

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709029

研究課題名(和文) 垂直磁化細線における磁壁移動型ストレージデバイスの研究

研究課題名(英文) Study on domain wall displacement type storage devices for perpendicular magnetization

研究代表者

田中 輝光 (Tanaka, Terumitsu)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・助教)

研究者番号：20423387

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：将来の巨大容量情報記録デバイスの一つとして磁性細線中を磁壁が移動するレーストラックメモリが期待されている。本研究では磁性細線の一部に異なる磁性体から成る交換結合構造部を作製することで、容易に磁壁を導入できることを実験的に実証し、極Kerr効果を利用して電流による磁壁移動を確認した。また、磁壁移動型デバイスで問題となる磁壁移動のオーバーシュートが磁壁構造変化に起因すること、これを抑制するには周期的に変化する2種類の磁壁エネルギーが同等になるように磁性細線の厚みと幅を設定することが有効であることを示した。さらに多次的な電流分布を反映したマイクロマグネティックシミュレータを開発した。

研究成果の概要(英文)：Race track memory recently attracts attention as one of the future recording devices with ultra-high capacity, in which magnetic domain wall displacement is employed for information recording. Quite simple and easy method of domain wall introduction was proposed and successfully demonstrated experimentally. The domain wall introduction was enabled by an exchange coupled composite structure of hard and soft magnetic layers partially arranged in the magnetic wire. The domain wall introduction and the displacements were successfully detected through a polar Kerr effect detection. A potential problems of overshoot phenomenon for domain wall displacements due to change in the domain wall structures was numerically found to be solved by setting aspect ratio of wire width and the thickness to balance the domain wall energies for Neel and Bloch walls. A micromagnetic simulator has been developed for designing 3 dimensional spin devices involving multi-dimensional current distribution.

研究分野：磁気記録

キーワード：磁壁移動 交換結合構造 マイクロマグネティクス

1. 研究開始当初の背景

継続的な情報爆発に対応するため、情報記録デバイスには更なる大容量化・省電力化が求められている。現在の情報ストレージの中核を担うハードディスクドライブ(HDD)ではディスクの駆動に大きな電力が必要であり、また、ディスク面に情報を記録する方式であるため、面記録密度は非常に高いがドライブの体積を考慮すると単位体積当たりの記録密度は高いとは言えない。一方で、本研究対象とする磁壁移動型レーストラックメモリはHDDと比較して以下の特長を有する。

モーター等の駆動部を持たないため省電力である。

細線の微細化に伴って電流密度が増加するため省電力の記録再生が可能。

HDD よりも大幅な体積記録密度の向上が可能。

同時並列読み書きが可能であるため、一度に大量の情報記録・再生が可能。

現在ではHDDに代わるストレージデバイスとしてレーストラックメモリや、電源ノーマリーオフを実現するMRAMの研究がNEDO等の主導の下でなされている。これらのデバイスでは信号の記録や磁壁移動に磁界ではなく微小なスピン偏極電流を用いるため、記録領域の更なる狭小化が可能であり、将来的にはHDDの数百倍の大幅な情報記録容量の増大が見込める。

2. 研究の目的

本提案研究では、交換結合構造膜を用いて垂直磁化細線に磁壁を導入し、電流駆動による磁壁移動実験を実証し、磁壁移動の動的検出により値の推定を目指す。また、本ストレージデバイスの最適設計を行い、3次元スピンドバイスシミュレーション設計ツールの開発に展開する。

3. 研究の方法

本実験を実施するにあたり問題となるのは磁性薄膜に磁壁を形成することである。本来は垂直MRAMのようにスピン注入によって磁壁形成のための逆磁区を発生させることが望ましいが、このスピン注入磁化反転を実現し、更に実験を研究期間内に完了することは困難である。そこで、磁性薄膜の一部のみに逆磁区を確実に導入する(磁壁形成)ために磁性薄膜の交換結合構造を利用する。これは硬磁性層と軟磁性層とを積層して磁気的に交換結合させ、硬磁性部の磁化を本来の飽和磁界(ヒステリシス曲線が閉じる磁界強度)よりも小さな磁界で反転させる方法である。

