

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360143

研究課題名（和文） 垂直磁化膜を用いたスピン注入磁気メモリの研究

研究課題名（英文） Spin injection magnetic memory using perpendicular magnetized films

研究代表者

綱島 滋 (TSUNASHIMA SHIGERU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80023323

研究成果の概要：

本研究は固体メモリの高速性、磁気記録の不揮発性、さらには低電力での書き換え特性を兼ね備えた固体メモリデバイスの開発を目的とし、微細加工した希土類遷移金属 (RE-TM) 垂直磁化膜への熱磁気記録、RE-TM 膜へのスピン注入磁気記録を試みた。RE-TM 膜を用いることで十分実現可能なパワー密度で高速の熱アシスト磁化反転が可能であることが分かった。さらに、RE-TM 垂直磁化膜へのスピン注入による磁化反転を確認することに成功し、低電力での磁化反転の可能性を示すことができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：メモリ、熱磁気記録、アモルファス合金、スピン注入、ジュール熱、臨界電流密度

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)は不揮発であり、無限界の高速書き換えなど多くの利点を有していることから、DRAMを置き換えられる次世代ユニバーサルメモリとして期待されている。現在 Everspin Technology 社から 16Mbit 品が出荷され、国内でも NEC、東芝などにより 16 Mbit クラ

スの MRAM が試作されている。MRAM は微細加工された磁気トンネル接合 (MTJ) 素子をアレイ状に配置し、膜面内に磁化するフリー層の磁化方向により情報を記憶する。既存の MRAM は情報の書き換えに直交するビット、ワード線による電流磁界を利用するが、サブ μm スケールに素子を微細化した場合、反磁界の増大により書込電流が実現困難な

レベルまで増加してしまう問題を抱えている。また、ビットもしくワード線に電流を流すことによりその下にある全ての MTJ セルで半選択状態となることから、素子の熱安定性を上げて記録マージンを確保しなければならない。

今後の Gbit クラスの MRAM 実現のためには、微小素子で十分な熱安定性と小さな記録電流で書き換えを可能とする技術を開発する必要がある、それを可能とする一つの方法としてスピン注入磁化反転 (CIMS) が研究されている。これは片方の磁性層のスピン角運動量をフリー層に注入することで磁化反転する技術であり、素子サイズの微小化による書込電流の低減が期待される。しかしながら、この方式では熱安定性の確保が困難である。

スピン注入磁化反転の他に熱アシスト磁化反転も提案されている。これは記録時に熱を加えることで磁化反転を容易にする技術であり、記録時以外の熱安定性の確保、微小素子でも低電流で書込可能であると考えられる。これまで提案されたセル構造では交換結合二層膜を記録層とし交換バイアス方向を熱と磁界により反転するものである。Sousa らはこの構造の MTJ セルを作成し、その加熱プロセスを詳細に検討している。

2. 研究の目的

本検討では垂直磁化膜である希土類遷移金属 (RE-TM) 合金を用いた熱アシスト磁化反転を検討するとともに、実際の素子構造となる RE-TM 膜を用いた磁気トンネル接合について検討する。垂直磁化配置ではサブ μm 以下の素子サイズでも一様に磁化した単磁区構造が用意に得られ、面内磁化膜のような素子に形状異方性を付与する必要もない。TbFe 等の希土類遷移金属合金では大きな磁気異方性のため微小素子でも十分な熱安定性が確保でき、熱により磁気特性を制御しやすいという特徴を有する。さらに、RE-TM 膜を用いたスピン注入素子 (素子寸法 100 nm スケールの微小接合素子) を作成し、RE-TM 膜を用いることで低電力でのスピン注入磁化反転が可能であることを示すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) RE-TM 膜の熱アシスト磁化反転

絶縁障壁で発生するジュール熱が材料の温度上昇にどの程度効果があるのか、また熱伝導解析を行うことで、絶縁障壁で必要となる面積抵抗や障壁で発生するジュール熱を有効利用する多層構成を検討することが可能となる。これら基礎的なデータを得るために、本課題ではまず、RE-TM 膜の構成をできるだけ単純化した素子においてジュール

