

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 24日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760253

研究課題名（和文） 軟・硬磁性交換結合パターン媒体へのマイクロ波アシスト磁気記録シミュレーション

研究課題名（英文） Microwave assisted magnetic recording simulation of exchange composite patterned media

研究代表者

田中 輝光（TANAKA TERUMITSU）

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号：20423387

研究成果の概要（和文）：5 Tbits/inch<sup>2</sup> 超の記録密度を達成する軟・硬磁性交換結合パターン媒体へのマイクロ波アシスト磁気記録シミュレーションを行い、要求される記録媒体の物理的・磁気的特性を推定した。記録媒体を交換結合構造にすることで、信号記録に要求される高周波磁界強度および周波数が大幅に緩和され、硬磁性材料として一般的な減衰定数の大きなものでも効率的で高速な磁化反転が可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Microwave assisted magnetic recording simulation on exchange composite patterned media have been performed for achieving 5 Tbits/inch<sup>2</sup> of areal density, and the requirement of physical and magnetic properties for the media were estimated. In this research, it was found that microwave strength and its frequency essential for magnetization switching are significantly small comparable to those for conventional recording media, and effective magnetization switching is maintainable even when damping constant of the media is relatively large.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気記録・電子デバイス・機器

## 1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ（HDD）の近年の大容量化は高記録密度化によって成されており、現在では実験室段階で800 Gbits/inch<sup>2</sup>という面記録密度が既に達成されている。しかしながら、NEDOの調査によると現

在の記録方式では1.2 Tbits/inch<sup>2</sup>程度が限界であるため、更なる面記録密度の向上には熱アシスト記録またはマイクロ波アシスト記録の適用が必要であり、将来的には前述のアシスト記録方式に加えて、磁性粒子を規則的に配置したパターン媒体の適用

が必要であると予測されている。記録技術の変更が必要になる理由は、以下に述べるトライレンマと呼ばれる問題に直面しているためである。従来構造の記録媒体ではノイズを低減するために磁性粒を微細化することが必要であるが、磁性粒のサイズを現状の 5~7 nm 径以下にすると磁化が熱的に不安定になり、記録した情報が時間の経過とともに消失する。ノイズを低減し、磁化の熱安定性を確保するためには、異方性磁界の大きな材料を記録媒体として用いることが必要であるが、異方性磁界の大きな材料の保磁力は大きく、現存する記録ヘッドでは信号を記録できないという問題である。このトライレンマの解決のため、熱を加えて記録媒体の保磁力を低減して信号の記録を可能にする熱アシスト記録や、マイクロ波磁界を記録媒体に印加して磁気スピンの揺らぎを誘発することで、小さなヘッド磁界でも信号記録を可能にするマイクロ波アシスト記録が次世代の記録技術として注目されている。一方で、形状が整った磁性粒子を規則的に配置することでノイズを大幅に低減できることを利用して、比較的大きなサイズの磁性粒子を用いることで磁化の熱安定性を確保するパターン媒体も、更に次の世代の記録媒体として有力視されている。

## 2. 研究の目的

本提案研究では、軟磁性体と硬磁性体を複合化し、交換結合させたパターン媒体へのマイクロ波アシスト記録についてマイクロマグネティック計算を用いて記録特性をシミュレートすることで、5 Tbits/inch<sup>2</sup> 超の記録に必要な物理的・磁氣的パラメータを示し、超高密度記録用ハードディスク作製のための指針を得ることを目的とする。このような構造のパターン媒体へのマイクロ波アシスト記録方式は、磁化の熱安定性に優れた異方性磁界の極端に大きな超高密度記録材料への記録の容易性という点で他の記録方法と比較して、極めて有利なものである。

## 3. 研究の方法

将来の記録媒体としてパターン媒体が利用されることはほぼ確実であると予測される。しかしながら、信号記録方式は単磁極ヘッドによる従来の記録方式ではなく、熱アシスト記録方式またはマイクロ波アシスト記録方式が適用される見込みである。本提案研究では、様々な利点を有するマイクロ波アシスト記録方式による ECC パターン媒体への超高密度記録の可能性について検討する。硬磁性材料として磁気特性を比較的制御し易い FePt 系の材料を想定し、面記録密度 5 Tbits/inch<sup>2</sup> 以上を達成するための ECC パターン媒体へのマイクロ波アシスト記録に要

