Micromagnetic Simulation of Magnetization States Recorded by Perpendicular Magnetic Duplication

T. Komine, A. Izumi, T. Murata, and R. Sugita

Dept. of Media and Telecomm. Eng., Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

We demonstrated the micromagnetic simulation of magnetic duplication for perpendicular magnetic recording (PMR) media. The magnetization distributions of the PMR media duplicated by edge printing (EP) and bit printing (BP) were investigated. The dependence of duplication characteristics on the duplication field was also estimated. An AC erase state in the off-track region appeared for a strong duplication field in EP. The dependence of the duplication characteristics on the duplication field we found in this study is in agreement with that calculated by macroscopic-magnetization analysis in a previous report. Although the intergrain exchange constant has almost no influence on the duplication characteristics in EP, the duplication characteristics in BP are improved as the intergrain exchange constant increases.

Key words: magnetic duplication, perpendicular recording media, micromagnetic simulation

垂直磁気転写された磁化状態のマイクロマグネティックシミュレーション

小峰啓史・和泉昭彦・村田剛史・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

近年の垂直磁気記録の実用化, 高記録密度化に伴い, 信号の位置情報であるサーボ信号の書き込み時間の増大が問題となっている。垂直磁気転写法は, 垂直磁気記録方式を用いたハードディスクにサーボ信号を高速かつ安価に書き込む方法として注目されている^{1,2)}。垂直磁気転写における磁化状態解析には, 従来, 巨視的磁気特性が用いられていたが³⁾, 現実のハードディスクに対する詳細な転写特性を議論する場合, 垂直磁化膜の異方性分散, 粒子間交換結合などの, スレーブ媒体の微視的磁気特性が磁気転写に及ぼす影響を知る必要がある。本研究では, スレーブ媒体の微視的な磁化状態を解析するため, マイクロマグネティックシミュレーションを用いて, 転写条件及びスレーブ媒体の粒子間交換結合が垂直磁気転写特性に及ぼす影響を調べた。

2 計算方法

エッジ転写においては, AC 消磁状態のスレーブ媒体にマスター媒体を接触させ, 媒体膜面内方向に転写磁場を印加する。すると, パターニングされたマスター磁性膜エッジ部で強い垂直磁場成分が現れ, これに対応するマスター磁性膜エッジ部でスレーブ媒体が垂直方向に磁化される。ビット転写においては, はじめに, スレーブ媒体の垂直方向に初期磁場を印加して, 一方向に初期磁化し, 初期磁化したスレーブ媒体にマスター媒体を接触させ, 初期磁化と反対向きに転写磁場を印加する。これにより, 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。本研究では, 垂直転写された磁化状態を解析するため, 転写磁場印加時の記録磁場分布を有限要素法により計算

し, その磁場分布を用いてスレーブ媒体の磁化状態をマイクロマグネティックシミュレーションにより求めた。

3次元有限要素法を用いてポアソン方程式を解き, Fig. 1に示す計算モデルの記録層部に発生する記録磁場を計算した。マスター磁性膜パターン幅及び磁性膜間隔の等しいパターンが無限に配置されているマスター媒体を想定した。マスター磁性膜の寸法はトラック幅 100 nm, 磁性膜厚 100 nm, パターン幅(ビット長)およびピッチを 100 nm とした。また, 軟磁性裏打層(SUL)は膜厚 200 nm として, 記録層に接しているとした。マスター磁性膜及び SUL の磁気特性は, 飽和磁化 1900, 800 emu/cm³ をそれぞれ用い, 飽和を考慮してヒステリシスを折れ線で近似して, 透磁率をそれぞれ 100 とした。

次に計算された記録磁場分布を用いて, 垂直磁化膜の磁化状態をマイクロマグネティックシミュレーションにより求めた。計算領域は Fig. 1 に示すように磁性膜パターンが 3×3 個含まれる領域を想定し, 面内方向にはマスター磁性膜パターンが周期的に配置されているとして, 面内周期境界条件を課した。SUL には記録層の鏡像が現れるものとして, 鏡像が作る静磁場を考慮した。