熱による熱アシスト磁化反転を検討した。

試料はマグネトロンスパッタ法により作製し、膜構成は SiN (10 nm) / TbFe (80 nm) / SiN (10 nm) / SiO₂ (500 nm) / Si 基板とした。電子ビーム露光と電子サイクロトロン共鳴 Ar プラズマを用いたイオンエッチングにより中央部に電流が集中するような狭窄構造を微細加工した。電流が集中する部分の寸法は $1\ \mu\text{m}\square\sim 300\ \text{nm}\square$ とした。作製したパターンに 100 Oe の磁界中で電流パルス (パルス幅 5~1000 nsec) を印加し熱磁気書き込みを行った。電流パルスの印加後の磁区形状を磁気力顕微鏡 (MFM) により観察することで磁化反転の有無を確認した。なお、TbFe 膜の磁気特性の温度依存性は交番磁界勾配型磁力計、トルク磁力計、磁気 Kerr 効果測定装置により調べた。

(2) RE-TM 膜へのスピン注入磁化反転

まず、RE-TM 膜を用いた磁気トンネル接合を検討するため、RF8 元マグネトロンスパッタ装置を用い磁気トンネル積層膜を成膜した。成膜後フォトリソグラフィにより $20\ \mu\text{m}\square$ のトンネル接合用レジストパターンを作成する。次に電子サイクロトロン共鳴プラズマによる Ar イオンエッチングを行うことでレジストパターンを膜に転写する。エッチング後、上部・下部電極間絶縁膜 Al₂O₃ 100 nm, Al 層 200 nm (上部電極) を成膜することで素子を作製した。

次に、RE-TM 膜へのスピン注入磁化反転を検討するため、巨大磁気抵抗効果型の積層膜を成膜し、電子ビーム露光により $120\ \text{nm}\times 180\ \text{nm}$ の微小接合を作成した。エッチング、上部電極の成膜は上述の磁気トンネル接合同様に作成した。磁気抵抗効果は直流 4 端子法により測定し、スピン注入磁化反転は 100 msec の電流パルスを印加後の抵抗を測定することで評価した。

4. 研究成果

(1) RE-TM 膜の熱アシスト磁化反転

図 1 は中央狭窄部分サイズ $0.8\ \mu\text{m}\times 0.8\ \mu\text{m}$ に微細された SiN (10 nm) / TbFe (80 nm) / SiN (10 nm) / SiO₂ (500 nm) / Si 基板の磁気力顕微鏡 (MFM) 像である。明暗のコントラストは膜法線方向に磁化を持つ磁区によるものであり、TbFe がエッチングされた部分は中間色となっている。10 kOe の磁界で一方向に磁化飽和させることでコントラストを黒一色にすることができる (図 1(a))。その後、100 Oe の磁場中で電流パルスを印加することで中央部分のみ明るいコントラストが得られ (図 1(b))、この部分のみ磁化が反転し、熱アシスト書き込みが行われていることを確認した。パルス電流の値と素子サイズから熱アシスト反転に必要な電力密

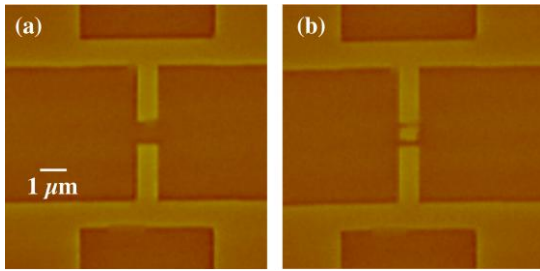


図1 微細加工 TbFe 膜の MFM 像 (a) 磁化飽和状態, (b) 電流パルスにて書き込み

度を求め、その電力密度の素子サイズ依存性、パルス幅依存性を検討した。

図2は種々の素子サイズに加工した TbFe 膜に熱アシスト書き込みを行った際の反転に必要なパワー密度、エネルギー密度の電流パルス幅依存性を示している。反転に必要なパワー密度はパルス幅の増大とともに減少する。これはパルス幅が短くなることで Curie 温度まで上昇するためにより多くの電力を必要とすることを意味する。しかしながらそのパワー密度は 10 nsec 程度でも 2 mW/μm² 程度と十分実現可能なパワー密度である。このパワー密度を面積抵抗 RA = 200 Ωμm² のトンネル障壁で実現する場合、電流密度 5 × 10⁵ A/cm² 程度となり、10⁵ A/cm² 台で Curie 温度までの加熱が可能であることを示す結果となっている。次に反転に必要なエネルギー密度は、パルス幅が 30 nsec 程度以下で、ほぼ一定値 20 pJ/μm² と非常に小さな

