

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360131

研究課題名(和文) マイクロ波アシストによるスイッチング原理および超高密度記録への応用

研究課題名(英文) Magnetization switching under the assistance of rf field and its feasibility for high density recording

研究代表者

岡本 聡 (Okamoto, Satoshi)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：10292278

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)：マイクロ波磁場引加による磁化反転の原理研究ならびに磁気記録への適用可能性について検討を行った。垂直磁化ナノドットを用いてマイクロ波磁場下での磁化反転挙動を調べた結果、交換結合長の数10倍程度の大きなドット径においても、ドット内部のスピン全体での歳差運動を経て磁化反転が起きることが分かった。磁化反転に必要な直流磁場はマイクロ波周波数に比例して減少し、その挙動はドット径に依存した歳差運動モードの周波数依存性に非常に良く対応するものであった。本結果は、極めて制御性の高い次世代記録技術を提供できることを示すものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, magnetization switching behaviors of perpendicular magnetic nanodots under the rf field have been investigated and discussed the technological feasibility for the future ultra-high density magnetic recording. Even for the dot 10 times larger than the exchange length, it is revealed that the magnetization switching caused by the precessional motion of whole spins inside the dot is realized. The switching field which is the dc field required for the magnetization switching proportionally decreases with increasing the frequency of the rf field. This switching behavior is well understood by the frequency dispersion of the eigenmode of precessional motion which strongly depends on the dot size. These results will provide the novel recording technology which possesses very good controllability.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気・電子材料工学

キーワード：磁気記録 スピンドYNAMICS マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

磁気記録は大容量情報ストレージデバイスの主役であり、現在の IT インフラにおける基盤技術として今後の益々の大容量化が要求されている。しかしながら、現行磁気記録技術は、原理的な記録密度限界に差し掛かっており、次世代記録技術の開発が世界中で加速している。有力候補として、ビットパターン媒体、熱アシスト記録の2つがあるが、現行技術からの大きなシステム変更の必要性、コスト、信頼性などの多くの課題が未だ残されているのが現状である。このような状況の中、近年、米国より原理提案されたばかりのマイクロ波アシスト記録は現行記録方式との整合性に優れており、大変大きな注目を集めている。我々は米国グループとは独立に本手法に対する着想を得て原理検証を開始し、本研究開始時点までに計算機シミュレーションによる原理実証、最適な実施方式に関する特許申請(2件)、スピン動力学の基本方程式であるランダウーリフシッツーギルバート(LLG)方程式を基にしたスイッチング条件を解析計算手法の提案、さらに垂直磁気異方性材料を用いてのスイッチング実験などを実施していた。

2. 研究の目的

マイクロ波アシスト磁化反転(MAS)の実用化技術としての可能性を議論するためには、ナノスケール領域での垂直磁化ドットを用いた実証実験が不可欠であり、またアシスト効果に大きな影響を及ぼすと予想される垂直磁化材料の磁気緩和定数の制御手法についても検討を行った。したがって、以下の2つを本研究の目的とした。

(a) ナノスケール領域での垂直磁化ドットを用いた MAS 効果の実証実験

(b) 垂直磁化材料の低磁気緩和の指針

3. 研究の方法

垂直磁化ドットを用いた MAS 効果の実証実験に用いた素子構造を図1に示す。試料は Co/Pt 垂直磁化多層膜を用いており、微細加工技術を用いてナノドット形状に加工した。ドット径は 50 ~ 330 nm であり、Pt 十字電極上に形成することにより、異常 Hall 効果を用

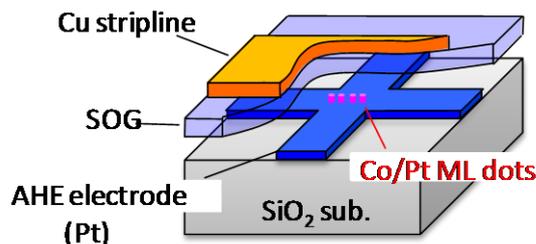


図1 垂直磁化ナノドットを用いた MAS 実験に用いた素子模式図

いて磁化曲線の測定を行った。ドット形成後に絶縁層を介して Cu ストリップ線路を配置した。この Cu 線路に rf 給電することにより、マイクロ波帯域の rf 磁場をドット試料に印加した。rf 磁場強度は代表的なもので 500 Oe である。

一方、磁気緩和測定はベクトルネットワークアナライザを用いた強磁性共鳴(VNA-FMR)によって評価した。試料には MAS 実験にも使用した Co/Pt 垂直磁化多層膜を用い、層構造と磁気特性ならびに磁気緩和との相間を調査した。

4. 研究成果

図2にドット径 $D = 50 \text{ nm}$, 230 nm の場合の MAS 効果の2次元図を示す。横軸がマイクロ波磁場の周波数 f_{rf} であり、縦軸は DC 磁場 H_{dc} である。色は規格化磁化の z 成分 m_z に対応しており、赤/青の領域が反転/未反転領域であり、白領域が反転磁場 H_{sw} を与える。 $D = 50 \text{ nm}$, 230 nm の両者ともに f_{rf} に対して直線的に H_{sw} が減少しており、ある臨界周波数 f_c を越えると MAS 効果が消失する挙動となっている。これは MAS 効果に極めて特徴的なものであり、計算機シミュレーションの結果と非常に良く対応している。ここで注目したいのは、 $D = 230 \text{ nm}$ の方が $D = 50 \text{ nm}$ に比べて MAS 効果が著しく増大している点である。

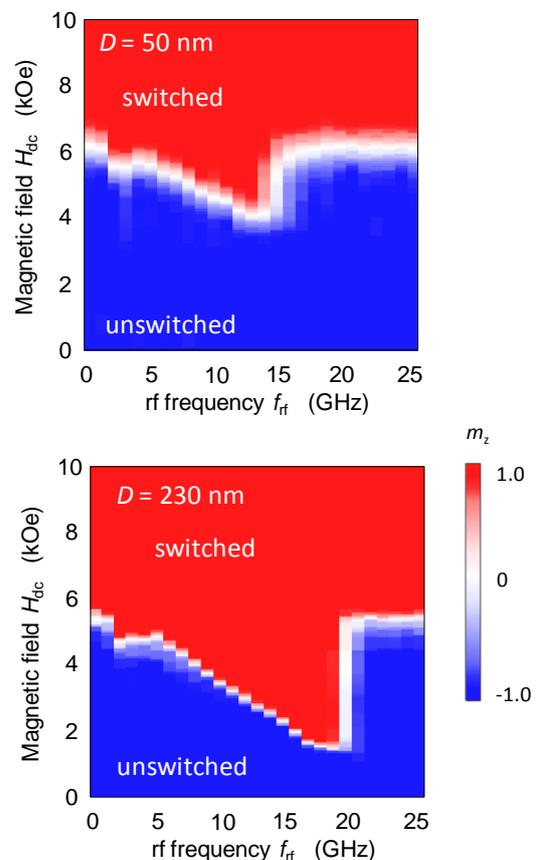


図2 Co/Pt 垂直磁化ドットアレイによる MAS 効果の2次元図。

また f_c が高周波側にシフトしていることも分かる. 各ドット径において最も H_{sw} が減少した値 $H_{sw,min}$ ならびに臨界周波数 f_c のドット径依存性を図3に示す. 実験結果が■であり, シングルマクロスピ(▽)ならびに有限要素(△)シミュレーション結果も併せて示してある, $D = 50$ nm の場合は, 実験結果とシミュレーション結果は非常に良く対応しており, さらにシングルマクロスピと有限要素の結果も一致している. このことは, $D = 50$ nm のドットにおいては, 交換結合長(~10 nm)よりも大きいにもかかわらず, ドット内のスピが一様モードでの歳差運動を経て磁化反転に至っていることが分かる. 一方, $D > 100$ nm のドットでは, $H_{sw,min}$ が低下し, f_c が増加している. また有限要素の結果が実験と良く対応しており, マクロスピの結果は大きく逸脱している. このサイズ領域では, ドット内部で図4に示すような不均一な歳差運動が励起しており, このような不均一な歳差運動が大きなMAS効果をもたらしたものと結論できる. この不均一な歳差運動挙動は, ディスク状磁性体内部に誘起される同心円状のスピ波を仮定して, そのスピ波分散関係を計算したところ, 磁化反転挙動と非常によい一致を示した. ドット径が小さい場合は最低次のモードのみ誘起され, ドット径が増大

