SPT 垂直ライトヘッドにおける反強磁性結合多層膜の膜構成最適化検討

Optimum Layer Structure of Antiferromagnetic-Coupled Multilayer for SPT Perpendicular Writer Heads

秋元秀行・清水香壱*・金井 均・田村 亮*・池川幸徳・上原裕二

富士通株式会社 ヘッド先行開発部, 長野県長野市北尾張部 36 (〒381-8501)

*富士通株式会社 物理シミュレーション技術部, 神奈川県川崎市中原区上小田中 4-1-1 (〒211-8588)

H. Akimoto, K. Shimizu*, H. Kanai, A. Tamura*, Y. Ikegawa, and Y. Uehara

Advance Head Technology Department, Fujitsu Ltd., 36 Kita-owaribe, Nagano, 381-8501, Japan

*Physical Simulation Technology Department, Fujitsu Ltd., 4-1-1 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki, 211-8588, Japan

Perpendicular magnetic recording using a single-pole-type (SPT) writer head and a double-layer perpendicular medium with a soft underlayer (SUL) has several advantages for high-density magnetic recording. It is therefore a promising candidate for a next-generation magnetic recording system. However, the pole-erase phenomenon, which is a signal reduction caused by a remanent head field from the main pole, prevents high-density recording. We investigated an SPT writer head with antiferromagnetic- (AFM-) coupled main pole to avoid the pole-erase phenomenon by using recently developed combined micromagnetics and finite-element method simulations. We demonstrated that the recording head field decreases monotonically with increasing number of AFM-coupled layers. On the other hand, residual field (pole-erase field) strength dramatically decreases to around half while applying an AFM-coupled bi-layer for the main pole. The pole-erase field is almost constant in the case of two or more layers. The optimum layer number of an AFM-coupled multilayer for the main pole is from two to four layers from the recording and pole-erase field point of view. We confirmed the same tendency by experimental observation of the pole-erase.

Key words: SPT perpendicular writer head, antiferromagnetic coupling, multilayer, pole-erase, LLG, FEM, simulations.

1. はじめに

軟磁性裏打ち層(SUL)を有する二層垂直磁気記録媒体と単磁極(SPT)ライトヘッドとの組合せからなる垂直磁気記録は高い分解能が得られること、高面記録密度において反磁界が小さくなり耐熱ゆらぎ性に優れることなどの様々な利点を持つことから次世代の磁気記録方式として期待されている^{1)~3)}。一方で、垂直磁気記録特有の問題点もくつか報告されている^{4), 5)}。例えば、記録電流オフ後もヘッド主磁極に残留磁化が残り媒体上の磁気記録情報を消してしまうポールイレース現象⁴⁾が指摘されている。ポールイレース対策として、主磁極の強磁性体を非磁性層で分断した構造⁶⁾やRu層を介して反強磁性結合させる構造⁷⁾などが提案されている。また、ポールイレースの解析としてマイクロマグネティクス(LLG)を用いた計算機シミュレーション結果が報告されている^{8), 9)}が、現在のヘッドサイズ全体をモデル化するに至っていない。一方シミュレーションを用いたヘッド構造に対する発生磁界の解析も行われているが、有限要素法(FEM)を用いている場合がほとんどであり¹⁰⁾、

¹¹⁾、残留磁界強度の解析や主磁極の多層膜構造をモデル化するには適していない。本論文ではLLGとFEMを組み合わせたシミュレータを新たに開発し、ポールイレース対策として反強磁性結合多層膜を主磁極材料として適用した場合の記録・残留磁界の解析を行った。また、その膜構成の最適化について検討した結果について報告する。

2. 計算方法

多層膜主磁極のモデル化、残留磁界の計算を行うにあたり、LLGとFEMを組み合わせたシミュレータを新たに開発した¹²⁾。計算に使用する基礎方程式はLandau-Lifshitz-Gilbert方程式(1)と磁場の方程式(2)または(3)である。

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\gamma(\vec{m} \times \vec{H}_{eff}) - \alpha \left(\vec{m} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times M_s \cdot \vec{m} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 \quad (3)$$