多次元構造の磁性細線モデルを想定し、有限要素方計算により電流密度分布を求め、この電流密度分布を考慮した多次元構造磁性細線における磁壁転送シミュレータを開発する。

4. 研究成果

(1) 交換結合構造化による保磁力低減と磁壁の導入

垂直磁化細線の交換結合構造化による保磁力低減に効果について検証した。垂直磁化細線の材料は $[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Ni}(8\text{\AA})]_8$ および $[\text{Co}(1.7\text{\AA})/\text{Pd}(8\text{\AA})]_{20}$ とした。ガラス基板を用いてCo/Ni人工格子膜を配向用のAu(700)/Ti(5)に、CoPdはガラス基板上に直接成膜した。その上部に軟磁性層を成膜した。本研究ではCoおよびNiFeを軟磁性膜として用いた。その結果、Co/Ni薄膜はCoと、Co/Pd薄膜はFeNiと交換結合することが分かった。図1にCo/NiとCo薄膜からなる交換結合膜の保磁力を示す。同図からCoを2nm程度成膜することで保磁力が大幅に低減することが分かる。これは交換結合構造化することで硬磁性部の磁化反転が促進されたことを示している。Co/Niと同様にCo/PdについてもFeNiを成膜することで保磁力の大幅な低減が可能であることが分かった。ただし、Co/Pdについては大幅な保磁力低減効果が得られるFeNiの膜厚は比較的大きく5nm程度必要であった。

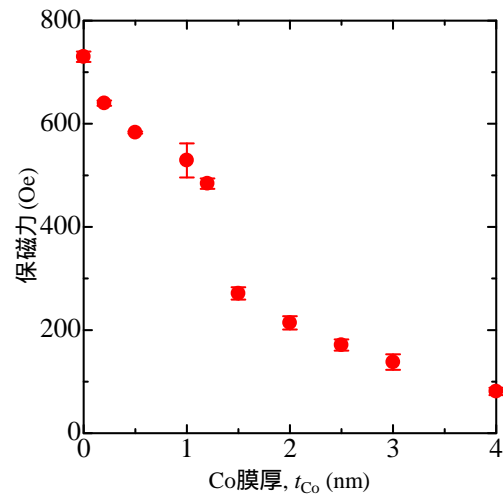


図1 $[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Ni}(8\text{\AA})]_8/\text{Co}(t_{\text{Co}})$ 交換結合膜の保磁力。

(2) 磁壁の電流駆動実験

$[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Ni}(8\text{\AA})]_8$ 磁性細線における磁壁の電流駆動実験を行った。図2に素子の顕微鏡写真を示す。素子に対して垂直に磁界を印加し、電極に正および負方向に電流を流した状態でワイヤ部のKerr出力を測定した。電流導入によって磁壁がワイヤ部を移動した場合には電流未導入時とは異なる出力値が得られる。なお、磁壁の移動は電流を負方向に流したときのみ生じるが、本研究では電流を正方向にも流して測定している。これは電流導入による素子の発熱によって生じる磁化の熱揺らぎに起因する磁化反転と磁壁移動による出力変化とを区別するためである。したがって、磁壁移動の評価は電流を負方向に流した場合のKerr出力から正方向に

流した場合の Kerr 出力を差し引いて行った。測定結果を図 3 に示す。同図には印加磁界が -690 Oe、-740 Oe、-795 Oe の場合の差分出力を示す。印加磁界が -690 Oe の時には Kerr 出力は電流値に依存せず一定である。これは電流閾値が測定範囲外にあるか、磁界が弱く、逆磁区が導入できていないことが原因として考えられる。印加磁界を負方向に大きくしていくと出力変化が現れ、-795 Oe の場合には、電流値 21 mA で大きな差分出力が得られており、磁壁の移動が生じたと推測される。電気抵抗率と膜厚から単純計算すると電流密度 $5.5 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ の電流が Co/Ni 部分に流れていると推測される。これは報告例のあるディピニング電流値よりもかなり小さな値であり、印加磁界によりディピニングが促進された結果であると推測される。また、さらに大きな電流の場合には、電流導入によるジュール熱に起因する熱揺らぎが磁化反転に対して支配的になり、磁壁移動測定が困難になったと考えられる。磁壁移動の詳細な解析は絶縁体上に磁性細線を作製し、導入した全電流を磁性細線に流し、ジュール熱を可能な限り低減させると同時に磁壁駆動に寄与する電流効率を向上させて行うことが効果的であると思われる。

