

Magneto-transport and microstructure properties of $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})/\text{Cu}$ lateral spin valves

Ikhtiar^{1,2}, S. Kasai¹, A. Itoh^{1,3}, Y.K. Takahashi¹, T. Ohkubo^{1,3}, S. Mitani^{1,2}, and K. Hono^{1,2}

¹ Magnetic Materials Unit, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

² Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577, Japan

³ Department of Materials Science and Technology, Tokyo University of Science, Tokyo 125-8585, Japan

As the areal density of hard disk drives (HDDs) has been expected to go beyond 2 Tbit/inch² for the next 10 years¹⁾, very narrow read heads with reliable performance would be strongly desired. With regards to this issue, lateral spin valves (LSVs) have been proposed to be one of candidates for very narrow read head applications. Since the two ferromagnetic layers in LSVs are laterally separated, very narrow shield-to-shield spacing is expected to be realized in this structure. However, as for all-metallic LSVs with ohmic contacts, the output voltage is much smaller than that of vertical magnetoresistive devices such as current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance (CPP-GMR) and magnetic tunnel junctions (MTJ). Based on one dimensional spin diffusion model²⁾, one of the recipes to effectively enhance the output voltage of LSVs is to utilize highly spin polarized ferromagnets. In this meeting we will present our recent effort on the development of all-metallic LSVs utilizing $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ (CFGG) Heusler alloy exhibiting high spin polarization.

The starting multilayer stack of MgO (001) sub./Cr (1nm)/Ag (10nm)/CFGG (20nm)/Cu (20nm)/ MgO (2nm) was prepared by ultra-high vacuum magnetron sputtering system. After the deposition of CFGG film, the whole stack was annealed at 500°C to promote the B2 ordered structure of the CFGG film. The multilayer stack was then microfabricated into LSV devices with sub-micron scale dimension of CFGG ferromagnetic wires and Cu metallic channels. The scanning transmission electron microscopy observation on a representative LSV device confirmed the clean interface of CFGG/Cu contacts. At room temperature, a very large non-local spin signal (ΔR_s) of 17.3 mΩ was observed for a LSV device with center-to-center CFGG wires distance of 350 nm (Fig. 1). The fitting based on one dimensional model (Fig. 2) suggests that both high spin polarizations of CFGG film (P_F) and CFGG/Cu interfaces (P_J) contribute to the large non-local spin signals observed in this system.

References

- 1) “Status and Outlook”, *ASTC Fall 2013 Meeting*, Biltmore Hotel, Santa Clara, California, September 27, 2013.
- 2) S. Takahashi and S. Maekawa, *Phys. Rev.B*, 67, 052409 (2003).

Acknowledgements

This work was partly supported by NEDO “Strategic Innovation Program for Energy Conservation Technologies” and Grant-in-Aid for Scientific Research (A) (Grant Nos. 22246091 and 25249087).

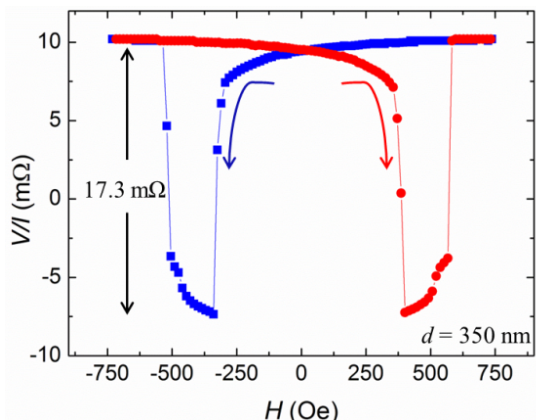


Figure 1. The non-local resistance change (V/I) of a LSV device exhibiting spin signal of 17.3 mΩ at room temperature.

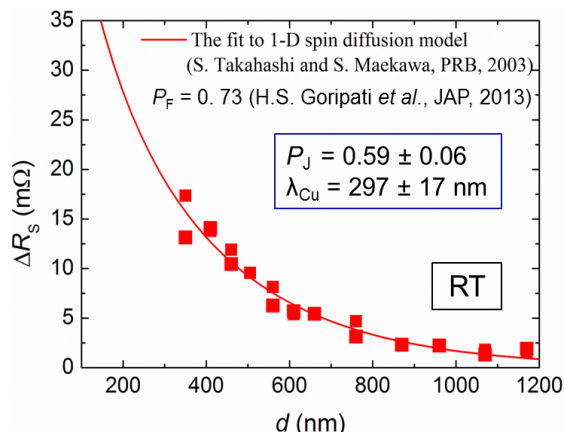


Figure 1. The non-local spin signals (ΔR_s) as a function of CFGG-wires distances measured at room temperature. The red line corresponds to the best fit based on one dimensional spin diffusion model.

Co₂(FeMn)Si ホイスラー合金を用いたスピン蓄積 MR センサーの高出力特性

白鳥 聡志、橋本 進、高岸 雅幸、上口 裕三、岩崎 仁志、山田 健一郎
東芝 研究開発センター

Non-local spin-valves using Co₂(FeMn)Si Heusler alloy with large output
S. Shirotori, S. Hashimoto, M. Takagishi, Y. Kamiguchi, H. Iwasaki, and K. Yamada
Corporate R&D Center, Toshiba Corporation

背景

再生ヘッドには TMR 効果を用いたスピバルブ型素子が用いられているが、低抵抗化に加えて、厚い反強磁性層を伴うため 20 nm 以下のシールド間隔(RG)の実現が課題である。一方、スピントロニクス分野ではピン層とフリー層を平面配置してスピン拡散を利用したスピン蓄積型 MR 素子 (non-local-spin-valves, NLSV) が注目を集めており、15 nm 以下の RG が可能である。しかし、メタル系 NLSV に関する既報告の出力は大変小さく (<20 μV)¹⁾、再生ヘッドへの適応は困難である。1次元モデル²⁾によると NLSV の出力は微細化により急上昇する。そこで本研究では、50nm 級に微細化したホイスラー合金 NLSV 素子の出力特性を調べた。

実験方法

磁性層に(110)配向の多結晶 Co₂(Fe_{0.4}Mn_{0.6})Si (以下、CFMS) を用い、400°C で 1 時間のポストアニールを行った³⁾。その後、ナノインプリント法と Ar イオンミリングを用いて 2 本の磁性細線(CFMS1, CFMS2)を形成し、非磁性層の Cu を成膜し、磁性細線と同様の方法で非磁性細線を形成した。2 本の磁性細線幅、磁性細線間幅、非磁性細線幅はいずれも同じ幅 (W) で、50 nm から 150 nm とした。ここで、CFMS1 細線から Cu 細線にスピン偏極電流を注入し、純スピン流が Cu 細線で拡散伝搬されることによって、CFMS2 細線との間でスピン信号が得られる。磁性細線方向に磁場を印加して、室温での非局所 MR 測定を行った (図 1)。

実験結果

図 2 に W と 1mA 当たりの出力 ΔV の関係を示す。W=150nm では、 $\Delta V = 15 \sim 20 \mu\text{V}$ であり、単結晶ホイスラー合金 NLSV の出力と概ね一致する^{1), 4)}。W を 50 nm に狭めると、約 40 倍の 0.7 mV の出力が得られた。2 mA まで電流を印加することで最大 1.2 mV の出力が得られた。この実験結果は Cu のスピン拡散長(λ_N)を 200nm とした際の一次元モデル²⁾と良い一致を示した。1次元モデルから、W = 10 nm では 10 mV 級の出力が予想され、NLSV は狭 RG および狭トラック幅再生に適する。

本研究の一部は、戦略的省エネルギー技術革新プログラム (NEDO) の援助により実施した。

参考文献

- 1) Y. K. Takahashi, et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 052405 (2012)
- 2) S. Takahashi et al., Phys. Rev. B **67**, 052409 (2003).
- 3) 長谷他、日本磁気学会学術講演会予稿集 3pC-1 (2013)
- 4) S. Sakuraba et al., Digests of 58th MMM, BP-13 (2013)

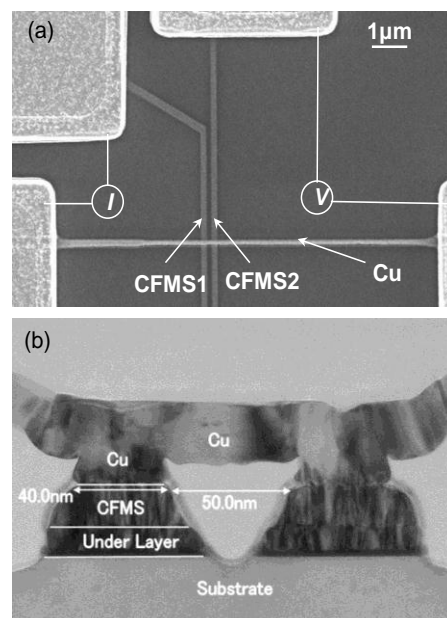


図 1 (a)NLSVs の平面像 (W = 150 nm)
(b)NLSVs の断面 TEM 像 (W = 50 nm)

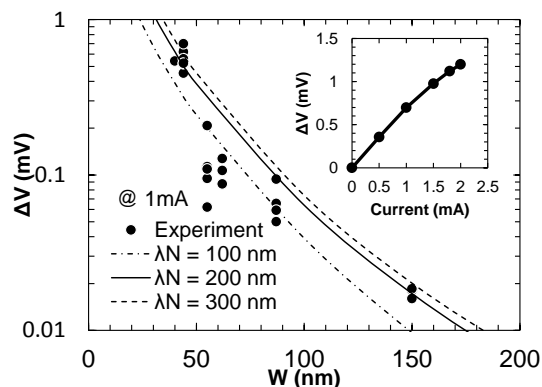


図 2 出力のデバイスサイズ W 依存性と注入電流依存性(挿入図)

SMR-MAMR 用ヘッドの高周波記録電流への応答解析

片山拓人、金井靖、吉田和悦¹、Simon J. Greaves²、村岡裕明²
(新潟工科大、¹工学院大、²東北大)

High-frequency response analysis of SMR-MAMR head
T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida¹, S. J. Greaves², H. Muraoka²
(Niigata Inst. of Tech.,¹Kogakuin Univ.,²Tohoku Univ.)

はじめに

高周波アシスト磁気記録(MAMR)方式は、高周波発振素子(STO)から発生する高周波磁界を主磁極からの記録磁界に重畳し、高異方性媒体への記録を容易にする¹⁾。STOには磁界強度とともに、記録ヘッドのコイル電流が反転しても安定した発振が求められる。我々は安定したSTOの発振磁界を得るために、STOを挿入する主磁極-トレーリングシールドギャップ(MP-TS gap)を垂直記録媒体に対して傾ける構造(Tilted-STO)により、STOに加わる面内磁界を小さくし、安定した発振を得ることを示した²⁾。本報告では、Tilted-STOで記録ヘッドのコイル電流を1-2 GHzとしてマイクロマグネティック解析を行った。その結果、記録ヘッドの寸法を小さくすることでMP-TS gap磁界のコイル電流への追従性が良くなり、2 GHzの記録電流に対しても安定したSTOの発振が得られたので報告する。

計算モデルと計算条件

Fig.1に示すようにSTOは、高周波発振層(FGL)とスピン注入層(RL)の二層構造からなり、垂直磁気記録媒体に対して30度傾けた。注入電流密度は、 3.0×10^8 A/cm²としRLからFGLへ流れることを想定した。記録ヘッドコイルの起磁力を0.4 AT_{0p}とし、ヘッドABSから11 nmの位置で磁界を観測した。また、Table1に記録ヘッドおよびSTOの諸元を示す。

計算結果

Fig.2にコイル電流を1GHzおよび2 GHzとしたときの記録磁界、MP-TS gap磁界およびSTOによる発振磁界の応答を示す。1 GHzではFull model、Half modelとも安定した発振が得られたが、2 GHzではFull modelはMP-TS gap磁界のコイル電流への応答が悪く、STOの発振は不安定である。一方、Half modelはMP-TS gap磁界のコイル電流への追従性が良好であり、安定したSTOの発振を得た。さらに、Half modelでは、コイル記録電流の反転時に、STOの発振磁界が安定するまでの時間が短く、高い周波数での記録が可能と思われる。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp.125- 131 (2008).
- 2) T. Katayama, Y. Kanai, K. Yoshida, S. J. Greaves, and H. Muraoka: *INTERMAG EUROPE*, CR-19 (2014).

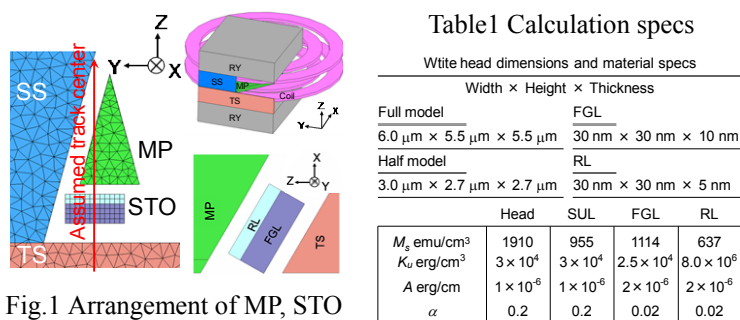


Fig.1 Arrangement of MP, STO and TS.