求されるパターンサイズ・パターン間隔などの物理特性および異方性磁界や飽和磁化などの磁気特性をシミュレーションにより推定する。

## 4. 研究成果

(1) ECC ナノピラーにおける歳差運動角  $\theta$  の周波数スペクトルには各種の共鳴状態に起因したピークが複数の周波数領域に現れる。Fig. 1 は  $\theta$  が極大となる周波数の内、最も低い周波数の異方性磁界に対する変化を示したものである。このピーク周波数は硬磁性部の異方性磁界  $H_{k,h}$  にほぼ依存せず、一方で軟磁性部の異方性磁界  $H_{k,s}$  に対してはほぼ線形に増加した。これらの特性から低周波側に現れるピークは主に軟磁性部における強磁性共鳴を反映しているものと考えられる。Fig. 2 に  $H_{k,h} = 90$  kOe,  $H_{k,s} = 50$  Oe の場合における磁化反転の生じた交流磁界条件をプロットで表した磁化反転マップを示す。なお 10 kOe の直流磁界を印加している。図を見ると、およそ 2 kOe、20 GHz の交流磁界条件で磁化反転が生じていることが分かる。これらの値はそれぞれ硬磁性部における異方性磁界の 2%、および強磁性共鳴周波数の 4% 程度

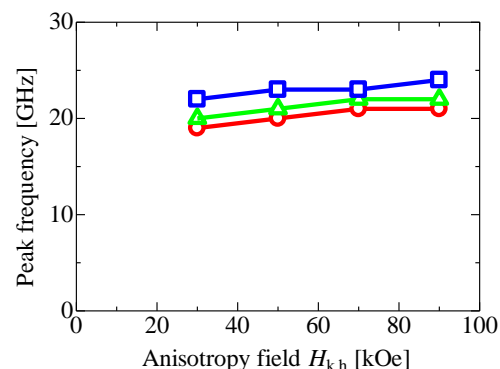


Fig. 1 Anisotropy field dependence of resonant frequency. ( $H_{dc} = 0$ ,  $H_{ac} = 10$  Oe)

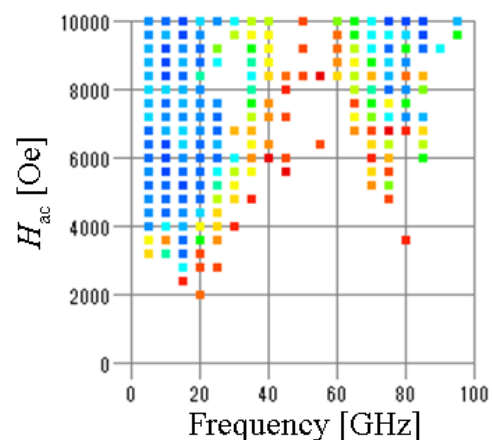


Fig. 2 Switching yield map. ( $H_{k,h} = 90$  kOe,  $H_{k,s} = 50$  Oe  $H_{dc} = 10$  kOe)

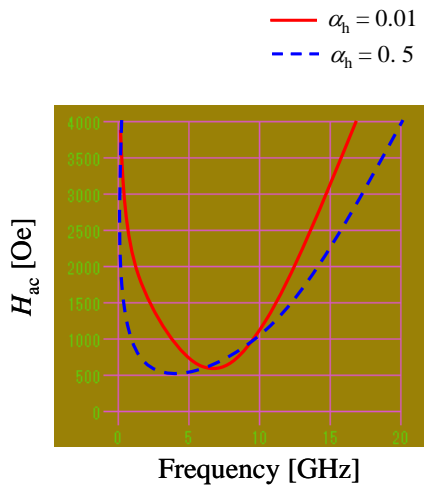


Fig. 3 Switching yield map for ECC nano-pillar.

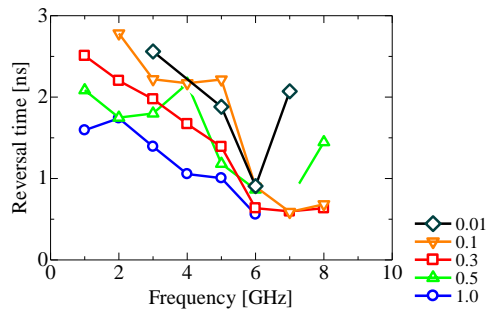


Fig. 4 magnetization reversal time.

