

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18892

研究課題名(和文)スピントロニクス発振素子を用いたニューロコンピューティング実現のための基盤構築

研究課題名(英文)Spintronic auto-oscillator for neuromorphic computing

研究代表者

葛西 伸哉(KASAI, Shinya)

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・グループリーダー

研究者番号：20378855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円

研究成果の概要(和文)： スピンホール効果による磁化反転および自励発振について詳細な評価を行った。直流電流下においてスピンホールトルクによる磁化の準安定状態の生成・観測に成功し、またその安定性をDwell Timeで評価可能であることを示した。また、直流電流を増加させることによって、自励発振状態を実現できる。発振モードは低電流下では単一モードであるのに対して、高電流下ではマルチモードへと遷移する様子が観測された。特にマルチモードは基本モードに対して、モードが等間隔に並ぶ、という特徴的なものである。実験的には外因的なものがマルチモードの主因であるが、数値計算では内因的な起源も存在しうることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強磁性体・特に磁気抵抗素子の熱安定性は、パルス電流に対するスイッチング確率によって評価されるのが一般的であるが、Dwell Timeによる評価は現行手法に対して相補的となりうる。また、ニューロモルフィックコンピューティングのために必要な発振素子の変調は、現状、外因的な効果を必要とするため小型化が困難であるが、本研究課題にて数値的に見いだされた非線形効果を用いれば、基板内実装が可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)： We investigated the magnetization switching as well as the auto-oscillation through the spin Hall effect. We found the meta-stable state under the spin Hall-induced spin torque. The mean dwell time could be the comprehensive method to the evaluation of the thermal stability. The auto-oscillation start with increasing the current: single mode at low bias current changes into the multi-mode whose frequency spacing is constant. This behavior can be primarily explained by the extremely broadened peak of the spin torque oscillator (STO), which is accompanied by the frequency dependent filtering by the transmission line. To explain the observation more quantitatively, we also discuss that the multi-peak may reflect the characteristics of the intrinsic dynamics of STO in the non-linear regime.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス ニューロモルフィックコンピューティング スピンドायナミクス 自励発振素子

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現状の人工知能技術は大型計算機と巨大データベースを使った巨大クラウドシステムによるディープラーニングによって担われているが、今後の更なる計算コストの増大を打破するにはパラダイムシフトが不可欠である。生体の脳や神経系を模倣したニューロコンピューティングは現行ノイマン型とは異なり、ディープラーニング、画像認識、画像再構成等の計算コストを大幅に低減できると期待されている。スピントロニクス発振素子は GHz 帯域と高い発振周波数を有しており、これを用いることで高速演算可能なニューロコンピューティング機能の実現が期待される。本研究では、入出力分離のための素子構造の多端子化、素子自身へのメモリ機能の付与、およびモードロック機能の提供という三つの課題の解決を通して、スピントロニクス発振素子を用いたニューロコンピューティング応用のための基盤を構築する。

### 2. 研究の目的

本研究では、入出力分離のための素子構造の多端子化、素子自身へのメモリ機能の付与、およびモードロック機能の提供という三つの課題の解決を通して、スピントロニクス発振素子を用いたニューロコンピューティング応用のための基盤を構築する。特に非線形モードについて検討することを通して、ニューロモルフィックコンピューティングに必要な要素機能の実現を目指す。

