二層膜垂直磁気記録媒体の低ノイズ化設計

Design for low noise double layered perpendicular magnetic medium

大内 一弘, 本多 直樹, 有明 順

秋田県高度技術研究所(AIT)

Kazuhiro OUCHI, Naoki HONDA and Jun ARIAKE

Akita Research Institute of Advanced Technology

abstract - Noise property and noise origin for double layered perpendicular magnetic recording media were studied in terms of the medium design and fabrication. It was found that medium noise from recording layer increased by introducing a soft magnetic backlayer. This might due to increase of a magnetic domain size of recording layer. In a Co-Cr system, some intermediate layers were found to reduce the medium noise of the recording layer. The still remained noise was thought due to the magnetization irregularity of the head-on like transition in the backlayer that was affected by the recording layer magnetization.

1. はじめに

磁気記録ハードディスク装置の記録密度向上は年率60%を越え、最近では年率100%と加速されている。たとえば、'99年5月に面記録密度20 Gbit/in²のデモンストレーションが数社から発表され^[1]、'99年8月には26 Gbit/in²記録の発表が行なわれた。このような激しい性能向上は、記録の物性限界(熱擾乱など)への接近を早め、次世代の記録媒体として垂直記録媒体が熱心に研究されるようになった^[2,3]。特に軟磁性裏打ち層付きの二層膜記録媒体(以下二層膜媒体と記す)は垂直記録方式により適した媒体として100 Gbit/in²以上の記録が期待されている^[4]。

記録密度の向上を妨げる大きな要因の一つに媒体ノイズがある。われわれは、単層垂直記録媒体における媒体ノイズが、記録ビット内の逆磁区に起因するとするノイズモデルから低ノイズ媒体の条件を提案し^[5]、記録層の組成・成膜条件や磁気特性について検討してきた^[6]。その結果、提案しているNb-Pt添加のCo-Cr系4元媒体において、MFM観察と電磁変換特性の両面から25 Gbit/in²を超える記録ができ

ることを確認した^[7,8]。

本論文では、各種の二層膜媒体について、特に媒体ノイズ低減の観点から検討した。またそのノイズの原因についても考察し、作製法の観点でノイズ抑制法を議論する。

2. 単層膜媒体のノイズ特性

われわれはすでに単層膜媒体において、逆磁区モデルに基づき、マクロな磁気特性(垂直抗磁力($H_{\perp}$), 飽和磁化(M_s) など)とdcイレースノイズとの関係を整理した。その結果をもとに、 $SQ_{\perp}$ を大きくし、M-Hループの傾き(α)を小さくすれば媒体ノイズを減少できることを示した^[9]。この場合M-Hループの傾きは粒子間交換相互作用を反映し、傾きが大きいと磁区サイズが大きくなることが多い。したがって磁区サイズが小さくなるほどノイズは低減するという結果であった。

一方、Co-Cr系については、記録層膜厚に対して、磁化反転機構が変わらない範囲においては膜厚が薄くなるほど磁区寸法が小さくなる^[9]。したがって、厚膜ほど出力の点で有利とはいえず、ノイズ低減と記録分解能(ヘッド磁界の急峻さの維持)の点で、膜厚はより薄い領域(おおむね50 nm以下)でも検討が必要となってきた。このような薄い膜厚の媒体で十分な磁気特性を確保するには困難が伴う。たとえば、Co-Cr系では膜の堆積初期に結晶配向の進まない、いわゆる成長初期層が存在する。Fig 1に示すようにほぼ40-50 nm付近で $H_{\perp}$ が最大となり、それより薄い領域では急激に減少する(実線)。最近この初期層を抑制できる手法がいくつか提案された。たとえば同図のCo-Cr系においても、ある条件のもとでは20 nm程度の薄い膜厚で4.5 kOe以上の高い $H_{\perp}$ を得ることがで

Fig. 1 Dependence of perpendicular coercivity on film thickness for various kind of media materials.

