

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560394

研究課題名(和文) エネルギーアシスト記録及び瓦記録方式ハードディスク対応超高速サーボ信号転写の研究

研究課題名(英文) Studies on ultra-high speed servo signal printing for energy-assisted and shingled magnetic recording

研究代表者

杉田 龍二 (SUGITA, RYUJI)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：20292477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、エネルギーアシスト及び瓦記録方式などの次世代ハードディスクに対応できる超高速サーボ信号転写法を実現すべく、実験及び計算機シミュレーションにより研究を推進し次の成果を得た。転写された信号の遷移ノイズを低減するためには、ハードディスクの記録層構造にかかわらず、できる限り面内成分を多く含む転写磁場で記録することが望ましい。マスター媒体用磁性層として適している高垂直磁気異方性CoPt膜の消磁磁区構造は磁場印加方向に依存し、面内印加に比べて垂直印加の場合に磁区サイズが大きくなる。転写特性は積層構造記録層の層間交換相互作用の強さに大きく依存する。

研究成果の概要(英文)：This research was pursued to realize an ultra-high speed servo signal printing method which can be used for energy-assisted magnetic recording and shingled magnetic recording, and the following results were obtained. It was desirable that the printing magnetic field had large in-plane component as much as possible in order to reduce the transition noise of printed signals regardless of structure of recording layer. Demagnetized magnetic domain structure of CoPt thin films with high magnetic anisotropy which was suitable for the magnetic layer of master media depended on the applied magnetic field direction, and perpendicular demagnetized films had larger domain than in-plane ones. Interlayer exchange interaction of recording layers with stacked structure seriously influenced the printing characteristics.

研究分野：工学

キーワード：ハードディスク 磁気転写 エネルギーアシスト記録 瓦記録 磁区構造 層間交換相互作用

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ (HDD) の高記録密度化、大容量化は留まるところを知らず、現在も 40 % / 年の割合で高密度化が進展し、既に 700 Gbit / inch² 程度の密度の HDD が商品化されている。しかし、より高い密度を達成するためには現状の延長では困難であり、新たな技術としてエネルギーアシスト記録方式及び瓦記録方式が有望視されている。エネルギーアシスト記録方式には、熱アシスト記録方式とマイクロ波アシスト記録方式があり、国内外で研究が行われている。

一方、ハードディスク (HD) の高記録密度化が進展するのに伴い、HD 上の位置情報を担うサーボ信号の記録精度の低下及び記録時間とコストの増大が大きな問題になっている。我々はこの問題を解決すべく、磁気転写法によるサーボ信号記録の研究を推進して来た。磁気転写法においては、初めにスレーブ媒体としての HD を一方向に初期磁化し、これにパターンニングされたマスター媒体を接触させて、初期磁化と反対向きに転写磁場を印加する。マスター磁性膜との接触部では初期磁化が反転し、マスター媒体の凹凸パターンが、HD に磁化の変化として転写される。磁気転写法によれば、従来方法の 1 / 1000 の時間でサーボ信号を記録することが可能である。

我々はこれまでに、磁気転写法によってサーボ信号を記録した HD が、問題なくサーボがかかることを確認している。しかしながら、エネルギーアシストあるいは瓦記録方式用 HD に対する磁気転写の研究は、これまで全く行われていない。数年後の実用化を目指して両記録方式 HDD の研究開発が進められている現状を鑑みると、これに対応できるサーボ信号高速磁気転写法に関する研究及びその実用化が急務である。

2. 研究の目的

エネルギーアシスト及び瓦記録方式 HD の特徴は、従来 HD の室温における保磁力が約 5 kOe であるのに対し、10 kOe 程度と高いことにある。このような高保磁力 HD に対し、エネルギーアシスト記録においては、局所的に熱などのエネルギーを与えることによって保磁力を低下させ、これまでと同等の記録磁場で記録する。瓦記録においては、記録ヘッド磁極の HD に対向する面積を従来に比べて桁違いに大きくして記録磁場を強める。一方、磁気転写法においては、これらのいずれの手法も困難である。

