

平成 28 年 4 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790044

研究課題名(和文)熱活性領域におけるスピントルク磁化ダイナミクスの理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study on spin torque induced magnetization dynamics in thermally activated region

研究代表者

谷口 知大(Taniguchi, Tomohiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究員

研究者番号：90635806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はナノ強磁性多層膜においてスピントルクと熱揺らぎの競合によって生じる磁化ダイナミクスの理論を確立することを目指して行った。磁化の運動方程式を解くことで確率的な磁化反転公式を導出した。これはナノ強磁性体の熱擾乱耐性の定量的評価手法の確立に大きく貢献するものである。またスピントルク発振やマイクロ波アシスト磁化反転といった別の物理現象への応用が可能であることも示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a theory of magnetization dynamics in nanostructured ferromagnetic multilayer in the presence of both spin transfer torque and thermal fluctuations. Solving the stochastic equation of motion of the magnetization, we derive a formula of the switching probability of the magnetization in thermally activated region excited by spin torque. This theory will enable to establish method to evaluate the thermal stability of the ferromagnet with high accuracy. It was also found that the present theory can be applied to other phenomena, such as spin torque oscillator and microwave assisted magnetization reversal.

研究分野：磁性

キーワード：スピントロニクス 理論 スピントルク

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初はナノ強磁性多層膜における熱活性領域での磁化ダイナミクスの実験と理論に大きな隔たりがあった。不揮発性磁気メモリに代表されるスピントロニクス・デバイスの性能は素子内の熱揺らぎによって著しく低下する。この問題を解決するためには熱活性領域においてスピントルクによって誘起される磁化ダイナミクスを理論的に解明することが必要となる。しかし実験では素子に比較的大きな電流を流して大きなスピントルク効果を実現しているのに対し、従来の理論は電流が極めて小さいという仮定の下で構築されており、そのような理論を使って実験を解析することの妥当性は不明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は実験の解析・予測に適用可能な熱活性領域におけるスピントルク磁化ダイナミクスの理論を構築することである。上記 1.に記載した通り、本研究を開始する以前の先行研究はナノ強磁性多層膜に注入する電流が極めて小さいという、実際の実験状況に合わない仮定の下で構築されているにも関わらず、様々な実験の解析に使用されてきた。これに対し本研究では、先行研究の枠組みを越えて、実験の状況に適合した理論を作ることを目指した。

3. 研究の方法

一般に磁化ダイナミクスは2変数の非線形連立微分方程式で記述され、それを正確に解くことは極めて難しい。熱揺らぎというランダムな外力を含めれば解析の難しさは更に増す。しかし変数変換によって変数を時間的に遅く変化する量(エネルギー)と早く変化する量(位相)に分け、早く変化する量に関して運動方程式を平均化すれば解析は比較的簡単になる。本研究ではこの手法を応用し、平均化された運動方程式およびFokker-Planck 方程式を解析的に解くことでスピントルク磁化反転確率といった実験と直接比較できる量の導出を行った。

4. 研究成果

本研究の成果は主に以下の3つである。

(1) 熱活性領域におけるスピントルク磁化反転の理論の確立

磁化の運動方程式およびFokker-Planck 方程式を解くことで熱活性領域におけるスピントルク磁化反転の反転確率の公式を導出することに成功した。この手法が先行研究と大きく異なるのは、非線形な運動方程式を厳密に解くことで、ナノ強磁性多層膜に注入される電流が大きい場合にも適用可能な理論が確立された点である。

従来の理論研究では磁化の安定点近傍で運動方程式を線形化し、そこでのスピ

ントルクと熱揺らぎの競合にのみ注目することで磁化の反転確率の公式を導出していた。しかしこのような線形化が許されるのは素子に印加する電流が極めて小さく、従って磁化が安定点からほとんど動かないような場合だけである。一方、実験で観測されるのはある安定状態から別の安定状態への磁化反転であり、初期の安定点近傍のダイナミクスはその一部にすぎない。これに対し本研究では磁化の運動方程式を非線形領域まで解くことで磁化の反転過程全体を包括する解を導出することに成功した。この解析を行うにあたって上記 3. に述べたような運動方程式の平均化というアプローチを見出したことが大きな助けとなった。