きている(点線)^[10,11]。さらに、Fig. 1にはCo/Pd人工格子膜^[12]やFe-Pt規則合金膜^[13]の例も示すが、10 nmというごく薄い膜厚領域まで、4 kOeを超える非常に高い H_{cl} を有し、初期層はかなり薄くなっている。これらの材料においては、膜厚20nmにおいても媒体ノイズを低減させることができている^[14,15]。

3. 二層膜媒体でのノイズ特性

3-1 二層膜媒体での記録層の磁気特性

裏打ち層としてニオブパーマロイ ($\text{Ni}_{80}\text{-Fe}_{15}\text{-Nb}_5$; wt%) を用い、Co-Cr系記録層には単層低ノイズ媒体の組成 ($\text{Co}_{71}\text{-Cr}_{20}\text{-Nb}_4\text{-Pt}_5$; at %) を採用した。しかしながら同じ成膜条件にも関わらず、Fig. 2に示すように、Kerr 効果測定装置で測定した記録層(膜厚50 nm)のM-Hループは大きく異なる。すなわち裏打ち層上の記録層の H_{cl} は単層膜媒体のそれに比べ小さく、 SQ_L 、ループの傾きはともに大きくなった。Fig. 3に示すように媒体ノイズはdc イレースノイズ、高密度記録時のノイズとも単層膜媒体の場合と比べて際だって大きくなる^[16]。S/N比で比べても二層膜媒体では5 dBほど小さい。二層膜媒体で記録層のM-Hループの傾きが大きいということは、単層膜媒体からの類推より、ビット内の

Fig. 2 M-H loops for (a) single layered and (b) double layered Co-Cr-Nb-Pt media.

Fig. 3 Signal output and noise property for single and double layered Co-Cr-M media^[16].

逆磁区寸法が大きくなり、ノイズが増加したものと考えられる。このCo-Cr系記録層は、裏打ち層とTi下地層の上では明らかに堆積機構が異なっていると予想される。

このような単層膜から二層膜へのM-Hループの形や H_{cl} の変化はCo/Pd人工格子膜^[17]や、Fe-Pt規則合金膜^[18]の場合にも見られる。特にCo/Pd人工格子膜の場合には、もともとPdバッファ層(膜厚10 nm以上)を堆積させているにも関わらず、厚い軟磁性裏打ち層のあることが、記録層の磁気特性に影響している。この場合Pdバッファ層の改質も含めて不明な点が多い。いずれにしるCo/Pd層の場合には、単層膜でより大きな H_{cl} を得るような条件にすれば、二層膜媒体の記録層として所望の磁気特性を得ることが可能になっている。

3-2 記録層の磁区サイズ

媒体ノイズには記録層の磁区サイズが大きく関わっている。Fig. 2で単層膜の磁区サイズは約80 nmであるのに対し、二層膜では100 nmを越える磁区サイズとなっている。このように磁区サイズが増加する理由は、NiFeNbのような結晶性の軟磁性層の場合、膜厚が厚い(本例では500 nm)ために粒子サイズが大きく、結晶配向が良いので、その上に堆積する記録層の粒子も大きく成長しやすく、磁気的にもつながりやすいことが考えられる。

x線回折測定の結果でも(ただしこの場合はNi-fcc(100)ピークとCo-hcp(00.2)ピークが分離可能な、上記とは少し異なる組成のCo-Cr-Nb-Ptを使った)、二層膜媒体での記録層の結晶性(回折強度で2720 cps)は単層膜媒体のそれ(310 cps)より優れていることが分かっており、上で述べたことを裏付けている。

3-3 中間層の効果

Co-Cr-Nb-Ptを二層膜媒体でも単層膜媒体と同様の低ノイズにする手法の一つとして、中間層の導入を図った。

中間層としてはTi、 $\text{Co}_{81}\text{Zr}_3\text{Nb}_{16}$ (at%: 以下CoZrNbと記す)、およびパラ磁性 $\text{Co}_{65}\text{Cr}_{35}$ (at%: 以下非磁性Co-Crと記す)を選び、記録層はそれぞれの中間層を用いた際の H_{c1} が最大になる条件で成膜した。中間層の膜厚はすべて5 nmとした。Tiと非磁性Co-Crはその上に堆積するCo-Cr系記録層の結晶配向を向上させるという報告もある^[19,20,21]。またCoZrNbはアモルファス構造であることから、結晶性下地の場合との違い、また磁性を持った中間層の影響を調べるために用いた。各種測定用の媒体は、中間層のない媒体とあわせて4種類作製した。

媒体ノイズはFig. 4に示すようにTiおよびCoZrNb 中間層を用いた場合に大幅に低下した。これらでは出力の低下はきわめて小さい。非磁性Co-Cr中間層を用いた場合には、中間層

Fig. 4 Signal output and noise property for various kind of intermediate layers.