そこで本研究では、積層構造磁性膜マスター媒体による記録磁場の増大、転写時に印加する転写磁場の増大、マスター媒体とスレーブ媒体 (HD) 間のスペーシングの極小化、の検討を行い、高保磁力 HD に対する転写特性を飛躍的に向上させ、エネルギーアシスト及び瓦記録方式 HD に対応可能なサーボ信号超高速転写技術を確立することを目的とする。

磁気転写特性を向上させるには、マスター媒体のパターン凸部と凹部における記録磁場の差 H を出来るだけ大きくする必要があり、これを実現するために、マスター磁性層として CoPt 垂直磁気異方性膜を使用してきた。しかし、CoPt 垂直磁気異方性膜の飽和磁化は高々 1300 emu/cm³ と低い。一方、FeCo 膜を用いれば 1900 emu/cm³ の飽和磁化が得られるが、垂直磁気異方性を有していないため十分な転写特性は得られない。そこで本研究では、積層構造磁性膜を用いることにより、高垂直磁気異方性かつ高飽和磁化を実現し、高 H を達成する。

また、磁気転写する際に転写磁場を増大することは、エネルギーアシスト記録において記録領域にエネルギーを加えることに相当している。そこで、転写磁場増大による高保磁力 HD への磁気転写を検討する。さらに、マスター媒体と HD 間のスペーシングの極小化による転写特性向上を目指す。磁気転写法においてはマスター媒体を HD に接触できるのが大きな特長であるため、これを十分に生かした状況での磁気転写について検討する。本研究により、従来検討されてこなかったこれらの手段を通して、高保磁力媒体への磁気転写可能性を明確にすることができる。

3. 研究の方法

研究計画・方法は次の4つに大別される。

(1) 高垂直磁気異方性膜 (高 K_u 膜) と高飽和磁化膜 (高 M_s 膜) から成る積層構造磁性膜 (積層膜) を作製し、磁気特性を評価する。高 K_u 膜としては CoPt 薄膜が最有力候補であるので、CoPt 薄膜の磁気特性及び磁区構造を明らかにする。その際、磁区構造の磁場印加方向依存性にも着目する。

(2) 所望の磁気特性を有する CoPt 薄膜が得られた後、積層膜を有するマスター媒体を作製し、転写実験を行う。また、シミュレーションによる磁化状態及び転写特性解析を実施する。

(3) 高転写磁場による高保磁力 HD に対する磁気転写実験及びシミュレーションを行う。

(4) マスター媒体と HD 間の極小スペーシングを想定した転写実験とシミュレーションを推進する。

4. 研究成果

(1) 積層構造磁性膜を有するマスター媒体を用いた磁気転写実験 (転写された HD の磁化遷移領域に着目)

転写特性を改善すべく作製した積層構造マスター媒体を用いて転写実験を実施し、転写された市販 HD の磁化遷移領域の状態を調べた。積層構造マスター媒体は CoPt / Ta / FeCoB / Ni 基板なる構造を有しており、信号パターンはラインアンドスペースである。市販 HD は、記録密度 650 Gb / inch² (媒体 A) と 120 Gb / inch² (媒体 B) のものを用いた。図 1 に、磁化遷移領域近傍の磁気力顕微鏡像を示す。は転写

