

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360160

研究課題名(和文)大容量・省エネルギーな次々世代情報ストレージ開発に向けた三次元磁気記録の研究

研究課題名(英文) Research on 3 dimensional magnetic recording for high-capacity and low power consuming storage technologies

研究代表者

能崎 幸雄 (Nozaki, Yukio)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円、(間接経費) 4,680,000円

研究成果の概要(和文)：多層構造媒体を用いた3次元磁気記録について、マイクロマグネティクス計算の手法を用いて調べた。その結果、周波数を適切に選択した円偏波マイクロ波磁場を用いることにより、任意の層に選択的に磁気ビットを記録できることを確かめた。また、磁気特性や構造の最適化により、再生時のS/N確保に必要な磁化600 emu/cm³の磁性層を用いた3次元記録が可能になることを明らかにした。次に、500 Gbps級の垂直媒体を用いてマイクロ波アシスト記録実験を行った。幅50 nsのマイクロ波に対して、周波数に依存した保磁力の減少を観察し、15 GHz、25 dBmの条件で媒体の保磁力を30%低減することに成功した。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional magnetic recording in a multi-layered stacked magnetic pillar was investigated using micromagnetic simulation. Selective magnetization switching is possible with the assistance of a circularly polarized microwave field with an adequate corresponding frequency. The value of the saturation magnetization of the magnetic layers is critical in suppressing selective magnetization switching errors caused by magnetostatic fields. A large saturation magnetization of up to 600 emu/cm³ in the second layer allows successful three-dimensional magnetic recording. Microwave-assisted recording on a 500-Gbps-class perpendicular medium was experimentally demonstrated at room temperature. A frequency-dependent reduction in the switching field was clearly observed in response to a microwave impulse 50 ns in duration. A significant reduction of up to 30% in the coercive field was achieved by applying a microwave impulse with an amplitude of 25 dBm and a frequency of 15 GHz.

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 強磁性共鳴 垂直磁化膜 マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

社会全体で情報量が爆発的に増加しており、ハードディスク装置(HDD)の大容量・省電力化が求められている。従来技術は、すでに高記録密度化の壁(1Tb/in²)に直面しており、これを打破する技術として、エネルギーアシスト記録、およびパターン媒体の研究が国内外で盛んに行われている。しかし2018年には、記録媒体の磁気異方性エネルギーが材料限界に到達し、磁気ビットの微小化が困難となる新たな壁に直面すると予想されている。この壁を打破するためには、面内に磁気ビットを配列させる2次元記録方式ではなく、記録媒体を積層した3次元記録方式が必須となる。

2. 研究の目的

(1)3次元 MAMR 記録に適した多層媒体の解明

マイクロ波アシスト磁化反転(MAMR)は、熱アシスト磁化反転(HAMR)とは異なり現行の記録媒体材料を大きく変更する必要がない一方、未だ信号記録の検証に成功していない。その原因は、記録に必要な磁場強度、周波数を局所的に印加可能なマイクロ波磁場発生源が作られていない点にある。さらに、MAMRのダイナミクスや磁気記録特性にも未解明な点が多い。本研究では、3次元MAMR記録による高記録密度化を実現するため、マイクロマグネティックの手法を用いて多層構造媒体の構造・材料設計を行った。さらに、スピントルク発振素子を再生ヘッドとして用いた高分解能信号検出の検討を行った。

(2)コプレーナ線路を用いた MAMR 動作検証

グラニューラ媒体におけるMAMRの動的磁化反転過程は、解明されたとは言いがたい。単磁区微粒子として近似できる系では、解析計算やマイクロマグネティクス計算による動的磁化反転過程

の詳細が報告されているが、グラニューラ媒体の場合、特有の磁気双極子相互作用がMAMR特性に影響を及ぼすため、単磁区モデルが適用できない。そこで本研究では、CoCrPtグラニューラ膜の動的磁化反転過程を調べるため、磁化反転磁場のマイクロ波磁場強度依存性を測定した。その結果、媒体のFMR周波数近傍では各結晶粒が一斉磁化回転により反転するのに対し、FMR周波数よりも低周波側では非一様磁化回転による磁化反転を示唆する結果が得られた。