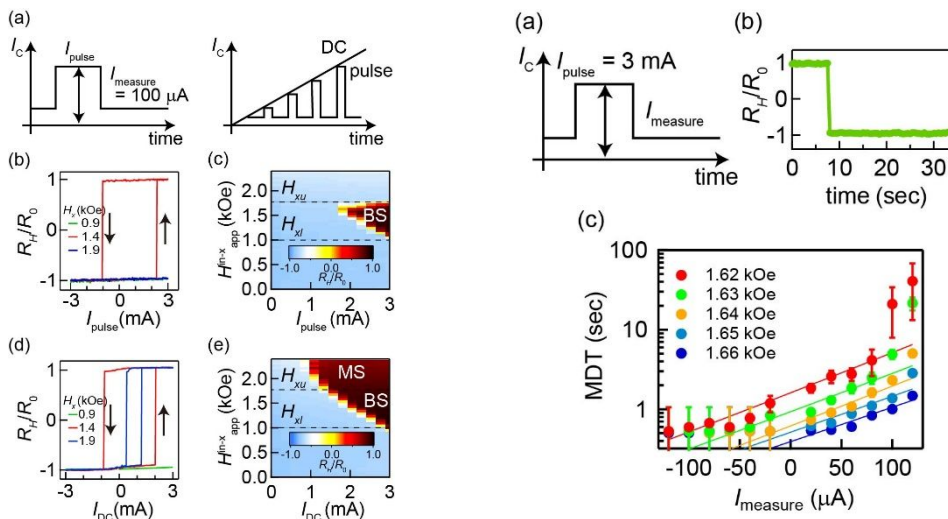
### 3. 研究の方法

本研究では主に超高真空マグネトロンスパッタ法により成膜した CoFeB/MgO/CoFeB 磁気トンネル接合を用いて研究を行った。下地層として、重金属である Ta あるいは W を用いて強磁性体/重金属層二層構造を作製し、スピンホール効果による磁化制御を可能とした。磁化状態は、上部 CoFeB にゲート電圧を印加することによって生じるトンネル磁気抵抗効果を用いて評価可能である。

### 4. 研究成果

#### 4.1 スピンホールトルクによる磁化準安定状態の実現と、Dwell-Time による安定性評価

自励発振素子の評価に先立ち、スピンホール効果を用いた磁化反転の検出を行った。直流電流下においてスピンホールトルク(ダンピングトルク)による磁化の準安定状態の生成・観測に成功し、またその安定性を Dwell Time を用いることで評価可能であることを示した。現状、強磁性体・特に磁気抵抗素子の熱安定性はパルス電流に対するスイッチング確率によって評価されるのが一般的であるが、Dwell Time による評価は従来手法に対して相補的な役割を果たす。当該結果については Applied Physics Letters 115, 092407 (2019)に掲載された。

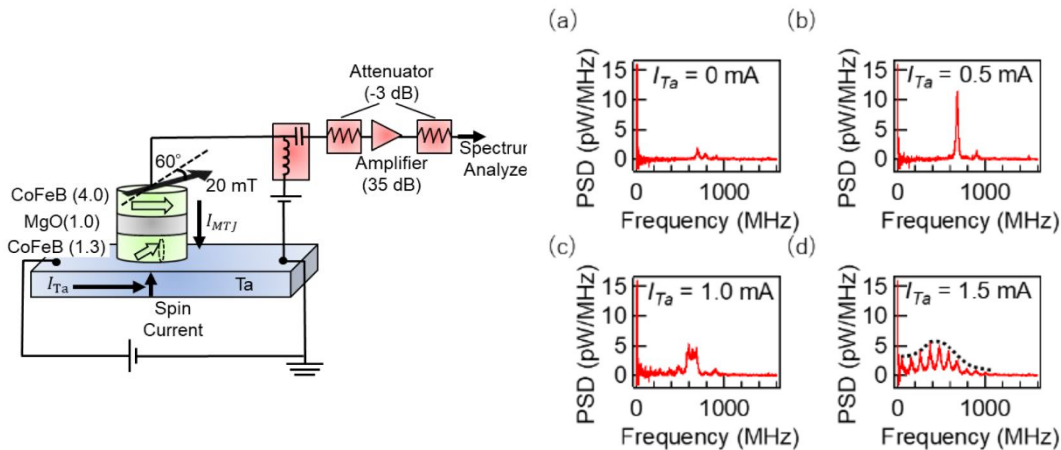


左図 (a)電流印加および測定シーケンス。(b,c)パルス電流に対する磁化反転。外部からのバイアス磁場のため、限定された領域(BS)でのみ磁化反転が生じる。(d,e)直流電流に対する磁化反転過程。パルス電流で磁化反転が観測された領域に加え、準安定な状態(MS)が形成されている。

右図 (a,b) 測定シーケンス。電流のスイッチングオフからの、始状態への緩和時間(dwell time)を評価する。(c)バイアス磁場に対する、dwell time の測定電流依存性。測定電流によるわずかなスピンホールトルクが、磁化準安定状態からの回帰に大きな影響を与えている。