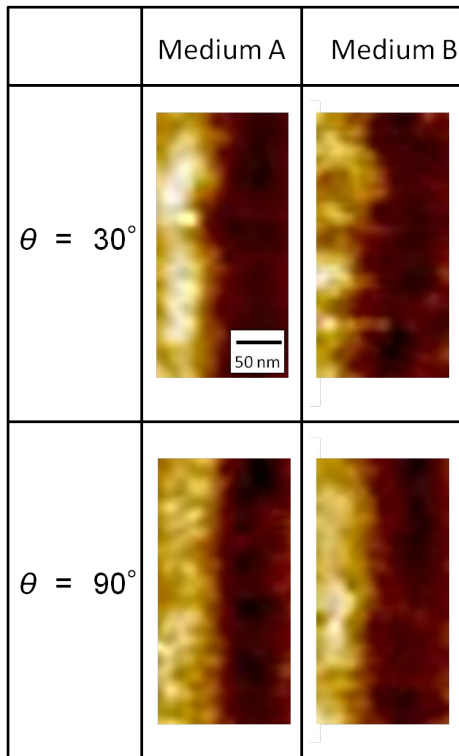


図1 磁化遷移領域近傍の磁気力顕微鏡像

時の転写磁場印加方向(膜面垂直方向が $\theta = 0^\circ$) である。明部は磁化が上向きの領域、暗部は下向きの領域である。いずれの媒体においても、面内磁場成分を多く含む $\theta = 30^\circ$ の方が 90° よりも磁化遷移領域の直線性が優れており、遷移ノイズが少ないことを示している。

(2) 転写された磁化遷移領域のマイクロマグネティックシミュレーション

転写されたHDにおける磁化遷移領域近傍の磁化分布を解析するために、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。記録層の磁気特性が現実のHDの特性に近くなるような値に、異方性磁場、粒子間交換スチフネス定数及び層間交換スチフネス定数を設定し、そのような媒体に転写磁場を印加して信号を記録した場合のHDの磁化分布を計算した。図2に、記録磁場の面内磁場成分 H_x の割合を変化させて記録した場合の磁化分布を示す。図2から、面内磁場成分の割合の増加に伴い磁化遷移領域の直線性が増していることがわか

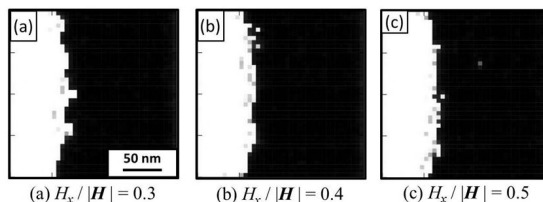


図2 計算により求めた磁化遷移領域近傍の磁化分布

る。これは図1に示した実験結果と一致しており、図1, 2の結果から、面内成分の多い磁場を用いて記録することがノイズを低減する観点から望ましいと結論付けられる。

(3) 高保磁力積層媒体への磁気転写の際の磁化反転シミュレーション

ビットサイズが 30 nm のドットパターンを転写する際の、積層構造スレーブ媒体におけるソフト層及びハード層の磁化の時間変化をマイクロマグネティックシミュレーションにより検討した。図3に計算結果を示す。図3は飽和磁化 M_s が 600 emu/cm^3 、層間交換磁場 $H_{\text{ex}}^{\text{interlayer}}$ が 6 kOe の場合である。図3(a)は、4.5 kOe の転写磁場 H_a を印加して 30 ps 経過した時の各磁性層の磁化分布を示している。図3(b)は、 H_a を印加して 116 ps 経過した時の磁化分布である。 $H_a = 4.5 \text{ kOe}$ はこの場合の最適転写磁場である。図3に示される磁化分布図は記録層の上面図であり、白色は磁化が膜面垂直方向上向き(+zの向き)、黒色は膜面垂直方向下向き(-zの向き)を示している。転写磁場を印加すると、図3(a)に示すように、初めにソフト層磁化が反転する。その後、図3(b)に示すように、ハード層磁化がソフト層磁化に追従する。

磁気転写されたソフト層及びハード層の磁化状態を評価するために、Printing performance (PP) なる指標を次式で定義した。

$$\text{Printing performance [\%]} = \frac{\sum M_z^{\text{ideal}} M_z^{\text{cal}}}{\sum M_z^{\text{ideal}} M_z^{\text{ideal}}} \times 100$$