3. 研究方法

(1)マイクロマグネティクス計算による3次元MAMR記録シミュレーション

グラニューラ媒体の結晶粒を想定した直径4.6~11nmの3層構造磁性ピラー(図1)について、3次元MAMRシミュレーションを行った。各磁性層は一軸磁気異方性を有しており、それぞれ1nmの非磁性誘電体層で分離されている。各層の磁化は、初期状態で+zまたは-z方向を向いており、3層の磁化がすべて-z方向を向く場合を除く7通りについて選択記録特性を調べた。各層の異方性磁場は、それぞれに印加されるヘッド磁場強度の2倍程度とした。さらに、各層の飽和磁化は、磁気ビットを10年保持できるように決定した。

3次元MAMRの記録ヘッドとして単磁極ヘッドを想定した。ヘッド磁場は、主磁極(MP)とトレーリングリターンヨーク(RY)、軟磁性裏打ち層(SUL)

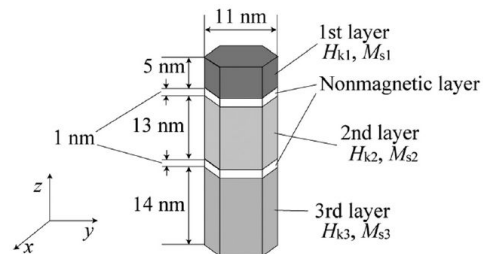


図1 三次元MAMR計算モデル

間の相互作用を考慮した有限要素法計算により求めた。MP および RY の比透磁率は 764、SUL の比透磁率は 191 とし、線形材料を仮定し、コイル電流は 10mA とした。MP 先端部の寸法は 10 nm × 20 nm とし、MP 先端部と SUL の距離は 40 nm とした。なお、SUL の膜厚は 100 nm である。本研究では、マイクロ波磁場発生源として、磁化が y - z 平面内で一定の角速度で回転する単磁区構造 FGL を仮定した (STO)。FGL の飽和磁化は、2.4 T とした。マイクロ波アシスト効果により磁化を効率よく反転させるためには、円偏波磁場の回転方向を媒体磁化の歳差運動の回転方向に同期させる必要がある。一方、HDD に STO を応用した場合、ヘッド磁場の極性変化に伴い FGL 磁化の回転方向を周期的に変化させることができる可能性がある。そこで本計算モデルでは、FGL の回転方向がヘッド磁場の極性と同期して反転し、常に磁化反転を効率よくアシストするようにした。3層に印加される直流磁場強度は、それぞれ 7~9, 3.5~7, 2~3.5 kOe、マイクロ波磁場強度は 1.9~2.2, 1.1~1.9, 0.5~1 kOe である。

(2)VNA-FMR 測定を用いた MAMR 検出

強磁性薄膜パターンの MAMR 検出には、磁気力顕微鏡や Kerr 顕微鏡を用いた磁区観察法、

磁化測定法、および FMR スペクトル測定法の3種類が主に用いられてきた。中でも数十 GHz オーダーのマイクロ波を伝送可能なコプレーナ線路を用いた FMR スペクトル測定法は、線路との誘導性結合を利用して磁化ダイナミクスを検出するため、グラニューラ膜のような電気伝導度の低い試料の磁化ダイナミクスをマイクロ波領域で測定するのに適している。さらに、試料の FMR スペクトルを同時に観察できるため、MAMR 周波数と FMR 周波数の直接比較ができ、MAMR 効果と

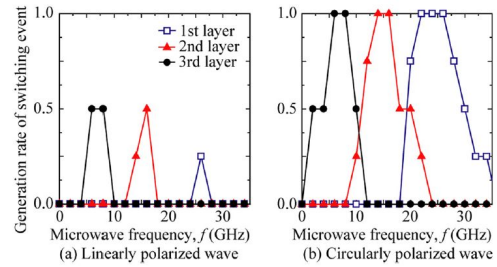


図2 三層媒体の選択記録シミュレーション

熱アシスト効果の分離が容易である。

垂直磁化グラニューラ膜において磁化反転した結晶粒の FMR 周波数 f_r は、

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} (H_{ext} + H_k - 4\pi N_{eff} M) \quad (1)$$