上式において M_s , $\vec{m}$, γ , α は飽和磁化密度、磁化方向を示す単位ベクトル、ジャイロ磁気定数、減衰定数である。また、 μ_0 , μ , $\vec{J}_0$, $\vec{A}$ はそれぞれ真空の透磁率、透磁率、強制電流密度、磁気ベクトルポテンシャルである。なお、式(1)の $\vec{H}_{eff}$ はLLG計算領域における各計算セルに加わる実効的な印加磁界で、次式により算出される。

$$\vec{H}_{eff} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{\nabla} \times \vec{A} - M_s \cdot \vec{m}) + \vec{H}_{ex} + \vec{H}_k \quad (4)$$

ここで $\vec{H}_{ex}$, $\vec{H}_k$ はそれぞれ交換磁気結合磁界、結晶磁気異方性磁界である。

モデル内ではLLG方程式は有限体積法で、磁場の方程式は2要素を用いた有限要素法で離散化した。磁場の方程式は、LLGとして磁化が定義されている領域を式(2)により、空気領域を含め磁性体を透磁率で指定する領域(FEM領域)を式(3)でそれぞれ計算している。なお、LLG領域においてはセル内の磁気モーメントの大きさは一定とし、その方向のみが変化するものとして計算を行った。

Fig.1 Schematic calculation model of STP perpendicular writer head.

Fig.2 LLG + FEM model of STP writer head. The figure shows the structure and the LLG, FEM calculation area at the near air-bearing surface.

3. 計算パラメータ

本論文で使用したSPT垂直ライトヘッドのモデルをFig. 1に示す。主磁極はトレーリング側の光学コア幅130 nm、膜厚260 nm一定とし、その浮上面形状はトレーリング側のコア幅が広いトリム角10度の逆台形形状を仮定した。また記録ヘッドに加え軟磁性裏打ち層(SUL)についてもモデル化を行った。なお、記録層については空気領域として扱い、記録層中心における各ヘッドの記録・残留磁界強度をシミュレーションにより算出した。具体的には主磁極とSULとの間隔を50 nmとし、記録層中心として主磁極から25 nm位置における二次元平面の磁界分布を算出した。ヘッドからの発生磁界は面内成分を含めた三次元計算を行っているが、本論文では垂直成分に限定し解析を行った。Fig. 2は計算に用いた主磁極先端部のメッシュ構造およびLLG/FEM計算領域の一例である。LLG計算領域は主磁極ヨーク部の磁化状態を反映させるのに必要十分な奥行きとして1.0 μmを設定した。一方SULを含む他の部分についてはFEM計算領域としてモデル化した。全体のモデル規模としては約10万節点、LLG計算領域として約5000要素である。

次に反強磁性結合を有する多層膜主磁極のモデル化方法について説明する。膜厚260 nmの主磁極を膜厚方向に24要素(約10.8 nm)に等分割し、膜厚方向の各要素間の交換磁気結合力を正および負に設定することでメッシュ構造を変えることなく多層膜構造を表現した。例えば4層多層膜はRuの存在しない6要素間(膜厚: 65

Table 1 Simulated write and residual magnetic field strength of different TH SPT writer heads.

	Throat heights (TH)		
	0.25 μm	0.35 μm	0.50 μm
Recording field	8890 Oe	8290 Oe	7640 Oe
Residual field	1890 Oe	1230 Oe	3180 Oe

Fig.3 Magnetization configuration of main pole at residual state for different throat height.

nm)に正、Ru層が存在する要素間に負の交換磁気結合を交互に与えることでモデル化した。このため幾何学モデル上はRu層に相当する非磁性層は存在せず、交換磁気結合力の違いとしてのみモデル化されている。この時、正の交換結合磁界(H_{ex})は軟磁性膜の典型的な交換ステイフネス定数: $A = 1.0 \times 10^6$ erg/cmに相当する1050 Oeを、負の H_{ex} はFeCo/Ru多層膜の実測値である-900 Oeをそれぞれ用いた。主磁極材料の磁気特性としては B_s : 2.4 T, H_k : 50 Oeを仮定した。FEM領域については μ : 1000として扱った。

