

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19569005
 研究課題名 (和文) 軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディア開発のための
 磁気記録シミュレーション
 研究課題名 (英文) Magnetic recording simulation for development of patterned media
 with soft magnetic nano-pillar
 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所・助教
 研究者番号：20423387

研究成果の概要：軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアの 1 Tbits/inch² という面記録密度達成の可能性についてマイクロマグネティックシミュレーションおよび有限要素法を用いて検討し、1 Tbits/inch² の面記録密度を達成可能にする媒体およびヘッドパラメータを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,800,000	0	2,800,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	180,000	3,580,000

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・パターンドメディア・マイクロマグネティックシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁気記録技術を活用した記録デバイスの一つである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り達成されており、記録方式が長手記録から垂直記録方式へと変化しても単位面積あたりの記録容量 (面記録密度) の伸び率は衰えず、現在でも年率 3 割を維持しており現在は 378 Gbits/inch² という面記録密度が達成されている。現在の HDD 研究で目標とされている 1 Tbits/inch² 超の高密度化には、従来の連続膜やグラニューラ膜とは異なるタイプの記録媒体が必要であると考えられており、記録層となる硬磁性の粒子を規則的に配置したパ

ターンドメディアが今後の超高密度記録媒体として有力視されている。これは、従来のグラニューラ媒体では、磁化転移がガタガタとした形状となるために転移性のノイズが大きいことが一つの要因である。転移性ノイズを低減するには磁性粒の微細化が必須であるが、現状の数 nm 径以下にすると磁化が熱的に不安定となり、記録した情報が時間の経過とともに消えてしまうという結果になる。一方で、パターンドメディアは磁性粒が規則的に配置されているため、転移性のノイズが非常に小さく、また、磁性粒を小さくする必要がないために磁化の熱安定性を確保し易くなる。

現在のハードディスクには垂直磁気記録が適用されており、硬磁性である記録層の下部に軟磁性裏打ち層と呼ばれる軟磁性層を配置した構造になっている。軟磁性層は記録ヘッドが発する磁束をトレーリングリターンヨークへと通し、強い記録ヘッド磁界を得るために必要なものである。現在、パターンメディアとして考えられている構造は、図1に示すような、連続軟磁性膜の上部に硬磁性粒子を規則的に配置したものである。これまでに同図のような構造のパターンメディアの作製方法についていくつか提案されているが、数十 nm の大きさのパターンをディスク全面に規則的に作製でき、制作コストが低いものは、現在のところナノインプリント技術とアルミナ陽極酸化法を組み合わせただけの方法のみである。これはパターンの型枠となる穴を作り、その内部に磁性体をめっき等の方法によって充填するものであり、実際に試作されている。このように記録層をパターン化することによって記録層の転移性ノイズおよび磁化の熱安定性の問題は解決できるが、一方で、従来の垂直磁気記録メディアで問題となっている軟磁性裏打ち層内での磁壁移動によって発生するノイズの問題は依然として残る。その解決策として、図2に示すように、硬磁性体だけでなく、軟磁性裏打ち層もパターン化し、軟磁性裏打ち層も記録層と同様に磁氣的に孤立させて磁壁の発生を防ぐ方法がある。しかし、軟磁性層が連続でないために、ヘッドから発せられた磁束が閉磁路を形成できず、ヘッド磁界が大きく低下して信号記録に必要な強度のヘッド磁界が得られないと考えられており、これまであまり研究されてこなかった。

