

プラズモンセンサによる HAMR エミュレーションおよび 保護膜・潤滑膜の化学構造解析に基づく寿命推定

柳沢雅広、國本雅宏、本間敬之
(早稲田大学)

HAMR emulation and life estimation based on chemical structure analysis of overcoat and lubricant film
using plasmonic sensor

M.Yanagisawa, M.Kunimoto, T.Homma
(Waseda University)

はじめに

磁気ディスクの記録密度向上のために、熱アシスト磁気記録方式(HAMR)が注目されている。NFT(Near field transducer)を介してレーザー光により磁気記録膜をキュリー点近傍まで加熱する方式は、筆者らが開発したプラズモンセンサリによる表面・界面の化学構造分析手法と物理的に等価であり、これにより HAMR の加熱エミュレーションが可能になると同時に、加熱による化学構造の解析が可能となる。本報告ではプラズモンセンサによる表面増強ラマン分光法(SERS)を用いて、レーザー加熱時の磁性膜、カーボン保護膜(DLC)、潤滑膜(PFPE)などの耐熱性を測定し、それらの化学構造変化を解析した。

実験方法

Fig.1 にプラズモンセンサを用いた SERS 測定ツール の概念図を示す。レーザー光の強度を連続的に変えることにより、磁性膜・カーボン保護膜・潤滑膜の温度の測定と化学構造変化を調べた。磁性膜の温度は 1064nm の近赤外レーザー励起加熱による放射スペクトルから、また保護膜と潤滑膜の温度は 532nm の可視光レーザーのアンチストークスとストークスピーク の強度比から測定した。また CoPt 媒体の 2.5 インチハードディスクドライブにプラズモンセンサアレイを組み込み、10,500rpm で回転させてオペランド測定を行った。

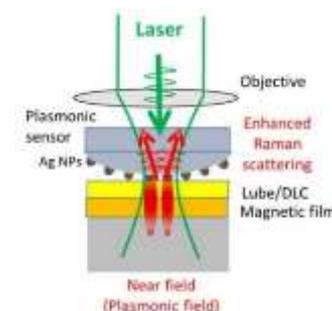


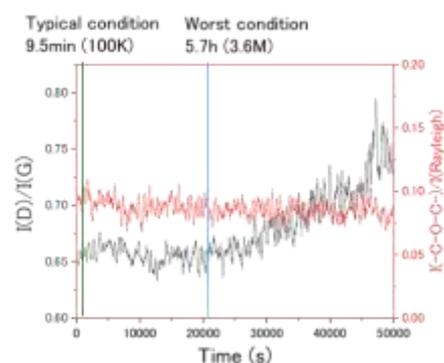
Fig.1 SERS analysis system with plasmonic sensor

結果・考察

ハードディスクドライブに組み込んだセンサアレイにより測定したカーボン膜と潤滑膜の化学構造は、Fig.2 に示すように HAMR の条件(Typical および Worst)においても変化が無いことを確認した。しかし Co 酸化物や Fe 酸化物などの触媒作用や摺動によるトライボケミカル反応により、潤滑剤が分解することを明らかにした²⁾。実際にエラーが多発して記録再生できなくなったドライブのヘッド部分の付着物から潤滑剤分解物や Co 水酸化物が検出された。新開発のブリュアン散乱/ラマン散乱ハイブリット分光法により、潤滑剤分解酸化物やカーボンおよび Co 酸化物の混合物は粘度を増加させることがわかった。

Fig.2 I(D)/I(G) of carbon and ether group(-O-) for duration time

これは熱、触媒、機械エネルギーが潤滑剤を分解し、ヘッドクラッシュの原因となることを示唆している。



参考文献

- 1) M.Yanagisawa, M.Saito, M.Kunimoto, and T.Homma, "Transmission-type plasmonic sensor for surface-enhanced Raman spectroscopy", Appl.Phys.Express, 9 (2016) pp.122002.
- 2) 柳沢,ベルツ,齋藤,國本,本間: ラマン分光法を用いたトライボロジーのオペランド観察(第5報): 材料その1, トライボロジー会議 2019 春 東京(2019).

HAMR Read/Write System Prospects and Challenges

Masafumi Mochizuki, Naoto Ito, Masato Matsubara, Mitsumasa Minematsu, Yukiya Shimizu,
Masayoshi Shimokoshi and Masaomi Ikeda
Western Digital Technologies GK, 1 Kirihara-cho, Fujisawa-shi, Kanagawa-ken, 252-0888

For decades, Heat-Assisted Magnetic Recording (HAMR) has been researched and developed as a candidate to enable higher area density in Hard Disc Drive (HDD) [1]. Recent Demonstrations and Announcements [2], [3], [4] have identified HAMR as a promising practical technology for HDD and enabling its areal density growth. The Advanced Storage Technology Consortium (ASRC) HDD Technology Roadmap includes HAMR as the main successor to the conventional perpendicular magnetic recording (PMR), (Fig.1). However, we have several technical challenges of Read/Write system because HAMR uses a laser-coupled near-field transducer for writing on FePt base media. Since the recording process is significantly different from PMR, we must take care of unique phenomena of HAMR.

Written track quality can be degraded by iteration of adjacent track write. Adjacent track interference (ATI) is a well-known characteristics to be handled for HAMR as well as PMR. ATI causes performance degradation and unrecoverable error in the worst-case scenario. Therefore, the track pitch in the product is chosen to provide sufficient margin against these problems. Ito et.al [5] characterized ATI in HAMR drives. In HAMR, there are two types of ATI: one is ATI localized at the track edge. The other is broad ATI which affects several adjacent tracks. For ATI localized at the track edge, it is important to reduce the number of ATI-sensitive grains by using a high cross-track thermal gradient head, by using high anisotropy field (Hk) media, and by reducing the base write current. The broad ATI is a relatively gentle effect compared to the others. It is caused by a combination of wide magnetic head field, widespread heat, and low Hk grains.