記録層は, 飽和磁化 500 emu/cm³, 平均の一軸異方性磁場 8 kOe, 異方性分散 0.8 kOe, 角度分散 10°, 膜厚 20 nm の垂直磁化膜を想定した。垂直磁化膜は, 5 nm×5 nm×20 nm の直方体単磁区粒子で構成されているとしてセルに分割し, 粒子間交換結合 A を 1.0×10^{-7} erg/cm として, 基準値 A_0 とした。これらの磁気特性は, 我々が以前に解析に用いたマクロな磁気特性と概ね対応し, 保磁力付近でのヒステリシスの傾き α ($\equiv 4\pi dM/dH|_{H=H_c}$) は約 2.5, 保磁力 H_c は約 4 kOe, 核生成磁場 H_n は約 -1.5 kOe であった。

面内方向に転写磁場 H_a を印加する転写方式であるエッジ転写の場合, AC 消磁状態を初期状態として与えた。有限要素法

Fig. 1 Schematic illustration of calculation model for perpendicular magnetic duplication.

によって計算された転写磁場印加中の記録磁場分布を与えて、転写中の磁化状態を計算した後、磁場を取り去って転写後の磁化状態を求めた。一方、膜面垂直方向に転写磁場を印加する転写方式であるビット転写の場合では、初めに垂直方向に初期磁場を与えて DC 消磁状態を求めた。その後、初期磁場とは逆向きの転写磁場を印加している際の記録磁場分布を与えて磁化状態を計算し、磁場を取り去って転写後の磁化状態を求めた。

転写磁場 H_a を変えて、エッジ転写及びビット転写された磁化状態を比較、検討した。各々の転写特性を簡易に評価するため、転写された記録層からの洩れ磁場を計算し、トラック幅 80 nm、膜厚 5 nm のフリー層を持つ GMR 素子が記録層とのスペーシング 10 nm で配置されていると想定して、フリー層の ABS における平均磁場から再生出力を見積もった。また、粒子間交換結合 A を変えて、粒子間交換結合が転写状態に及ぼす影響を調べた。

3 結果と考察

3.1 ビット転写及びエッジ転写されたスレーブの磁化状態

Fig. 2 に転写磁場 H_a を変化させてエッジ転写した記録層の磁化分布を示す。Fig. 2 を見ると、マスター磁性膜エッジ部において、上向き、下向きの磁化が転写されていることがわかる。また、転写磁場が弱いときには十分な転写が得られないものの、転写磁場強度が増すにつれて、明瞭に磁化が転写されていることがわかる。この傾向は、記録層の磁気特性として、巨視的な磁気特性を仮定して解析した結果とも一致する。トラッ

クエッジ部に着目すると、4 kOe では転写された磁化が隣接トラックでつながっているものの、転写磁場を強くするに従って AC 消磁状態に近づき、所望のトラック幅に近づくことが分かる。

Fig. 3 に転写磁場 4 kOe を印加しているときのトラック中心部における記録磁場分布、及び、磁場が容易軸となす角 θ の分布を示す。Fig. 3 を見ると、磁性膜パターンエッジ部では、容易軸方向に対して記録磁場が約 40° 程度傾いていることが分かる。各磁性粒子が Stoner-Wohlfarth モデルに従うとすれば、エッジ部分で容易に磁化反転が起こると推定される。

転写された磁化分布及びその磁化過程を理解するため、転写磁場印加時及び転写後のオントラック、オフトラックにおける磁化分布を Fig. 4 に示す。転写磁場強度は 15 kOe である。オントラック領域では、強い転写磁場を面内方向に印加すると、転写磁場印加中の磁化はほとんど転写磁場の方向を向き、パターンエッジ部ではわずかに磁化の垂直成分を持つ。転写磁場を取り去ると、そのわずかな垂直成分が起点となって、最終の転写状態を決定する。一方、オフトラック部では記録磁場の垂直成分がほとんど無いため、転写磁場印加中は、面内方向に磁化が向いている。その結果、垂直方向に磁化する起点が存在しないため、AC 消磁状態が実現される。垂直磁気記録のサーボ信号において、オフトラック領域の DC 消磁状態に起因する再生波形の歪みが問題となっており、それを解消する試みが報告されている⁴⁾。エッジ転写では、転写を実行するだけでオフトラック部での AC 消磁が自動的に行われており、サーボ信号における再生波形歪みを同時に解消することが期待できる。

Fig. 2 (a) Alignment of master patterns in the calculation region. Magnetization distributions for the recording layer duplicated by edge printing with various duplication fields: (b) 2 kOe, (c) 4 kOe, (d) 8 kOe, (e) 10 kOe, and (f) 15 kOe.

