

令和元年6月6日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14257

研究課題名(和文) ナノ界面磁壁の制御と3次元シフトレジスターへの応用

研究課題名(英文) Controlling of nanostructured magnetic domain wall and its application to three dimensional shift resistor

研究代表者

松山 公秀 (Matsuyama, Kimihide)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：80165919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：界面磁壁の3次元シフトレジスター動作に適した材料系の一次候補として、Co/Ni等の人工格子膜に着目し、核形成磁界と磁壁抗磁力の比を、磁壁情報安定性と低電力磁壁転送との相反要求に対する性能指標として層構成の最適化を行った。マイクロマグネティクスシミュレーションにより、界面磁壁を熱擾乱に抗して安定に保持可能な磁気異方性変調構造や磁壁駆動電流を明らかにした。層厚10nmの面内磁気異方性層が界面磁壁に対して安定なピンニングサイトとして機能することを明らかにし、30nm周期で形成したピンニングサイト間を実用上十分な駆動電流余裕度(中央値の34%)でビットシフト可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モバイル情報機器やクラウドコンピューティングの普及に伴い、その重要な基盤技術である情報ストレージに対する性能要求が急速に高まりつつある。情報担体となる磁壁自体を膜厚方向に沿って自在に移動させる技術が開発できれば、シフトレジスター動作を2次元から3次元へと展開することができ、飛躍的な記録密度の向上が期待できる。本研究では、既存の強磁性金属で構成可能な垂直磁気異方性層と面内磁気異方性層とを数nmの層厚で交互に積層した磁性ナノコンポジット構造が、3次元シフトレジスターの基本構造として実用的な動作性能を有することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Artificial super lattices of Co/Ni etc. were focused as promising material system for a three dimensional shift resistor. The layer structure were optimized with the ratio of domain nucleation fields and domain wall coercive fields, which is a figure of merit for contradicting demand of stored information stability and low power domain wall operation. Magnetic anisotropy modulation to stabilize the domain wall against the thermal agitation and the required electric current density for domain wall propagation were numerically evaluated with micromagnetic simulations. It was clarified that the in-plane magnetic anisotropy layer with the thickness of 10 nm exhibited superior wall pinning property. Successful bit shift between the pinning sites arraigned with 30 nm period has been demonstrated with practical drive current margin (34 % of mid value).

研究分野：磁気デバイス工学

キーワード：電子デバイス・機器 スピンエレクトロニクス 磁性薄膜 磁壁 磁気記録

1. 研究開始当初の背景

モバイルデバイスやクラウドコンピューティングの普及に伴い、その重要な基盤技術である情報ストレージに対する性能要求が急速に高まりつつある。IBM社から提案されたレーストラックメモリと呼ばれる磁性体メモリは、磁性細線への直接通電により誘起される駆動トルク（スピン移行トルク）によって磁壁を移動させるシフトレジスタ型のメモリであり、ハードディスクの大容量性とDRAM級の高速性を併せ持つ次世代の情報ストレージ技術として、その実用化に大きな期待が寄せられている。

他の集積デバイスと同様、レーストラックメモリにおいても基板面内の集積度向上については、加工精度上の微細化限界や、情報の安定保持に関する物理的限界への直面が必至とされている。申請者は、磁性多層膜による膜厚方向への磁気記録情報の多値化を提案し、試作素子により有効性を実証しているが、記録情報位置が固定されているため、記録階層数の増大に伴う読み出し分解能低下の問題があった。情報担体となる磁壁自体を膜厚方向に沿って自在に移動させる技術が開発できれば、シフトレジスタ動作を2次元から3次元へと展開することができ、飛躍的な記録密度の向上が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、垂直磁気異方性層と面内磁気異方性層を数 nm の層厚で交互に積層した磁性ナノコンポジット構造を作製し、膜厚方向に沿った 10nm 以下の転送周期でのシフトレジスタの可能性を追求する。磁壁エネルギーを膜厚方向に沿って人為的に変化させる試みはこれまで行なわれておらず、大容量性と高速性を兼備した 3次元シフトレジスタ機能の創出に向け、実験と計算機シミュレーションの両面から研究を推進する。