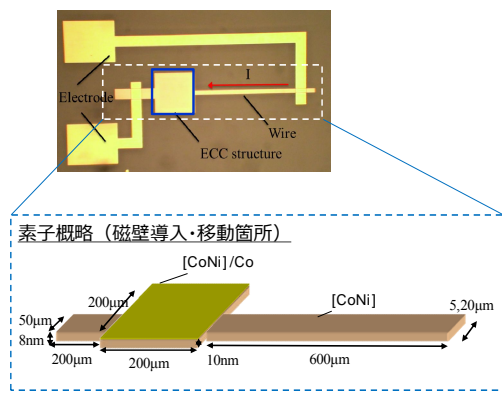


図 2 磁壁移動実験に使用した素子の顕微鏡写真および模式図。

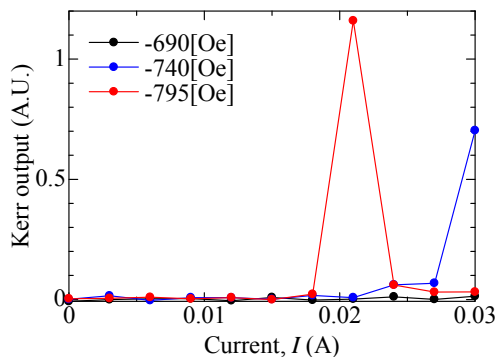


図 3 磁壁移動による Kerr 出力の変化。

(3) 磁壁のマスレス転送シミュレーション
磁性細線における磁壁構造は細線の幅と厚みの関係（アスペクト比）から最もエネル

ギーが低くなるように決まる。電流により磁壁を移動させる場合、磁壁はその構造をネール型とプロット型に周期的に変化しながら移動する。電流をオフにした際には即座には停止せず、速度を緩めながら徐々に停止する。この現象は質量を持った物質が慣性をもつことと同様であるため、磁壁には質量が伴うと言われている。これは、電流をオフにした後の磁壁移動が、磁壁が安定な構造に収束するときに移動を伴うことが原因であると考えられる。磁壁の構造が安定する構造になったタイミングで電流をオフにすると磁壁は即座に移動を停止するが、実デバイスにおいてこのようなタイミングで電流をオフにすることはできない。したがって磁壁に慣性を持たせないようにするには、ネール型とプロット型双方のエネルギーの値が同じになるようにアスペクト比を決定することが有効であると考えられる。図 4 に電流をオフにした際の磁壁のオーバーシュート量 (dx) とワイヤ幅 (W) の関係を示す。ワイヤの厚みを 5 nm として本研究で開発した多次元マイクロマグネティック使用して計算した。なお、磁性パラメータは Co/Ni 人工格子膜を想定し、垂直異方性磁界を 13.3 kOe、飽和磁化を 600 emu/cm³ とした。同図から $W = 36$ nm のときにオーバーシュートが最も小さくなっていることが分かる。なお、 W が 36 nm 以上の場合にはプロット磁壁が安定であり、36 nm 以下ではネール磁壁が安定であることを確認している。このことからアスペクト比を適切な値に設定することでいわゆるマスレス磁壁転送を実現し、オーバーシュートを抑制できることを示した。

