

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14487

研究課題名（和文）二成分スピントルク項に基づく希土類フェリ磁性薄膜中スピントルクの新解釈

研究課題名（英文）Investigation of spin torque in transition metal-rare earth metal ferrimagnet based on 2 component spin torque term

研究代表者

黒川 雄一郎（Kurokawa, Yuichiro）

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：20749535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：希土類フェリ磁性薄膜は希土類元素と遷移金属元素による二つの種類の磁化を持ち、スピントルクの寄与が構成元素ごとに異なることが予想されたが、これまで元素ごとの寄与は考慮されてこなかった。初めに、希土類フェリ磁性体TbGdFe合金を用いてスピントルク係数を見積もる研究を行った。その結果、GdFe合金にTbを添加していくと、スピントルクが観測されなくなるという結果を得た。次に、フェリ磁性の二成分の磁化を用いたマイクロマグネティックシミュレーションを行った。補償組成付近で磁化発振を数値解析したところ、二つの磁化成分の複雑な動きにより、従来よりも高い周波数で発振が可能になることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GdFe合金にTbを添加していくとスピントルクが観測されなくなるという結果は、Tb添加により選択的にスピントルクを不活性化するという重要な結果である。実際、この研究の中で、組成の異なるTbGdFe合金を使ってスピントルクの方向性を制御する結果を得ている。この成果は磁気メモリなどに応用が可能であり重要である。次に、フェリ磁性体の補償組成付近で従来よりも高い周波数で発振が可能になるシミュレーション結果は、高周波数発振可能な小型発振器へ応用が可能であり、発振器の設計指針を与える重要な結果である。

研究成果の概要（英文）：The transition metal-rare earth (TM-RE) ferrimagnet has two magnetization components. These components can have different contribution for the current-induced spin torque. In this study, firstly, we measured the spin torque in TbGdFe alloy. we found that the spin torques were deactivated in the TbGdFe with the Tb composition over 8 at%. Next, we investigated the current-induced magnetization oscillation in the GdFeCo ally using a micromagnetic simulation with the two magnetization components. we found that the magnetization oscillation with high frequency appeared around the angular momentum compensation composition of the GdFeCo.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：希土類フェリ磁性体 スピントルク マイクロマグネティックシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス技術に基づいた磁性体中の磁化操作は、高速情報記録や発振器に応用が可能とされ、注目されている。通常磁性体の磁化操作は外部から磁場を印可することで可能となるが、スピントロニクスに基づいた方法では伝導電子の有するスピン角運動量を利用し、電流を用いて磁化を操作する、スピントルクと呼ばれる技術を用いる。スピントルクをメモリに応用した場合、ランダムアクセスメモリ並みに高速でありながら情報の維持に電力を必要としない不揮発性を有するメモリが実現可能である。また、発振器に応用する場合は直径数100nm程度の小型のマイクロ波発振源に応用できる。このように、スピントルクは重要な技術であるが、一方で、スピントルクによる磁化操作は未だに必要な電流量が多く、改良の余地が大いにある。ここで、申請者が特に着目しているのは、希土類フェリ磁性薄膜である。希土類フェリ磁性薄膜とは、希土類磁性(RE)元素と遷移金属磁性(TM)元素で構成される磁性薄膜である。希土類フェリ磁性薄膜は、各元素の持つ磁化が反平行に整列したフェリ磁性を有し、磁化の反平行整列に起因した小さな磁化を有する。スピントルクは磁性薄膜の有する磁化が小さいほど大きくなるため、この小さな磁化は大きなスピントルクを誘起し、小さな電流での磁化の操作を可能とする。加えて、希土類フェリ磁性薄膜は垂直磁気異方性を持つ。これはメモリの記録密度を上げることに必須の特性であり、重要である。