ここで、 M_z^{ideal} は理想的に信号が記録された場合の磁化状態における磁化の z 成分を示し、 M_z^{cal} は計算によって得られた磁化の z 成分を示している。さらに、ソフト層及びハード層の磁化反転機構を系統的に解析するために、ディレイパラメータ D を次式で定義した。

$$D = (\tau_h - \tau_s) / \tau_s$$

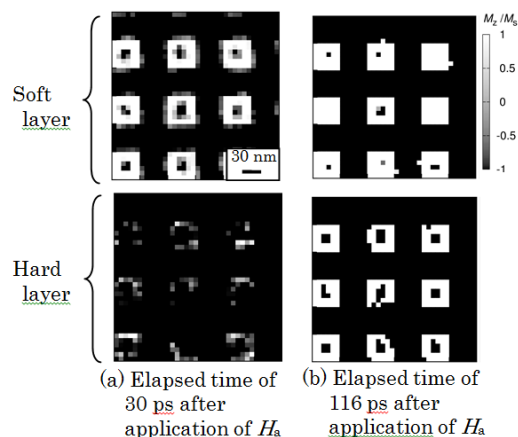


図3 サーボ信号転写時におけるソフト層及びハード層の磁化分布の時間変化

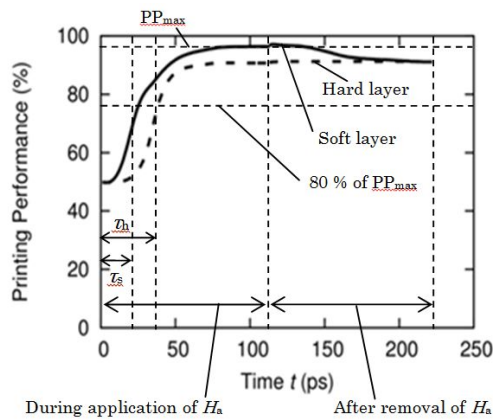


図 4 PP の時間変化

ここで、図4に示すように、 t_h はハード層のPPがPPの最大値 PP_{max} の80%に達した時間と定義した。同様に t_s はソフト層のPPが最大値の PP_{max} の80%に達した時間と定義した。ソフト層のみが磁化反転し、ハード層磁化が反転しない場合、ディレイパラメータ D は無限大となり、スピントロップ反転に相当する。また、 D が0.1以下となった場合、時間遅れがほとんどないとみなしてコヒーレント反転と定義した。 D を用いて飽和磁化が磁化反転機構に及ぼす影響を系統的に解析した。 $H_{ex}^{interlayer}$ を $6kOe$ とし、 M_s を $400, 600, 800 \text{ emu/cm}^3$ と変化させた。その結果、 t_h 及び t_s とが一致しないため、いずれもインコヒーレント反転ことが分かった。また、 M_s の増加に伴い、 t_s は増加し、 t_h は減少することが明らかになった。

(4) CoPt 垂直磁気異方性膜の磁区構造

高性能積層構造マスター媒体を得るためには、最上層に形成される CoPt 垂直磁気異方性薄膜の磁区構造を明らかにし、高性能化のための指針を示す必要がある。そこで、膜厚 $1 \sim 20 \text{ nm}$ の CoPt 薄膜をスパッタリング法で作製し、その磁気特性、磁区構造及び磁区構造の磁場印加方向依存性に関する検討を行った。膜構造は、Pt (2 nm) / CoPt₃₀ / Ru (20 nm) / Pt (100 nm) / ガラス基板とした。