#### 4.2 スピンホール発振素子におけるマルチモード形成

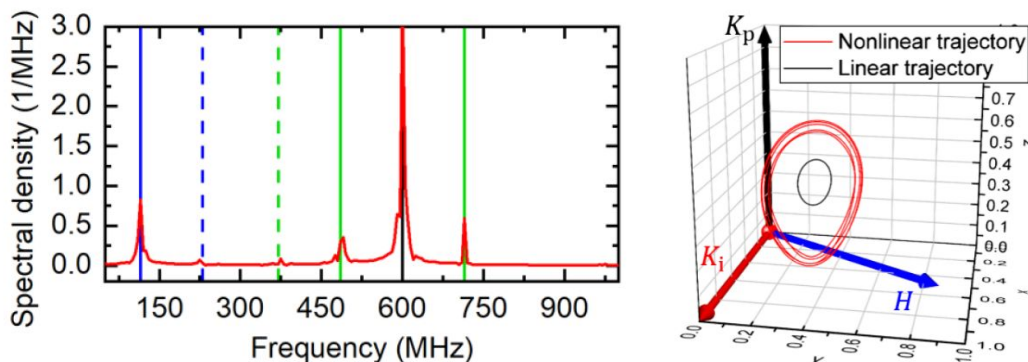
上記素子に対して、直流電流を増加させることによって、自励発振状態の検出に成功した。発振モードはバイアス電流の強度に依存し、低電流下では単一モードが観測されるのに対して、高電流下ではマルチモードへと遷移する様子が観測された。特にマルチモードは基本モードに対して、モードが等間隔に並ぶ、という特徴的なものである。当該結果は、測定のために接続した同軸ケーブル内の多重反射によって定性的に説明することができる。しかし、多重反射のみでは、電流強度依存性およびサテライトピーク強度の説明ができず、本質的な非線形効果の重畳が強く示唆される。当該結果については、arXiv:2005.07434 に掲載(その後 Applied Physics Letter に採択)されている。



左図 測定回路の模式図。右図 発振スペクトルの電流強度依存性。Ta 層に流す電流が大きくなると、シングルモードからマルチモードへの変遷がみられる。特にマルチモード励起状態では、各モードのピーク間隔は一定である。

#### 4.3 数値計算によるマルチモード形成の起源探索

非線形自励発振モードについて理解をするために、Landau-Lifchitz-Gilbert 方程式を用いたマイクロマグネティクスシミュレーションを行った。試料パラメータとしては、4.2 とほぼ同一の条件を用いた。結果として、低電流下では、シングルモードが観測されるのに対して、高電流下では4.2 同様、マルチモードの生成が確認された。マルチモードの起源は、歳差運動の軸の運動に起因している。言い換えると内因的な物理現象のみで、マルチモードの生成が可能であることを示唆している。当該結果については、arXiv:2005.07836 に掲載(その後 AIP Advances に採択)されている。



左図 マイクロマグネティクス計算によって得られた高電流下での発振スペクトル。基本ピーク(~600MHz)の周辺に、等間隔にサテライトピークが発言している。右図 弱励起状態と強励起状態の歳差軸の時間変化。強励起状態では歳差軸が歪み、かつ二値への遷移がみられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Hirayama Shigeyuki, Mitani Seiji, Otani YoshiChika, Kasai Shinya	4. 巻 57
2. 論文標題 Direct current modulation of spin-Hall-induced spin torque ferromagnetic resonance in platinum/permalloy bilayer thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 060301 ~ 060301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.060301	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 Hirayama Shigeyuki, Mitani Seiji, Otani YoshiChika, Kasai Shinya	4. 巻 11
2. 論文標題 Anomalous modulation of spin torque-induced ferromagnetic resonance caused by direct currents in permalloy/platinum bilayer thin films	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 013002-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/apex.11.013002	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 Iwakiri Shuichi, Sugimoto Satoshi, Niimi Yasuhiro, Kobayashi Kensuke, Takahashi Yukiko K., Kasai Shinya	4. 巻 115
2. 論文標題 Observation of the magnetization metastable state in a perpendicularly magnetized nanopillar with asymmetric potential landscape	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092407 ~ 092407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5098866	査読の有無 無
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩切秀一, 杉本聡志, 新見康洋, 小林研介, 葛西伸哉
2. 発表標題 スピン軌道トルクによる磁化の準安定状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山重之、葛西伸哉、三谷誠司
2. 発表標題 パーマロイ/白金二層膜におけるスピントルク強磁性共鳴の直流電流変調
3. 学会等名 日本応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩切秀一, 杉本聡志, 新見康洋, 小林研介, 葛西伸哉
2. 発表標題 スピントルク発振素子における非線形現象
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----