AFC 媒体の記録再生シミュレーション

Read/Write Simulation of Antiferromagnetically Coupled Magnetic Media

鷹栖 幸子, 藤原 直哉, 松尾 東, 相沢 はる奈, 品川 公成
東邦大学理学部, 千葉県船橋市三山 2-2-1 (〒274-8510)

S. Takanosu, N. Fujiwara, A. Matsuo, H. Aizawa, and K. Shinagawa
Faculty of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi-shi, Chiba 274-8510

A read/write simulation based on the Poisson equation by a finite element method was performed on antiferromagnetically coupled (AFC) magnetic media composed of two laminated recording layers and a thin intervening Ru layer, and a thin-film head system. To estimate the thermal stability of the AFC media, a new medium model that introduces interlayer exchange coupling is proposed. This model explains well the observed minor loop shifts to the first quadrant in M-H loops due to the interlayer exchange coupling. However, the recorded magnetizations calculated by using this model are found to be in antiparallel magnetization configurations that are independent of the interlayer exchange coupling, and the thermal stability of the AFC media is found to be much improved in comparison with that of the conventional medium. This suggests that within the parameters used in the present simulation, the thermal stability of the AFC media is mainly enhanced by the magnetostatic interlayer coupling.

Key words: magnetic recording, simulation, finite element method, antiferromagnetically coupled magnetic medium, thin-film head, thermal stability

1. はじめに

磁気ディスクの記録密度の大幅な上昇に伴い、熱揺らぎによる減磁の問題が重要な技術課題となっている。これは記録された磁化が、熱活性化により反転してしまう現象で、解決策としては、反強磁性交換結合を利用した媒体^{1) 2) 3)}

(antiferromagnetically coupled magnetic medium 以下, AFC 媒体) が提案されている。AFC 媒体では、記録層を薄い Ru 層を介して積層させ、記録層間で記録磁化を反強磁性的に結合させる。これによって記録ビットに働く反磁界を減少させ、高記録密度で熱安定性に優れた媒体の実現¹⁾を可能にしている。現在はダブルスペキュラー型 GMR ヘッドとの組み合わせで、100 Gbit/in²の磁気ディスクが製品化されつつあり、数年後には 300 Gbit/in²の面記録密度に達するとまで言われている。

筆者らは、これまで媒体の熱安定性を向上させる方法の一つとして、キーパー媒体⁴⁾に関する研究を行ってきた。このキーパー媒体では、キーパー層(軟磁性層)と記録層を非磁性層を介して積層し、その間の静磁的な結合によって、熱安定性を向上させる。それに対して AFC 媒体では、静磁結合と交換結合を利用できるので、更なる熱安定性が

期待できる。そこで本研究では、AFC 媒体と薄膜ヘッドによる記録再生シミュレーションを行い、AFC 媒体における熱安定性を評価する事を目的とした。

2. 計算方法

記録・再生現象の記述には、静磁界、2次元(トラック方向、即ち z 軸を無限大)の2つの近似を導入し、Maxwell の方程式から導いたベクトルポテンシャル A_z に関する Poisson 方程式、

$$-\text{div}(\mu^{-1} \text{grad} A_z) = J_z + (\text{rot} M)_z \quad (1)$$

(A_z : ベクトルポテンシャル, μ : 透磁率, J_z : 電流密度, M : 磁化)を用い、有限要素法により数値計算した。^{5) 6) 7)} この解析手法は、ヘッド・媒体間相互作用 HMI (鏡像効果) の影響⁸⁾を厳密に考慮することができる。

2.1 記録過程

ヘッドのコイルに流す最適な電流を、電流密度 J_z として (1) 式の右辺へ代入し、ヘッドと媒体を相対的に移動させながら、繰り返し磁化 M を計算し、記録層の磁化状態を求めた。

2.2 再生過程

(1) 式に記録磁化 M を代入し、ベクトルポテンシャル A_z を求める。2次元では、ヘッドのコイルを通過する磁束 ϕ は、左右のコイル断面のベクトルポテンシャル A_z の差として求められるので、ヘッドと媒体の相対移動距離 (Δx) と、磁束の変化量 $\Delta \phi$ から、最終的に再生出力 E を、次式より求めた。

$$E = -N \cdot T_w \cdot v \cdot \left(\frac{\Delta \phi}{\Delta x} \right) \quad (2)$$