(2) 強磁性多層構造膜を材料系候補として、層構造と磁気ヒステリシス特性との関係を詳しく調べ、界面磁壁形成の傍証となる多段階ヒステリシスの発現条件を明らかにする。次いで、パルス磁界印加による磁気 Kerr 効果信号の変化や、マイクロ波磁界に対する共鳴特性測定から、磁壁移動速度や磁壁質量等の動特性を明らかにする。さらに、3次元構造の磁壁転送路を設計し、スピン偏極電流パルスの印加による数ナノ秒のビット転送時間での 3次元シフトレジスタ動作を検証する。

3. 研究の方法

(1) 垂直/面内磁気異方性多層膜の作製

垂直磁気異方性層と面内磁気異方性層（以下、各々、垂直層、面内層と称す）とを交互に積層した種々の材料系、層構造の多層膜を作製し、次項以下に示す 3次元シフトレジスタ機能に適した材料系探索のための評価実験に供する。成膜にはタンデム型多元マグネトロンスパッタリング装置（研究室現有設備）を用い、PC 制御によるシャッター開閉機構により原子層オーダーで各層厚を制御する。層厚校正には触針式段差測定装置を用い、サンプリング試料については AFM、断面 TEM 観察等により実膜厚、実層厚を測定する。

界面磁壁の転送媒体となる垂直層の材料系としては、FePd、MnGa、MnAl 等の L_{10} 規則格子合金を候補とする。これらの材料系は、 10^7erg/cm^3 以上の垂直磁気異方性を有することから、磁化遷移幅の狭小化が可能であり磁壁の集積性に優れている。また、動的磁化過程における制動効果を示すダンピング定数が 0.01 以下と非常に小さいためにスピン移行トルクによる磁壁の駆動効率が高く、低電流動作が期待できる。GaAs 等の半導体基板上へのスパッタリング法によるエピタキシャル成膜が可能であり実用材料としても有望である。界面磁壁の安定位置を規定する面内層には、顕著な面内磁気異方性が報告されている Fe/Co、Fe/Ta 等を始め、種々の 3d/nd ($n=3, 4, 5$) 界面多層膜について適正材料系を探索する。

(2) 磁壁の静特性評価

試料振動型磁力計、磁気 Kerr 効果測定装置、磁気伝導評価システム等の評価系を用いて、外部磁界掃引に対する磁化の応答特性を詳細に調べる。第一段階として、垂直層と面内層との 2層膜を作製する。2層膜における残留磁化の面内層厚依存性から、磁化方向遷移幅（～交換長）を評価し、層構造設計の一次指針とする。これを基に、3層膜（垂直層/面内層/垂直層）、多層膜と段階的に階層数を増加し、界面磁壁形成の傍証となる 2段階、多段階の磁気ヒステリシス特性の実現を図る。多段階ヒステリシス特性において磁化が一定値を保持する磁界範囲及びその温度依存性等から、面内層により形成される磁壁エネルギー谷を定量的に評価する。

(3) 計算機シミュレーションによる磁壁構造解析

結晶構造配置した磁性原子間の交換相互作用、及び各磁性原子の磁気異方性エネルギーを定式化し、原子レベルでのスピン配列構造を解析可能なスピニクスシミュレーションを新たに開発する。

4. 研究成果

(1) 磁壁を情報担体とする3次元シフトレジスタの実現に向け、構成材料としてCo/Ni, Co/Pd等の人工格子膜を選定のうえ、核形成磁界 H_n と磁壁抗磁力 H_w の比を磁壁情報安定性と低電力磁壁転送との相反要求に対する性能指標として、成膜条件、下地層、積層構造の最適化を行った。

