

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289083

研究課題名(和文) マイクロ波アシスト磁化反転の高効率化技術の開発

研究課題名(英文) Development of high-efficiency techniques of microwave-assisted magnetization switching

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) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波アシスト磁化反転技術の高効率化手法について各種検討を行った。まず、ナノドットにおける大振幅歳差運動挙動の高感度定量評価手法を確立した。次に層間結合強度の制御を行った積層磁気性ドットにおいて低周波領域から著しいマイクロ波アシスト効果の増大を確認した。またフェリ磁性体を用いることにより、有効ジャイロ磁気定数を制御することで、マイクロ波アシスト効果の制御が可能であることを実証した。また磁性粒子間の磁氣的相互作用がマイクロ波アシスト効果を増大させることを実証した。以上の成果、本技術の実用化を進める上で、マイクロ波アシスト効果の制御が様々なアプローチで可能であることを示すものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated various approaches to improve the efficiency of microwave-assisted magnetization switching effect. First, we successfully developed novel quantitative evaluation methods for large cone angle magnetization precession in a nano-scale magnetic dot based on anomalous Hall effect (AHE) and x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) detection techniques. Then, we studied the microwave-assisted magnetization switching against various factors, such as the interlayer coupling in a dot composed of two magnetic layers, the effective gyromagnetic ratio in ferromagnetic materials, and inter-grain magnetic interaction in granular magnetic films. It is well verified that these factors can be significantly modify the microwave-assisted switching behavior. These findings are beneficial for practical application of the microwave-assisted magnetization switching.

研究分野：工学

キーワード：スピンドYNAMICS 磁気記録

1. 研究開始当初の背景

磁気記録はこれまで大容量ストレージ技術の主演として記録密度の増大を達成し続けていたが、近年、原理的な限界を迎えつつある。この現状を打破する次世代技術の一つがマイクロ波アシスト記録方式であり、GHz帯の高周波磁場により磁化歳差運動を誘起することで反転磁場の大幅な低減（マイクロ波アシスト効果）を実現するものである。本技術は磁気記録だけでなく、ナノ磁性体の磁化制御技術として、磁気固定メモリーなど様々な分野への応用も期待される。我々の研究グループでは、これまでに本技術に関する基礎的な解明を進めてきた。その結果、均一な歳差運動する系（マクロスピンモデルに対応）でのマイクロ波アシスト効果の理論限界などを明らかにした。その一方で、スピン波励起などの空間的に不均一な歳差運動系ではマイクロ波アシスト効果が大幅に増大することを見出した。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ磁性体の磁化制御技術として、マクロスピンモデルの理論予測を大幅に超えるマイクロ波アシスト効果の発現ならびにその制御手法の開発を目的とするものである。その目的のため、以下の項目について検討を進めた。

- a) 大振幅歳差運動挙動の定量評価
- b) 積層構造における層間結合の影響
- c) フェリ磁性体を用いた有効ジャイロ磁気定数制御
- d) 粒子間相互作用の影響

3. 研究の方法

それぞれ各項目について、以下のように研究を進めた。

- a) 大振幅歳差運動挙動の定量評価: ナノドット試料における大振幅挙動評価を高感度に行うため、磁気信号検出は異常 Hall 効果 (AHE) ならびに硬 X ナノビームによる磁気円二色性 (XMCD) を用いた。十字型電極の中央にドット形状の磁性体試料を配置し、絶縁層を介してマイクロ波線路を直上に配置したデバイスを作製した。磁性体ドットは Co/Pt 垂直磁化膜を用いて電子線リソグラフィ法と Ar イオンエッチングにより作製し、ドット径は 3000 nm である。AHE ならびに XMCD では磁化の膜面垂直成分に比例した信号が検出されるため、歳差運動角の開きが磁化信号の減少として計測される。XMCD 測定は Spring-8 BL39XU にて行った。
- b) 積層構造における層間結合の影響: 素子構成は上記(a)と同様である。磁性体ドットは中間層を介して磁気特性の異なる 2 層で構成されており、中間層材料や厚みを変えることで、層間結合の制御を行い、マイクロ波アシスト効果への影響を評価した。
- c) フェリ磁性体を用いた有効ジャイロ磁気定数制御: フェリ磁性体では、各副格子スピ