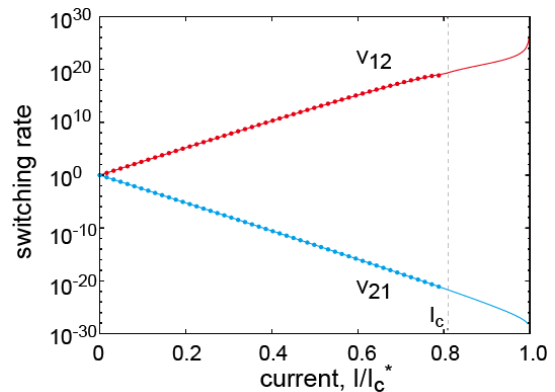


図 1: 熱活性領域におけるスピントルク磁化反転の反転レイトの電流依存性。下記 5. 「主な発表論文」より抜粋。

本研究の成果の一例を図 1 に示す。この図では 2 つの安定状態(1,2 と名付ける)の間の反転レイト(単位時間当たりの反転確率)の電流依存性が示されている。電流値が臨界電流(絶対零度での磁化反転電流)の 80%程度以下では反転レイトは電流に対して対数スケールで線形である。先行研究は全てこの比が小さい(80%程度以下)の場合のみに着目しており、電流依存性が線形であるという結果が電流の大きな(80%以上)ところでも成り立つと仮定していた。一方、本研究では比が大きなところ(80%以上)のところまで定量的に反転レイトが評価できるようになった。図 1 からわかるように電流の大きなところでは反転レイトの電流依存性は非線形であり、先行研究の仮定は成り立っていないことが分かる。このように、先行研究の限界を指摘し、それを越える理論を構築したことな国内外で初めての成果である。

図 1 からわかるように、電流の値が少しでも変化すると反転レイトは大きく変化する。これは実験で反転を観測するのに必要な時間が桁で変化することを意味する。実験で反転確率を評価するには 10^5 回もしくはそれ以上の反転を測定するの

が一般的である。1回の反転に長い時間がかかると反転確率を評価するのに極めて長い時間がかかってしまう。そこで実験では比較的大きな電流を流し、高速で何度も磁化反転を観測する。そのため実験で使われている電流は通常、臨界電流の80%よりも大きい。従ってそのような電流領域での磁化反転を定量的に予測できるようになったことは実験の解析や新規現象の予測を可能にすることとなり、実験研究者に与えるインパクトは極めて大きい。また非線形ダイナミクスの解析という基礎研究の面からも特筆すべき成果であると考えられる。

現在、実験で作成されている素子には膜の不均一性等に起因する素子間のばらつきが原因で、理論との比較が直接は行えないのが実情である。しかし今後、更なる実験技術の進展により、高精度で均一な素子が作成できるようになれば、理論と実験を定量的に比較することが可能になると考えられる。またその成果がスピントロニクス・デバイスの精密な性能評価および実用化を飛躍的に前進させることが期待される。

(2) スピントルク自励発振の理論構築

研究当初には予期していなかったことであるが、本研究を進める過程で、上記(1)で確立した理論が別の物理現象の解析にも適用できることが明らかとなった。その一例がスピントルク磁化発振である。スピントルク磁化発振とは、熱活性領域における磁化反転に必要な電流よりも更に大きな電流を素子に注入することで、スピントルクが磁性体の磁気緩和を打ち消し磁化の定常的な歳差運動が実現させる現象を指す。ある安定状態から別の安定状態へと遷移する磁化反転と一定のエネルギー状態にとどまる発振とは一見すると異なる現象のように見えるが、上記3.で述べたように熱活性領域における磁化反転では磁化のエネルギーは遅く変化する変数であるため、発振との関連性を見出すことができるのである。

そこで発振が起こる電流領域において平均化された磁化の運動方程式を解き、発振状態を特徴付ける物理量の評価を行った。具体的には発振の線幅の電流依存性の定量的評価である(下記5.「主な発表論文」)。絶対零度の発振では磁化はある周波数で等エネルギー面上を歳差運動する。しかし有限温度では熱揺らぎによって磁化のエネルギーが変化し、それに伴って発振周波数がわずかに変化する。この変化は発振のパワースペクトルの線幅として観測される。本研究では発振線幅の理論公式を導出した。また具体例として垂直磁化自由層・面内磁化固定層からなるスピントルク発振素子の線幅を定

量的に見積もった。この結果を既存の実験と比較するとよく一致することが確かめられた。また、現在の実験値より数倍の電流を素子に印加すれば、線幅が2-3桁細くなることが理論的に予測された。

