Numerical Analysis of Magnetic Printing by Using a Perpendicular Anisotropy Master Medium

M. Nakazawa, H. Konishi, N. Sheeda, T. Komine, and R. Sugita

Ibaraki Univ., 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

A perpendicular anisotropy master medium (PAMM) is proposed. The PAMM is composed of CoPt film with perpendicular magnetic anisotropy and large saturation magnetization. The magnetization distributions of PAMM and conventional master media (using an FeCo soft magnetic layer) were analyzed by using micromagnetic simulation. It was found that the peak-to-valley value of the recording field and the recording field gradient at the edge of the patterned magnetic film of PAMM were larger than those of the conventional master medium. Furthermore, the peak-to-valley value of the recording field and the recording field gradient of PAMM did not depend on the strength of the printing field. The printing characteristic of PAMM is twice that of the conventional master medium. Furthermore, the optimum printing field for PAMM is 1 kOe lower than that of the conventional master medium. As a result, PAMM is expected to improve the printing characteristic of the bit printing method.

Key words: magnetic printing, perpendicular anisotropy master, servo signal

垂直異方性マスター媒体を用いた磁気転写の数値解析

中澤光貴・小西弘孝・Nurul Sheeda・小峰啓史・杉田龍二

茨城大学工学部, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 (〒316-8511)

1. はじめに

ハードディスクの高記録密度化, 大容量化が進んでおり, サーボ信号の高速, 高精度かつ安価な形成方法が課題となっている. これらの課題を解決すべく磁気転写法が検討されている¹⁾. 村田らは, ビット転写における転写特性が, 軟磁性膜で作製されたマスター媒体 (FeCo) の飽和磁化には依存せず, マスター磁性膜形状に依る反磁場係数にのみ依存することを明らかにした. 同時に, 従来のマスター媒体では, 転写時において FeCo の飽和磁化が十分に活用されていないことを指摘した²⁾. 本研究では, 垂直磁気異方性を有するマスター媒体 (Perpendicular Anisotropy Master Medium, PAMM) を提案し, マスター磁性膜内の磁化分布及び磁性膜近傍における記録磁場分布をマイクロマグネティックシミュレーションにより解析し, 従来マスター媒体と比較した.

2. 垂直異方性マスター媒体

本研究で提案する PAMM は垂直磁気異方性を有し, かつ飽和磁化の大きな CoPt 薄膜で構成されている. パターニングされた CoPt 及び FeCo のヒステリシスループの模式図を Fig. 1 に示す.

Fig. 1 Schematic perpendicular hysteresis loops of CoPt and FeCo patterned magnetic films.

パターンニング形状は, CoPt, FeCo 共に, ビット長及びトラック幅方向のサイズがいずれも 100 nm, 膜厚が 50 nm の磁性膜が, 間隔 100 nm で 2 次元的に配置されており, CoPt の垂直磁気異方性磁場 H_k が 5 kOe 程度のものを想定した. ビット転写においては, 最適転写磁場は記録層の保磁力程度の強さである³⁾. それゆえ, 記録層保磁力が 5 kOe 程度のハードディスクがスレーブ媒体である場合, Fig. 1 より, 飽和磁場が 17 kOe と大きい FeCo マスター媒体においては, 最適転写磁場では飽和磁化の 1/3 程度しか磁化されない. 一方, CoPt の場合, 垂直磁気異方性のため飽和磁場が小さくなり, 最適転写磁場における磁化は, FeCo の約 2 倍になると予想される. マスター磁性膜の磁化が増大することで転写特性の改善が期待できる.

3. シミュレーション方法

ビット転写では, まずスレーブ媒体の垂直方向に初期磁場を印加し, スレーブ媒体を一方方向に磁化する. 次にマスター媒体を接触させ, 初期磁場と反対向きに転写磁場を印加する. マスター磁性膜接触部では磁場が強くなるため初期磁化が反転し, 非接触部では磁場が弱くなり初期磁化が保存される. その結果, マスター媒体のパターンがスレーブ媒体に転写される.

