

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360126

研究課題名(和文)サブネットワークスピントルクによる省電力全固体スピンメモリの研究

研究課題名(英文)Basic study of a magnetic solid state power saving memory using subnetwork spin torque effect

研究代表者

栗野 博之(AWANO, HIROYUKI)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40571675

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文):磁性細線上の磁壁をデータとする全固体メモリの基礎検討を行った。磁壁データ列の駆動には伝導電子のスピントルクやスピンホール効果などを利用する。従来のFeNiやCo/Ni磁性細線では磁壁駆動に大電流を必要としていた。この磁性細線はエッチングで作成するため、エッジ荒れにより磁壁駆動は難しかった。そこで、新しい磁性細線作成法(ナノインプリント法)を提案した。磁性膜には希土類・遷移金属合金を利用することで磁壁駆動電流密度をFeNiの500分の1にまで低減した。また、本手法を駆使して45nm極細磁性細線を作成し、この上に市販磁気ヘッドで記録し、TMR再生ヘッドで記録磁区を再生することにも成功した。

研究成果の概要(英文):Current driven domain wall memory with RE-TM magnetic layer has been investigated. Generally, FeNi or Co/Ni magnetic wires have been fabricated by etching process. However, it gives a damage to the magnetic wire edge, then it will interfere with the domain wall motion. Therefore, a new magnetic wire fabrication technique without etching has been proposed. It is named as nano-imprinted magnetic wire. By using this technique, we have succeeded to obtain smooth wire edge and the critical current density of domain wall motion has been drastically improved compared with that of the conventional magnetic wire as FeNi alloy and Co/Ni multilayer. By using the nanoimprint RE-TM magnetic wire fabrication technique without any etching process, 45nm width magnetic wire with smooth edge has been fabricated successfully. Next, a recording mark was fabricated on the narrow track by commercialized magnetic head. The recorded mark has been also observed by scanning image of the TMR head.

研究分野：スピントロニクス、磁気記録

キーワード：ナノインプリント磁性細線 トルク スピンホール効果 磁壁の電流駆動 エッチングレス磁性細線 希土類遷移金属合金 磁壁駆動電流密度 スピン 磁壁移動速度

1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングやビッグデータなど IT 技術の急速な進展により、扱うデータ量は従来にも増して爆発的に増加している。加えてデータ量を増やしているのが経済成長著しい新興国である。すなわち、水や食料の供給不足同様、データストレージも足りなくなり、生産工場を大增設して供給を満たす場合には、現在の電力問題が更に深刻になる。これを回避するためには、データストレージの主役であるハードディスク(HDD)や半導体メモリの消費電力を劇的に低減する必要がある。現在の SRAM や DRAM などの半導体メモリは揮発メモリであるためデータ保持に多くの待機電力を必要とするため、不揮発メモリである MRAM の研究及び製品開発が盛んに行われている。この MRAM はメモリ構成が非常に複雑なため高コストであり、IBM はシングルビットの MRAM を FeNi 磁性細線上にマルチビット化した Racetrack メモリを提案した。この細線に電流を注入するとすべてのマルチビット(ビット境界は磁壁)を一斉にシフトすることができる。ただし、FeNi は磁性材料中最も保磁力が小さく磁壁を動かしやすい材料であるにも拘らず、磁壁を動かすための臨界電流密度(Jc)は $1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ と大きいことがわかった。この原因として、FeNi の飽和磁化が大きい事、及び磁性細線作成時のエッジ荒れが考えられる。

2. 研究の目的

そこで、飽和磁化の小さな希土類遷移金属合金で磁性細線を作成し、希土類と遷移金属の磁気モーメントのサブネットワークが互いにキャンセルする最適組成で飽和磁化を低減することによる Jc 低減効果の確認、および従来の磁性細線作成法(エッチング法)ではなく全く新しい細線作成法(ナノインプリント法)による細線エッジ荒れの低減効果、更にこれによる Jc 低減効果を確認する事を目的とした。

3. 研究の方法

図1には、磁性細線の作成方法を示す。従来の作成法を図1(a)に示す。自然酸化膜の

ついた通常の Si 基板に磁性膜をスパッタ法で製膜する。これにレジストを塗布し、電子線露光装置で所望の細線パターンを描画する。これをドライエッチング装置に装填して Ar イオンでエッチングを行うと露光部分はレジストがマスクとして機能するために非露光部の磁性膜だけが削られて除去される。その後、レジストを除去して磁性細線が完成する。ただし、磁性膜が削り取られた細線エッジ部分を SEM で観察した結果を同プロセス下に示したが、10nm の凹凸が生じておりかなり荒れていることがわかる。この磁性細線に磁壁を記録して移動しようとするこの凹凸はピンニングポイントになり、電流による磁壁移動の障害となる。