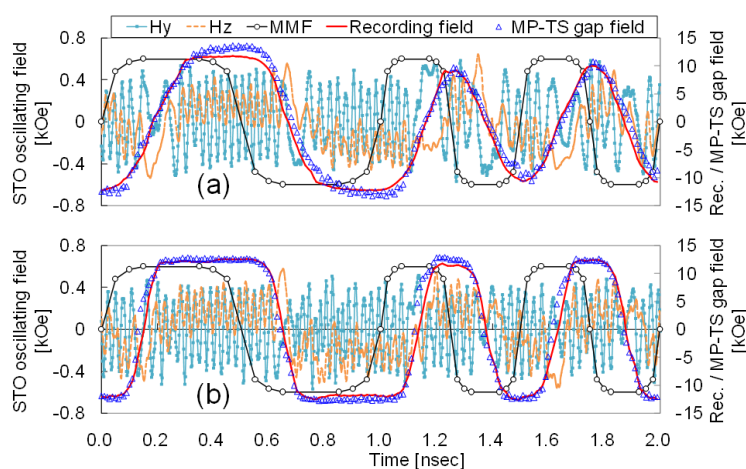


Fig.2 Head field and STO oscillation responses to switching of coil current. (a) Full model. (b) Half model. Note: Responses between -8 nsec to 0 nsec are not shown.

TMR ヘッドから発生する磁化揺らぎノイズに関する研究

遠藤 恭, 樊 鵬, 山口正洋 (東北大工)

Study on the magnetization fluctuation noise in TMR read heads with various stripe heights

Yasushi Endo, Peng Fan, Masahiro Yamaguchi (Tohoku Univ.)

はじめに HDDの大容量化にともない、磁気記録媒体における記録ビットサイズの低減と、再生用磁気ヘッドの微細化が要求されている。なかでも、ヘッドの微細化を進めるうえで面積抵抗 (Resistance area product : RA) の低減が課題であり、RAの低いヘッドでは高い出力を得るために電流密度が増加する可能性がある。しかしながら、高電流密度下では、熱による磁化揺らぎノイズ (マグノイズ) に加えて、スピントルクによる不安定な磁化揺らぎが発生し、ノイズが著しく増大する恐れがある¹⁾。

これまでに、我々は素子サイズおよびRAおよびの減少にともないマグノイズに対するスピントルクの影響が深刻な問題となりうることを報告した²⁾。本研究では、より小さな素子サイズかつ低RAのTMRヘッドから発生するマグノイズの電流密度依存性を詳細に検討し、ノイズがヘッドのS/N比を劣化させる臨界電流密度について検討した。

実験方法 試料はMgO絶縁層をもつTMRヘッドである。素子サイズに関しては、トラック幅36 nmと固定し、ストライプ高さを15~45 nmと可変させた。また、RAは $0.9 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ である。このヘッドには永久磁石が具備されており、そのバイアス磁界の方向は参照層の磁化方向と直交している。外部磁界はヘッドの面内ストライプ高さ方向に印加し、その強度を0~1800 Oeの範囲で変化させた。バイアス電流はヘッドの膜面直に流し、電流密度を $0 - 6.8 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ の範囲で変化させた。外部磁界を参照層の磁化方向と反平行に印加した場合を正と定義する。また、電流密度に関してはバイアス電流を自由層から参照層に流した場合を正と定義する。外部磁界の強度と極性、また電流密度の大きさと向きを変化させてヘッドから生じるノイズのスペクトルを0.1~20 GHzの周波数範囲で計測した²⁾。

実験結果 素子サイズ $36 \times 15 \text{ nm}^2$ のTMRヘッドにおいて、電流密度を $+1.3 \times 10^{11}$ および $+6.8 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ に固定し、外部磁界を変化させたときのノイズスペクトルの一例をFig. 1に示す。電流密度が $+1.3 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ の場合、外部磁界0 Oeのとき、8.2 GHz付近にピークが観測された。外部磁界を $+1800 \text{ Oe}$ まで増加させると、ピークの位置は低周波側へ移動するものの、その強度は減少した。このピークは主に自由層から発生するマグノイズによると考えられる。一方、電流密度が $+6.8 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ の場合、8.2 GHz付近で観測されたピークは外部磁界 $+800 \text{ Oe}$ 付近で急峻となり、さらに外部磁界を増加させるとその強度は減衰した。この結果は、マグノイズがスピントルクの影響により増大したものと推察される。

マグノイズのスピントルクによる影響を明確にするために、外部磁界 $+800 \text{ Oe}$ 印加したときに観測された7.2 GHz付近のピークに着目して、そのピーク強度と半値幅を電流密度の大きさと向きに対してまとめた。Fig. 2に示すように、電流密度の方向を負から正へ反転させてその大きさを増加させていくと、ピーク強度は著しく増大し、その半値幅は線形的に減少した。これらの挙動からもマグノイズがスピントルクの影響により増大したことを理解できる。また、ヘッドに流す電流密度をさらに増加させるとピークの半値幅がゼロとなり、その閾値 (臨界電流密度) を超えると自由層の磁化の定常的な歳差運動が起こり、ノイズが著しく増大することが予測できる¹⁾。したがって、ピークの半値幅の電流密度に対する変化を利用して半値幅がゼロとなる臨界電流密度を求めたところ、約 $+1.5 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ であった。この値は、これまでの報告に比べて一桁高く、素子サイズの低下により形状異方性が強くなっていることによると考えられる。

以上の結果から、この臨界電流密度近傍から、マグノイズの増大がトルクの影響を受けて顕著となり、ヘッドのS/N比をより劣化させる可能性がある。

謝辞 本研究は情報ストレージ研究推進機構(SRC)の協力のもとで行われた。

参考文献 1) S. Petit *et al.*, Phys. Rev. B, **78**, 184420 (2008)., 2) Y. Endo *et al.*, IEEE Trans. Magn., **49**, 3745 (2013)他。

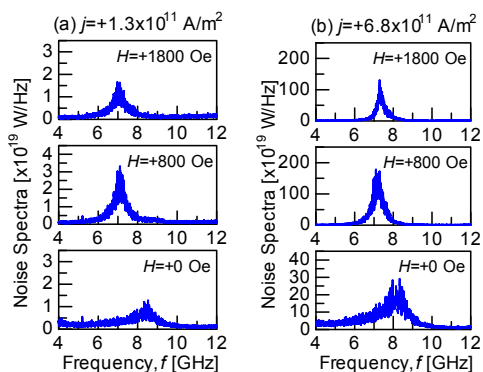


Fig. 1. Noise spectrum in the TMR head with a size of $36 \times 15 \text{ nm}^2$ as a function of positive magnetic field with $j = +1.32 \times 10^{11}$ [(a)] and $+6.76 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ [(b)].

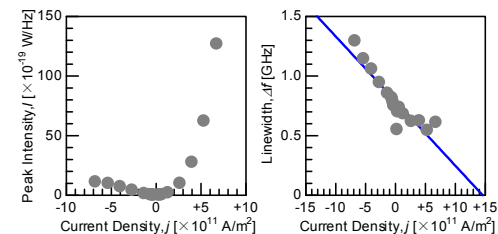


Fig. 2. Peak intensity I and line-width Δf of the strong noise spectral peak in the TMR head as a function of j with $H = +800 \text{ Oe}$. Solid line represents the linear function obtained from the least square fitting to the data of the line-width.

記録層磁性粒子の位置分散制御によるジッタノイズの抑圧

原彬大、村岡裕明
(東北大学電気通信研究所)

Suppression of jitter noise by controlling position distribution of magnetic grains

A. Hara, H. Muraoka
(RIEC, Tohoku Univ.)

1. まえがき

現在広く使われているグラニューラ媒体を用いた高密度記録の実現ができれば大きな意味を持つ。そこで、通常位置に規則性のないグラニューラ媒体に位置に規則性を持たせた場合のジッタノイズの挙動を以前の研究で検討した[1]。本検討では、粒子位置に規則性のないグラニューラ媒体を比較対象とした場合の結果について報告する。

2. 計算方法とシミュレーション結果

数値計算の方法として磁性粒子のモデリングにポロノイセルを用いる。粒子の直径、粒径分散、位置分散等は母点位置によって決定される。粒子位置規則性を失わせた通常のグラニューラ媒体のモデリングには Lloyd's algorithm[2]を用いて、位置に規則性があるものはグレインピッチ(8.86 nm)となる間隔で母点を格子状に置き、そこに正規分布に従った揺らぎを母点位置に与えた。この時の揺らぎの標準偏差を位置分散(nm)とし、粒径はセルと同面積の円の直径として計算し、粒径分散は平均粒径に対する標準偏差(%)で表す。セルの作成、磁化反転方向の計算、得られる磁化の計算、再生波形の計算を、繰り返し行う事により転移ジッタを計算した。Fig.1 に作成したポロノイセル(左図)の例と、その重心位置の分布図(右図)を示す。重心位置の分布図から(a)には強い位置の規則性が、(b)には弱い位置の規則性が、(c)には位置の規則性がないことが確認された。

Fig.2 に書き込み時の電流反転位置を変化させた場合のジッタノイズを示す。粒子位置に規則性がない場合書き込み位置によりジッタノイズは変化しないが、位置に規則性がある場合、グレインピッチの中間地点でヘッドが書き込みを行った場合大きくジッタノイズを低減できる。

3. まとめ

磁性粒子位置の規則性を導入し、書き込み位置を同期することにより、通常のグラニューラ媒体では達成できない値までジッタノイズを低減できることを示した。

参考文献

- 1) A. Hara, H. Muraoka, J. Appl. Phys.115, 17, B730, 2014.
- 2) M.Yamashita. et al, IEEE Trans. Magn, 47,10 , 3558-3561, 2011.

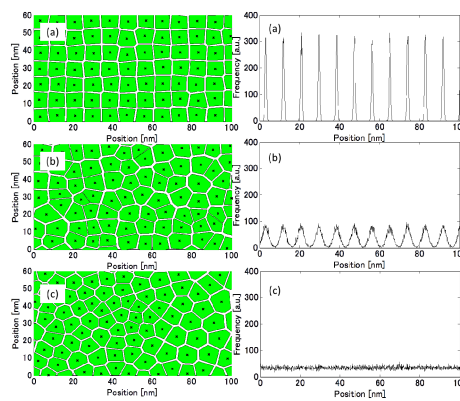


Fig.1 Modeled Voronoi cells(left) and Corresponding histogram of grain positions(right). (a) position distribution= 0.4 nm, diameter distribution 2 % (b) position distribution= 1.5 nm diameter distribution 10 % (c) diameter distribution 10 % [Lloyd's]

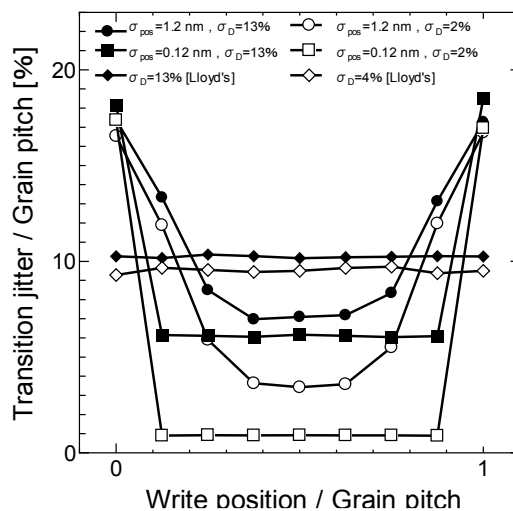


Fig.2 Transition jitter dependence on writing position

面内記録磁場が層厚比の異なる ハードディスクのトランジションノイズに及ぼす影響

小室彰也, 富山直樹, 江畑一輝, 杉田龍二
(茨城大)

Influence of in-plane recording field on transition noise of hard disks with various layer thickness ratio

A. Komuro, N. Tomiyama, K. Ebata and R. Sugita
(Ibaraki Univ.)

はじめに ハードディスク(HD)の高記録密度化, 大容量化のためには, トランジションノイズの低減が必要不可欠である. 記録層が Granular 層と Cap 層から成る積層媒体の消磁磁区構造は磁場印加方向に依存し, 面内磁場印加によって消磁すると, 消磁ノイズが低下する^{1),2)}. 本研究では, Granular 層と Cap 層の層厚比が異なる積層媒体に信号を記録した場合に, 記録磁場の方向がトランジション部における漏れ磁場分布に及ぼす影響を検討した.

実験方法 Granular 層厚 8 nm, Cap 層厚 8 nm である記録密度 120 Gb/in² の市販 HD(以後媒体 A と称する), Granular 層厚 12 nm, Cap 層厚 2 nm である記録密度 700 Gb/in² の市販 HD(媒体 B), 及び媒体 B において Cap 層を除去した Granular 層のみの媒体(媒体 C)に, 磁気転写法を用いてビット長 100 nm のライン&スペースパターンを記録した. 記録するには上記媒体とマスター媒体を接触させ, 法線からの角度 θ が 30° 及び 90° の方向に外部磁場を印加した. 漏れ磁場分布は磁気力顕微鏡(MFM)によって観察した.

