

令和元年6月18日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04352

研究課題名(和文)磁壁移動型ストレージデバイスの安定動作に関する研究

研究課題名(英文)Stable operation of domain wall shift type storage devices

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所・助教

研究者番号：20423387

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁壁移動型情報記録デバイスの安定動作に関する研究である。垂直磁化材料として用いられる磁性薄膜の磁壁抗磁力に関して下地層の効果などを検証した。また、磁性薄膜を多層化することで磁壁の構造変化に伴う磁壁移動速度の不安定化を解消し、安定に動作させることができることをマイクロマグネティックシミュレーションによって示した。また、有限要素法とマイクロマグネティックシミュレーションを併用して3次元構造のレーストラックメモリにおける安定したビットシフト動作の実現性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界で毎年新たに生まれる情報量は増加の一途をたどっており、情報記録デバイスの大容量化・高速化・高信頼化は今後益々重要になる。本研究は次世代の情報記録デバイスである磁壁移動型ストレージデバイスにおける重要な課題である「磁壁転送の安定化」に関するものである。本研究では、情報担持体である磁性体の磁気特性に関して実験的に検証し、情報転送時の省エネ化や情報担持体の構造に工夫を凝らすことで情報記録デバイスの安定した動作を実現できることをコンピュータシミュレーションによって示している。

研究成果の概要(英文)：This study focused on information storage devices based on domain wall shift. In the experimental study, the effect of underlayer for magnetic wires were characterized in terms of domain wall coercivity. The micromagnetic simulation revealed that an additional soft magnetic layer deposited on the magnetic wire stabilizes the domain wall shift operation by suppressing the domain wall structure change in domain wall shift process. The 3 dimensional micromagnetic simulation combined with the finite element calculation clarified the feasibility in stable domain wall shift operations for 3 dimensional race track memory.

研究分野：磁気デバイス

キーワード：磁気記録 磁性細線 マイクロマグネティックシミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来の情報記録デバイスには大幅な大容量化・省電力化が求められている。本研究対象とする磁壁移動型レーストラックメモリは、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)と比較して以下の特長を有する。

- (1) モーター等の駆動部を持たないため省電力である。
- (2) 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。
- (3) 細線構造を多層化することで将来的には大幅な情報記録容量の増大が見込める。
- (4) 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。

レーストラックメモリでは電子スピンと磁気スピンの間の相互作用を利用して磁壁を電子の流れる向きに移動させながら情報の読み書きを行う。磁性細線には面内磁化型と垂直磁化型があり、電流効率の点で垂直磁化型が有利であることが分かっている。しかし、磁壁移動速度は電流密度におおよそ比例するが、これまでの報告例では磁壁移動速度の測定値に大きなばらつきがあり、移動速度が非常に不安定であるなどの問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、磁壁移動速度を測定して β 値を推定する。さらに磁性細線を交換結合化することで磁壁移動速度の安定化を図り、磁壁移動型ストレージデバイスの設計開発に展開する。本研究では3年間に大きく分けて下記の3項目の研究・開発を実施する。

- (1) スピン偏極電流を用いた磁壁移動速度の測定と β 値の推定
- (2) 磁壁移動速度の安定化
- (3) 複数ビットの安定転送

3. 研究の方法

本研究を実施するにあたり、まず問題となるのは磁性細線に単一の磁壁を導入することである。磁性細線近傍に導体線を形成して、電流磁界を印加して磁壁を導入することは可能であるが、熱的に安定な磁性材料は保磁力が高く、電流磁界では磁壁の導入は困難である。これに対する方法として、垂直MRAMのようにスピン注入により磁壁形成する方法が考えられるが、このスピン注入磁化反転を実現し、更に上述の実証実験を研究期間内に完了することは困難である。そこで、磁性細線の一部に逆磁区を確実に導入する(磁壁形成)ために磁性層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氣的に交換結合させ、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。これによりCo/NiおよびCo/Pd多層膜に磁壁を導入し、磁壁移動実験を行う。また、電流により発生する熱を利用した磁壁の導入方法についても検証する。更に、多次元構造の磁性細線モデルを想定し、有限要素法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て、磁壁移動の動特性をシミュレートし、磁壁の安定動作を検証する。