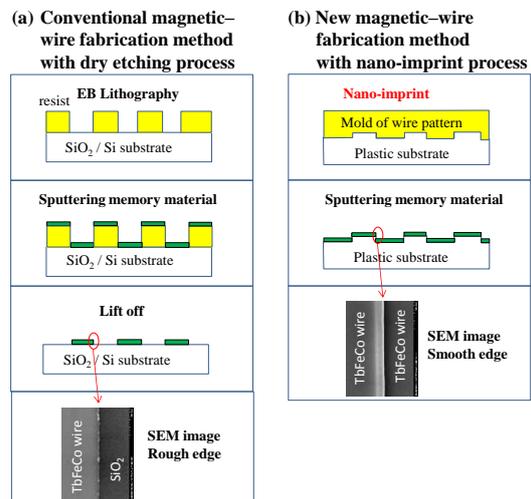


図1 磁性細線作成法 (a) ドライエッチングを用いる一般的な方法 (b) 本提案 ナノインプリントを用いる簡便な方法

一方、提案した新しい磁性細線作成法を図1(b)に示す。予め細線パターンをガラス原盤に作成しておき、薄いプラスチック基板をこの原盤にのせて熱プレス機でナノインプリントする。この凹凸基板をスパッタ装置にセットし、基板溝深さの10分の1以下の薄い磁性層を製膜する。するとランド部及びグループ部にのみ磁性膜は成膜され、溝側壁部への磁性膜付着はわずかとなる。この溝方向に電流を印加すると主にランド部のみに電流が流れるため、エッチング法を使わずとも

磁性細線を作成できる。これは光ディスク作成方法と同じプロセスであり、安価に簡単に磁性細線を作成できる点が大きな特徴である。本方法で作成した磁性細線エッジのSEM写真を示すが、エッジ荒れはほとんどない。これにより磁壁のスムーズな電流駆動が可能になる。

さて、磁壁の導入方法には偏光顕微鏡に組み込んだ青色レーザーを用いた。従来の磁性細線への記録磁区導入には磁性細線にクロスするように作成した電極に大きな電流を流してできる電流磁界を利用していましたが、電流磁界はせいぜい $1kOe$ 程度しか発生できないためストレージに必要な大きな保磁力材料での磁壁電流駆動実験はできなかった。その点、レーザーを使った光磁気書き込みでは容易に磁壁導入を行う事ができる。

磁壁駆動に必要なパルス電流は Picosecond 社のパルス発信機 ($1\sim 100nsec$) で印加した。偏光顕微鏡で観察しながらパルス電流を印加し、磁壁駆動の様子を直接観察した。この光学顕微鏡では 50 倍の対物レンズを使っているために空間分解能は $800nm$ と大きく、詳細な磁区観察ができない。そこで、XY スキャンが可能な TMR ヘッドを準備して、磁性細線上をスキャンする事で詳細な磁区観察を行った。この空間分解能は $20nm$ である。また、この TMR ヘッドには記録ヘッドも搭載されており、これを利用して $45nm$ 極細ナノインプリント磁性細線への記録も行った。

4. 研究成果

図 2 には、アモルファス TbFeCo 合金を用いた磁性細線の偏光顕微鏡像を示す。Tb のサブネットワーク磁化と FeCo のサブネットワーク磁化は互いに逆を向いてキャンセルしているため膜全体のネットの飽和磁化は約 $100emu/cm^3$ であり、FeNi 合金の 10 分の 1 と小さい。この保磁力は約 $2.5kOe$ と大きく (FeNi 合金の保磁力の 100 倍) データストレ

ージに利用可能な材料である。事実、これはミニディスク (MD) や 3.5 “MO の製品材料である。図 2(a) に示すように外部磁界を印加して予め一方向に着磁し、図 2(b) に示したように記録磁区を 2 本の TbFeCo 細線にそれぞれ 1 個磁区を導入し、パルス電流を印加すると磁区の前エッジ、後エッジは同時に同距離電流と逆方向、すなわち電子流の方向に移動した。更に、両細線左側でもう 1 個ずつ磁区を記録し、再び電流を右から左に印加すると図 2(c) のようにすべての記録磁区は右側にシフトした。

