

令和元年6月11日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17486

研究課題名(和文)非線形解析に基づくマイクロ波アシスト磁化反転の理論構築

研究課題名(英文)Theory of microwave assisted magnetization reversal based on nonlinear analysis

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・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

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)：本研究はマイクロ波アシスト磁化反転(microwave assisted magnetization reversal, MAMR)技術の実現に向けた磁化ダイナミクスの理論を非線形科学に基づいて構築することを目指し行った。そしてマイクロ波アシスト磁化反転に必要なスピントルク発振器の新構造や、新しい物理現象に基づく同期現象などを理論的に提案した。これらの研究成果は磁性・スピントロニクス・非線形科学などの基礎物理の発展に貢献するものであると同時に、次世代の超高密度磁気記録デバイスの実現に向けた研究開発の発展を促進するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果はナノサイズの磁性体で起こる磁化ダイナミクスの理論を構築することで磁性・スピントロニクス・非線形科学などの基礎物理学の発展に貢献するものであると同時に、データ・センター等で必要とされる超高密度ハードディスク・デバイスなど次世代の磁気デバイスの実現を大きく前進させるものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to develop a theory of magnetization dynamics, related to microwave assisted magnetization reversal (MAMR), based on nonlinear science. I have theoretically proposed a new device design of spin-torque oscillators (STOs) applicable to MAMR. I have also proposed new mechanisms of synchronization phenomena excited in STOs by using theory of spin transport in nanostructured ferromagnets. These results contribute to the development of physics, in particular in the field of magnetism, spintronics, and nonlinear science. In addition, these results will be useful for research on next-generation high-density magnetic recording.

研究分野：磁性

キーワード：磁性 スピントロニクス 非線形解析 理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初は次世代の磁気記録技術であるマイクロ波アシスト磁化反転 (Microwave Assisted Magnetization Reversal, 以下 MAMR) の実現に向けて、磁気記録素子で起こる磁化ダイナミクスの基礎理論が求められているという背景があった。MAMR は磁気記録媒体での磁化反転やマイクロ波源であるスピントルク発振器での自励発振など、さまざまな磁化ダイナミクスに関連した現象である。これらのダイナミクスは一般に非線形性が高く、物理的な解釈が極めて難しい。そのため MAMR を実現するための見通しの良い指針がないというのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は MAMR に関連した物理現象の基礎理論を構築するとともに、MAMR の実現に向けた新しい物理現象の提案や実デバイスのデザインを提案することである。MAMR の物理は磁性・スピントロニクス・非線形科学など様々な分野にまたがっており、MAMR の理論を構築することでこれらの分野に橋渡しがおこり、より深い知見が得られることが期待される。またビッグデータ時代に必須とされる記録技術の研究開発への貢献も期待される。

3. 研究の方法

本研究では解析的な理論構築と数値シミュレーションを駆使して研究を行った。上記の通り MAMR に関連する磁化ダイナミクスは非線形性が極めて高いため一般に解析的な理論を構築することは困難であり、数値シミュレーションが必要となる。一方で MAMR の物理の本質を明らかにすることや、新しい現象・デバイス構造を提案するには解析的な理論が強い研究指針を与える。そこで本研究では数値シミュレーションによって磁化ダイナミクスの様相を明らかにするとともに、そのデータからダイナミクスの特徴を見出し、適当な近似を

4. 研究成果

(1) スピントルク発振器の新しい同期メカニズムの提案

MAMR に基づく磁気記録ではスピントルク発振器をマイクロ波源とすることが想定されている。スピントルク発振器はナノサイズの磁性多層膜から成る自励発振素子であり、素子に直流電流を流すことで数ギガヘルツ帯の磁化の振動を励起する。この磁化の振動に伴って発振器外部の発生するマイクロ波磁場を磁気記録媒体に照射することで MAMR を実現する。そのためスピントルク発振器には強いマイクロ波磁場を安定して放出することが求められる。しかし従来のスピントルク発振器はサイズの小ささに起因して磁性体内の熱揺らぎの効果が大きく、自励発振が安定しないという問題がある。

この問題を解決し、かつマイクロ波磁場の強度を上げることができると期待されているのが複数個のスピントルク発振器の同期現象である。これまではスピントルク発振器の同期現象として電流注入という電気的な手法と、交流磁場という磁気的な手法が研究されてきた。しかし電気的な手法では外部に電気回路を組み込むため素子が大きくなり、かつ余分な電力も消費するという欠点がある。磁気的な手法も交流磁場を発生されるためには電気回路が必要になってしまう。

そこで本研究では新しい同期メカニズムとしてスピン流の利用を提案した。スピントルク発振器での磁化ダイナミクスは素子に電子スピンの偏極した電流 (スピン流) を注入することで励起される。ここで複数個のスピントルク発振器をアレイ化すると、一つのスピントルク発振器を通過したスピン流を別の素子に注入することが可能となる。スピン流はスピントルク発振器を通過する際にその磁性体の磁化の位相と周波数の情報を得るため、スピン流が複数のスピントルク発振器の間を往復することで発振器同士が互いの位相・周波数を感じ、同期現象が起こる。この現象の興味深い点は素子をアレイ化するだけで外部から電力を使うことなく自発的に同期が起こるといった点である。

