Influence of the Master Pattern Angle on Perpendicular Magnetic Contact Printing Characteristics

T. Saito, Y. Sakaguchi, S. Okami, T. Komine, and R. Sugita

Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawacho, Hitachi, Ibaraki 316-8511, Japan

The influence of the inclination angle of the master pattern on the edge printing characteristics for writing phase servo patterns on perpendicular magnetic recording media was investigated. Even if the master pattern angle is 40 degrees, the printing characteristics are only 10 percent lower than when the angle is 0 degrees. The influence of the inclination angle of the master pattern on the printing characteristics is also small when the bit length is changed. The contribution of the in-plane component of the recording field to magnetization reversal is large in edge printing. Although the perpendicular component of the recording field decreases markedly as the inclination angle of the master pattern increases, edge printing can be used for writing phase servo patterns on slave media.

Key words: magnetic contact printing, perpendicular magnetic recording media, hard disk, phase servo.

マスターパターンの傾きが垂直磁気転写特性に及ぼす影響

齋藤俊明・坂口雄一・岡見智史・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

磁気転写法は、ハードディスク(HD)にサーボ信号を高速、高精度かつ安価に書き込む方法として注目されている¹⁾。また、HDの高記録密度化に伴い、位相サーボ方式を用いたヘッドトラッキング技術が検討されている²⁾。

垂直磁気転写法には、2通りの方法がある。膜面に対して垂直に転写磁場を印加するビット転写と、膜面に対して平行に転写磁場を印加するエッジ転写である。位相サーボパターンの概略図、及び実際にHDにエッジ転写する際の装置構成をFig. 1に示す。Fig. 1において、ディスク半径方向からの位相サーボパターンの傾きを θ とすると、 θ が 40° を超える場所が存在する。ビット転写を行う場合には、転写磁場を膜面垂直方向に印加するので、転写特性は θ に依存しない。一方、エッジ転写を行う場合には、転写磁場印加方向(ダウントラック方向)とマスターパターンのパターン方向との成す角が 90° ではなく、 50° 以下になる場所が存在するため、マスターパターンの傾きによる転写特性への影響が懸念される。

以前我々は、拡大モデルを用いて位相サーボに対する垂直磁気転写特性について報告した³⁾が、垂直磁気記録HDそのものを用い

た磁気転写は、まだ検討されていない。本研究では、エッジ転写により垂直磁気記録HDに位相サーボパターンを形成することを目的として、マスターパターンの傾斜角が垂直磁気転写特性に及ぼす影響について実験及び計算の両面から検討した。

2. 実験及び計算方法

2.1 実験方法

本研究では、マスターパターンのパターン方向が無限大とみなせる、位相サーボ方式における位相バースト部のパターンを想定した。本実験で用いたマスター媒体の模式図をFig. 2に示す。マスター媒体は、基板上に $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ 膜($M_s = 1900 \text{ emu/cm}^3$)をストライプ状に形成したものを用いた。ストライプパターンの幅 L 及びパターン間隔 S は $100 \sim 500 \text{ nm}$ とした。 FeCo 膜厚 δ_m は 100 nm 、トラック幅は約 7 mm である。スレーブ媒体には、保磁力が 4.5 kOe の市販の垂直磁気記録HDを用いた。

転写の実験方法をFig. 3を用いて説明する。AC消磁状態のスレーブ媒体にマスター媒体を接触させ、 x 軸方向に転写磁場 H_a を印加した。このとき、転写磁場により磁化されたマスター媒体からの磁場と、転写磁場を重ね合わせた記録磁場が発生し、マスター磁性膜両側エッジ近傍に発生する磁場の z 軸方向成分(垂直成分)によって、スレーブ媒体が垂直上下方向に磁化される。Fig. 3に示すように、クロストラック方向(y 軸方向)からのマスターパターン傾斜角 θ は、位相サーボパターンの傾きに相当するとして、 θ を $0 \sim 40^\circ$ 、転写磁場 H_a を $4 \sim 12 \text{ kOe}$ と変えた。転写されたスレーブ媒体の磁化状態は磁気力顕微鏡(MFM)を用いて評価した。

Fig. 1 Schematic of the phase servo pattern and edge printing process for hard disks.