ンのジャイロ磁気定数が異なっている場合、磁化補償点とモーメント補償点が異なり、それぞれにおいて有効ジャイロ磁気定数がゼロもしくは発散することが知られている。これは、有効ジャイロ磁気定数を制御することに他ならず、マイクロ波アシスト効果に対する影響を調べた。

d) 粒子間相互作用の影響: 磁気記録媒体であるグラニューラ分散型試料では、磁性粒子間の磁氣的相互作用が存在している。しかし、その磁化反転挙動への影響は準静的な場合と動的なものとでは大きく異なると予想される。ここでは計算機シミュレーションによりその影響を調べた。

4. 研究成果

それぞれ各項目について、以下のように研究成果を得た。

a) 大振幅歳差運動挙動の定量評価: 図 1 に AHE ならびに XMCD による歳差運動挙動の評価結果を示す。外部磁場を高磁場側から低磁場側に変化させると、徐々に歳差運動角の開きが増大していく様子が AHE ならびに XMCD でともに観測出来ている様子が分かる。さらに両者は定量的にも誤差の範囲内で一致していることを確認した。外部磁場をさらに減少させると歳差運動の励起条件から外れるため、歳差運動の終了に伴い急峻に磁化信号が増大する様子も明瞭に確認できた (hold over 効果)。本結果により、AHE ならびに XMCD が歳差運動挙動の定量評価手法として非常に高感度に計測可能であることが示された。

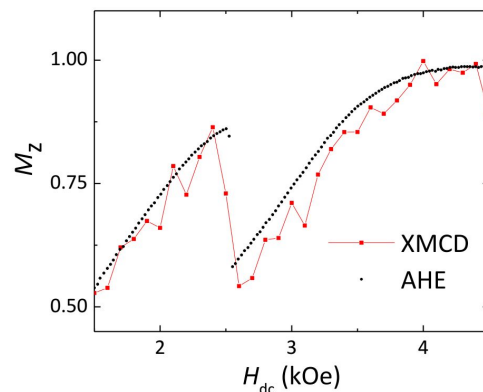


図 1 AHE ならびに XMCD による歳差運動挙動の定量評価結果。

b) 積層構造における層間結合の影響: 図 2 に磁気特性の異なる(ハード/ソフト)2 層を積層させたドット試料のマイクロ波アシスト効果の実験結果を示す。今回の結果では中間層には Pt 10 nm を用いており、層間の交換結合はほぼ無視でき、静磁結合のみである。ソフトとハード層とではマイクロ波周波数に対する反転磁場の挙動に大きな相違が存在することが確認できる。ソフト層は低周波領域から大幅に反転磁場が減少し、マイクロ

波印加前の反転磁場からの減少率は約 95 % に達している．一方，ハード層のそれはほぼ線形な反転磁場減少を示し，減少率は約 60 % が得られている．本結果はまだ十分な解析が出来ていないものの，層間の静磁結合が歳差運動挙動に大きく影響を及ぼすことに示すものと考えられる．

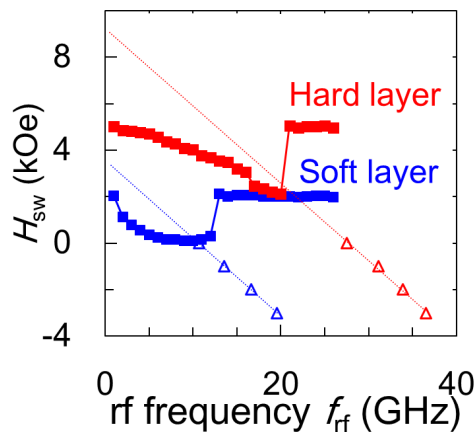


図 2 ハード/ソフト 2 層積層構造を有する磁性体ドットのマイクロ波アシスト挙動．

c) フェリ磁性体を用いた有効ジャイロ磁気定数制御：素子構造はこれまでの実験とほぼ同様であり，フェリ磁性体として Gd-Fe-Co アモルファス薄膜を用いた 図 3 に Gd-Fe-Co ナノドットのマイクロ波アシスト効果に関する実験結果を示す．通常の強磁性体試料と同様に，マイクロ波周波数に対してほぼ線形に反転磁場が減少する様子が得られ，フェリ磁性体であっても良好なマイクロ波アシスト効果が発現することが確認できた．さらに，周波数に対する反転磁場の変化率は通常の強磁性体の場合に比べて約半分となっていることを確認した．これは本試料において組成がモーメント補償点に近いことから有効ジャイロ磁気定数が増大していることを反映したものである．本結果より，有効ジャイロ磁気定数の制御がマイクロ波アシスト効果の制御につながることを実験的に確認することが出来た．

