

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82108

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20434

研究課題名（和文）スピントルク発振素子の磁化ダイナミクス解明のための新規計測技術開発

研究課題名（英文）Development of a novel analysis method of spin-torque oscillators for understanding the magnetization dynamics

研究代表者

首藤 浩文（SUTO, Hirofumi）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員

研究者番号：00912940

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：スピントルク発振素子が磁気記録応用などの観点から注目されている。本研究では、スピントルク発振素子の磁化ダイナミクス解明・性能向上に関して以下のテーマで研究を行った。注入同期を用いた解析手法を開発し、高周波電気信号を用いた従来手法に対する優位性を示した。スピントルク発振素子の新たな構造を実現する負のスピントルク材料であるFeCrに関して、その特性評価、特にスピントランスファートルク効率の定量評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントルク発振素子は、微細なサイズ・直流電流を通電することでサブGHz～数10GHzの磁化振動が励起可能という特徴を有し、磁気記録応用・高周波デバイス応用から研究されている。特に磁気記録応用である、マイクロ波アシスト磁気記録は、現在停滞しているHDDの記録密度を飛躍的に向上させることのできる技術であり、近年の情報爆発に伴い問題となっているデータセンタの消費電力を削減につながる。スピントルク発振素子の高速な磁化ダイナミクスを解析し制御することは困難であり、実用化への障壁となっている。この課題を解決することで、スピントルク発振素子の実用化につなげる。

研究成果の概要（英文）：Spin-torque oscillators have been studied for applications such as magnetic recording. In this research, we worked on understanding the magnetization dynamics and improving the performance of spin-torque oscillators by conducting research on the following topics. We developed a novel analysis method for spin-torque oscillators using injection locking, which has advantages over the conventional method based on microwave electrical signals from spin-torque oscillators. We evaluated the spin torque efficiency of FeCr, which has negative spin polarization and can achieve novel device structures of spin-torque oscillators.

研究分野：スピントロニクスデバイス

キーワード：スピントルク発振素子 同期 磁気記録 マイクロ波アシスト 負のスピントルク

## 1. 研究開始当初の背景

スピントランスファートルクにより磁化の振動を励起するデバイスであるスピントルク発振素子（spin-torque oscillator : STO）は、マイクロメートル以下の微小なサイズ、直流電流を通電することにより数 GHz から数 10 GHz の周波数での磁化発振が生じる、という特徴を有し、次世代のハードディスクドライブ（HDD）技術であるマイクロ波アシスト磁気記録（MAMR）におけるキーデバイスとして研究されている。マイクロ波アシスト磁気記録は、現在停滞している HDD の記録密度を飛躍的に向上させることのできる技術であり、近年の情報爆発に伴い問題となっているデータセンタの消費電力を削減につながる。また、磁気記録応用のほかにも、STO は高周波デバイス応用の観点からも研究されている。しかしながら、STO の高速な磁化ダイナミクスを解析し制御することは困難であり、実用化への障壁となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、注入同期（injection locking）現象を利用した新規計測技術を開発し、STO の発振特性の理解を深めることを目的とする。また STO の新規構造・特性向上を実現する材料を探求することを目的とする。

従来、STO の解析においては、STO から生じる高周波電気信号が用いられてきた。この高周波電気信号は、STO を構成する磁化の振動によって、磁気抵抗（MR）による素子抵抗の振動が生じることで発生する。この手法には以下のような問題点があった、①発振周波数の他に複数の磁性体層に生じる発振の差分周波数、磁化軌道のゆがみから生じる倍波といった周波数成分を含み、磁化の発振周波数を同定できない。②磁化起動の対称性が高い場合など、発振中の磁化の相対格変化が小さい時には高周波信号の出力が弱く検出が困難となる。この問題を解決する方法として、注入同期を用いた STO の解析方法を考案した。この手法では、発振状態にある STO に対して、信号発生器とアンテナを用いて発生させたマイクロ波磁界を印可する。この時、マイクロ波磁界の周波数と STO の発振周波数がある程度近い条件では、磁化発振がマイクロ波磁界に同期する。この同期を検出することで、STO の発振周波数を同定することができる。この手法は STO から生じる高周波電気信号を用いないため、上述の問題を解決することができる。さらに、HDD ヘッドといった実デバイスでは、高周波信号の取り出しに配慮した設計にはなっておらず、高周波信号の測定が困難であることが想定される。このような実デバイスにおける STO の解析にも有用である。