となる。このように極めて高い異方性磁界を持つ材料を硬磁性部とした場合であっても、交流磁界強度および周波数の十分な低減効果が期待できる結果を得た。

(2) LLG 方程式を用いて磁化反転挙動の計算を行った。異方性磁界、外部印加磁界、交換相互作用磁界、静磁氣的相互作用磁界のベクトル和を実効磁界とした。対角線の長さが 4.6 nm、厚さが 1 nm の正六角柱を計算最小セルとし、それを 16 個積層したナノピラーについて磁化反転過程の計算を行った。上部 10 層を軟磁性部、下部 6 層を硬磁性部とし硬磁性部の異方性磁界  $H_{k,h}$  を 50 kOe とした。飽和磁化  $M_s$ 、交換定数  $A$  は共に  $800 \text{ emu/cm}^3$ 、 $1 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$  とした。軟磁性部のダンピング定数  $\alpha_h$  は 0.01 とした。硬・軟磁性層間における交換結合定数  $A_{in}$  は  $10 \text{ erg/cm}^2$  とした。なお初期状態で磁化は全て  $+z$  方向を向いており、10 kOe の直流磁界は  $-z$  方向にマイクロ波磁界は  $y$  軸方向にそれぞれ印加し、硬磁性部のダンピング定数による磁化反転特性の違いを調べた。Fig. 3 に実線、破線はそれぞれ硬磁性部のダンピング定数  $\alpha_h$  が 0.01、

0.5 の場合における磁化反転の生じる領域を示している。なお ECC ナノピラーは、各種の共鳴現象に起因して反転領域が複数の反転領域に広がっているが、最も低周波側に広がる反転領域にのみ着目した。周波数に対する広がりには多少の差異はあるものの、いずれの  $\alpha_h$  でも 1 kOe、5 GHz 周辺に反転領域が広がっている、このように硬磁性部のダンピング定数が支配的でない結果は、ECC ナノピラーにおける MAMR 特有の軟磁性部の磁化挙動および共鳴現象を反映した磁化反転のよるためと考えられる。Fig. 4 は交流磁界の周波数に対する磁化反転時間を  $\alpha_h$  をパラメータとして示したものである。 $\alpha_h$  が大きいほど磁化反転に要する時間は短い傾向にある。これは  $\alpha_h$  の増大することで硬磁性部の磁化が軟磁性部の磁化挙動を反映しやすくなった結果であると考えられる。

(3) 媒体として直径 4.5 nm、厚さ 16 nm の六角柱状のピラーを 2 次元的に並べた ECC 媒体を想定した。Fig. 5 に記録ヘッドのモデル図を示す。ヘッド磁界は、主磁極(MP)及びトレーリングリターンヨーク(RY)を有する単磁極ヘッドと軟磁性裏打ち層を考慮し、有限要素法計算で求めた。交流磁界発生源として単一磁化が理想的に回転するスピントルクオシレータ(STO)を想定し、幅 20 nm、厚さ 8 nm の磁界発生層(FGL)が MP、RY 間に配置されているものとした。媒体表面に印加

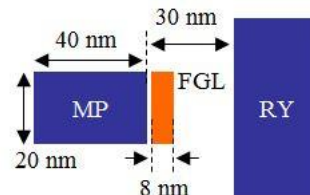


Fig. 5 Single pole type head and field generation layer.

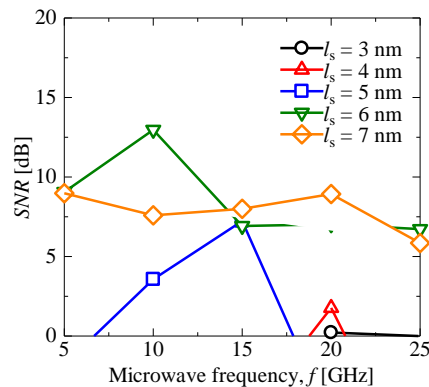


Fig. 6 SNR as a parameter of the upper layer thickness,  $l_s$ .