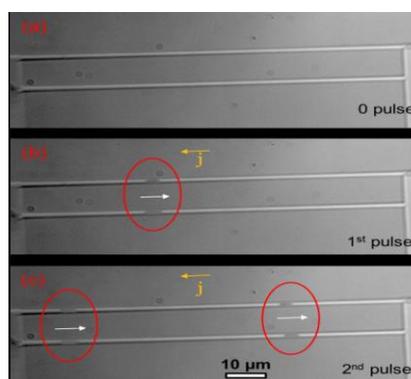


図 2 TbFeCo 磁性細線の偏光顕微鏡写真 (a) 着磁後 (b) 磁区記録の電流駆動 (c) 追加磁区記録の電流駆動

これは、電子のスピントルクトランスファ効果によるものであり、ストレージの基本原理解説実験結果である。このときの磁壁駆動に必要な臨界電流密度 (J_c) は FeNi 合金に比べて 50 分の 1 であった。この原因として、TbFeCo の小さな飽和磁化 (M_s) が考えられる。図 3 には、様々な磁性細線の J_c と M_s の関係を示す。 M_s 減少で J_c も低下している。

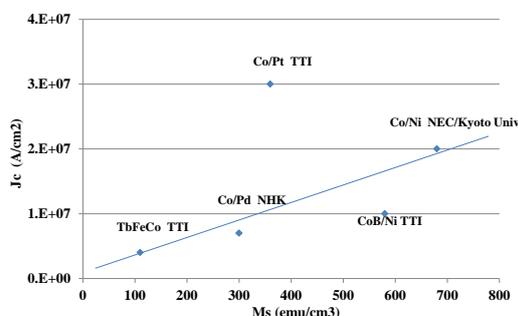


図 3 様々な磁性細線における飽和磁化 M_s と磁壁駆動のための臨界電流密度 J_c

図 4 には様々な磁性細線の J_c と磁壁抗磁

力(Hw)の関係を示す。FeNi の場合には Hw が小さく磁壁が容易に動くにも拘らず、Jc が大きい。一方、データストレージ媒体に要求される大きな Hw の磁性細線の場合には、磁壁が動きにくく大きな Jc が予想される。

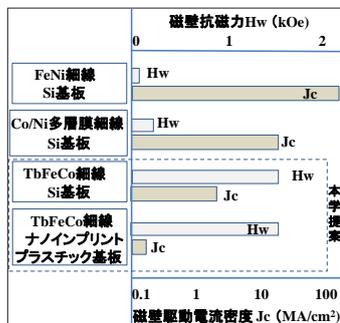


図4 様々な磁性細線における磁壁抗磁力 Hw と磁壁駆動のための臨界電流密度 Jc

しかし、TbFeCo の結果を見ると Hw が大きいにも拘らず Jc が小さく理想的な結果となった。更に、新しい磁性細線作成法で作ったナノインプリント TbFeCo 磁性細線では、Jc が FeNi の 500 分の 1 に低減できた。

図 5 には、同じ TbFeCo をエッチング法で作成した場合とナノインプリント法で作成した場合の磁性細線における Jc の外部磁界依存性を示す。エッチング法で作成した場合には、外部磁界を印加すると磁壁をピンニングできるために大幅に Jc が低減しているが、ナノインプリント法ではピンニングが少ないために Jc の磁界依存性が小さい。

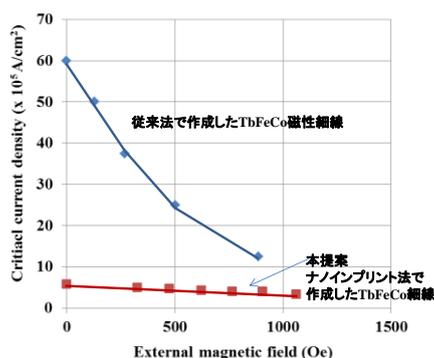


図 5 従来法（ドライエッチング）で作成した磁性細線と本提案（ナノインプリント法）で作成した TbFeCo 磁性細線における Jc の外部磁界依存性

図 6 には、45nm 幅極細 TbFeCo ナノインプリント磁性細線に、磁気ヘッドで磁区書き込

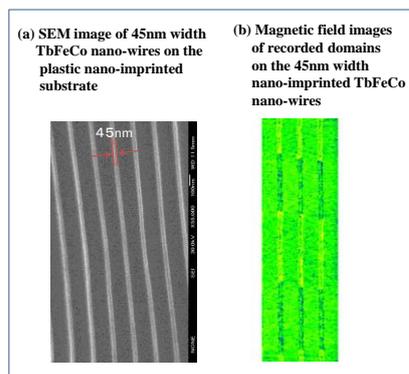


図 6 45nm ナノインプリント TbFeCo 磁性細線の SEM 写真(a)と、その上に磁気ヘッドで記録した磁区の TMR ヘッドスキャンによる記録磁区イメージ