材料の観点からは負のスピントルクを有する FeCr について研究を行った。負のスピントルク材料は、一般の正のスピントルク材料とは逆のスピントランスファートルクを発生させることができることから、スピントロニクスデバイスにおける新たなビルディングブロックとして研究されている。

## 3. 研究の方法

マグネトロンスパッタリングを用いて作成した磁性体多層膜からなる MR 素子膜を、電子ビームリソグラフィ、Ar イオンミリングにより素子加工を行い、素子特性を電氣的に計測した。FeCr の解析には、X線磁気円二色性（XMCD）測定、メスバウアー分光測定を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 注入同期を用いた STO 磁化ダイナミクスの解析。

初めに提案する測定の原理について、シミュレーションによる検討を行った。図 1(a)にシミュレーションモデルを示す。磁界発生層（FGL）、スピン注入層（SIL）の2層の面内磁化膜から構成される all-in-plane 型 STO における磁化発振を計算した。SIL と FGL の発振周波数はそれぞれ、約 34 GHz、10 GHz であった。この時、高周波電気信号に対応する素子のポテンシャルには 24 GHz に信号が現れた。この周波数は SIL と FGL の発振周波数の差に対応している。この結果は、高周波電気信号を測定することでは磁化発振の周波数を同定できないことを示している。次に、発振状態にある STO にマイクロ波磁界を印加した。図 1(b)に、SIL と FGL の発振周波数のマイクロ波磁界周波数依存性を示す。マイクロ波磁界が FGL 周波数と一致する際に FGL の周波数がマイクロ波磁界と同期した。また、マイクロ波磁界周波数が高周波電気信号の周波数である 24 GHz と一致したときに特に変化が起きていない。この理由は、24 GHz の信号は周波数の差分により生じたものであり、実際にその周波数には磁化振動が生じていないためである。図 1(c)に、同期によって生じる STO 素子抵抗変化のマイクロ波磁界周波数依存性を示す。10 GHz 付近に抵抗の変化が現れた。これは注入同期により磁化の発振軌道が変化したためであり、この抵抗変化を用いることで、同期を検出することができる。

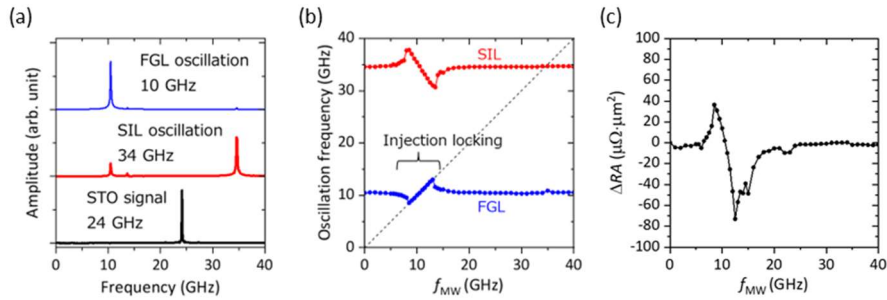


図 1 (a) all-in-plane タイプの STO における発振状態の一例、(b) SIL と FGL の発振周波数のマイクロ波磁界周波数依存性、(c) (b)の結果に対応した注入同期による素子抵抗変化。