The combination of HAMR with Shingled Magnetic Recording (SMR) system is also another point to be optimized because the temperature distribution in HAMR is different from the magnetic write field distribution of PMR.

More challenges and understandings by HDD and spin-stand evaluation will be presented and discussed at the conference.

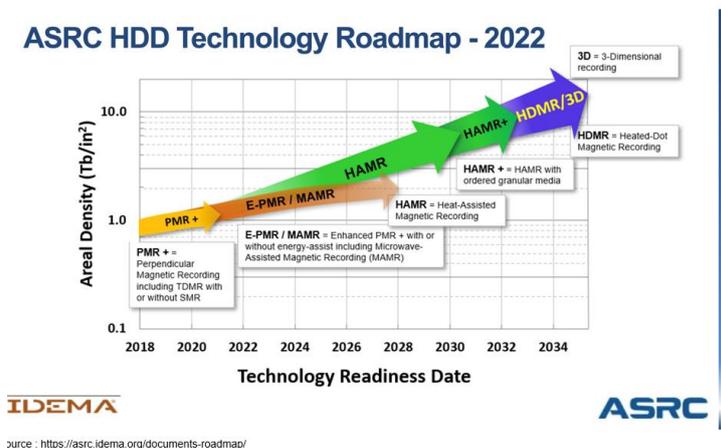


Fig.1. The Advanced Storage Technology Consortium HDD Technology Roadmap [2].

Reference

- 1) D. Weller, et. al., "A HAMR Media Technology Roadmap to an Areal Density of 4 Tb/in²", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, No. 1, Jan. 2014.
- 2) IDEMA "ASRC HDD Technology Roadmap – 2022", <https://asrc.idema.org/documents-roadmap/>
- 3) Seagate, <https://www.seagate.com/blog/seagate-hamr-solutions-deliver-industry-leading-reliability/>
- 4) Seagate, <https://www.seagate.com/innovation/mosaic/>
- 5) Akihiko Takeo, "HDD Technology toward Large Capacity", IDEMA Japan Symposium, May/16th, 2024.
- 6) N. Ito, et. al., "HDD Level Characterization of Adjacent Track Interference in Heat-Assisted Magnetic Recording", TMRC 2019 #A5.

複数の FGL を有する MAMR 用 STO のマイクロマグ解析

金井靖、龍野京太、サイモン グリーブズ*
(新潟工大、*東北大)

Micromagnetic analysis of STO with multiple FGLs for MAMR
Yasushi Kanai, Keita Tatsuno, Simon Greaves
(Niigata Inst. Tech, *Tohoku Univ.)

1. はじめに

マイクロ波アシスト磁気記録(microwave-assisted magnetic recording: MAMR)は次世代の垂直磁気記録方式として提案された[1], [2]。スピントルク発振器(spin torque oscillator: STO)は MAMR を実現するために最も重要な構成要素であり、当初は 1 枚の高周波発振層(field generation layer: FGL)を有するモデルが提案、研究された。近年は安定な発振を得るため、複数の FGL を有する STO が提案されている[3]-[5]。それに伴い、構造や材料の選定は自由度が増す一方で、最適化が複雑になった。本報告では FGL/軟磁性層(soft magnetic material: SMM)/FGL で構成される、単純な構造の STO のマイクロマグ解析を行い、発振特性および記録再生特性を論ずる。

2. 計算モデルとソフトウェア

Fig.1 に提案する記録ヘッドと STO の模式図を示す。記録ヘッドは高周波電流に良好に対応するようヨーク長を 500 nm とした。2 層媒体のうち媒体裏打層 (soft magnetic underlayer: SUL) は考慮したが、表示していない。媒体記録層は、発振特性シミュレーションでは考慮していない。前述の通り、STO は FGL/SMM/FGL で構成される単純な構造である。本 STO を記録ヘッドのギャップ中に挿入し、主磁極 (main pole: MP)と FGL2 の間および FGL1 と負の分極率をもつスピン注入層 (spin injection layer with negative polarization: nSIL) の間にスピントルクを考慮した。一方、FGL1 と SMM の間および FGL2 と SMM の間にはスピントルクを考慮していない。また、FGL1 と SMM および FGL2 と SMM の間に負の exchange を仮定し、それぞれ -10 erg/cm^2 を与え、トレーリングシールド(trailing shield: TS)と nSIL の間には $\text{exchange} = 12.5 \text{ erg/cm}^2$ を与えた。他の材料特性は Table1 の通りである。FGL1 および FGL2 の大きさは $40 \text{ nm} \times 40 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ であり、nSIL の大きさは $40 \text{ nm} \times 40 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$ である。非磁性層の厚さは MP-FGL2 間が 3 nm、他は 2 nm である。スピントルク項を含む LLG 方程式を解くために、FastMag Micromagnetic Simulator (Numerics and Design, Inc.)を使用した。

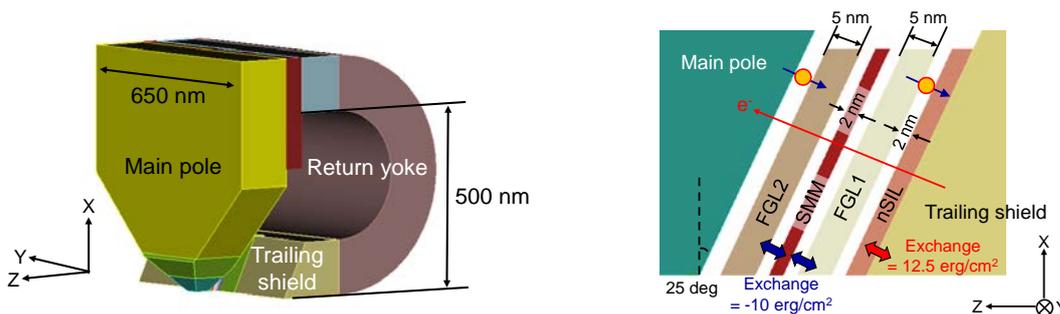


Fig. 1 Schematics of write head (left) and arrangement of STO inserted into main pole (MP) – trailing shield (TS) gap (right). A double-layered medium was considered, but not shown.

