

周波数ドメインにおける磁化動特性測定用 Kerr 顕微鏡の開発

田丸慎吾、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治
(産総研 ナノスピントロニクス研究センター)

Development of Kerr microscopy for the observation of magnetization dynamics in frequency domain

S. Tamaru, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa
(AIST, Spintronics Research Center)

はじめに

微小な磁性体を用いた高周波デバイスの研究を行う上で、磁化の動的挙動を広帯域にわたって、高い空間分解能で測定する事は極めて重要である。この目的には、これまで Micro Focus-Brillouin Light Scattering (MF-BLS)[1]や Time Resolved-Scanning Kerr Effect Microscopy (TR-SKEM)[2]が使われてきているが、MF-BLS は入射光の弾性散乱の為、GHz より低い周波数の測定が困難であり、また TR-SKEM は多くの振動モードを一度に励起してしまうなど、それぞれ一長一短ある。我々は、広帯域、高空間分解能で磁化動特性を測定するため、TR-SKEM を発展させ、単一周波数の連続マイクロ波で興味あるモードを選択的に励起し、それによって生じたスピン波を Kerr 効果を用いて検出する、Spatially Resolved Ferromagnetic Resonance-Scanning Kerr Effect Microscopy (SRFMR-SKEM) という手法を開発した。[3,4]

実験方法及び結果

図1に SRFMR-SKEM のブロック図を示す。半導体レーザーは 10 MHz の基準クロックに同期して波長 408 nm、半値幅約 20 ps のパルス光を発生する。またマイクロ波発振器も基準クロックに位相同期した 8 GHz のマイクロ波を発生する。このマイクロ波に伴う高周波磁場が磁性膜に印加され、スピン波が励起される。パルス光はマイクロ波の決まった位相タイミングで磁性膜を照射し、反射光はその時点における磁化を反映する Kerr 回転を示す。低周波パルスによってマイクロ波は 180 度位相変調され、パルス光の入射タイミングは周期的に反位相に切り替えられる。よってフォトディテクタ出力を変調周波数に同期してロックイン増幅する事により、高感度でスピン波の複素振幅が得られる。試料をスキャンしながらこの測定を繰り返す事により、スピン波の空間分布を測定する事が出来る。

図2(a)に試料の構造を示す。この試料では、100 nm 厚のパーマロイ(Py)膜が 100 μm 四方の正方形に微細加工され、その下に平面導波路(CPW)が作りこまれている。この CPW にマイクロ波が流れ、Py 膜中にスピン波が発生する。

図2(b)に 520 Oe のバイアス磁場中で励起されたスピン波の振幅と位相の 1 次元分布を示す。位相分布よりその波長は約 15 μm である事がわかる。今回用いた Py 膜の幅は減衰定数よりも広いので、中心付近で励起されたスピン波が、両側に伝搬しつつ指数関数的に減衰し、Py 膜の端に到達する頃にはかなり弱くなる。その為 CPW 近傍では振幅が単調に減衰し、両端近傍でのみ進行波と反射波の干渉が見えている。講演では、この測定手法の詳細及び、磁場や試料形状等を変えた際の磁化動特性の測定結果について報告する。