本研究では複数のスピントルク発振器間を流れるスピン流を電子輸送理論に基づいて記述し、スピン流によって励起される磁化ダイナミクスの運動方程式を理論的に導いた。そして運動方程式の数値シミュレーションを行い、スピントルク発振器の間に位相同期が起こることを示した。位相同期には発振器間の位相が揃う同相同期や位相が逆となる逆相同期、そしてそれ以外の位相差を持つ異相同期がある。本研究ではスピン流の生成メカニズムや発振器の磁気異方性、素子の配置の仕方によって様々なタイプの位相同期が実現することが明らかとなった。特に発振器が 2 つの場合には解析的な理論に基づいて磁気異方性が位相を決めていることを示すことができた。一方で発振器が 3 個になると同期状態での位相は素子に印加する電流などのパラメータにも依存するになり、極めて複雑であることが数値シミュレーションによって示された。

スピントルク発振器の同期の研究は国内のみならず国外の複数のグループが積極的に行っているが、スピン流を起源とする同期現象は本研究で明らかとなった新しい結果である。上記の通り、スピン流による同期現象は外部からの電力供給を必要とせず自発的に起こるため、基礎物理学の観点のみならず実用化研究の観点からも極めて大きなインパクトを有すると考えられる。今後は本理論提案を実証するための実験研究や、構造最適化の探索が行われると考えられる。特に発振器が 3 個以上の場合には多様な位相同期状態が実現すると期待されるため、その制御技術の研究開発が必要となると考えられる。

(2) 新しいデバイス構造の提案

MAMR の特徴の一つがカイラリティ・マッチングと呼ばれる技術である。磁性体に直流磁場を印加すると磁化が磁場周りに歳差運動を行うが、この歳差運動の回転方向は直流磁場や磁性体の磁気異方性によって時計回り・反時計回りのどちらかとなる。磁気記録デバイスでは通常、2つの安定状態を持つ磁性体を記録ビットとして用いるが、磁化がどちらの安定状態にあるかで歳差運動の方向が異なる。MAMR ではマイクロ波磁場の回転方向が磁化の歳差運動の方向と一致した時だけ磁化反転が起こる。これをカイラリティ・マッチングと呼ぶ。この性質を利用することで MAMR ではビットに 0 か 1 のどちらかの情報を指定して書き込むことが可能となる。

スピントルク発振器に励起される磁化ダイナミクスは円軌道を描く。従ってスピントルク発振器の周りには円偏光のマイクロ波磁場が発生している。しかし従来の MAMR デバイスではスピントルク発振器が図 1(a) のように記録媒体に対して横向きになっているため、記録媒体側から見ると線偏光のマイクロ波磁場に見えてしまう。線偏光磁場では MAMR を起こすことはできるが、これではスピントルク発振器の磁化の回転方向が記録媒体側に反映されず、カイラリティ・マッチングによる情報選択が実現できないという問題がある。

従来のデバイスにおいてスピントルク発振器を横向きに配置するのは発振器を記録媒体に近付けるためである。従来のスピントルク発振器は素子に直接電流を流して自励発振を励起する構造であるため、発振している磁性層に電極を付けなければならない。そのためスピントルク発振器の磁性層と記録媒体には距離が開いてしまう。一方、スピントルク発振器から発生するマイクロ波磁場は発振器の周りに広がるため、発振器が記録媒体から離れると狙ったビット以外のビットにもマイクロ波が照射されてしまい望まない MAMR が起こってしまう。またマイクロ波磁場の強度が弱まってしまうという問題も生じる。そこでスピントルク発振器を横向きにして電極に関係なく発振器が記録媒体に近い位置に置けるようにデバイスが設計されている。またカイラリティ・マッチングの効果を少しでも得るためマイクロ波磁場は記録媒体に対して斜めから照射することが検討されている。

これに対し本研究ではカイラリティ・マッチングの効果を活かすため図 1(b) に示す新しいデバイス構造を提案した。本提案では自励発振を起こす磁性層に電流を流すことなく発振を励起するため、スピン・ホール効果と呼ばれる物理現象に着目した。スピン・ホール効果は非磁性重金属のスピン軌道相互作用によって電流からスピン流を生成する現象であり、これによって生成されるスピン流は電流と直交する向きに流れる。そこで図 1(b) のような構造において電流を流すと磁性層に電流を流すことなくスピン流を注入することが可能となる。

