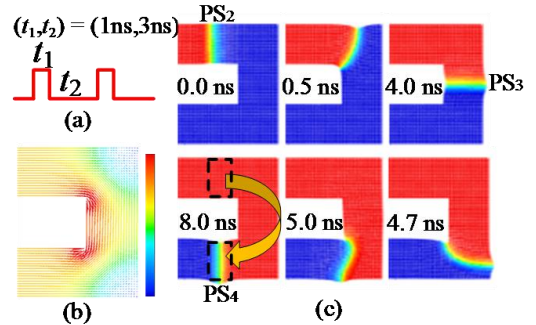


Fig.2 (a) Spin polarized current pulses. (b) Current density distribution at Corner. (c) DW propagation process at the corner.

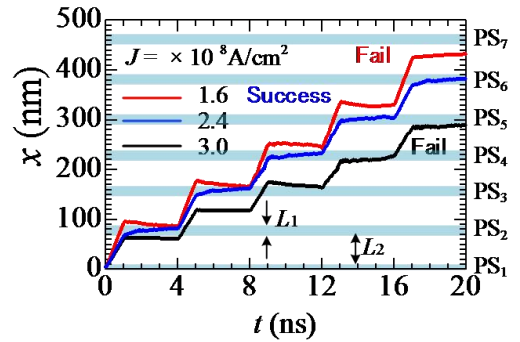


Fig.3 Time evolution of the propagating DW position along the magnetic stripe.

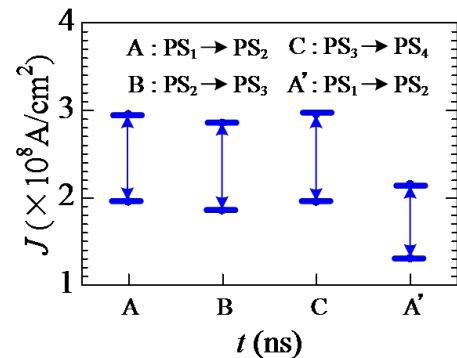


Fig.4 Bit propagation margin of the pulsed current density for DW motion ($dL = 0$ nm; $L_1 = 20$ nm, $L_2 = 60$ nm (A,B,C), $L_2 = 40$ nm (A'))

強磁性カイラル構造のマイクロマグネティクス計算

富田知志、児玉俊之、柳久雄、葛西伸哉*、三俣千春*

(奈良先端大、*物材機構)

Micromagnetics simulation of ferromagnetic chiral structures

S. Tomita, T. Kodama, H. Yanagi, S. Kasai*, C. Mitsumata*

(NAIST, *NIMS)

はじめに

時間反転対称性と空間反転対称性が共存した系、すなわち磁性体のカイラル構造が物性物理において興味を持たれている。特に電磁波の偏光には無依存だが進行方向には依存して屈折率が異なる磁気カイラル効果が期待されている。磁気カイラル効果は、外場によって切り替え可能な非相反マジックミラーの実現という応用の観点のみならず、光にとつての「磁場」である人工的ゲージ場の実現という基礎研究の立場からも大変興味深い。しかしながら天然の物質での磁気カイラル効果は、表裏の屈折率差にして 10^{-8} 程度と極めて小さく、その観測には強磁場もしくは低温が不可欠であった。そこで我々は人工構造（磁気カイラルメタ分子）での共鳴現象を用いることで、室温及び弱磁場にも関わらずマイクロ波領域で屈折率差が 10^{-3} 程度と比較的大きな磁気カイラル効果の観測に成功した[1]。更に高周波化に向けて応力誘起自己巻き上げ法を用いた磁気カイラルメタ分子の微細化を進め[2]、ミクロンサイズの単一メタ分子の強磁性共鳴(FMR)を調べている[3]。今回はこれらの実験と相補的に進めてきたマイクロマグネティクス計算の結果について報告する。

計算方法

実験と同じ幅 $9\mu\text{m}$ 、厚さ 60nm の強磁性体の短冊が、時計回り (CW) もしくは反時計回り (CCW) に5周巻いたカイラル構造を計算機中でモデル化した。カイラル構造の直径は $50\mu\text{m}$ であった。カイラルピッチは $10\mu\text{m}$ で、長さは $50\mu\text{m}$ となる。短冊を $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ のメッシュで切った。厚さ方向は1メッシュで、1周は52メッシュとなる。メッシュの中心に磁気モーメント (800emu/cc) を配置した。カイラル軸 (z 軸) と外部直流磁場との成す角を θ とした。直流磁場の強さと θ を変化させながら、磁気モーメント間の交換相互作用及び双極子相互作用を取り入れ、磁気モーメントの運動方程式である LLG 方程式を直接解いた。なお交換固さは 10^{-6}erg/cm 、ダンピング定数は 0.01 とした。マイクロ波の周波数は 9GHz とし、マイクロ波磁場の強さは 0.5Oe であった。温度は絶対零度であった。