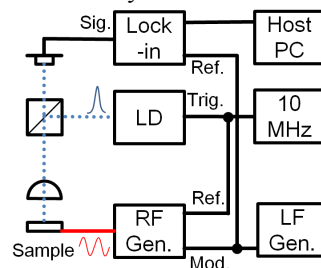


図1 SRFMR-SKEM ブロック図

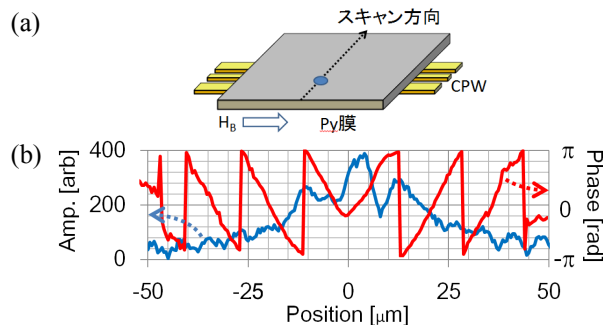


図2(a) 試料の構造、(b) 図2(a)の線上で観測されたスピン波の振幅(青線)と位相(赤線)の 1 次元分布

参考文献

- 1) A. A. Serga et al., Appl. Phys. Lett. 89, 063506 (2006)
- 2) W. K. Hiebert et al., Phys. Rev. Lett. 79, 1134 (1997)
- 3) S. Tamaru et al., J. Appl. Phys. 91, 8034 (2002)
- 4) S. Tamaru et al., Phys. Rev. B 70, 104416 (2004)

謝辞

本研究は、JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」の支援によって行われた。

垂直磁化 $L1_0$ -FePd 薄膜における低ダンピング定数

○飯浜賢志, 水上成美*, 永沼博, 大兼幹彦, 宮崎照宣*, 安藤康夫

(東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻, *東北大学原子分子材料科学高等研究機構)

Low magnetic damping in $L1_0$ -FePd thin films with a large perpendicular magnetic anisotropy

S. Iihama, S. Mizukami*, H. Naganuma, M. Oogane, T. Miyazaki*, and Y. Ando

(Department of Applied Physics, Tohoku Univ., *WPI-AIMR, Tohoku Univ.)

はじめに

大きな垂直磁気異方性を有する合金薄膜は、磁気抵抗ランダムアクセスメモリの高い熱安定性を確保するための磁性電極材料として重要である。他方、スピン注入磁化反転における反転電流密度は、垂直磁気異方性定数(K_u^{eff})とギルバートダンピング定数(α)に比例する。よって、高い垂直磁気異方性を保ちつつ小さな α を示す材料の探索が必須である。これまで我々は、垂直磁化 FePt 薄膜における磁化才差ダイナミクスを光学的検出を行い、比較的大きな α 値 (0.06) を報告した¹⁾。Pd は Pt に比べて軽い元素であるため、FePd の α は FePt のそれに比べ小さな値を示すことが期待される。本研究では比較的大きな垂直磁気異方性と小さな α を兼ねることが期待される $L1_0$ -FePd 薄膜において磁化才差ダイナミクスを測定し、 α を評価することを目的とした。

実験方法

試料は超高真空マグネトロンスパッタ法により作製した。膜構成は SrTiO₃ (001)単結晶基板/ FePd (20 nm)/Ta 保護層とした。薄膜試料は、基板温度 T_s で成膜した後、温度 T_a で真空中熱処理した。磁気特性は振動試料型磁力計(VSM), 結晶構造を X 線回折で評価し、磁化才差ダイナミクスはフェムト秒パルスレーザーを用いた全光学的ポンプ・プローブ法により検出した。

実験結果

温度 T_s を様々に変えて作製したところ、 T_s が 300°C 以上の時に垂直磁気異方性を有する試料が得られた。また T_a が 500°C 以上の場合に表面平坦性が良く、かつ大きな垂直磁気異方性を示す試料が得られた。Fig. 1(a)に $T_s = 300^\circ\text{C}$ および $T_a = 500^\circ\text{C}$ で作製した試料の磁化ダイナミクス測定結果を示す。外部磁場は 20 kOe とし、磁場角度 θ_H を様々に変えている。非常に周波数が速く減衰の小さい才差運動が観測されている。それぞれの波形に減衰振動関数をフィッティングすることで才差周波数 f および緩和時間 τ を求め、それらから実効 α 値 α_{eff} を評価した。その際 $\alpha_{\text{eff}} = 1/2\pi f\tau$ の関係式を用いた。Fig. 1(b)に異なる T_a で作製した試料の α_{eff} の磁場角度 θ_H 依存性を示す。 α_{eff} は θ_H に対して大きく変化している。これは異方性分散や 2 マグノン散乱といった磁気的な不均一性の影響によるものと考えられる。 $T_a = 500^\circ\text{C}$ の試料における α_{eff} の最小値は 0.006 であるため、FePd 垂直磁化膜の α は 0.006 よりも小さい可能性がある。この値は、垂直磁気異方性材料薄膜の中でも最も小さな値の一つである。

