垂直磁気記録トラックエッジのMFMによる評価

Magnetic Force Microscopy Study of Track Edge Magnetization structures Recorded on Perpendicular Recording Media

本多 幸雄、平山 義幸、伊藤 研也、二本 正昭

(株)日立製作所 中央研究所

Y.Honda, Y.Hirayama, K.Itou, and M.Futamoto

Central Research Lab., Hitachi, Ltd.

Track edge magnetization structures for a single-layered perpendicular media recorded with ring-type head are observed by magnetic force microscopy (MFM). Quantitative analysis of the microscopic magnetization structure is carried out through spectrum analyses of the MFM images. Magnetization structures with sharp track edge profile are formed by using a trimmed symmetrical pole tip shape write head. Several peaks in the Fourier-transformed spectra are considered to reflect the presence of magnetization irregularities. Medium noise measured at the recorded track edge is about 2.6dB larger than that measured from the DC-erased area.

1. 緒言

垂直磁気記録の高密度化を図るためには、媒体ノイズの低減、線記録密度の向上に加えて、狭トラック幅ヘッドによる記録と記録トラック端部の記録にじみの低減による高トラック密度化が極めて重要であり、計算機シミュレーションによる検討が行われている[1][2]。実際、単層垂直媒体にリングヘッドで記録する垂直磁気記録により750kFCI以上の高い線記録密度の可能性が示されている[3]。垂直磁気記録は、記録ビットの微細化に伴う熱的不安定性などの問題を回避して超高面記録密度を実現する有力な手段と考えられる。単層垂直媒体/リングヘッド記録方式は、現在実用化されている面内記録方式のヘッド技術が応用できる利点があるが、この系における記録端部の記録にじみの構造とノイズ特性を具体的に評価された例はない。

記録磁化状態の構造を詳細に調べるには、スピン偏極走査電子顕微鏡[4]、高分解能ピクチャーSEM法[5]、磁気力顕微鏡(MFM)[6][7]などが有効である。これらの解析法の中で、特にMFMは、鋭い磁性探針を一種の狭トラック幅の再生ヘッドと見なすことができ、また磁気ヘッドとほぼ同じ高さの漏洩磁束分布を計測できる。さらにMFM像の周波数解析法[8][9]の採用により、任意のトラック位置のノイズ特性を調べることが可能である。

本研究では、MFM像の周波数解析法を単層垂直媒体/リングヘッド記録系における記録トラック端部の構造とノイズ特性の解析に応用した。

2. 実験方法

本研究に用いた単層垂直媒体は、超高真空ス

表1 媒体構成と磁気特性

媒体No.	磁性膜	下地層(nm)	保磁力(Oe)
A	CoCr ₁₆ Pt ₁₀ Ta ₃ (100 nm)	CoCr ₃₅ /TiCr ₁₀ (20)/(30)	2200
B	CoCr ₁₉ Pt ₁₂ (100 nm)	CoCr ₃₅ /TiCr ₁₀ (20)/(30)	2200
C	CoCr ₁₇ Ta ₄ (50 nm)	TiCr ₁₀ (30)	1800

パタリング装置を用いて作製した[10]。媒体の構成と基本特性を表1に示す。記録用ヘッドは高Bs材料を磁極に用いたトラック幅の異なる2種類のMIGヘッド(Bs:1.6 T)を用い、直流消去の後デジタル磁気記録を行なった。トラック幅は6.3 μ m(ヘッド1)、及び1.5 μ m(ヘッド2)で、ギャップ長はいずれも0.34 μ mである。ヘッド2は、ヘッドの摺動面側から集束イオンビーム加工(FIB加工)して作製したものである。磁気記録時の磁気スペーシングは約60nmとした。