Fig. 5 M-H loops for media with various kind of intermediate layers.

のない場合と同様媒体ノイズは大きい。この理由は3-1で見たように下地効果による記録層の変化と思われるので、各媒体の記録層のM-Hループを比較した。Fig. 5に示すように、M-Hループの傾きがTiおよびCoZrNb中間層を用いた媒体では小さく、また非磁性Co-Cr中間層の場合には中間層のない媒体と変わらない。すなわち低ノイズ単層膜媒体の場合と同様のM-Hループの時は低ノイズとなる。TiやCoZrNb中間層では記録層が単層膜媒体と同様に微細化していると推定される。膜厚5 nmのTi中間層の場合には記録層の結晶配向が向上することも予想された^[21]が、Fig. 5(c)のM-Hループから類推できるように、実際は低下していると思われる。ここで、Fig. 5(c), (d)と同程度のM-Hループの単層膜媒体では、結晶配向が十分ではないにも関わらず、6 kOe以上の大きな垂直磁気異方性を示す。これはここで用いたCo-Cr-Nb-Pt 4元系の特有な性質である可能性もある。

Fig. 6に示すMFM像は中間層のない媒体とCoZrNb中間層の媒体の磁化転移部分の磁気像で、CoZrNb中間層媒体では明らかに磁区寸法が微細化していることが分かる。このように低ノイズ化した媒体では、トラック幅を0.14 μm にFIB加工した薄膜単磁極ヘッド(主磁極Fe-Si-N/Si-N: $B_s = 1.9 \text{ T}$)で線記録密度400 kFRPIの信号パターンがMFMにより明瞭に観察された^[22]。これは50 Gbit/in²以上の面記録密度に相当するものである。

Fig. 6 MFM images at transition for media (a) without, (b) CoZrNb intermediate layers.

全体として低ノイズ化は達成されているものの、記録密度ともにノイズが増加する傾向はなくなっていない。すなわち磁化反転に伴うと思われるノイズが見られる。これら媒体のdcイレースノイズに対する信号記録時(200 kFRPI)の相対ノイズとして測定した媒体固有のノイズスペクトルは低周波数に偏っている

Fig. 7 Relative noise spectra of 200 kFRPI recording to dc erased state for media with various kind of intermediate layers.

(Fig. 7)。このスペクトルは遷移ノイズを示す長手記録媒体の場合のそれによく似ている。ただしそれより低周波数のノイズ成分(5 μm 程度)をも含んでいる。

これらに対し、Fig. 7に示した中間層のない媒体あるいは非磁性Co-Cr中間層媒体ではdcイレースノイズに対して信号記録時のノイズの増加が小さい。増加分の固有ノイズスペクトルは準白色型に近く、低ノイズ化した単層膜垂直媒体のそれに似ている。したがってこれらの媒体のノイズは主にビット間の逆磁区によるものと推測され、実際これらの媒体にはFig. 6(a)に示すようにMFM観察でビット間に逆磁区が多数存在していることが分かる。

3-3 軟磁性裏打ち層の検討

軟磁性裏打ち層としてのNiFeNb膜はオーバライト特性なども考慮に入れて、数100 nmの膜厚にしている場合が多い。しかし、このような厚膜では、軟磁性材料に垂直異方性が発現し^[23]、縞状磁区によるノイズの原因となっている場合がある。またそのノイズ低減のため軟磁性膜の磁化容易軸をディスク面の径方向に制御する必要もある^[24]。

一方では超高面密度をねらう場合に、ヘッド主磁極の断面積の微細化に照らし、最適膜厚の再検討も必要である。課題は多いが、裏打ち層としての好ましい磁気特性を維持しながら、中間層のない低ノイズ二層膜作製の可能性を見ることにする。

ここでは一例として、スパッタガスとしてArにN₂を添加して裏打ち膜を成膜した。Fig. 8にN₂ガスの添加量に対し、NiFeNb膜の軟磁気特性の変化を示す。N₂ガスを5%入れることで、透磁率(μ)は急激に低下し、困難軸方向の抗磁

Fig. 8 Dependence of soft magnetic properties for NiFeNb film on nitrogen content.