【謝辞】

本研究の一部は科研費(No. 24226001), 田中貴金属, NEDO 若手研究 Grant(No. 11B07018d), FIRST プログラム, JSPS 特別研究員奨励費(No. 26-4778)の援助のもと行われた。

参考文献

- 1) S.Iihama *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 073002 (2013),

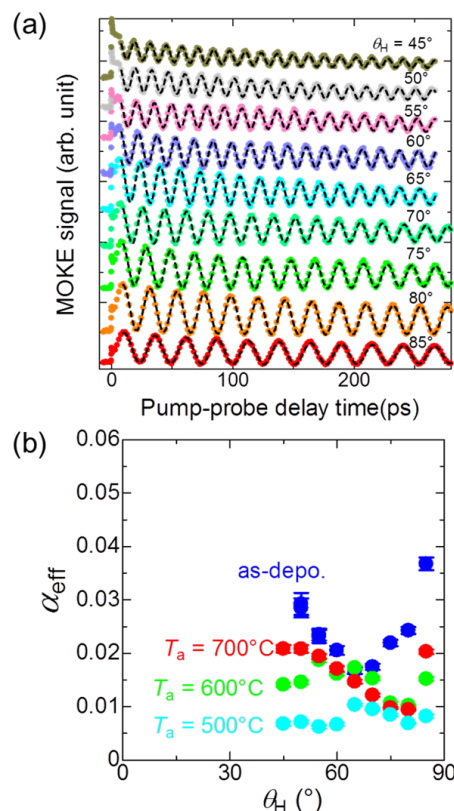


Fig. 1(a) Typical TRMOKE signals for the films with $T_s = 300^\circ\text{C}$ and $T_a = 500^\circ\text{C}$ with different field angle θ_H at fixed external field of 20 kOe. (b) θ_H dependence of α_{eff} obtained from the fitting with different T_a .

CoPtCr-SiO₂ 媒体の反転磁区形成時の実効ダンピング定数○日向 慎太郎^{a,b)}, 斉藤 伸^{b)}, 高橋 研^{b)}, 佐橋 政司^{b)}^(a)日本学術振興会特別研究員 (PD), ^(b)東北大学Effective damping factor for CoPtCr-SiO₂ medium with partially switched magnetic domains○Shintaro Hinata^{a,b)}, Shin Saito^{b)}, Migaku Takahashi^{b)}, and Masashi Sahashi^{b)}^(a)JSPS Research Fellow (PD), ^(b)Tohoku University

はじめに マイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) は, trilemma 課題打破に有用な技術として提案され, 近年実際の媒体へのアシスト磁化反転結果が報告され始めた¹⁾. 実用化には第一世代として CoPt 基合金を用いたグラニューラ媒体の適用が検討されている²⁾. MAMR 媒体の材料開発にあたっては, 静的な磁気定数 (飽和磁化 M_s , 一軸結晶磁気異方性定数など) に加え, 動的磁気定数, 特にマイクロ波の応答性に対応するダンピングファクター α の把握が重要である. 一般にグラニューラ媒体中の磁化が実効的に感じるダンピングファクター α_{eff} の評価は, 磁化が膜面直方向に飽和した状態での強磁性共鳴 (Ferromagnetic Resonance: FMR) の線幅から評価される^{1,3-4)}. しかしながら, 実媒体での記録時における磁化状態では, 上向きおよび下向きの磁化が膜中に混在しており, 磁性結晶粒は逆向きの磁化から粒間交換結合の影響を受けて歳差運動することとなるため, α_{eff} は磁化状態に依存して異なると考えられる. 本研究では, 粒間交換結合を変化させた Co₈₄Pt₁₆Cr₁₀-8mol(SiO₂)グラニューラ媒体について Q-band FMR を測定し, 媒体の磁化状態と α_{eff} との相関について検討したので報告する.