4. 研究成果

(1) Co/Ni および Co/Pd 薄膜の核形成磁界・磁壁抗磁力の下地層依存性

磁化の熱的安定性と容易な磁壁移動特性が得られるような垂直磁化膜と下地層の組み合わせについて検討した。磁気特性として核形成磁界 H_N 、磁壁移動の容易さの指標として磁壁抗磁力 H_W についてAuおよびPtを下地層として用いてこれら効果を検証した。

図1にCo/Ni積層膜の磁壁抗磁力に対するAu下地層厚の効果を示す。なお、CoおよびNi層の厚みはそれぞれ0.8 nm、0.2 nmであり、これをN周期積層している。同図から積層数に依らず H_N 、 H_W は $t_{Au}=75$ nmまで単調増加していくことが分かる。 H_N は垂直磁気異方性を反映することから、本研究におけるAu下地層を用いたCo/Ni垂直磁化膜では積層数に依らず異方性の上昇と共に磁壁移動を起こしにくくなることが分かった。なお、Co/Pd垂直磁化膜を用いた場合にも殆ど同様の結果が得られている。

図2にCo/Pd積層膜の磁壁抗磁力に対するPt下地層の効果を示す。Pt下地層ではAu下地層とは異なり、厚み20 nm以下では H_N の増大効果はほとんど得られていない。また、厚み40 nmから120 nmの範囲では H_N 、 H_W は単調増加する。磁壁移動型デバイスでは高い情報の安定性と容易な

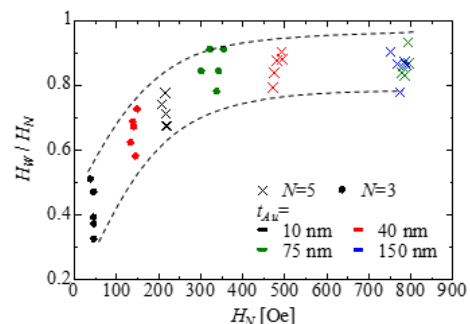


図1 Au下地層を用いた場合の[Co/Ni]_N薄膜における H_W/H_N

磁壁移動を同時に満たすような垂直磁化材料が最も適している。情報の安定性は H_N に反映され、磁壁移動の容易さは H_W に反映される。本実験では、Co/Pd 垂直磁化膜の積層数が 9 層かつ厚みが 50~80 nm の Pt 下地層を用いることで、2 kOe 以上の高い H_N と 0.8 未満の低 H_W/H_N をもつ垂直磁化膜が作製できた。

(2)Co/Ni および Co/Pd 垂直磁化膜の電流誘起磁壁移動実験

上記の Co/Ni および Co/Pd において薄膜を細線状に加工し、磁壁移動実験を行った。図 3 に素子の概略図と素子の画像を示す。単一の磁壁導入を導入するため、細線の一部に 1.6 nm 厚の Co 層を堆積して交換結合複合(ECC)構造とし、磁化に逆磁界を加えて ECC 構造部分のみに磁壁を導入した。なお、細線の幅は 5 μm であり、磁気力顕微鏡で磁壁導入を確認している。電子が細線の左側から右側に移動するように電圧を印加すると磁壁は右に移動するため、ECC 構造部の右側で Kerr 出力を測定すれば磁壁移動を検出できる。これを正方向の電流印加と定義する。測定は正および負方向に電流を印加して行った。本来、逆方向に電流を印加しても磁壁は右側には移動しないが電流によるジュール熱で磁化反転が生じる恐れがあるため、この影響を取り除くために電流を正・負方向に印加した場合の Kerr 出力差で磁壁移動の有無を評価した。