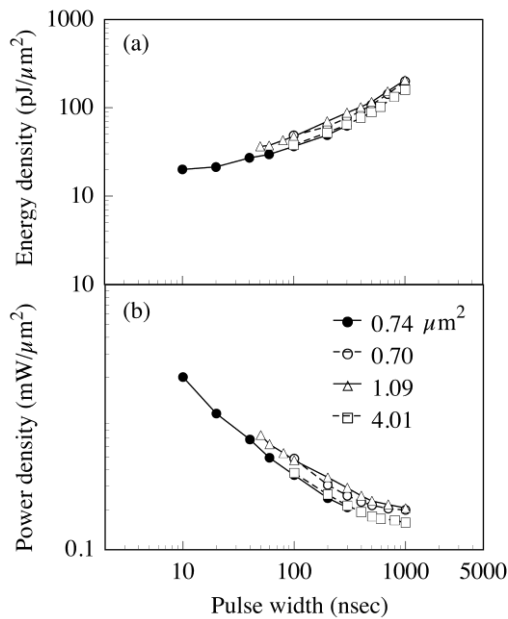


図2 微細加工 TbFe 膜への熱アシスト反転に必要な(a)エネルギー密度, (b)パワー密度の電流パルス幅依存性

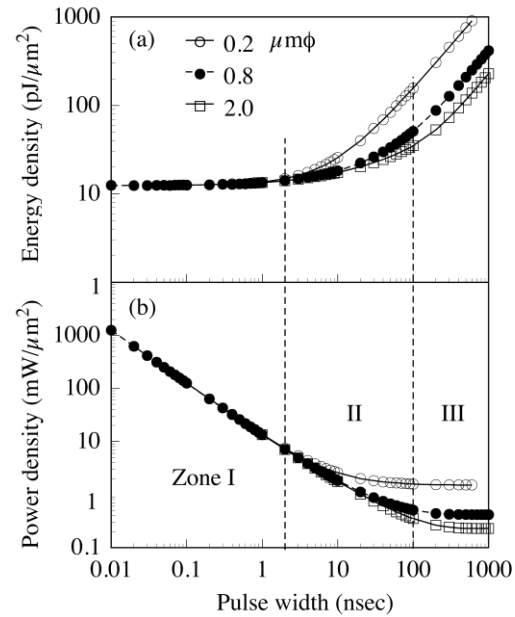


図3 円筒形 TbFe を 90 °C まで上昇するのに必要な(a)エネルギー密度, (b)パワー密度の電流パルス幅依存性(シミュレーション)

値となる。これはパルス幅が短くなることで基板などへの熱放出の影響が小さくなり、系が断熱的になるためと考えられる。なお、反転に必要なパワー密度、エネルギー密度が素子寸法にあまり依存していないことは注目される。

図2の実験結果を詳細に検討するため有限要素法による熱拡散シミュレーションを行った。図3はシミュレーションにより計算した TbFe 層の温度が 90 °C まで上昇するのに必要なパワー密度、エネルギー密度の電流パルス幅依存性であり、TbFe 円板の直径 $\phi = 0.2, 0.8, 2.0 \mu\text{m}$ について計算した。図3から熱拡散過程は3つの特徴的な領域 (Zone) に分けることができる。パルス幅 2 nsec 以下の Zone I では、必要なエネルギー密度がパルス幅に依存せず一定値 13 pJ/μm² となっている。これは電流パルスにより印加したエネルギーが SiO₂ 層に伝わらず、系が断熱的であることを示している。次にパルス幅 2 nsec – 100 nsec の Zone II では、エネルギー密度がパルス幅に依存して増大する。これは TbFe 層の熱が比較的熱伝導率の低い SiO₂ 層に伝わっていくことを示している。この Zone では SiO₂ 内の熱拡散長は SiO₂ 層厚 500 nm 以下である。このため大きなサイズの TbFe ($f = 2 \mu\text{m}$) では1次的に熱拡散するのに対して小さなサイズ ($\phi = 0.2 \mu\text{m}$) では3次的に熱拡散する。これは図3に示すようにパワー密度、エネルギー密度がサイズに依存することを意味する。パルス幅 100 nsec 以上の Zone III では必要なパワー密度がパルスは場

