

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15437

研究課題名（和文）電界効果による磁性金属の磁化緩和機構の能動的制御

研究課題名（英文）Active control of the magnetization damping by electric field effect in magnetic metal

研究代表者

笠谷 雄一（KASATANI, Yuichi）

日本大学・理工学部・研究員

研究者番号：30836507

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）：本研究の目的は、電圧などの外部パラメータによる磁化緩和機構の能動的変化である。強磁性共鳴測定系、試料電圧印加可能な時間分解磁気光学測定系および成膜装置の新規立ち上げを行った。測定可能範囲での電圧印加では磁化緩和機構の明確な変調は見られず、試料構造と電界強度が重要であると考えられる。成膜装置故障のため当初の予定を変更し、希土類 遷移金属合金フェリ磁性体における熱磁気効果について実験検討した。Gd-Fe合金薄膜に温度勾配を与え、それに垂直な方向の電圧を測定した結果、広範囲の合金組成で異常ネルンスト効果が生じることを示し、その大きさおよび極性が優勢副格子磁化による組成依存性を持つことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果の学術的意義は、時間領域と周波数領域の両方の観点から磁化緩和機構を複合的に捉え、変化中の過渡状態と結果としてのパラメータ変化から電子状態と磁化緩和機構の関係に深くアプローチすることを可能にした。また、広範な合金組成の希土類 遷移金属合金フェリ磁性体で異常ネルンスト効果が生じ、その大きさや極性の組成・温度依存性を示した。社会的意義としては、磁化緩和機構の能動的制御指針を示すことでデバイス応用への可能性を見出した。さらに、近年注目されている熱磁気効果をデバイス応用する上で、希土類 遷移金属フェリ磁性体を用いることによって比較的容易な特性制御の可能性を示したと言える。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is active control of the magnetization relaxation mechanism by external parameters such as voltage. The measurement system and the sputtering machine were newly set up. Distinct change of the magnetization relaxation mechanism was not observed with applying the voltage. It is suggested that sample structure and voltage intensity are important to control the damping constant. Since it was difficult to prepare new samples due to the breakdown of the sputtering machine, I have changed original plan and investigated the thermomagnetic effect in rare earth-transition metal ferrimagnetic alloys. By applying a temperature gradient to the Gd-Fe alloy ferrimagnetic thin film, I found that anomalous Nernst effects occur in wide range of composition ratio. I also qualitatively found that the magnitude and polarity of the anomalous Nernst voltage changes sensitively in response to the dominant sublattice elements with changing the composition ratio.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁化緩和機構 ダンピング定数 強磁性共鳴 磁気光学効果 電界効果 異常ネルンスト効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、電子の電荷とスピンの2つの自由度を利用するスピントロニクス研究分野が急速に発展してきた。スピントロニクスは、巨大磁気抵抗効果のハードディスクの読み取りヘッドへの利用、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリの開発など、新奇現象が産業応用に結び付く研究分野であり、今日においても、スピンを介して電気・熱・光・物理的回転などの様々な情報の相互変換を担える分野として盛んに研究が行われている。

磁性体中の電子スピン(磁化)を利用して情報の伝達や記録を行うスピントロニクスデバイスの実現や高性能化のためには、磁性体の動的磁気特性である磁化緩和機構を理解し、制御することが極めて重要である。磁化緩和機構とは、磁性体内において有効磁場が変化すると、磁化が歳差運動をしながらその動径方向に緩和トルクを受けて有効磁場方向に緩和する現象である。磁化緩和機構は磁化反転だけでなく、スピン波伝搬距離やスピントランスファートルク効率の増減など、スピントロニクス特有の情報伝達現象において極めて重要な要素である。

磁化緩和機構を特徴づけるダンピング定数は、磁性体の材料組成や結晶構造により決定される電子状態密度やスピン軌道相互作用と密接に関係することが実験的・理論的に示されてきた。しかし、ダンピング定数制御の試みは材料組成や結晶構造のような後から作り変えることが困難な系での研究に留まっており、現状では極めて非能動的な変化しかできないことが問題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、外部からの操作によって電子状態密度やスピン軌道相互作用に変調を与え、磁化緩和機構を系統的に制御することである。外部パラメータとして電圧を採用し、ゲート電極構造を利用した電界効果によりダンピング定数の能動的変化について実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では以下に示す課題を解決することで、電界効果による磁化緩和機構の変調について実空間・周波数領域の両面から多角的に明らかにする。