ECC 構造部の磁化のみが反転し、細線部分の磁化が反転しない -700 Oe の外部磁界を印加して磁壁を導入した。図 4 に実験結果を示す。同図において、電流値が小さな場合には磁壁は移動しないため出力は小さく、ある閾電流値を超えると磁壁動が生じて出力が大きくなり、さらに電流値が大きくなると熱による磁化反転が生じるため出力差は低下することになる。つまり出力が正に大きく出ている電流値ではジュール熱による磁化反転は生じておらず電流による磁壁移動が誘起されていることになる。同図に示す実験結果は、電磁石を用いて磁化を飽和させ、その後、逆磁界を印加して磁壁導入し、電流を流して Kerr 出力を測定するという手順で行っており、Kerr 出力を測定する毎にこれらの操作を行っている。測定結果にバラつきが生じているのは電磁石のヒステリシスにより、逆磁界の大きさに ± 10 Oe 程度のバラつきがあることが原因であると推測される。上記構造における磁性細線および下地層の抵抗値を並列抵抗とみなし、電流密度を計算すると、 $4.3 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^5$ A/cm² の範囲で磁壁移動が検出されていることになる。報告されている閾値電流密度より小さな値となっているのは、外部磁界印加によって磁壁の駆動がアシストされているためである。また、本測定では H_W/H_N が 0.85 の素子を用いたが、 H_W/H_N が 0.95 のものでは磁壁移動が検出された電流密度は 5.5×10^5 A/cm² 以上であった。本実験は低 H_W/H_N の垂直膜を用いることで磁壁移動に必要な電流密度を低減できることを示しており、その他の材料を用いた垂直磁化膜においても、低 H_W/H_N のものを用いることによる電流密度低減の可能性を示している。同様の実験を Co/Pd 細線を用いて行った。図 5 に結果を示す。磁壁移動が起こる電流密度は 7.0×10^6 A/cm² 程度となっており、Co/Ni 垂直膜と比べると磁壁移動を起こすためには 1 桁以上大きな電流密度が必要となっている。この原因として、Co/Ni 垂直磁化膜より大きな垂直異方性