されるヘッド磁界の垂直成分、およびマイクロ波磁界の面内成分はそれぞれ最大 12.6 kOe、1.5 kOe である。線密度 847 kbpI における信号記録・再生時の信号対雑音比(*SNR*)のマイクロ波周波数依存性を Fig. 6 に示す。なお、上部ソフト層は  $H_k = 10$  kOe、 $M_s = 1000$  emu/cc、 $\alpha = 0.02$ 、下部ハード層は  $M_s = 1000$  emu/cc、 $\alpha = 0.2$ 、熱安定性指標が 60(@RT)となるように  $H_k$  を 30 ~ 40 kOe の範囲で変化させた。同図から上部層膜厚  $l_s$  の減少に伴い、*SNR* の最大値が減少し、*SNR* が最大となるマイクロ波周波数が増加していることがわかる。これは  $l_s$  が小さい場合、層間での磁氣的結合が強いために ECC ピラー全体の磁化が単磁区的な挙動を取りやすく、上部ソフト層の磁気特性が磁化挙動に反映されにくくなる為である。一方  $l_s = 6$  nm の場合には、上部ソフト層固有の磁化挙動が顕在化し、ECC 媒体としてのマイクロ波周波数低減効果が現れていることがわかる。また  $l_s = 7$  nm ではマイクロ波周波数依存性が小さくなり、*SNR* の最大値は  $l_s = 6$  nm の場合よりも低下した。この結果から本モデルにおいて、単層媒体時に必要なマイクロ波周波数 40 ~ 50 GHz よりも大幅に低い 10 ~ 20 GHz での信号記録が可能であることがわかった。

(4)①マイクロ波アシストを利用した ECC パターン媒体への記録シミュレーション、②パターン配列と記録信号周波数のシンクロナイズエラー許容値の検討を行った。①に関しては、立案当初に懸念された通り、計算時間が極端に長くなる結果となった。これに対し、グラフィックボードに搭載されている GPU を用いた並列計算を導入し、計算時間を 1/40 にまで短縮することに成功し、計算の効率化を図った。パターンサイズとパターン間隔が 1 : 2 の記録媒体において 10Tbits/inch<sup>2</sup> 以上の信号記録が可能であることがコンピュータシミュレーションによって確認された。ただし、磁性体の磁気パラメータは一本の ECC ピラーの磁化反転特性から推測した最適値よりもソフト層の磁気特性はハードに、ハード層の磁気特性をソフトにし、なおかつハード層の膜厚を増やして熱安定性を確保する必要がある。②に関しては、信号書き込み時のシンクロナイズエラーがおおよそ 30% を超えると急激に書き込みエラーが増加することが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ①田中輝光, 加藤 歩, 川野敏志, 成田直幸, 能崎幸雄, 金井 靖, 松山公秀, マイクロ波アシス

ト磁気記録における記録ビットパターン of 媒体飽和磁化依存性, The Institute of Electrical Engineering of Japan, Trans. on FM, 査読有, 130 巻, 2010, Terumitsu Tanaka, Yoshitoki Furomoto, Ayumu Kato, Anis Faridah Md Nor, and Kimihide Matsuyama pp. 648-654

- ②Naoyuki Narita, Terumitsu Tanaka, Ayumu Kato, Kimihide Matsuyama and Yukio Nozaki, Dependence of Magnetization Switching Property with Microwave Assistance on Anisotropy Field for ECC Nano-pillar, Proceedings of IEEE Region 10 Conference, TENCON 2010, 査読有, TENCON2010, 2010, pp. 1898-19101

- ③T. Tanaka, A. Kato, Y. Furomoto, A. F. Md Nor, Y. Kanai, and Kimihide Matsuyama, Microwave-assisted magnetic recording simulation on exchange-coupled composite medium, Journal of Applied Physics, 査読有, 111 巻, 2012, pp. 07B711-1-3

- ④Yukio Nozaki, Ayumu Kato, Kenji Noda, Yasushi Kanai, Terumitsu Tanaka, and Kimihide Matsuyama, Microwave-assisted magnetic recording simulation on exchange-coupled composite medium, Journal of Applied Physics, 査読有, 109 巻, 2011, pp. 123912-1-8

[学会発表] (計 26 件)

- ① T. Tanaka, N. Narita, A. Kato, Y. Nozaki and K. Matsuyama, Microwave-assisted magnetization reversal of exchange coupled composite nano-pillar with large damping constant, International Magnetic Conference 2011.

- ② Terumitsu Tanaka, Yoshitoki Furomoto, Ayumu Kato, Anis Faridah Md Nor, and Kimihide Matsuyama, Reduction in switching fields by thermal activation in microwave assisted magnetization reversal, 56th Annual Conference on Magnetism Magnetic Materials, 2011.

- ③ T. Tanaka, A. Kato, Y. Furomoto, Y. Kanai and K. Matsuyama, Signal Recording Simulation on Exchange Coupled Compositied Media with Microwave Assistance, 第 21 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2011.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)

○取得状況（計0件）

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 輝光 (TANAKA TERUMITSU )  
九州大学. 大学院システム情報科学研究  
院・助教  
研究者番号：20423387

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：