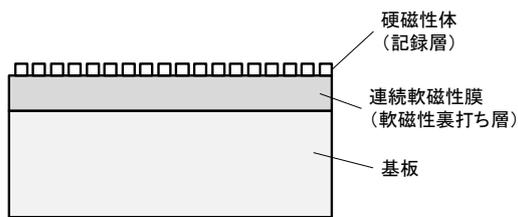


図1 従来のパターンメディアの断面構造。

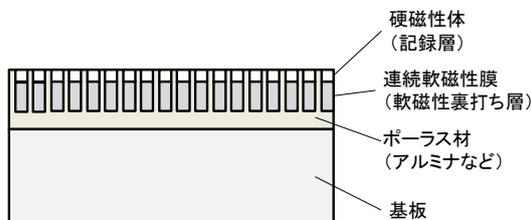


図2 本提案のパターンメディアの断面構造。

2. 研究の目的

HDD のような多種の技術を用いる必要のあるデバイス開発にはトータル設計が必須である。つまりメディアとヘッドの組み合わせが重要であるため、双方の特性を考慮したデバイス開発が最も重要となる。本提案研究では 1 Tbits/inch² 以上の超高密度磁気記録に必要な記録媒体の物理的・磁氣的特性を定量的に示し、同時に軟磁性ナノピラーを有するパターンメディアの高密度記録能力をコンピュータシミュレーションにより証明する。また、3次元電磁界有限要素法シミュレーションにより記録ヘッドの形状や磁気特性を最適化することで、本提案のパターンメディアを用いた HDD 開発の指針を得ることを目的とする。また、パターンメディアであっても、記録密度をさらに上げるには、磁性粒（パターンの大きさ）を小さくする必要があるので、従来のグラニューラ媒体と同様に必ず磁化の熱安定性の問題が発生する。本提案研究で対象とする軟磁性ナノピラーを有するパターンメディアでは、熱安定性に優れた高 K₁ 材料を用いても、信号記録の容易性を維持できることを定量的に示す。

3. 研究の方法

NEDO の調査によると今後 10 年以内には 1 Tbits/inch² の超高密度記録用の媒体としてパターンメディアが採用されることが予測されているが、どのような形態のパターンメディアが用いられるかは依然として不透明な状態である。本試験研究で取り扱う軟磁性ナノピラーを有するパターンメディアの作製方法は、モールドをアルミ基板に押し付け、これを陽極酸化して型枠をつくり、その内部に軟磁性体および硬磁性体を充填するという非常に単純なものである。これは従来から考えられてきたリソグラフィ技術等を用いて作製する方法と比較すると、加工精度・コスト・生産性の点で極めて優位であるため、磁性体の充填方法が確立されれば近い将来に製品化されるものと考えられる。以上の理由から、軟磁性ナノピラーを有するパターンメディアは次世代の記録媒体として非常に有望であると考えている。1 Tbits/inch² 超の更なる高密度記録の達成には記録ヘッドと記録媒体の双方の特性を考慮した設計が不可欠であり、実用化のためにはトータルバランスの取れた設計が必須である。また、記録媒体には、磁化の経時変化の問題が常に付きまとうため、最低でも 10 年程度の情報保持能力をもつ媒体設計をする必要がある。

本研究では、軟磁性ナノピラーを有するパターンメディアにおける Tbits/inch² 級の超高密度記録の可能性について検討するために、有限要素法およびマイクロマグネティ

ックシミュレーションを用いて、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアおよび記録ヘッドも含めた 1 Tbits/inch² 実現に要求される記録システムの全体設計を行った。

4. 研究成果

(1) 垂直磁気記録メディアに単磁極ヘッドで信号を記録する際には、記録層の膜厚方向に強く急峻な分布の磁界を加えることが望ましい。単磁極ヘッドと二層膜メディアの組み合わせでは、各々の磁気特性や構造などを最適化することにより良好なヘッド磁界を得ることができる。しかし、高密度化に伴う媒体の高保磁力化によって、飽和記録は困難になる一方である。記録ヘッド磁極材料として用いることのできる Co、Ni、Fe 合金の最大磁束密度は 2.4 T であり、現状以上のヘッド磁界強度を得ることは困難である。また、材料や構造などの種々のパラメータを変化させ、理想的なヘッドやメディアをカットアンドトライで作製することは容易ではない。特に、単磁極ヘッドと二層膜メディアの組み合わせでは、メディアの軟磁性裏打ち層も含めた解析が不可欠である。この対処法として、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) 磁界解析を用いて、単磁極ヘッドの記録能力の向上のため、ヘッド構造の最適化を図ることが有効である。軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアは、硬磁性部および軟磁性部がともに離散的に分布している。つまり、軟磁性裏打ち層がパターン化されることによって、本来の軟磁性裏打ち層としての効果が減少し、磁気記録層に印加されるヘッド磁界強度が低下することが懸念される。また、従来の磁気記録媒体と比べるとヘッド磁界の分布が異なることも予想される。そこで、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアと単磁極ヘッドを組み合わせた記録システムを仮定し、3 次元有限要素法に基づいた磁界解析シミュレーションによりヘッド磁界を計算した。また、ヘッド磁界分布に影響を与えるパラメータについても検討した。