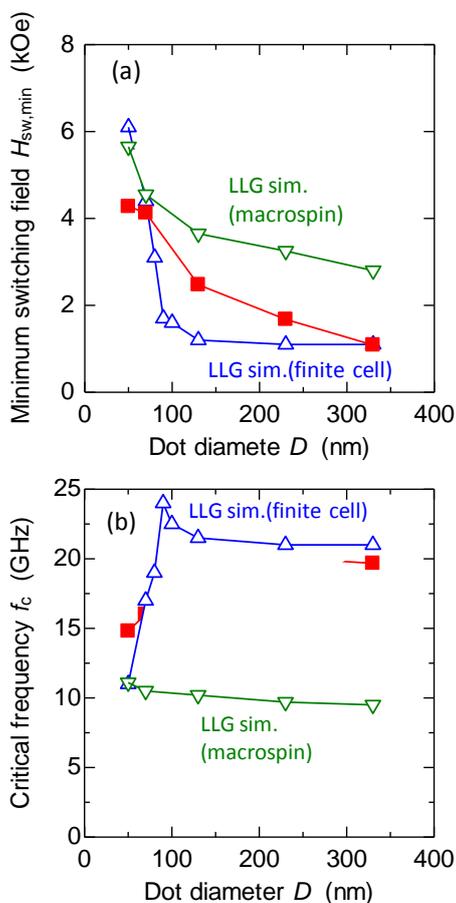


図3 最も H_{sw} が減少した値 $H_{sw,min}$ ならびに臨界周波数 f_c のドット径依存性

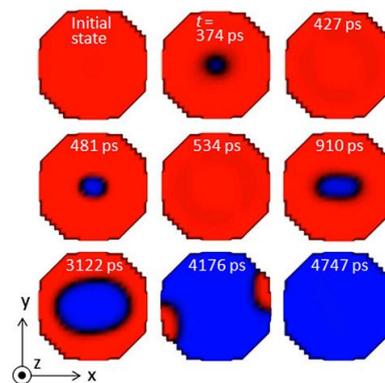


図4 有限要素LLGシミュレーションによって得られた $D = 120$ nmの垂直磁化ドットのマイクロ波磁場下での磁化反転挙動

するに従い高次モードのスピ波が誘起される. つまり, 実験で観測されたMAS効果のドット径依存性は, 高次モードのスピ波励起によるものと結論付けられる.

次に, 垂直磁化材料の磁気緩和定数について評価した結果について示す. 図5はCo/Pt垂直磁化多層膜の磁気緩和定数 α をPtとCoの層厚比 t_{Pt}/t_{Co} に対してプロットしたものである. 一般的には磁気異方性 K_u と磁気緩和定数 α はともにスピ-軌道相互作用に依存するため, 互いに相間があるものと言われている. しかしながら, Co/Pt多層膜においては K_u と α には密接な相間は見られておらず, むしろ図5に示すとおり t_{Pt}/t_{Co} に対して比例する結果となった. これは, 本系において K_u は界面効果である界面磁気異方性を起源としているのに対して, α はバルク的なスピ散乱が支配要因であるため, と推察される. また, この t_{Pt}/t_{Co} に対する α の傾きはスピポンピングモデルによる予測と定量的にもよい一致を示した.