計算結果

図に計算で得られた共鳴信号を示す。横軸は直流磁場の強さ、縦軸は x 方向の磁気モーメントの強度である。赤色が $\theta=0$ 度、緑色が $\theta=15$ 度に対応する。各色で $\triangle$ が CW、 $\blacksquare$ が CCW の結果に対応する。直流磁場は強磁性膜の面内に向いた $\theta=0$ 度の場合、 950Oe 付近に共鳴が見て取れる。これは磁気モーメントの一斉歳差運動であるキッテルモードの FMR と考えられる。一方 $\theta=15$ 度では、強磁性膜面に対して直流磁場が傾いているため、反磁場によって共鳴磁場が 1000Oe 付近に高磁場シフトしている。これらの計算結果は、実験結果[3]を定性的に再現している。 $\theta=0$ 度の場合、CW でも CCW でも共鳴磁場は同じであった。これに対して $\theta=15$ 度では、CCW の共鳴磁場は CW よりも若干高磁場にみえる。講演では FMR 信号の印加磁場角度及びカイラリティへの依存性について詳細に報告する予定である。

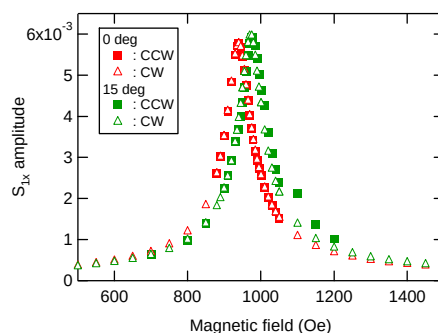


Fig. Calculated FMR signals.

参考文献 [1] S. Tomita et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 235501 (2014). [2] T. Kodama et al., *Appl. Phys. A* **122**, 41 (2016). [3] T. Kodama et al., submitted.

磁性細線の横方向の磁気異方性の導入及びその磁区構造

池田智彦、劉小晰
(信州大学)

Introducing transversal magnetic anisotropy in magnetic wires and its effect on the magnetic domain configuration

Tomohiko Ikeda, Xiaoxi Liu
(Shinshu University)

はじめに

次世代高密度情報ストレージのレーストラックメモリやスピントランジスタの分野では、磁性細線の磁区構造に関する研究は極めて重要である。これまでの磁性細線に関する先行研究では、主に磁性細線の長手方向の形状磁気異方性を利用した軟磁性磁性細線及び垂直磁気異方性を持つ磁性細線の二種類に分けられる。ここで我々は、特殊な成膜法を用いて、磁性細線の横方向に磁気異方性を導入し、その磁区構造を報告する。

実験方法

露光装置及び対向スパッタ装置を用いて、ガラス基板上に、幅 $2\ \mu\text{m}$ から $20\ \mu\text{m}$ 、厚さ $5\ \text{nm}$ から $40\ \text{nm}$ の FeCo 磁性細線を形成した。FeCo の結晶粒子サイズ及び保磁力を低減するために、CoNi 下地層を用いた。磁性細線の基本磁気特性を調べるために、同条件で磁性薄膜を成膜し、その磁気特性を振動試料型磁力計で測定した。カー顕微鏡、磁気力顕微鏡及び粉末図形法を用いて、磁性細線の磁区構造及びその膜厚、細線幅との関係について実験を行った。磁性細線中の磁区構造を解析するために、OOMMF を用いて磁区構造をシミュレーションした。

実験結果

Fig.1 に対向式スパッタ装置を成膜した FeCo 薄膜の磁化曲線を示す。面内に容易軸と困難軸を示す。容易軸方向では、角型比ほぼ 1 の磁化曲線を示す一方、困難軸では、残留磁化極めて低い磁化曲線を確認された。容易軸と困難軸の交差磁界は約 $80\ \text{Oe}$ と確認された。Fig.2 に FeCo の面内磁気異方性の容易軸を磁性細線横断方向に配置した面内カー顕微鏡(a)及び粉末図形法(b)の結果を示す。面内カー顕微鏡では、明暗のコントラストを確認され、細線横方向に 180° 磁壁があると考えられる。粉末図形法では、細線横方向の直線状磁壁が確認された。

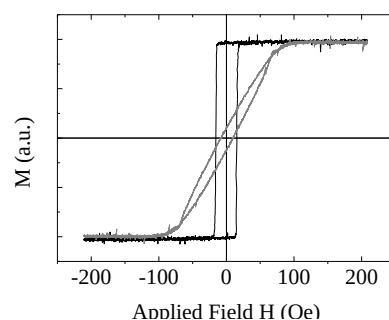
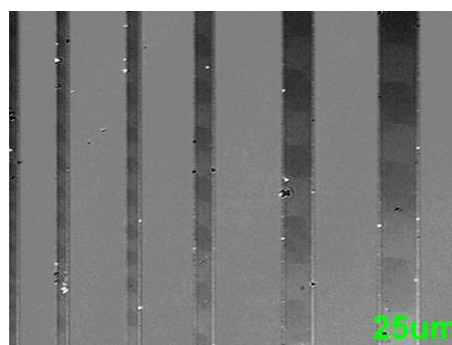
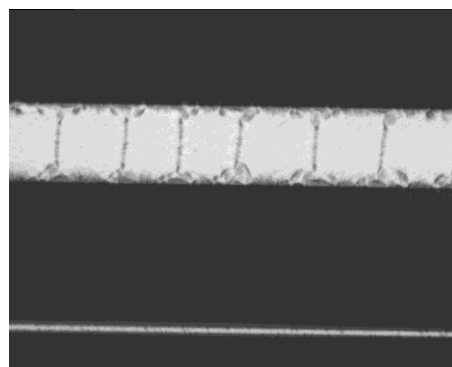


Fig. 1 Typical hysteresis loops of FeCo films.