磁化反転していない結晶粒の FMR 周波数は、

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} (-H_{ext} + H_k + 4\pi N_{eff} M) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、磁化を M 、外部磁場を H_{ext} 、異方性磁場を H_k 、磁気回転比を γ 、有効反磁場係数を N_{eff} とした。したがって、任意の H_{ext} で f_r を測定することにより、 M を求めることができる。

今回用いた CoCrPt グラニューラ膜は、500 Gb/in² クラスの媒体と同等品であり、結晶粒間の交換結合が調節されている。さらに、磁気異方性エネルギーが膜厚方向で変調されている (graded 媒体)。グラニューラ膜の核発生磁場、保磁力、磁化飽和磁場、有効異方性磁場は、それぞれ 2.1, 5.3, 8.5, 12 kOe である。本研究では、VNA-FMR 測定法を用いてグラニューラ膜の FMR スペクトルを測定した。実験に用いた素子は、 $6 \times 100 \mu\text{m}^2$ に微細加工した上記の CoCrPt グラニューラ膜上に、膜厚 300 nm の Au コプレーナ線路を作製したものである。コプレーナ線路の形状は、長さが 50 もしくは 100 μm 、幅が 0.6 μm である。素子は、方向性結合器を用いてベクトルネットワークアナライザとマイクロ波発生源、マイクロ波増幅器に接続されている。

4. 研究成果

(1) 3次元 MAMR 記録用媒体の最適化

図2に磁化反転確率の周波数依存性を示す。ここで各層の磁化反転確率は、他2層の磁化方向の組み合わせ(4通り)の中で何通りが反転できたかによって定義した。図2(a)と2(b)は、それぞれ振幅の同じ直線偏波磁場と円偏波磁場を用いた場合の結果である。直線偏波を用いた場合、各層の磁化反転確率が最大で50%となっており、他の磁性層の磁化方位によって磁化反転できない場合が生じる。これに対し、円偏波を用いた場合、6~8、14~16、および22~26 GHzにおいて他層の磁化配置に関係なく任意の磁性層を磁化反転できた。また、この選択的磁化反転の成否は、各層の飽和磁化とダンピング定数に依存することがわかった。前者は再生信号のS/Nに、後者は記録速度に影響を及ぼすパラメータである。層間の静磁氣的相互作用の影響が最も大きな中間層について、飽和磁化を変化させながら選択記録の可否を調べた結果、3層の膜厚を最適化することにより、再生信号のS/N確保に必要な 600 emu/cm^3 で選択的な磁化反転が可能になることがわかった。さらに、 5 Gb/in^2 の記録密度実現に向けて、選択記録が可能で最大積層数を調べた結果、異方性磁場と層厚を最適化することにより、6層まで積層できることがわかった。したがって、各層の記録密度が現行媒体で既に実現している 1 Gb/in^2 と仮定すると、今回提案した3次元 MAMR 記録方式により $1 \text{ Gb/in}^2 \times 6 = 6 \text{ Gb/in}^2$ を達成可能と考えられる。

(2) グラニュラー媒体の MAMR 特性

図3は、5種類の異なる直流磁場 H_{rev} でマイクロ波インパルス(25 dBm, 50 ns)を印加した後に測定した磁化 M/M_s のマイクロ波周波数依存性である。なお、図中の実線は、 H_{rev} のみを加えた場