実験結果 粒間交換結合の調整には, 磁性層の成長初期部での結晶粒同士の接触度合いを変化させた. その具体的な手法としては下地層の成膜 Ar ガス圧 $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$ を変化させ, Ru 下地層の表面凹凸を変化させた. 図 1 に一例として表面凹凸の大きい $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}} = 8 \text{ Pa}$ の Ru 下地上に作製したグラニューラ媒体における FMR 信号を種々の磁化状態について示す. 各信号の相対高さは媒体の磁化 M/M_s に対応しており, 最上段および最下段の信号はそれぞれ磁化を上向きおよび下向きに飽和させた状態での共鳴に対応している. また, 赤および青の実線で示された FMR はそれぞれ反転磁界 H_{sw} の大きな上向きに磁化した結晶粒, および H_{sw} の小さな下向きに磁化した結晶粒の FMR に対応している³⁻⁴⁾. 上向き磁化の FMR に注目すると, 磁化飽和状態 ($M/M_s = 1$) において, 磁界約 2.4 kOe で線幅 $\Delta H_{\text{DC}}^{\text{res}}$ が約 500 Oe の FMR が観測された. また, 磁化反転の進行とともに共鳴磁界は低減し, かつ $\Delta H_{\text{DC}}^{\text{res}}$ は増大していくことがわかった. 図 2 には CoPtCr-SiO₂ グラニューラ媒体において (a) 上向きおよび (b) 下向きに磁化した結晶粒による FMR 線幅 $\Delta H_{\text{DC}}^{\text{res}}$ の磁化状態依存性を種々の $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$ 毎に示す. 副軸には $\alpha_{\text{eff}} = \Delta H_{\text{DC}}^{\text{res}} \times \gamma / 2\omega$ により導出した実効ダンピング定数を記載した. 上向き磁化起因の α_{eff} は $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}} = 0.6 \text{ Pa}$ の試料では $M/M_s = 1$ から 0.65 への減少により 0.050 から 0.065 へとわずかな増大であった. 一方, $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}} = 8.0 \text{ Pa}$ の試料では同様の M/M_s の変化で α_{eff} は約 0.025 から 0.115 へと大きく増大した. 下向きに磁化した結晶粒の共鳴の挙動は, 上記の上向きに磁化した結晶粒の共鳴と概ね同様であった. $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$ の大きな Ru 下地層を用いたグラニューラ媒体において α_{eff} の M/M_s に対する勾配が大幅に増大した理由としては, $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$ の増大にともない組織の不均一性が増加し, 粒間交換結合の強度に分散が生じたためと考えている.

参考文献 1) Y. Nozaki *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **112**, 083912 (2012). 2) K. Yamada *et al.*, *Digest of the 24th Magn. Rec. Conference. TMRC*, **24**, 64 (2013). 3) S. Hinata *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **111**, 07B722 (2012). 4) S. Hinata *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **48**, 3177 (2012)

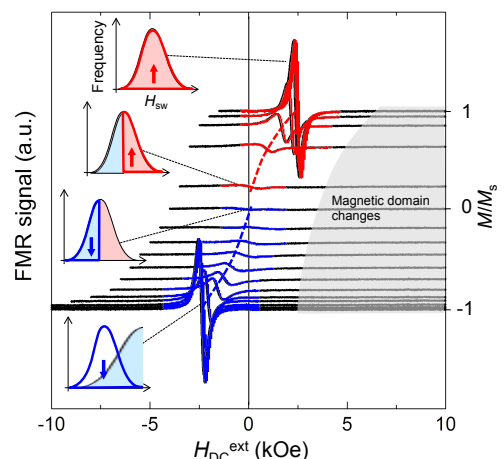


Fig. 1 FMR linewidth for CoPtCr-SiO₂ granular media deposited on Ru underlayer with various Ar pressure $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$.