本提案において重要な点は、スピン・ホール効果では通常、円軌道を描く磁化の自励発振は励起できないという問題を解決した点にある。自励発振を励起するには通常、磁性体に存在するエネルギー緩和を打ち消すようなスピン流を注入しなければならない。この要請はスピン流のスピン偏極方向に制限を与えるが、スピン・ホール効果によって生成されるスピン流はこの要請を満たさないことが知られている。そのためスピン・ホール効果では自励発振を励起できない。この困難を乗り越えるため本研究ではスピン・ホール効果を起こす非磁性重金属と自励発振させたい磁性層の間にもう一つの磁性層を挿入することを考えた。スピン・ホール効果によって発生したスピン流がこの磁性層を通過すると、スピン流と磁化の相互作用によってスピン偏極の向きが変化する。その結果、発振を励起したい磁性層には従来と異なる向きのスピン偏極を持ったスピン流が注入されることとなり、自励発振が励起できるようになる。本研究では拡散的なスピン流伝導および各層界面での量子力学的な散乱の理論を用いることで、素子を通るスピン流の大きさとスピン偏極の向きを定量的に評価する理論式を確立した。またスピン流の効果を含んだ磁化の運動方程式を数値シミュレーションすることで円軌道を描く自励発振が励起できることを示した。

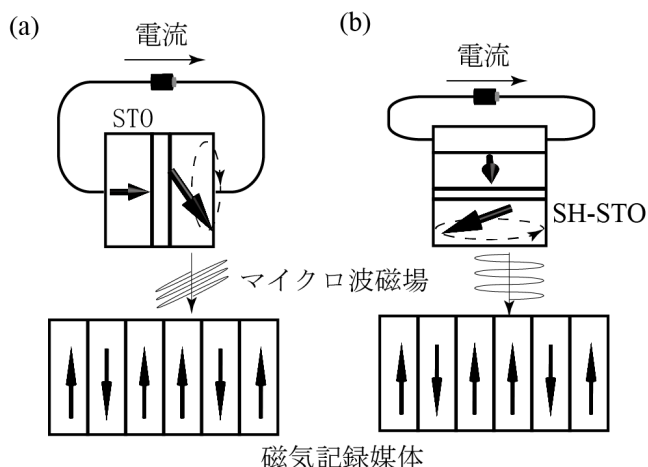


図 1(a)従来の MAMR デバイスを横から見たところ。スピントルク発振器 (Spin torque, oscillator, STO) に電流を注入することで磁性層の磁化 (黒矢印) の発振を励起する。その結果、磁気記録媒体にマイクロ波磁場が照射される。(b) スピン・ホール (Spin Hall) 効果を利用したスピントルク発振器 (SH-STO) を用いた MAMR デバイスの提案図。

図 1(b)には本研究で提案された新しいスピントルク発振器を実装した磁気記録デバイスのデザインが描かれている。自励発振を起こす磁性層に電極が付いていないので、従来型(図 1(a))と異なり、発振器を縦に向けたまま記録媒体に近付けて設置することが可能となる。発振器から発生している円偏光のマイクロ波磁場は記録媒体側から見ても円偏光のままであるため、発振器の磁化の歳差運動の方向を制御することで、記録媒体には時計回り・反時計回りどちらのマイクロ波磁場も照射することが可能である。これによりカイラリティ・マッチングを活かした MAMR が実現できるようになる。

MAMR は国内外の研究所・企業が競って研究開発を行っている、磁性分野の主要テーマの一つである。本研究ではスピン・ホール効果というスピントロニクス分野の知見を活かすことで新しい MAMR の新しいデバイス・デザインを提案することに成功した。しかしスピン・ホール効果は貴重で高価な重金属の材料が必要という課題があるため、今後はありふれた材料で高効率のスピン・ホール効果を実現する材料探索が必要となると考えられる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

- (1) 谷口知大、Out-of-Plane Auto-Oscillation in Spin Hall Oscillator With Additional Polarizer, IEEE Transactions on Magnetics、査読有、54 巻、2018 年、4100205-1~5、DOI: 10.1109/TMAG.2018.2827923
- (2) 谷口知大、Spin-current driven spontaneous coupling of ferromagnets, Physical Review B、査読有、98 巻、2018 年、104417-1~17、DOI: 10.1103/PhysRevB.98.104417
- (3) 谷口知大、伊藤貴博、常木澄人、久保田均、内海裕洋、Relaxation time and critical slowing down of a spin-torque oscillator, Physical Review B、査読有、96 巻、2017 年、024406-1~11、DOI: 10.1103/PhysRevB.96.024406
- (4) 谷口知大、Indirect excitation of self-oscillation in perpendicular ferromagnet by spin Hall effect, Applied Physics Letters、査読有、111 巻、2017 年、022410-1~5、DOI: 10.1063/1.4991663
- (5) 谷口知大、Dynamic coupling of ferromagnets via spin Hall magnetoresistance, Physical Review B、査読有、95 巻、2017 年、104426-1~15、DOI: 10.1103/PhysRevB.95.104426

〔学会発表〕(計 12 件)

- (1) 谷口知大、Theory of Microwave Assisted Magnetization Reversal、第 42 回日本磁気学会学術講演会、2018 年
- (2) 谷口知大、Out-of-plane auto-oscillation in spin Hall oscillator with additional polarizer、International Magnetism Conference 2018、2018 年
- (3) 谷口知大、Indirect excitation of self-oscillation in perpendicularly magnetized spin Hall nano-oscillator、第 78 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年

〔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)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし