

HDMR において高記録密度達成のためのドットのばらつきの条件

Dot dispersion Conditions for Achieving High Recording Density in HDMR

松島 直史 赤城 文子

Naofumi Matsushima, Fumiko Akagi

工学院大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻

Graduate School of Electrical Engineering and Electronics, Kogakuin University

1. はじめに

磁気ディスク装置 (hard disk drive : HDD)において、テラビット級の高記録密度化を阻む問題が媒体雑音、熱安定性、ヘッド磁界強度不足のトリレンマ問題である。これを解決する方法として、熱アシスト磁気記録(heat assisted magnetic recording : HAMR)とビットパターン媒体(bit patterned media : BPM)を組み合わせた記録方式(heated dot magnetic recording : HDMR)が提案されている[1]。BPM は、ドット径及びドット間空隙を狭小化することで記録密度を向上することができる。しかし、実際の BPM は磁性ドットの大きさ、位置、キュリー温度 T_c がばらついており、これらのばらつきをすべて考慮して計算する必要がある[2]。先行研究では熱揺らぎによるエラーをなくすため、媒体の異方性磁界(異方性定数) H_k を増加させてドットのばらつきの許容条件を検討した。その結果、径と位置のばらつきはそれぞれ 6%と 5%まで広げられることを確認した[2]。本検討では、ドットの大きさ、位置、キュリー温度 T_c がすべてばらついているときのビットエラーレート(BER)を検討した。

2. 計算方法

HDMR 方式の記録過程の計算には、(1)式に示す Landau-Lifshitz-Bloch (LLB)方程式を用いた。

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\gamma[\vec{m} \times \vec{H}_{eff}] + \gamma\alpha_{\parallel} \frac{(\vec{m} \cdot \vec{H}_{eff})\vec{m}}{|\vec{m}|^2} - \gamma\alpha_{\perp} \frac{[\vec{m} \times (\vec{m} \times \vec{H}_{eff})]}{|\vec{m}|^2} \quad (1)$$

ここで、 \vec{m} は磁化、 t は時間、 γ はジャイロ磁気定数、 α はダンピング定数、 M_s は飽和磁化、 \vec{H}_{eff} は実効磁界である。媒体は、材料に FePt を用いたビットパターン媒体を仮定した。キュリー温度 T_c は 600 K、室温 (298 K) で M_s は 1.16 T、異方性磁界 H_k は 4000 kA/m、熱揺らぎ安定性の指標 $K_u V / k_B T$ は 226 とした。磁性粒子(ドット)は円柱としダウントラック方向に 1536 個、クロストラック方向に 8 個を仮定した。ドットの膜厚は 8 nm、ドット径は 8 nm とした。ドットピッチはダウントラック方向、クロストラック方向ともに 12 nm とした。このとき面記録密度は 4.48 T bit/inch² となる。ドット径、位置の分布は正規分布に従うものとし、標準偏差/平均(変動係数)を変化させた。熱分布は 3 次元ガウス分布を仮定し、最大上昇温度は 250 K、半値幅は 20 nm とした。ドットに印加される膜厚中心のヘッド磁界強度は 1228 kA/m とした。ドットの初期磁化は +DC 方向、ヘッド・媒体間の相対速度は 10 m/sec とした。BER は記録トラックのエラーレートを評価した。定義は、(エラードット数 / 記録トラックドット数) × 100 % とし、BER の許容範囲を 0.1%以下と定義した。

3. 計算結果と考察

図 1 に BER が許容範囲を満たす各ドットのばらつきを示す。図は T_c のばらつきの関数としてドット径のばらつきとドット位置のばらつきを変えた結果である。塗りつぶしの記号は BER が許容範囲内であり、白抜きの記号は許容範囲を超える条件である。図より、 σT_c が 2% であると BER は 0.1% を超えるという厳しい結果となった。位置のばらつ

きと径のばらつきを比較すると位置のばらつきの方が強い律速条件となることがわかった。しかし、 T_c がばらつくことによって位置のばらつきよりも径のばらつきの許容条件の減少率が大きいといえる。これは、表 1 に示すように両要因に共通する熱揺らぎが原因と考えられる。