(a)



(b)

Fig. 2 magnetic domain configuration of magnetic wires by (a) Kerr microscope and (b) Bitter pattern.

磁性量子セルラオートマタに基づく双方向シフトレジスタ

吉岡 直倫, 野村 光, 中谷 亮一
(阪大工)

Bidirectional shift register based on magnetic quantum cellular automata

Naomichi Yoshioka, Hikaru Nomura, Ryoichi Nakatani
(Osaka Univ.)

概要

近年, 磁性量子セルラオートマタ (Magnetic quantum cellular automata : MQCA)^{1,2} に代表される微小磁性体を利用したデバイスが, 低消費電力性能の観点から注目されている. MQCA 回路を実現するためにはゲートの間での情報の伝送方向の制御が必要となる. また, 動作時に伝送方向を切り替え可能であることが望ましい. そこで我々はそのような MQCA に基づく素子, 双方向シフトレジスタ素子を提案する.

実験方法

MQCA 双方向シフトレジスタ素子として, Au(3 nm)/Ni-20 at.%Fe(20 nm)の膜構成を持つ微小磁性体を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て Si 基板上に作製した(図 1(a)). 磁気力顕微鏡探針には, 市販のカンチレバー (SI-DL40) にイオンビームスパッタリング法を用いて Co-17 at.%Pt (80 nm)を製膜したものを用いた. バイナリ情報の入力には, 外部磁場ならびに, 磁気力探針による磁性マニピュレーションを用いた. 情報のシフトには, 一様な外部磁場を試料に印加した(図 1 (b), (c)). バイナリ情報の読み取りには, 高さ一定モード磁気力顕微鏡法を用いた.

実験結果

本素子が適当な外部磁場下で, 双方向に情報を 1 ビットシフトできることが確認された. また正しくビットシフトをする外部磁場強度の範囲を, 各向き (図 1 (b), (c))ごとに確認した. このシフトレジスタを用いることによって, 近い将来複数の演算ゲートを接続した MQCA 回路が実証されると期待している.

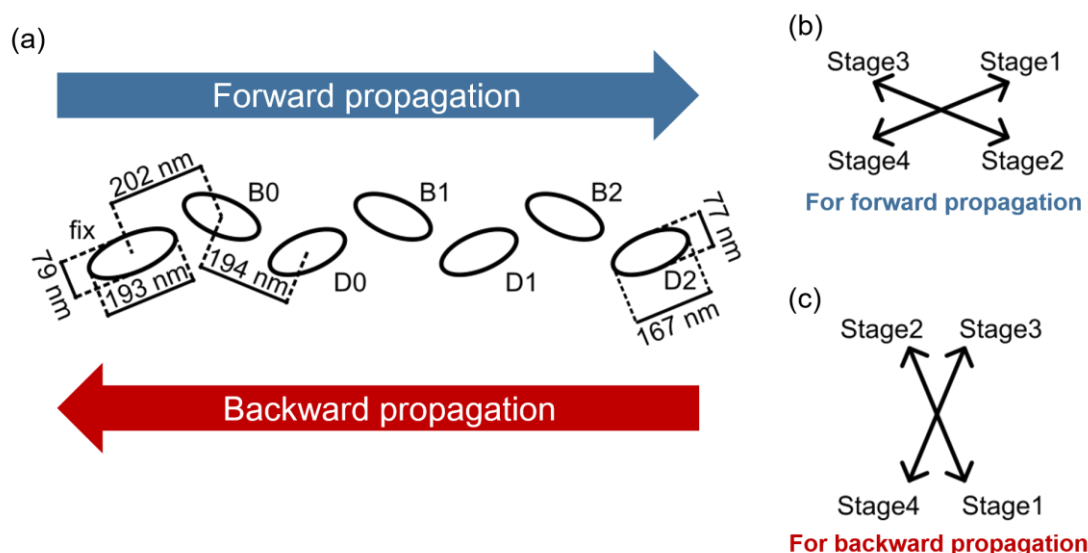


図 1 (a)双方向シフトレジスタの概要図と(b)順方向, (c)逆方向情報伝送時の外部磁場印加方向.

参考文献

- 1) R. P. Cowburn and M. E. Welland, Science, 287, 1466 (2000).
- 2) H. Nomura and R. Nakatani, Applied Physics Express, 013004 (2011).