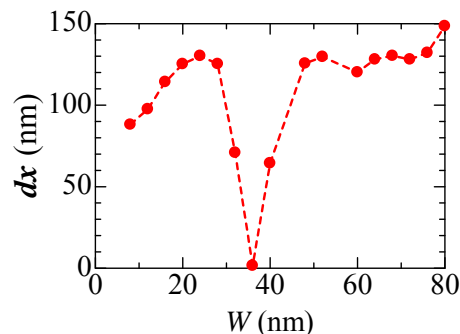


図 4 オーバーシュート量と線幅の関係。

(4) 多次元形状磁壁移動シミュレータの開発

レーストラックメモリのような磁壁移動を伴う記録デバイスにおいて磁壁位置の制御は重要な課題である。一般に磁壁の位置制御はワイヤの一部に形状加工を施したピンングサイトと呼ばれる箇所を設けて行うことが必要とされている。これまでの報告例では細線の一部に“くびれ”を施すことや、ワイヤの一部にイオンを注入して磁気特性に変調を施す例があり、マイクロマグネティックシミュレーションによりピンングの効果を検証されている。本研究では、多次元形状の

磁壁移動シミュレーションを可能にするマイクロマグネティックシミュレータを開発した。例として蛇行した細線を想定し、磁壁転送シミュレーションを行った。多次元形状の磁性体における磁壁転送の計算には電流密度分布やその密度分布から得られる3次元的なスピン偏極した電流ベクトルを考慮したマイクロマグネティック計算が必要である。そこで電流分布を有限要素法計算によって求め、磁化挙動を本研究で開発した多次元電流分布に対応可能なマイクロマグネティックシミュレータを開発し、適切に計算できることを確認した(図5)。

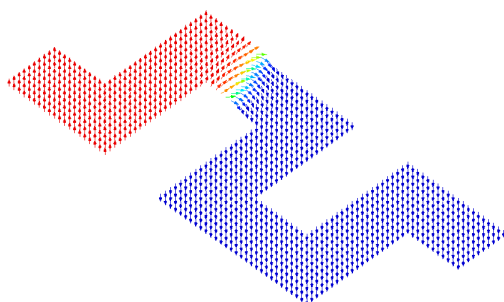


図5 蛇行型細線における磁壁移動。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 12 件)

1. X. Ya, K. Imamura, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Numerical Analysis on 2-D Standing Spin Waves in Microstructured Exchange-Coupled Hard/Soft Bilayer Strips," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有, VOL. 51, NO. 11, Art. No. 7003003, (NOV. 2015). DOI: 10.1109/ TMAG.2015.2447278
2. H. Yu, X. Ya, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Microwave-Assisted Spin-Transfer Torque Switching in a Vertically Integrated Architecture," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有, VOL. 51, NO. 11, Art. No. 3401103, (NOV. 2015). DOI: 10.1109/ TMAG.2015.2438817
3. J. Shen, M. Shi, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Numerical Analysis of Thermally-Assisted Spin-Transfer Torque Magnetization Reversal in Synthetic Ferromagnetic Free Layers," Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 177, No. 17, Art. No. 17A718 (Apr. 2015). DOI:10.1063/1.4917005
4. X. Ya, H. Chen, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Interferometric properties of standing spin waves and the application to a phase comparator," Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 117, No. 17, Art. No. 17A719 (March. 2015). DOI: 10.1063/1.4914366
5. Y. Urazuka, K. Imamura, S. Oyabu, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Successive Logic-in-Memory Operation in Spin Wave-Based Devices with Domain Wall Data Coding Scheme," IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, Vol. 50, No. 11, Art. No. 3401303 (Nov. 2014). DOI: 10.1109/TMAG.2014.2320759
6. J. Shen, M. Shi, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Asymmetric Composite Free Layers with Compensated Magnetization for Ultrahigh Density Integration of STT-MRAM," IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 50, No. 11, Art. No. 3401205 (Nov. 2014). DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326894
7. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Otsuka, Y. Nozaki, Y.K. Hong, K. Matsuyama, "Microwave-Assisted Magnetization Reversal of Exchange-Coupled Composite Nanopillar with Large Gilbert Damping Constant." IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol. 50, No. 6, Art. No. 3000503 (Jun. 2014). DOI: 10.1109/TMAG.2013.2297156
8. Y. Urazuka, S. Oyabu, H. Chen, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Spin wave based parallel logic operations for binary data coded with domain walls," Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 115, No. 17, Art. No. 17D505 (Feb. 2014). DOI: 10.1063/1.4863936
9. B. Peng, Y. Urazuka, H. Chen, S. Oyabu, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Self-oscillation of standing spin wave in ring resonator with proportional-integral-derivative control," Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 115, No. 17, Art. No. 17D115 (Jan. 2014). DOI: 10.1063/1.4862222
10. S. Yakata, T. Tanaka, K. Kiseki, K. Matsuyama, T. Kimura, "Wide range tuning of resonant frequency for a vortex core in a regular triangle magnet," Scientific Report, 査読有, Vol. 3, p. 3567 (Dec., 2013). DOI:10.1038/srep03567
11. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Furomoto, Y. Otsuka, K. Matsuyama, "Stable microwave-assisted magnetization switching for nanoscale exchange-coupled composite grain," Nanoscale Research Letters, 査読有, Vol. 8, pp.

