Magnetic Properties of Hard/Soft-Stacked Perpendicular Media Having Very Thin Soft Layers with a High Saturation Magnetization

Y. Inaba, T. Shimatsu, S. Watanabe*, O. Kitakami**, S. Okamoto**, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., *Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

*Fuji Electric Advanced Technology Co., Ltd., *Tsukama 4-18-1, Matsumoto 390-0821, Japan*

** Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku Univ., *Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

The magnetic properties and recording performance of hard/soft-stacked media consisting of a magnetically hard layer (9-10 nm) underneath a very thin soft layer (2 nm) with a large saturation magnetization were investigated. Magnetic energy calculations revealed that reducing the strength of the interfacial exchange coupling between the hard and soft layers reduces the remanence coercivity, H_r . Moreover, an increase in the saturation magnetization of the soft layer $\langle M_s^{\text{soft}} \rangle$ significantly enhances the H_r reduction. It is theoretically predicted that the grain volume of hard (10 nm)/soft (2 nm) stacked media having $\langle M_s^{\text{soft}} \rangle$ of 1000 emu/cm³ could be reduced to about 1/3 that of conventional media whilst maintaining good recording writability and thermal stability. An experimental study of stacked media revealed that the magnetization reversal mechanism changed systematically as a function of the strength of the interfacial exchange coupling, as predicted theoretically. The H_r reduction on adjusting the interfacial coupling reached 22% of that of media consisting of directly coupled hard/soft grains. It was successfully demonstrated that hard/soft-stacked media having thin soft layers with a large $\langle M_s^{\text{soft}} \rangle$ showed better recording writability without degradation of SN_mR , recording resolution, or thermal stability.

Key words: hard/soft-stacked perpendicular recording media, thermal stability, saturation recording

高飽和磁化の薄いソフト層を有する Hard/Soft スタック垂直媒体の磁気特性と記録再生特性

稲葉祐樹・島津武仁・渡辺貞幸*・北上 修**・岡本 聡**・村岡裕明・青井 基・中村慶久

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1 (〒980-8577)

*富士電機アドバンステクノロジー株式会社, 松本市筑摩 4 丁目 18-1 (〒390-0821)

**東北大学多元物質科学研究所, 仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1 (〒980-8577)

1. はじめに

我々はこれまでに、ハード層に種々のソフト層を付与したグラニュー構造を有するスタック媒体について検討を行ってきた^{1),2)}。この媒体は熱安定性を大きく損なうことなく保磁力を低減し、飽和記録特性を向上させることが可能であることを理論、実験の両面から明らかにしている。さらに、ソフト層の飽和磁化を大きくすることでゼーマン項が増加し、保磁力が大きく減少するため、これらの効果は異方性の大きな材料を媒体として使いこなすのに非常に有効である。しかし現行の成膜プロセスでは、ソフト層の膜厚を厚くしすぎると結晶粒の分離度が劣化してしまうため、ソフト層は数 nm 以下の領域で用いる必要がある³⁾。

一方、Victoria らは、界面の結合力を制御することで熱安定性を維持しながらスイッチング磁界をさらに下げることが可能であることを理論的に示している⁴⁾。ただし、報告されているモデル計算では、ソフト層の磁化回転を促進するためにソフト層を厚く設定しているが、上述したように粒子の分離度を保ったままソフト層を厚く成長させることは容易ではない。

そこで本論文では、薄いソフト層を有するグラニュー型のスタック媒体について、まず、界面の結合力、および、飽和磁化を変化させた場合のエネルギー計算を行い、薄く、かつ高飽和磁化のソフト層を用いることで、どの程度の高密度化が期待できるのかを検討した。さらに、上記の結果を踏まえ、薄く且つ高飽和磁化

