慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	膜厚方向スピン波の実空間観察とスピン波アシスト磁化反転の動的過程解明
Sub Title	Research on dynamical process of spinwave-assisted magnetization reversal and observation of spinwaves excited along thickness direction
Author	能崎, 幸雄(Nozaki, Yukio) 渡邉, 紳一(Watanabe, Shinichi)
Publisher	
Publication year	2017
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2016.)
JaLC DOI	
Abstract	膜厚方向で磁気特性を変調させたECC媒体に励起されるスピン波の磁化反転アシスト効果を調べるため, 磁化ダイナミクスを面内, および膜厚方向で空間分解可能なマイクロMOKE計測システムを開発した。また, 極短パルス磁場をプローブ信号とするCooperative switching法を開発し, ナノスケール磁性体の非平衡状態の非線形磁化ダイナミクスの時間分解観察に成功した。さらに, ECC媒体の臨界スイッチング周波数の層間交換結合力依存性を測定した結果, 16nm厚の極薄媒体でも膜厚方向のスピン波が磁化反転をアシスト可能なことを実験的に確かめた。 In order to study a magnetization switching assisted by a spin waves along a thickness direction of an exchange coupled composite (ECC) medium, we developed a micro-MOKE measurement system which enables to spatially resolve the magnetization dynamics. In addition, we succeeded to demonstrate a temporarily resolved observation of nonlinear magnetization dynamics in nonequilibrium state of nano-scaled ferromagnet. From the dependence of a critical switching frequency of an ECC medium on the strength of interlayer exchange coupling, we experimentally confirmed that the spin wave assisted magnetization reversal could be realized even in ultra-thin ECC media with a thickness of 16 nm.
Notes	研究種目：基盤研究(A)(一般) 研究期間：2014～2016 課題番号：26249052 研究分野：磁性物理学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26249052seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ５ 月 ２６ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2014～2016
課題番号：２６２４９０５２

研究課題名（和文）膜厚方向スピン波の実空間観察とスピン波アシスト磁化反転の動的過程解明

研究課題名（英文）Reserch on dynamical process of spinwave-assisted magnetization reversal and observation of spinwaves excited along thickness direction

研究代表者
能崎　幸雄（Nozaki, Yukio）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：３０３０４７６０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　33,000,000円

研究成果の概要（和文）：膜厚方向で磁気特性を変調させたECC媒体に励起されるスピン波の磁化反転アシスト効果を調べるため、磁化ダイナミクスを面内、および膜厚方向で空間分解可能なマイクロMOKE計測システムを開発した。また、極短パルス磁場をプローブ信号とするCooperative switching法を開発し、ナノスケール磁性体の非平衡状態の非線形磁化ダイナミクスの時間分解観察に成功した。さらに、ECC媒体の臨界スイッチング周波数の層間交換結合力依存性を測定した結果、16 nm厚の極薄媒体でも膜厚方向のスピン波が磁化反転をアシスト可能なことを実験的に確かめた。

研究成果の概要（英文）：In order to study a magnetization switching assisted by a spin waves along a thickness direction of an exchange coupled composite (ECC) medium, we developed a micro-MOKE measurement system which enables to spatially resolve the magnetization dynamics. In addition, we succeeded to demonstrate a temporarily resolved observation of nonlinear magnetization dynamics in nonequilibrium state of nano-scaled ferromagnet. From the dependence of a critical switching frequency of an ECC medium on the strength of interlayer exchange coupling, we experimentally confirmed that the spin wave assisted magnetization reversal could be realized even in ultra-thin ECC media with a thickness of 16 nm.