4. シミュレーション結果および考察

4.1 単層主磁極のスロートハイト依存性

初めに主磁極として単層磁性膜を用いたSPT垂直ライトヘッドの記録磁界および残留磁界強度のスロートハイト(TH)依存性について議論する。磁界強度の計算は先ず全ての磁化をコア幅方向に完全に揃えた初期磁化状態から磁化安定点を求めた。その後記録

電流として 0.15 AT の起磁力を与え記録磁界分布を求め、その分布から記録磁界強度としてトレーリング側のトラック中心における磁界強度を求めた。更に、残留磁界分布として起磁力をゼロに戻し主磁極が残留磁化状態にある時の磁界分布を算出した。残留磁界強度は計算領域内の最大磁界強度を絶対値として算出した。Table. 1 にシミュレーションにより求めた各 TH における磁界強度を示した。また Fig. 3 には各ヘッドの残留磁化分布およびトラック センターにおける磁界強度のダウトトラック位置に対する変化を示した。 TH を縮小することで記録磁界強度はほぼ単調に増加する。一方残留磁界強度は $TH: 0.35 \mu\text{m}$ を最小とし $0.50, 0.25 \mu\text{m}$ いずれの値としても増加する傾向が見られた。残留磁化は非常に複雑な分布をしており解釈が困難であるが TH を $0.50 \mu\text{m}$ と大きくした場合、主磁極先端の形状異方性から磁化が全体としてスロート ハイット方向に揃い残留磁界強度が大きくなっているものと思われる。一方、 TH が $0.35 \mu\text{m}$ では主磁極中心で負の磁界が大きくなっており、その結果残留磁界強度が最も小さくなっている。

4.2 多層膜主磁極における磁界強度の層数依存性

次に単層主磁極のシミュレーションにて最も大きな記録磁界が得られた $TH: 0.25 \mu\text{m}$ の SPT 垂直ライトヘッドについて主磁極を多層化した場合の記録および残留磁界強度について議論する。Fig. 4 は主磁極として反強磁性結合多層膜を想定し、全膜厚を 260

Fig. 4 Recording and residual field strength dependence on layer number of AFM-coupled multilayer main pole.

nm に固定したまま層数を変化した場合のヘッド発生磁界の変化である。図から明らかのように層数を多くすると記録磁界強度は単調減少する。一方、残留磁界強度については層数を単層から 2 層にすることで約半減し、2 層以上では残留磁界強度の変化がほぼ無く、1000 Oe 以下の小さな値を保つ。残留磁界強度は多層膜の層数を増加することで減少傾向にあるものの、その変化は磁気特性、磁極形状、その他の条件に左右されるため記録磁界のような

Fig. 5 Head field distributions of STP writer head with different layer structure main pole. (a) to (d) are recording head field and (e) to (h) are residual head field distributions.

Fig. 6 Experimental pole-erase evaluations with single and multilayer SPT writer head.

単調な変化ではなく複雑な挙動を示す。Fig. 5 に単層および2, 4, 24 層の記録および残留磁界の二次元分布図を示す。24 層の反強磁性結合多層膜を主磁極とした場合、各層間の反強磁性結合が強いためライト通電時 (0.15 AT 起磁力印加時) においても主磁極の磁化方向が一方向に揃わない。このため記録磁界強度としては3500 Oe と小さく十分なO/W性を確保することが困難であると予想される。なお、磁界強度についてはFig. 4 も併せて参照されたい。全体を4層に分割した場合にも反強磁性結合の影響のため記録磁界の強弱が存在するが、記録磁界強度としては8200 Oe を確保しており、単層主磁極ヘッドの8900 Oe には若干劣るものの比較的大きな記録磁界強度を確保している。

一方残留磁界強度について比較すると、単層ヘッドでは主磁極のトレーリングおよびリーディング エッジから2000 Oe 弱の残留磁界が発生しており、ポールイレースが懸念される。主磁極を2層以上の反強磁性結合多層膜とすることで残留磁界は半減され、1000 Oe 以下の残留磁界強度となる。以上の結果から記録および残留磁界強度の両者を考慮すると、反強磁性結合多層膜をSTP 垂直ライトヘッドの主磁極材料として適用する場合、2~4層程度の多層化とすることで比較的大きな記録磁界と、小さな残留磁界が得られる。