図5に、膜厚 $3 \sim 10 \text{ nm}$ の膜について、垂直磁場印加により消磁した場合、面内磁場印加により消磁した場合の磁区構造を磁気力顕微鏡で観察した結果を示す。垂直消磁した膜厚 3 nm の膜の磁区構造は不規則構造であり、面内消磁した 3 nm の膜は不規則磁区と迷路磁区が混合している。また、前者の磁区サイズは約 400 nm であり、後者の約2倍の大きさになっている。垂直消磁、面内消磁のいずれにおいても、膜厚の増加に伴って磁区サイズは減少しており、不規則磁区構造から迷路磁区構造に変化している。また膜厚 7 nm までは、垂直消磁の場合の磁区サイズが面内消磁よりも大きくなっているが、 10 nm の膜では、消磁方向が変わっても磁区構造及び磁

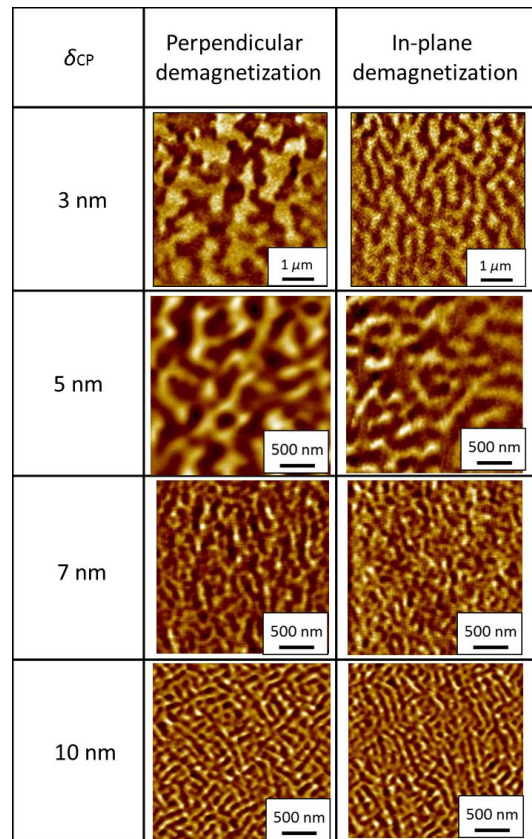


図5 CoPt 薄膜の磁区構造

区サイズに変化は見られない。

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17件)

S.Sato, S.Kuragai, R.Sugita, "Effects of sub-domain structure on initial magnetization curve and domain size distribution of stacked media", J. Magn. Mater., Vol.377, pp.147-152, 2015, 査読有

A.Oyama, R.Sugita, "Effect of layer thickness ratio on magnetization reversal process in stacked media with high coercivity", EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences, Vol.75, pp.06009p.1-p.4, 2014, 査読有

N.Tomiyama, A.Oyama, S.Sato, R.Sugita, "Influence of recording field direction on transition noise of stacked media", EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences, Vol.75, pp.06010p.1-p.4, 2014, 査読有

S.Kuragai, S.Sato, R.Sugita, "Micromagnetic study on influence of the recording field direction on transition noise of stacked media", J. Appl. Phys., Vol.115, pp.17B706-1-17B706-3, 2014, 査読有

S.Sato, Y.Yamaguchi, R.Sugita, "Effect of applied magnetic field angle and intensity on magnetic cluster state of stacked perpendicular

recording media”, IEICE TRANS. ELECTRON., Vol. E96-C, No.12, pp.1479-1483, 2013, 査読有

Y.Yaraguchi, S.Sato, S.Kuragai, T.Komine, R.Sugita, “Micromagnetic study on influence of the magnetic field direction on the domain structure in stacked media”, IEEE Trans. Magn., Vol.49, No.7, pp.3584-3587, 2013, 査読有

大山哲広, 小峰啓史, 杉田龍二, 「高保磁力ECC媒体への磁気転写における磁化反転」, 日本磁気学会誌, Vol.37, No.3-1, pp.62-65, 2013, 査読有

川田裕介, 東條隆介, 佐藤翔平, 小峰啓史, 杉田龍二, 「CoPt 垂直磁気異方性膜の磁区構造」, 日本磁気学会誌, Vol.37, No.3-1, pp.66-70, 2013, 査読有