実験結果 Fig. 1 に, 媒体 A, B 及び C に対し, $\theta = 30^\circ$ 及び 90° の印加磁場によって記録した場合の MFM 像を示す. MFM 像において, 暗部が初期磁化部, 明部が記録によって磁化が反転した部分である. Fig. 1 より, 層厚比の異なる媒体 A, B, C いずれにおいても, $\theta = 30^\circ$ で記録した MFM 像に比べて 90° はトランジション部の漏れ磁場変動が少なくなっており, トランジションの直線性が増していることが分かる. MFM 像をクロストラック方向に 5 nm 間隔でストライプ状に分割し, それぞれのストライプにおけるトランジション位置を測定して, その位置と頻度の関係から求めたトランジション位置分散の標準偏差 σ を Fig. 1 中の各 MFM 像の下に示してある. σ は媒体 A, B 及び C のいずれにおいても, $\theta = 30^\circ$ に比べて 90° の方が小さくなっている. 以上より, Granular 層と Cap 層との層厚比の相違がトランジションノイズに及ぼす影響は殆ど見られず, 面内成分の多い記録磁場の方が幅の狭いトランジションを形成できると言える. Fig.1 の結果は, 記録磁場の面内成分が増えると磁区サイズが小さくなることによってトランジションノイズが低減されると解釈でき, 消磁磁場方向と消磁磁区構造との関係を反映している¹⁾⁻³⁾.

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 C(24560394)により行われました. ここに深謝致します.

参考文献

- 1) S. Sato, Y. Yamaguchi, T. Komine, and R. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, p. 3181 (2012).
- 2) Y. Yamaguchi, S. Sato, T. Komine, and R. Sugita: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, p. 3584 (2013).
- 3) E. Noel Abarra, Paramjit Gill, B. Ramamurthy Acharya, Jianing Zhou, Min Zheng, Gunn Choe, and Brian Demczyk: *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, p.3127 (2005).

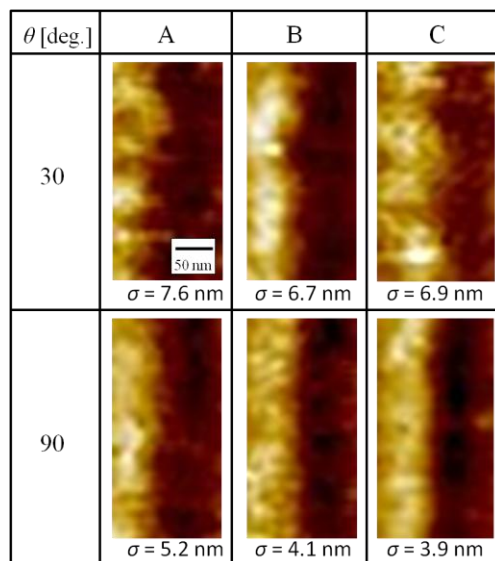


Fig.1 MFM images near transition area.

SMR におけるヘッドスキュー角に対するビット誤り率特性

仲村 泰明, 大沢 寿, 岡本 好弘, 金井 靖*, 村岡 裕明**
(愛媛大学, *新潟工科大学, **東北大学)

Bit Error Rate Performance for Head Skew Angle in Shingled Magnetic Recording

Y. Nakamura, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Kanai*, H. Muraoka**

(Ehime University, *Niigata Institute of Technology, **Tohoku University)

はじめに

ハードディスク装置の高密度化を実現する次世代の記録方式としてシングル磁気記録(SMR : shingled magnetic recording)¹⁾の導入が期待されている。SMR はトラック間にガードバンドが無い場合、隣接トラックに与える記録滲みの影響がヘッドスキュー角に依存する可能性がある。本検討では、トラックピッチを一定とした SMR 記録・再生系モデルを用いて再生波形を取得し、ビット誤り率(BER : bit error rate)特性を求めてヘッドスキュー角依存性について評価する。

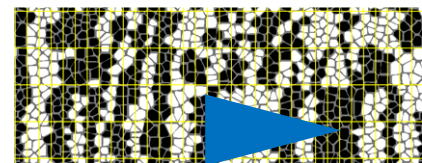
記録再生シミュレーション

本記録再生シミュレーションモデルでは、離散グラニューラ媒体モデル²⁾に、トレーリングシールドと主磁極の片側(図の上側)にサイドシールドを有する物理的な記録トラック幅が 50 nm, 主磁極の偏角が 75° の二等辺三角形の記録ヘッド³⁾を用いて記録し、MR素子の周りをシールドした再生ヘッド²⁾で再生する。Fig. 1 に、PRBS (pseudo random binary sequence) を記録した磁化パターンを示す。但し、(a)~(c)はスキュー角がそれぞれ 0, -15, +15 deg の場合を示し、ビット長を 7.3 nm, トラックピッチを 22.1 nm としている。図中の格子状の実線はビット境界、三角は記録ヘッドの主磁極を示している。図より、(a)に対して (b), (c)の場合には記録磁化パターンがスキュー角に応じて傾斜し、(c)の+15 deg の場合にはトラックの境界が滲み、イレーズバンドが延びているのがわかる。Fig. 2 に、スキュー角に対する BER 特性を示す。但し、再生ヘッドはトラックの中央を走査し、システム雑音を加えていない。また、PR1ML 方式を適用している。図より、負の向きのスキュー角に対して BER の劣化は小であるが、正の方向に対してはイレーズバンドにより大幅に BER が劣化することがわかる。

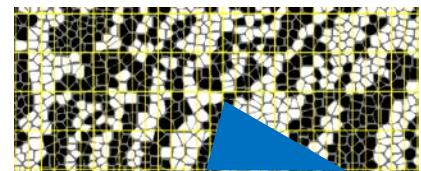
謝辞 本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構(SRC)と科学研究費補助金(若手研究(B):25820161, 基盤研究(C):26420358)の助成のもとに行われたものであることを付記し謝意を示す。

参考文献

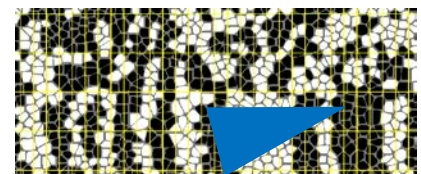
- 1) R. Wood et al., IEEE Trans. Magn., **45**, 917 (2009).
- 2) M. Yamashita et al., IEICE Trans. Electron., **E96-C**, 1504 (2013).
- 3) Y. Kanai et al., IEEE Trans. Magn., **47**, 715 (2010).



(a) Skew angle : 0 deg



(b) Skew angle : -15 deg



(c) Skew angle : +15 deg

Fig. 1 Magnetization patterns for head skew angle

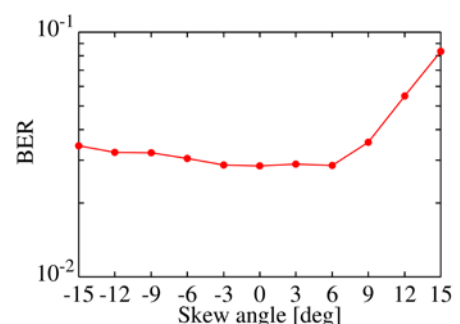


Fig. 2 BER performance for head skew angle (PR1ML system, w/o system noise)

4Tbits/inch²級のマイクロ波アシスト磁気記録シミュレーション

柏木翔太, 田中輝光, 金井靖*, 松山公秀

(九州大学, *新潟工科大学)

Microwave-assisted magnetic recording simulation aiming 4 Tbits/inch²

S. Kashiwagi, T. Tanaka, Y. Kanai* and K. Matsuyama

(Kyushu University, *Niigata Institute of Technology)

はじめに

次世代 HDD 実現のための新技術としてマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)¹⁾が期待されている。高 Ku 材料を用いた信号記録には MAMR と併せて交換結合複合(ECC)媒体²⁾の適用が効果的であることがわかっている。本研究では計算機解析により 3 層の磁性体からなる ECC 媒体を想定し、4 Tbits/inch²級の将来の超高密度記録の実現に向けて MAMR と互記録³⁾を併用した信号記録・再生特性について検討した。

計算方法

記録媒体モデルとして、Fig. 1 に示すような 3 層の磁性層を有する平均粒径 4.6 nm のボロノイ形状の磁性粒が 2 次的に配置されているものを想定した。総膜厚は 12 nm である。磁化挙動計算は LLG 方程式を用いて行った。記録ヘッドには Fig. 1 に示すトレーリングシールドを有する互記録用単磁極ヘッドと軟磁性裏打ち層の組み合わせを想定し、有限要素法計算により磁界分布を求めた。マイクロ波磁界発生源としてスピントルクオシレータ⁴⁾を想定し、10×20×20 nm³サイズの磁界発生層(FGL)が主磁極・トレーリングシールド間に配置されているものとした。記録媒体の磁気特性は熱安定性指標を 60 (@ 350 K)保持できる程度とした。

計算結果

本モデルにおいては 15~25 GHz でマイクロ波アシストの効果が発現しており、単トラック記録における再生信号の SNR は 20 dB 程度である。Fig. 2 にトラックピッチ(TP) 20 nm の場合の記録ビットパターンを示す。同図から明瞭なビットパターンが記録されていることがわかる。Fig. 3 に SNR のトラックピッチ依存性を示す。なお、本データは Fig. 2 に示す 200 kbpi の信号の SNR である。TP が減少するに従って残留トラックが狭小化するため SNR が低下することがわかる。しかしながら本モデルにおいては、TP=20 nm において、19 dB の SNR を保持しており、最大トラック密度 1.27 Mtpi が実現可能であると推測される。また、1600 kbpi の記録信号出力は 200 kbpi の信号出力の 35%程度得られており、本モデルにおいては 4 Tbits/inch² 相当の記録性能が期待できる。

参考文献

- 1) J. G. Zhu et al., *IEEE Trans. Magn.*, **44**, pp. 125-131 (2008).
- 2) R. H. Victora, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 537(2005).
- 3) S. Greaves et al., *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3823-3829 (2009)
- 4) X. Zhu et al., *IEEE Trans. Magn.*, **42**, pp. 2670-2672 (2006).

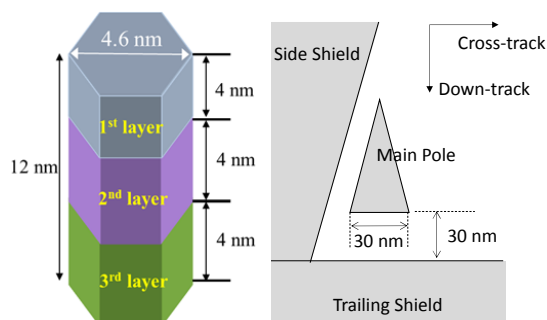


Fig. 1 Simulation models.

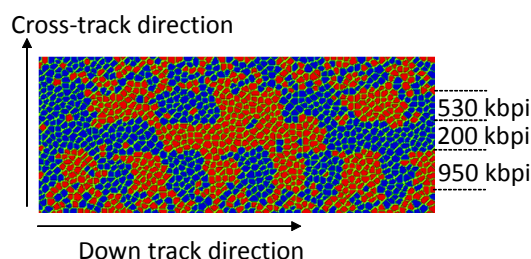


Fig. 2 Recorded bit patterns.

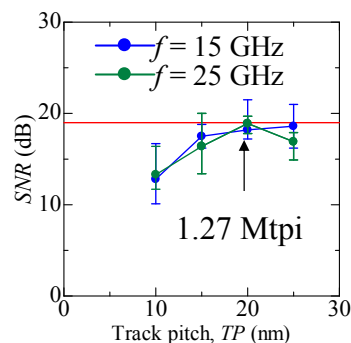


Fig. 3 SNR as a function of track pitch.

Fe と CoPt 合金の磁性二層膜を被覆した磁気力顕微鏡探針の空間分解能と反転磁界

永津良・大竹充・二本正昭・桐野文良*・稲葉信幸**
(中央大, *東京藝大, **山形大)

Spatial Resolution and Switching Field of Magnetic Force Microscope Tip
Coated with Magnetic Bi-Layer Film Consisting of Fe and CoPt-Alloy

Ryo Nagatsu, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino*, and Nobuyuki Inaba**
(Chuo Univ., *Tokyo Univ. Arts, **Yamagata Univ.)