3. 結果と考察

STO 発振シミュレーション

Fig.2に FGL2, SMM, FGL1, および nSIL の磁化回転を示す。このとき、STO への印加電流

Table 1 Major Parameters Used in Calculations

	$4\pi M_s$	24 kG	$4\pi M_s$	10 kG
	H_k	31.4 Oe	H_k	31.4 Oe
FGL	Exchange, A	$2.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}$	nSIL	Exchange, A
	α	0.02		α
	P_o	0.5 (FGL2) -0.3 (FGL1)		P_o
				1.0 $\times 10^6 \text{ erg/cm}$
				0.02
				-0.3

密度 J は 4.0×10^8 A/cm² であった。STO が記録ヘッドのギャップに挿入されていることを考慮すると、極めて安定した発振が得られている。これは、1枚のFGLを有するSTOと比べ、FGL1とSMMおよびFGL2とSMMが反磁性結合しており、STOと記録ヘッドの静磁気相互作用が小さいためと思われる。発振周波数は16 GHzであり、 $J = 7.0 \times 10^8$ A/cm²のときは20 GHzであった。つまり、 J を大きくすると発振周波数が高くなることから、本STOは2層記録に用いることが可能である [6], [7]。さらに、FGL1とFGL2は同相で回転し、FGL1とSMMおよびFGL2とSMMは逆相で回転する。

媒体記録再生シミュレーション

ここではSTOの発振解析よりも小さい(20 nm × 20 nm × 5 nm) STOを用いた。また、STOは媒体垂直面に対して15°傾いている。さらに、FGLとSMMは完全に薄膜面内で回転し(FGL1とFGL2は同相で回転し、FGL1とSMMおよびFGL2とSMMは逆相で回転する)、スイッチング時間(FGLが回転方向を変えるに要する時間)はゼロと仮定した[8]。これらの条件は異なるが、現象を理解するには十分であろう。

Fig.3にいろいろなSMMの厚さ(d_{soft})に対する、記録幅のSTOの発振周波数への依存性を示す。SMMの厚さがゼロのときに記録幅は最大であり、SMMの厚さが増すと記録幅は減少する。これは、FGL1およびFGL2とSMMの間で磁束が閉じるためである。その結果、Fig.3 Insetに示す通り、 d_{soft} が増加するにつれてfigure of merit (FOM: SNR / track width)は大きくなる。ここで、信号対雑音比 (SNR) はSTOの発振周波数が9 GHz付近で18.1 dB – 18.4 dBであり、 d_{soft} に依らない。

参考文献

- [1] J.-G. Zhu, *IEEE Trans. Magn.*, **57** (2021) 3300106.
- [2] M. Takagishi, et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, **563** (2022) 169859.
- [3] M. Takagishi, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **57** (2021) 3300106.
- [4] Y. Nakagawa, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **58** (2022) 3201005.
- [5] W. Chen, et al., *TMRC*, (2022) C3.
- [6] R. Itagaki, et al., *International Journal of AEM*, **71** (2023) S191.
- [7] S. Greaves, et al., *IEEE Trans. on Magn.*, **53** (2017) 300510.
- [8] S. J. Greaves and Y. Kanai, *TMRC*, (2024), (to be presented).

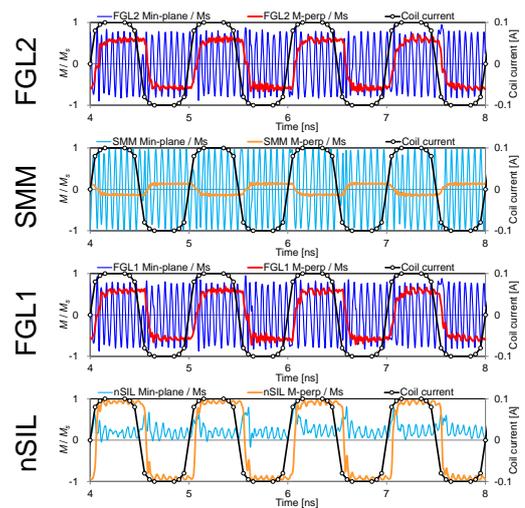


Fig. 2 Magnetization rotation of, from top to bottom: FGL2, soft magnetic material (SMM), FGL1, and nSIL. $J = 4.0 \times 10^8$ A/cm².

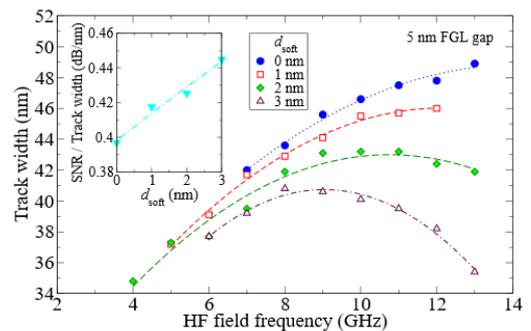


Fig. 3 Written track width vs. HF field frequency for the new dual FGL STO with various SMM thicknesses, d_{soft} . Inset: SNR / track width vs. d_{soft} .