みを行い、TMRヘッドスキャンでその記録状態を観察した結果を示す。

このように本提案の新しいナノインプリント磁性細線作成法は、簡便であるばかりでなく細線エッジ荒れを解消できる実用化に適した提案であることを示すことができた。残された課題としては、スパッタ粒子の直進性を向上させナノインプリント基板の溝側壁への膜付着防止（膜付着防止により更なる Jc 低減の可能性が期待できる）と TMR 再生ヘッド再生アンプの帯域向上（現在 10kHz と低いため CNR 等ストレージ基本特性評価ができない）である。次の科研費提案でこれら設備補強を行って、磁性細線メモリ実用化へのフィージビリティ検証を行いたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- [1] Masaaki Tanaka, Hiroki Kanazawa, Sho Sumitomo, Syuta Honda, Ko Mibu, and Hiroyuki Awano, "Current-induced dynamics of bubble domains in perpendicularly magnetized TbFeCo wires", Appl. Phys. Express 8, 073002 (2015) 査読有
- [2] Hiroyuki Awano, "Investigation of domain wall motion in RE-TM magnetic wire towards current driven memory and logic", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 383, pp50-55 (2015) 査読有
- [3] Do Bang, H. Awano "High efficiency of the spin-orbit torques induced domain wall motion in asymmetric interfacial multilayered Tb/Co wires", J. Appl. Phys., 117, 17D916 (2015) 査読有

- [4] Do Bang, H. Awano “Domain wall motion in Tb/Co multilayer wire with a large domain wall depinning field”, *J. Appl. Phys.*, 115, 17D512 (2014) 査読有
- [5] 栗野博之, “電流駆動磁壁移動を用いた積層型 3 次元磁気メモリ”, *日本磁気学会誌*. **9**, 275(2014) 査読無
- [6] 栗野博之, “希土類・遷移金属磁性細線における電流磁壁駆動効果の改善”, *映像情報メディア学会技術報告*, 39, pp25-30, (2014) 査読無
- [7] 栗野博之, “磁性細線における磁壁の電流駆動の基礎検討”, *電子情報通信学会信学技法 IEIEC Technical Report*, MR2014-11, pp17-22, (2014) 査読無
- [8] Do Bang, Hiroyuki Awano, “Reversal of Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wires : Size Dependence”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 123001 (2013) 査読有
- [9] Do Bang, Hiroyuki Awano, “Current Induced Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co wire in presence of Rashba field”, *IEEE. Trans. Mag.* 49, 4390 (2013) 査読有
- [10] Do Bang, and Hiroyuki Awano, “Size effect of domain wall magneto resistance in ultrathin TbFeCo wires”, *Korean Phys. Soc.* 62, 1933 (2013) 査読有
- [11] Masamichi Sakai, Koichi Kakizaki, Shigehiko Hasegawa, Akira Kitajima, Akihiro Ohshima, and Hiroyuki Awano, “Design of Spin Polarization Analyzer using Transverse Longitudinal Correlation in Resistivities Induced by Spin-Orbit Interaction”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 013004 (2013) 査読有
- [12] Do Bang, Hiroyuki Awano, “Current-Induced Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetized Tb-Fe-Co Wire with Different Interface Structures”, *Appl. Phys. Express* **5**, 125201 (2012). 査読有
- [13] Masamichi Sakai, Koichi Kakizaki, Shigehiko Hasegawa, Akira Kitajima, Akihiro Oshima, and Hiroyuki Awano, “Design of Spin polarization Analyzer using Transverse-Longitudinal Correction in Resistivities Induced by Spin-Orbit Interaction”, *Jpn.J. Appl. Phys.* **52**, 013004 (2012). 査読有
[学会発表] (計 41 件)
1. B. Do, and H. Awano, 51th International Magnetism Conference, GT-07, (2015)
 2. 栗野博之, 映像メディア学会技術報告, 名古屋大学、2015 年 1 月 (招待講演)
 3. H. Awano, Moscow International Symposium on Magnetism (Invited), 2RP-A-9 (2014)
 4. D. Bang and H. Awano, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, GS-15, (2014)
 5. A. Takeuchi, T. asari and H. Awano, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, HT-14, (2014)
 6. M. Tanaka, H. Kanazawa, S. Sumitomo, S. Honda, K. Mibu and H. Awano, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, GW-08, (2014)
 7. Tatsuyuki Maeda and Hiroyuki Awano, 50th International Magnetism Conference, HB-4, (2014)
 8. Do Bang and Hiroyuki Awano, 50th International Magnetism Conference, GR-13, (2014)
 9. Tatsuyuki Maeda, Toma Kanehira, and Hiroyuki Awano, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学 (2014 年 9 月)
 10. 田中雅章、金沢大樹、住友翔、本多周太、壬生攻、栗野博之、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学 (2014 年 9 月)
 11. 栗野博之, 第 48 回スピンエレクトロニクス専門研究会, 中央大学、2014 年 3 月 (招待講演)
 12. 大野紘明, 栗野博之, 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 2014 年 3 月
 13. H. Awano, and D. Bang, Energy Materials Nanotechnology Fall 2013, Orland, USA, p124 (2013) (Invited).
 14. Tatsuyuki Maeda, and Hiroyuki Awano, Magnetism and Optics Research International Symposium MORIS' 2013, Tu-P-10, p42 (2013).