次に、実験結果を示す。図 2(a)に、36 GHz に現れた STO 信号に対して、注入同期を行った結果を示す。印加マイクロ波磁界周波数が 36 GHz に一致した際に STO 信号に変化が生じており、同期が起きていることを示しているこの際の STO 素子抵抗の変化を図 2(b)に示す。シミュレーションと同様の素子抵抗の変化が生じており、注入同期を素子抵抗の変化で検出できることを示した。この結果により、新規解析方法の原理検証に成功した。今後はこの手法を活用し、STO の解析を進める。

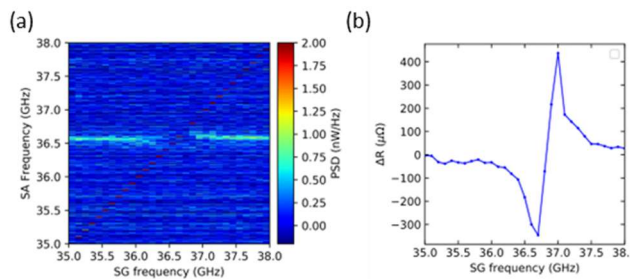


図 2 (a) all-in-plane タイプの STO における得られた高周波電気信号スペクトルのマイクロ波磁界周波数依存性、(b) (a)の結果に対応した素子の抵抗変化。

N.Asam, et al., " Analysis method of a spin-torque oscillator using dc resistance change during injection locking to an external microwave magnetic field. Applied Physics Letters," 119 [14] (2021) 142405 10.1063/5.0058847

H. Suto, et al., " Analysis of an all-in-plane spin-torque oscillator using injection locking to an external microwave magnetic field," Applied Physics Express. 14 [5] (2021) 053001 10.35848/1882-0786/abf667

(2) 負のスピントルクを有する FeCr のスピントルク能率の解析

図 3 に CoFe/Cu/FeCr の構成を有する素子を Cr 組成比 20%、30%、40%の 3 水準において作製し測定した R-H 曲線を示す。Cr 組成比が 30%、40%では一般の MR 効果とは逆に並行配置で抵抗が高くなる、負の MR 効果が得られた。この結果は、FeCr の負のスピントルクを示している。Cr 組成比 20 %では正と負の MR 効果が合わさったような複雑な R-H 曲線が得られた。

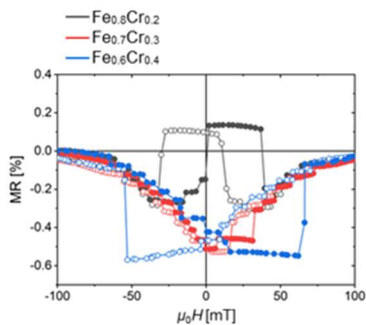


図 3 FeCr/Cu/CoFe の構成を持つ MR 素子において測定した R-H 曲線。

次に FeCr のスピントルク能率を調べるため、図 4 の上部の模式図に示すような素子を作製し、FeCr 層からのスピン注入により NiFe の磁化を反転させた。この実験は垂直方向の磁界を変化させておこなった。磁化反転に必要な電流量は垂直方向磁界に対して線形に増加し、この時の傾きからスピントルク能率を求めることができる。比較のため NiFe 層からのスピン注入による磁化反転の事件を行った。結果を図 4 に示す。FeCr からのスピン注入による磁化反転 (図 4(a)) と NiFe からのスピン注入による磁化反転 (図 4(b)) では磁化反転が生じるバイアスは逆極性になった。これは FeCr の負のスピン分極に由来して、スピントランスファートルクの方向も反転したことを示している。磁化反転に必要な電流の外部磁界依存性からスピントルク能率を求めると、FeCr のスピントルク能率は NiFe のおよそ半分であった。デバイスの性能向上のためには、より高いスピントルク能率を有する材料の開発が必要である。