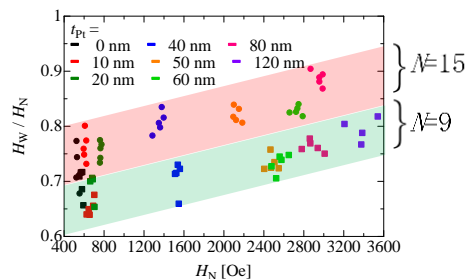


図 2 Pt 下地層を用いた場合の [Co/Pd]_N 薄膜における H_W/H_N

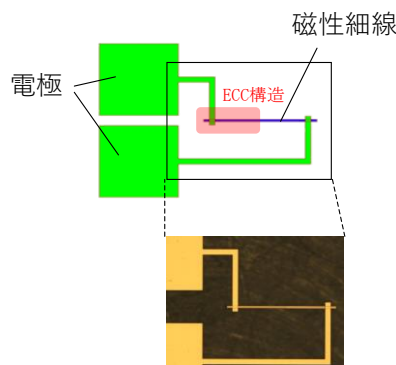


図 3 磁壁移動実験に用いた素子構成

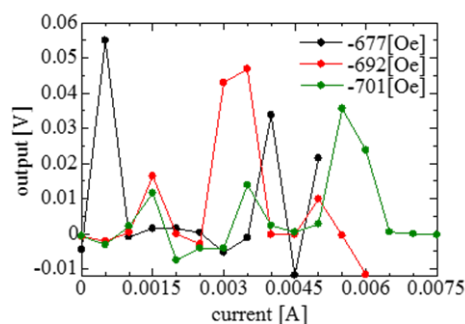


図 4 Co/Ni 細線における Kerr 出力と電流値

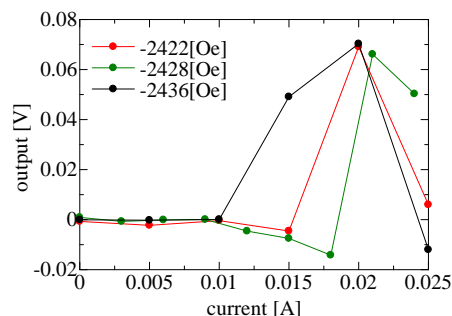


図 5 Co/Pd 細線における Kerr 出力と電流値

を持っていることが考えられるが、同時に Co/Pd 垂直膜内にピニングサイトが存在していることも原因として考えられる。より良質な薄膜を作成することで更に低電流密度での磁壁移動が可能であると推測される。一方で、本研究では β 値の推定のため、磁壁移動速度の動的観察を目的としている。Kerr 検出系の改良および電流・電圧変換に使用するアンプの高周波化を行い、磁壁通過による Kerr 出力の変化を検出することには成功したが、ノイズが大きく Kerr 出力の時間的な変化から正確に磁壁移動速度を見積るには至っていないため、現在は Kerr 回転角の検出系により高感度で高速応答が可能な検出系を導入して実験を継続している。

(3) ジュール熱を利用した局所的な磁壁導入方法の検討

磁壁移動実験では通常、磁壁の導入に電流磁界が用いられる。しかし、異方性磁界が大きな材料の場合には必要な電流値が非常に高くなる。そこで、電流を磁性細線に流した際に発生するジュール熱による局所的な熱磁化反転を用いた磁壁の導入について検討した。

磁性細線において局所的に熱的な磁化反転を生じさせるためには大きな熱勾配をつけることが肝要である。そこで、図 6 に示すような素子を作製して十字型磁性体に対して縦に電流を流して過熱し、クロス部から横の位置に対して磁化する割合を複数回の測定により求めた(図 7)。横軸は交差点の中心を 0 としたときの観察点の距離を示しており、縦軸は電流印加時に外部磁界 -755 Oe を同時に印加した時の磁化反転割合を示している。実線は放熱領域を設けた場合の結果、破線は放熱領域を設けていない場合の結果である。同図より、交差点中心から離れるにつれて磁化反転割合が低下しており、細線横方向に熱勾配がついていることが確認できる。交差点部と放熱領域付近の温度差を見積もるために、以下に示す磁化反転確率の式を用いた。

$$R = \exp\left(-f_0 t \exp\left[\frac{-K_u V}{k_B T}\right]\right)$$

f_0 は試行周波数であり、 K_u は磁気異方性エネルギーである。なお体積 V は粒径が膜厚と同じであると仮定した。上式より温度差を見積もると交差点中心と $50 \mu\text{m}$ 離れた点では $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の温度差が推測され、ジュール熱を利用した磁壁導入が可能であることが分かった。