はじめに 磁気力顕微鏡 (MFM) は観察試料から漏洩する磁場勾配を検出し、磁化状態を観察する顕微鏡である。次世代高 K_1 磁気記録媒体や永久磁石材料の観察には、漏洩磁場による探針磁化反転を防ぐために、高分解能に加え、高い反転磁界 (H_{sw}) を持つ探針が必要になる。これまで、 $L1_0$ 型構造を持つ FePt や CoPt, FePd 膜を被覆した高 H_{sw} 探針の作製が試みられている¹⁻³⁾。我々は、比較的低い熱処理温度で高い K_u を持つ準安定 $L1_1$ 構造が実現できる CoPt 合金膜に着目し、この磁性材料を被覆して作製した高 H_{sw} 探針を検討している⁴⁾。本研究では、MFM 信号の高感度検出が可能な高 M_s -Fe と高 H_{sw} が期待される $L1_1$ -CoPt 合金を組み合わせた磁性二層膜被覆 MFM 探針を作製し、高分解能で高 H_{sw} の実現可能性を検討した。

実験方法 膜被覆には、超高真空マグネトロンスパッタリング装置を用いた。ベース探針として、市販の先端半径 4 nm の Si 探針を使用した。300 °C で加熱したベース探針上に、Fe(x nm)/CoPt(20- x nm)/Ru(5 nm)、もしくは、CoPt(20- x nm)/Fe(x nm)/Ru(5 nm)膜を形成した。Ru 層は磁性二層膜の配向制御層として導入した。 x を 0 から 20 とし、各磁性層厚比を変化させた。

実験結果 Fig. 1 に Fe(20 nm)/Ru 膜被覆探針を用いて観察を行った垂直磁気記録媒体の MFM 像とその像から得られたパワースペクトルを示す。1500 kFCI (ビット長: 17.1 nm) までは、パワースペクトルにおいてピークが認められる。一方、1600 kFCI (ビット長: 15.9 nm) では記録周期に対応するピークが現れていない。したがって、分解能は $17.1/2 = 8.5$ nm と $15.9/2 = 7.9$ nm との間の 8.2 ± 0.3 nm であると判断できる。同様な評価を Fe(x nm)/CoPt(20- x nm)/Ru 膜被覆探針に対して行った結果を Fig. 2(a) にまとめる。Fe 層の増加に伴い、MFM 信号検出感度が高くなり、分解能が向上していることが分かる。次に、 H_{sw} 評価のために、MFM 探針着磁方向と逆方向に外部磁界を印加し、HDD 媒体 (163 Gb/in²) の MFM 観察を行った。磁界強度を 50 Oe 間隔で上昇させ、印加毎に媒体の同一箇所観察を行い、コントラストが反転した際の磁界を H_{sw} とした。Fig. 3 に Fe(20 nm)/Ru 膜被覆探針の測定結果を示す。印加磁界が 450 Oe までは初期状態と同じコントラストで観察されている (Fig. 3(a), (b))。500 Oe まで上昇させると、コントラスト反転が認められる (Fig. 3(c))。したがって、 H_{sw} は 475 ± 25 Oe となる。同様な H_{sw} 評価を Fe(x nm)/CoPt(20- x nm)/Ru 膜被覆探針に対して行った結果を Fig. 2(b) に示す。Fe 層の増加に伴い、分解能は向上するが、CoPt 層の減少により、 H_{sw} は低い値となることが分かる。当日は、CoPt(20- x nm)/Fe(x nm)/Ru 膜被覆探針についても報告する。

参考文献

- 1) Y. Rheem *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3793 (2005).
- 2) L. Gao *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2194 (2004).
- 3) S. Ishihara *et al.*: *J. Mang. Soc. Jpn.*, **37**, 55 (2013).
- 4) S. Ishihara *et al.*: *J. Mang. Soc. Jpn.*, **37**, 255 (2013).

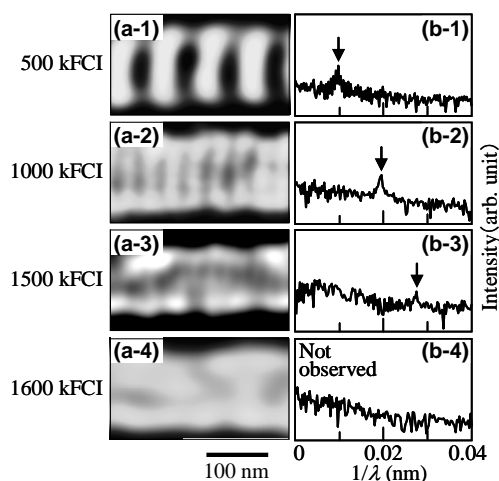


Fig. 1 (a) MFM images of a perpendicular medium recorded at (a-1) 500, (a-2) 1000, (a-3) 1500, and (a-4) 1600 kFCI observed by using an MFM tip coated with Fe(20 nm)/Ru(5 nm) film. (b-1)–(b-4) Power spectra analyzed for the magnetic bit images of (a-1)–(a-4), respectively.

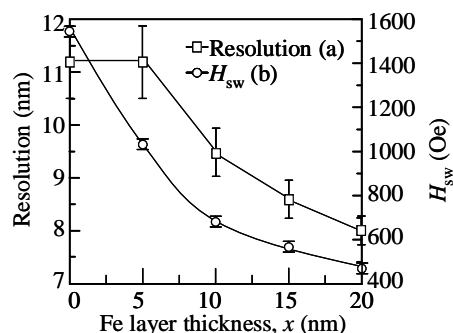


Fig. 2 (a) Resolutions and (b) H_{sw} values of MFM tips coated with Fe(x nm)/CoPt(20- x nm)/Ru(5 nm) films.

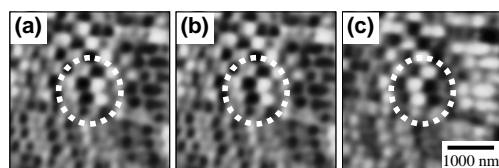


Fig. 3 MFM images of a same area of HDD perpendicular medium observed by using an MFM tip coated with Fe(20 nm)/Ru(5 nm) film (a) before and [(b), (c)] after applying magnetic fields of (b) 450 and (c) 500 Oe.

Co/Pt 多層膜を被覆した磁気力顕微鏡探針の反転磁界

鈴木遼・大竹充・二本正昭・桐野文良*・稲葉信幸**

(中央大, *東京藝大, **山形大)

Switching Field of Magnetic Force Microscope Tip Coated with Co/Pt Multilayer Film

Ryo Suzuki, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino*, and Nobuyuki Inaba**

(Chuo Univ., *Tokyo Univ. Arts, **Yamagata Univ.)

はじめに 磁気力顕微鏡 (MFM) は、磁性膜被覆探針を用いることにより試料からの漏洩磁場勾配を検出し、磁化状態を観察する顕微鏡である。高 K_u 記録媒体や永久磁石を観察する場合、漏洩磁場による探針磁化反転を防ぐため、高分解能に加えて高い反転磁界 (H_{sw}) を持つ探針が必要となる。これまで、CoPt や FePt, FePd 合金膜を被覆した高 H_{sw} 探針の作製が試みられている¹⁻³⁾。しかしながら、これらの材料を規則化させるためには高温処理が必要となる。磁性多層膜を被覆膜として適応することができれば、高 H_{sw} 探針の室温形成が可能となり、被覆膜の表面平坦性も保たれることが考えられる。最近、我々は Co/Pt 多層膜被覆探針を作製し、層厚比および総膜厚が分解能と H_{sw} に及ぼす影響を調べてきた⁴⁾。Co/Pt 多層膜の磁気異方性は結晶配向により変化することが知られている⁵⁾。本研究では、探針に被覆した Co/Pt 多層膜の結晶配向が H_{sw} に及ぼす影響について検討を行った。

実験方法 超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用い、市販の先端半径 4 nm の Si 探針に室温で膜被覆を行った。磁性膜被覆探針の構成は [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀/Si 探針、もしくは、[Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀/X(20 nm)/Si 探針とした。下地層 X は、(111)配向用に hcp-Ru, fcc-Pt, Pd, その他配向用に bcc-Cr などを設けることにより配向を変化させた探針も作製した。分解能および H_{sw} の評価には、真空排気型 MFM を用いた。探針形状観察には SEM を用いた。被覆膜の構造および磁気特性評価には、MFM 探針作製時に同時に Si 基板上に形成した平坦膜を使用し、AFM, XRD, VSM 測定を行った。

実験結果 Fig. 1 に Si 探針および [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀/Si 探針の SEM 像を示す。Si 探針に膜が均一に被覆されていることが分かる。また、AFM により評価した膜の表面粗さ (R_a) は 0.2 nm であった。以上のことから、Si 探針に多層膜が被覆されていることが分かる。Fig. 2 に Si 基板上に形成した多層膜の面外 XRD パターンを示す。Co および Pt 層からの反射がそれぞれ観察されており、いずれの層も最密充填配向となっていることが分かる。次に MFM 探針の性能評価を行った。[Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀ 膜被覆探針の分解能は 8.8 ± 0.3 nm であった⁴⁾。探針初期磁化方向と逆方向の磁界を印加し、磁界強度を 50 Oe ステップで増大させた。磁界印加処理した探針で垂直媒体試料の同一個所 MFM 像観察を行い、像コントラストが反転した処理磁界とその直前磁界の中間値を H_{sw} として求めた。Fig. 3 に [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀ 膜被覆探針の評価結果を示す。印加磁界が 1050 から 1100 Oe へ増加するとコントラスト反転が認められる。したがって、 H_{sw} は 1075 ± 25 Oe であることが分かる。当日は下地層 X を用いることにより、多層膜の配向制御を行った結果についても議論する。

参考文献 1) L. Gao *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2194 (2004). 2) S. Ishihara *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **37**, 55 (2013). 3) M. Futamoto *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 2748 (2013). 4) R. Suzuki *et al.*: *Dig. Annual Conf. Magn. Jpn.*; *Magnetic Society of Japan*, 3pF-13 (2013). 5) S. Shiomi *et al.*: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1357 (1999).

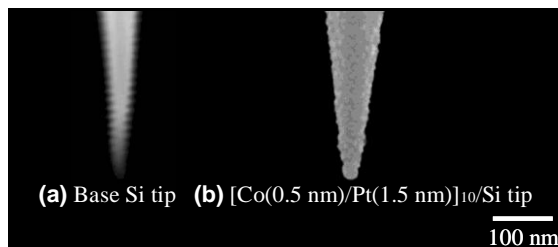


Fig. 1 SEM images observed for (a) a Si tip and (b) an MFM tip coated with [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀ multilayer film.

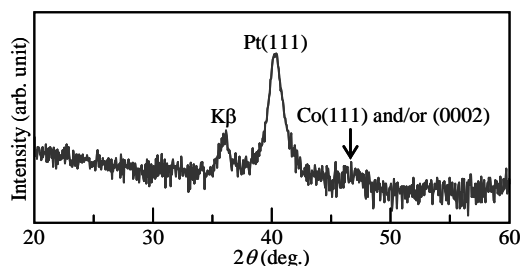


Fig. 2 XRD pattern of a [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀ multilayer film deposited on flat Si substrate.

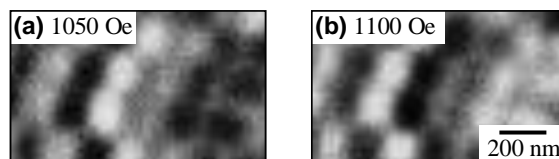


Fig. 3 MFM images of a same area of HDD perpendicular medium observed by using a tip coated with [Co(0.5 nm)/Pt(1.5 nm)]₁₀ multilayer film after applying magnetic fields of (a) 1050 and (b) 1100 Oe. The contrast is reversed for (b).