461-468 (Nov., 2013). DOI:10.1186/1556-276X-8-461

12. K. Ito, T. Takashima, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Micromagnetic study on micro structured ferromagnetic thin film for high-frequency-device applications," Journal of the Korean Physical Society, 査読有, August 2013, Volume 63, Issue 3, pp 659-662 (Aug. 2013). DOI:10.3938/jkps.63.659

[学会発表](計 82 件)

1. X. Ya, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Numerical analysis on magnetic vortex motion through inductive output," Magnetism and Optics Research International Symposium 2015, Tu-P-22 (Nov.29 - Dec.2, 2015, Toyohashi University of Technology - Universiti Sains Malaysia Technology Collaboration Centre in Penang, Penang, Malaysia).
2. B. Peng, X. Ya, K. Imamura, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Oscillation of standing spin wave in nanostructured ring resonator with spin transfer torque," 20th International Conference on Magnetism, Th.O-P07 (July 5-10, 2015, the Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain).
3. X. Ya, K. Imamura, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Structural control of standing spin wave properties in exchange-coupled multilayer strips," 20th International Conference on Magnetism, Mo.G-P04, (July 5-10, 2015, the Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona, Spain)
4. T. Tanaka, K. Matsuyama, "GPU-accelerated micromagnetic calculation for design of magnetic storage devices(Invited)," Collaborative Conference on 3D & Materials Research, p. 10 (June 15-19, 2015, BEXCO, Busan, Korea).
5. K. Imamura, X. Ya, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Controlling of synthesized standing spin wave configuration with external fields," IEEE International Magnetism Conference, HT-07, p. 2473 (May 11-15, 2015, China National Conventional Center, Beijing, China).
6. H. Yu, X. Ya, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Microwave assisted spin transfer torque switching in a vertically integrated logic-in-memory architecture," IEEE International Magnetism Conference, GT-15, p. 2457 (May 11-15, 2015, China National Conventional Center, Beijing, China).
7. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai, K. Matsuyama, "Shingled magnetic recording combined with microwave-assisted magnetization reversal for granular exchange-coupled composite media," (Invited) EMN Phuket Meeting 2015, p. 27 (May 4-7, 2015, Holiday Inn Resort, Phuket, Thailand).
8. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Kanai, K. Matsuyama, "High track density recording of shingled magnetic recording combined with microwave-assisted magnetization reversal," 59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference, BP-10 (Nov. 3-7, 2014, the Hilton Hawaiian Village Beach Resort in Honolulu, Hawaii, USA).
9. S. Kashiwagi, Y. Otsuka, T. Tanaka, Y. Kanai, K. Matsuyama, "Study on shingled magnetic recording for exchange-coupled composite media," International Union of Materials Research Societies-The IUMRS International Conference in Asia 2014, A5-P28-027 (Aug. 24-30, 2014, Fukuoka University).
10. M. Li, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Micromagnetic simulation of domain wall propagation between nanostructured pinning sites," International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014, C1-P26-008 (Aug. 24-30, 2014, Fukuoka University).
11. J. Shen, M. Shi, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Asymmetric composite free layers with compensated magnetization for ultra-high density integration of STT-MRAM," IEEE International Magnetism Conference, GR-4, p. 2845 (May 4-8, 2014, International Congress Center Dresden, Dresden, Germany).
12. Y. Urazuka, K. Imamura, S. Oyabu, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Successive logic-in-memory operation in spin wave based devices with domain wall data coding scheme," IEEE International Magnetism Conference, FU-2, p. 2473 (May 4-8, 2014, International Congress Center Dresden, Dresden, Germany).
13. S. Oyabu, Y. Urazuka, H. Chen, K. Imamura, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Controlling of synthesized standing spin wave modes with relative phase