Fig. 9 M-H loops for media with NiFeNb deposited (a) with and (b) without nitrogen.

力は増加しはじめる。N₂を1%以上入れることでNi-fcc(111)配向は劣化することが分かっている。ここでは2%添加して中間層のない二層膜媒体を作製し、添加しないものと比較した。その結果、Fig. 9に示すようにM-Hループが大きく異なり、N₂添加媒体の記録層のH_{cl}は大きく、SQ₁は小さくなっていることが分かる。

再生出力とノイズの記録密度依存性をFig. 10に比較した。この図よりN₂添加媒体のノイズが大きく低下していることが分かる。この場合再生出力も若干低下してるが、S/Nで見ると記録密度全域にわたって、N₂添加膜の方が2 dB以上高いことが分かった。

Fig. 10 Signal output and noise properties for media with NiFeNb deposited with/without nitrogen.

以上のように中間層を用いずにNiFeNb膜の成膜条件を変化させて、記録層から発生する媒体ノイズを低減することも可能である。

したがって記録層の成長や媒体ノイズの低減に関しては、中間層が必須というわけではないことが分かった。

上で述べたような軟磁性裏打ち層そのものの成膜条件で磁気特性を制御する方法の他、裏打ち層の膜構造を変更することによって、磁気特性を制御しようとする試みも従来より行なわれている。例えば、(軟磁性層／非磁性層)の積層により軟磁気特性を確保する^[25]試み、(硬磁性層／軟磁性層)の積層により軟磁性層をピン止め^[24]する方法、あるいは(軟磁性／反強磁性層)の交換結合膜積層(交換バイアス積層膜)による軟磁性層を異方性制御^[26]する方法などが挙げられる。われわれが検討している交換バイアス積層膜の詳細については、別の報告で詳しく述べる^[27]。

4. 二層膜媒体のノイズ起源

前項で述べたように、媒体ノイズは記録層の作製法によって大幅に低減したが、高密度記録時に密度とともに増加するノイズがなお残っている。その原因としては一般に以下のようなものが考えられる。

4-1 記録層起因のノイズ

- ①信号を記録した際の記録層の磁化転移の乱れ
- ②記録層の面内容易な成長初期層での磁化転移の乱れ

4-2 裏打ち層に起因するノイズ

- ③記録層との交換結合によって生じた裏打ち層のセミハード層での磁化転移の乱れ
- ④記録層磁化との静磁気結合によって生じた裏打ち層の突き合わせ磁化転移のゆらぎ

①については、Fig. 6やFig. 11に示す中間層のない媒体とCoZrNb中間層媒体のMFM記録パターンの比較から分かるように、後者の磁区寸法はdcイレースノイズの大きい前者のそれと比べて小さい。また磁化の転移部分でのパターンはより明瞭でストレートである(Fig. 11)。よってノイズの原因として記録層の磁化転移の乱れとは考えにくい。

②の成長初期層に関しては、例えばTiを下地層とした単層膜媒体の場合には面内M-Hループのジャンプがほとんどないことから初

Fig. 11 MFM images at 100 kFRPI for media (a) without, (b) CoZrNb intermediate layers.

期層による媒体ノイズへの影響は少ないと思われるため、これもノイズ源とは考えにくい。

③に挙げた記録層との交換結合による軟磁性裏打ち層のセミハード層の磁化転移の乱れに関しては、非磁性であるTiならびに磁性を持つCoZrNbを中間層とした媒体でも、同様なM-Hループ(Fig. 5(c),(d))と同様なノイズ特性(Fig. 4)を有すること、また非磁性Co-Crを中間層とした媒体でも中間層のない場合と同様(Fig. 4, Fig. 5(a), (b))であることから、二層膜媒体のノイズ源ではない。

したがって④に挙げた記録層と静磁気結合した裏打ち層の磁化遷移部分の突き合わせ磁化のゆらぎが二層膜媒体のノイズ源として最も可能性が高いと思われる。しかし、MFMで磁化の転移部分やビット部分を見てもノイズに対応するような磁化のゆらぎは現在のところ観察されていない。