磁気記録ヘッドの強い交流磁場観察に適した高保磁力・磁気力 顕微鏡探針の開発とパルス磁場を用いた探針保磁力評価

鄭 富、江川元太、吉村 哲、鄭 仰東、木下幸則、齊藤 準
(秋田大学)

Fabrication of high-coercivity FePt-based MFM tips for magnetic imaging of strong AC magnetic field of for AC magnetic imaging of magnetic writing head and direct measurement of tip-coercivity by pulse magnetic field

F. Zheng, G. Egawa, S. Yoshimura, Y. Zheng, Y. Kinoshita, H. Saito
(Akita University)

はじめに 我々は以前、試料表面近傍での磁場計測を可能にする交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発した^{1),2)}。磁気記録ヘッド等の交流磁場計測には、交流磁場の印加により磁化状態が変化しないハード磁性探針を用い、探針にその共振周波数と異なる正弦波磁場を印加する事により発生する、正弦波磁場を変調源とした周波数変調 (FM) を利用する。しかしながら、現在開発が進められている強磁場を発生する磁気記録ヘッドの交流磁場観察を行うためには、これまで用いていた FePt ハード磁性探針の保磁力は 10 kOe 程度であるので、ハード磁性探針の高保磁力化が必要不可欠である。一方、高保磁力探針の開発においては、探針に成膜する薄膜試料の磁気特性評価に加え、Si 探針母材への成膜後の磁性探針自身の保磁力評価も重要となる。本研究では、FePt 探針の高保磁力化を目的として、1) FePt 合金の MgO 添加によるグラニューラー構造化、2) FePt 結晶粒の膜面内容易軸化のための低昇温速度・長時間熱処理、3) 規則化促進のための薄膜成膜中の VHF プラズマ照射³⁾、を検討した。また、探針の保磁力を MFM 信号のパルス磁場応答性から求める方法を提案し、作製した FePt 系探針の保磁力を評価した。

方法 各種の FePt 系合金の薄膜 (膜厚 40 nm)、およびそれらを成膜した探針を、マグネトロンスパッタリング法を用いて、前者は熱酸化膜付き Si 基板上に、後者は Si 探針母材上に、それぞれ室温で作製した。MgO 添加量は 0~35 vol.%, VHF プラズマ照射電力は 5~15 W の条件下で変化させて成膜した。規則化のための熱処理は、750 °C までの昇温速度を 0.1 °C/秒もしくは 5 °C/秒、750 °C の保持時間を 10 分もしくは 120 分、とした。薄膜の磁気特性評価には振動試料型磁束計 (VSM) と超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いた。探針の保磁力評価には、30 kOe のパルス磁場を印加できるコイルを組み込んだ大気雰囲気型走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いた。

結果 Table.1 に、MgO 添加量、熱処理条件、VHF プラズマ照射電力、を変化させた FePt 系薄膜の保磁力を示す。最大 22.3 kOe (Table.1(E)) の保磁力が、MgO 添加量 35 vol.%, 熱処理時の遅い昇温速度と長い高温保持時間、VHF プラズマ照射電力 15 W の条件で得られた。保磁力向上の原因は、FePt 結晶粒の磁氣的孤立化・膜面内配向化・高 L_{10} 規則化によるものと考えられる。Fig.1 に、探針に印加したパルス磁場、及びパルス磁場印加時の探針振動の位相の時間変化を示す。磁性探針は、着磁をパルス磁場を用いて探針長手方向に行った後に逆方向にパルス磁場を印加して位相変化を測定した。位相の符号が負 (斥力) から正 (引力) に変わる時の磁場が探針保磁力 (磁場方向の探針磁化成分がゼロになる磁場) に対応する。Table.2 に、薄膜の磁化測定による保磁力と、探針のパルス磁場を用いた評価法による保磁力を示す。薄膜と探針の保磁力には強い相関が見られ、保磁力が 20 kOe 以上の探針の作製に成功した事が判る。

参考文献 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 107, 09D309 (2010). 2) S. Yasui et al., Annual Conference of ICAUMS2012, 4pPS-118 3) S. Yoshimura et al., *J. Appl. Phys.*, 109, 07B751 (2011).

Table. 1 Fabricated condition of FePt-based films and coercivity of the films.

Sample	MgO addition	Annealing condition	VHF power	In-plane coercivity of FePt-based films
A	0	5 °C/sec, 10 min	0	14.4 kOe
B	12 vol.%	5 °C/sec, 10 min	0	14.9 kOe
C	35 vol.%	5 °C/sec, 10 min	0	15.4 kOe
D	35 vol.%	0.1 °C/sec, 120 min	0	19.0 kOe
E	35 vol.%	0.1 °C/sec, 120 min	5 W	19.3 kOe
F	35 vol.%	0.1 °C/sec, 120 min	10 W	21.0 kOe
G	35 vol.%	0.1 °C/sec, 120 min	15 W	22.3 kOe

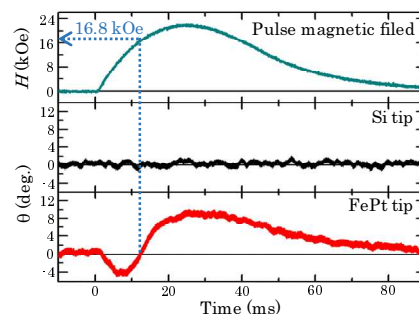


Fig. 1 Pulse magnetic field and phase change of different kinds of tips dependence on time.

Table. 2 Coercivity of films and tips.

Sample	In-plane coercivity of FePt-	Coercivity of tips
A	14.4 kOe	16.8 kOe
C	15.4 kOe	18.2 kOe
D	19.0 kOe	19.4 kOe
G	22.3 kOe	20.3 kOe

交番力顕微鏡を用いた $(\text{Bi}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeO}_3$ マルチフェロイック 薄膜の電場・磁場の同時イメージング

芦 佳, 江川 元太, 木下 幸則, 吉村 哲, 〇齊藤 準
(秋田大学)

Simultaneous imaging of electric and magnetic field on $(\text{Bi}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeO}_3$ multiferroic films by
alternating force microscopy

J. Lu, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura and 〇H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 我々は、これまで遠距離力である電場と磁場を、試料表面近傍において高い空間分解能で極性を含めて検出できる特長を有する、交番電気力顕微鏡 (A-EFM) ならびに交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発してきた¹⁾²⁾。A-EFM は、励振された導電性探針に、探針の共振周波数と異なる非共振の交流電場を印加して非共振の交番電気力を発生させ、A-MFM は、励振されたソフト磁性探針に、非共振の交流磁場を印加して非共振の交番磁気力を発生させ、これら非共振交番力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用して、観察試料から発生する静電場ならびに静磁場を、周波数復調後にロックイン検出する。本研究では、静電場と静磁場の同時画像化を目的として、探針に導電性のソフト磁性探針を用い、異なる周波数の交流電場と交流磁場を印加して、静電場と静磁場を発生する $(\text{Bi}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeO}_3$ 強誘電・強磁性マルチフェロイック薄膜を観察した結果を紹介する。

実験方法 計測システムは、汎用の走査型プローブ顕微鏡 (日本電子製 JSPM-5400) に、2 出力の信号発生器、周波数復調器 (PLL 回路) 及び 2 台のロックインアンプを付加して構成した。探針には、自作した導電性を有する CoZrNb ソフト磁性探針 (Si 探針に磁性膜を 30 nm 成膜) を用い、周波数の異なる交流電場および交流磁場を印加して、自作した(111) 配向 $(\text{Bi}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeO}_3$ 薄膜 (表面酸化 Si 基板上的 Ta/Pt 下地層に 100 nm 成膜) の試料面に垂直方向の静電場および静磁場を観察した (Fig.1)。交流電場は探針と Ta/Pt 下地層間に交流電圧を印加して発生させた。

実験結果 観察に先立ち、強誘電性分域構造を探針と Ta/Pt 下地層間に直流電圧を印加して形成した。その際、 $3\ \mu\text{m}$ 角の領域に 12 V 印加した後に、その中央の $1\ \mu\text{m}$ 角の領域に -12 V 印加した。Fig.2 (a),(b),(e),(f) に静電場の強度像と位相像および対応する線プロファイルを示す。探針には 0.2 V, 300 Hz の交流電圧および 200 Oe, 78 Hz の交流磁場を印加した。静電場像では強誘電性分域構造が明瞭に観察され、分域境界では、垂直電場の絶対値が極小値をとり、位相は境界を隔てて 180° 異なっており、垂直電場の方向が反転している。静磁場像においても、強誘電性分域構造と同じ場所に強磁性磁区構造が観察され、磁区境界で垂直磁場の絶対値が極小値をとり、位相は境界を隔てて 180° 異なっており、垂直磁場の方向が反転している。以上よりこの強誘電・強磁性薄膜では、電気分極 P と磁気モーメント M との間でお互いを平行に保つ強い相互作用があることがわかる。本計測手法は、強誘電・強磁性薄膜等の機能性薄膜の局所物性解析に有効と考えられる。

参考文献

1) H. Saito, et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 07E330 (2011), 2) J. Lu et al., *J. Appl. Phys.*, **112**, 124110 (2012)

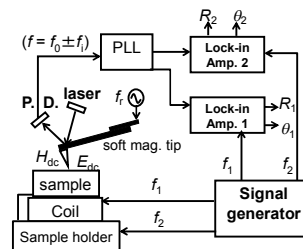


Fig.1 Measuring system

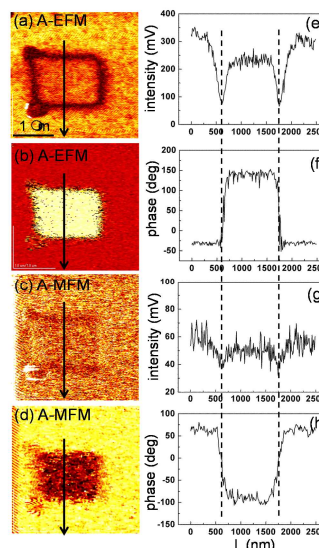


Fig. 2 Electric and magnetic field images of $(\text{Bi}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeO}_3$ multiferroic film.

交番磁気力顕微鏡におけるソフト磁性探針の性能評価と 磁気記録媒体の高分解能直流磁場観察

岡安慎介, F. Zheng, H. Qi, K. Srinivasa Rao, 江川元太, 木下幸則, 吉村哲, 齊藤準
(秋田大学)

Alternating magnetic force microscopy: Performance evaluation of soft magnetic tips and high-resolution DC magnetic field imaging of magnetic recording media

S. Okayasu, F. Zheng, H. Qi, K. Srinivasa Rao, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura, and H. Saito
(Akita University)

はじめに 近年、磁気記録媒体の高密度化に伴い、MFMの高分解能化が強く求められている。我々は試料表面近傍の磁場計測が可能な交番磁気力顕微鏡(Alternating magnetic force microscope: A-MFM)を開発し、媒体の直流磁場の高分解能観察を検討している^{1),2)}。A-MFMを用いた直流磁場の計測では、加振させたソフト磁性探針に探針の共振周波数と異なる周波数の交流磁場を印加して探針試料間に発生させた非共振の交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用する。これまで我々は高飽和磁化 Fe-Co 探針を用いて空間分解能 6 nm 程度を得た³⁾。さらなる高分解能化のためにはソフト磁性探針の性能向上が重要となる。本研究では、最近開発したソフト磁性探針の交流磁場応答性を利用した探針性能評価法⁴⁾を用いて、新たに作製した種々のソフト磁性探針を評価し、従来の Fe-Co 探針より優れた性能を示したソフト磁性探針を用いて垂直磁気記録媒体の高分解能観察を試みた結果を報告する。

方法 種々のソフト磁性探針を市販の Si 探針に、 $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ 、 $\text{Fe}_{56}\text{Co}_{24}\text{B}_{20}$ 、 $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ 、 $\text{Co}_{80}\text{Zr}_5\text{Nb}_{15}$ 、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 合金をそれぞれスパッタリング法で 30 nm 成膜して作製した。探針の性能評価は市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製)に、交流磁場源として電磁石を加えて、磁性探針に交流磁場を印加することで生じる探針振動の周波数変調スペクトルの 2 次側帯波の強度 $I(2\omega_m)$ をスペクトラムアナライザーで測定することで行った。交流磁場の振幅は 30 - 1200 Oe, 周波数は 89 Hz とした。記録媒体の磁区観察は、 CoCrPt-SiO_2 垂直磁気記録媒体を用い、探針試料間距離約 2-3 nm としてタッピングリフトモードで行った。交流磁場の振幅は 50-300 Oe, 周波数は 89 Hz である。

結果 Fig. 1 に、作製した種々のソフト磁性探針に対する探針振動の周波数変調スペクトルの 2 次側帯波強度 $I(2\omega_m)$ の交流磁場振幅 H_0^{ac} 依存性を示す。2 次側帯波は、交流磁場に追従して変化する探針磁化と交流磁場との相互作用により生じる。 $I(2\omega_m)$ は H_0^{ac} の増加に伴い、その 2 乗に比例して増加後、1 乗に比例して変化する。 H_0^{ac} 依存性が変化する磁場は、探針の飽和磁場を意味し、そのときの信号強度が探針の最大感度に対応する。図より、 $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ 探針は $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 探針よりも小さい交流磁場で飽和に達し、 $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ 探針と同程度の高い検出感度を示すことから優れた探針性能を有することがわかる。尚、各種ソフト磁性探針の飽和磁場及び最大検出感度は、各種磁性薄膜の飽和磁場及び飽和磁化とよい相関が得られている。Fig.2 (I) に、この $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ 探針を用いて A-MFM 観察した垂直磁気記録媒体 (記録密度: 500 kfc/i) の記録ビットの空間スペクトル強度の H_0^{ac} 依存性を示す。記録ビットのスペクトル強度は磁気像の記録ビット部のラインプロファイルの空間スペクトルから図中に示したように求めた。尚、(II) には比較のため Fig. 1 の $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ 探針の $I(2\omega_m)$ 評価結果も示した。図に見るように、記録ビット強度は H_0^{ac} の増加に伴い、比例して増加し、後に飽和して一定値となる。ここで飽和に達する H_0^{ac} 値は、 $I(2\omega_m)$ の依存性が変化する H_0^{ac} 値より大きくなるが、この結果はシミュレーション結果と一致した。以上より、 $I(2\omega_m)$ を用いた探針性能評価法は、探針の開発に有用である。講演では、分解能向上を図るため、磁性膜厚をさらに薄くした $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ 探針を用いた記録媒体の観察結果についても発表する。

参考文献 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 07E330 (2011). 2) 伊藤 他, 第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, 27pD-2. 3) S. Okayasu et al., 2nd ICAUMS, 2pPS-109 (2012). 4) H. Qi et al., 第 38 回日本磁気学会学術講演会 講演予定。

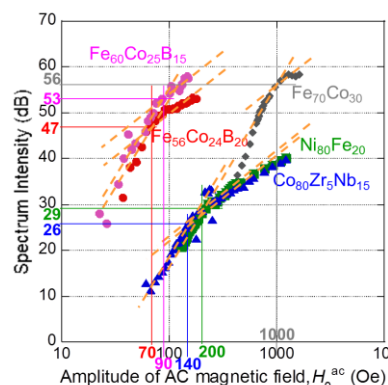


Fig.1 Dependence of AC magnetic field amplitude on the intensity of second harmonics of tip's frequency

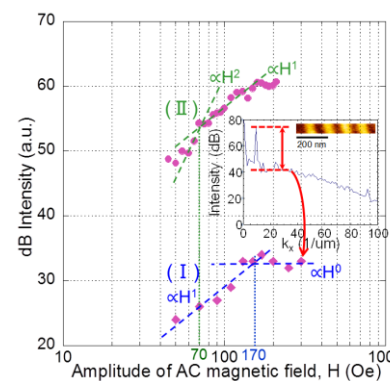


Fig.2 Dependence of AC-magnetic field amplitude on the intensity of spatial spectrum intensity of recording bits (I) and the second harmonics intensity of tip's frequency modulated oscillation (II) for $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{25}\text{B}_{15}$ tip.