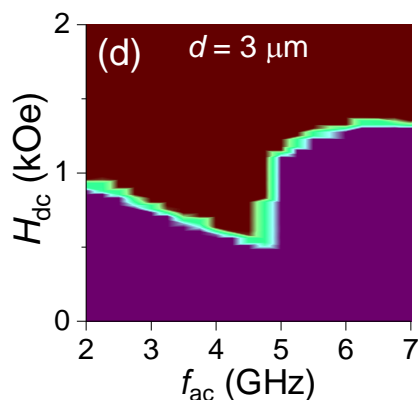


図 3 フェリ磁性体(Gd-Fe-Co)ナノドットを用いたマイクロ波アシスト挙動

d) 粒子間相互作用の影響：現実の磁気記録媒体をモデリングした計算機シミュレーションによって粒子間相互作用の影響について調べた結果を図 4 に示す．粒子間相互作用がない場合に比べて，相互作用が存在する場合の方が明らかにマイクロ波アシスト効果が増大している様子が確認できる．中でも，静磁気相互作用と交換相互作用の両方が存在する場合には著しく増大していることが分かる．この結果は，実際のグラニュー型磁気記録媒体でのマイクロ波アシスト効果の実験結果に非常に良く対応するものであり，粒子間相互作用がマイクロ波アシスト効果の増大に有効であることが分かった．

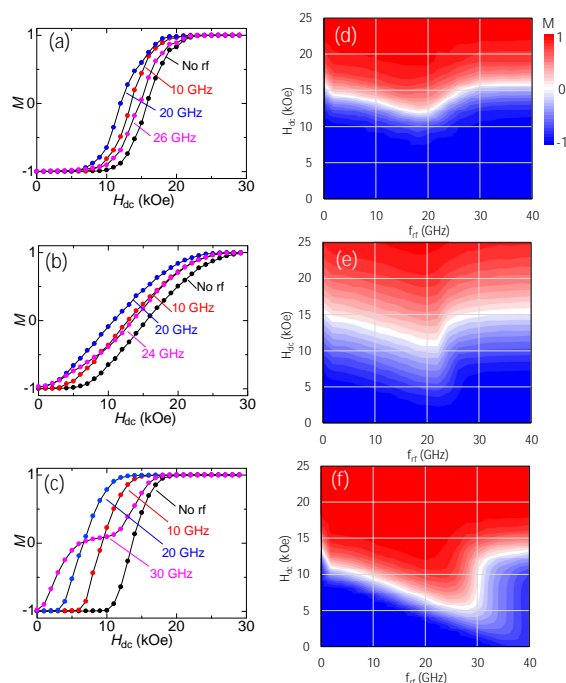


図 4 記録媒体をモデリングしたマイクロ波アシスト効果の計算結果．(a) 粒子間相互作用なし (b) 静磁気相互作用のみ，(c) 静磁気相互作用 + 交換結合

## 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 6 件)

S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, and T. Shimatsu, Influence of intergrain interactions and thermal agitation on microwave-assisted magnetization switching behavior of granular magnetic film, Appl. Phys. Express, 査読有, 10 巻, 2017 年, 023004-1 - 023004-4  
doi:10.7567/APEX.10.023004

N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami, Anomalous Hall Effect measurement on nanostructure with magnetic pulse fields, Mater. Tran., 査読有,

57 卷, 2016 年, 789-795

doi:10.2320/matertrans.ME201507

草薙勇作, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 加藤剛志, 岩田 聡, Co/Pt 多層膜および CoPt 合金膜のダンピング定数評価, IEEJ Trans. Fund. Metar., 査読有, 136 巻, 2016 年, 317-323 DOI: 10.1541/ieejfms.136.317

S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, Microwave assisted magnetic recording technologies and related physics, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 48 巻, 353001-1 - 353001-18, 2015 年

doi:10.1088/0022-3727/48/35/353001

古田 正樹, 岡本 聡, 菊池 伸明, 北上 修, 島津 武仁, Co/Pt ナノドットにおけるマイクロ波アシスト磁化反転の交流磁場強度依存性, IEEJ Trans. Fund. Metar., 査読有, 135 巻, 2015 年, 229-234

doi.org/10.1541/ieejfms.135.229

N. Kikuchi, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Quantized spin waves in single Co/Pt dots detected by anomalous Hall effect based ferromagnetic resonance, Applied Physics Letters, 査読有, 105 巻, 2014 年, 242405-1 - 242405-4

doi: 10.1063/1.4904225

[学会発表](計 17 件)