シミュレーションモデルの上面図及び断面図を Fig. 2 に示す. 解析には, マスター磁性膜パターン幅及び間隔が等しいマスター媒体のみが存在する空間を想定した. マスター磁性膜の寸法は, ビット長及びトラック幅を 100 nm, 膜厚を 50 nm とした. 磁性膜パターンには, CoPt 及び FeCo を想定し, それぞれの飽和磁化を 1300, 1900 emu/cm^3 とした. また, CoPt は垂直磁気異方性を有するものと仮定し, 異方性磁場の強さを 1~15 kOe の範囲で変化させた. また, hcp c 軸の配向角度分散 $\Delta\theta_0$ を 5 deg. とした. 交換スチフネス定数 A は $1.0 \times 10^{-6} \text{ erg}/\text{cm}$ とした. 計算領域は Fig. 2 における点線部分とし, これを $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ のセルに分割し, x 及び y 方向に周期境界条件を適用した. 初期状態における磁

Fig. 2 Simulation model.

化は、全て転写磁場印加方向に向いているものとして計算を行った。媒体膜面垂直方向に転写磁場を印加し、CoPtの垂直磁気異方性及び転写磁場が磁性膜内の磁化分布、及び記録磁場に与える影響を調べ、FeCo磁性膜の場合と比較した。

磁化の計算にはLLG方程式を用いた⁴⁾。磁気転写において記録磁場印加時間は数秒程度であり、ヘッド記録とは異なり静的な磁化状態とみなせるため、平衡状態をLLG方程式により求めた。ダンピング定数を1.0、ジャイロ磁気定数を $1.76 \times 10^7 \text{ Hz/Oe}$ とし、LLG方程式における $|\mathbf{M} \times \mathbf{H}|$ の最大値が $1.0 \times 10^2 \text{ erg/cm}^3$ 以下となった磁化分布を平衡状態とみなした。このとき、磁化の変化は 1 memu/cm^3 以下であった。マスター磁性膜が記録層中央部に作る記録磁場を計算し、比較を行った。

4. シミュレーション結果及び考察

4.1 マスター磁性膜の垂直磁気異方性が磁化及び記録磁場に及ぼす影響

転写磁場を5 kOeとした場合の、CoPt($H_k = 15 \text{ kOe}$)及びFeCo磁性膜内の磁化分布をFig. 3(a)及び(b)に示す。磁化分布は、各々の飽和磁化で規格化し、矢印で表現した。また、Fig. 3の上部はマスター磁性膜トラック中心部($x-z$ 面)、下部は記録層対向面($x-y$ 面)における磁化分布である。Fig. 3より、 $x-z$ 面のCoPt磁性膜内の磁化は、FeCo磁性膜内のそれと異なり、磁場印加方向に向くことがわかる。記録層対向面における磁化分布に注目すると、FeCo磁性膜では磁化が中心で渦を巻く構造になっていることがわかる。我々が以前に行った研究においても、FeCo磁性膜内の記録層対向面における磁化分布は渦状構造であり、今回得られ

Fig. 3 Magnetization distributions at the center of the track (upper panel) and on the surface of a patterned film (lower panel) in the case of (a) CoPt($H_k = 15 \text{ kOe}$) and (b) FeCo.

Fig. 4 Recording field distributions at the center of the track in various anisotropic fields.

た磁化分布は以前に報告した磁化分布と定性的に一致している⁴⁾。一方、CoPt磁性膜では磁化が中心を向く構造であるが、磁化の面内成分は小さい。

次に、CoPt($H_k = 1 \sim 15 \text{ kOe}$)及びFeCoマスター磁性膜に5 kOeの転写磁場を印加した場合の、記録磁場の z 成分 H_z をFig. 4に示す。なお、記録磁場分布は、記録層膜厚方向中央部のトラック中心部における値をプロットした。Fig. 4より、 H_k が1 kOeのCoPt及びFeCo磁性膜の記録磁場分布はあまり変わらないが、CoPt膜では H_k が大きくなるに伴い、 H_z の最大値が増加し、最小値が減少することがわかる。Figs. 3及び4から、CoPt磁性膜の垂直磁気異方性によって記録磁場が増大することがわかる。

ビット転写では、記録磁場の最大値と最小値の差、及びマスター磁性膜エッジ部の磁場勾配が転写特性に影響を及ぼす。 H_z の最大値と最小値の差を ΔH_z 、マスター磁性膜エッジ部における記録磁場の傾きを $\left. \frac{\partial H_z}{\partial x} \right|_{\text{edge}}$ として、Fig. 5に ΔH_z 及び $\left. \frac{\partial H_z}{\partial x} \right|_{\text{edge}}$ の

Fig. 5 Anisotropy field dependence of the peak-to-valley value of perpendicular component of recording field ΔH_z and recording field gradient $\partial H_z/\partial x|_{\text{edge}}$ at the edge of the patterned magnetic film.