(N : コイル巻数, T_w : トラック幅, v : ヘッド・媒体相対速度)

3. モデル

3.1 ヘッドモデル

計算には、ギャップ長 G_l = 記録時: 0.1 μm , 再生時: 0.05 μm , ギャップ深さ G_d = 1.92 μm , 磁極 B_s (飽和磁束密度) = 2.2 T (22 kG) の薄膜ヘッドを用いた。また、磁極の B-H 特性は次式により表されたとした。

$$B = \mu_0 \left[H + \frac{2B_s}{\pi\mu_0} \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi\mu_0}{2B_s} (\mu - 1) H \right\} \right] \quad (3)$$

(μ_0 : 真空の透磁率, μ : 軟磁性層の比透磁率)

3.2 媒体モデル

媒体は 12nm の上部記録層, 4nm の下部記録層および, 1nm の Ru 中間層から成る. 上部記録層の磁気特性は, $H_c = 304$ kA/m (3800 Oe), H_{c0} (0K における H_c) = 528 kA/m (6600 Oe), $M_s = 420$ kA/m (420 emu/cc), である $K_u V / k_B T$ (熱安定性を表す指標) = 50 とし, 下部記録層の磁気特性は, $H_c = 6$ kA/m (80 Oe), $H_{c0} = 38$ kA/m (470 Oe), $M_s = 200, 300, 370, 420$ kA/m (200, 300, 370, 420 emu/cc), $K_u V / k_B T = 20$ とした. 尚, この時の保磁力 H_c は記録直後から 0.01sec (これは, ほぼ 5400rpm でディスクが 1 周するのに要する時間に相当する.) 後の値を示した. 記録密度は 423 kBPI, 浮上量は magnetic spacing で 15 nm とした.

(a) 記録層の磁化モデル

記録層の磁化モデルには, 一軸異方性を持つ単磁区粒子の集合体モデルである修正 Stoner - Wohlfarth モデル⁹⁾を用いた. このモデルでは, 異方性定数 K_u を持つ単磁区粒子の一斉磁化回転と同時に, 磁壁移動を考慮するために, 磁化容易軸方向のある磁界 H_x で, 磁化反転をさせている. なお, 有限要素法における記録再生計算にこのモデルを使う際には, 記録層内の各要素に含まれる粒子数を 256 個とした.

記録過程は 10^{-9} sec のオーダーで行われる為, 熱揺らぎの影響は無視できる. 再生過程における熱揺らぎの影響は, 以下のモデルにより導入した.

各 SW 粒子の磁気モーメントは, 磁界がアステロイド曲線の内側にあり, かつ絶対零度であれば, 2つの極小値 (+, -) のいずれかの方向にある. しかし有限温度では, 外部からの熱により, ある確率でエネルギーバリア E_b を越えて反転する. そこで単位時間あたりの反転確率を Neel-Arrhenius の式¹⁰⁾により導入し, マスター方程式を用いると, 時刻 t における粒子の存在確率 $P(t)$ は以下のように表される.

$$\begin{aligned} P_+(t) &= P_+(eq) + [P_+(0) - P_+(eq)] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \\ P_-(t) &= P_-(eq) + [P_-(0) - P_-(eq)] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

($P_+(0), P_-(0)$): 初期状態での存在確率,

$P_+(eq), P_-(eq)$: 熱平衡状態での存在確率, τ : 緩和時間)

(4) 式を考慮した修正 SW モデルを用いて, 前述のポアソン方程式から, 熱と時間を考慮した記録再生シミュレーション¹¹⁾を行った. なお, この計算では, $T=300$ K とし, M_s, K_u の温度依存性は考慮していない.