今後、裏打ち層の磁気特性、異方性の制御、膜厚の効果などを調べてノイズの起源を明らかにする必要がある。

5. 結論

Co-Cr系二層膜媒体の媒体ノイズおよびその低減について検討し、次の結論を得た。

- ①単層膜媒体で低ノイズ化し、その低ノイズ単層膜を二層膜媒体に再現することで、二層膜媒体のノイズ(特にdcイレースノイズ)は大幅に低減できる。その手法には、一部中間層の材料選択ならびに裏打ち層そのものの改質が有効である。
- ②なお現状でも50 Gbit/in²以上の面記録密度のポテンシャルがあることを確認している。

③転移性に酷似したノイズはまだ軽減できていないが、軟磁性層の異方性、透磁率(抗磁力)と膜厚など、超高密度記録に対応した設計を行なう過程で、解決する必要がある。

謝辞 日頃ご指導いただきます東北工業大学・岩崎俊一学長に深謝いたします。本論文の作成および実験に協力してもらった、AITの鈴木淑男、渡辺さおり、経徳敏明、田口香、木谷貴則の各研究員に感謝する。

参考文献

- [1] presented at Intermag '99 by Fujitsu Ltd. (AA-03, AB-02, by IBM corporation (DC-02) and by Read-Rite corporation (BB-10).
- [2] K. Ouchi et. al., to be appeared at IEEE Trans. Magn.
- [3] 片山博之他、日本応用磁気学会誌、23、1901-1906.
- [4] 中村慶久ほか、電子情報通信学会論文誌、C-II, vol. J79-C-II, No. 6, pp. 204-216 (1996).
- [5] N. Honda et. al., J. Magn. Soc. Jpn, vol. 21-S2, pp. 505-508, 1997.
- [6] J. Ariake et. al., J. Magn. Soc. Jpn, vol. 21-S2, pp. 509-512, 1997.
- [7] J. Ariake et. al., Electrochemical Soc. Proc., vol. 98-20, pp. 242-252, 1999.
- [8] S. Yanase et. al., Technical Rep. IEICE, vol. 98, pp. 29-34 (MR98-68), 1999.
- [9] 渡辺さおりほか、日本応用磁気学会誌 22, 233-236 (1998).
- [10] I. S. Lee et. al., to be appeared in J. Appl. Phys., vol. 85, No. 8, Part II (1999).
- [11] 経徳敏明 平成10年度AIT研究報告会資料.
- [12] L. Wu et. al., Technical Report of IEICE, 95 (No. 383), 63 (1995).
- 呉連軍ほか、日本応用磁気学会誌 21, 301-304 (1997).
- [13] 鈴木淑男ほか、日本応用磁気学会誌 23, 957-960 (1999).
- [14] L. Wu et. al., J. Magn. Magn. Mater., 193, pp. 89-92 (1999).
- [15] T. Suzuki et. al., to be appeared in IEEE Trans. Magn., 35 (1999).
- [16] 木谷貴則ほか、平成11年電子情報通信学会総合大会講演論文集
- [17] M. Uchida, private communication
- [18] 鈴木淑男ほか、第23回日本応用磁気学会学術講演会'99で報告予定
- [19] 杉田龍二ほか、電子情報通信学会技術研究報告, MR83-31 (1983).
- [20] S. Nakagawa et. al., Technical Rep. IEICE, vol. 97, pp. 25-30 (MR97-43), 1997.
- [21] 島津武仁ほか、日本応用磁気学会誌、23、969-972 (1999).
- [22] 山川清志ほか、本シンポジウム(PMRS'99)で報告予定.
- [23] 朴鎮圭ほか、電子情報通信学会技術研究報告, MR90-3 (1990).
- [24] T. Ando et. al., J. magn. Soc. Jpn., vol. 21-S2, 521, 1997.
- [25] 菊池、第16回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 9pf-16 (1992).
- [26] 高橋慎吾ほか、日本応用磁気学会誌、23、1393-1396 (1999).
- [27] 高橋慎吾ほか、本シンポジウム(PMRS'99)で報告予定.