交番磁気力顕微鏡を用いた強い直流磁場計測に向けた 高磁化率 Fe 基常磁性および Ag-Co 超常磁性探針の開発

吉村 哲、番匠 春嵐、郑 富、江川 元太、木下 幸則、齊藤 準

(秋田大)

Development of high-susceptibility Fe-based paramagnetic and Ag-Co superparamagnetic tips
for magnetic imaging of strong DC magnetic field by alternating magnetic force microscopy

S. Yoshimura, S. Bansho, F. Zheng, G. Egawa, Y. Kinoshita, and H. Saito

(Akita Univ.)

はじめに 我々は、試料表面近傍での静磁場計測を可能にする高空間分解能な交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発した^{1),2)}。本手法では、ハード磁性試料の直流磁場計測に対しては、ソフト磁性探針に交流磁場を印加し、探針磁化を周期的に反転させて探針試料間に交番磁気力を発生させ、この交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用する。しかしながら、永久磁石等の極めて強い磁場を発生する試料の評価においては、1) ソフト磁性探針が試料表面に磁気吸着してしまう、2) ソフト磁性探針の磁化が試料からの直流磁場で飽和してしまい周波数変調現象が生じない、などの問題が発生する。これに対し、磁気モーメントがソフト磁性材料よりも小さく、磁化が飽和しない、高い磁化率を有する、などの特徴を有する常磁性および超常磁性材料を用いた探針が、強磁場画像化に有望であると考えられる。また、磁化が磁場に比例しかつ残留磁化がゼロであるこれら探針は、直流磁場印加機構と組み合わせることで、試料直流磁場の絶対値計測³⁾に用いることもできる。本研究では、常磁性および超常磁性薄膜において磁化率を増大させるための材料探索並びに作製プロセスの検討を行い、上記の用途に適した高感度探針を開発することを目的とした。

方法 各種常磁性および超常磁性薄膜 (膜厚 100 nm)、そしてそれらを成膜した常磁性および超常磁性探針を、マグネトロンスパッタリング法を用いて、前者は熱酸化膜付き Si 基板上に、後者は Si 探針母材上に、それぞれ室温で作製した。常磁性薄膜は強磁性ターゲット上に非磁性シートを貼り付けた複合ターゲットを用い、超常磁性薄膜は強磁性ターゲットと非磁性ターゲットを用いた2元同時スパッタリングにより、それぞれ成膜した。各薄膜の磁気測定は、試料振動型磁力計 (VSM) により、各磁性探針の感度は、永久磁石の磁気力顕微鏡 (MFM) 測定における探針振動の位相変化を測定することにより、それぞれ行った。

結果 Table.1 に、作製した常磁性薄膜および超常磁性薄膜の室温での磁化率、およびそれらの薄膜を成膜した探針の最大位相変化 (検出感度)、をそれぞれ示す。Ni-Cr, Fe-Cr, Fe-Mn は結晶質で常磁性、Fe-Mo-B は非晶質で常磁性、Ag-Co はグラニューラー構造の超常磁性、の薄膜である。ここで、いずれの常磁性薄膜においても、室温での磁化率が最大になる (キュリー温度が室温になる) 組成に調整されている。結晶質の常磁性材料においては、強磁性元素の磁気モーメントの増大に伴い、また非磁性元素の添加量低減に伴い、磁化率が増大する傾向を示した。また、Mo, B を添加して非晶質化することで磁化率が更に増大した。この増大は、少ない非磁性元素の添加でキュリー温度を低下できたことによる。さらに、後述のように作製条件を最適化した超常磁性薄膜において、非常に高い磁化率が得られた。そして、薄膜の磁化率と探針の位相変化は、良い相関を示した。尚、いずれの探針においても、試料への磁気吸着は生じなかった。Fig.1 に、その Ag-Co 超常磁性薄膜の作製条件に対する磁化率の変化を示す。ここで、成膜速度の増大は、Ag マトリックス中の Co 粒子サイズの微細化に寄与するものと考えている。図中の点線は、超常磁性単相と超常磁性と強磁性の混相の境界であり、この判断は、図中の磁化曲線の例に示すように、ヒステリシスの有無から行った。成膜速度を増大させることにより、超常磁性単相を形成できる Co 含有量が増加し、作製条件を最適化することにより超常磁性薄膜の磁化率を非常に大きくすることができることが判る。

参考文献 1) H. Saito et al., J. Appl. Phys., 109, 07E330 (2011).

2) 伊藤, 他. 第35回日本磁気学会学術講演概要集, 27pD-2. 3) 木下, 他. 第37回日本磁気学会学術講演概要集, 3pF-10.

Table.1 Susceptibility of films and sensitivity of tips with the films.

Film material	Thickness X (H/m)	Thickness (nm)			
		100	50	20	10
Pd	7.6×10^{-9}				
Ni ₈₃ Cr ₇	4.7×10^{-8}	4.5°			
Fe ₅₈ Cr ₄₁	6.0×10^{-8}				
Fe ₆₇ Mn ₃₃	1.2×10^{-7}	21.2°	9.4°	8.8°	
Fe ₈₈ Mo _{7.5} B _{6.5}	1.4×10^{-7}	26.1°	16.5°	7.4°	3.3°
Ag ₇₉ Co ₂₁	7.5×10^{-7}				

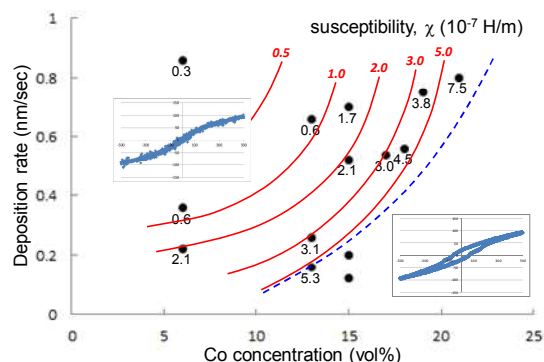


Fig.1 Dependence of susceptibility of Ag-Co granular films on fabrication conditions.

針状磁気プローブによる低透磁率材料の微小残留磁気の測定

南谷 保, 若浦 大, 山田 外史
(金沢大学)

Measurement of minute remnant magnetization by Needle Type Magnetic Probe
Tamotsu Minamitani, Dai Wakaura, Sotoshi Yamada
(Kanazawa University)

はじめに

地磁気レベル以下の微小な残留磁気(10^{-8} ~ 10^{-6} T)を簡易な測定器にて測定することは、古代の地磁気、雷電流の挙動の解明などに大きく貢献することが期待されている。しかし、これまで微小な残留磁化の測定には磁気シールド、高感度の磁気センサが必要であり大規模な測定システムとなっていた。そこで、磁気シールドなしで汎用の磁気センサ(たとえばMI,GMRセンサ)を用いて、2次元成分の残留磁気を簡易に測定できることを報告した¹⁾。課題は3次元成分の測定であり、そのためには穴径を小さくすることが必要であった。そこで、GMRセンサを付けた針状磁気プローブを用い、直交する小さな2個の穴にて3方向成分を測定することを行ったので報告する。

測定原理

立方体形状の円筒穴中では磁束密度ベクトルがほぼ均一であることを利用して、Fig.1の測定システムを考案した。センサは試料の円筒穴中央分に配置し、センシング方向を穴に対し垂直方向(x軸方向)とする。この装置ではセンサを固定し、試料を回転させる構造となっている。磁気センサからみて、地磁場は均一成分であり直流成分、試料の磁化成分は円筒穴の磁束密度は回転させることで交流成分として検出される。磁気センサの直流成分をカット、交流成分を取り出すことで、穴と直交する円筒穴内の磁束密度の振幅とx軸に対する磁化方向が推定できる。

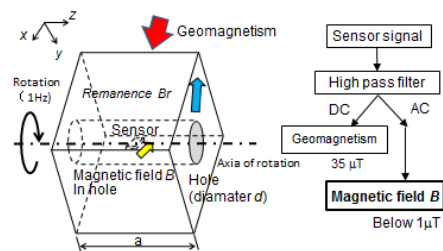


Fig. 1 Detection system of remnant magnetization.

試料サイズと磁束密度の関係

針状磁気プローブの針形状の寸法は 0.4×0.4 mm, 長さ30 mmであり, MI²⁾センサ(11×2 mm)より円筒穴径を小さくできる。これにより、試料のサイズはこれまでの試料($a=35$, $d=13$ mm)より大幅に小型化が可能となる。かつ、試料寸法比 a/d (試料長/穴直径)と穴内の磁束密度の大きさはFig.2の関係があり、小型化により円筒穴内の磁束密度が数%大きくなる。

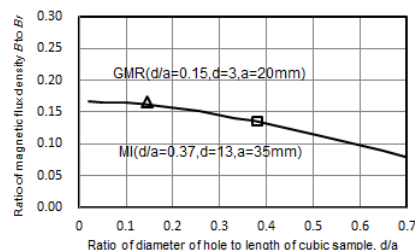


Fig. 2 Ratio of B in the center of hole to remanence Br .

実験結果と考察

測定試料($a=20$, $d=3$ mm)は、マグネタイトの微粒子をエポキシ系樹脂に重量濃度1.0%で混ぜ固めて作成した。針状磁気プローブを用いて試料の円筒穴内の磁束密度を測定した結果をFig.3に示す。この信号をロックインアンプにて処理することにより、 10^{-6} Tレベルの磁束密度、信号の位相から磁化方向が測定できることが確認できた。

以上から、径の小さな針状GMR磁気プローブを用いることで、小さな試料サイズで方向の異なる2穴を開け、2穴内の磁気計測を行うことで3方向成分の測定が可能となる。

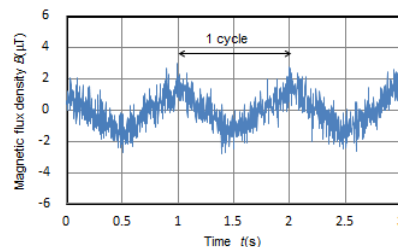


Fig. 3 Measured signal by GMR probe.

参考文献

- 1) T.Minamitani, D.Wakaura, S.Yamada, *Digest of 2014 JIEE Annual Conference*, 2-127, 2014.
- 2) Nanotesla sensor, Aichi Micro Intelligent Co.: http://www.aichi-mi.com/magnetometer/type-dh_en.htm.