に依存しなくなり、熱が熱伝導率の高い Si 基板まで伝わり、系が定常状態に達したことを示している。

(2) RE-TM 膜へのスピン注入磁化反転

試料の作製には RF8 元マグネトロンスパッタ装置を用い、Ta (5 nm) / Tb₁₅(Co₉₀Fe₁₀)₈₅ (20 nm) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (y nm) / Al-O (1.6 nm) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (y nm) / [Co(0.4 nm) / Pd(1.6 nm)]₆ / Ta (10 nm) を熱酸化膜付き Si 基板上に成膜した。上部の TbCoFe 層は低 Curie 温度層、下部の Co / Pd 多層膜は高 Curie 温度層である。Al-O 層は Al 層を 1.6 nm スパッタ後、O₂ 4 Pa 中でプラズマ放電を行うことで酸化した。Al-O 層を挟むような形で挿入した CoFeB 層はトンネル障壁界面での伝導電子のスピン偏極率を高くするために用いた。

図 4 は、異なる CoFeB 層の膜厚 y を持つ膜に対して測定した磁気抵抗曲線である、y = 0 の結果を図 4(a) に、y = 1 の結果を図 4(b) に示す。図から明瞭な保磁力差型の MR 曲線が得られ、y = 0 の膜構成ではおよそ 15 % 程

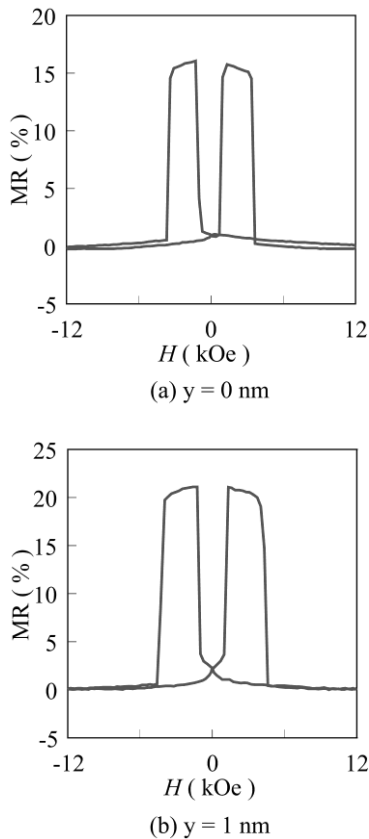


図 4 20 μm \square に加工された Tb₁₅(Co₉₀Fe₁₀)₈₅ (20 nm) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (y nm) / Al-O (1.6 nm) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (y nm) / [Co(0.4 nm) / Pd(1.6 nm)]₆ 接合の磁気抵抗曲線。(a) y = 0 nm および (b) y = 1 nm.

度、y = 1 の膜構成ではおよそ 20 % 程度の良好な MR 比が得られた。これにより、垂直磁化膜を用いた TMR 素子としては、十分大きな MR 比を実現することに成功したと言える。

次に希土類-遷移金属材料の巨大磁気抵抗効果型素子を用いたスピン注入素子について得られた結果を示す。図 5(a) は電子ビーム露光および ECR Ar⁺ イオンエッチングにより 120 nm x 180 nm の接合サイズに微細加工された Gd₂₁(Fe₉₀Co₁₀)₈₉ (5 nm) / Cu (3 nm) / CoFeB(1 nm) / Tb₁₅(Co₉₀Fe₁₀)₈₅ (20 nm) 素子に膜法線方向に磁界を印加して測定した磁気抵抗曲線を示す。印加磁界 -500 Oe 付近で GdFeCo 層の磁化反転に起因する 0.1 % 程度の磁気抵抗変化を得ていた。GdFeCo 層の磁化反転が -500 Oe 付近に見られる理由は Cu 層を介した交換結合による。この素子にパルス幅 100 msec の電流パルス印加し、印加後の抵抗値を測定した結果を図 5(b) に示す。なお、測定中の印加磁界は -460 Oe である。両磁性層が平行状態（低抵抗状態）から反平行状態に $I = -11$ mA 付近で遷移し、反平行状態から平行状態へは $I = 12$ mA 付近で遷移し、GdFeCo 垂直磁化膜においてスピン注入による磁化反転を初めて確認した。図 6 は平行 (P) から反平行 (AP) または AP から P へ遷移する電流密度を外部磁界に対してプロットした結果である。反転