- modulation," IEEE International Magnetics Conference, FT-14, p. 2457 (May 4-8, 2014, International Congress Center Dresden, Dresden, Germany).
14. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Otsuka, Y. Kanai, K. Matsuyama, "Micromagnetic calculation for microwave-assisted magnetic recording," (Invited) International Conference on Small Science (Dec, 15-18, 2013, Las Vegas, NV, USA).
 15. Y. Urazuka, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Parallel logic-in-memory architecture implemented with spin waves and domain walls," Magnetics and Optics Research International Symposium (Dec, 2-5, 2013, OMIYA SONIC CITY, Saitama, Japan).
 16. B. Peng, Y. Urazuka, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Numerical analysis on quantized standing spin wave in nano-structured active ring resonator," Magnetics and Optics Research International Symposium (Dec, 2-5, 2013, OMIYA SONIC CITY, Saitama, Japan).
 17. B. Peng, Y. Urazuka, S. Oyabu, H. Chen, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Self-oscillation of standing spin wave in nanostructured ring resonator," International Symposium on Frontiers in Materials Science, SA/PO 1.13 (Nov, 17-19, 2013, Ha Noi, Vietnam).
 18. H. Chen, Y. Urazuka, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Standing spin wave resonance in NiFe strip arrays with various dipole coupling," International Symposium on Frontiers in Materials Science, SA 1.4 (Nov, 17-19, 2013, Ha Noi, Vietnam).
 19. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Otsuka, Y. K. Hong, K. Matsuyama, "Microwave-assisted magnetization reversal of exchange coupled composite nano-pillar consisting of high anisotropy material with large damping," International Symposium on Frontiers in Materials Science, SM 2.4 (Nov, 17-19, 2013, Ha Noi, Vietnam).
 20. Y. Urazuka, H. Chen, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Interferometric spin wave based logic operations for stored binary data coded with domain walls," International Symposium on Frontiers in Materials Science, SA/PO 2.10 (Nov, 17-19, 2013, Ha Noi, Vietnam).
 21. Y. Urazuka, H. Chen, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Spin wave based parallel logic operations for stored binary data coded with domain walls," 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FU-02 (Nov, 4-8, 2013, Denver, Colorado, USA).
 22. H. Chen, Y. Urazuka, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Collective standing spin wave resonance in Permalloy strip arrays with various dipole coupling," 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FP-03 (Nov, 4-8, 2013, Denver, Colorado, USA).
 23. T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Otsuka, Y. Kanai, K. Matsuyama, "Micromagnetic simulation of shingled magnetic recording combined with microwave assisted magnetization reversal," 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, CT-20 (Nov, 4-8, 2013, Denver, Colorado, USA).
 24. B. Peng, Y. Urazuka, S. Oyabu, H. Chen, H. Otsuki, T. Tanaka, K. Matsuyama, "Self-oscillation of standing spin wave in ring resonator with PID control," 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, BU-03 (Nov, 4-8, 2013, Denver, Colorado, USA).
 25. S. Kashiwagi, T. Tanaka, Y. Otsuka, Y. Furomoto, K. Matsuyama, "Stable microwave-assisted magnetization switching for exchange-coupled composite grain," Collaborative Conference on 3D and Materials Research 2013, pp. 798-799 (June, 23-28, 2013, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea).
 26. T. Tanaka, Y. Otsuka, S. Kashiwagi, Y. Kanai, K. Matsuyama, "Micromagnetic simulation of microwave-assisted magnetic recording process," (Invited) Collaborative Conference on 3D and Materials Research 2013, pp. 167-168 (June, 23-28, 2013, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea).

〔その他〕

ホームページ等

<http://spin.ed.kyushu-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 輝光 (TANAKA, Terumitsu)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教

研究者番号：20423387