研究分野：磁性物理学

キーワード：強磁性共鳴　スピン波　磁気記録　非線形ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

近年の情報爆発に伴い、ハードディスクドライブ(HDD)の大容量・省電力化が求められている。一方、記録ヘッドの磁場強度はすでに材料限界に達しており、高記録密度化の壁(1平方インチ当たり1兆ビット)に直面している。これを打破する技術として、マイクロ波アシスト記録(MAMR)の研究が国内外で盛んにおこなわれている。これは、記録磁場と同時にマイクロ波磁場を与えることにより、磁気異方性エネルギーK_uの高い次世代媒体の磁化反転を容易化する技術であり、数値計算により1平方インチ当たり2兆ビット以上の記録密度を実現できる可能性が示されている。研究代表者は、MAMR について 2006 年から精力的に研究を行い、微細加工により基板上に作製したマイクロ波伝送線路が作るマイクロ波磁場を用いて、HDD 媒体の MAMR 記録に世界で初めて成功した。MAMR の場合、媒体の K_uに比例した周波数のマイクロ波磁場が必要なため、記録密度増大を目指した媒体の高 K_u 化は、記録周波数の増大を引き起こす。この問題を解決する手段として、高 K_u材料に強磁性共鳴周波数 f_{FMR}の低いソフト材料を交換結合させた複合構造媒体(ECC 媒体)が有効であることを研究代表者と東北大・産総研の共同研究により明らかにした(スピン波アシスト磁化反転(Sw-AMR))。ただし、ECC 媒体の MAMR 記録の実用化には、ECC 媒体の膜厚方向に励起されるスピン波と媒体の磁化反転ダイナミクスに及ぼす影響を実験的に明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、ECC 媒体の MAMR 記録技術を実用化レベルにまで昇華させるため、次の3つの課題に取り組んだ。

(1) <u>磁化ダイナミクス分布観察法の開発</u>

Sw-AMR では、高強度マイクロ波磁場により励起した大振幅スピン波の空間分布が磁化反転特性に大きく影響する。そこで、マイクロ波プローブと磁気光学効果(MOKE)測定系を組み合わせたスピン波分布観察法を開発し、マイクロ波伝送線路が作るマイクロ波磁場により誘引した磁化ダイナミクスの空間分解観察を目指した。

(2) <u>非平衡状態の非線形磁化ダイナミクスの時間分解観察法の開発</u>

MAMR では、高強度マイクロ波磁場により励起した大振幅磁化ダイナミクスを利用してサブナノ秒以内に磁化反転させる必要がある。しかし、ポンプ・プローブ法のように繰り返し現象の時間分解観察は多数報告されている一方、 磁化反転のような単発現象の磁化ダイナミクスを時間分解観察する手段は皆無である。そこで、サブナノ秒のパルス磁場を非平衡状態の非線形磁化ダイナミクス観察のプローブに用いる”Cooperative switching (CS)法”を独自に開発した。

(3) <u>ECC 媒体の MAMR 記録特性の解明</u>

ECC 媒体では、記録周波数を低減するソフト磁性層と記録ビットの熱安定性を確保するハード磁性層の膜厚や層間交換結合の大きさが、MAMR 記録特性に大きく影響する。しかし、これらを系統的に変化させながら MAMR 記録特性を調べた研究はほとんどなく、Sw-AMR に適した ECC 媒体の条件や、磁化反転機構の詳細には未解明な点が多い。そこで、研究代表者らがこれまでの研究で培った HDD 媒体の MAMR 特性評価技術を活用し、極薄 ECC 媒体における Sw-AMR 記録の可能性を検証した。

3. 研究方法

(1) <u>マイクロ MOKE 測定系を用いた GHz 領域の磁化ダイナミクス観察</u>

膜厚方向の空間分解観察に必要なソレイユーバビネット補償板を挿入したマイクロ MOKE 計測システムを立ち上げた。光弾性変調器(PEM)と差

動光学検出回路、ロックインアンプを組み合わせることにより、検出可能な最小 Kerr 回転角を 0.001 度以下にまで向上させた。さらに、測定媒体の波長選択性を考慮して、408 nm と 655 nm の2種類の波長の LD レーザーを光源として採用した。開発した MOKE 計測システムの性能評価のため、(i) 膜厚の異なる強磁性 Co 薄膜を2枚積層した膜の各層の磁化反転過程の選択的観察、および(ii) ミクロンスケールの交差型コプレーナ線路（TCCW，図1）が生成する円偏向マイクロ波磁場による Co/Ni 多層膜の磁化ダイナミクスの高空間分解観察を行った。

(2) Cooperative switching 法を用いた非線形磁化ダイナミクスの時間分解観察

MAMR では、高強度マイクロ波磁場により大振幅な磁化歳差運動を誘引するため、その非線形な磁化ダイナミクスの理解が不可欠である。そこで、図2のようにナノスケール磁性体(NiFe 合金)をコプレーナ型マイクロ波伝送線路(CPW)上に形成した素子を作製し、最大 40 GHz の交流電流を印加する信号発生器(SG)と最小 100 ピコ秒幅の単発矩形電流を印加するパルス信号生成器(PG)の合成信号を入力しながら、NiFe 薄膜パターンの磁化反転特性を調べた。この場合、マイクロ波磁場とパルス磁場の協同作用により磁化反転がアシストされる。パルス磁場の印加タイミングを変化させながら磁化反転磁場を測定することにより、マイクロ波磁場により誘引された NiFe 薄膜パターンの大振幅歳差運動の磁化反転における実効的ポテンシャル障壁の時間発展の様子を測定することができる。