マイクロ波アシスト磁気記録技術開発

成田 直幸、高岸 雅幸、中川 裕治、前田 知幸
(東芝 研究開発センター)

Development of Microwave-Assisted Magnetic Recording Technologies
Naoyuki Narita, Masayuki Takagishi, Yuji Nakagawa, Tomoyuki Maeda
(Corporate Research & Development Center, Toshiba)

はじめに

マイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave-Assisted Magnetic Recording : MAMR) は、次世代の高記録密度ハードディスクドライブを実現可能にするアシスト記録技術のひとつである¹⁾。東芝では、磁束制御型 (Flux Control MAMR : FC-MAMR) ・磁気共鳴型 (Microwave-Assisted Switching - MAMR : MAS-MAMR) のふたつの MAMR 技術の開発を行っている。本報告では、これらの技術の開発状況を説明するとともに、特に高い記録密度ポテンシャルを有する MAS-MAMR における重要開発要素と、それらの開発要素に対する東芝での検討について報告する。

FC-MAMR と MAS-MAMR

MAS-MAMR は、従来よく知られる強磁性共鳴を用いたアシスト記録技術である。記録ヘッド内に設置されたスピントルク発振子 (Spin torque oscillator : STO) から、数十 GHz 帯の高周波磁界を媒体に局所的に印加し、記録媒体内で強磁性共鳴を誘起することで記録密度を高めることが可能になる。一方で、FC-MAMR では、記録ヘッド内に設置したスピントロニクス素子において、磁化発振ではなく、磁化反転を発生させる。これにより、磁極から発生する磁束の流れが局所的に変調されることで、記録密度を高めることができる²⁾。FC-MAMR では共鳴現象を用いないため、MAS-MAMR に比べてポテンシャルは低いものの、後述する MAS-MAMR 固有の開発要素の技術検討を必要としないことから、スピントロニクス技術を用いたアシスト記録ヘッド技術として、世界で初めて実用化に至った。

MAS-MAMR の重要開発要素³⁾

1. “STO と磁極の相互作用の影響” :

STO と磁極が磁氣的に結合することで、STO の動作電圧が増大する。相互作用を抑制し、信頼性観点で適切な動作電圧を達成する必要がある。

2. “周波数マッチング” :

記録媒体の強磁性共鳴周波数と STO の発振周波数を、磁気記録としての他の要件を満たしながら一致させる必要がある。

3. “STO による記録ヘッドの磁路短絡効果” :

記録ヘッド内に配置された STO の磁化配置によって、実効的な磁路短絡が生じ記録能力が劣化する効果。STO の発振効率を改善することで抑制できる。

4. “高周波磁界垂直成分によるアシスト効果の劣化” :

媒体面直方向に高周波磁界が印可されることで、実行的にアシスト効果が劣化する。従来の STO 構造では、回避することが困難であり、新たな STO 構造の提案が必要となる。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu et al., IEEE Trans. Magn., **44**, pp. 125-131 (2008)
- 2) N. Narita et al., IEEE Trans. Magan., **57**, Art. no. 3300205 (2021)
- 3) M. Takagishi et al., IEEE Trans. Magn., **57**, Art. no. 3300106 (2021).

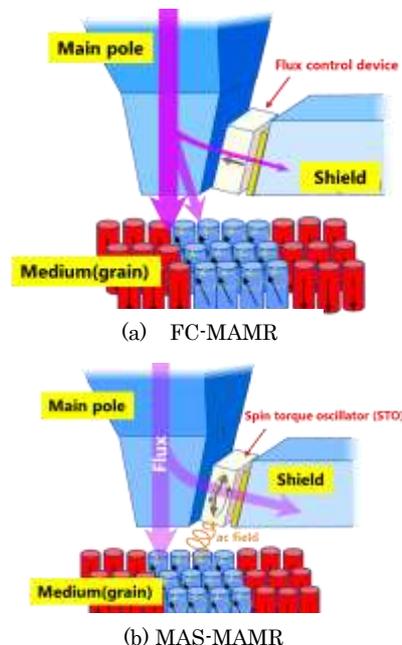


Fig.1 Schematic views of MAMR technologies

次世代垂直磁気記録媒体の開発状況

大橋栄久

(株式会社レゾナック・ハードディスク)

Development Status of Next Generation Perpendicular Magnetic Recording Media

Haruhisa Ohashi

(Resonac Hard Disk Corporation)

はじめに

近年、人工知能や機械学習をはじめとするデジタル技術は目覚ましい発展を遂げている。これらの技術の基盤となるのが大量のデータである。その総量は指数関数的な増加をみせており、2025年には全世界で175ZBものデータが生成されると予測されている¹⁾。ハードディスクドライブ (HDD) は今後も継続して大容量ストレージとしての役割を担うことを期待されている。HDDの記録密度向上のためには単位面積あたりに記録するビットの数を増やす必要があるが、微小なビットを形成するために磁性粒子の体積を小さくしていくと熱エネルギーによって磁化が消失してしまう問題が発生する。これは磁性粒子の磁気異方性エネルギー KuV (Ku : 単位体積あたりの磁気異方性エネルギー, V : 磁性粒子の体積) が熱エネルギー k_bT (k_b : ボルツマン定数, T : 絶対温度) に打ち勝てなくなるためである。この問題を解決するために高い Ku を有する磁性材料を使用すると、保磁力が高くなるために現行のヘッド磁界では記録ビットを形成することが出来なくなる。この問題、いわゆるハードディスクのトリレンマ問題を解決するための手段がエネルギーアシスト磁気記録である。ヘッド磁界でも書き込みができるように記録媒体に対して外部からエネルギーを付与して磁化反転に必要なポテンシャルを引き下げる技術であり、次世代の垂直磁気記録方式としての期待から盛んに研究が行われている。媒体メーカーであるレゾナックでは二つの次世代磁気記録方式に対応した媒体開発に取り組んでおり、それらの開発状況について報告する。