Fig. 3 Recording field distribution along the center of the track in EP (lower). The upper figure indicates angle θ with respect to the easy axis, which is defined as $\theta = \tan^{-1} |H_z/H_x|$.

Fig. 4 Magnetization distribution along the on-track (lower) and off-track (upper) in EP. The solid line and dashed line indicate the magnetization distributions on the application of field and after duplication, respectively.

Fig. 5 に転写磁場 H_a を変化させてビット転写した記録層の磁化分布を示す。Fig. 5 を見ると、マスター磁性膜凸部において対応する上向きの磁化が転写されていることがわかる。転写磁場が弱いときには、パターンエッジ部の磁化反転が起こり、転写磁場の増加にともなって反転領域が単調に拡大することが分かる。

Fig. 6 に転写磁場 4 kOe を印加しているときのトラック中心部における記録磁場分布、及び、記録磁場が容易軸となす角 θ の分布を同様に示す。Fig. 6 を見ると、磁性膜パターンのエッジ付近に容易軸となす角が大きな記録磁場が印加されていることがわかる。また、そのピーク位置は磁性膜パターンの外側に位置している。この結果は、Fig. 5(b) に示したように、磁性膜パターンエッジ部から磁化反転が起こること、磁化分布が磁性膜パターンに比べて広がっていることとも対応している。

巨視的な磁気特性を用いた従来解析のように、記録磁場の膜面垂直成分及び垂直方向ヒステリシスのみを元に解析した場合、磁化の面内方向成分が転写された磁化状態に及ぼす影響は

十分に議論出来なかった。一方、本研究のように、マイクロマグネティックシミュレーション及び3次元の記録磁場分布を考慮した場合、記録磁場の面内成分がビット形状に大きく関わっていることが分かる。

Fig. 5 Magnetization distributions for the recording layer duplicated by bit-printing with various duplication fields: (a) 2 kOe, (b) 4 kOe, (c) 6 kOe, and (d) 8 kOe.

Fig. 6 Recording field distribution along the center of the track in BP (lower). The upper figure indicates angle θ with respect to the easy axis, which is defined as $\theta = \tan^{-1} |H_z/H_x|$.

3.2 再生出力の転写磁場依存性

記録層からの洩れ磁場分布を用いて、オントラック時の再生出力を計算した。転写磁場を変えてエッジ転写された記録層の再生波形を Fig. 7(a) に、ビット転写された記録層の再生波形を Fig. 7(b) に示す。エッジ転写では、磁場が弱いときに再生波形にノイズが見られるものの、転写磁場を強くすると矩形波に近づくことが分かる。また、ビット転写では転写磁場 2 kOe のときにビット中心における再生波形の歪みが見られるものの、磁場が強くなるにしたがい、再生波形が矩形波に近づくことが分かる。ただし、転写磁場が強くなるにつれて、磁化反転領域が拡大することから、再生波形のビットシフトも増大する傾向にある。

上述した再生波形の基本波振幅を計算し、基本波振幅の転

写磁場依存性をまとめたものが Fig. 8 である．これを見ると，エッジ転写では磁場強度の増加にともなって転写特性が飽和する．一方，ビット転写では保磁力付近に最適値が存在する．これらの傾向は以前のマクロな解析結果とも一致する．エッジ転写の場合，15 kOe 程度の強い転写磁場を印加すると基本波振幅がわずかに減少しているが，これは記録されるトラック幅が減少して，所望のトラック幅に近づいているためである．ビット転写の基本波振幅は，エッジ転写のそれに比べて小さいが，これはビットシフトのために基本波が減少したためであり，再生波形全体の振幅にそれほど大きな差はない．したがって，ビットシフトを考慮した最適パターン幅を選択することでビット転写でも十分な転写特性を得ることが可能である．

Fig. 7 Output waveforms for (a) edge printing and (b) bit printing.