Fig. 2 Schematic of the master medium used in this study.

Fig. 3 Edge printing process for writing phase servo patterns in the experiments.

2. 2 計算方法

位相サーボにおけるスレーブ媒体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行った。計算モデルをFig. 4に示す。有限要素法により記録層部分に発生する記録磁場分布を計算し、その磁場分布を用いてマイクロマグネティックシミュレーションにより記録層の磁化状態を求めた^{4), 5)}。マスター媒体は、トラック幅無限大の磁性膜がストライプ状に無限に配置されているパターンを想定し、Fig. 4に示すように θ を定義して、マスターパターンの傾きを考慮した。マスター磁性膜の飽和磁化は 1900 emu/cm^3 とし、膜厚 δ_m を 100 nm 、ビット長 L を 250 nm 、マスター媒体とスレーブ媒体の磁気的スペーシングを 10 nm とした。記録層の飽和磁化は 550 emu/cm^3 、異方性磁場 10 kOe 、異方性分散 1 kOe 、膜厚 δ_r を 15 nm 、シード層、軟磁性裏打ち層(SUL)の膜厚をそれぞれ 15 nm 、 200 nm とした。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。また、記録層は $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm} \times 15 \text{ nm}$ の直方体単磁区粒子で構成されているとし、粒子間交換結合を $2 \times 10^7 \text{ erg/cm}$ とした。このときのスレーブ媒体保磁力は約 4.2 kOe である。さらに、実験で得られたMFM出力と対応させるために、転写されたスレーブ媒体からの漏れ磁場の垂直成分をモーメント法により求めた⁶⁾。

Fig. 4 Calculation model.

3. 1 転写実験結果

L が 250 nm のマスター媒体を用いて転写された、スレーブ媒体からのMFM出力波形をFig. 5に示す。Fig. 5から、 θ を変えても波形のピークはマスターパターンのエッジ部に現れることがわかる。また、 θ が 0° 、 40° のいずれにおいても、波形はほぼ正弦波になった。ここで、Fig. 5(b)に示すように、波形のp-p値を V_{pp} とし、 V_{pp} の転写磁場依存性をFig. 6に示す。Fig. 6から、転写磁場 H_a が 8 kOe 付近で V_{pp} はピークを持ち、 θ を大きくすると V_{pp} が減少することがわかる。しかし、 θ が 0° のときと比べて、 θ が 40° のときでも V_{pp} の減少量は10%程度である。これは、以前に我々が報告した拡大モデル実験で得られた結果³⁾とも一致する。

Fig. 7に、 V_{pp} のビット長依存性を示す。それぞれのビット長において、転写磁場は最適転写磁場である 8 kOe とした。Fig. 7から、ビット長が 100 nm になると、 250 nm に比べ V_{pp} は減少するが、 V_{pp} のマスターパターン傾斜角依存性は同様の傾向を示し、 θ が変わっても V_{pp} は10%程度しか劣化していない。また、エッジ転写のS/Nは、サーボトラックライタ(STW)記録以上であることが報告されており⁷⁾、パターンが 40° 程度傾斜しても、サーボ信号としての十分な品質が確保されるものと推測される。

Fig. 5 MFM output waveforms from edge printed media with inclination angles of (a) $\theta = 0^\circ$ and (b) $\theta = 40^\circ$.

Fig. 6 Dependence of the peak-to-peak value of the MFM output on the printing field in edge printing with various inclination angles.

Fig. 7 Dependence of the peak-to-peak value of the MFM output on the bit length in edge printing with various inclination angles.