CoCrPt系グラニューラー垂直媒体

CoCrPt系グラニューラー垂直媒体は2005年に市販されてから約20年になるが、大容量ストレージの役割を担っていることから現在も絶え間なく改良が重ねられている。エネルギーアシスト磁気記録の一つであるマイクロ波アシスト磁気記録 (Microwave Assisted Magnetic Recording : MAMR)²⁾は磁気ヘッドに搭載されたスピントルク発振子 (Spin Torque Oscillator : STO) から高周波磁界を媒体に印加し、磁化が強磁性共鳴を起こすことで磁化反転を容易にする技術である。STOの発振周波数はCoCrPt系材料固有の強磁性共鳴周波数と同じ数十GHz帯であることから、膜設計を大きく変えることなく現行の媒体をMAMR媒体として適用可能である。当日はこれまでのCoCrPt系媒体について振り返りながらその設計などを報告する。

FePt系グラニューラー垂直媒体

L10型に規則化した構造を有するFePt系材料はCoCrPt系材料よりも高い Ku を有することから次世代の記録媒体材料として注目されており、記録媒体への実用化に近い段階まで開発が進んでいる。外部エネルギーとして熱を用いることから熱アシスト磁気記録 (Heat Assisted Magnetic Recording : HAMR) と呼ばれており、近接場光を用いて媒体の記録したい箇所をスポット的に加熱し、瞬間的に磁化を熱揺らぎさせることでヘッド磁界でも記録ビットを書き込み可能にする技術である。HAMRは現行媒体と比較して膜設計が大きく異なることから特有の課題も多い。当日はこの課題や開発状況について報告する。

参考文献

- 1) Seagate Technology レポート「データを再考する」
- 2) J.-G. Zhu et. al., *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 125-131 (2008)

熱アシスト 3次元磁気記録と材料開発

高橋有紀子

(物質・材料研究機構)

Materials Development for 3D-HAMR

Y.K. Takahashi

(NIMS)

はじめに

IoT および DX 社会の到来や生成 AI の活躍などによるデジタル情報の爆発的な増加に伴い、デジタル情報を保管するデータセンタ(DC)で用いられるストレージデバイスの大容量化が求められている。一方で、現行技術のままデジタル情報が増加し続けると DC の消費電力は 2025 年には世界の総消費電力の 10% に達すると見込まれており⁽¹⁾、DC の省エネは持続可能な社会を実現する上で喫緊の課題である。DC の省エネと大容量化を同時に実現するため、メインストレージデバイスであるハードディスクドライブ(HDD)の高密度化が必要になる。その 1 つの方法として 3 次元多値記録が挙げられる。ここでは熱アシスト 3 次元磁気記録を目指した我々の最近の取り組みを紹介したい。

熱アシスト 3次元磁気記録の動作原理

図 1 に多値記録で用いる記録媒体の模式図を示す。記録媒体は 3 次元へと展開する。ここでは簡単のため記録層が 2 層の場合を示している。上下の記録層にはキュリー点の差をつける(T_{c1} と T_{c2})。原理的には、磁化や異方性など他のパラメータは同一でも構わない。上下の記録層の交換結合を制御するために Breaking Layer(BL)層を挿入する。書き込みはレーザー強度を制御することにより 2 回のレーザー照射で上下記録層に書き込む 2 pass write の方法を採用する。再生は現行の磁気抵抗素子を用い、上下の磁気記録層からの和を検出する。これを上下記録層の信号に復号するには新規信号処理技術が必要となる。

FePt-C を用いた原理実証実験

図 2 に FePt-C/Ru-C/FePt-C グラニューラー薄膜の面内と断面の微細組織を示す。面内 TEM 像から、平均粒子径が約 14 nm の FePt 粒子が均一に分散している様子がわかる。断面の STEM-HAADF 像からは、下部 FePt、Ru、上部 FePt がエピタキシャル成長をし、Ru が fcc 構造を取っていることがわかる。磁化曲線は上下 FePt の磁化反転に対応する 2 段のステップがでており、磁化の温度依存性から異なる 2 つのキュリー点(526 K と 620K)が観測された⁽²⁾。講演時には詳細な微細組織と磁気特性測定の結果と、材料開発の現状について触れたい。

参考文献

- 1) Applied Materials Blog, Aug 21, 2019.
- 2) P. Tozman *et al.*, *Acta Mater.* **271**, 119869 (2024).

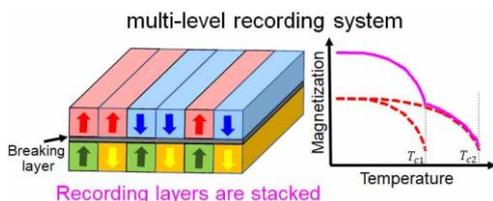


図 1 熱アシスト 3 次元磁気記録で用いる媒体の模式図。簡単のため 2 層の場合を示している。上下の磁気記録媒体は異なるキュリー点を持つ。

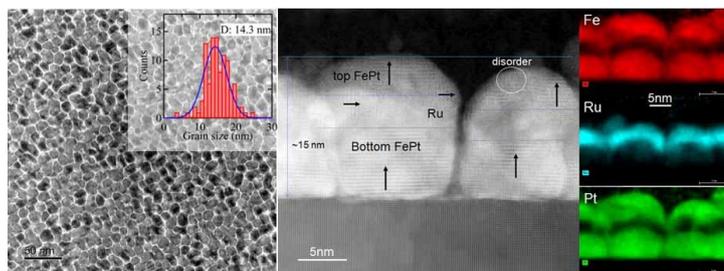


図 2 FePt-C/Ru-C/FePt-C グラニューラー薄膜の面内の明視野像とサイズ分布。断面の STEM-HAADF 像と元素マップ像。

Prospects for Three Dimensional Magnetic Recording

Simon Greaves¹

¹ Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Japan

Introduction

The transition from longitudinal to perpendicular recording allowed a rapid increase in the areal density of hard disk drives, but in recent years areal density growth has slowed due to limitations on the strength of the recording field. Energy-assisted technologies, such as microwave-assisted magnetic recording (MAMR) and heat-assisted magnetic recording (HAMR), offer ways to overcome write field limits and the thermal instability that accompanies reductions in the recording medium grain size.