3.3 粒子間交換結合が転写状態に及ぼす影響

粒子間に働く交換結合が磁気転写に及ぼす影響について検討した．粒子間交換結合は保磁力付近の傾き α を主に変えるため，記録状態が大きく変化することが予想される．粒子間交換結合 A_0 を基準値として，交換結合を $A = 0, 2A_0$ と変えて，エッジ転写及びビット転写したときの磁化状態を Fig. 9 にそれぞれ示す．エッジ転写では転写磁場 15 kOe，ビット転写では転写磁場 4 kOe のときの磁化状態をそれぞれ示す．エッジ転写においては，粒子間交換結合を強くしてもほとんど磁化分布には影響を与えないことが分かる．一方，ビット転写では磁化分布が大きく変化する．特に交換結合が大きいときには，パターン形状とよく整合した転写状態が得られており，交換結合 A の増加はビット転写の転写特性を向上させることが分かる．また，ビット転写では交換結合 A の増加とともに磁化反転領

Fig. 8 Dependence of duplication field on fundamental wave amplitude calculated from output waveforms for edge printing and bit printing.

域が拡大しており，垂直磁化膜に対応するパターン幅の設計が必要であると示唆される．

粒子間交換結合の影響は，各々の転写方法の初期状態に関係する．エッジ転写では，初期状態は AC 消磁状態であり，磁化過程は初磁化曲線に概ね従うため，転写状態は保磁力付近の傾きにほとんど依存しない．一方，ビット転写では，初期状態は DC 消磁状態であり，磁化過程は保磁力付近のメジャーロープに概ね従う．したがって，保磁力付近の傾きが大きい垂直磁化膜では，より明瞭にビット転写されると推定される．

粒子間交換結合に着目すると，エッジ転写では初期状態の磁化はランダムに向いているため，結果として粒子間交換結合の影響は相殺する．したがって，粒子間交換結合を変化させても，転写状態に大きな変化は起こらないと考えられる．一方，ビット転写での初期磁化は一方向に向いているため，粒子間交換結合が最も強く働く状況である．しかし，ひとたび磁化反転が起これば，交換結合の強さに対応した大きさのドメインが一斉反転するため，交換結合の増加とともに転写状態が改善したと理解することが出来る．

4 まとめ

本研究では，マイクロマグネティックシミュレーションを用いて，垂直磁気転写されたスレーブの磁化状態を計算し，転写条件及びスレーブの磁気特性が転写特性に及ぼす影響を考察した．その結果，以下のことが明らかとなった．

Fig. 9 Magnetization distributions for the recording layer with various exchange couplings in edge (left) and bit printing (right). The standard values, A_0 , of exchange constant, A , is 1×10^{-7} erg/cm.

- (1) エッジ転写では，転写磁場強度の増加に伴って，オフトラック領域の AC 消磁が促進される．

- (2) ビット転写では，パターンエッジから磁化反転が起こり，転写磁場の増加に伴って反転領域が単調に増加する．
- (3) エッジ転写及びビット転写によって得られる再生出力の転写磁場依存性はマクロな磁気特性を仮定した転写磁場依存性と概ね一致した．
- (4) 粒子間交換結合が転写特性に及ぼす影響は，エッジ転写では小さいが，ビット転写では大きい．ビット転写においては，交換結合が大きいときに特に転写特性が向上することが期待できる．

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) 平成 18 年度産業技術研究助成事業，及び日本学術振興会科学研究費補助金 (C16560291) の支援により行われました．また，長尾信氏を始めとする富士フイルム (株) の皆様には御協力，有益な御議論を頂きました．ここに深謝致します．

References

- 1) A. Saito, T. Hamada, T. Ishida, Y. Takano, and E. Yonezawa: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2195 (2002).
- 2) 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).
- 3) A. Izumi, Y. Nagahama, T. Komine, R. Sugita, and T. Muranoi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 184 (2006).
- 4) T. Hamaguchi, T. Ichikawa, and H. Takano: *J. Appl. Phys.*, **91**, 8697 (2002).

2006 年 10 月 4 日受理，2007 年 3 月 19 日採録