耐酸化保護層を形成した磁性膜被覆磁気力顕微鏡探針

加藤慶一・大竹充・二本正昭・稲葉信幸*・桐野文良**

(中央大, *山形大, **東京藝大)

Magnetic Force Microscope Tip Prepared by Coating with Magnetic Film and Oxidation Protection Layer

Keiichi Kato, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Nobuyuki Inaba*, and Fumiyoshi Kirino**

(Chuo Univ., *Yamagata Univ., **Tokyo Univ. Arts)

はじめに 磁気力顕微鏡 (MFM) は磁気記録媒体などの磁化状態解析に幅広く用いられている。MFM探針は、一般的に、Siなどの非磁性探針に磁性膜を被覆することにより作製され、観察試料から漏洩する磁場勾配を探針で検出し、磁化状態を観察する。そのため、探針形状に加えて、磁性探針の先端半径や磁性膜の酸化状況などが観察分解能に大きな影響を及ぼす。しかしながら、被覆膜の酸化が探針性能に及ぼす影響について検討した報告は殆どない。本研究では、耐酸化保護層を形成することにより、酸化耐性に優れたMFM探針の作製を試みた。

実験方法 膜被覆には、超真空スパッタリング装置を用いた。市販の先端半径 4 nmのSi探針に 20 nm厚の磁性膜および 2 nm厚の保護層を被覆することによりMFM探針を作製した。磁性膜材料としてFeを、保護層材料としてC, B, Siなどを用いた。また、比較のため、保護層無しのMFM探針も作製した。恒温恒湿槽を使用して磁性探針の酸化を行い、保存日数が分解能に及ぼす影響を調べた。磁気力顕微鏡の分解能評価では、真空排気型MFMを用いた。また、構造および磁気特性の評価には、膜被覆時に同時にSi基板上に形成した磁性膜を使用した。

実験結果 Fig. 1にSi基板上に形成したC保護層有りおよび無しのFe膜の飽和磁化 (M_s) の酸化試験経過日数依存性を示す。保護層無しの膜では、1日経過で M_s が急激に減少し、日数の増大に対応して継続的に減少する傾向が確認される。一方、保護層有りの膜の M_s は、ほぼ一定値を保っていることが分かる。次に、分解能評価を行うために、500~1800 kFCIで記録された試作垂直媒体のMFM観察を行った。Fig. 2(a)に酸化試験前の保護層無しのMFM探針を用いて観察を行った結果を示す。また、Fig. 2(b)には、記録ビット像のパワースペクトルを示す。1700 kFCI (ビット長: 14.9 nm) までは、ビット像およびパワースペクトルにおけるピークを確認することが出来る (Fig. 2(a-4), (b-4))。しかしながら、1800 kFCI (ビット長: 14.1 nm) で記録されたビットを識別することはできない (Fig. 2(a-5), (b-5))。したがって、分解能は $14.9/2=7.5$ nm と $14.1/2=7.1$ nmの間の 7.3 ± 0.2 nmと評価できる。Fig. 3にC保護層有りおよび無しのMFM探針の分解能の酸化試験経過日数依存性を示す。保護層無しの場合、被覆磁性膜の酸化に伴い、分解能が低下していることが分かる。一方、C保護層を用いることで、酸化耐性が向上し、恒温恒湿槽に保管を継続しても、分解能がほぼ一定に保たれていることが分かる。当日は、保護層の種類が分解能の酸化耐性に及ぼす影響についても報告する。

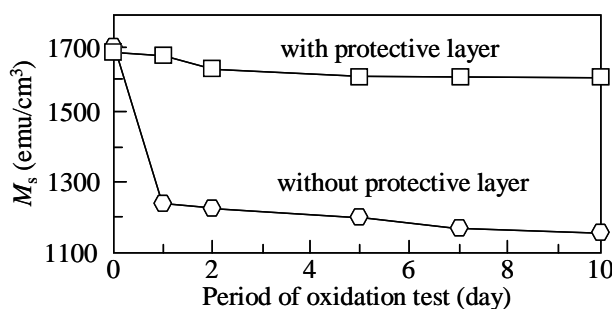


Fig. 1 Saturation magnetization values of Fe films without and with C protective layer deposited on flat Si substrates.

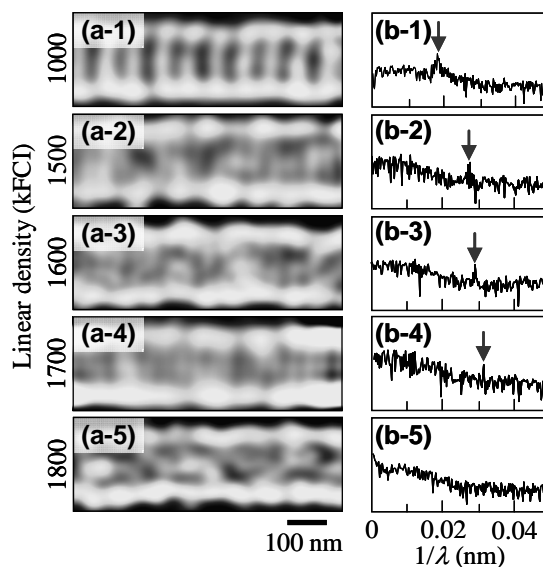


Fig. 2 (a) MFM images of a perpendicular recording medium observed by using an MFM tip coated with Fe film without C protective layer. (b) Power spectra analyzed for the magnetic bit images in (a).

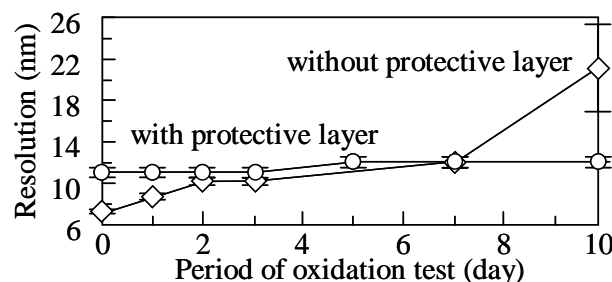


Fig. 3 Resolutions of MFM tips coated with Fe films without and with C protective layer.

Co フェライトを用いた磁気力顕微鏡用プローブの作成とその特性

深谷周作 高橋尚孝 劉小晰
(信州大学)

Preparation and properties of magnetic force microscope probes using Co-Ferrite

Syusaku Fukaya Naotaka Takahashi Xiaoxi Liu
(Shinshu University)

はじめに

Nd-Fe-B のように強力な薄膜磁石の表面の磁区構造の観察を行う際、商用の MFM プローブの保磁力が小さく計測試料の漏洩磁界の影響によりプローブの磁化の方向が反転してしまい正確な観察が行えない。そのため高い保磁力を持つ MFM プローブの製作が必要になる。

本研究では、Si 製の AFM プローブ上に磁性薄膜を成膜することにより高い保磁力を持つ MFM プローブ製作を目的としている。本研究における磁性材料として Co フェライトを選択した。Co フェライトは安価であり、酸化による影響が少ないと考えられるのでプローブの寿命が長くなると考えられる。

実験方法

成膜方法には対向ターゲット式スパッタリング装置(FTS)を用いる。今回 FTS を用いたのはプラズマによる基板へのダメージが DC マグネトロン式スパッタリング装置と比べ少なく、これまでの研究からカンチレバー上に成膜した場合 FTS のほうがより先鋭的になることが確認されているからである。¹⁾

チャンパー内の到達圧力は 5.0×10^{-4} Pa 以下とし、Ar ガスを導入してスパッタガス圧を 4.0×10^{-4} Pa、基板加熱温度を 150 °C から 400 °C まで変化させ成膜を行った。また、それらの試料に対して大気中での熱処理を行った。次に室温においてガス圧を 0.5 Pa から 0.1 Pa まで変化させ成膜した。試料振動型磁力計(VSM)を用いて磁気特性を、X 線回折(XRD)を用いて結晶構造を評価し、さらに最適な条件を確認後 MFM プローブの作製を行う。

実験結果

Fig. 1 に各基板加熱温度における熱処理前と熱処理後の保磁力について示す。全体において熱処理を行うことによって保磁力の増加が確認された。最大の保磁力は、基板加熱 350°C、ポストアニール 400°C 5 時間行うことで垂直方向において約 6.8 kOe、面内方向において 6.1 kOe の保磁力が確認された。同条件において MFM プローブ上に成膜を行い、Nd₂Fe₄B 薄膜の観察を行った。Fig. 2 が得られた MFM 画像である。しかし、同プローブのアルミ製反射膜に剥離が認められた。

この問題の解決のために室温において高い保磁力を得るためにガス圧を変化させてスパッタを行った。Fig. 3 に各ガス圧に対する保磁力を示す。この図が示すように保磁力は 0.1 Pa の時に最も大きく垂直方向で約 4.9 kOe、面内方向に約 3.5 kOe となりガス圧の上昇とともに減少が見られた。このように室温においても熱処理を行った場合に近い保磁力を得ることに成功した。

各試料の結晶構造、室温で作製したプローブでの観察結果等のデータについては学会時に報告する。

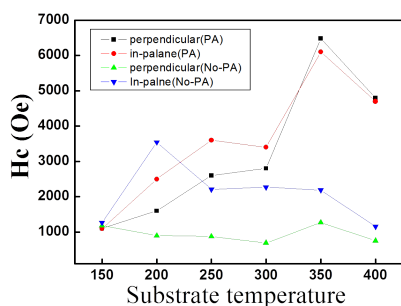


Fig.1 Coercivity of each substrate heating temperature

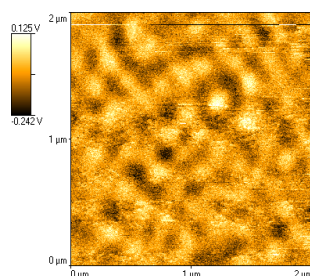


Fig.2 MFM image

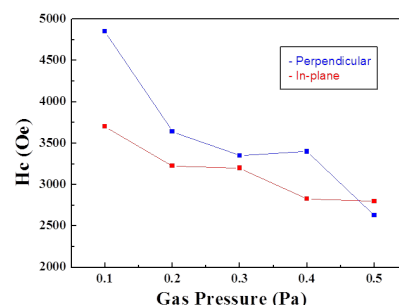


Fig.3 Coercivity of each gas pressure

参考文献

- 1) X. liu, S. Isomura, A. Morisako, IEEE Trans. MAG, 48(11), 3673-3676, (2012)

交番磁気力顕微鏡を用いた高磁化率 Ag-Co 超常磁性探針による FePt 永久磁石厚膜の表面近傍磁場イメージング

中山翔太、岩井 航、江川元太、木下幸則、吉村 哲、齊藤 準
(秋田大学)

Near-contact magnetic field imaging on FePt hard magnet films by alternating magnetic force microscopy with a high-susceptibility superparamagnetic Ag-Co tip
S. Nakayama, W. Iwai, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura and H. Saito
(Akita University)

はじめに 我々は、試料表面近傍での磁場計測を可能にする交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発し、高密度磁気記録媒体に対してソフト磁性探針を用いて、直流磁場の高空間分解能観察に成功している^{1),2)}。ここでは、励振している探針に探針の共振周波数と異なる交流磁場を印加して探針磁化を周期的に反転させて探針試料間に非共振の交番磁気力を発生させ、この交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用して、試料からの直流磁場を計測している。しかしながら、永久磁石等の極めて強い直流磁場を発生する試料の観察時には、ソフト磁性探針の、1) 試料表面への磁気吸着、2) 探針磁化が試料からの直流磁場により飽和し、周波数変調現象が生じない、等の問題があり、解決策として、探針磁化が磁場に比例し飽和せず、磁化値を磁場で制御できる新たな探針が必要になる。本研究では、我々が最近開発した高い磁化率を有するグラニューラー構造の Ag-Co 超常磁性探針³⁾を用いて、永久磁石薄膜の磁区観察を試みた結果を報告する。

方法 上記の A-MFM において、探針に超常磁性探針を用いた場合には、探針の交流磁化は、試料からの直流磁場による探針の直流磁化とは独立に、交流磁場方向のみに磁場に比例して発生することから、探針試料間の磁気力勾配は次式となる。 $(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{dc} + M_z^{ac} \cos(\omega_m t)) (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2 + \partial^2 H_z^{ac} \cos(\omega_m t) / \partial z^2)$ (1) ここで探針に空間的に均一な交流磁場を印加する場合、 $(\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \ll 1$ より(1)式の ω_m 成分は以下となる。 $(\partial F_z / \partial z)(\omega_m t) \cong M_z^{ac} (\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2) \cos(\omega_m t)$ (2) したがって、(2)式により誘起される周波数変調の ω_m 成分を、探針振動波形を周波数復調後にロックイン検出することで、交流磁場方向に平行な直流磁場の勾配を計測することができる。自作した FePt 磁石厚膜 (膜厚 300 nm) の観察は、市販の走査型プローブ顕微鏡 (L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製) に、探針に交流磁場を印加するための電磁石を試料側に付加して A-MFM 装置系を構成し、大気中で行った。探針は、磁化率 4.5×10^{-7} H/m の Ag-Co 薄膜 (100 nm) を成膜した超常磁性探針を用いた。

結果 Fig.1 に、膜面垂直方向に直流消磁した FePt 磁石厚膜の表面像(a)、磁場強度 (振幅) 像(b)、磁場極性 (位相) 像(c)、をそれぞれ示す。磁場強度像において得られた明部分の形状やサイズが、通常の MFM 測定で観察された磁区の形状や大きさとほぼ同じであること、また磁場極性像において得られた明および暗の部分の面積比が、ほぼ 1 : 1 であることから、本 A-MFM で得られた像が、FePt 磁石厚膜の消磁状態を反映した明瞭な垂直方向の磁場像で有ると言える。Fig.2 の(d) および(e) に、Fig.1 の(b) 磁場強度像および(c) 磁場極性像におけるラインプロファイルを示す。垂直磁場の強度がゼロとなる場所を境として磁場極性の反転 (位相差は 180° 変化) が明瞭に観察されており、かつ磁場極性像のラインプロファイルでは、位相が一定値を示しているプラトーな部分においてノイズが非常に小さい傾向もみられた。このことは、本超常磁性探針の磁化が、印加した交流磁場 (FePt 厚膜面垂直) 方向のみに成分をもって時間変化し、磁化曲線にヒステリシスがないことを示唆する。

参考文献 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 109, 07E330 (2011). 2) 伊藤 他, 第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, 27pD-2. 3) 吉村 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演会 発表予定

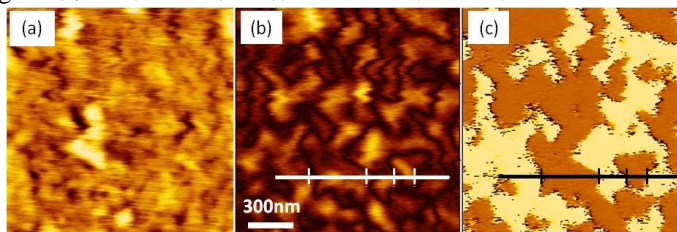


Fig.1 (a) Topographic image, (b) Amplitude image, and (c) phase image of FePt thick film.