If a recording medium contains two, discrete recording structures then, in theory, the recording capacity can be doubled. Although such three dimensional (3D) recording is possible by varying the write head current [1], [2], [3], energy-assisted approaches offer more control and flexibility [4], [5], [6]. In this talk we will discuss the technical issues and prospects for 3D recording using examples from micromagnetic simulations.

3D MAMR

Fig. 1 shows how MAMR can be used to selectively switch either of two, vertically-stacked recording structures, RL1 and RL2. The figure shows the maximum medium H_k of grains in each structure that can be switched by a combination of a head field and a high frequency (HF) field from a spin torque oscillator (STO) integrated into the write head. If the two structures RL1 and RL2 have H_k in the range ΔH_{k1} and ΔH_{k2} , respectively, one of the structures will switch at f_1 and not at f_2 , and vice-versa. A similar approach can be used to increase the number of recording structures to three. Using more than three recording structures seems to be unfeasible due to the decay of the HF field with distance from the STO.

3D HAMR

HAMR can also be used for 3D recording if the two recording structures have different Curie temperatures, T_c , as shown in fig. 2. Heating to T_{c2} , or above, allows information to be recorded on both structures, but heating to T_{c1} will only allow writing on the structure with T_{c1} as the coercivity of the other structure is higher than the write field at this point. The difference in the Curie temperatures of the two structures should be around 100 K, or more. 3D HAMR can also be extended to more than two structures, limited by the maximum temperature that can be tolerated and the strength of the write field in the structure furthest from the write head.

Areal density estimation of 3D HAMR

A grain switching probability (GSP) model was trained using data from a Landau-Lifshitz-Bloch (LLB) micromagnetic model. The bit error rate (BER) of tracks with a total of 100000 bits with random polarities (up/down) was then calculated for media with a range of average grain sizes, $\langle D \rangle$, and Curie temperature distributions, σT_c . Given the BER, the user areal density (UAD) was obtained from Shannon's equation. The results for media with a 6 nm RL1 / 3 nm IL / 6 nm RL2 structure and a target areal density of 2 Tbit/in² are shown in figs. 3 and 4.

In the absence of any read/write errors the UAD would be about 2.07 Tbit/in². For RL1 (the lower recording structure, furthest from the read/write head) the maximum UAD was about 1.6 Tbit/in². The target AD of 2 Tbits/in² was not achieved due to the lower readback signal and increased sensitivity to noise from adjacent bits and tracks. Optimisation of the recording structure thicknesses is required to boost the readback signal from RL1.

For RL2 (the uppermost recording structure), a UAD of 2 Tbit/in² was achievable when ($\langle D \rangle, \sigma T_c$) were in the range (5 nm, 25 K (4% of $\langle T_c \rangle$)) to (5.3 nm, 0 K). Lowering the UAD to 1.8 Tbit/in² would enable the use of media with much larger grains (up to $\langle D \rangle = 7$ nm) and/or σT_c (up to 70 K).

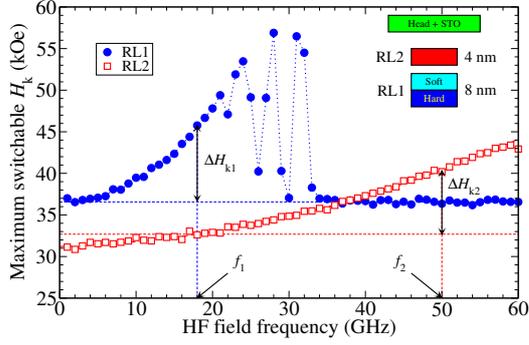


Fig. 1: Example of selective switching of recording structures in MAMR.

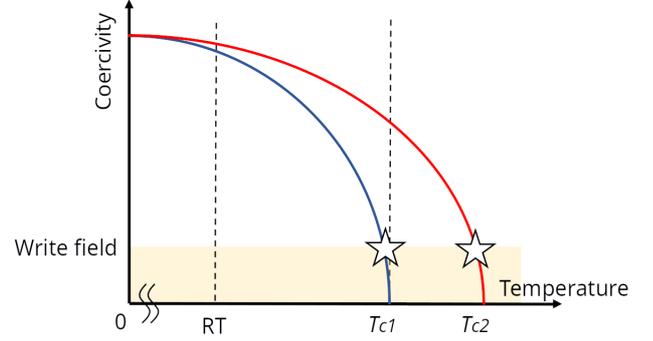


Fig. 2: Selective recording in a 3D HAMR system. The recording structures have different T_c .

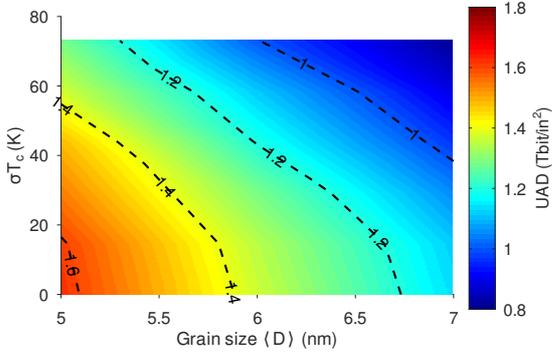


Fig. 3: Effect of average grain size and T_c distribution on user areal density in RL1 of a 3D HAMR system.

