

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05313

研究課題名(和文) 超高密度磁気記録の実現を目指したレーザー励起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 laser-excited magnetization reversal dynamics for developing ultra-high-density magnetic recording media

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：二層交換結合系垂直ナノ磁性体に対応する物質パラメータを精査しLLG (Landau-Lifshitz-Gilbert)方程式を解くことにより、有効磁場下におけるAtomisticレベルの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の構築を進めてきた。レーザー励起磁化反転のメカニズムには当初想定していたスピン波以外の要素も検討に含める意義があることが分かってきた。磁化の消磁効果を考慮に入れた温度モデルの組み込みを行なった上で磁化反転条件の物質パラメータ依存性に関する理論解析を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では次世代高密度且つ超高速磁気記録を実現する磁化反転制御手法の確立を目指してレーザー励起と磁化反転の相関を精査し、レーザー励起磁化反転の低消費電力化、および高精度(低エラー率)化の指針を得た。レーザー励起により交換結合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提案する点で学術的な意義は大きいと考えられる。また、レーザー励起磁化反転の実現により、情報デバイス業界への貢献が期待される。従来のアシスト磁化反転とはメカニズムが異なるレーザー励起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。

研究成果の概要(英文)：We have studied the material parameter dependence of the magnetization switching in the exchange coupled perpendicularly magnetized nano magnets. We have developed the effective spin model simulation program for calculating the dynamics of the magnetization switching under effective field. It was found that other than spin wave, there is a mechanism to need to consider for studying the laser induced magnetization switching. We carried out the theoretical analysis of the material parameter dependence fo the magnetization switching based on the temperature model by considering the demagnetization of magnetization.

研究分野：スピントロニクス理論

キーワード：超高速磁気記録 超高密度磁気記録 レーザー励起 パルス磁場 物質パラメータ依存性 理論解析

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、ユーザーが創出するデータ量が格段に増え、それに伴いストレージへの需要は爆発的に増えた。全世界で創出されるデータの容量はZB(ゼタバイト)単位で語られるようになり、手元のデバイスからインターネット経由でアクセスするサーバーまで、ありとあらゆる所でストレージが欠かせなくなっている。アプリケーションごとのストレージの需要のトレンドでは、クライアントPC、家電、クラウドのいずれの分野でも、今後高い成長が見込まれる。しかし、多くのデータが置かれるであろうクラウドストレージ領域において、記録密度は年間20%しか向上しないが、それに対するデータ量は55%も増える予測があり、これが今後のストレージ市場の課題となっている。このように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。

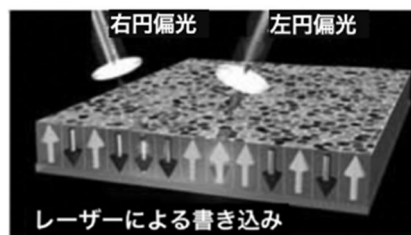
HDDの記録密度は、これまで年率20%から40%で増加し続け、記録方式は面内磁気記録方式から垂直磁気記録方式に移り変わり、現在に至る。しかしながら、HDDの垂直磁気記録方式の記録密度を需要に見合うように伸ばし続けるには、現状の技術では「高密度化」「熱安定性」「書き込み容易性」のトリレンマに直面している。

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(50~100GHz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。

2. 研究の目的

一方、英国ヨーク大学のChantrellらのグループによって、遷移金属強磁性体と希土類金属強磁性体を、IrやRu層により反強磁性結合させた薄膜にフェムト秒レーザーを照射することによる、ゼロ磁場での磁化反転現象が2011年に報告された[1]。しかし、報告された磁化薄膜は、その低い磁気異方性とアモルファス構造のため、磁気記録媒体への実用化には向かないと考えられた。そこで、Chantrellらのグループに加えて、米国カリフォルニア大学のGorchonらのグループによって、高い磁気異方性をもつFePtやCoPtを用いた磁化膜の作製と、レーザー励起磁化反転の観測に関する研究が行われてきた。このようにレーザー励起磁化反転は実験研究が先行しているが、外部パラメータと物質パラメータを系統的に変えて、レーザー励起磁化反転が起きる臨界条件や詳細なメカニズムを調べる研究はコストが掛かり難しく、未だ明らかにされていない。レーザー励起磁化反転は、強磁性体と反強磁性体の組み合わせでは実現するのか、二層界面が強磁性結合の場合はどうなるのか、キュリー温度の差は磁化反転制御にどう影響するかなど系統的な研究はなされていない。