(b) 交換磁界の導入

AFC 媒体を扱うためには, 上部記録層と下部記録層との間の交換相互作用を考慮したモデルを構築する必要がある. Fig. 1 に AFC 媒体の要素分割図と, 記録層のモデルを示す. 上部記録層は 3 層に分割し, 膜厚方向の要素間にはコラム構造を考慮して, 強磁性交換相互作用が働くとし, これを平均場近似により交換磁界係数 A_0 を用いて, 交換磁

界 $H_{ex} = A_0 M_x$ として導入した. また, 上部記録層の最下部の要素と, 下部記録層の間に働く反強磁性相互作用を, 同様に交換磁界係数 A により, 交換磁界 $H_{ex} = -A M_x$ として導入した. なお, ここではコラム間 (長手方向の要素間) に働く交換相互作用は無視した. 記録・再生シミュレーションには, これらの交換磁界を考慮して, (1) 式を満たすセルフコンシステントな解を求めた. 今回の計算では $A_0=0.15$ とし, A は 0, 0.1, 0.2, 0.5 と変化させた.

4. 計算結果および考察

4.1 AFC 媒体の磁化曲線

Fig. 2 に AFC 媒体の磁化曲線を示す. 記録層間の磁気的な結合のため, 図に示すように下部記録層によるマイナーループが Y 軸付近に現れ, 交換磁界係数 A の増加と共に, 第一象限にシフトする磁化曲線が得られた. また, 時間の経過と共に, 保磁力の熱による減少が認められた. これら磁化曲線から求めた上部記録層と下部記録層の保磁力を Fig. 3 に示す. 上部記録層, 下部記録層, 共に交換磁界係

Fig. 1 Model of an AFC medium.

Fig. 2 M-H loops of the AFC media and exchange field parameters.

数 A の増加に伴い, 保磁力がわずかながら増加した. これは

Fig. 3 Dependence of coercive forces on the exchange field parameter A in AFC media

反強磁性的な結合によるピンング効果のためと考えられる。

4.2 AFC 媒体の熱安定性

Fig. 4 は、記録層内部における磁化の大きさと方向を、要素ごとに矢印で示した。ここで単層媒体は膜厚 16nm で、AFC 媒体の上部記録層と同じ磁気特性を持つとした。また、Ru 層は非常に薄いため (1nm)、図には表示していない。記録直後の 0.01sec 後では、単層媒体は通常のように記録されており、AFC 媒体は、上部記録層と下部記録層の磁化が、反平行になっている。特に AFC 媒体の $A=0$ の場合には、交換磁界がないにも関わらず、静磁的な結合によって、下部記録層の磁化が反転した。 A の大きさによる記録磁化状態の差は、ほとんど認められなかった。一方、 10^8 sec 後の単層媒体では、熱によって媒体上部の磁化が消え、また磁化の垂直成分の著しい増加が観察された。AFC 媒体でもやはり、媒体上部の磁化の垂直成分が増加したが、その割合は単層媒体に比べると小さく、また上部の記録磁化も消えずに残った。今回のパラメータでは、記録磁化の交換磁界係数による顕著な違いは、観察されなかった。

Fig. 5 に Fig. 4 の記録状態を再生した結果を示す。Fig. 5 の縦軸は再生出力、横軸は記録後の経過時間である。AFC 媒体では、上部と下部の記録層が反強磁性的に結合しているため、磁化がキャンセルされ、同じ膜厚の単層媒体と比較すると、その出力は小さくなっている。図より、単層媒体の出力は、 10^5 sec 付近から減少し、 10^9 sec で零となった。一方 AFC 媒体では、 10^7 sec 付近から減少し始め、 10^{10} sec で零となり、時間にしてほぼ一桁、AFC 媒体の方が、熱安定性に優れている結果となった。0.01sec の出力を基準と

した時の出力の減少の割合を見積もったグラフが Fig. 6 である。 10^7 sec あたりまでは、交換磁界係数の差による変化は認められず、交換磁界係数 A が 0 のものと一致している。このことから単層媒体と比較して、初期の段階での AFC 媒体の熱安定性の増加は、静磁的な結合によるものと考えられる。そして、更なる時間の経過によって、しだいに、交換結合による効果が現れていると考えられる。

Fig. 7 に、交換磁界係数 $A=0.2$ とした時に、下部記録層の M_r を変化させた時の媒体の熱安定性を示す。単層媒体と比較して、AFC 媒体では下部記録層の M_r によらず、熱安定性が増加している。Fig. 8 に 10^8 sec における再生出力の減少の割合を示す。下部記録層の M_r を変化させる事は、上下記録層間の静磁結合を変化させたことに相当するが、熱安定性は、 M_r が大きい方で若干向上する傾向が見られた。しかし、その変化量は、期待した程、大きな差ではなかった。

