Transition Curvature and Readback Pulse Width in Perpendicular Magnetic Recording

Y. Yamakawa, K. Miura, H. Muraoka, H. Aoi, and Y. Nakamura

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

In perpendicular magnetic recording, track edge noise, write fringing, and transition curvature are crucial issues that need to be addressed in order to increase track density. In particular, it is thought that the transition curvature at the written track edges broadens readback pulse width through the azimuth loss effect, but quantitative discussion of this phenomenon has not been sufficient. In this paper we extract transition lines observed in MFM images, and examine the influence of the transition curvature on the readback pulse width and transition jitter. Our findings show that this influence is not very large, and that deterioration of the writing resolution or broadening of the transition width at the track edges is more significant.

Key words: transition curvature, readback pulse width

垂直磁気記録における磁化転移ライン湾曲と再生波形パルス幅

山川慶之・三浦健司・村岡裕明・青井基・中村慶久

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

1. はじめに

今後の垂直磁気記録における高面密度化にはトラック密度の向上が重要な要件であり, 100 nm 以下の狭トラック幅の実現が緊急の課題である. しかしこのような狭トラック垂直磁気記録においては記録再生にじみによるトラック幅の増大やトラックエッジノイズによる SN 比の劣化, 磁化転移のトラック端部での湾曲¹⁾が懸念されている. この中で磁化転移ラインの湾曲はトラック端における等価的な分解能の劣化を引き起こすことが推測されるが, 湾曲と分解能劣化の関係は必ずしも明らかになっていない. 本報告では MFM 像から転移ラインの形状を抽出し, 湾曲による再生波形のパルス幅の広がりやトラック各部での記録分解能への影響などについて検討を行った.

2. 実験方法

実験装置は記録再生測定にはスピンスタンドを用い, 磁気像の観察にはデジタルインストルメンツ社製 MFM (Nanoscope III a)を用いた. 記録再生ヘッドにはマーシ型単磁極ヘッド (T_{ww} : 180 nm, シールド無し) / GMR ヘッド (T_{wr} : 140 nm, G_s : 55 nm)を用いた. 媒体は CoPtCr-SiO₂ 垂直二層膜媒体を用い, その諸元は Table 1 に示すとおりである. 初期状態は AC バンドイレーズとして 1200 kFCI を記録電流 50 mA_{Op} で書き込み, その後記録電流 30, 40, 50 mA_{Op}, 記録密度 100 kFCI で記録を行った. 時間軸解析²⁾をもちいて転移ジッタ距離, σ_{jitter} を測定した.

Table 1 Specifications of a CoPtCr-SiO₂ double-layered perpendicular medium.

M_s (emu/cm ³)	M_t/M_s	H_c (kOe)	H_0 (kOe)	K_u V/kT
646	0.83	3.5	8.3	81

3. 計算方法

3.1 磁化転移ラインの抽出方法

MFM 像からできるだけ高精度に磁化転移ラインを抽出するために(1)式に示す相互相関関数を用いた. Fig. 1 に示すように着目したトラックを MFM 像のダウントラック方向スキャンごと(約 8 nm 間隔)のマイクロトラックの集合と見なし, そのうち中央付近の1つを基準マイクロトラック 磁化 ($f_0(k)$) として他のマイクロトラック 磁化 ($f_z(k)$) との相互相関関数 $R(l)$ を求めた. ただし N は各マイクロトラックのデータ数である. 湾曲によって f_0 と f_z の信号には図示するような位相差があり, この相互相関関数の最大値の位置より基準マイクロトラックとの位相差を求めた. これをクロストラック位置の関数で表現して磁化転移ラインを得た.

$$R_{f_0 f_z}(l) = \begin{cases} \frac{1}{N+l} \sum_{k=1}^{N+l} f_0(k) \cdot f_z(k-l) & \text{for } l = -N+1 \cdots -1 \\ \frac{1}{N-l} \sum_{k=1}^{N-l} f_0(l+k) \cdot f_z(l) & \text{for } l = 0, 1 \cdots N-1 \end{cases} \quad (1)$$

$f_z(k)$ を $f_0(k)$ に対して移動させながら積和計算をして, 相互相関演算を行っており, f_0 と f_z のデータ点数が等しいので上式は $f_z(k)$ が $f_0(k)$ より左にあるとき ($l < 0$) で, 下式は右にあるとき ($l \geq 0$) の計算式である.

Fig. 1 Schematic diagram of a cross-correlation operation.