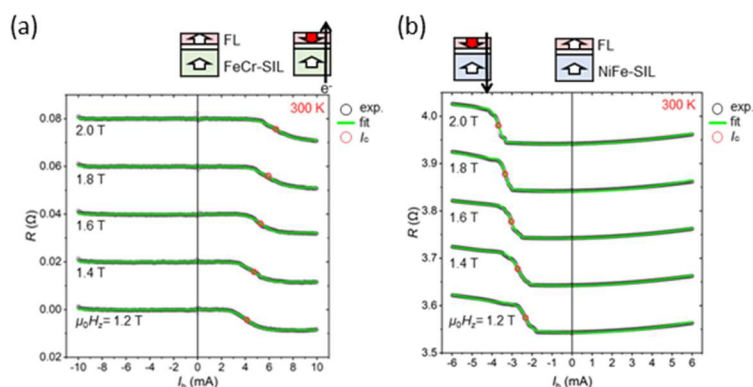


図 4 (a) FeCr および、(b) NiFe からのスピン注入による磁化反転実験の結果。十分なバイアス電流を印加することで、磁化反転が生じ、MR 効果によって抵抗変化が生じる。

H. Suto, et al., " Study on FeCr thin film for a spintronic material with negative spin polarization," Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 557 (2022) 169474 10.1016/j.jmmm.2022.169474

H. Suto, et al., " Evaluation of spin-transfer-torque efficiency using magnetization reversal against a magnetic field: comparison of FeCr with negative spin polarization and NiFe," Applied Physics Express. 16 [1] (2023) 013003 10.35848/1882-0786/acb310

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 Suto Hirofumi, Nakatani Tomoya, Asam Nagarjuna, Iwasaki Hitoshi, Sakuraba Yuya	4. 巻 16
2. 論文標題 Evaluation of spin-transfer-torque efficiency using magnetization reversal against a magnetic field: comparison of FeCr with negative spin polarization and NiFe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 013003 ~ 013003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acb310	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 Suto Hirofumi, Nakatani Tomoya, Kota Yohei, Nagarjuna Asam, Iwasaki Hitoshi, Amemiya Kenta, Mitsui Takaya, Sakai Seiji, Li Songtian, Sakuraba Yuya	4. 巻 557
2. 論文標題 Study on FeCr thin film for a spintronic material with negative spin polarization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 169474 ~ 169474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/J.JMMM.2022.169474	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H. Suto, N. Asam, S. Tamaru, H. Sepehri-Amin, A. Bolyachkin, W. Zhou, T. Nakatani, H. Kubota, and Y. Sakuraba
2. 発表標題 Analysis of a Spin-Torque Oscillator using Injection Locking to an External Microwave Field
3. 学会等名 ICMFS 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirofumi Suto, Tomoya Nakatani, Nagarjuna Asam, Hitoshi Iwasaki, and Yuya Sakuraba
2. 発表標題 valuation of spin-transfer-torque efficiency of FeCr with negative spin polarization using magnetization reversal against a magnetic field
3. 学会等名 応用物理学会 秋季学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirofumi Suto, Vineet Barwal, Zehao Li, Keisuke Masuda, Taisuke Sasaki, and Yuya Sakuraba
2. 発表標題 Negative spin polarization of Mn <sub>2</sub> VGa Heusler alloy thin film studied in current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices
3. 学会等名 Intermag 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 首藤 浩文、Nagarjuna Asam、中谷 友也、岩崎 仁志、桜庭 裕也、小田 洋平、雨宮 健太、三井 隆也、境 誠司、李 松田
2. 発表標題 負のスピントロニクスを有する FeCr合金のスピンロニクス応用と メスパワー分光法による解析
3. 学会等名 メスパワー分光研究会 シンポジウム 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirofumi Suto, Vineet Barwal, Zehao Li, Keisuke Masuda, Taisuke Sasaki, and Yuya Sakuraba
2. 発表標題 Magnetoresistance effect in epitaxial thin films of Mn-based Heusler alloys: Mn <sub>2</sub> VGa and Mn <sub>2</sub> VAl
3. 学会等名 磁気学会 学術講演会 2023
4. 発表年 2023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
---------	---------