図 3 にヘッド磁界の垂直成分 (H_y) の主磁極-トレーリングリターンヨーク間のギャップ長 (g) 依存性を示す。この計算では、軟磁性ピラーの長さは 100 nm、ヘッド-メディア間の距離 (d) を 5 nm としている。なお、ピラー径はビット長の半分とし、1 Tbits/inch² を想定して 12.5 nm とした。縦軸は硬磁性部の厚みの中央位置における H_y を示す、従来の媒体では、主磁極先端から出た磁束は連続な軟磁性裏打ち層内部を通り、トレーリングリターンヨークへ入るため、磁路効率が高く、 g が変化しても H_y にほとんど影響はない。一方、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアの場合では、ヘッド磁界強度は g に依存して変化している。従来の媒体にお

けるヘッド磁界強度に比べてヘッド磁化強度はやや小さいが、 g が小さくなるにつれて H_y は増加し、 g が 50 nm 以下では従来の媒体と比べても約 80 % を確保できる。これは、主磁極からトレーリングリターンヨークに流れる磁束の磁路効率が向上したためである。従って、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアにおいて面記録密度 1 Tbits/inch² の記録システムを実現するには、 g を少なくともピラー系程度 (=12.5 nm) にすることが重要であることが分かる。

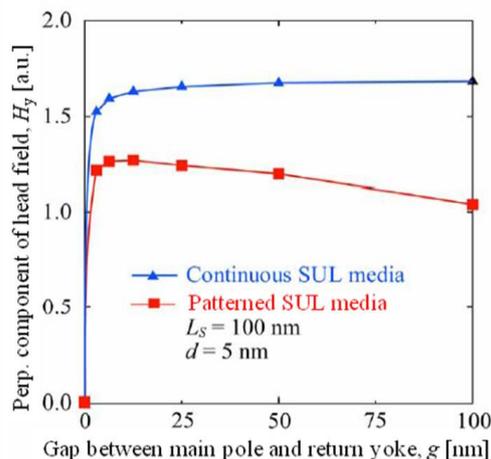


図 3 ヘッド磁界垂直成分強度とギャップ長の関係

(2) Tbits/inch² 級の超高密度記録を実現するためには、結晶磁気異方性の大きな材料を硬磁性材料に用いつつ、限られた強度の外部印加磁界で飽和記録することが求められる。軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアは、軟磁性部も硬磁性部とともにパターン化された特異な構造を有するため、軟磁性部の磁化が硬磁性部の磁化反転を促すことが考えられる。そこで、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に基づくマイクロマグネティックシミュレーションを用いて軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアの磁化反転挙動を計算し、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアの特長の一つとして考えられる硬磁性体の磁化反転促進効果について検討した。

図 4 に硬磁性部の実効保磁力 (H_{ch}) の軟磁性部の長さ (L_s) 依存性を示す。また、硬-軟磁性部間の交換定数 (A_{int}) も変化させて計算している。本計算では、硬磁性部の長さを 10 nm、異方性磁界を 18 kOe、飽和磁化を 1000 emu/cc、軟磁性部の飽和磁化を $M_{SS}=1200$ emu/cc と設定している。 L_s が 0、つまり硬磁性部のみの場合では、 H_{ch} は形状に依存する反磁界、つまり形状磁気異方性の影響により 16 kOe 程度の値を示した。 A_{int} が 0 の場合には硬磁性

部と軟磁性部間との磁気的なカップリングがないにもかかわらず H_{ch} は減少している。これは軟磁性部から生じる静磁気相互作用磁界に起因している。また、 L_s が増大するに伴ない、 H_{ch} は減少する。同図から、硬磁性部の実効保磁力を低減するためには、軟磁性部の長さは 25 nm 以上必要であることがわかる。

図 5 に軟磁性部の実効保磁力 (H_{cs}) の軟磁性部の長さ (L_s) および硬-軟磁性部間の交換定数 (A_{int}) 依存性を示す。参考のため、軟磁性部のみの場合の保磁力も破線で示している。 L_s が 25 nm 以下では、 A_{int} が大きいほど H_{cs} は大きくなる傾向をもつ。これは L_s が短くなると、硬磁性部との交換相互作用が軟磁性部内部の交換相互作用を介して軟磁性部下部での磁化反転を抑制するためである。従って、 L_s が長くなれば、軟磁性部の下部への硬磁性部との交換相互作用の影響が減少するため、軟磁性部下部の磁化の自由度が増し、軟磁性部本来の磁気特性を示す。 L_s が 25 nm 以上の場合では、軟磁性部のみの場合の保磁力と値が一致しているのはこの為である。