[Co(0.2nm)/Ni(0.8nm)]_N/Au(75nm)/Ti(5nm)の試料において2kOe以上の異方性磁界と比較的小さな H_w/H_n 値(<0.7)が得られ(図1)、最適化前における磁壁移動に要する電流閾値を1桁程度低減することに成功した。また、磁性細線の磁壁ピン止め力をより正確に評価するため、磁性細線の局所ジュール加熱により温度勾配付与し、細線に沿って磁化反転磁界を変調する新たな磁壁の初期設定手法を開発した。

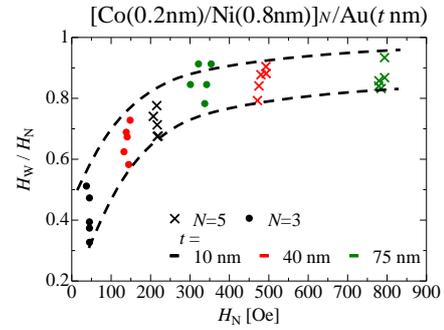


図1 Co/Ni人工格子膜における、磁壁抗磁力 H_w 及核形成磁界 H_n の層構成依存性

(2) 磁壁を基板面と垂直方向に制御性良く転送するための機能要素として、垂直磁気異方性層と面内磁気異方性とを周期積層したナノピラーを提案し素子構造の基本設計(図2)を行うと併に、マイクロマグネティクスシミュレーションにより界面磁壁の転送特性評価を行った(図3)。層厚10nmの面内磁気異方性層が界面磁壁に対して実用上十分なピンングサイトとして機能することを明らかにし(図4)、30nm周期で形成したピンングサイト間を1ns幅の電流パルスでビットシフト可能であることを示した(図5)。素子各部の構造パラメータを最適化することで、コーナー部転送を含む3次元シフトレジスタ

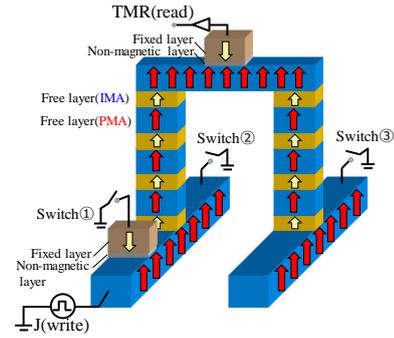


図2 3次元シフトレジスタの素子構造

動作が $3.8 \times 10^8 \text{ A/cm}^2 \pm 19\%$ の広い動作電流マージンで実現可能であることを明らかにした。

複数磁壁の転送時には、磁壁間の静磁気相互作用の影響により、磁壁転送が低下することが判明したが、隣接磁壁間にダミービットを設けることで、静時期相互作用の低減を図った結果、単独磁壁と同等のビット転送特性が得られることを明らかにした。

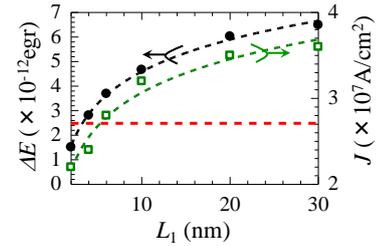


図4 磁壁移動に対するエネルギー障壁高さ

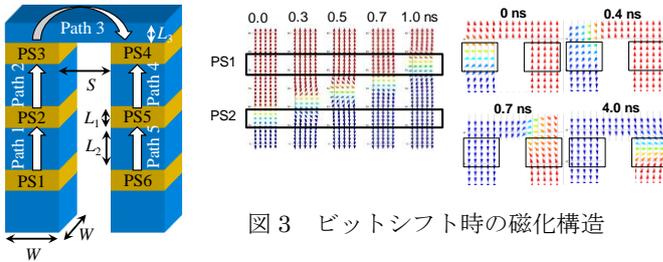


図3 ビットシフト時の磁化構造

(3) 当該デバイスの材料候補である[Co(0.2nm)/Ni(0.8nm)]_N/Au(75nm)/Ti(5nm)人工格子膜の動特性を評価するため、同膜を微細加工した磁性細線上にコプレーナ伝送路を配した評価素子を作成し(図6)、ベクトルネットワークアナライザ分光法により強磁性共鳴(FMR)特性を評価した。FMR周波数(f_r)のバイアス磁界依存性(図7)から見積もられる垂直磁気異方性等価磁界は積層数 $N=25$ の場合7.1kOeであり N の増加に伴い減少する傾向にあることが分か