媒体表面から約30nmの高さの漏洩磁束分布をMFMにより測定した。記録磁化状態を定量的に評価するために次の手順によりMFM像(データポイント512x512)のスペクトル解析[9]を行なった。(1)MFM像において疑似トラック幅50nmを設定し、この範囲のMFM信号の平均強度を求める。(2)前記のMFM信号、1-lineに関してフーリエ解析処理(FFT)を行い、振幅成分(RMS=[FFT²]^{1/2})を求める。(3)波長7.5-0.05 μ mの範囲を128データポイントに分割し、振幅成分の波長依存性を調べる。

3. 結果と検討

図1は、媒体A(CoCrPtTa媒体)にヘッド1を用いて、線記録密度20kFCI,100kFCI,250 kFCIおよび300kFCIで記録した試料のMFM像を示す。直流消去領域や記録ビットの内部にこの媒体の平均結晶粒径(25-30 nm)の2-10倍の大きさの不規則構造の磁区が観察される。この不規則磁区は反磁界の影響により磁化方向と逆向きに形成される逆磁区によるものと推定される[11]。高記録密度領域では、隣接記録ビット間で磁氣的に結合した領域が認められるけれども、300 kFCIの記録状態が鮮明に観察できる。図の左側に示した矢印 $\rightarrow$ は、このMFM像から判定した記録トラックエッジを示す。低記録密度領域では、MFM像から記録トラックエッジの構造を容易に識別できるが、高記

図1 媒体Aの記録磁化状態

図2 MFM像から求めたトラックプロファイル

録密度領域では記録トラックエッジの磁化状態が不鮮明で、記録トラック幅の正確な評価が困難である。

記録トラックエッジの構造を詳細に調べるために、MFM像のスペクトラム解析を行った。図2は、MFM像をフーリエ解析した後、各記録信号強度から求めたオフトラックプロファイルを示す。MFM像において疑似トラック幅50 nmを仮定し、疑似トラック幅50 nmでトラック幅方向に積算したMFM信号をフーリエ解析した後、記録信号に対応する波長の振幅を測定した。特にトラックエッジ部では、15 nmのピッチで詳細に調べた。線記録密度20 kFCIから300 kFCIのいずれの記録密度でもトラックエッジでのMFM信号強度の変化を鮮明に観察することができる。図中、矢印は図1のMFM像に示した矢印と同じ位置を示す。この図から単層垂直媒体/リングヘッド系の磁気記録でも、記録ヘッドの磁極端部を揃えることにより、記録にじみを小さくできることがわかる。100 kFCIの記録トラックプロファイルにおいて、 ΔTw を記録トラックエッジのにじみと定義すると、 ΔTw は約0.28-0.34 μm と判定される。これより単層垂直媒体/リングヘッド記録系の ΔTw の量は、記録ヘッドのギャップ長と同程度であると推定できる。図2において、2つの矢印の間隔を記録トラック幅と定義し、トラック幅の記録密度依存性を測定した結果を図3に示す。記録トラック幅は線記録密度の増加と共に単調に減少し、300kFCIでは、20 kFCIに比べて約3%減少している。

図4は、100 kFCIで記録したMFM像の直流消去領域(a)、トラックエッジ部(b)およびトラック中央部(c)のノイズスペクトラムを示す。ノイズスペクトラムにおいて、横軸は波長 λ の逆数であり、対応する波長の値も示した。縦軸はMFM像のフーリエ解析から求めたノイズパワーに対応し、100kFCIの記録信号強度で規格化して示した。100kFCIの記録信号の他に $p_1(\lambda=1-0.49\mu\text{m})$ 、 $p_2(\lambda=0.49-0.26\mu\text{m})$ 、 $p_3(\lambda=0.26-0.18\mu\text{m})$ 、 $p_4(\lambda=0.18-0.11\mu\text{m})$ のマークで示した多数のピーク群が観察される。ここで $p_1 - p_4$ は、直流消去時のスペクトラムにおいて特徴的なピーク群を分類して示した。これらのピークは、媒体表面から発生したノイズ成分を表わしている。直流消去領域(a)において、波長0.7-0.12 μm の範囲($p_1 - p_4$)に見られるピークは、MFM像で観察される不規則磁区の大きさ(波長の1/2)を反映している。このノイズスペクトラムから、この媒体の不規則磁区は0.35-0.06 μm の範囲で分布しており、これは平均的な結晶粒径の2-10倍の大きさである。トラックエッジ部(b)では、特に p_2 、 p_3 のピーク群に対応する波長成分を持ったノイズが直流消去領域に比べて大きくなる傾向が認め