のソフト層を有するグラニュー媒体を作製し、界面の結合力の強さと磁気特性及び記録再生特性の関係を明らかにし、同媒体の性能と課題について検証したので報告する。

2. Hard/Soft スタック粒子のエネルギー計算

2.1 計算条件

Fig. 1 に示すように、磁気異方性の大きなハード材料の上に、ソフト材料を載せた粒子を想定した。このとき、系全体の磁気エネルギー E は、次のように表すことができる。

$$E = E_{\text{anisotropy}} + E_{\text{zeeman}} + E_{\text{exchange}} \quad (1).$$

ここで、 $E_{\text{anisotropy}}$, E_{zeeman} , E_{exchange} は、それぞれ、次に示すように、ハード、ソフト各材料の磁気異方性エネルギー、ゼーマンエネルギー、および界面の結合力に起因するエネルギーであり、次のように表すことができる。

$$E_{\text{anisotropy}} = K_{\text{u hard}} (S\delta_{\text{hard}}) \sin^2 \theta_{\text{hard}} + K_{\text{u soft}} (S\delta_{\text{soft}}) \sin^2 \theta_{\text{soft}} \quad (2-a),$$

$$E_{\text{zeeman}} = M_{\text{hard}} (S\delta_{\text{hard}}) H \cos(\phi - \theta_{\text{hard}}) + M_{\text{soft}} (S\delta_{\text{soft}}) H \cos(\phi - \theta_{\text{soft}}) \quad (2-b),$$

$$E_{\text{exchange}} = -J S \cos(\theta_{\text{hard}} - \theta_{\text{soft}}) \quad (2-c).$$

Fig. 1 Schematic view of stacked grains consisting of a soft layer, a hard layer, and an interlayer.

ここで、 θ は容易軸と磁化のなす角度、 ϕ は容易軸と印加磁界のなす角度、 S は粒の断面積、 δ は膜厚、 M_s は飽和磁化、 K_u は一軸磁気異方性エネルギー、 J は界面結合エネルギー(erg/cm²)、 H は外部印加磁界をそれぞれ表す。外部磁界の印加方向は、磁化容易軸方向とした。なお、ハード、ソフト各層における値には、それぞれ hard, soft の添え字をつけて表記した。

ハード層の膜厚は 10 nm で一定とし、ソフト層の膜厚は 5 nm および 2 nm の 2 種類について検討した。粒径は 7 nm としたが、粒子体積を変化させた計算では粒径を変化させている。ソフト層の K_u は 0 とし、スタック粒子の充填率は現行の媒体とほぼ同じである 70% とした。充填率を考慮した膜平均の K_u 及び M_s の値は、 $\langle K_u \rangle$ 及び $\langle M_s \rangle$ と表記した。また、界面結合エネルギーの分散は考慮していない。

(1)式に示した磁気エネルギーを H の関数として計算し、スイッチング磁界 H_{sw} を求めた。粒子の集合体では、保磁力近傍では膜平均の磁化が 0 となるため、 H_{sw} の計算において反磁界の影響は無視した。また、 $H=4\pi\langle M_s \rangle$ の反磁界が印加された状態におけるエネルギーポテンシャル曲線から、飽和残留磁化状態におけるエネルギー障壁 ΔE を求めた。

ここで、記録過程において媒体の磁化曲線が飽和する飽和磁界、 H_s を下記のように定義した。

$$H_s = 0.9 \times H_{sw} + (4\pi/3) \langle M_s \rangle / \alpha \quad (3),$$

ここでは粒子の c 軸分散を考慮し、 H_{sw} を 0.9 倍したものを実効的なスイッチング磁界とした。磁化曲線の傾き、 α は 1.0 としたが、記録過程では、裏打ち層と主磁極とで挟まれる効果により、媒体の反磁界係数が 1/3 倍^{5), 6)}に低減すると仮定した。この 1/3 は、記録時の反磁界の減衰率としては大きめの仮定であるが、一方で、媒体に仮定した $\alpha=1.0$ は、想定している媒体の膜厚および層構成から考えると⁷⁾小さな値であり、 H_s の評価の上でバランスを取っている。計算では、ヘッドの最大磁界が 16 kOe であると仮定して飽和記録条件を $H_s=16$ kOe とした。