(3) 一般にパターンドメディアでは、パターン間の静磁氣的相互作用磁界による影響を低減することが重要である。本研究では、複数のピラーが存在する場合において減磁曲線を計算したところ、軟磁性部の飽和磁化が 600 emu/cc 程度であれば、パターン間の静磁氣的相互作用の影響を大幅に低減することができ、なおかつ硬磁性部の磁化反転磁界の低減効果も維持できることが分かった。そこで、これらの磁気特性を考慮して、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアへの信号記録シミュレーションを行った。図 6 に記録ビットパターンを示す。計算は一つのピラーを $5 \times 5 \times 14$ 個のセルに分割して行った。同図は中段部分をヘッドが右から左に移動した場合の記録ビットパターンを示しており、白および青が磁化の向き（上向きおよび下向き）を示している。ヘッド-メディア間の相対速度は 40 m/s、記録周波数は 1.5 GHz として計算した。軟磁性部の飽和磁化が 800 emu/cc 以上では媒体の磁化は反転するものの、隣接するピラーからの静磁気相互作用磁界の影響を大きく受けるため、記録パターンに乱れが生じることが分かった。一方で、軟磁性部の飽和磁化が 600 emu/cc 程度の場合には同図に示すように、隣接するピラーの静磁氣的相互作用の影響を低減できるため、明瞭な記録ビットパターンが得られている。以上のことから、軟磁性ナノピラーを有するパターンドメディアは少なくとも 1 Tbits/inch² 程度の高密度記録が可能であることが示された。

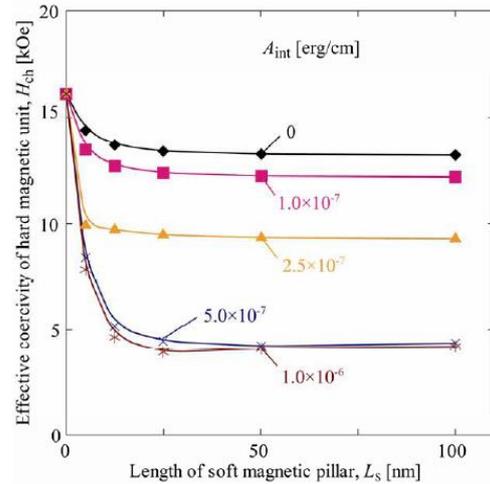


図 4 硬磁性部の実効保磁力と軟磁性ピラーの長さの関係

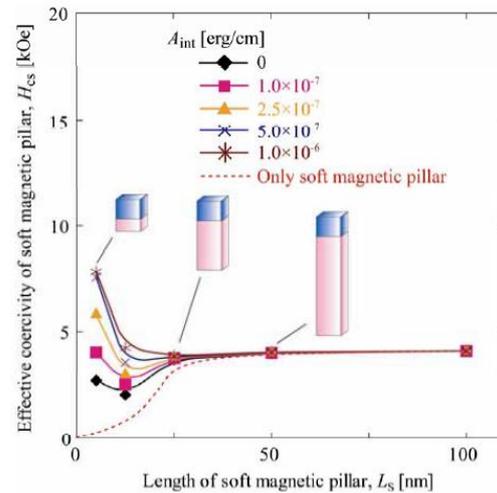


図 5 軟磁性部の実効保磁力と軟磁性ピラーの長さの関係

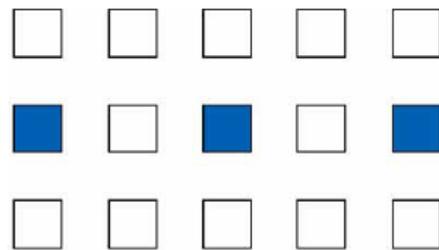


図 6 記録ビットパターン

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Junsuke Matsuzaki、Terumitsu Tanaka、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Influence of Geometrical and Magnetic Parameters on Magnetization Behavior for a Hard/Soft

Magnetic Composite Pillar, Transactions of the Materials Research Society of Japan, 33 巻、885-888、2008、査読あり