図3 記録トラック幅の記録密度依存性

図4 媒体Aのノイズスペクトラム(100 kFCI)

られる。このノイズスペクトラムにおいて、全波長領域のノイズ信号を積算して求めたトータルノイズは、トラックエッジ部では直流消去領域に比べて、約2.6dB大きい値である。これは記録ヘッドのトラック端部から発生する不均一な漏洩磁界により磁区構造が乱され、特に p_2 、 p_3 に対応するノイズ成分が増大したことを示している。記録トラック中央部(c)で測定したノイズスペクトラムは、直流消去領域と類似した波長成分を示す。このことは垂直記録におけるノイズは、直流消去時

と同じ不規則磁区が発生源であることを示している。記録トラック中央部(c)において、記録信号ピークの裾野がブロードになる傾向がある。これは不規則磁区の影響により記録ビットの遷移が揺らいだためと考えられる。

図5は、媒体B(CoCrPt磁性膜)にFIB加工して作製した狭トラック幅ヘッド(ヘッド2)で記録した試料のMFM像とトラックプロファイル及びノイズスペクトラムを示す。線記録密度は100 kFCIである。MFM信号のトラックプロファイルは、トラック端部から中央部に向かって徐々に増大したブロードな形をしている。この系における記録トラック幅の記録密度依存性を図3に示した。図から明らかなように、20 kFCIから150 kFCIの範囲で約17%もの記録トラック幅の減少が発生していることがわかる。これはFIB加工による磁極端部の加工だれや局所的な磁気特性の劣化などにより、記録トラック端部で飽和記録が出来なかったものと推定される。

直流消去領域のノイズスペクトラムから、 q_1 - q_4 の範囲(直流消去時のノイズスペクトラムにおいて特徴的なノイズ信号のピーク群で分類した)で印した波長 λ が1.25-0.14 μm のノイズ信号が検出されている。これよりこのCoCrPt媒体の不規則磁区の大きさは0.6-0.07 μm 範囲に分布していることがわかる。トラックエッジ部では、特に q_2 で示した長波長成分のノイズが増大する傾向が認められる。

図6は、直流消去領域のノイズスペクトラムにおけるノイズ信号を短波長から長波長領域に向かって順次累積した強度の比を媒体A

(CoCrPtTa磁性膜)と媒体B(CoCrPt磁性膜)について比較した結果を示す。図において累積強度比50%におけるノイズ信号の波長が、媒体の平均的な不規則磁区の大きさを表していると見なすことができる。図4(a)において媒体Aの不規則磁区の大きさは0.06-0.35 μm の範囲に分布していたが、その平均径は約0.14 μm ($\lambda=0.28\mu\text{m}$)であることがわかる。一方、媒体Bの不規則磁区は0.07-0.6 μm の範囲に分布しているが、その平均径は約0.16 μm ($\lambda=0.32\mu\text{m}$)であり、媒体Aに比べて平均的な磁区径が大きくなる傾向が認められる。これはCoCrPt媒体へのTa添加により磁性粒子の磁氣的孤立化が促進[12]され、磁区径の微細化が促進されたためと考えられる。

図7は、媒体C(CoCrTa :50nm厚)にヘッド2(FIB加工ヘッド)で磁気記録した試料のMFM像とトラックプロファイルおよびノイズスペクトラムを示す。この場合、図5に示した媒体Bに比べてS/Nの良い100 kFCIの記録状態が観察できる。また直流消去時の媒体ノイズも小さく、鮮明なトラックプロファイルを示している。直流消去時のノイズスペクトラムから求