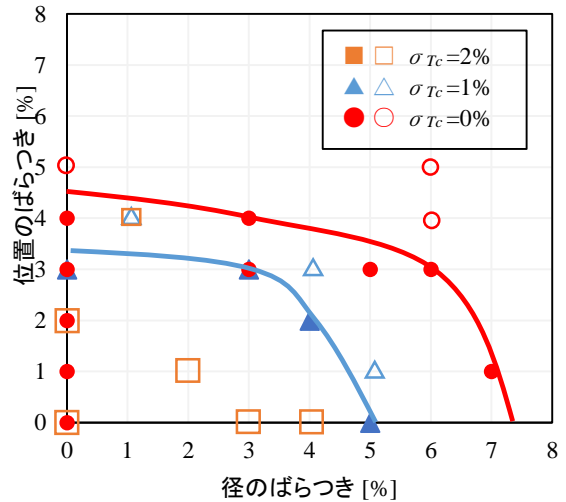


図 1 BER が許容範囲を満たす各ドットのばらつき

表 1 各ドットのばらつきにおける BER 増加の原因

要因	径	位置	T_c
エラーの原因	熱揺らぎ	記録時間の不足	熱揺らぎ (低 T_c)
			H_k の減少不足 (高 T_c)

4. まとめ

ドットの大きさ、位置、キュリー温度 T_c がすべてばらついているときの BER が許容範囲となる条件を検討した結果、 T_c のばらつきが最も厳しい律速条件となることがわかった。発表では、COMSOL Multiphysics[3]を用いて HDMR の記録計算を行った結果についても報告する。

謝辞

本研究で用いたプログラムは(株)日立製作所から貸与されているものです。

参考文献

- [1] F. Akagi, M. Mukoh, M. Mochizuki, J. Ushiyama, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, pp. 309-313, 2012.
- [2] 松島直史, 赤城文子, 信学会, C-7-2, 2020.
- [3] COMSOL Multiphysics, <https://www.comsol.jp>

HAMR を用いた2つの記録層をもつビットパターンドメディアの検討 Heat-Assisted Magnetic Recording on Dual Structure Bit Patterned Media

山根輝、Simon John Greaves、田中陽一郎
東北大学電気通信研究所

Hikaru Yamane, Simon John Greaves and Yoichiro Tanaka
RIEC, Tohoku University

はじめに

磁気記録の更なる記録密度の向上のため、熱アシスト磁気記録 (HAMR) 技術が期待されている。本研究では、高い記録密度の実現のため、キュリー温度 (T_C) の異なる2つの記録層をもつビットパターンドメディア (BPM) を想定して、2つの記録層に選択的に記録を行うシミュレーションを行い、最適な T_C の組み合わせを調査した。また、その組み合わせで得られる記録密度を計算した。

シミュレーションモデル

直径 6nm のシリンダー型ドットが Down-track 上に 10nm 間隔で並べられた BPM を想定し、メディアの磁化をマイクロ磁気モデルを用いて Landau-Lifshitz-Bloch (LLB) 方程式に基づいて計算した。モデルの構成は、下層から軟磁性層/非磁性層 (5nm)/記録層 1(5nm)/非磁性層 (2nm)/記録層 2(5nm)/空気 (3nm)/書き込みヘッドで、各記録層は異なる T_C (T_{C1}, T_{C2}) を持っている。 T_C 以外の磁性パラメータは等しい。ここで、 $T_{C1}=460\text{K}$, $T_{C2}=550\text{K}$ の場合について、保磁力の温度変化を調べた結果を図1に示した。低い T_C (この場合 T_{C1}) 付近における二層の保磁力の差を利用して、片方一層へ選択的に記録する。

メディア表面上のヒートスポットの強度はガウス分布をもち、その半値全幅は 20nm とした。記録する際は、最大温度 (T_{max}) がターゲット層の T_C より 10K 高くなるように設定し、両層間の垂直方向の温度勾配はないものとした。 T_{max} が high- T_C より高くなるようにして両層反転させる high モードと、 T_{max} が low- T_C より高く high- T_C より低くなるようにして T_C が低い層のみ反転させる low モードの、2つのモードによって選択的記録を実現させる。