Fig. 9(a) に上部と下部の記録層の M_r が同じである媒体、(b) に下部記録層の M_r が上部記録層の半分である媒体の、記録層内の磁化と反磁界の変化を示した。下部記録層の M_r が大きい場合には、下部記録層に記録される磁化の大きさは大きくなるが、反磁界の大きさは、 M_r によらず一致した。磁化の大きさが異なるにも関わらず、反磁界の大きさが一致しているという事は、 M_r によるビット内に働く反磁界よりも、上部記録層からの静磁的な結合による磁界が大きいことを示している。媒体全体の磁化と反磁界を比較すると、 M_r による差は見られなかった。これは、下部記録層の膜厚が薄いためである。

Fig. 4 Magnetization patterns at 423 kBPI in conventional and AFC media at 0.01 and 10^8 sec.

Fig. 5 Time dependence of the output voltage in conventional and AFC media.

Fig. 6 Time dependence of the output voltage reduction (%) in conventional and AFC media.

Fig. 7 Time dependence of the output voltage reduction (%) in conventional and AFC media with various underlayer M_r values.

Fig. 8 Output voltage reduction at 10^8 sec vs. the underlayer M_r of AFC media.

Fig. 9 Magnetization M_x and demagnetizing field H_{dx} in AFC media. ($A=0.2, 10^8$ sec)

5. まとめ

AFC 媒体 (上部記録層 $t=12\text{nm}$, $H_c = 304\text{ kA/m}$, $K_u V/k_B T = 50$, 下部記録層 $t=4\text{nm}$, $H_c = 6\text{ kA/m}$, $K_u V/k_B T = 20$, Ru 層 $t=1\text{nm}$) における記録再生シミュレーションを行い, 以下の点を明らかにした.

1. AFC 媒体の磁化曲線は, 交換磁界係数の増加と共に, 下部記録層のマイナーループが第一象限にシフトし, 上部下部共に保磁力が増加した.
2. 交換結合のない AFC 媒体でも, 静磁的な結合により, 上部記録層と下部記録層の記録ビットは反平行となる.
3. AFC 媒体は単層媒体に比べて, 時間にして約 1 桁, 熱安定性が向上した.

最終的に, ここで用いた媒体パラメータの範囲では, 熱安定性の向上には,

4. 下部記録層のキーパー的な役割 (静磁結合) が大きい. そして熱安定性が劣化し始めると, 次第に交換結合による寄与が増加すると考えられる.

謝 辞 情報ストレージ研究推進機構 (SRC) による研究助成, および実験データの提供, ならびにシミュレーションプログラム MAGRAS を使用させて頂きました日立製作所に深謝いたします.

文 献

- 1) E. N. Abarra, H. Sato, A. Inomata, I. Okamoto and Y. Mizoshita : *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 2581 (2000).
- 2) A. Moser, D. Weller, and M. F. Doerner : *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1604 (1999).
- 3) A. Inomata, E. Noel Abarra, B. Ramamurthy Acharya, I. Okamoto : *Reports of the 118th research meeting (The magnetics society of Japan)*, 87 (2001).
- 4) S. Takanosu, N. Fujiwara, A. Matsuo, S. Iida, K. Shinagawa : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, 603 (2001).
- 5) K. Shinagawa : *Seminar text (The magnetics society of Japan)*, 1 (1997).
- 6) J. Hokkyou : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**, 1016 (1998).
- 7) K. Shinagawa, H. Fujiwara, F. Kugiya, T. Okuwaki and M. Kudo : *J. Appl. Phys.*, **53**, 2585 (1982).
- 8) A. Matsuo, R. Inutake, S. Takanosu, K. Shinagawa : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1057 (1999).
- 9) I. A. Beardsley : *J. Appl. Phys.*, **53**, 2582 (1982).
- 10) L. Neel, *Progress in Low temperature Phys.*, **1**, 337 (1955).
- 11) N. Fujiwara, A. Matsuo, S. Takanosu, K. Shinagawa : *Digests of the 25th annual conference on magnetics in Japan*, 400 (2001).

2001 年 10 月 6 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録