このように、希土類フェリ磁性薄膜は未来の材料として非常に有益であるが、互いに反平行に整列した二種類以上の元素による磁化を有するために、電流による磁化ダイナミクスが非常に複雑であることがわかってきた。したがって、従来ではシミュレーションによる数値解析がダイナミクスを理解するために用いられる。希土類フェリ磁性薄膜の場合は、二つの磁化の合成モーメントを一つの磁化として仮定し、ランダウ-リフシッツ-ギルバート(LLG)方程式と呼ばれる磁化の運動を記述する式にて解析を行う。この一成分LLG方程式は希土類フェリ磁性薄膜の磁化の動きを近似できるが、後述のようにスピントルクには強い元素依存性が示唆され、二成分を考慮した解析でなければ真の磁化ダイナミクスを理解できない。本研究ではこの二成分を考慮し、計算機、および実験の双方から解析を行う。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記の問いに回答し、元素ごとへのスピントルクの寄与を表す全く新しい係数 χ_{TM} 、 χ_{RE} を導くことである。TM元素の磁化の源である局在スピンは、伝導電子の存在するフェルミ準位から近いd軌道に存在することに対し、RE元素の局在スピンはフェルミ準位から遠いf軌道に存在することから磁化と伝導電子の相互作用はTMとREで異なることが予想される。この考えに基づき、本研究では、TM元素とRE元素がそれぞれスピントルクに及ぼす影響を、係数を χ_{TM} 、 χ_{RE} にて表せると仮定し、この係数を実験と計算から求めることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の背景をもとに、研究期間内には以下のことを明らかにする。

①磁気異方性の小さいGd-Fe合金薄膜を母物質として各種TM元素、RE元素をドーブし、そのスピントルクを測定し、その組成依存性を明らかにする。

②二成分LLG方程式による数値解析により、二成分による複雑な磁化ダイナミクスを明らかにする。

①では、 χ_{TM} 、 χ_{RE} を求めるためにGd-Fe薄膜のスピントルクの組成依存性を測定する。具体的には、Gd-Fe薄膜を母物質とし、Tbをドーブし、そのスピントルクの組成変化を調べ、各元素の χ_{TM} 、 χ_{RE} を導出可能なデータを得ることを目標とする。スピントルクは作製したTb-Gd-Fe薄膜細線に重金属を積層することで発生させる。これに電流を印可すると、重金属層の大きなスピン軌道相互作用によってスピントルクを発生させることが可能である。スピントルクの測定は、一定面内磁場の下で垂直磁場を印可し、ホール効果を測定することで行う。測定する際に電流を様々に変化させることで垂直方向へ異なるスピントルクを発生させ、ホールループのシフトを誘起する。このシフト量を見積もることでスピントルクが測定できる。

②では、二成分LLG方程式を用いてスピントルクの計算機シミュレーションによる数値解析を行う。TM-REに起因した二つの磁化を仮定した二つのLLG方程式を組み合わせ、マイクロマグネティックシミュレーションを行う。各元素の組成比変更することを仮定し、二つの成分の磁化の大きさをそれぞれ変更した。最終的に、スピントルクを印加し、磁化の発振を観察した。

4. 研究成果

①の結果として、重金属層としてTaを用いた $Gd_{32}Fe_{68}$ 合金積層膜にTbをドーブしていくことで、スピントルクの大きさを見積もった。図1に示すように、面内磁場中で、ホール効果を測定することにより、電流から発生したスピントルクにより、実効的な面直磁場が発生し、ホール効果によるループが印加電流方向によって左右にシフトする。このシフト量からスピントルクの大きさを見積もることが可能である。スピントルクの見積もりの結果、Tb濃度が8 at%以上の試料では、スピントルクが検出できなくなることが分かった。これは、Gdの χ_{RE} とTbの χ_{RE} が異なるため、このようなことが起こることが原因の一つとして示唆された。次に、Tb濃度によりスピントルクの大きさを制御できることを利用し、Tb濃度が小さいGd-Fe膜とTb濃度が大きいGd-Fe膜を積層し、2つのTa層で挟み込むことによりスピンの流れを一方向に限定する検証を行った。通常、2つの重金属層で強磁性体を挟み込むと、互いの重金属層から発生するスピントルクの向きが逆向きとなるため、正味のスピントルクはキャンセルされゼロとなる。一方、この検証では、Tb濃度の異なる2層のGd-Fe層を用いることにより、2つの重金属層で挟んでも、片方の活性なGd-Fe層しかスピントルクを受け取らないため、正味のスピントルクはキャンセルされないはずである。実際に実験を行ってみると、2つの重金属層で挟んだ試料でも有限のスピントルクが検出され、Tb濃度の異なるGd-Fe層を用いることにより、スピンの流れを一方向に限定できることが分かった。