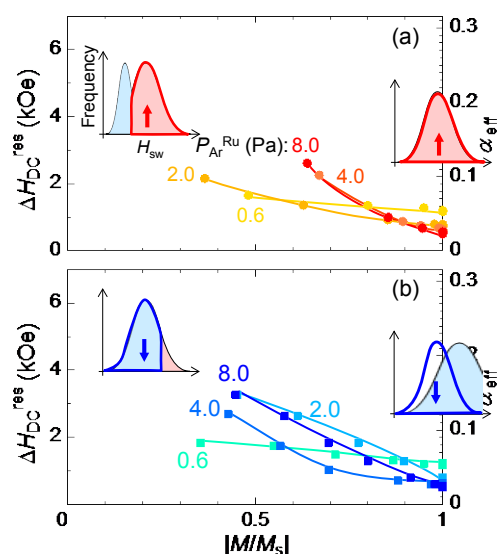


Fig. 2 FMR linewidths for (a) upwardly- and (b) downwardly magnetized grains for CoPtCr-SiO₂ granular media deposited on Ru underlayer with various Ar prewssure $P_{\text{Ar}}^{\text{Ru}}$.

CoPtCr-SiO₂ 媒体の反転磁界分布に及ぼす マイクロ波アシスト磁化反転の効果

○日向 慎太郎^{a,b)}, 斉藤 伸^{b)}, 高橋 研^{b)}, 佐橋 政司^{b)}

(^{a)}日本学術振興会特別研究員 (PD), (^{b)}東北大学)

Effect of microwave assisted switching on switching field distribution of CoPtCr-SiO₂ medium

○Shintaro Hinata^{a,b)}, Shin Saito^{b)}, Migaku Takahashi^{b)}, and Masashi Sahashi^{b)}

(^{a)}JSPS Research Fellow (PD), (^{b)}Tohoku University)

はじめに マイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) は, trilemma 課題打破に有効であり, 現行の CoPtCr 合金を用いたグラニューラ媒体に適用することで更なる記録密度向上が期待されている¹⁾. 実際に MAMR が行われる際には, 媒体は書込ヘッドからの記録磁界を斜め方向に受けて反転する¹⁾. しかしながら一般にマイクロ波アシスト磁化反転の原理検証は, 直流磁界を試料垂直方向に印加した状況でマイクロストリップ線路を用いた周波数掃引型の測定系を用いて行われている²⁻³⁾. 今回我々は, 直流磁界の印加角度を試料の回転により容易に変更可能であり, かつ数 mm の領域に渡って強度が均一なマイクロ波を試料へ入射できる「キャビティ法」⁴⁾によりマイクロ波アシスト磁化反転を試み, その反転磁界分布を評価したので報告する.

実験結果 図 1 にアシスト反転と反転磁化量検出のためのマイクロ波の印加手順を示す. 細い実線は外部磁界 H_{DC}^{ext} を薄膜面直方向に印加した際のフルループを示している. 実験手順は以下の通りである. I) 磁化を飽和させるため, 外部磁界 H_{DC}^{ext} を膜面直方向へ A (最大磁界) まで印加. II) H_{DC}^{ext} を A から B ($H_{DC}^{ext} = 0$) まで掃引する. III) H_{DC}^{ext} の印加角度を変更した後, アシスト反転を促すために Q-band (約 34 GHz) のマイクロ波を印加しながら H_{DC}^{ext} を B から D (任意の折り返し磁界 $-H_{ret}$) へと掃引する. IV) H_{DC}^{ext} の印加角度を膜面直へ戻し, D から E へと磁化状態を維持したまま H_{DC}^{ext} を掃引する. V) H_{DC}^{ext} を E から A まで掃引しマイナーループを閉じる. VI) H_{ret} の値を変更し上記 I) - V) を繰り返す. 反転磁化量は, D から E へと磁界掃引中に弱振幅にて Q-band 強磁性共鳴を測定し, その共鳴磁界から見積もった⁵⁾.