(1) ゲート電圧印加下での磁化緩和機構を測定可能な試料の作製

ゲート電圧印加により誘電体層の電気分極を介して電界効果を誘起することでGdFeCo磁性層の磁気特性と磁化緩和機構の変調を誘引するため、Si基板上にゲート電圧印加用の下部電極および、下部電極上に誘電体層、GdFeCo磁性層、上部電極から成る積層構造の作製をそれぞれ行う。

(2) フェムト秒パルスレーザーを用いた電界効果誘起磁化ダイナミクス変調の超高時間分解磁化ベクトル計測

試料電圧印加機構付きの光学試料ホルダーを設計・導入およびゲート電極構造を持つ多層膜試料における電界効果の磁気光学効果測定

フェムト秒パルスレーザーを用いたポンプ-プローブ法による超高時間分解実空間磁化挙動追跡

(3) 強磁性共鳴法による電界効果ダンピング定数変調の精密測定

コプレーナ導波路を用いた周波数掃引強磁性共鳴法による希土類遷移金属合金フェリ磁性薄膜のダンピング定数精密測定手法の確立

ゲート電極構造を持つ試料を用いた電界効果によるダンピング定数変調と精密測定

4. 研究成果

(1) 絶縁体および電極成膜用成膜装置の導入と成膜条件探索

強磁性共鳴測定用コプレーナ導波路および電圧印加可能試料の作製のため、誘電体および電極材料成膜用に新たに成膜装置を導入した。誘電体材料として窒化シリコン(SiN)および二酸化シリコン(SiO₂)、電極材料としてTi、Cu、Alをそれぞれ新規導入した。それぞれの材料の成膜条件を探索しコプレーナ導波路およびゲート電極の作製が可能になった。

(2) 強磁性共鳴法によるダンピング定数の精密測定実験系の立ち上げ

所属機関所有の温度可変垂直磁場印加型プローブシステムに高周波対応プローブを増設した。また、ベクトルネットワークアナライザーを新規に導入し、高周波用同軸ケーブルを用いて高周波対応プローブと接続することにより周波数掃引型強磁性共鳴を温度可変・膜面垂直磁場印加可能な環境で測定可能な実験系を新たに構築した。

(3) 強磁性共鳴法によるダンピング定数精密測定

上記(2)において立ち上げた周波数掃引強磁性共鳴測定システムを用いて、(1)の成膜装置を利用して作製したコプレーナ導波路電極を有するGdFeCoフェリ磁性体薄膜試料を用いて強磁性共鳴測定を行った。GdFeCoフェリ磁性体における膜面垂直静磁場印加下での面内高周波磁場による強磁性共鳴では、試料の磁化が小さく信号雑音比が小さいことがわかった。強磁性共鳴を同定しダンピング定数を適切に評価するには、信号雑音比の改善が必要で、微細加工精度の向上や試料構造の最適化を行っている。

(4) 電界効果によるダンピング定数変調の強磁性共鳴法による測定の試み

ゲート電極構造を有する試料を作製し電圧を印加しながら強磁性共鳴測定を行ったが、電界効果による明確な信号変化は得られなかった。(3) でも示した強磁性共鳴検出の高精度化に加えて、電界効果の増強のため高誘電率誘電体材料や高出力電源を導入する必要があると考えられ、現在検討中である。

(5) 電界効果による磁気特性変調測定に向けた磁気光学測定システムの改良と測定

フェムト秒レーザーシステムによる時間分解磁気光学効果測定に先立ち、連続波レーザーを用いた静的磁気光学測定により電界効果による磁気特性変化を明らかにするため、三軸直線微動機構と面内回転微動機構を導入し、電圧印加機構を備えた試料ホルダー新たに設計・作製し光学測定系に組み込んだ。(1) で導入した成膜装置により作製したゲート電極を備える GdFeCo 多層膜試料において電圧印加下で磁気光学測定を行ったが、電界効果による磁気特性の明確な変化は得られなかった。(4) と同様、電界効果増強に向けた高誘電体材料や高出力電源の導入が必要であることがわかった。