また、熱安定性の議論では、 $\Delta E/kT=60$ を熱安定性が確保できる指標とした。

2.2 界面結合力に対するエネルギー変化

Fig. 2 には、 H_{sw} と ΔE の値を、界面結合力の強さ J に対して示した。 ΔE は熱エネルギー kT で規格化して示してある。ここでは、一例として、ソフト層膜厚が 5 nm、ハード層、ソフト層の $\langle M_s \rangle$ がいずれも 400 emu/cm³ とした場合のスタック媒体の結果が示してある。また、図中には各領域における磁化反転様式を模式図で示した。

結合力が強い領域ではソフト、ハード両層の磁化は一斉反転するが、結合力を弱めることでソフト層が先に反転を始め、スイッチング磁界が低下することがわかる。またこの時、エネルギー障壁はほとんど変化しない。さらに結合力を低下させると、ソフト層が先に反転を終えてしまい、その後ハード層が反転する、いわゆるスピンドロップ状態が出現し、スイッチング磁界は急激に増加する。

ここで、 H_{sw} が極小を示す J を、 J の最適値と定義した。計算では、ハード層及びソフト層の膜厚、物性値等を変化させた種々の条件下で、それぞれ J の最適値を求め、この J の最適値における H_{sw} および ΔE の値を求めた。これ以降に示す H_{sw} および ΔE の値は、特に断らない限り、この J の最適値における値である。

2.3 スタック媒体と単層媒体の比較

まず、ハード層とソフト層の飽和磁化が同じ場合について、単層媒体との比較を行った。Fig. 3 には、ソフト層の厚みを 5 nm とし、式(3)に示した飽和記録条件を満足するハード層の K_u を、ハード層及びソフト層の M_s に対して示した。図では、充填率を考慮した膜平均の値である $\langle K_u \rangle$ と $\langle M_s \rangle$ の関係を示してある。図中には、スタック媒体の総膜厚と同じ膜厚 15 nm のハード層のみの媒体(単層媒体と表現)の結果も示してある。いずれの媒体でも、全体の $\langle M_s \rangle$ が大きくなるほど式(3)を満たす $\langle K_u \rangle$ 値は増加するが、スタ

Fig. 2 Exchange constant dependence for the switching field and energy barrier of stacked grain.

Fig. 3 Change in anisotropy energy for $H_s = 16$ kOe as a function of the saturation magnetization.

Fig. 4 Change in energy barrier for $H_s = 16$ kOe as a function of the saturation magnetization.

ック媒体では、同じ膜厚の単層媒体に比べて2倍以上大きな $\langle K_u \rangle$ の材料を使うことが可能となる。

Fig. 4には、これらの媒体の $\Delta E/kT$ の値を示した。いずれの媒体でも、Fig. 3に示した $\langle K_u \rangle$ 値の増加により $\Delta E/kT$ が増加するが、 $\langle M_s \rangle$ が大きくなり過ぎると、膜の反磁界の増加により $\Delta E/kT$ は逆に低下する。スタック媒体の $\Delta E/kT$ は、単層媒体よりも2倍以上大きく、 $\langle M_s \rangle$ が300~700 emu/cm³の領域で、実用的な熱安定性を確保できると考えられる $\Delta E/kT=60$ の値を超えている。ただし、熱擾乱による保磁力の低減を考慮しない場合でも、磁化曲線の角型比を1に維持するためには、 $\langle M_s \rangle$ は600 emu/cm³以下である必要がある。

ここで、十分な熱安定性が得られる場合には、粒子の体積を減少させることで高密度化が実現できることになる。Fig. 5には飽和記録条件と $\Delta E/kT=60$ の両方を満足する粒子体積 $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ を示した。スタック媒体の $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は、単層媒体の1/2以下であり、 $\langle M_s \rangle$ が大きいほど両者の差が大きい。スタック媒体において $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ が最も小さくなる $\langle M_s \rangle$ は400~500 emu/cm³であり、この時、 $\langle K_u \rangle=8\sim 10 \times 10^6$

erg/cm³, $J=5\sim 6$ erg/cm²に対応する。また、この $\langle M_s \rangle$ 領域におけるスタック媒体の $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は約700 nm³であり、単層媒体の $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ の2.4分の1まで低下できることになる。