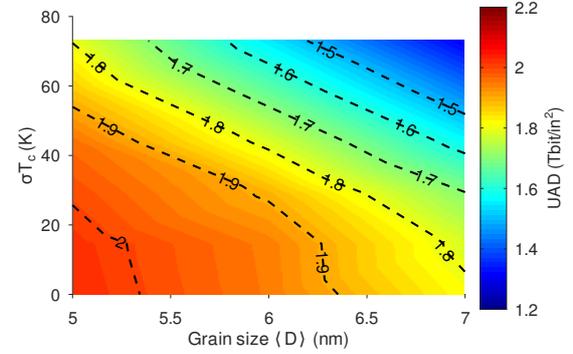


Fig. 4: Effect of average grain size and T_c distribution on user areal density in RL2 of a 3D HAMR system.

References

- [1] M. Albrecht, G. Hu, A. Moser, O. Hellwig, and B. D. Terris *J. Appl. Phys.*, vol. 97, pp. 103910–1–5, 2005.
- [2] S. Khizroev, Y. Hijazi, N. Amos, R. Chomko, and D. Litvinov *J. Appl. Phys.*, vol. 100, pp. 063907–1–8, 2006.
- [3] N. Amos *et al. PLoS ONE*, vol. 7, p. e40134, 2012.
- [4] S. J. Greaves, K. S. Chan, and Y. Kanai *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55(12), pp. 6701509–1–9, Dec. 2019.
- [5] A. Aboutaleb, A. Sayyafan, K. Sivakumar, B. Belzer, S. Greaves, K. S. Chan, and R. Wood *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, pp. 010502–1–11, 2021.
- [6] H. Yamane, S. J. Greaves, and Y. Tanaka *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, pp. 3200705–1–5, Aug. 2022.

二層磁気記録における信号処理方式の一検討

仲村 泰明, 西川 まどか, 岡本 好弘

(愛媛大学大学院 理工学研究科)

A study of signal processing in double layered magnetic recording

Yasuaki Nakamura, Madoka Nishikawa, Yoshihiro Okamoto

(Graduate School of Science and Engineering, Ehime University)

はじめに

ハードディスク装置(HDD: hard disk drive)のトリレンマ問題を解決する記録方式として、エネルギーアシスト磁気記録¹⁾が提案されている。また、記録密度を大幅に向上させる記録方式として片面に複数の記録層を有する多層磁気記録²⁾が注目されている。本検討では、記録層を2層有するグラニューラ媒体モデルに熱アシスト磁気記録(HAMR: heat assisted magnetic recording)³⁾を適用した記録再生系に対して採用したPRML (partial response maximum likelihood)方式⁴⁾による誤り率(BER: bit error rate)について検討する。

HAMR モデル

Fig. 1 に、HAMR の記録層に用いる離散グラニューラ媒体モデル⁵⁾を示す。本検討では、磁性粒子材料として FePt⁶⁾を想定しておりその平均粒径、平均粒子間隔、および平均非磁性粒界幅をそれぞれ 5、6、1 nm とし、平均粒径で規格化した粒径分散を 20%としている。また、二層磁気記録媒体の記録層を、ABS (air bearing surface) から 1 層目、2 層目と定義し、各記録層および中間層の厚みを、それぞれ 4、10、1 nm としている。媒体上の面記録密度を 2 Tbit/inch² と想定し、媒体上のチャンネルビット長 l_{bl} 、およびトラックピッチ l_{tp} をそれぞれ 12、26 nm としている。

Fig. 2 に、各記録層における媒体温度 T_m に対する保磁力 H_c の関係⁵⁾を示す。ここで、0 K における両記録層の平均保磁力を 40 kOe、分散を 5%としている。また、第 1 層と 2 層のキュリー温度 T_{c1} 、 T_{c2} を、平均値がそれぞれ 520 K、620 K、標準偏差 σ_{T_c} が 10 K のガウス分布と仮定している。

記録ヘッドは、主磁極の中央に熱源を設置可能な分割構造⁷⁾と仮定する。また、媒体の温度分布を二次元ガウス分布と仮定し、ダウントラック方向、クロストラック方向の標準偏差をそれぞれ 6、12 nm としている。本検討では、第 1 層、2 層の最高加熱温度をそれぞれ $T_{max1} = 570$ K、 $T_{max2} = 730$ K⁵⁾としている。

Fig. 3 に、“0011” の繰返し(2T)パターンに対する再生波形を示す。これは、三次元有限要素法により求めた各層に対する MR(magneto-resistive)ヘッドの再生感度と各層の磁化パターンを畳み込むことで求められ、第 1 層の孤立再生波形の飽和レベルで規格化している。二層一括再生して得られる再生

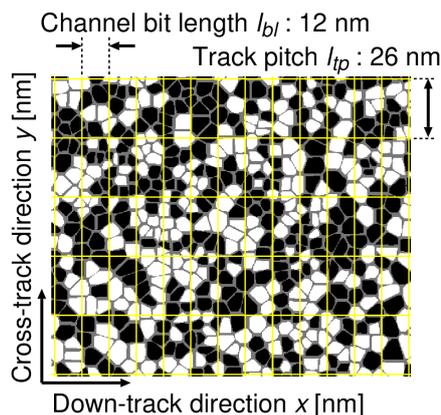


Fig. 1 Granular medium model.