以上の結果は, K_u と α は異なる支配因子に依っており,

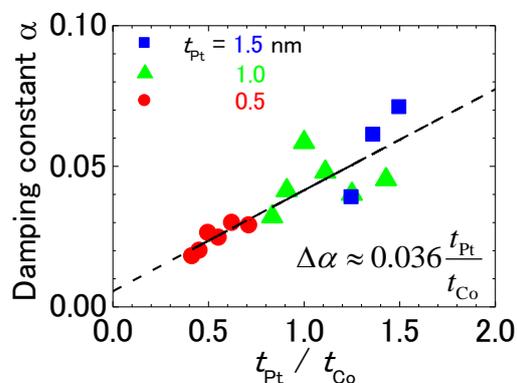


図5 磁気緩和定数 α のPtとCoの層厚比 t_{Pt}/t_{Co} に対する依存性

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 S. Okamoto, M. Furuta, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Theory and experiment of microwave-Assisted magnetization switching in perpendicular magnetic nanodots, *IEEE Trans. Magn.*, 査読有, 50 巻, 2014 年, 3200906-1 - 3200906-6

DOI: 10.1109/TMAG.2013.2281400

② M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Size dependence of magnetization switching and its dispersion of Co/Pt nanodots, *J. Appl. Phys.* 査読有, 115 巻, 2014 年, 133914-1 - 133914-8

DOI: 10.1063/1.4870451

③ S. Okamoto, N. Kikuchi, A. Hotta, M. Furuta, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Microwave assistance effect on magnetization switching in Co-Cr-Pt granular film, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 103 巻, 2014 年, 202405-1 - 202405-4

DOI: 10.1063/1.4830364

④ M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Stoner-Wohlfarth Like Magnetization Switching in Very Small Co/Pt Nanodots under the Assistance of Radio Frequency Magnetic Field, *Appl. Phys. Express*, 査読有, 6 巻, 2013 年, 053006-1 - 053006-4

DOI: 10.7567/APEX.6.053006

⑤ S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Switching Behaviors and its Dynamics of a Co/Pt Nanodot Under the Assistance of rf Fields, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 109 巻, 2012 年, 237209-1 - 237209-4

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.237209

⑥ S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Significant Reduction of Switching Field and its Distribution in Co/Pt Nanodots with Assistance of Radio Frequency Field, *Appl. Phys. Express*, 査読有, 5 巻, 2012 年, 093005-1 - 093005-3

DOI: 10.1143/APEX.5.093005

⑦ S. Okamoto, N. Kikuchi, J. Li, O. Kitakami, T. Shimatsu, and H. Aoi, Frequency and Time Dependent Microwave Assisted Switching Behaviors of Co/Pt Nanodots, *Appl. Phys. Express*, 査読有, 5 巻, 2012 年, 043001-1 - 043001-3

DOI: 10.1143/APEX.5.043001

[学会発表] (計24件)

1. S. Okamoto, N. Kikuchi, A. Hotta, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Switching field reduction of Co-Cr-Pt granular film under the assistance of rf fields, 58TH ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, 2013 年 11 月 6 日, 米国・デンバー

2. M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu, Switching field and critical frequency distributions on microwave assisted switching in Co/Pt nanodot array, 58TH ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, 2013 年 11 月 5 日, 米国・デンバー

3. [招待講演] 岡本 聡, 古田正樹, 菊池伸明, 北上 修, 島津武仁, マイクロ波アシスト磁化反転技術の現状と課題, 日本 HDD 協会クォーターリーセミナー, 2013 年 10 月 10 日, 東京

4. 古田正樹, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 島津武仁, Co/Pt ナノドットのマイクロ波アシストにおける反転磁場分散と臨界周波数分散, 第 37 回 日本磁気学会学術講演会, 2013 年 9 月 5 日, 札幌

5. 古田正樹, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 島津武仁, マイクロ波アシスト磁化反転における Co/Pt ドット径依存性, 第 37 回 日本磁気学会学術講演会, 2013 年 9 月 5 日, 札幌

6. 草薙勇作, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 加藤剛志, 岩田 聡, Co/Pt 多層膜のダンピング定数の Co 層厚依存性, 第 37 回 日本磁気学会学術講演会, 2013 年 9 月 4 日, 札幌

7. 足立寛太, 加藤剛志, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 岩田 聡, Co/Pt 多層膜の垂直磁気異方性とダンピング定数, 第 37 回 日本磁気学会学術講演会, 2013 年 9 月 4 日, 札幌