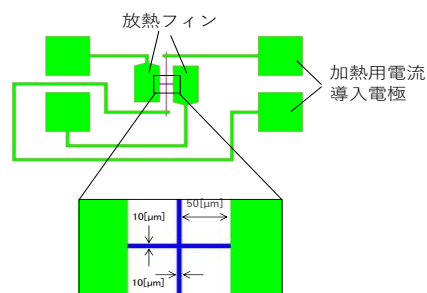


図 6 熱磁化反転を利用した磁壁導入素子の模式図

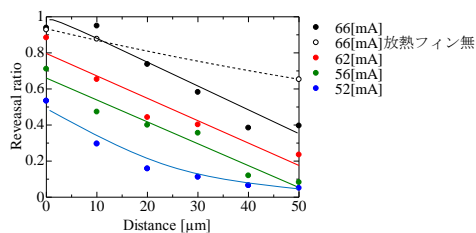


図 7 電流印加時の外部磁界 (-755 Oe) による磁化反転割合

(4) 磁性細線の積層構造化による磁壁の安定動作

垂直磁気異方性を有する磁性細線における磁壁移動では、ダンピング定数と β 値が異なる場合には磁壁は磁壁構造に応じて速度を変化させながら移動する。垂直磁化膜の β 値に関しては今なお理論的な議論が行われておりダンピング定数よりも大きな値であると言われている。本研究では垂直磁化膜の上部に薄い軟磁性体を積層した場合の磁壁移動特性について計算機シミュレーションにより検討した。垂直磁化細線として幅 40 nm 、厚み 8 nm の Co/Ni 薄膜を想定した。ダンピング定数および β 値をそれぞれ 0.02 、 0.04 と仮定して電流速度を 40 m/s としている。図 8 に得られた結果の一例を示す。単一の垂直磁化細線で磁壁の位置が時間の経過にしたがって波打った形状のグラフになっている。これは磁壁がその構造を変化させているためである。このような磁壁移動特性は、多ビット転送時には記録ビットの消失やビット間隔の負均一性によるエラーの原因となる。一方で、垂直磁化膜の上部に 2 nm 厚の軟磁性層(パーマロイを想定)を積層した場合には、軟磁性層との交換結合および軟磁性部の反磁界の影響により磁壁はネール型の構造を保持しており、極めて安定した磁壁移動が実現できることが分かる。上部層の厚みが更に大きな場合には、磁壁移動の初動が遅く、電流印加より数 ns

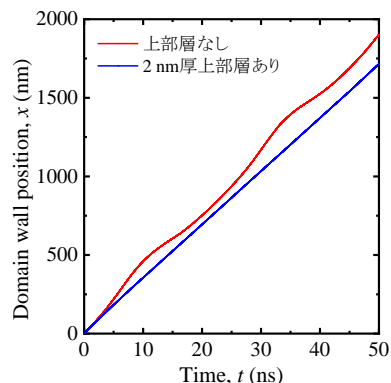


図 8 電流印加開始後の磁壁位置

程度の遅延が生じ、また移動速度が安定するのに 20 ns 程度の時間を要することが分かった。

(5) 3次元磁性細線における動作の安定化および電流マージンの推定

S. Parkin によって提唱された 3次元構造のレーストラックメモリにおける磁壁移動特性および多ビット情報の安定転送に関して計算機シミュレーションによりその実現性を検証した。

提唱された当初のレーストラックメモリでは磁氣的にソフトな面内磁化膜がメモリ材料として提案されていたが、これまでの研究から垂直磁化膜では磁壁移動に必要な電流が面内膜のもののお十数%程度で済むことが分かっている。そこで、本研究では磁性細線の幅・厚み、磁壁を特定の位置にピンングするための磁気特性を変調した領域の長さ等を最適化し、電流パルスの

振幅およびパルス幅を調整することで安定したビット転送を実現するのに必要な条件を見積もった。図 9 に細線のモデル図を示す。3次元構造の垂直磁性細線を用いたレーストラックメモリでは、磁壁の移動方向と磁化の向きとが平行になる領域と垂直になる領域とがあり、見方によってはハード磁性で面内磁化領域と垂直磁化領域が混在することになり、それら双方の領域において安定したビット伝送を実現する必要がある。図 9 に示す U字型細線は青の部分に異方性磁界 20 kOe の垂直磁化材料で橙色は異方性磁界 10 Oe の領域である飽和磁化は共に 800 emu/cm³ である。垂直磁化材料の長さは 20 nm であり、10 nm 長さの変調領域を介して垂直磁化領域に接続されている。細線の幅および厚みは 10 nm である。磁壁がピンングするために必要なエネルギーは長期の情報保持に必要なエネルギー指標である 60 k_BT 以上あり、熱安定性には問題がないサイズである。連続した電流パルスを加えて良好な磁壁転送が実現した場合には、同図(a)を初期状態として最初のパルスで(b)、続くパルスで(c)、(d)のように磁壁間隔を保ったまま、シフトレジスタのような動作をすることになる。電流パルス幅を 1 ns、パルス間隔を 3 ns とした場合の電流マージンを図 10 に示す。同図から、必要電流値がやや高いものの 25%程度の広いマージンを確保しながら良好な磁壁伝送が実現できることが分かる。