- ② Terumitsu Tanaka、Junsuke Matsuzaki、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Recording head field for SPT head combined with hard/soft magnetic composite pillar arraymedia、Journal of Magnetism and Magnetic Materials、320 巻、2931-2934、2008、査読あり
- ③ Terumitsu Tanaka、Junsuke Matsuzaki、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Magnetization behavior of hard/soft-magnetic composite pillar、Journal of Magnetism and Magnetic Materials、320 巻、3100-3103、2008、査読あり

[学会発表] (計 17 件)

- ① Terumitsu Tanaka、Junsuke Matsuzaki、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Relationship between Coercivity and Magnetic Domain Structure for Permalloy Thin Film、IU-MRS 2008、2008年12月12日、名古屋コンベンションセンター
- ② Junsuke Matsuzaki、Terumitsu Tanaka、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Magnetization Switching Time for Hard/Soft Magnetic Composite Pillar、IU-MRS 2008、2008年12月12日、名古屋コンベンションセンター
- ③ 田中輝光、松崎淳介、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラーへの高周波記録、粉体粉末冶金協会、2008年11月7日、九州大学病院百年講堂
- ④ 松崎淳介、田中輝光、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラー規則配列媒体における静磁気相互作用の影響、日本磁気学会、2008年9月14日、東北学院大学
- ⑤ 田中輝光、松崎淳介、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラーにおける軟磁性部の磁化構造、日本磁気学会、2008年9月12日、東北学院大学
- ⑥ 田中輝光、松崎淳介、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラーの磁化反転挙動に与える軟磁性部の磁気特性の影響、粉体粉末冶金協会 2008年5月28日、早稲田大学
- ⑦ Junsuke Matsuzaki、Terumitsu Tanaka、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Design of SPT Head-CPA Media system for 1

Tbits/inch²、日本 MRS、2007年12月7日、日本大学

- ⑧ Junsuke Matsuzaki、Terumitsu Tanaka、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Influence of geometrical and magnetic parameter on magnetization behavior for a hard/soft magnetic composite pillar、日本 MRS、2007年12月7日、日本大学
- ⑨ 田中輝光、松崎淳介、栗巣普揮、山本節夫、硬磁性/軟磁性複合ピラー媒体の磁化反転機構、粉体粉末冶金協会、2007年11月20日、京都工芸繊維大学
- ⑩ 松崎淳介、田中輝光、栗巣普揮、山本節夫、単磁極ヘッド磁界による硬/軟磁性複合ピラーの磁化反転、日本MRS、2007年11月17日、山口大学
- ⑪ Setsuo Yamamoto、Terumitsu Tanaka、Hiroki Kurisu、Simulation of Perpendicular Recording on Hard/Soft Magnetic Composite Pillar Array Medium、PMRC 2007、2007年10月16日、東京国際会議場
- ⑫ Terumitsu Tanaka、Jeong-Ryul Kim、Junsuke Matsuzaki、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Magnetization Behavior of Hard/Soft Magnetic Composite Pillar、PMRC 2007、2007年10月16日、東京国際会議場
- ⑬ Terumitsu Tanaka、Junsuke Matsuzaki、Jeong-Ryul Kim、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Fringe Field Distribution for SPT Head Combined with Hard/Soft Magnetic Composite Pillar Medium、PMRC 2007、2007年10月16日、東京国際会議場
- ⑭ Terumitsu Tanaka、Jeong-Ryul Kim、Junsuke Matsuzaki、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Influence of Head-Media Spacing on Head Field Distribution for Hard/Soft Magnetic Composite Pillar Array Media、PMRC 2007、2007年10月16日、東京国際会議場
- ⑮ Junsuke Matsuzaki、Terumitsu Tanaka、Jeong-Ryul Kim、Hiroki Kurisu、Setsuo Yamamoto、Head Field Strength for SPT head with Hard/Soft Magnetic Composite Pillar Array Media、PMRC 2007、2007年10月15日、東京国際会議場
- ⑯ 松崎淳介、田中輝光、金正烈、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラーの磁化反

転促進効果、日本応用磁気学会、2007年9月11日、学習院大学

- ⑰ 田中輝光、栗巣普揮、山本節夫、硬/軟磁性複合ピラー規則配列媒体における磁束の集中効果、日本応用磁気学会、2007年9月11日、学習院大学

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