ヘッドは 10m/s でメディア表面上を動き、3 ビット分磁界を印加した。ターゲット層の磁化について、100 回のシミュレーションでの反転回数から反転した確率を算出した。この操作を、Down-track 方向にドットを 0.1nm ずつ動かしながら行った (図2参照)。ここで Down-track 上で 8nm 幅の記録窓を定義し、記録窓の平均確率が最大となる時、その平均値を反転確率とした。この際、high モードではターゲット層 (高い T_C 層) のみを計算したが、low モードではターゲット層 (低い T_C 層) から非ターゲット層 (高い T_C 層) の値を、各点において差し引いて計算した。さらに両モードで得られた確率を乗算して、その結果をその T_C の組み合わせにおける最終的な反転確率として評価した。

結果

T_{C1}, T_{C2} をそれぞれ 450K~600K, 450K~750K の範囲で 10K ずつ変化させた結果、 $(T_{C1}, T_{C2})=(460\text{K}, 550\text{K})$, $(530\text{K}, 460\text{K})$ 周辺で反転確率が高くなった。記録窓の後方 (Down-track 負方向) で磁化が上書きされてしまう現象 (erase-after-write) が見られたので、その分を差し引いた反転確率はそれぞれ 0.9883, 0.9816 となった。

ドットの数を増やして周囲のドットから受ける静磁界の影響を考慮した結果、それぞれ 0.9867, 0.9800 となった。

Cross-track 方向にドットを動かしてヘッド磁界の影響を受ける距離を調べた結果、最小のトラックピッチ (TP) は 11.2nm, 10.9nm であった。ドットが標準偏差 1.2nm の位置分散を持つことを仮定すると最小の TP は 14.8nm, 14.5nm となった。ドットピッチ 10nm で面記録密度を計算し、シャノンの式 [1] からユーザー面記録密度を求めた結果、 $(460\text{K}, 550\text{K})$, $(530\text{K}, 460\text{K})$ の条件でそれぞれ $7.82\text{Tbit}/\text{in}^2$, $7.64\text{Tbit}/\text{in}^2$ の高い記録密度が得られた。

メディアの製造や読み取り技術など取り組むべき課題はまだ多く残っているが、本研究は未来の高密度記録システムの実現に有益な示唆を与えるものである。

参考文献

[1] C. E. Shannon, The bell System Technical Journal, vol.27, pp. 623-656, Oct. 1948

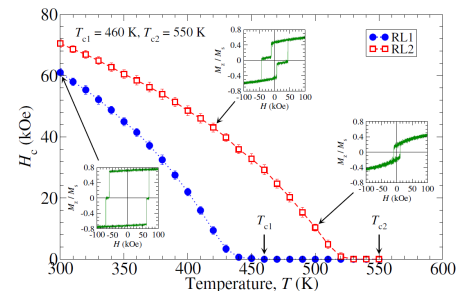


図1 (460K, 550K) の場合における保磁力の温度依存性

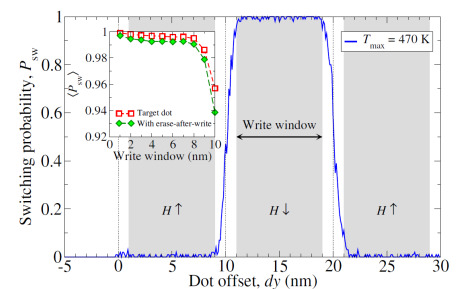


図2 $T_{C1}=460\text{K}$, $T_{max}=470\text{K}$ のときの、Down-track 上での記録層1の反転確率

磁場印加角度のマイクロ波アシスト磁化反転への影響

菊池伸明, 岡本聡
(東北大)

Field angle effect on microwave assisted magnetization switching

N. Kikuchi, S. Okamoto
(Tohoku Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording: MAMR) の発展のためには、マイクロ波磁場下での反転挙動の理解が重要である。我々のグループではこれまでに、Co/Pt 多層膜ドット[1]やCoCrPt グラニューラー薄膜[2]を用いてマイクロ波アシスト磁化反転実験を行い、その挙動を明らかにしてきた。実験では、マイクロ波磁場の印加に基板上に作製したコプレナー線路を用いているため、試料位置でのマイクロ波磁場の印加方向は膜面内に限られる。その一方、MAMRにおいては記録ヘッドにスピントルク発振器を組み込んでマイクロ波磁場を発生させるため、書き込み磁場とマイクロ波磁場の印加方向は時間と場所様々に変化する。本研究では、Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式に基づいた数値計算を行い、反転磁場にマイクロ波磁場の印加方向が及ぼす影響について調べた。