A.Oyama, T.Komine, R.Sugita, “Effect of interlayer exchange coupling on magnetization reversal process in ECC media with high coercivity”, EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences, Vol.40, pp.07003p.1-p.4, 2013, 査読有

Y.Kawada, M.Onose, R.Tojo, T.Komine, R.Sugita, “Magnetic domain structure in thin CoPt perpendicular magnetic anisotropy films”, EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences, Vol.40, pp.07002p.1-p.4, 2013, 査読有

川崎龍太, 小野綱秀, 大山哲広, 川田裕介, 小峰啓史, 杉田龍二, 「積層構造垂直磁気異方性マスター媒体による垂直磁気転写」, 日本磁気学会誌, Vol.36, No.6, pp.323-330, 2012, 査読有

S.Sato, Y.Yaraguchi, T.Komine, R.Sugita, “Effect of applied magnetic field direction on magnetic cluster state of perpendicular recording media”, IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11, pp.3181-3184, 2012, 査読有

[学会発表](計26件)

N.Tomiyama, K.Ebata, R.Sugita, “Dependence of domain structure on applied field direction in stacked media”, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FQ-14, 2014.11.6, ホノルル(米国)

N.Nomiya, R.Sugita, “Influence of layer thickness ratio on the leakage field from recorded magnetization of stacked media with high coercivity”, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FQ-15, 2014.11.6, ホノルル(米国)

小室章也, 富山直樹, 江畑一輝, 杉田龍二, 「面内記録磁場が層厚比の異なるハードディスクのトランジションノイズに及ぼす影響」, 第38回日本磁気学会学術講演会, p.210, 2014.9.4, 慶應義塾大学(神奈川県横浜市)

H.Kawamura, R.Tojo, R.Sugita, “Aging variation of magnetic properties and domain structure of ultra-thin CoPt perpendicular magnetic anisotropy films”, INTERMAG 2014 (The 2014 IEEE International Magnetism Conference), BR-01, 2014.5.5, ドレスデン(ドイツ)

S.Sato, S.Kuragai, R.Sugita, “Effect of sub-domain structure on initial magnetization curve and domain size distribution of stacked media”, 58th

Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, DT-01, 2013.11.6, デンバー(米国)

S.Kuragai, S.Sato, R.Sugita, “Micromagnetic study on influence of recording field direction on transition noise of stacked media”, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, DT-02, 2013.11.6, デンバー(米国)

N.Tomiyama, S.Sato, R.Sugita, “Influence of recording field direction on transition noise of stacked media”, JEMS 2013 (Joint European Magnetic Symposia 2013), MO-107, 2013.8.26, ロドス(ギリシャ)

A.Oyama, R.Sugita, “Effect of layer thickness ratio on magnetization reversal process in stacked media with high coercivity”, JEMS 2013 (Joint European Magnetic Symposia 2013), TU-108, 2013.8.27, ロドス(ギリシャ)

S.Sato, Y.Yaraguchi, T.Komine, R.Sugita, “Effect of applied magnetic field angle and intensity on magnetic cluster state of stacked perpendicular recording media”, 12th Joint MM-Intermag Conference, AV-02, 2013.1.15, シカゴ(米国)

Y.Yaraguchi, T.Komine, R.Sugita, “Magnetic field direction dependence of magnetization state in stacked media”, ICAUMS 2012 (International Conference of Asian Union of Magnetism Societies 2012), 2pPS-142, 2012.10.2, 奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

A.Oyama, T.Komine, R.Sugita, “Effect of interlayer exchange coupling on magnetization reversal process in ECC media with high coercivity”, JEMS 2012 (Joint European Magnetic Symposia 2012), TU-50, 2012.9.11, ノルマ(イタリア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉田 龍二 (SUGITA RYUJI)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号: 20292477

(2) 研究分担者

小峰 啓史 (KOMINE TAKASHI)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号: 90361287

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し