8. [招待講演] S. Okamoto, M. Furuta, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Frequency and Size Dependent Microwave Assisted Magnetization Switching in Co/Pt Nanodots, 第 24 回磁気記録に関する国際会議(TMRC 2013), 2013 年 8 月 22 日, 東京

9. [招待講演] S. Okamoto, M. Furuta, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Switching behaviors of perpendicular magnetic nanodots under the assistance of rf field, 情報ストレージ研究推進機構(SRC) 第 35 回テクニカルレビューミーティング, 2013 年 5 月 30 日, 東京

10. [招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 古田正樹, 門ノ沢和也, 後藤龍太, 北上 修, 島津武仁, 異常 Hall 効果による垂直磁化ナノドットの磁化反転ダイナミクス計測と軟 X 線 MCD 同時計測の展望, SPring-8 研究会 GIGNO 研究領域創成ワークショップ, 2013 年 3 月 12 日, 東京

11. M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu, Microwave assisted switching experiments in Co/Pt dot array with narrow switching field distribution, 12th MMM-INTERMAG Joint Conference, 2013 年 1 月 16 日, 米国・シカゴ

12. S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O.

- Kitakami, T. Shimatsu, Switching behaviors and its dynamics in a single Co/Pt multilayer nanodot under microwave assistance, 12th MMM-INTERMAG Joint Conference, 2013年1月16日, 米国・シカゴ
13. [招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 古田正樹, 北上 修, 島津武仁, マイクロ波アシストにおける Co/Pt ナノドットの磁化反転挙動, 日本磁気学会 第186回研究会, 2012年11月2日, 東京
14. [招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 古田正樹, 北上 修, 島津武仁, 垂直磁化ナノドットのマイクロ波アシスト磁化反転挙動, 日本HDD協会 クォーターリーセミナー, 2012年10月12日, 東京
15. M. Furuta, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Microwave assisted switching experiment on Co/Pt multilayer dot array, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), 2012年10月2日, 奈良
16. S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Switching behavior of single Co/Pt nanodot under microwave assistance, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), 2012年10月2日, 奈良
17. [招待講演] S. Okamoto, M. Furuta, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Aoi, Microwave Assisted Magnetization Switching In Co/Pt Nanodot, 第23回磁気記録に関する国際会議(TMRC 2012), 2012年8月20日, 米国・サンノゼ
18. [招待講演] S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Microwave assisted magnetization switching on perpendicular magnetic dots, Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2012), 2012年6月26日, 韓国・ソウル
19. [招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 古田正樹, 北上 修, 島津武仁, 青井 基, Co/Pt ナノドットを用いたマイクロ波アシスト磁化反転, 電子情報通信学会 磁気記録研究会, 2012年6月14日, 仙台
20. 李瑋, 菊池伸明, 岡本聡, 北上修, 島津武仁, 青井基, 加藤剛志, 岩田聡, Co/Pt 多層膜の強磁性共鳴と緩和定数評価, 日本磁気学会学術講演会, 2011年9月29日, つくば
21. 岡本聡, 李瑋, 菊池伸明, 北上修, 島津武仁, 青井基, Co/Pt 多層膜ナノドットにおけるマイクロ波アシスト磁化反転実験, 日本磁気学会学術講演会, 2011年9月27日, つくば
22. [招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, マイクロ波アシスト磁化反転とその反転メカニズム, 日本磁気学会学術講演会, 2011年9月27日, つくば
23. S. Okamoto, N. Kikuchi, J. Li, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Aoi, Switching behavior of

Co/Pt multilayer nanodots under microwave assistance, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, 2011年11月2日, 米国・アリゾナ

[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

岡本 聡 (OKAMOTO, SATOSHI)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授
研究者番号：10292278

(2) 研究分担者

菊池伸明 (KIKUCHI, NOBUAKI)

東北大学・多元物質科学研究所・助教
研究者番号：80436170

(3) 研究分担者

北上 修 (KITAKAMI, OSAMU)

東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号：70250834

(4) 研究分担者

島津武仁 (SHIMATSU, TAKEHITO)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授
研究者番号：50206182

(5) 連携研究者

加藤剛志 (KATO, TAKESHI)

名古屋大学・大学院工学研究科, 准教授
研究者番号：50303665