計算方法および結果

計算は一軸性の磁気異方性を持つマクロスピンを仮定して行った。磁化容易軸方向は z 軸に平行とし、異方性磁界 H_k の大きさは 20kOe 、温度 $T = 0\text{ K}$ とした。直流およびマイクロ波磁場の印加方向は図1に示す配置とした。 $-z$ 方向に飽和させた磁化 \mathbf{M} に対し、 x - z 平面内で x 軸と角度 θ_{dc} をなす直流磁場 \mathbf{H}_{dc} 、 z 軸と角度 θ_{rf} 、方位角 φ_{rf} であるベクトル \mathbf{n}_{rf} の周りを周波数 f_{rf} で回転する大きさ 1kOe のマイクロ波磁場 \mathbf{H}_{rf} を印加した。印加する直流磁場の大きさを 2kOe/ns で変化させ、反転に必要な直流磁場の大きさ H_{sw} を求めた。なお、計算はフリーの GPGPU ソフトウェアである Mumax3[3]を用いた。

図2に、反転磁場 H_{sw} の直流磁場の θ_{dc} 依存性を、周波数 $f_{rf} = 16\text{--}40\text{ GHz}$ について示す。破線はマイクロ波磁場がない場合の反転磁場である。マイクロ波磁場の印加角度は $\theta_{rf} = \varphi_{rf} = 0$ とした。 $\theta_{dc} = 0$ では、 $f_{rf} = 16\text{ GHz}$ 以上の周波数ではアシスト効果が消失しており、解析計算から得られる臨界周波数 (16.6 GHz) の結果ともよく一致する。一方で、 $\theta_{dc} = 10^\circ$ 程度のわずかな直流磁場の傾きにより臨界周波数以上でもアシスト効果が発現し、また、得られるアシスト効果は周波数に伴って大きくなるのが分かった。この結果は、マイクロ波アシスト効果の最適化には磁場の印加角度の制御が重要であることを示唆するものである。

参考文献

- 1) S. Okamoto *et al*, Phys. Rev. Lett. **109**, 237209 (2012).
- 2) N. Kikuchi *et al*, J. Appl. Phys. **126**, 83908 (2019).
- 3) A. Vansteenkiste *et al*, AIP advances **4**, 107133 (2014).

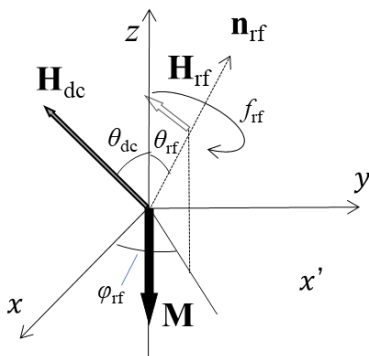


図1 計算に用いた座標系

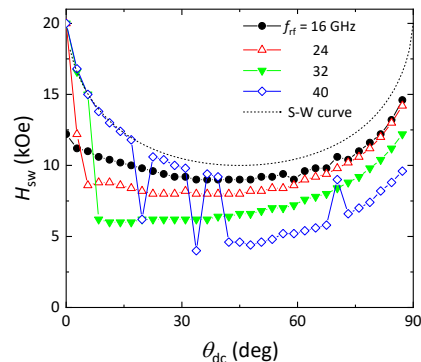


図2 反転磁場の θ_{dc} 依存性

講演取消

ナノビーム XMCD を用いた HDD 書き込みヘッドの磁化ダイナミクス観察

首藤 浩文¹、喜々津 哲¹、小谷 佳範²、前田 知幸¹、豊木 研太郎²、
大沢 仁志²、菊池 伸明^{3,4}、岡本 聡^{3,4}、中村 哲也²
(¹東芝研究開発センター、²JASRI、³東北大多元研、⁴東北大 CSRN)

Nano-beam XMCD study on magnetization dynamics of an HDD write head

H. Suto¹, A. Kikitsu¹, Y. Kotani², T. Maeda¹, K. Toyoki²,
H. Osawa², N. Kikuchi^{3,4}, S. Okamoto^{3,4}, and T. Nakamura²

(¹Corporate R&D Center, Toshiba Corp., ²JASRI, ³IMRAM, Tohoku Univ., ⁴CSRN, Tohoku Univ.)