5. ポールイレース実測結果との比較

Fig. 6 に単層および反強磁性結合多層膜を主磁極材料として適用したSPT ライトヘッドのポールイレース量の実測評価結果を示す。主磁極の材料はFeCo および {FeCo/Ru}×4 層を用いた。いずれのヘッドも主磁極の全膜厚を280 nm、トレーリング側の光学トラック幅を120 nm として作製した。ポールイレースの評価はAC バンドイレース後、50 kFCI の信号を1周記録し、その後ヘッドをオントラックのまま放置し、100, 1000, 10000 周後のヘッド出力を読み取り、各出力を記録直後のヘッド出力で規格化してイレース量を求めた。なお、評価に当たっては、 H_c/H_n :3700

/1400 O 程度、角形比はほぼ1、記録層膜厚:6 nm の比較的イレースの起こりやすい媒体を用いて相対評価を行った。主磁極材料を {FeCo/Ru}×4 層の多層膜とすることで、FeCo 単層膜に比較してポールイレース量が減少することを実測においても確認した。また、O/W 性についても両ヘッドではほぼ同等の特性が得られ、シミュレーション結果と一致した。

6. まとめ

単磁極垂直ライトヘッドの一つの問題点であるポールイレース対策として、主磁極への反強磁性結合多層膜の適用およびその膜厚最適化について計算機シミュレーションを用いて検討を行った。反強磁性多層膜主磁極のモデル化およびポールイレース(残留磁界強度)のシミュレーションにあたり、LLG と FEM を組み合わせた連成シミュレータを新たに開発した。同シミュレータを用いた解析の結果、記録磁界強度は多層膜の層数を多くすると単調減少し、残留磁界強度は層数を2層以上とすることで急激に減少することを明らかにした。以上から垂直ライトヘッドの主磁極材料として反強磁性結合多層膜を適用する場合、層数を2~4層程度にすることで記録・残留磁界強度を両立させることができる。また、実ヘッドによるポールイレース量の実測においても同傾向を確認した。

References

- 1) S. Iwasaki and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **13**(1), 1272 (1977).
- 2) H. N. Bertram and M. Williams: *IEEE Trans. Magn.*, **36**(1), 4 (2000).
- 3) M. Mallery, A. Torabi, and M. Benakli: *IEEE Trans. Magn.*, **38**(4), 1719 (2004).
- 4) W. Cain, A. Payne, M. Baldwinson, and R. Hempstead: *IEEE Trans. Magn.*, **32**(1), 97 (1996).
- 5) B. M. Lairson, S. R. Lambert, L. Nguyen, A. Wallash, T. Huang, and J. Adler: *IEEE Trans. Magn.*, **37**(4), 1223 (2001).
- 6) K. Nakamoto, T. Okada, K. Watanabe, H. Hoshiya, N. Yoshida, Y. Kawato, M. Hatatani, K. Meguro, Y. Okada, H. Kimura, M. Mochizuki, K. Kusukawa, C. Ishikawa, and M. Fuyama: *IEEE Trans. Magn.*, **40**(1), 290 (2004).
- 7) Y. Ikegawa, S. Yamawaki, N. Ozaki, T. Hoshino, T. Kubomiya, K. Satoh, and T. Kosikawa: *IEEE Trans. Magn.*, **40**(4), 2338 (2004).
- 8) D. Z. Bai and J.-G. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **38**(5), 2240 (2002).
- 9) M. Mochizuki, C. Ishikawa, H. Ide, K. Nakamoto, Y. Nakatani, and N. Hayashi: *J Appl. Phys.*, **93**(10), 6748 (2003).
- 10) Y. Kanai and R. Matsubara: *IEEE Trans. Magn.*, **38**(1), 169 (2002).
- 11) W. Xia, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **38**(5), 2216 (2002).
- 12) K. Shimizu, H. Akimoto, and A. Tamura: *FUJITSU Magazine*, **55**(3), 238 (2004).

2004 年 10 月 8 日受理, 2005 年 2 月 8 日採録