異方性磁場 H_k 依存性を示す。なお、転写磁場は 5 kOe とした。Fig. 5 より、 H_k が高くなるに伴い、 ΔH_z 及び $\partial H_z/\partial x|_{\text{edge}}$ が増大することがわかる。 $H_k = 15$ kOe の CoPt 磁性膜の場合、FeCo 磁性膜に比べ、 ΔH_z は 1.8 倍、 $\partial H_z/\partial x|_{\text{edge}}$ は 2.1 倍となっている。 ΔH_z の H_k 依存性について考察する。 ΔH_z の振る舞いは、印加磁場及び反磁場の和と異方性磁場の大小関係で説明できると考えられる。本シミュレーションで用いたマスター磁性膜の反磁場係数は約 0.6 であり、マスター磁性膜磁化が飽和するとき、CoPt 磁性膜中心部近傍における反磁場は約 10 kOe である。従って、反磁場と転写磁場の和は 5 kOe 程度であり、このことから CoPt 磁性膜磁化を転写磁場印加方向に向けるためには、少なくとも 5 kOe 程度以上の異方性磁場が必要であると推定される。Fig. 5 の計算結果を見ると、 ΔH_z は、 H_k が 5 kOe 以上でほぼ飽和しており、CoPt 磁性膜の磁化が転写磁場印加方向を向いていることが示唆される。

4.2 転写磁場が記録磁場及び転写特性に及ぼす影響

転写磁場を 0~5 kOe の範囲で変化させたときの CoPt ($H_k = 15$ kOe) マスターにおける記録磁場分布を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、記録磁場分布の形は、転写磁場にほとんど依存しないことがわかる。転写磁場を印加していない場合 (0 Oe) における記録磁場分布に注目すると、有限な ΔH_z が生じていることがわかる。ここで、スレーブ媒体の核生成磁場は 2 kOe 程度であるため、転写磁場が 0 Oe の場合における記録磁場が、スレーブ磁化に影響を及ぼすことが考えられるが、転写プロセスを考慮すると、この影響は無視できる。この理由について説明する。まず、一方向に初期磁化したスレーブ媒体に、マスター媒体を接触させると、Fig. 6 の転写磁場 0 Oe の記録磁場が生じ、これにより、マスター凸部と接触しているスレーブの磁化がわずかに反転する。一方、マスターと接触していない部分の磁化状態は変わらない。その後、転写磁場を印加すると、マスター凸部と接触している部分には強い記録磁場が印加され、スレーブの磁化は更に大きく反転し、マスターと接触していない部分

の磁化はわずかに反転する。また、転写磁場を取り去るとき、及びマスターを引き剥がすときは、スレーブの磁化は、ヒステリシスループにおける横軸にほぼ平行なマイナーループに沿うため、転写磁場印加時の磁化がそのまま残る。次に、4.1 節での考察を基に CoPt ($H_k = 5$ k, 6 k 及び 15 kOe) における ΔH_z 及び $\partial H_z/\partial x|_{\text{edge}}$ の転写磁場依存性を Fig. 7 に示す。Fig. 6 に示される記録磁場分布の形状は、転写磁場強度に依存しないため、Fig. 7 における $H_k = 15$ kOe の CoPt 磁性膜では、 ΔH_z 及び $\partial H_z/\partial x|_{\text{edge}}$ 共に転写磁場にほとんど依存しない。次に、 $H_k = 5$ kOe の CoPt 磁性膜に着目すると、0 及び 2 kOe の転写磁場を印加した場合の磁化が垂直方向をあまり向いていないため、記録磁場分布の形状は、Fig. 6 の分布と大きく異なる。一方、転写磁場が 3 k~5 kOe の範囲での記録磁場分布の形状は Fig. 6 の形状に類似している。それゆえ、Fig. 7 中の $H_k = 5$ kOe のグラフでは、転写磁場が 3 kOe 以上のもののみを示している。また、 $H_k = 6$ kOe の場合、転写磁場が 0 Oe の場合のみ、Fig. 6 の形状と異なる記録磁場分布となり、2 kOe 以上の転写磁場では Fig. 6 の形状と同様の分布が得られる。それゆえ、Fig. 7 中の $H_k = 6$ kOe のグラフでは、転写磁場が 2 kOe 以上のものを示している。以上より、 H_k が約 6 kOe 以上であれば、転写磁場を印加しない場合を除いては、ほぼ転写磁場依存性がなくなることがわかる。転写特性を評価するために、Fig. 8 に示すようなヒステリシスループを持つスレーブ媒体を想定した。スレーブ媒体の保磁力は 4 kOe、保磁力付近のループの傾き α は 2.8 である。計算により得られた記録磁場分布を用いて、このヒステリシスループをなぞることにより $\Delta M_z/M_s$ を算出した。 ΔM_z は、転写されたスレーブ媒体における垂直成分磁化の最大値と最小値の差であり、 $\Delta M_z/M_s$ が 2 とは、スレーブの逆向き磁化がいずれも飽和値になっていることを示す。 $\Delta M_z/M_s$ を用いて CoPt ($H_k = 15$ kOe) 及び FeCo 磁性膜の転写特性を比較した。 $\Delta M_z/M_s$ の転写磁場依存性を Fig. 9 に示す。FeCo 磁性膜に注目すると、転写磁場が 4 kOe のとき、 $\Delta M_z/M_s$ が最大となっていること