はじめに

HDDの年間総出荷記録容量は、現在およそ1ゼタ(10^{21})バイトに達しており、HDDは主要なストレージデバイスとしてデジタル技術を支えている。年々増大する情報量に対応するため、さらなるHDDの高記録容量が求められている。HDDの開発においては、書き込みヘッドの磁化ダイナミクスの解明が重要であるが、書き込みヘッドの微細な構造・高速な動作のため、磁化ダイナミクスの直接的な観察はこれまで困難であった。本研究では、ナノメートルオーダーの空間分解能、サブナノ秒オーダーの時間分解能で磁化を観察可能という特徴を持つナノビーム XMCD を用いて、HDD 書き込みヘッドの磁化ダイナミクスの観察を行った。¹⁾

実験方法

記録密度 200 Gbit/inch²、書き込み速度 700 Mbit/s に対応した垂直記録用書き込みヘッドを用い、SPring-8 BL25SU ビームラインにおいて XMCD 測定を行った。X 線のパルスの 5 倍の周波数に同期した 211.9 MHz の記録電流を記録ヘッドに印可することで、記録ヘッドの磁化を 2.36 ns ごとに反転させ、記録電流と X 線パルスのディレイ時間を変化させることで、記録ヘッドの空気支持 (ABS) 面の磁化のスナップショット観察を行った。

実験結果

Fig. 1(a)に書き込みヘッドの ABS 面の SEM 像を示す。書き込みヘッドは、先端のサイズが 250 nm (down-track) × 120 (cross-track) nm 程度である主磁極と、数 μm (down-track) × 数 10 μm (cross-track) のシールドから構成されている。Fig. 1(b)に示す記録電流を記録ヘッドに印可し、ディレイを磁化反転の 1 周期分 (2.36 ns) 変化させて測定した XMCD 像を Fig. 1(c)に示す。カラースケールは磁化の面直方向成分に対応している。0 ns においては主磁極の磁化は $-z$ 方向を向いているが、0.78 ~ 1.58 ns にかけて磁化が $+z$ 方向へと変化し、1 ns 以下の時間で主磁極が反転する様子が観察された。また、シールド部分には磁化の空間パターンが変化する様子が観察された。

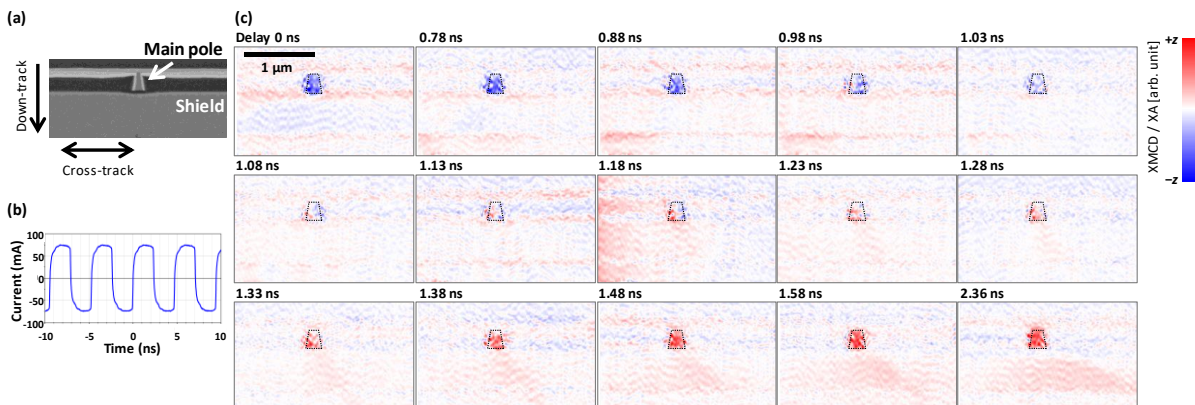


FIG. 1. (a)記録ヘッド ABS 面の SEM 像。(b)記録電流波形。(c)ディレイを変化させながら測定した XMCD 像。破線の台形は主磁極の位置。
※ディレイ時間は相対値であり、(b)に示す記録電流の横軸の時間とは対応していない。

XMCD 測定は SPring-8 BL25SU (課題番号 2018A1109, 2019B1683, 2019B2093) において行われた。

¹⁾ H. Suto et al., Time-resolved imaging of an operating hard-disk-drive write head using nano-beam X-ray magnetic circular dichroism, (accepted to JAP).