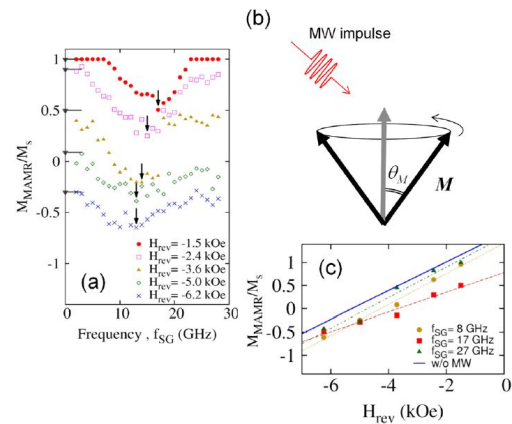


図3 磁化反転のマイクロ波周波数依存性

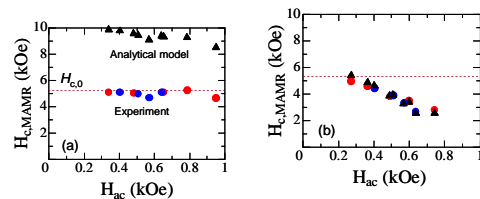


図4 MAMR 臨界スイッチング曲線

合の結果であり、マイクロ波インパルスにより磁化反転がアシストされていることがわかる。そこで、MAMRの動的磁化過程を解明するため、グラニュラー膜の平均の保磁力 $H_{c,MAMR}$ を磁化 $M/M_s = 0$ となる磁場として求め、マイクロ波磁場に対してプロットすることにより、臨界スイッチング曲線を求めた。図4(a)、4(b)は、それぞれ非共鳴条件(2 GHz)と共鳴条件(16 GHz)の臨界スイッチング曲線である。図中の破線は、マイクロ波インパルスを印加しなかった場合の保磁力 $H_{c,0} = 5.3 \text{ kOe}$ を示している。また、グラニュラー媒体と同じ大きさの有効異方性磁場 $H_{k,eff} = H_k - 4\pi N_{eff} M_s$ を有する単磁区微粒子を仮定して計算した $H_{c,MAMR}$ である。図4(a)を見ると、 $f_{SG} = 2 \text{ GHz}$ の場合には $H_{c,MAMR}$ は H_{ac} にほとんど依存しない。今回MAMR実験に用いたグラニュラー膜では、保磁力 $H_c = 5.3 \text{ kOe}$ が異方性磁場 $H_k = 12 \text{ kOe}$ の半分以下にまで減少した。粒径が 10 nm 程度のグラニュラー膜の場合、熱擾乱効果により各結晶粒の保磁力が有効異方性磁場よりも低下する。熱擾乱効果は、強度と方向が位置および時間相関の無

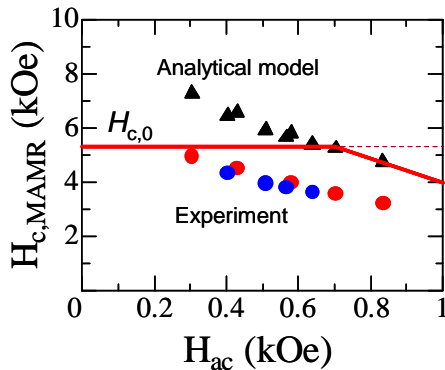


図5 非一様磁化ダイナミクスの励起による臨界スイッチング磁場の減少

いランダム磁場が加わっていることと等価と考えられる。非共鳴状態における磁化反転磁場が困難軸方向のマイクロ波磁場に依存しない結果は、熱擾乱磁場によるトルクが磁化反転に支配的なことを示唆している。これに対し、16 GHz のマイクロ波インパルスを印加した場合(図 4(b))には、 H_{ac} の増加に対して $H_{c,MAMR}$ が単調に減少した。さらに興味深いことに、実験結果と粒間相互作用の無い単磁区微粒子群について解析的に求めた結果が良く一致しており、共鳴条件近傍では一斉磁化回転に近い動的磁化反転が実現していることがわかった。これは、マイクロ波磁場によるトルクが熱擾乱磁場によるランダムなトルクを上回っていることを示唆している。図 5 は、10 GHz のマイクロ波磁場インパルスに対して測定した MAMR の臨界スイッチング曲線である。熱擾乱磁場によるトルクが磁化反転を支配する場合には、図 4(a)に示すように反転磁場はマイクロ波磁場に依存せず $H_c=5.3$ kOe となり、マイクロ波磁場によるトルクが支配的になる場合には図 4(b)に示すように単磁区モデルの解析解と一致すると予想される。すなわち、10 GHz の周波数では、 $H_{ac} > 0.7$ kOe で単磁区モデルの解析解が $H_c=5.3$ kOe を下回るので、 $H_{ac} < 0.7$ kOe では熱擾乱トルクが磁化反転を支配し、 $H_{ac} > 0.7$ kOe ではマ