図5 媒体BのMFM像、トラックプロファイル、ノイズスペクトラム(100 kFCI)

図6 CoCrPtTa、CoCrPt媒体直流消去領域の不規則磁区分布の比較

めた全波長領域の積算ノイズの比較から、媒体Cのノイズは媒体Bに比べて約6.1dB、媒体Aに比べて約5.9dB小さく、高S/Nの磁気記録が実現されている。しかし、記録トラックエッジ部ににじみ ΔTw は約 $0.5 \mu\text{m}$ と大きく、媒体Bに記録したときとほぼ同じである。記録トラックエッジ部ににじみの小さい狭トラックヘッド記録を実現するには、ヘッド加工精度の一層の改良が必要である。

4. 結言

単層垂直媒体／リングヘッド記録系の記録トラックプロファイルの解析にMFM像のスペクトラム解析法を応用した。

(1) 磁極端部を揃えた磁気ヘッドで記録をしたとき、トラック端部の記録ににじみ量 ΔTw は $0.28\text{--}0.34 \mu\text{m}$ と判定され、これは記録ヘッドのギャップ長にほぼ等しい。記録トラック幅は $20\text{--}300\text{kFCI}$ の範囲で約3%減少した。

(2) FIB加工狭トラックヘッド記録では、トラック端部で約 $0.5 \mu\text{m}$ の記録のだれが観測された。また $20\text{--}150\text{kFCI}$ の範囲で約17%もの記録トラック幅の減少が認められた。

(3) 記録トラック端部では、長波長のノイズ成分が増大し、直流消去領域に比べて約2.6 dB高いノイズが観測された。

図7 媒体CのMFM像、トラックプロファイル、ノイズスペクトラム (100 kFCI)

(4) CoCrPtTa媒体の不規則磁区は0.06-0.3 μm 、CoCrPt媒体では0.07-0.6 μm と判定された。CoCrPtTa媒体では、Taの添加により磁区径の微細化が促進されたものと考えられる。

(5) 磁性膜厚の薄いCoCrTa媒体の直流消去ノイズは、CoCrPtTa、CoCrPt媒体に比べて約6dB小さい。

参考文献

- [1]J.G.Zhu and X.Guang Ye : IEEE Trans. Magn. MAG-29 (1993) 3736.
- [2]K.Yishida, M.Hara, Y.Hirayama and Y.Sugita : J. Appl. Phys. 79 (1996) 5664.
- [3]N.Honda, T.Kitani and K.Oushi : Technical Report of IECE MR95-81 (1996-01) 31.
- [4]H.Matsuyama,K.Koike,F.Tomiyama,Y.Shiroishi,A.Ishikawa and H.Aoi : IEEE Trans. Magn. MAG-30 (1994) 2700.
- [5]T.Sakurai,O.Kitakami and Y.Shimada : J. Appl. Phys. 76 (1994) 3177.
- [6]Y.Honda,M.Suzuki,F.Tomiyama,H.Tomiyama,N.Inaba,K.Koike and M.Futamoto : Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L1803.
- [7]P.Glijer, K.Sin, J.M.Sivertsen,J.H.Judy : J. Magn. Soc. Jpn. 18-S1 (1994) 571.
- [8]Y.Honda,N.Inaba,F.Tomiyama,T.Yamamoto and M.Futamoto : Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) L987.
- [9]Y.Honda,Y.Hirayama,K.Itou and M.Futamoto : J. Magn. Soc. Jpn. Vol.19 Supplement, No.S2 (1995) 10.
- [10]Y.Hirayama and M.Futamoto : J. Magn. Soc. Jpn. Vol.19 Supplement, No.S2 (1995) 14.
- [11]M.Futamoto and Y.Honda : J. Magn. Soc. Jpn. 18-S1 (1994) 485.
- [12]Y.Hirayama,M.Futamoto,K.Kimoto and K.Usami : Proceeding of 1996 IEEE International Conference, GB-05.