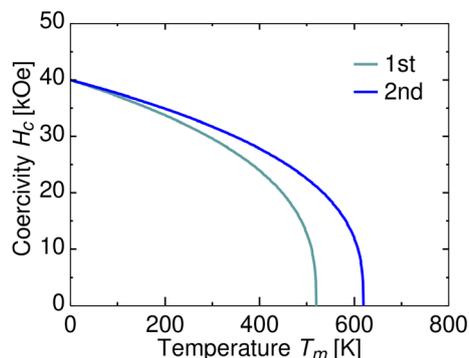


Fig. 2 Temperature dependence of coercivity H_c .

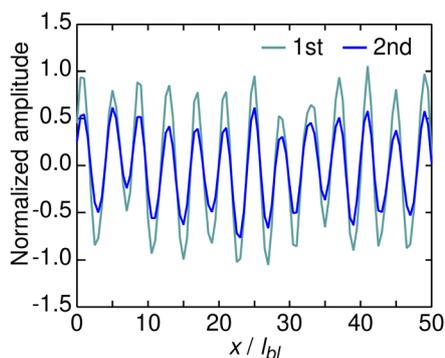


Fig. 3 Reproducing waveforms (2T pattern).

波形は、各層の再生波形を足し合わせることで求められるものと仮定し、信号処理を行う。

性能評価

Fig. 4 に、再生波形のサンプルの頻度分布を示す。ただし、各層に 1 Mbit のランダム系列を記録再生した波形を用いている。図中の赤色の線は第 1 層の記録情報が“0”、青色の線は第 1 層の記録情報が“1”、実線は第 2 層の記録情報が“0”、破線は第 2 層の記録情報が“1”の場合の分布をそれぞれ示している。図より、規格化振幅が“0.0”付近における第 1 層と第 2 層の記録情報が異なる“0”と“1”および“1”と“0”の分布は重なりが大きくなっていることがわかる。

Fig. 5 に、各層のビット応答より求めたチャンネルの時間領域応答を示す。図の横軸はビット間隔で規格化した時間、縦軸は第 1 層のチャンネル応答の最大値で規格化した規格化振幅を示している。図より、第 1 層目の時間応答はあまり広がっていないが、第 2 層目は第 1 層目に比べて広がりがあることがわかる。

Fig. 6 に、各層を個別に再生して PRML 方式を適用して求めた BER 特性を示す。ここで、両層とも PR の相関長を 2 として、1 番目の係数を“1.0”として 2 番目の係数を変化させて求めている。ただし、システム雑音は考慮していない。図より、両層ともに 2 番目の係数を“0.1”とすることで最小の BER が得られていることがわかる。

次に、Fig. 6 の結果を基に二層一括再生した再生波形に波形干渉と層間干渉を考慮した二次元 PR⁸⁾を適用して BER を求めたところ約 1.2×10^{-1} 程度と BER は高く、他の信号処理方式の導入が必要であることが明らかとなった。

謝辞

本検討を行うにあたり有益なご助言をいただきました東北大学 サイモン・グリーブス先生、新潟工科大学 金井靖先生、また物質・材料研究機構 首藤浩文博士、高橋有紀子博士に感謝いたします。また、本研究の一部は、JST、CREST、JPMJCR22C3 および情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の支援のもとに行われたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Y. Shiroishi, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3816 (2009).
- 2) S. Greaves, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 3000510 (2017).
- 3) M. A. Seigler, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 119 (2008).
- 4) Y. Okamoto, et al., *J. Magn. Magn. Mat.*, **235**, 259 (2001).
- 5) 渡部他, *IEICE Technical Report*, **124**, MRIS2024-5 (2024).
- 6) T. Y. Chang, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **59**, 3200107 (2023).
- 7) S. J. Greaves, et al., *IEEE Trans. Magn.*, **55**, 3001506 (2019).
- 8) Y. Nakamura, et al., *2021 IEEE International Magnetic Conference*, 2100024 (2021).

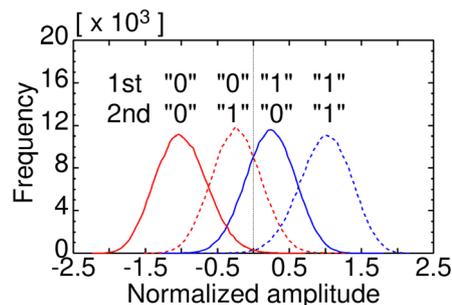


Fig. 4 Distributions of reproduced waveform.

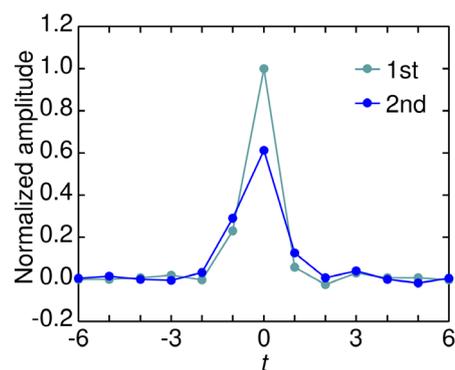


Fig. 5 Channel time-domain responses.

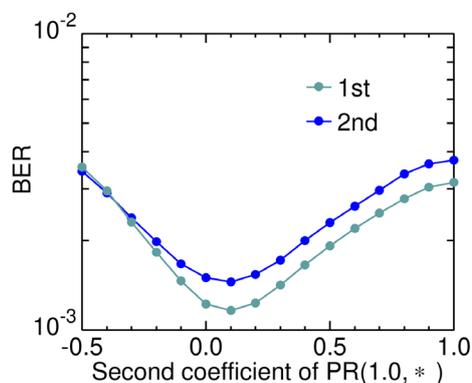


Fig. 6 BER performances for respective