$L_1 = 10 \text{ nm}, L_2 = 20 \text{ nm}, L_3 = 6 \text{ nm}$

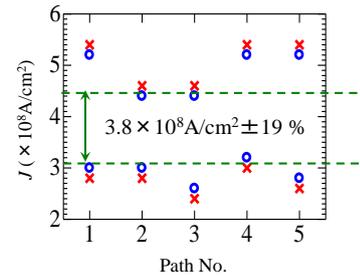


図5 3次元シフトレジスタ動作の駆動電流マージン

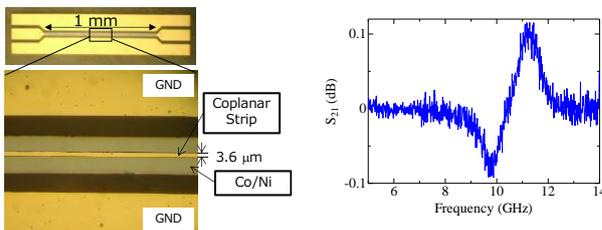


図6 ネットワークアナライザ分光法によるCo/Ni人工格子膜の強磁性共鳴特性評価

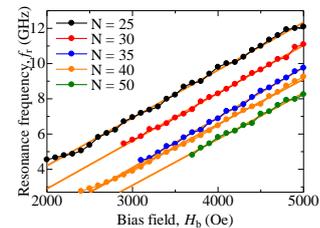


図7 強磁性共鳴周波数のバイアス磁界強度依存性

った ($f_r = 5.9$ kOe, @N=50). さらに, 磁気損失がより小さく点電流での磁壁転送が期待できる FePd 規則格子合金に着目し, 磁壁転送路への応用に向けた磁気特性の実現を図った. マグネトロンスパッタリングにより, 成膜温度 400 °C, ポストアニール温度 500°C で作製した FePd 膜において, 規則格子の形成を示唆する (001) ピークを観測すると共に, 顕著な垂直磁気異方性の発現を確認した.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Y. Hashiguchi, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Feasibility study on three-dimensional shift resistor with ferromagnetic nano-pillars”, 査読無, Proceeding of 28th Annual Meeting of MRS-J, B3-P18-018 (2018).
- ② M. Fukuzono, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “On chip measurements of spin wave resonance properties in perpendicularly magnetized microstrips”, 査読無, Proceeding of 28th Annual Meeting of MRS-J, B3-P18-009 (2018).
- ③ R. Akimitsu, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Spin wave resonance properties of strips with four fold in-plane magnetic anisotropy”, 査読無, Proceeding of 28th Annual Meeting of MRS-J, B3-O19-001 (2018).
- ④ 田中輝光, 金井靖, 松山公秀, “マイクロ波アシスト磁気記録におけるグラニューラー媒体への記録特性”, 査読無, IEICE Technical Report, 47-52 (2018)
- ⑤ X. Ya, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Standing spin wave resonant properties of spin-twist structure in exchange coupled composite films”, AIP Advances, 査読有, 7, 056028, (2017).
- ⑥ Y. Wang, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Atomistic simulation of heat-assisted linear reversal mode in nanodots with perpendicular anisotropy”, AIP Advances, 査読有, 7, 056015 (2017).
- ⑦ Z. Zhang, T. Tanaka, and K. Matsuyama, “Micromagnetic simulation of domain wall propagation along meandering magnetic strip with spatially modulated material parameters”, AIP Advances, 査読有, 7, 055922 (2017).
- ⑧ Xiaorui Ya, Terumitsu Tanaka and Kimihide Matsuyama, “Numerical Study on Microwave based Read-write Operation in Magnetic Vortex Memory”, ITE Trans. on MTA, 査読無, Vol. 4, No. 4, pp. 292-295 (2016).
- ⑨ T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai and K. Matsuyama, “Microwave-assisted shingled magnetic recording simulations on an exchange-coupled composite medium”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol. 416, pp. 188–193 (2016).
- ⑩ T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai and K. Matsuyama, “Microwave-assisted shingled magnetic recording simulations on an exchange-coupled composite medium”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol. 416, pp. 188–193 (2016).