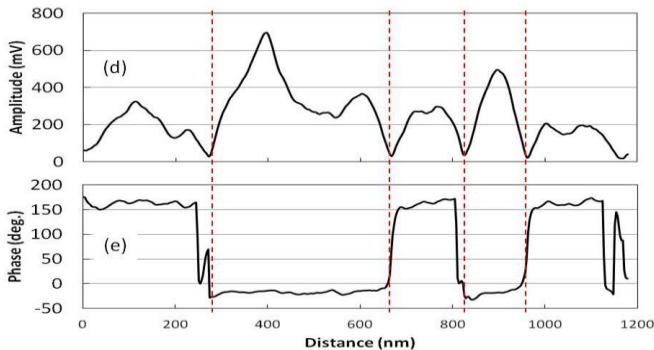


Fig.2 Line profiles of (d) Amplitude image and (e) phase image of FePt thick film.

ソフト磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 磁気記録ヘッドの交流磁場イメージング

伊集院寛仁、滝口史典、江川元太、木下幸則、吉村 哲、齊藤 準
(秋田大学)

AC magnetic field imaging of magnetic writing heads by alternating magnetic force microscopy
using a soft magnetic tip

Hirohito Ijuin, F. Takiguchi, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura and H. Saito
(Akita University)

はじめに 磁気記録ヘッドの性能評価には、発生する交流磁場を高い周波数まで画像化することが有用である。我々は先に開発した交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) および 10 kOe 以上の保磁力を有する FePt ハード磁性探針を用いることで、磁気記録ヘッドの垂直磁場のヘッド表面近傍での高分解能観察 (空間分解能 10 nm 以下) に成功している [1]。本研究では、さらに高い周波数の磁場を計測するために、高周波磁場応答に有利であり、より大きな飽和磁化を有するソフト磁性探針に着目し、A-MFM の磁気記録ヘッド検査装置への展開を視野に入れて、MHz 帯までの磁場観察を目的として、垂直磁気記録ヘッドを FeCo ソフト磁性探針により観察した。

実験方法 A-MFM は探針の共振周波数と異なる非共振の磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用している。ここでソフト磁性探針が交流磁場 $H_0^{ac} \cos(\omega_m t)$ により同期して磁化される場合、磁気力による探針の実効的なバネ定数の変化は以下となる。

$$\left(\frac{\partial F_m}{\partial z}\right) = \Delta k_{eff} = \left(M_0^{ac} \cos(\omega_m t)\right) \left(\frac{\partial^2 H_0^{ac} \cos(\omega_m t)}{\partial z^2}\right) \cong (q_{ip}/2) \left(\frac{\partial H_0^{ac}}{\partial z}\right) (1 + \cos(2\omega_m t)) \quad (1)$$

本研究では、探針を 2 次共振周波数 (周波数 $f_{r2} = \omega_{r2}/(2\pi)$) で機械励振し、磁気記録ヘッドの非共振交流磁場 (周波数 f_m) を、探針の 1 次共振周波数 (周波数 f_{r1}) との関係において、 $f_{r2} - 2f_m = f_{r1}$ を満たすように調整することで、磁気記録ヘッドの交流磁場により探針の 1 次共振周波数の振動を誘起し、その振動強度をロックインアンプで計測した。ここで、 $f_{r2} = 408.5$ Hz, $f_{r1} = 69.1$ Hz, $f_m = 169.7$ Hz であった。実験には市販の走査型プローブ顕微鏡 (JEOL・JSPM-5400) を使い、大気雰囲気中で行った。用いた FeCo ソフト磁性探針は Si 探針に FeCo 薄膜を 30 nm 成膜して自作した。ヘッド電流は 40 mA_{p-p} とし、リフト高さは約 10 nm とした。

実験結果 Fig.1 (a), (b) に観察した交流磁場の振幅像とそのラインプロファイルを示す。図より明瞭な交流磁場像が観察されていることがわかる。ソフト磁性探針を用いた場合、探針磁化が交流磁場に同期して変化していると考えられるが、(1) 式の探針磁化と磁場勾配の積は、発生磁場の方向で最大となり、そのときの強度がロックイン検出されるので、磁場方向によらずに磁場の大きさが計測されることになる。図に見るように、強い磁場は主磁極内部で発生していることがわかる。このことは、主磁極内部で強い垂直磁場が発生していることによるものと推察される。一方、ヘッドギャップにおいては、強度はゼロにならないが、これは面内磁場を主に計測しているものと推察される。本手法では、試料表面近傍での磁場計測が可能であるので、講演では磁場強度の探針-試料間距離の距離依存性の結果を報告する。あわせて、(1) 式の実効バネ定数の直流変化項による探針振動の位相変化を用いた従来手法 [2] や、ハード磁性探針を用いた A-MFM との比較を行い、本手法の特徴を明らかにする。

参考文献

[1] H. Saito, W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa and S. Yoshimura, J. Appl. Phys. 107, 09D309(2010)

[2] 張 開鋒 他, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, 30a-A8-5 (2013 春)

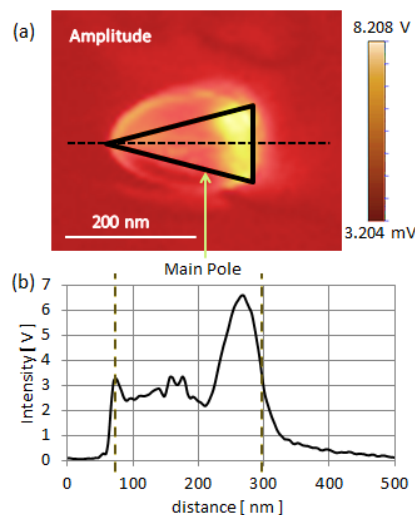


Fig.1 Amplitude image of AC magnetic field [(a)] and its line-profile [(b)] for a perpendicular magnetic writing head.

磁気力顕微鏡におけるソフト磁性探針の交流磁場応答を用いた性能評価方法の提案

H. Qi², 岡安慎介¹, F. Zheng², 江川元太¹, 木下幸則², 吉村哲¹, 齊藤準¹

¹秋田大学, ²秋田大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー

Proposal of evaluation method of soft magnetic MFM tip's performance by AC magnetic field response

H. Qi², S. Okayasu¹, F. Zheng², G. Egawa¹, Y. Kinoshita², S. Yoshimura¹, and H. Saito¹

¹Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

²Venture Business Laboratory, Akita University

はじめに 磁気力顕微鏡(MFM)は、磁性体試料と磁性探針の相互作用を利用して磁場を画像化するので、探針の磁気特性の把握は重要である。磁気力顕微鏡探針としては、ハード磁性探針が主に用いられているが、近年ではソフト磁性探針もその磁場応答性を利用した用途で使用されてきている^{1, 2)}。したがってソフト磁性探針の磁場応答性の評価は重要である。本研究ではソフト磁性探針の交流磁場応答性から探針性能である飽和磁場、計測感度を評価する方法を提案する。

方法 磁性探針に交流磁場を印加したときの磁気力の勾配は、探針の振動方向を z 方向とし、この方向に交流磁場 $H_z^{ac} \cos(\omega_m t)$ を印加した場合に次式で与えられる。 $(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{dc} + M_z^{ac}(t)) (\partial^2 H_z^{ac} \cos(\omega_m t) / \partial z^2)$ (1) ここで、 M_z^{dc} は時間変化しない探針磁化成分、 $M_z^{ac}(t)$ は時間変化する探針磁化成分である。理想的なハード磁性探針の場合 $M_z^{ac}(t) = 0$ であり、理想的なソフト磁性探針の場合 $M_z^{dc} = 0$ である。 $M_z^{ac}(t)$ が交流磁場に比例して変化する場合 ($M_z^{ac}(t) = M_z^{ac} \cos(\omega_m t)$)、(1)式は以下となる。

$$(\partial F_z / \partial z) = (M_z^{ac} / 2) (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) + M_z^{dc} (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \cos(\omega_m t) + (M_z^{ac} / 2) (\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2) \cos(2\omega_m t) \quad (2)$$

ここで、交流磁場の周波数 ω_m が探針の共振周波数 ω_0 と異なる場合、(2)式の磁気力の周期的変化により、探針振動に周波数変調が発生する³⁾。したがって、周波数変調による探針振動の側帯波成分 ($\omega_0 \pm n\omega_m$; n は周波数変調の次数) の強度を測定することにより、探針磁化の磁場応答性の評価が可能になる。そこで、本研究では市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製)に、探針に交流磁場を印加するための電磁石を付加して、磁性探針に 89 Hz の交流磁場を印加し、その振動スペクトルをスキャナラライザ[®]で測定した。

結果 Fig.1に Ni-Fe 探針における探針振動スペクトルの一例と 2 次の周波数変調の側帯波成分の強度 $I(2\omega_m)$ の交流磁場振幅 H_{ac} 依存性を示す。 $I(2\omega_m)$ は H_{ac} の増加に伴い、その 2 乗に比例して増加した後 1 乗に比例して変化する。この現象を理解するために、 $(\partial F_z / \partial z) = M_z(t) (\partial^2 H_z(t) / \partial z^2) \propto M_z(t) H_z(t)$ の関係を用い、Fig.2(a)のように探針磁化が磁場に比例して増加した後飽和する磁化曲線を仮定し、探針に交流磁場を印加した際の $M_z(t) H_z(t)$ の時間変化波形の一例として交流磁場振幅が探針の飽和磁場 H_s の 2 倍の場合のものを Fig.2(b)に、Fig.2(c)に $M_z(t) H_z(t)$ の $2\omega_m$ のフーリエ級数成分 $I(2\omega_m)$ の H_{ac} 依存性の計算結果を示す。Fig.2(c)のように、 $I(2\omega_m)$ は H_{ac} の増加に伴い、実験結果と同様に、その 2 乗で H_s まで増加した後 1 乗に比例して変化する。したがって、本手法により、ソフト磁性探針の飽和磁場を求めることが可能になることがわかる。さらに、 H_s での $I(2\omega_m)$ の値を様々な探針について比較することで、探針の計測感度の評価が可能となる。講演では、実験で観測される高次の探針振動スペクトルについても計算結果と比較検討した結果および評価した探針により観察される MFM 像との相関についても述べる。

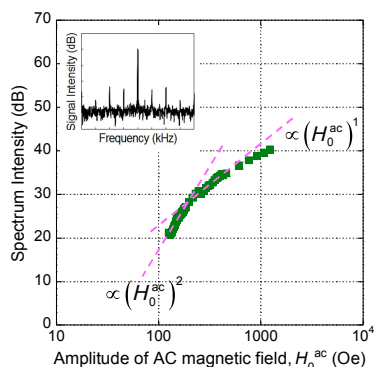


Fig.1 Dependence of AC magnetic field amplitude on the intensity of second harmonics of tip's frequency modulated oscillation for Ni-Fe MFM tip.

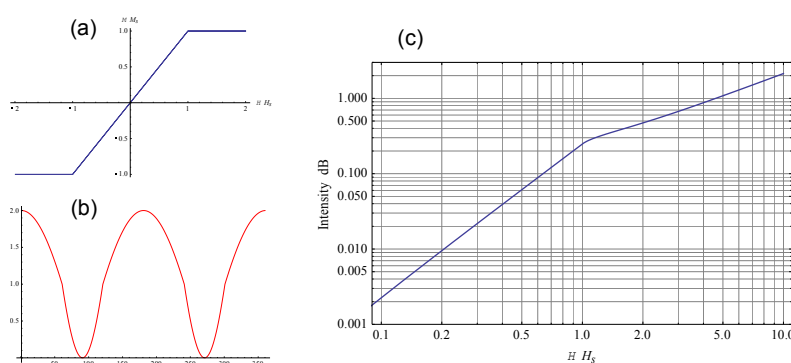


Fig.2 (a) Model of MFM tip's M - H curve, (b), waveform of $M_z(t)H_z(t)$, (c) Dependence of AC magnetic field amplitude on the intensity of calculated second harmonics of tip's frequency modulated oscillation for MFM tip.

参考文献 1) 伊藤 他, 第 35 回日本磁気学会学術講演会概要集, 27pD-2. 2) S. Okayasu et al., 2nd ICAUMS, 2pPS-109 (2012). 3) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 07E330 (2011).