②の結果として、GdFeCoを想定し、TMとREの磁化を仮定したLLG方程式が、互いの磁化を参照する反強磁性磁場 H_{anti} で結びついていると仮定し、マイクロマグネティックシミュレー

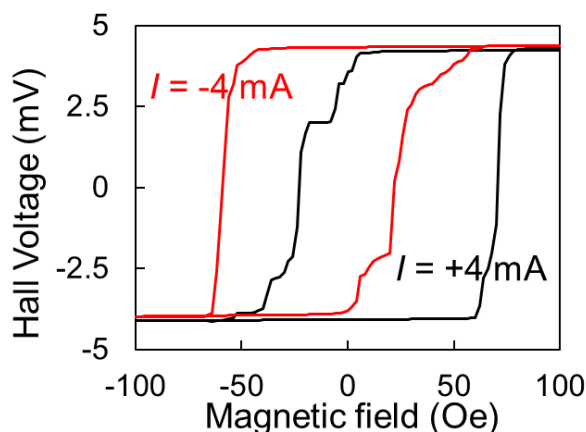


図1 Tb₄(Gd₃₂Fe₆₈)₉₆ 試料の面内磁場 800Oe、電流 I = ±4 mA 印可時のホール効果測定結果

シミュレーションを行った。各元素の組成は、各元素の飽和磁化を変更することで行っている。シミュレーションの結果、図2に示すように、ある組成で磁化発振周波数が極端に増減することが分かった。フェリ磁性体の各元素は異なる g 因子を有する為、ある組成で有限の磁化を持ちながら角運動量がゼロになる角運動量補償点が存在する。角運動量補償点では実効的な角運動量がゼロとなるため、角運動量の逆数に比例する磁気回転比 γ_{eff} が無限大に発散する。このため、わずかなスピントルクで極めて高速な磁化発振が得られることが分かった。また、さらに組成を増大させると各元素の磁化がゼロとなる磁化補償点に到達するが、そこでは発振周波数が極端に低下することも分かった。これらの結果は実効磁気回転比を直接操作して求める一成分 LLG 方程式から得られる結果とほぼ同様であり、各元素の磁気回転比を固定し、組成のみを変化させた二成分 LLG 方程式によるマイクロマグネティックシミュレーションでも同様の結果が得られることが分かった。加えて、角運動量補償点と磁化補償点の間では実効的な磁気回転比の符号が逆転する為、各元素の合成モーメントに与えるスピントルクの向きが逆向きになることも分かった。このスピントルクが逆向きになるという結果は2成分の磁化を仮定した LLG 方程式を用いたシミュレーションによってはじめて得られた結果であると考えられる。

今後の研究では、さらに様々な希土類元素を用いて組成を変化させ、スピントルクの測定を行っていく。またシミュレーションで得られた高速な発振を発振器として利用する為、素子作製を行っていく予定である。