[学会発表] (計 18 件)

- ① 福園舞桜, 牙 暁瑞, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀, “反強磁性交換結合膜における共鳴特性の数値解析” 日本磁気学会第 42 回学術講演会, 13pD-8, 2018.
- ② 秋光果奈, 牙 暁瑞, 福園舞桜, 田中輝光, 松山公秀, “CoFeB 薄膜における 4 回対称磁気異方性とスピン波共鳴特性の実験”, 日本磁気学会 第 42 回学術講演会, 13pD-9, 2018.
- ③ 牙 暁瑞, 福園舞桜, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀, “垂直磁化細線における電圧励起スピン波の共鳴特性”, 本磁気学会 第 42 回学術講演会, 13pD-10, 2018.
- ④ 福園舞桜, 牙 暁瑞, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀, “反強磁性交換結合による共鳴周波数の高周波化に関する数値解析”, 第 71 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 08-1A-11, 2018.
- ⑤ 牙 暁瑞, 福園舞桜, 秋光果奈, 田中輝光, 松山公秀, “垂直異方性の電圧制御によるスピン波励起と共鳴特性の数値解析”, 第 71 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 08-1A-12, 2018.

- ⑥ 秋光果奈, 牙 曉瑞, 福園舞桜, 田中輝光, 松山公秀, “CoFeB 面内磁化薄膜の 4 回対称磁気異方性とスピン波共鳴特性” 第 71 回電気・情報関係学会九州支部連合大会, 08-1P-01, 2018.
- ⑦ 田中輝光, 金井靖, 松山公秀, “マイクロ波アシスト磁気記録におけるグラニューラー媒体への記録特性”, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会 (MRIS), 47-52, 2018.
- ⑧ M. Fukuzono, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “On chip measurements of spin wave resonance properties in perpendicularly magnetized micro-strips”, 第 28 回 日本 MRS 年次大会, B3-P18-009, 2018.
- ⑨ Y. Hashiguchi, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Feasibility study on three-dimensional shift resistor with ferromagnetic nano-pillars”, 第 28 回 日本 MRS 年次大会, B3-P18-018, 2018.
- ⑩ R. Akimitsu, X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Spin wave resonance properties of strips with four fold in-plane magnetic anisotropy”, 第 28 回 日本 MRS 年次大会, B3-O19-001, 2018.
- ⑪ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Numerical analysis on spin dynamics in multilayer nanodots with interlayer antiferromagnetic coupling” IEEE International Magnetism Conference, 2017.
- ⑫ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Controlling of voltage-induced spin wave resonance properties in ferromagnetic nanowires with perpendicular anisotropy”, IEEE International Magnetism Conference, 2017.
- ⑬ T. Tanaka, Y. Nozaki and K. Matsuyama, “Micromagnetic calculation of microwave-assisted magnetization switching process for granular films”, IEEE International Magnetism Conference, 2017.
- ⑭ Z. Zhang, Y. Hashiguchi, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Numerical study on vertical domain wall propagation for three-dimensional race track memory”, IEEE International Magnetism Conference, 2017.
- ⑮ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Standing spin wave resonant properties of spin-twist structure in exchange coupled composite films”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑯ Z. Zhang, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Micromagnetic Simulation of Domain Wall Propagation Along Meandering Magnetic Strip With Spatially Modulated Material Parameters”, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑰ Y. Wang, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Atomistic simulation of heat assisted linear reversal mode in nano-dots with perpendicular anisotropy, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016.
- ⑱ X. Ya, T. Tanaka and K. Matsuyama, “Controlling of standing spin wave configuration in nanowires with domain wall”, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松山 公秀 (MATSUYAMA KIMIHIDE)
九州大学・大学院システム情報科学研究所・教授
研究者番号：80165919