なお、熱擾乱による残留保磁力の低下を考えると、 $\langle M_s \rangle=400\sim 500$ emu/cm³の領域は、VSMの時間スケールで角型比1が得られる臨界的な $\langle M_s \rangle$ 領域に相当すると考えられる。これは、 H_s および角型比の議論の上で最も厳しい条件である $\alpha=1.0$ を想定して議論しているためであり、実際には α が1.0以上の大きくなることを考慮すると、VSMの時間スケールで角型比1.0は満足できると考えられる。

2.4 ソフト層の飽和磁化の増大効果

Fig. 6には、ハード層の $\langle M_s \rangle$ を400 emu/cm³に固定し、ソフト層の $\langle M_s \rangle$ のみを変化させた場合の $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ を、ソフト層の $\langle M_s \rangle$ 値($\langle M_{s,\text{soft}} \rangle$)に対して示した。計算ではハード層とソフト層の界面における磁束の不連続性の影響は無視している。図中には、ソフト層の厚みが5 nmと2 nmの

Fig. 5 Change in grain volume for $H_s = 16$ kOe and $\Delta E/kT = 60$ as a function of the saturation magnetization.

Fig. 6 Change in grain volume for $H_s = 16$ kOe and $\Delta E/kT = 60$ as a function of the saturation magnetization of the soft layer.

結果をそれぞれ示しており、 $\langle M_s \rangle$ が 400 emu/cm^3 の単層媒体における $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ も比較のため示している。

$\langle M_s^{\text{soft}} \rangle$ が大きくなるほど $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は低下している。ソフト層の膜厚が 2 nm の場合でも、 $\langle M_s^{\text{soft}} \rangle = 1000 \text{ emu/cm}^3$ (充填率 70% の Co にほぼ相当) の $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は約 620 nm^3 まで低下しており、上下両層の $\langle M_s \rangle$ が 400 emu/cm^3 の場合よりも、さらに低減できることがわかる。この $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は、単層媒体に比較して 2.7 分の 1 の小さな値である。

以上のことから、ソフト層の膜厚を 2 nm と薄く設定しても、純 Co を用いたグラニューラ膜相当まで $\langle M_s^{\text{soft}} \rangle$ を増加させることで、 $\langle V_{\text{grain}} \rangle$ は単層媒体の約 1/3 まで小さくすることができることが明らかとなった。

3. 実験による検証

3.1 実験方法

試料は ANELVA 社製 UHV-DC, RF マグネトロンスパッタリング装置によって直径 65 mm のハードディスク用ガラス基板に製膜した。装置の到達真空度は 10^{-7} Pa である。シード層は、基板側より、Ta, Pt, Ru 層をそれぞれ 5, 10, 20 nm 形成したものを用いた。ハード層には計算結果に合わせ $\langle M_s \rangle$ を 400 emu/cm^3 程度に調整した (Co-Pt)- SiO_2 グラニューラ層を用い、膜厚は 9 nm とした。ソフト層には $\langle M_s \rangle$ が大きな Co- SiO_2 を 2 nm 用いた。なお、両層に添加した SiO_2 量は、磁気特性の評価から粒子の磁気的分離度が最も高くなる添加量に調節しており、電子顕微鏡による組織観察によって、概ね個々の粒子がアモルファス層によって分離されたグラニューラ構造を有することを確認している。ここで、 2 nm の Co- SiO_2 ソフト層をスタックした媒体の $\langle M_s \rangle$ は 500 emu/cm^3 程度であり、Co- SiO_2 ソフト層のみの $\langle M_s \rangle$ は約 950 emu/cm^3 に相当する。界面の交換結合力を制御する層としては Pt⁸⁾ に SiO_2 を添加した Pt- SiO_2 用い、膜厚を $0 \sim 3 \text{ nm}$ まで変化させることで結合力を制御した。製膜は全て室温にて行なった。磁化曲線及び残留磁化曲線の測定は、VSM を用いて 10 Oe/s 台の磁界変化速度において測定した。一部の実験では、パルス磁界を用いて $\sim 10^8 \text{ Oe/s}$ の磁界変化速度における残留磁化曲線も評価した。