図 2 には種々のマイクロ波強度 P において評価した H_{DC}^{ext} 印加角度 (a) 0 deg (膜面直) および (b) 45 deg における Co₇₄Pt₁₆Cr₁₀-8mol(SiO₂) グラニューラ媒体の反転磁界分布 (Switching field distribution: SFD) を示す. 各 SFD は積分面積が 100%となるように規格化されている. (a) において $P = 0.002$ mW (ほぼアシスト無し) では, SFD は約 3.8 kOe を最頻値とした分布をとった. P を増加させるに従い, SFD の形状全体が低磁界側へ移動した. $P = 160$ mW では 0.002 mW の場合と比較して約 200 Oe 低磁界側へ移動しており, 最頻値は 3.6 kOe となった. 一方, (b) において $P = 0.002$ mW での SFD は 2.5 kOe を最頻値とした分布をとった. P を増加させた場合, SFD の形状としては 5 - 8 kOe 以上の反転磁界領域において形状が約 200 Oe 低磁界側へ移動した. 上記の結果より, 斜め方向の磁界印加においてもマイクロ波アシストによる反転磁界の低減効果が認められることがわかった.

参考文献 1) K. Yamada *et al.*, *Digest of the 24th Magn. Rec. Conference. TMRC*, **24**, 64 (2013). 2) S. Okamoto *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **109**, 07B748 (2011). 3) Y. Nozaki *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **112**, 083912 (2012). 4) S. Hinata, *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 214 (2010). 5) S. Hinata *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 3951 (2011).

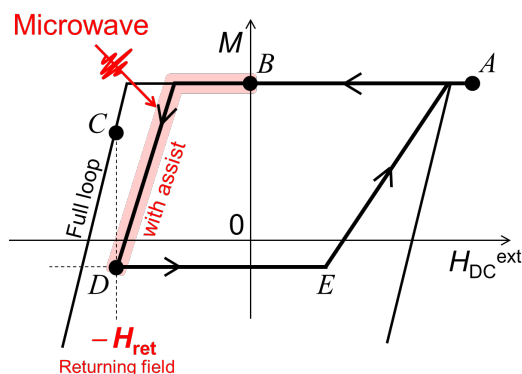


Fig. 1 A schematic of verification method for microwave assisted effect. Grey solid line shows the typical full-loop of the granular media ($\theta_H = 0$ deg).

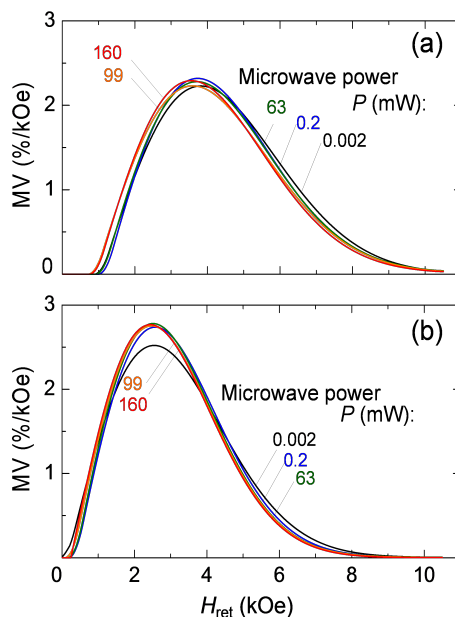


Fig. 2 Switching field distribution at various microwave assisting power for incident angle of DC external field θ_H is (a) 0 deg and (b) 45 deg.

熱アシスト磁気記録における媒体の磁気異方性

赤尾達也, 磯脇洋介, 小林正, 藤原裕司

(三重大)

Anisotropy constant required for Thermally Assisted Magnetic Recording

T. Akao, Y. Isowaki, T. Kobayashi, Y. Fujiwara

(Mie Univ.)