3.2 湾曲によるパルス幅の広がり の計算方法

転移湾曲による再生波形パルス幅の広がり は、 マイクロトラック磁化転移を規格化誤差関数 $M_0(x)$ でモデル化したものと前述の方法で抽出した転移ラインによる位相変動を用いて計算した。

$$M_0(x) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{\pi}a}\right) \quad (2)$$

まず転移形状に沿って実測値に合わせた磁化転移幅 a を有する複数の誤差関数を配置し、これを再生ヘッドのトラック幅で積分し再生ヘッドの感度関数³⁾を相反定理に従って畳み込み演算を行って再生波形を得た。これを再生ヘッドをトラック中央から片側にオフトラックさせた各位置について計算してパルス幅 T_{50} をプロットした。

4. 実験結果

4.1 磁化転移ラインの抽出

Fig. 2 に観察したトラックの MFM 像 (上) とそこから抽出した磁化転移ライン (下) を示す。ここで磁化転移ラインはヘッド走行方向を横軸、クロストラック方向を縦軸にしている。測定して抽出した各記録電流で記録された全ての磁化転移ラインにトラック端での湾曲が確認された。ここで磁化転移がヘッド磁化反転によってトレーリング端に生じるものであるから減磁界の影響を無視した第一近似としてはヘッド磁界の等高線とこの磁化転移ラインが一致するはずである。これを定性的に比較するためヘッド磁界を 3 次元有限要素法で計算した。更に、斜め磁界印加による反転磁界低減効果を考慮するために式(3) によって得た実効的な磁界 H_{eff} の媒体厚み方向の磁界分布を Fig. 3 に示す。

$$H_{\text{eff}} = (H_l^{2/3} + H_y^{2/3})^{3/2} \quad (3)$$

$$\left(H_l = \sqrt{H_x^2 + H_z^2} \right)$$

この磁界分布の形状はトラック中央からトラック端にかけて概ね 50 nm の湾曲に相当するが、上述の MFM 観測値はこれに近く、概ね妥当な範囲と考えられる。特に大電流励磁の場合、等磁界強度線は外側に推移するので湾曲が強調される傾向が認められる。

ここで記録分解能を規定する磁界勾配の様子を知るため、一例として磁界強度 6 kOe 付近のトラック中央とトラック端のヘッド磁界勾配について計算した。磁界勾配はトラック中央の約 120 Oe/nm に対し、トラック中央から 130 nm オフトラックした位置では 40~60 Oe/nm と半分以下に低下した。このヘッド磁界分布からは、トラック端での記録分解能の劣化が示唆される。

4.2 湾曲によるパルス幅の広がり

Fig. 4 に計算により求めた再生パルス幅 T_{50} の再生ヘッドオフトラック位置依存性を示す。横軸の 0 がヘッドがトラック中央に位置する状態である。この計算方法では湾曲が存在する場合、リードヘッドのトラック幅全てがオントラックしている範囲ではヘッドがオフトラックするほど平均化する転移湾曲の位相差が大きくなりパルス幅 T_{50} は増加することになる。一方、リードヘッドが記録トラックの外側にオフトラックすると、再生ヘッドの全リード幅による平均ではなく、記録トラック上にある部分だけのより狭いリード幅での再生になるため湾曲が T_{50} に与える影響は減少することになる。ここではオフトラック位置が 50 nm 付近が外れ始める位置で、 T_{50} は増加から減少に変化している。同図より湾曲のみによる T_{50} の劣化は湾曲が大きくても高々 8 nm 程度である。しかし Fig. 5 に示す実測における T_{50} のヘッドオフトラック位置依存性はヘッドがオフトラックするほど増大している。この 2 つの結果より転

Fig. 2 MFM images of the tracks recorded at 100 kFCI by changing the write current and transition lines extracted from the MFM images.

Fig. 3 Typical head field distribution calculated by 3D FEM simulation. ($\delta = 10$ nm, FH: 10 nm)

Fig. 4 Dependence of the readback pulse width T_{50} on the off-track displacement (calculation).

Fig. 5 Dependence of the readback pulse width T_{50} on the off-track displacement (experiment).

Fig. 6 Estimation of averaged transition parameter a .