スピントルク発振器はナノスケールの通信機器や磁気記録素子の書き込みヘッド、カーセンサーといった様々なデバイスへの応用が期待されている一方で、線幅の低減など実用化に必要とされる要求を満たすための研究の方向性が定まっていけないのが実情である。その中で発振特性を定量的に評価できる一般的な理論を構築し、またそれを具体的な系に適用する例を示したことは応用研究の発展に大きなインパクトを与えたと考えられる。今後はこの理論を様々な系に適用することで効率的にデバイス設計が行えるようになることと期待される。

(3) マイクロ波アシスト磁化反転の反転条件の導出

研究開始当初に予期していなかったもう一つの成果としてマイクロ波アシスト磁化反転の解析が挙げられる。マイクロ波アシスト磁化反転とはナノ強磁性体にマイクロ波と直流磁場を印加することで磁化反転を起こす現象であり、超高密度磁気記録素子の書き込み技術への応用が期待されている。強磁性体がナノスケールまで小さくなると素子の熱耐性を保つために大きな磁気異方性を持った材料を使わなければならない。一方で異方性が大きくなると書き込みの際に大きな直流磁場を作らなければならないが、そのような磁場をナノスケールの記録ビットに、しかも周りのビットに影響を与えずに、印加するのは極めて困難である。マイクロ波アシスト磁化反転ではあらかじめ記録ビットである磁性体にマイクロ波を照射して磁気共鳴を誘起しておくことで、反転に必要な直流磁場の大きさを低減するものである。このような現象は実験および数値シミュレーションで確認されていたが、効率的に反転を行うための条件等は不明であった。

本研究の要点はマイクロ波アシスト磁化反転を記述する磁化の運動方程式が、特別な座標を使うとスピントルク磁化反転の運動方程式と同じになることを見出したことである。これは純粋に数学的な共通点であるが、スピントルク磁化反転の解析で得た知見がそのままマイクロ波アシスト磁化反転の解析に適用できることを意味しており、理論研究の発展としては大きな前進であるといえる。平均化された運動方程式から磁化の反転条件を導出し数値シミュレーションの結果と比較したところ、極めてよい一致を得た。これは本研究成果の妥当性を示すもので

ある。今後はあらかじめ理論的に磁化の反転条件を予測することができるようになり、素子設計が高効率で行えるようになる。

スピントルクとの類似性からマイクロ波アシスト磁化反転の反転条件を導出したのは国内外で初の成果であり、しかもそれが数値シミュレーションとよい一致を得たことは磁気記録の研究に大きなインパクトがある。一方で今後は本研究成果に統計学のアイデアを導入することが必要になると考えられる。なぜなら既存の実験ではどうしてもビット間に材料パラメータのばらつきが生じているからである。本成果はこのような更なる課題の解決にも適用できると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 12 件)

谷口知大、伊藤貴博、内海裕洋、常木澄人、久保田均、Stable oscillation in spin torque oscillator excited by a small in-plane magnetic field、Journal of Applied Physics、査読有、118 巻、2015、053903-1~7、DOI:10.1063/1.4927621

谷口知大、Nonlinear analysis of magnetization dynamics excited by spin Hall effect、Physical Review B、査読有、91 巻、2015、104406-1~6、DOI:10.1103/PhysRevB.91.104406

谷口知大、Linewidth of power spectrum originated from thermal noise in spin torque oscillator、Applied Physics Express、査読有、7 巻、2015、053004-1~4、DOI:10.7567/APEX.7.053004

谷口知大、今村裕志、Current dependence of spin torque switching rate based on Fokker-Planck approach、Journal of Applied Physics、査読有、115 巻、2014、17C708-1~3、DOI:10.1063/1.4860944

谷口知大、内海裕洋、今村裕志、Thermally activated switching rate of a nanomagnet in the presence of spin torque、Physical Review B、査読有、88 巻、2013、214414-1~6、DOI:10.1103/PhysRevB.88.214414

[学会発表](計 8 件)

谷口知大、伊藤貴博、内海裕洋、常木澄人、久保田均、Steady precession of magnetization in perpendicular ferromagnet by spin torque and in-plane magnetic field、International Colloquium on Magnetic Films and Surface (ICMFS 2015)、2015 年 7 月 16 日、クラクフ(ポーランド)

谷口知大、三谷誠司、林将光、Critical current of magnetization dynamics excited by spin-Hall torque in the presence of transverse magnetic field、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 12 日、東海大学(神奈川県平塚市)

谷口知大、今村裕志、Current dependence of spin torque switching rate based on Fokker-Planck approach、58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials、2013 年 11 月 6 日、デンバー(アメリカ合衆国)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口知大(TANIGUCHI, Tomohiro) 産業技術総合研究所・研究員

研究者番号: 90635806