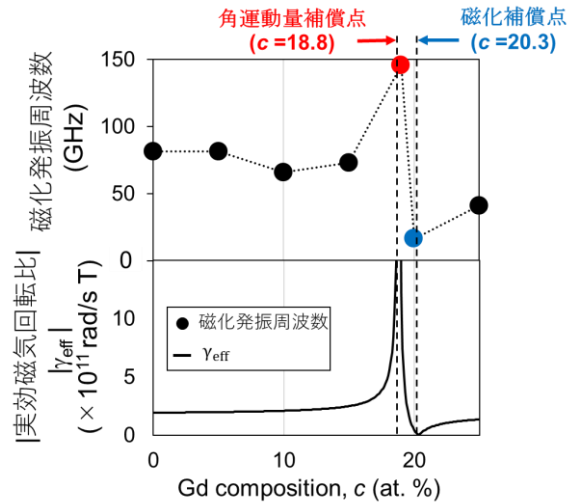


図2 Gd 組成を変化させたときの磁化発振周波数と実効磁気回転比 γ_{eff}

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichiro Kurokawa, Keisuke Yamada, Tomohiro Taniguchi, Shu Horiike, Terumitsu Tanaka, Hiromi Yuasa	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultra-wide-band millimeter-wave generator using spin torque oscillator with strong interlayer exchange couplings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-15014-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yuichiro Kurokawa, Hiromi Yuasa	4. 巻 62
2. 論文標題 Operating characteristics of domain walls in perpendicularly magnetized ferrimagnetic cylindrical nano-wires for three-dimensional magnetic memory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb828	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 Uraku Kamihoki, Yuichiro Kurokawa, Masahiro Fujimoto, Hiromi Yuasa	4. 巻 133
2. 論文標題 Inversion symmetry breaking in spin orbit torque-induced magnetization switching to improve the recording density of multi-level magnetoresistive random-access memory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 143902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0131540	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 Yuichiro Kurokawa, Masahiro Itoh, Masakazu Wakae, Masahiro Fujimoto, Uraku Kamihoki, and Hiromi Yuasa	4. 巻 61
2. 論文標題 Inactivation of damping-like torque in Tb-Gd-Fe film on Ta layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1025-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3fcb	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Masakazu Wakae, Masayuki Memita, Uraku Kamihoki, Masahiro Fujimoto, Satoshi Sumi, Hiroyuki Awano, Kohei Ohnishi, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Current-induced domain wall motion in ferrimagnetic Gd-Fe wire
3. 学会等名 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川雄一郎、若江将和、瀧田勇樹、藤本真大、伊藤正裕、湯浅裕美
2. 発表標題 交換バイアスを印加したTb-Fe層における無磁場中スピンオービットトルク磁化反転の観察
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 characteristics of domain walls in perpendicular magnetized ferrimagnetic nano-pillar for three-dimensional magnetic memory
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Device and Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Masahiro Itoh, Masakazu Wakae, Masahiro Fujimoto, Uraku Kamihoki, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Inactivation of Damping Like Torque in Tb-Gd-Fe Film on Ta Layer
3. 学会等名 Solid State Devices and Materials 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Kurokawa, Naoki Hashimoto, Liu Chuhan, Terumitsu Tanaka, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Sub-THz spin torque oscillation excited by inverse effective spin torque in ferrimagnetic material at angular momentum compensation composition
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayuki Memita, Yuichiro Kurokawa, Uraku Kamihoki, Masahiro Fujimoto, Hiromi Yuasa
2. 発表標題 Investigation of bit shift and write operation using spin orbit torque switching in racetrack memory
3. 学会等名 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本真大、上穂木有樂、黒川雄一郎、湯浅裕美
2. 発表標題 高磁気抵抗率と低閾電流密度の両立を目指すCoFeB/Tb-Fe垂直磁化細線の電流誘起磁化反転の観察
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上穂木有樂, 黒川雄一郎, 藤本真大, 湯浅裕美
2. 発表標題 多値メモリ応用の為の非対称スピノービットトルク磁化反転の観測
3. 学会等名 2021年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------