イクロ波トルクが磁化反転を支配すると考えられる。このように考えると、磁化反転磁場のマイクロ波磁場依存性は図 5 の実線のようにになると予想されるが、実験結果は予想される磁化反転磁場を下回る。この結果は、非一様な磁化回転が磁化反転を引き起こしている可能性を示唆しており、グラニューラ膜における MAMR の動的磁化過程の解明とその性能向上に向けて重要な知見である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

- (1) N. Ishida, Y. Soeno, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, "Frequency dependence of critical switching asteroid of CoCrPt-SiO₂ granular film under 50-ns microwave impulse", J. Appl. Phys. **114** (2013) 043915 (5 pages)., 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4816778>
- (2) T. Tanaka, Y. Otsuka, Y. Furomoto, K. Matsuyama, and Y. Nozaki, "Selective Magnetization Switching with Microwave Assistance for Three-Dimensional Magnetic Recording", J. Appl. Phys. **113** (2013) 143908 (6 pages)., 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4801888>
- (3) T. Tanaka, N. Narita, A. Kato, Y. Nozaki, Y.-K. Hong, and K. Matsuyama, "Micromagnetic Study of Microwave-Assisted Magnetization Reversals of Exchange-Coupled Composite Nanopillars", IEEE Trans. Magn. **49** (2013) pp.562-566., 査読有, DOI: [10.1109/TMAG.2012.2211030](https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2211030)
- (4) Y. Nozaki, N. Ishida, Y. Soeno, and K. Sekiguchi, "Room temperature microwave-assisted recording on 500-Gbps-class perpendicular medium", J. Appl. Phys. **112**

(2012) 083912 (7 pages)., 査読有, DOI:
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4759169>

(5) T. Kobayashi, N. Ishida, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, “Ferromagnetic resonance properties of granular Co-Cr-Pt films measured by micro-fabricated coplanar waveguides”, J. Appl. Phys. **111** (2011) 07B919 (3 pages)., 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3679411>

[学会発表](計7件)

(1) Y. Nozaki, N. Ishida, Y. Soeno, and K. Sekiguchi, “Pulse duration dependence of microwave-assisted magnetization reversal in CoCrPt-based granular medium”, 12th Joint MMM-Intermag conference, Cicago (USA), Jan. 16, 2013.

(2) N. Ishida, Y. Soeno, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, “Microwave-power dependence of switching field required for MAMR in CoCrPt-SiO₂ perpendicular medium.”, ICAUMS 2012, Nara (Japan), Oct. 3, 2012.

(3) T. Tanaka, Y. Otsuka, Y. Furumoto, K. Matsuyama, and Y. Nozaki, “Selective magnetization switching by microwave assistance for layered magnetic pillar.”, ICM 2012, Busan (Korea), Jul. 12, 2012.

(4) T. Tanaka, Y. Otsuka, Y. Furumoto, K. Matsuyama, and Y. Nozaki, “Selective magnetization switching with microwave assistance for 3 dimensional magnetic recording.”, Intermag 2012, Vancouver (Canada), May 9, 2012.

(5) N. Ishida, Y. Soeno, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, “Experimental study on microwave-assisted writing of 500 Gbps-class perpendicular medium.”, Intermag 2012,

Vancouver (Canada), May 9, 2012.

(6) T. Kobayashi, N. Ishida and Y. Nozaki, “Ferromagnetic resonance properties of granular Co-Cr-Pt films measured using micro-fabricated coplanar waveguides.”, The 56th Magnetism and Magnetic Materials Conference, Scottsdale (USA), Nov. 1, 2011.

(7) T. Kobayashi, H. Ueda, A. Yamaguchi and Y. Nozaki, “Measurement of complex susceptibility using vector network analyzer FMR spectroscopy”, SPINTECH 6, FP-64, Matsue (Japan), Aug. 3, 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]

<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/nozaki/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

能崎 幸雄 (NOZAKI, Yukio)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30304760

(2) 研究分担者

松山 公秀 (MATSUYAMA, Kimihide)

九州大学・大学院システム情報科学研究所・教授

研究者番号: 80165919