Fig. 6 Perpendicular component of the recording field distributions at the center of the track in various printing fields in the case of CoPt ($H_k = 15$ kOe).

Fig. 7 Printing field dependence of the peak-to-valley value of the perpendicular component of the recording field ΔH_z (a) and recording field gradient $\frac{\partial H_z}{\partial x}|_{\text{edge}}$ at the edge of the magnetic pattern of a master (b).

Fig. 8 Hysteresis loop of the recording layer in the perpendicular direction.

Fig. 9 Printing field dependence of the printing characteristics (CoPt and FeCo).

がわかる。これは、以前の研究結果と一致している³⁾。次にCoPt磁性膜に注目すると、転写特性の最大値は1.7となっており、FeCo磁性膜の最大値0.8と比べて、2倍強に向上していることがわかる。また、このときの転写磁場は3 kOeであり、FeCo磁性膜の最適転写磁場に比べ、1 kOe減少していることがわかる。以上のことから、マスター磁性膜に(大きな垂直磁気異方性を持つ)CoPtを用いることで、転写特性の向上と、最適転写磁場の低減が可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、垂直磁気異方性を有するマスター媒体(PAMM)を提案した。マイクロマグネティックシミュレーションによりPAMM磁性膜内の磁化分布及び記録磁場分布を解析し、マスター磁性膜にFeCoを用いた従来マスター媒体との比較を行った。その結果、次のことが明らかになった。

1. PAMMの異方性磁場が大きくなるに伴い、記録磁場の最大値が増大した。また、記録磁場におけるpeak-to-valley値及びマスター磁性膜エッジ部における記録磁場勾配が増大することがわかった。
2. 大きな H_k を持つPAMMにおける、記録磁場の転写磁場依存性を調べたところ、転写磁場が0~5 kOeの範囲では記録磁場分布、peak-to-valley値及びマスター磁性膜エッジ部における記録磁場勾配はほとんど変化しなかった。
3. PAMM及び従来マスター媒体の転写特性を比較したところ、従来マスター媒体に比べてPAMMの転写特性が2倍程度向上し、PAMMの最適転写磁場は従来マスター媒体に比べ、1 kOe程度低くなることがわかった。

以上の結果、垂直磁気転写にPAMMを用いることで、転写特性の更なる改善が可能であることが明らかになった。

謝辞 本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)産業技術研究助成事業の支援により行われました。また、富士フイルム(株)の皆様には有益なご議論を頂きました。ここに深謝致します。

References

- 1) M. Nishikawa, S. Wakamatsu, K. Ichikawa, T. Usa, M. Nagao, T. Ishioka, T. Yasunaga, T. Komine and R. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2612 (2006).
- 2) T. Murata, A. Izumi, T. Komine and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 58 (2007).
- 3) A. Izumi, Y. Nagahama, T. Komine, R. Sugita and T. Muranoi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 184 (2006).
- 4) M. Nakazawa, T. Komine and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 466 (2008).

2008年10月14日受理 2009年1月9日採録