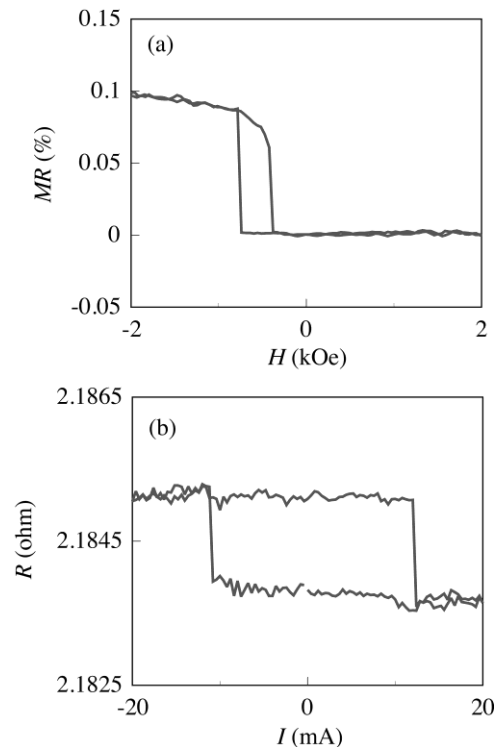


図 5 Gd₂₁(Fe₉₀Co₁₀)₇₉ 膜を用いた巨大磁気抵抗効果型素子について測定した (a) 磁気抵抗曲線および (b) 電流-抵抗曲線。

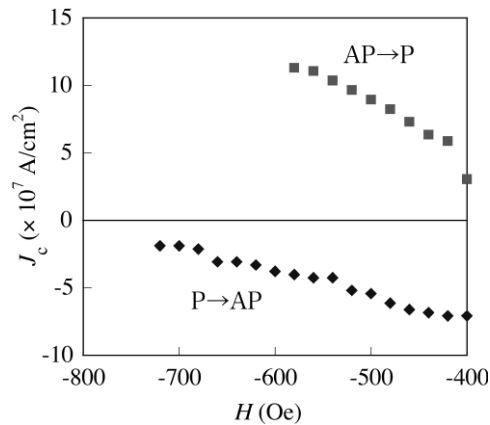


図 6 GdFeCo / Cu / CoFeB / TbCoFe スピン注入素子において測定した臨界電流密度の外部磁界依存性

電流密度は AP から P では $3 - 11 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$, P から AP では $-2 - -7 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ となった. 測定された臨界電流密度は 10^7 A/cm^2 程度と他研究と同程度の値であるが, GdFeCo 層が 5 nm と厚いことを考えると, GdFeCo 層を用いることで比較的低い臨界電流密度でスピン注入磁化反転が確認できたと考えられる.

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 6 件)

- ① L. You, T. Kato, S. Tsunashima, S. Iwata
Thermomagnetic writing on deep submicron patterned TbFe films by nanosecond current pulse
J. Magn. Magn. Mat., vol. 321, pp. 1015-1018 (2009).査読有
- ② T. Kato, Y. Yamauchi, S. Iwata, S. Tsunashima, K. Matsumoto, T. Morikawa, K. Ozaki
Planar patterned media fabricated by ion irradiation into CrPt₃ ordered alloy films
J. Appl. Phys., vol. 150, 07C117 (2009).査読有
- ③ L. You, T. Kato, S. Tsunashima, S. Iwata
Dynamic Heating in Micron- and Submicron-Patterned TbFe Films
Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, No. 1, pp. 146-149 (2008).査読有
- ④ T. Kato, K. Nakazawa, R. Komiya, N. Nishizawa, S. Tsunashima, S. Iwata
Compositional dependence of g-factor and damping constant of GdFeCo

amorphous alloy films

IEEE Trans. Magn., vol. 44, No. 11, pp. 3380-3383 (2008).査読有

- ⑤ 岩田聡, 加藤剛志, 網島滋
MBE 成膜した Co-Pt および Fe-Pt 規則合金膜の構造と磁気特性
まぐね, vol. 3, No. 6, pp. 254-261 (2008).査読無