Fig. 8 Calculated recording field distributions in edge printing with (a) $\theta = 0^\circ$ and (b) $\theta = 40^\circ$.

Fig. 9 Calculated magnetization and perpendicular component of stray field from slave medium distributions of edge printed media with (a) $\theta = 0^\circ$ and (b) $\theta = 40^\circ$.

Fig. 10 Dependence of the recording field at the pattern edge on the printing field in edge printing with $\theta = 0^\circ$ and $\theta = 40^\circ$.

3. 2 計算結果

3. 1 節の実験結果を裏付けるために、マイクロマグネティックシミュレーションにより記録層の磁化状態を計算し、転写されたスレーブ媒体からの漏れ磁場を求めた。Fig. 8 に、有限要素法により求めた記録磁場分布を示す。Fig. 8 から、記録磁場の垂直成分はマスター磁性膜のエッジ部においてピークを持ち、面内成分は磁性膜の接触部で減少し、非接触部で増加していることがわかる。また、マスターパターンを 40° 傾斜させると記録磁場の垂直成分は約 $1/2$ に減少する。これは、マスター磁性膜内部の磁化がパターン方向に向く傾向にあるためである³⁾。

次に、Fig. 8 の記録磁場分布を用いて計算した、スレーブ媒体の磁化状態及びスレーブ媒体からの漏れ磁場分布を Fig. 9 に示す。なお、磁化は M_s で規格化してある。Fig. 9 から、マスターパターンを 40° 傾斜させても、記録層における磁化の垂直成分 M_z は、ピークにおいてはほぼ飽和まで磁化していることがわかる。また、MFM 出力に相当すると考えられる、スレーブ媒体からの漏れ磁場の垂直成分を見ると、6%程度しか劣化していない。これは、10%程度しか転写特性が劣化しないという実験結果とよく一致している。

3. 3 記録磁場面内成分の影響

マスターパターンを 40° 傾斜させると記録磁場の垂直成分は約 $1/2$ に減少するが、この垂直成分の減少が転写特性に及ぼす影響は小さいといえる。この原因は、エッジ転写における強い面内磁場成分にあるものと思われる。Fig. 8 に示すように、磁場の垂直磁場成分の 0-p 値を ΔH_z とし、Fig. 10 に ΔH_z の転写磁場依存性を示す。実験で用いた HD の保磁力は 4.5 kOe であり、Fig. 8 をみると、マスターパターンを 40° 傾けると ΔH_z は保磁力以下に減少することがわかる。特に、マスターパターン傾斜角 40° 、転写磁場 4 kOe の場合、 ΔH_z は約 3.0 kOe であり、記録磁場の垂直成分のみを考えたのでは、ほとんど磁化反転しないことになる。しかし、Fig. 6 から、転写できることが実験的に確認されている。以上の結果から、エッジ転写においては記録磁場の面内成分が磁化反転を促し、垂直成分が弱い場合でも転写できるものと推定される。

そこで、エッジ転写において、記録磁場の面内成分が磁化反転に及ぼす影響を調べるために、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。マスター磁性膜エッジ部に現れる記録磁場を想定し、消磁状態のスレーブ媒体に対して垂直磁場成分のみを印加した場合、及び面内磁場成分まで含めて印加した場合のそれぞれについて反転磁化分布を求めた。マスターパターン傾斜角 40° 、転写磁場 4 kOe で転写するとき、マスター磁性膜エッジ部分に現れる記録磁場の垂直成分は約 3.1 kOe 、面内成分は約 3.9 kOe 、面内成分と垂直成分のベクトル和は約 5.0 kOe で、膜面垂直方向と磁場の成す角を Fig. 11(a) に示す ϕ とすると、約 51.9° である。記録層の磁気特性は 2. 2 節の計算と同様の値を用いた。

Fig. 11 にマイクロマグネティックシミュレーションにより得られた反転磁化分布を示す。Fig. 11 の濃淡は、記録層磁化の垂直成分 M_z を飽和磁化 M_s で規格化した値であり、明部が膜面上向き、暗部が下向きの磁化を示している。Fig. 11(b) はエッジ転写の初期状態で、AC 消磁状態である。Fig. 11(c) は記録磁場の垂直成分のみを考

Fig. 11 Calculated magnetization reversal distributions with various fields: (a) calculation model, (b) initial state (ac erase), (c) $H=3.0$ kOe, $\phi=0^\circ$, and (d) $H=5.0$ kOe, $\phi=50^\circ$.