移湾曲による影響だけでは実測の結果を説明できず、磁化転移幅自体がトラック端で増大していることが推測される。

そこで予め各々のオフトラック位置で再生パルス幅 T_{50} と転移パラメータ a の対応について3次元ヘッド感度関数による相反定理から計算しておき、実測値と比較して T_{50} が一致する a の値を選び出してプロットした。その結果を Fig. 6 に示す。どの記録電流においてもトラック端で急激に a が大きくなる。ここでの a はそれぞれのオフトラック位置で再生ヘッドのトラック幅にわたって平均したものでマイクロトラックでの a に対応するものではないが、トラック端で記録分解能が劣化する明らかな傾向を示している。

4.3 転移ジッタの再生ヘッドオフトラック位置依存性

Fig. 7 に実測波形の時間軸解析より求めた転移ジッタのヘッドオフトラック位置依存性を示す。どの記録電流においてもトラック端においてジッタが増大しており、記録電流が大きいほどその傾向は顕著である。ここでリードトラック幅が減少すればジッタ量はその平方根の逆数に比例して増加するから⁴⁾、オフトラックさせる測定ではこれを勘案することが必要である。信号振幅のオフトラックプロファイルより実効的な記録幅 T_{ww} 、再生幅 T_{wr} は、それぞれ約 270 nm、約 148 nm であった。これらに対してリードヘッドの位置によって記録トラック上に再生ヘッドがあつて信号を読み込むリード幅 T_{read} はオフトラック量 z に応じて(4a)式のように場合分けして示される。また、このリード幅の減少だけによるジッタの増加は(4b)式のように平方根に依存する。

$$T_{read} = \begin{cases} T_{wr} & \text{for } z \leq \frac{T_{ww} - T_{wr}}{2} \\ \frac{T_{ww} + T_{wr}}{2} - z & \text{for } z > \frac{T_{ww} - T_{wr}}{2} \end{cases} \quad (4a)$$

$$\sigma_{\text{jitter comp}} = \sqrt{\frac{T_{read}}{T_{wr}}} \cdot \sigma_{\text{jitter exp}} \quad (4b)$$

この式を用いて実験のジッタ値 $\sigma_{\text{jitter exp}}$ を補正した $\sigma_{\text{jitter comp}}$ を compensated として同図中に示す。実測ではトラック端で更にジッタ量が大きくなっており、単にオフトラックによるリードトラック幅の減少では説明できない信号品質の劣化を示唆している。

同様に各記録電流で記録されたトラックの MFM 像から求めた転移ジッタの計算値を Fig. 8 に示す。上述の記録再生特性の実測から得られたジッタ量に比べて値が大きいのは、MFM スキャン磁化転移ジッタを直接測定しており、トラック幅に相当する実効的な読み取り幅が Fig. 7 での磁気ヘッドより狭いために転移揺らぎの平滑化効果が小さいためである。なお、やはりトラック端においてジッタが増大し記録電流が大きいほどその傾向は顕著である。これはシミュレーションの結果で述べたようにトラック端ほどダウントラック方向でのヘッド記録磁界勾配が緩やかになるためであると考えられる。

5. まとめ

記録されたトラックの MFM 像より相互相関関数を用いることで磁化転移ラインを抽出し、湾曲による再生波形パルス幅の広がり进行を考察した。ここでは得られた転移ラインよりトラック上で転移幅が一定として算出した湾曲の影響による影響は比較的小さいことが分かった。記録再生特性の実測結果を説明するには湾曲だけではなくトラック端での転移の広がり进行を考慮する必要がある、トラック端で転移幅はトラック中央に比べ 2 倍以上にまで増加している可能性が示唆された。転移ジッタ測定からもトラック中央にくらべトラック端では転移ジッタが大きく増大しており、記録電流が大きいほどその傾向は顕著であった。以上よりトラック端において信号品質が劣化していることが示唆された。これらトラック端での転移幅の広がり进行は記録ヘッドの磁界勾配の低下が関与している可能性があり⁵⁾、実際、3次元有限要素法によるヘッド磁界計算からもトラック端では半分以下に勾配が劣化することが示された。

記録ヘッドのトラック端における磁界勾配が重要であることを指摘した。すなわちトラックの外側では急峻に減衰するとともに、その内側ではクロストラック方向に均一な磁界分布を実現することであり、これによりトラック端の転移幅の広がり进行とジッタの増大を抑制して高トラック密度化できると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省平成 14 年科学技術試験研究, RR2002 (超小型大容量ハードディスクの開発), SRC の支援を得て行った。謝意を表する。

References

- 1) David J. Seagle, Matthew C. Barsotti, Marc L. Osborn, and Vincent M. Tobin: *IEEE Trans. Magn.*, **35**,619(1999).
- 2) K. Miura, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura: *J.Magn. Soc. Jpn.*, **24**,231(2000).
- 3) H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2235(1999).
- 4) A. Moser, K. A. Rubin, and M. E. Best: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1872(2001).
- 5) K. Miura, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1926(2001).

2005 年 10 月 19 日受理, 2006 年 3 月 6 日採録

Fig. 7 Dependence of transition jitter σ_{jitter} on the off-track displacement (experiment).

Fig. 8 Dependence of the transition jitter σ_{jitter} on the off-track displacement (MFM).