(6) 時間分解光学測定系への試料電圧印加機構の組み込みと GdFeCo 合金フェリ磁性体における電界効果による磁化緩和機構の能動的制御の試み

静的な磁気特性における電界効果の寄与がほとんど見られなかったが、磁化ダイナミクスにはその寄与が現れているのではないかと考え、フェムト秒レーザーシステムを用いた時間分解磁気光学効果測定系に、(5) で導入した微動機構と試料ホルダーを導入した。さらに、信号雑音比の改善と電界効果の寄与増大を狙って試料サイズを数 μm 程度に微細加工した。そして、フェムト秒パルスレーザーの数 μm の試料への空間的精密照射のために対物レンズを用いた収束光学系を導入した。ゲート電極構造を有する GdFeCo フェリ磁性体薄膜試料を用いて電圧印加下で時間分解磁気光学カー効果測定を試みた。明確な磁化ダイナミクスの変調効果は測定できていない。上記と同様、高誘電率材料や高出力電源が必要であると考えられる。

(7) 副格子磁気構造を持つ希土類 遷移金属合金フェリ磁性体における熱磁気効果の実験的検討

研究期間中の磁性体成膜装置故障により磁化緩和機構検討用の試料作製に困難が生じたため、本研究の検討段階で作製していた予備試料を用いて希土類 遷移金属合金フェリ磁性体薄膜における熱磁気効果について研究を行った。組成比を多様に変化させた $\text{Gd}_x\text{Fe}_{100-x}$ ($0 < x < 100$) 合金薄膜試料において、精密に温度勾配を与え、それと磁化の両方に垂直に発生する微小電圧を測定することにより、広範囲の Gd-Fe 合金組成において異常ネルンスト効果が生じることを明らかにした。また、その異常ネルンスト電圧において、各組成・各温度における優勢副格子元素により極性が変化することを副格子磁気モーメントの観点から定性的に示した。合金組成比の系統的制御および実験温度範囲の拡大により磁化補償および角運動量補償における異常ネルンスト効果の振舞いにつきより詳細な検討を行っている。さらに Gd 組成が 50 % を超えると異常ネルンスト係数が Gd 組成増加に対して減少することがわかった。このような異常ネルンスト係数の変化には合金中 Gd (4f 電子スピン) の磁気相転移の可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Kasatani, H. Yoshikawa, and A. Tsukamoto
2. 発表標題 Electrical Detection of Single Shot All-Optical Magnetization Switching in Ferrimagnetic GdFeCo Alloy
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium 2019 (MORIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kasatani, H. Yoshikawa, and A. Tsukamoto
2. 発表標題 Electrical detection of all-optical magnetization switching in ferrimagnetic GdFeCo alloy by anomalous Hall effect
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kasatani, H. Yoshikawa, and A. Tsukamoto
2. 発表標題 Electrical detection and modulation of All-Optical magnetization Switching in GdFeCo ferrimagnetic alloy
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠谷雄一, 吉川大貴, 塚本新
2. 発表標題 GdFeCoフェリ磁性体合金における全光型磁化反転交番誘起の異常ホール効果による電氣的検出
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yoshikawa, Y. Kasatani, and A. Tsukamoto
2. 発表標題 All-Optical Magnetization Switching In GdFeCo on Electronic Heat Conversion Layers
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium 2019 (MORIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Yoshikawa, Y. Kasatani, and A. Tsukamoto
2. 発表標題 Thickness dependency of GdFeCo films and All-optical magnetization switching phenomena
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森敦司, 笠谷雄一, 塚本新
2. 発表標題 GdFe 系合金薄膜を用いたホール素子作製への検討
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林祐希, 笠谷雄一, 塚本新
2. 発表標題 GdFeフェリ磁性薄膜における温度勾配に起因する横電圧誘起と横ゼーベック係数
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 2021年

1. 発表者名 笠谷雄一, 吉川大貴, 塚本新
2. 発表標題 GdFeCoフェリ磁性合金薄膜における全光型磁化反転の電氣的検出と電流制御
3. 学会等名 電気学会 マグネティックス研究会 (招待講演)
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
---------	---------