Y. Lu, S. Okamoto, N. Kikuchi, B. Lao, Y. Kusanagi, O. Kitakami, T. Shimatsu, Microwave assisted magnetization switching behaviors in a ferrimagnetic amorphous Gd-Fe-Co single dot, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016 年 10 月 31 日, アメリカ・ニューオーリンズ

N. Kikuchi, T. Yomogita, D. Kanahara, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, H. Osawa, M. Suzuki, Time resolved FMR measurement in non-linear regime on a Co/Pt multilayer dot measured by XMCD, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016 年 10 月 31 日, アメリカ・ニューオーリンズ

Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, Y. Miura, Engineering of positive and negative perpendicular magnetic anisotropy in W/Fe/W trilayer, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016 年 10 月 31 日, アメリカ・ニューオーリンズ

[招待講演] S. Okamoto, N. Kikuchi, B. Lao, Y. Kusanagi, Y. Lu, O. Kitakami, Y. Nakayama, A. Hotta, T. Shimatsu, Microwave-Assisted Magnetization Switching in Granular Media, ASTC fall meeting 2016, 2016 年 10 月 12 日, アメリカ・サンノゼ

N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, M. Suzuki, Detection of ferromagnetic resonance on Pt layers of a Co/Pt multilayer single dot by micro-XMCD magnetometry MMM/Intermag 2016 Joint Conference, 2016 年 1 月 11 日, アメリカ・サンディエゴ

[招待講演] 岡本 聡, 菊池伸明, 草薙勇作, Lu Yuming, 北上 修, 中山湧稀, 島津武仁, マイクロ波アシスト磁化反転技術の現状と将来展望, 第 55 回スピンエレクトロニクス専門研究会/第 67 回ナノマグネティクス専門研究会, 2015 年 11 月 12 日, 東京, 中央大学駿河台記念館

菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁, 鈴木基寛, マイクロ波磁場により励起された Co/Pt 多層膜ドットのナノビーム X 線磁気円二色性測定, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日, 名古屋, 名古屋大学

草薙勇作, 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と強磁性共鳴の同一 Co/Pt ナノドット試料での測定, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日, 名古屋, 名古屋大学

中山湧稀, 草薙勇作, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修, 反強磁性結合を有するマイクロ波アシスト記録用 CoCrPt グラニューラ垂直記録媒体の磁化反転機構, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日, 名古屋, 名古屋大学

Y. Kusanagi, S. Okamoto, N. Kikuchi, T. Kato, S. Iwata, O. Kitakami, H. Nemoto, Gilbert damping constant of Co-Pt based alloy films, IEEE International Magnetism Conference, 2015 年 5 月 11 日, 中国・ペキン

M. Furuta, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Shimatsu, Microwave assisted magnetization switching based on non-uniform precession mode in layered nanodot, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2014), 2014 年 11 月 3 日, アメリカ・ホノルル

N. Kikuchi, M. Furuta, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu, Ferromagnetic resonance on nanosized Co/Pt multilayer dot, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2014), 2014 年 11 月 3 日, アメリカ・ホノルル

[招待講演] S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Switching behaviors of Co/Pt nanodots and its dynamics under the assistance of rf field, The 2014 ECS and SMEQ Joint International Meeting, 2014 年 10 月 5 日, メキシコ・カンクン

菊池伸明, 古田正樹, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁, Co/Pt ナノドットの強磁性共鳴測定, 第 38 回 日本磁気学会学術講演会, 2014 年 9 月 2 日, 横浜, 慶應義塾大学日吉キャンパス

草薙勇作, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 加藤剛志, 岩田 聡, CoPt/Ru 垂直磁化膜の VNA-FMR, 第 38 回 日本磁気学会学術講演会, 2014 年 9 月 2 日, 横浜, 慶應義塾大学日吉キャンパス

古田正樹, 岡本 聡, 菊池伸明, 北上 修, 島津武仁, 積層磁性ドットにおけるマイクロ波アシスト磁化反転, 第 38 回 日本磁気学会学術講演会, 2014 年 9 月 2 日, 横浜, 慶應義

塾大学日吉キャンパス

[招待講演] S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, T. Shimatsu, Switching dynamics of Co/Pt nanodots under the assistance of rf field, MISM 2014, 2014年6月29日, ロシア・モスクワ

〔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) 研究協力者

佐藤 公紀 (KIMINORI, SATO)  
富士電機(株)