

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18412

研究課題名(和文) スピン波共鳴を利用した磁化反転ダイナミクスの理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical Study of Magnetization Switching Dynamics Using Spin Wave Resonance

研究代表者

山路 俊樹 (Yamaji, Toshiki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：30432355

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：円偏光rf磁場下での垂直磁性体の磁化反転の膜厚依存性を1次元有効スピンモデルを用いて分析した。その結果、2つの臨界膜厚($dc1$, $dc2$)が存在することが分かった。膜厚が薄い場合、反転モードはマクロスピンモデルで良く説明することができる均一モードであることが分かった。膜厚を増加させて $dc1$ より厚くなると、反転モードは不均一モードになることが分かった。更に膜厚を増加させて $dc2$ より厚くなると、反転磁場のrf周波数依存性において反転磁場が最小値をとる臨界周波数が増加した。臨界周波数が増加することによって、結果として、従来のマイクロ波アシスト磁化反転よりも反転磁場を更に低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の手法のようなエネルギーアシストやトルクを利用するのではなく、スピン波共鳴を磁化反転低減に利用する手法であるスピン波アシスト磁化反転の理論構築を行い、スピン波アシスト磁化反転の実験結果に対して理論的裏付けを与える重要な研究である。スピン波を介した磁化反転ダイナミクスという未開拓な物理理論を構築する点で学術的意義があり、垂直磁気記録におけるトリレンマを打破し5 Tbit/in²を超える次世代超高密度磁気記録媒体の開発に繋がる点で社会的(産業的)意義がある。スピン波アシスト磁化反転が実用化されれば社会的インパクトが非常に大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The magnetization switching in a perpendicularly magnetized nanomagnet by applying a circularly polarized rf field is analyzed as a function of the thickness (d) of the specimen using an effective one-dimensional model. It is found that there exist two kinds of critical thicknesses, $dc1$ and $dc2$ ($dc1 < dc2$). When $d < dc1$, the switching mode is uniform type which is well described by a macro-spin model. On the other hand, when $dc1 < d < dc2$, the switching mode is non-uniform type, whereas the rf frequency dependence of the switching field is the same as the one with $d < dc1$. In the case of $d > dc2$, the critical rf frequency at which the switching field takes a minimum value, increases. The results indicate that the switching field is more effectively reduced than the conventional microwave-assisted switching.

研究分野：スピントロニクス理論

キーワード：スピン波 磁化反転 理論研究 磁気記録

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、PC、スマートデバイス、クラウドサービスの普及により、ユーザーデータの爆発的な増加に伴い、これまで以上の超大容量のハードディスクドライブ(HDD)の需要が増している。HDDの記録密度は、これまで年率20%から40%で増加し続け、記録方式は面内磁気記録方式から垂直磁気記録方式に移り変わり、現在に至る。しかしながら、HDDの垂直磁気記録方式の記録密度を需要に見合うように伸ばし続けるには、現状の技術では「高密度化」「熱安定性」「書き込み容易性」のトリレンマに直面している。

このトリレンマを解決するために、近接場光で磁化媒体を昇温して反転磁場を低減させる熱アシスト磁化反転や、外部からマイクロ波を印加し磁化歳差運動を増幅して反転磁場を低減させるマイクロ波アシスト磁化反転という手法が国内・国外において実験・理論両面から盛んに研究が行われてきた。しかし、熱アシスト磁化反転では熱照射による信頼性の低下が実用化のネックとなっている。一方、マイクロ波アシスト磁化反転では、反転磁場を十分に低減させるために必要なマイクロ波周波数が非常に高周波数(50GHzから100GHz以上)になることが分かっている。このように、トリレンマを打破するために様々な手法が研究されてきたが、未だ十分な反転磁場の低減には至っていない。