慮した場合、Fig. 11(d)は面内成分まで含めた場合の計算結果である。Fig. 11(b) ~ (d)において、全体の M_z/M_s を平均し、その平均値を求めるとそれぞれ、0.00, -0.10, -0.96 となる。よって、垂直磁場成分だけでは 10%程度しか磁化反転しないが、面内磁場成分を加えることでほぼすべての粒子が磁化反転することがわかる。

ここで、異方性磁場 10 kOe の単磁区粒子が Stoner-Wohlfarth モデルに従うと仮定して考察する。このような粒子の集合体では、Fig. 11(c)の計算結果($\phi=0^\circ$)において、磁場が磁化反転に必要な値に達していないため、10%程度しか反転できない。また、Fig. 11(d)の ϕ が 50° の場合、Stoner-Wohlfarth モデルにおいて磁化反転に必要な磁場は約 5.5 kOe であることから、ほぼすべての粒子が反転したと考えられる。一方、実験では転写磁場 H_a が 4 kOe、マスターパターン傾斜角 θ が 40° の条件であれば転写が可能であり(Fig. 6)、4 kOe よりも低い H_a では、いずれの θ であっても転写が困難であった。 H_a が 4 kOe、 θ が 40° の場合のマスター磁性膜エッジ部近傍における記録磁場を計算により求めると、Fig. 11(d)で与えた条件となる。すなわち、実験結果は、このような条件のときに磁化が反転し、それよりも低い磁場の場合には反転しないことを示している。このことは、最も低い反転磁場が 5 kOe(ϕ が 45° のとき)であることが示される Stoner-Wohlfarth モデルとほぼ一致している。

以上の結果から、転写時に強い面内磁場成分を有するエッジ転写においては、面内磁場成分が磁化反転に大きく影響することがわかった。

4. まとめ

スレーブ媒体として市販の垂直磁気記録 HD を用い、マスターパターンの傾斜角が転写特性に及ぼす影響について検討した結果、次のことが明らかになった。

- (1) マスターパターンが 40° 傾斜しても転写特性は 10%程度しか劣化しない。
- (2) ビット長が変わっても、マスターパターンの傾斜が転写特性に与える影響は小さい。
- (3) マスターパターン傾斜角 40° では、記録磁場の垂直成分は約 1/2 に減少し HD の保磁力より小さくなるが、エッジ転写時の強い面内磁場成分が磁化反転を促すことで十分に転写できる。

以上より、マスターパターン傾斜角が 40° でも、サーボ信号として十分な品質の転写特性を得ることができるといえる。これは、磁気転写が位相サーボ方式にも対応可能であることを示すものである。

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)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)の皆様にご協力、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) H. Suzuki, H. Komoriya, Y. Nakamura, T. Hirahara, T. Yasunaga, M. Nishikawa, and M. Nagao: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2528 (2004).
- 3) T. Saito, H. Yasuda, T. Komine, and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 239 (2008).
- 4) M. Nakazawa, T. Komine, and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 466 (2008).
- 5) Y. Sakaguchi, T. Murata, T. Komine, and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 221 (2008).
- 6) K. Tanabe, S. Okami, T. Saito, T. Komine and R. Sugita: Dig. 32nd Annual Conf., Miyagi, 2008, p.140 (The Magn. Soc. Jpn 2008)

2008年10月15日受理, 2009年01月09日採録