記録再生特性の評価には、CoZrNb 軟磁性層 (膜厚 200 nm) を裏打ち層としてガラス基板とシード層の間に形成した媒体を用いた。実験は日立ハイテック製スピンスタンド (RH 4160E) を用いた。記録にはマージ型単磁極ヘッドを用いており、記録ヘッドの主磁極材料の飽和磁束密度は 2.4 T 、ライトコア幅は 180 nm 、再生ヘッドについては、リードコア幅が 140 nm 、シールドギャップ長が 55 nm の GMR ヘッドを用いている。線速度は 10.16 m/s とした。再生出力はトラック 1 周分の平均の振幅 (0 to peak) とし、媒体ノイズは各記録密度の再生波形をスペクトラムアナライザに取り込み、 $0 \sim 160 \text{ MHz}$ までのノイズ電力量を積分して求めた。ここで、媒体以外から生ずるノイズは差し引いてある。信号対雑音比 SN_mR 値はこれら再生出力と媒体ノ

イズより求めた。

3.2 残留保磁力の変化

Fig. 7 には、界面交換結合制御層 (Pt- SiO_2 層) を 0.0 nm から 3.0 nm まで変化させた場合の磁化曲線の変化の様子を示す。図には磁化曲線と共に残留磁化曲線を白丸で示しており、 0.0 nm についてはハード層のみの場合の結果も示した。

ハード層に直接ソフト層を付与した場合、保磁力は約 30% 程度低減していた。ここに Pt- SiO_2 を挿入すると保磁力はさらに低下し、 1.5 nm で極小となっていた。さらに 2.0 nm と厚くすると、磁化曲線上には段差が観察され、磁化曲線と残留磁化曲線に大きな差が現れるようになる。これは、ソフト層のみが可逆的に反転するスピンプロップ状態である。 3.0 nm ではソフト層も非可逆的に反転し、磁気的な結合力が非常に弱くなっている。これらの界面結合力の低下による磁化機構の段階的な変化は、理論的な予測と良く一致していることがわかる。ここで、 $0 \sim 2 \text{ nm}$ に及ぶ膜厚領域にわたり上下層の磁化の交換結合力が徐々に低下して行く理由は、Pt の分極の影響であると考えられ、Pt の分極厚みともほぼ一致する⁸⁾。なお、Fig. 7 において、Pt- SiO_2 を 3 nm まで厚くしてもソフト層の磁化が垂直方向を向いている理由は、Pt- SiO_2 層と Co- SiO_2 層の間に誘導される界面異方性が関係しているものと推察される。Co- SiO_2 層との界面異方性が小さな NiFeCr- SiO_2 等を界面結合制御層に用いた場合⁷⁾には、スピンプロップが現れる膜厚以上に界面制御層を厚くすると、角型比は低下する。

Table 1 には、これらのサンプルの残留保磁力 H_r と、パルス磁界を用いて高速な磁界変化速度 ($\sim 10^8 \text{ Oe/s}$) で評価した残留保磁力 H_r^p の値を示した。 H_r^p と H_r の比は、 1.5 nm の Pt- SiO_2 層の挿入により低下するが、Pt- SiO_2 層が 2.0 nm になると急激に増加している。

Pt- SiO_2 層が 2.0 nm の媒体では、ハード層とソフト層の

Fig. 7 Hysteresis loops for stacked media with various Pt- SiO_2 interlayer thicknesses.