そこで本研究では、交換結合を介した超高速磁化反転、レーザー照射と磁化反転現象との相関を解明する。交換結合系の磁性体を用いる点は共通しているが、直流磁場を必要としないので、従来のアシスト磁化反転手法とは原理的にメカニズムが異なるレーザー励起磁化反転の制御と反転機構の理論構築を行う。レーザー励起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、5Tbit/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産業的意義がある。レーザー励起磁化反転及びそれに基づく応用技術が実用化されれば社会的インパクトが非常に大きい。

[1] I. Radu et al., Nature, 472, 205 (2011).

3. 研究の方法

超高速磁化反転が起こる臨界条件(強度とパルス幅)を明らかにするために、二層交換結合系垂直ナノ磁性体に対応する物質パラメータを精査する。Atomistic有効スピンモデルを作成し、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する。物質パラメータを変化させて反転臨界条件を解析する。この解析は、従来のアシスト磁化反転とは物理メカニズムが全く異なるレーザー励起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。また、レーザー励起磁化反転を理論的に定式化するために、交換結合を介したスピン角運動量移行との相関を明らかにする。磁化反転が起きる臨界条件の交換結合強度依存性と磁化モード(スピン波など)との相関を、スピン波をマグノンとして捉え、マグノンと磁化との相互作用の観点から定式化を行う。

磁化反転に必要なパルス強度に対するパルス幅、膜厚、飽和磁化、ダンピング定数、異方性磁場依存性を調べ、磁化反転の最適条件を理論解析し、5Tbit/in²を超える超高密度磁気記録を実現する磁気記録システムの理論設計を行う。実用化に向けて、特に積層構造の厚さが高密度化に、パルス幅の長さが高速化および高信頼性においてネックになると考えられるので、膜厚とパルス幅の最適値を理論解析する。

4．研究成果

超高速磁化反転、レーザー励起磁化反転が起こる臨界条件を明らかにするために、二層交換結合系垂直ナノ磁性体に対応する物質パラメータを精査した。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の構築を進めた。また、ソフトウェアを用いた Atomistic シミュレーションを取り入れた理論解析を進めた。

超高速磁化反転、レーザー励起磁化反転のメカニズムには当初想定していたスピン波以外の要素も検討に含める意義があることが分かってきた。令和 4 年度は磁化の温度モデルの組み込みを行なった上で磁化反転条件の物質パラメータ依存性に関する理論解析を行なった。さらに、磁化反転に関して回転座標系に移行した解析を進めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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, Hiroshi Imamura	4. 巻 92
2. 論文標題 Material Parameters for Faster Ballistic Switching of an In-Plane Magnetized Nanomagnet	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 64703
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.92.064703	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 -

1. 著者名 Toshiki Yamaji, Hiroshi Imamura	4. 巻 91
2. 論文標題 Macrospin Analysis of Equal Probability of Voltage-Driven Magnetization Switching of Nano-Magnet for Random Number Generator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 55001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.055001	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山路俊樹、今村裕志
2. 発表標題 面内磁気異方性をもつナノ磁性体におけるパリティ磁化反転領域の物質パラメータ依存性に関する理論解析
3. 学会等名 応用物理学会 第83回秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山路俊樹・今村裕志
2. 発表標題 電圧駆動磁化反転の等反転確率を用いた物理乱数発生に関するシミュレーション解析
3. 学会等名 IEICE 磁気記録・情報ストレージ(MRIS)研究会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------