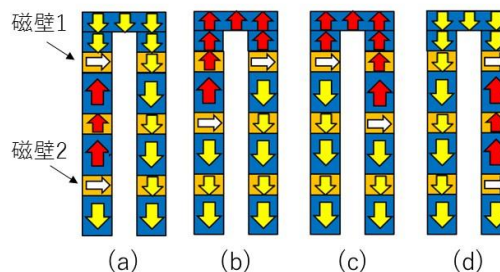


図 9 シフトレジスタ型の磁壁転送

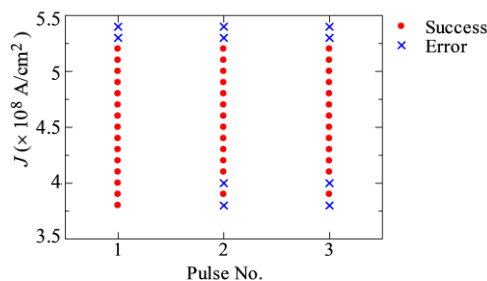


図 10 ビット転送の電流マージン

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① [Terumitsu Tanaka](#), Yukio Nozaki and Kimihide Matsuyama, Micromagnetic simulation of microwave-assisted magnetization switching process for granular films, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS、査読有、Vol. 53、No. 11、2017、3200504、DOI: 10.1109/TMAG.2017.2697429
- ② 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、Vol. 7、2017、056028、DOI: 10.1063/1.4977771
- ③ 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、Vol. 7、2017、056015、DOI: 10.1063/1.4975490
- ④ 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、2017、055922、DOI: 10.1063/1.4975368
- ⑤ Xiaorui Ya, [Terumitsu Tanaka](#) and Kimihide Matsuyama, Numerical Study on Microwave based Read-write Operation in Magnetic Vortex Memory, ITE Trans. on MTA、査読有、Vol. 4、No. 4、2016、pp. 292-295、DOI: 10.3169/mta.4.292
- ⑥ [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、2016、pp. 188-193、DOI:

[学会発表] (計 12 件)

- ① T. Tanaka、Y. Kanai and K. Matsuyama、Recording resolution of granular exchange-coupled composite media for microwave-assisted magnetic recording、International Conference on Magnetism 2018
- ② T. Tanaka、Y. Kanai and K. Matsuyama、Read/write simulation on microwave-assisted magnetic recording for exchange-coupled composite granular media、62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2017
- ③ Terumitsu Tanaka、Yukio Nozaki and Kimihide Matsuyama、Magnetization curves of granular media under microwave fields、The 15th International Conference on Advanced Materials 2017
- ④ Terumitsu Tanaka、Yukio Nozaki and Kimihide Matsuyama、Micromagnetic simulation of microwave-assisted magnetization switching on granular medium、Collaborative Conference on Materials Research 2017
- ⑤ X. Ya、T. Tanaka and K. Matsuyama、Numerical analysis on spin dynamics in multilayer nanodots with interlayer antiferromagnetic coupling、IEEE International Magnetics Conference 2017
- ⑥ T. Tanaka、Y. Nozaki and K. Matsuyama、Micromagnetic calculation of microwave-assisted magnetization switching process for granular films、IEEE International Magnetics Conference 2017
- ⑦ Z. Zhang、Y. Hashiguchi、T. Tanaka and K. Matsuyama、Numerical study on vertical domain wall propagation for three-dimensional race track memory、IEEE International Magnetics Conference 2017
- ⑧ 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
- ⑨ 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
- ⑩ T. Tanaka、Y. Nozaki and K. Matsuyama、Computational analysis of microwave assisted magnetization reversal in unstable switching process、61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016
- ⑪ T. Tanaka、D. Sakamoto、Y. Kanai and K. Matsuyama、Damping Constant Dependence of SNR at Track Edge for Shingled Microwave-Assisted Magnetic Recording、61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016
- ⑫ Terumitsu Tanaka、Daisuke Sakamoto、Yasushi Kanai and Kimihide Matsuyama、Numerical analysis on cross-track characteristics for tracks recorded with microwave assistance、International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies 2016

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。