結合力が弱くなりスピントロップが現れていることから、残留保磁力を決める磁化反転単位はハード層によりほぼ決定されつつあると考えられる。したがって、同媒体における H_r^P/H_r の増加は、媒体の熱安定性が急激に劣化していることを示している⁹⁾。

一方、1.5 nm の Pt-SiO₂ 層の挿入により H_r^P/H_r は低下しており、媒体の熱安定性が良くなっているようにも見える。しかし、同媒体では、ソフト層の磁化が先に反転を開始することで H_r が低下し、磁化反転機構が大きく変化していると考えられることから、 H_r^P/H_r の変化から熱安定性を単純に議論できない。Fig. 2 に示したエネルギー計算の結果、界面の結合力が低下すると磁気エネルギーのポテンシャル曲線が一斉回転型から徐々に変化していき、エネルギー障壁に変化が無くても、 H_r^P/H_r が小さくなることを確認している。したがって、1.5 nm の Pt-SiO₂ 層の挿入による H_r^P/H_r の低下は磁化機構の変化に起因するものであり、媒体の熱安定性はほとんど変化していないことを示唆しているが、定量的な議論は今後の課題である。

Fig. 8 には、A～C の種々の成膜プロセス条件で作製した場合の、Pt-SiO₂ 膜厚に対する残留保磁力の変化率を示した。ここで、Fig. 7 の結果は、B に対応する。成膜条件の違いによらず H_r は Pt-SiO₂ が 1.5 nm で極小となっていた。また、2.0 nm 近辺の領域ではいずれもスピントロップ状態となっていた。

この内、界面結合の低下による H_r の低下率が最も大きい

Table 1 Values of H_r , H_r^P and H_r^P/H_r for hard/soft-stacked media with various PtSiO₂ layer thicknesses.

Pt-SiO ₂ (nm)	H_r (kOe)	H_r^P (kOe)	H_r^P/H_r
0	6.71	7.95	1.18
1.5	5.42	6.11	1.13
2.0	8.15	11.52	1.41

Fig. 8 Interlayer thickness dependences for the reduction ratio of the remanence coercivity.

プロセス C では、ソフト層を直接スタックした媒体で 5.9kOe だった H_r が 4.6kOe まで低下しており、 H_r の低下率は約 22%であった。一方、実験に用いたソフト層およびハード層の物性値を用いて、先に述べたような磁気エネルギーの計算を行った結果、界面結合の低下による H_r の低下率は 43%と算出された。実験で得られている H_r の低下率は、この約 1/2 の値である。計算では、 H_r の低下率を H_r の極小値 (Fig. 2 参照) から求めており、わずかな J の分散により H_r の低下率は小さくなる。したがって、 H_r の低下率が計算値よりも小さく抑えられている原因の一つは、界面結合力の分散であると推測される。

3.3 記録再生特性

Fig. 9 に高記録密度 (500 kFCI) の上に低記録密度 (70 kFCI) を上書きした場合のオーバーライトを、記録電流に対して示す。図中には、プロセス C で成膜した Pt-SiO₂ 層が 0.0 と 1.5 nm の 2 つの媒体と、総厚が同じ単層媒体の結果を示してある。Co-SiO₂ (2 nm) をスタックすることにより飽和記録特性が向上し、さらに界面結合力を低下させることで効果的にオーバーライトが改善されていることがわかる。

Figs. 10, 11 には、これらの媒体の規格化した出力電圧および SN_mR を、線記録密度に対してそれぞれ示した。ヘッドの記録電流は全て 50 mA_{0p} で一定とした。

記録分解能 D_{50} は、単層媒体では 307 kFCI であるが、ソフト層の付与により 580 kFCI 近くまで向上し、さらに界面の交換結合力を低下させることで 630 kFCI 近くまで向上していた。また、ソフト層のスタック化によるオーバーライト特性の改善が主因と考えられるが、 SN_mR の顕著な改善が認められた。さらに SN_mR は界面結合力を低下させることにより僅かに向上していた。