- ⑥ Y. Maeda, Y. Suzuki, Y. Sakashita, S. Iwata, T. Kato, S. Tsunashima, H. Toyoda, H. Sugai

Effect of Sputtering Deposition Process on Magnetic Properties in Magnetic Multilayers

Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, No. 10, pp. 7879-7885 (2008).査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① 加藤剛志, 山内幸大, 岩田聡, 網島滋, 松本幸治, 森河剛, 尾崎一幸
L1₂ 型 CrPt₃ 合金膜を用いたイオン照射型ビットパターン媒体 (招待講演)
電子情報通信学会 2009 年総合大会, 愛媛大, 松山, 3/17 (2009).
- ② H. Kato, T. Kato, S. Tsunashima, S. Iwata
Local exchange anisotropy of epitaxial and polycrystalline MnIr/CoFe bilayers
IEEE International Magnetism Conference 2008, Madrid, Spain, 5/4 (2008).
- ③ T. Kato, K. Nakazawa, R. Komiya, N. Nishizawa, S. Tsunashima, S. Iwata
Compositional dependence of g-factor and damping constant of GdFeCo amorphous alloy films
IEEE International Magnetism Conference 2008, Madrid, Spain, 5/4 (2008).
- ④ 岩田聡, 前田幸春, 鈴木勇佑, 坂下洋平, 加藤剛志, 網島滋, 豊田浩孝, 菅井秀郎
磁性多層膜における磁気特性のスパッタ条件依存性 (招待講演)
平成 20 年電気学会全国大会, 福岡工業大学, 3/19 (2008).
- ⑤ 加藤剛志, 中澤健, 小宮良太, 西澤典彦, 網島滋, 岩田聡
超短パルスファイバレーザを用いた GdFeCo 薄膜の磁化ダイナミクス計測 (招待講演)
東北大通研共同プロジェクト研究/東北大通研スピニクス研究会, 東北大学, 宮城, 2/7 (2008).
- ⑥ L. You, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata
Thermomagnetic writing on deep submicron patterned TbFe films by

nanosecond current pulse
52nd Magnetism and Magnetic
Materials Conference, Tampa, USA, 11/5
(2007).

- ⑦ Y. Maeda, Y. Suzuki, Y. Sakashita, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima, H. Toyoda, and H. Sugai
Dependence of structure and magnetic properties in magnetic multilayers on sputtering gases
IEEE 6th International Symposium on Metallic Multilayers, Perth, Australia, 10/15 (2007).
- ⑧ H. Kato, T. Kato, W. Liu, S. Iwata, and S. Tsunashima
Local exchange anisotropy of (001) oriented CoFe/MnIr epitaxial bilayers
IEEE 6th International Symposium on Metallic Multilayers, Perth, Australia, 10/15 (2007).
- ⑨ 加藤剛志, You Long, 綱島滋, 岩田聡
微細加工 TbFe 合金膜へのパルス電流印加による熱アシスト磁化反転 (招待講演)
電気学会ナノ熱磁気記録調査専門委員会/日本応用磁気学会ハイブリッド記録専門研究会, 機械振興会館, 東京, 10/5 (2007).
- ⑩ K. Nakazawa, T. Kato, N. Nishizawa, S. Tsunashima, and S. Iwata
Magnetization Dynamics in GdFeCo Films Measured Using a Ultra Short Pulse Fiber Laser
MORIS 2007 Workshop on Thermal and Optical Magnetic Materials and Devices, Pittsburgh, USA, 9/27 (2007).

- ⑪ 加藤剛志, 谷口典隆, 綱島滋, 岩田聡
熱磁気記録方式における微小磁区形成過程の解析と高密度化の検討 (招待講演)
平成 19 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会, 大阪大学, 8/27 (2007).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 磁気記録媒体, 磁気記録再生装置, および磁気記録媒体の製造方法

発明者: 松本幸治, 森河剛, 尾崎一幸, 綱島滋, 岩田聡, 加藤剛志

権利者: 富士通株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2007-268533

出願年月日: 2007 年 10 月 16 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

綱島 滋 (TSUNASHIMA SHIGERU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80023323

(2) 研究分担者

岩田 聡 (IWATA SATOSHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60151742

(3) 研究分担者

加藤 剛志 (KATO TAKESHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50303665