はじめに

熱アシスト磁気記録(TAMR)において必要な媒体の磁気異方性 K_u を考える。まず、熱伝導シミュレーションにより書き込み直後の媒体の冷却速度 $\partial T / \partial x$ を計算した。次に、情報安定性に注目して分子場近似シミュレーションにより必要な K_u を算出した。TAMR では K_u とともにキュリー温度 T_c も指定する必要があるが、 K_u は T_c の関数である。そこで、バルクの K_u に対する膜の K_u の比 K_u / K_{ubulk} というパラメーターを導入する。 K_u / K_{ubulk} が同じであれば K_u が異なっても膜の作製難易度は同じであるが、 K_u / K_{ubulk} を大きくするのは難しい。

計算結果

計算パラメーターは、媒体の膜厚 h 、1 ビットあたりのグレイン数 n 、グレインサイズの標準偏差 σ_D 、書き込み温度 T_w で、Table 1 には h を変化させた結果を示す。媒体を TAMR として使うためには、以下の 3 つの条件を満たす必要がある。(1) 情報の 10 年間保存に必要な媒体の熱揺らぎ指標 $K_u V / kT (330K)$ は、 n と σ_D から決まる熱揺らぎ指標 K_β より大きくなくてはならない。(2) 記録時において、記録位置の 1 ビット前、1 トラック隣の情報安定性から、媒体が要求する最低の冷却速度 $\Delta T / \Delta x$ が決まる。これは $\partial T / \partial x$ より低くなくてはならない。なお、熱伝導シミュレーションにより計算した媒体の冷却速度はダウントラック方向とクロストラック方向でおおよそ等しい。そして、ビットアスペクトレシオを最適化することで、媒体が要求する冷却速度も各方向で等しくすることができるので、ダウントラック方向でのみ考える。(3) 主磁極下の情報安定性より、主磁極下で媒体が情報を保持できる最大の磁界 H_{adj} が決まる。これは必要な記録磁界 H_w より高くなくてはならない。この計算条件では(2)が律速となっていて、これより最低の K_u / K_{ubulk} が決まる。 h が 6 nm から 10 nm に厚くなると、グレイン体積 V も同様に大きくなるが、 K_u / K_{ubulk} はそれほど小さくはならない。これは h の増加とともに $\partial T / \partial x$ が下がるためである。 $h = 8$ nm において $K_u V / kT = 63$ の媒体は情報を 10 年間保存できるが、TAMR として使うには K_u が不十分であり、 $K_u V / kT = 97$ が必要となる。もし $\partial T / \partial x$ を 6.9 K/nm から 13.5 K/nm まで上げることができれば $K_u V / kT = 65$ の媒体も TAMR として使うことができ、 K_u / K_{ubulk} を 0.87 から 0.55 まで下げることができる。したがって必要な K_u / K_{ubulk} は $\partial T / \partial x$ に大きく依存する。

本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構(SRC)の助成のもとに行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) T. Kobayashi et al.: J. Magn. Soc. Jpn., 36, pp. 282-286, 2012.

Table 1 Media specification of TAMR for 4Tbps

h [nm]	6	8	10
n [grain/bit]	4	4	4
σ_D [%]	10	10	10
T_w [K]	500	500	500
M_s (300K) [emu/cm ³]	675	655	643
K_u (300K) [Memu/cm ³]	27.8	25.2	23.9
H_c (300K)= H_k (300K) [kOe]	82.3	76.9	74.3
T_c [K]	544	532	524
$K_u V / kT(300K)$	97	118	139
$K_\beta = f(n, \sigma_D)$	63	63	63
(1) $K_u V / kT(330K) > K_\beta$	81	97	115
$\partial T / \partial x$ [K/nm]	7.72	6.92	6.23
(2) $\Delta T / \Delta x$ [K/nm] $< \partial T / \partial x$	7.72	6.92	6.23
H_w [kOe]	10.8	10.5	10.3
(3) H_{adj} [kOe] $> H_w$	24.5	27.2	29.8
K_u / K_{ubulk}	0.90	0.87	0.86