ここで、界面結合の低下による SN_mR の向上は、記録分解能の向上、オーバーライト特性の向上の他に、保磁力の低下による実効的なトラック幅の増加が要因として作用していると考えられる。ただし、種々の条件で作製した媒体について、実効的なトラック幅が同じになるように記録電流を調整して測定したところ、 D_{50} , SN_mR 等の信号品質は、界面結合力の低減により若干良くなることはあっても、劣化することは全く無かった。これらのことは、ソフト層のスタック化ならびに界面結合力の低下が、信号品質を劣化させることなく飽和記録特性を向上させることを示している。

一方、実験を行った全ての媒体は、低記録密度時の磁化の減衰は全く観察されていない。これは、評価したいずれの媒体も VSM の時間スケールの角型比がほぼ 1 であることに対応しており、信号の時間減衰の評価から熱安定性の変化を議論には至っていない。

Fig. 9 Overwrite profiles for a hard/soft-stacked medium and a hard layer medium.

Fig. 10 Roll-off profiles for a hard/soft-stacked medium and a hard layer medium.

Fig. 11 Signal-to-noise ratio SN_mR for a hard/soft-stacked medium and a (Co-Pt)- SiO_2 medium as a function of the linear recording density.

4. まとめ

薄いソフト層を有するグラニュラ型のスタック媒体を想定し、膜厚、飽和磁化、ハード層とソフト層界面の交換結合の強さと、媒体のスイッチング磁界及び熱安定性の関係を議論

した。

磁気エネルギー計算の結果、ソフト層の飽和磁化を大きくし、且つ、界面交換結合を適切な値に低減させることで、2 nm という薄いソフト層膜厚においても、飽和記録特性と熱安定性を維持しながら、ハード層単層に比べて粒子体積を 1/3 近くまで低減できることが明らかとなった。

飽和磁化の大きな Co- SiO_2 をソフト層に採用し、Pt- SiO_2 層を界面結合制御層として用いた実験の結果、界面の交換結合を低減していくことで、理論的に予測される段階的な磁化反転機構の変化が観察され、1.5 nm の Pt- SiO_2 層で残留保磁力は最大 22% 低下した。また、記録再生特性の評価の結果、ソフト層のスタック化ならびに界面結合力の低下が、信号品質を劣化させることなく飽和記録特性を向上させることが明らかとなった。

スタック媒体の持つ利点を最大限に活かした媒体開発のためには、残留保磁力の低下率と磁化機構との関係の明確化、ならびに、熱安定性に関する定量的な議論をさらに進めていく必要がある。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省平成 18 年度科学技術試験研究(RR2002, 超小型大容量ハードディスクの開発)の支援により行われた。ここに深謝する。

References

- 1) Y. Inaba, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Sato, T. Oikawa, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, pp. 239-242 (2005).
- 2) Y. Inaba, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Sato, T. Oikawa, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, pp. 3136-3138 (2005).
- 3) Y. Inaba, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura: *Digest of 29th Annual Conference on Magnetism in Jpn.*, 21pA-15 (2005).
- 4) R. H. Victora and X. Shen: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, pp. 537-542 (2005).
- 5) K. Nakamoto, and H. N. Bertram: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, pp. 79-85 (2002).
- 6) J. Hokkyo, H. Hokkyo, H. Matsutera, K. Yamada, and T. Osaka: *Digest of 23th Annual Conference on Magnetism in Jpn.*, 5aB-1 (1999).
- 7) T. Shimatsu, Y. Inaba, S. Watanabe, O. Kitakami, S. Okamoto, H. Aoi, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **43** (2007) in press. [Abstracts of 10th Joint MMM/Intermag Conference, FX-02, Baltimore, Jan. 7-11 (2007).]
- 8) S. Okamoto, O. Kitakami, N. Kikuchi, T. Miyazaki, Y. Shimada, and Y. K. Takahashi: *Phys. Rev. B*, **67**, 094422 (2003).
- 9) T. Shimatsu, H. Uwazami, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, pp. 109-117 (2002).

2006年10月20日受理, 2007年3月19日採録