そのような状況の中で、ハード層にFePt、ソフト層にパーマロイを用いた二層強磁性体において、ソフト層に生成するスピン波を励起することにより、ハード層単体の反転磁場の13%にまで低減させることに成功した実験的研究がNature Communicationsに報告された[1]。これは従来のマイクロ波アシスト磁化反転で報告されている反転磁場低減の大凡2倍である[2]。さらに、必要なマイクロ波周波数が、ソフト層のスピン波共鳴に対応する周波数帯(10GHzから20GHz)となり、応用上最も安定な周波数帯であるので、実用化において非常に有利である。このように、十分な反転磁場の低減を可能とするスピン波アシスト磁化反転に関する研究は実験的研究が先行しているが、反転磁場低減を裏付けるメカニズムは未だ明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまで、超高密度磁気記録の実現を目指すべく、交換結合系マイクロ波アシスト磁化反転に関する理論的研究を行ってきた[3-4]。ソフト層からのトルクの効果とマイクロ波による磁化歳差運動の増幅効果の二つの効果を同時に活かして反転磁場を低減させる手法である。交換結合系の磁性体を用いる点とマイクロ波照射を行う点で、スピン波アシスト磁化反転は交換結合系マイクロ波アシスト磁化反転と共通しているが、スピン波アシスト磁化反転はスピン波共鳴型であり、交換結合系マイクロ波アシスト磁化反転はエネルギーアシスト型磁化反転である。すなわち、両者は根本的にメカニズムが異なる物理現象・反転磁場低減手法である。そこで、スピン波アシスト磁化反転のメカニズムの理論構築を行うことを目指した。

3. 研究の方法

反転磁場のマイクロ波周波数依存性が従来のマイクロ波アシスト磁化反転からスピン波アシスト磁化反転に移る臨界膜厚を明らかにすることを試みた。そのために、垂直ナノ磁性体に対応する物質パラメータを精査し、一定の厚さのセルに分けた1次元有効スピンモデルを作成した(図1)。LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert)方程式を解くことにより、有効磁場下における磁化ダイナミクスを算出する有効スピンモデル計算プログラムを構築した。

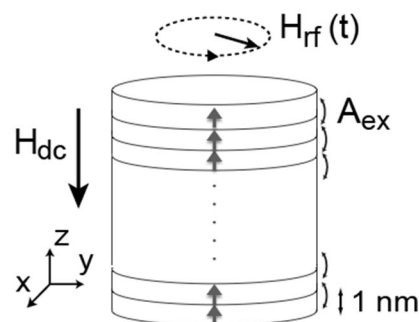


図1 1次元単層垂直磁性体有効スピンモデル。
面直に直流磁場 H_{dc} 、面内に円偏光rf磁場 $H_{rf}(t)$ を印加。 A_{ex} : 交換スティフネス定数。

4. 研究成果

円偏光 rf 磁場下での垂直磁性体の磁化反転の膜厚依存性について、1次元有効スピンモデルを用いて分析した。系統的に膜厚を変えた数値計算の結果、2つの臨界膜厚(d_{c1} , d_{c2})が存在することが分かった。膜厚が d_{c1} より薄い場合、反転モードはマクロスピンモデルで良く説明することができる均一モードであることが分かった。膜厚を増加させて d_{c1} より厚くなると、反転モードは不均一モードになることが分かった。更に膜厚を増加させて d_{c2} より厚くなると、反転磁場の rf 周波数依存性において反転磁場が最小値をとる臨界周波数が増加した。反転磁場が最小値をとる臨界周波数が増加することにより、結果として、従来のマイクロ波アシスト磁化反転よりも反転磁場を更に低減できることを示した。この解析は、従来のマイクロ波アシスト磁化反転とは異なる物理メカニズムであるスピン波アシスト磁化反転の理論的定式化を行う上でも、理論設計を行う上でも基礎となる重要な研究である。

<引用文献>

- T. Seki et al., *Nat. Comm.*, **4**, 1726 (2013).
Zhu et al., *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 125 (2008).
T. Yamaji et al., *Appl. Phys. Exp.*, **9**, 023001 (2016).
T. Yamaji et al., *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 192403 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Toshiki Yamaji and Hiroshi Imamura	4. 巻 112
2. 論文標題 Critical thickness for spin wave-assisted switching of magnetization in a perpendicularly magnetized nanomagnet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 202406
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5029219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山路俊樹、今村裕志
2. 発表標題 Theoretical study of spin wave-assisted switching of magnetization in a perpendicularly magnetized nanomagnet
3. 学会等名 TMRC2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山路俊樹、今村裕志
2. 発表標題 THEORETICAL STUDY OF SPIN WAVE EXCITATION IN PERPENDICULARLY MAGNETIZED SINGLE LAYER
3. 学会等名 TMRC2017（国際学会）
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 山路俊樹、今村裕志
2. 発表標題 単層垂直磁性体におけるスピン波アシスト 磁化反転の膜厚依存性に関する理論解析
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 山路俊樹、今村裕志
2. 発表標題 Critical Thickness for Spin Wave-Assisted Switching of Magnetization in a Perpendicularly Magnetized Nanomagnet
3. 学会等名 2017MMM (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	今村 裕志 (Imamura Hiroshi)		