15. Do Bang, and H. Awano, Mangnetics and Optics Research International Symposium MORIS' 2013, Tu-P-12, p46 (2013).
 16. Toma Kanehira, and Hiroyuki Awano, Mangnetics and Optics Research International Symposium MORIS' 2013, Tu-P-30, p82 (2013).
 17. Masaya Kawamoto, and Hiroyuki Awano, Mangnetics and Optics Research International Symposium MORIS' 2013, We-P-09, p114 (2013).
 18. H. Ono, Y. Suzuki, and H. Awano, Mangnetics and Optics Research International Symposium MORIS' 2013, Tu-P-15, p126 (2013).
 19. H. Awano, International Japanese-French Workshop on Spintronics, (2013). (Invited)
 20. Hiroyuki Awano, and Do Bang, Asia Pacific Data Storage Conference APDSC' 2013, (2013).(Invited)
 21. Do Bang, and Hiroyuki Awano, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials MMM'2013, Denver, USA (2013)
 22. M. Kawamoto, and H. Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013
 23. Atsushi Takeuchi, and Hiroyuki Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013,
 24. S. Harada, and H. Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013,
 25. T. Kanehira, and H. Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013,
 26. D. Bang, and H. Awano, The 8th International Symposium on Metallic Multilayers MML' 2013,
 27. D. Bang, and H. Awano, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013,
 28. H. Awano, and D. Bang, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013).
 29. D. Bang, and H. Awano, Joint MMM-INTERMAG 2013, Chicago, USA (2013).
 30. Hiroyuki Awano, and Do Bang, 第 37 回日本応用磁気学会学術講演会シンポジウム 3pB-2, 北海道大学、2013 年 9 月 (招待講演)
 31. 伊藤誠、小峰啓史、杉田龍二、上野秀俊、山口克彦、Do Bang, 栗野博之 第 37 回日本磁気学会学術講演会 5pC-6, 北海道大学 (2013)
 32. 原田晋太郎, 栗野博之, 電気学会マグネティックス研究会, 名古屋大学、2013 年 8 月
 33. 栗野博之, Duc The Ngo, 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, 名古屋大学 (2013)
 34. H. Awano, Energy Materials Nanotechnology Fall 2012, Las Vegas, USA (2012). (Invited)
 35. T. Kanehira and H. Awano, The 2nd International Conference of Asian Union of Magneics Societies , Nara, JAPAN (2012)).
 36. H. Ono and H. Awano, The 2nd International Conference of Asian Union of Magneics Society, Nara, JAPAN (2012)).
 37. D. Bang and H. Awano, The 2nd International Conference of Asian Union of Magneics Society, Nara, JAPAN (2012)).
 38. H. Ono and H. Awano, ICM 2012 , Busan, KOREA (2012)).
 39. T. Kanehira and H. Awano, ICM 2012, Busan, KOREA (2012)).
 40. D. Bang and H. Awano, ICM 2012 , Busan, KOREA (2012)).
 41. D. Bang and H. Awano, ICM 2012 , Busan, KOREA (2012)).
- 〔図書〕 (計 0 件)
 〔産業財産権〕
 ○出願状況 (計 0 件)
 ○取得状況 (計 0 件)
 〔その他〕
 ホームページ等
6. 研究組織
 (1) 研究代表者 栗野博之 (Hiroyuki Awano)
 豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号 : 40571675
 (2) 研究分担者 バン ド (Do Bang)
 豊田工業大学・大学院工学研究科・研究員
 研究者番号 : 40624804
 (3) 連携研究者 なし