(3) ベクトルネットワークアナライザを用いた ECC 媒体の MAMR 特性評価

磁気異方性エネルギーの異なる CoCrPt 基グラニュラー媒体を2枚積層した ECC 媒体に対し、線幅をサブミクロン幅にまで狭小化させて最大振

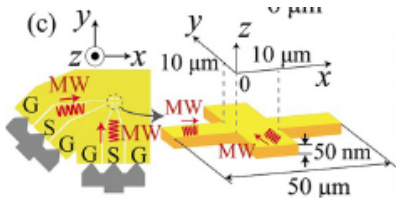

図 1 交差型コプレーナ線路

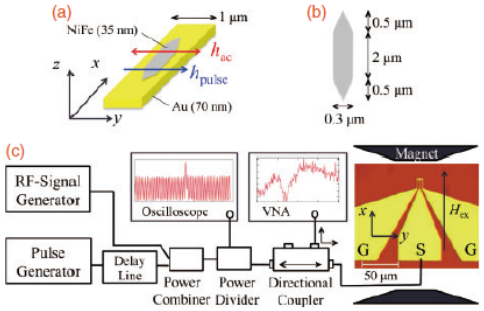

図 2 CS 法の実験セットアップ図

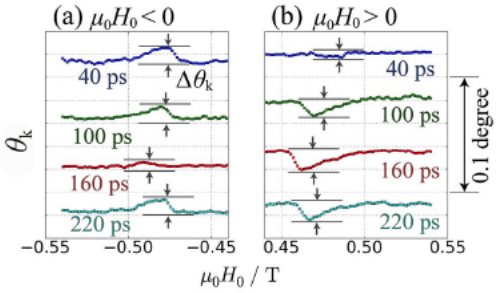

図 3 μ-MOKE 計測システムにより測定した Co/Ni 多層膜の FMR スペクトル

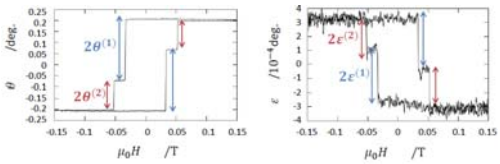

図 4 Co(1.2 nm) / Au(3 nm) / Co(0.8 nm) 多層膜のθおよびεの磁気ヒステリシス曲線

幅 100 mT の交流磁場を発生可能な CPW を用いて MAMR 特性を調べた。CPW は、交流電流発生電源（SG）と、マイクロ波の反射係数の周波数依存性をベクトル的に測定できるベクトルネットワークアナライザ（VNA）に接続し、20 ns 幅のマイクロ波磁場インパルス印加後の ECC 媒体の磁化反転量を媒体の強磁性共鳴（FMR）周波数の

変化から測定した。本研究では、極薄 Ta 薄膜(ECL 層)を挿入することにより、ECC 媒体の層間交換結合を系統的に変化させながら MAMR 特性を詳しく調べた。

4. 研究成果

(1) 多層構造強磁性薄膜の磁化ダイナミクスの空間分解観察

本研究で構築したマイクロ MOKE 計測システムで観察した TCCW 上の Co/Ni 多層膜の 4GHz におけるFMRスペクトルを図3に示す。(a)は－方向、(b)は＋方向を向く磁気モーメントの FMR スペクトルである。直交する TCCW 配線に位相遅延時間（図中の数値）の異なる交流電流を印加したところ、40 ピコ秒では－方向、160 ピコ秒では＋方向の磁気モーメントが選択的に共鳴しており、それぞれ回転方向が逆向きの円偏向磁場が生成できたことを示している。さらに、MOKE システムのプローブ光入射位置を変化させながら同様の実験を行い、本装置の面内空間分解能を評価した結果、スピン波の空間分解観察が可能な性能（約 0.7 マイクロメートル）を確認した。

また本装置は、PEM を利用することにより、Kerr 回転角θおよび Kerr 楕円率εを同時に測定できる。図4は、Co(1.2 nm) / Au(3 nm) / Co(0.8 nm) 多層膜について測定したθおよびεの磁気ヒステリシス曲線である。両者とも、保磁力の異なる2枚の Co 薄膜の磁化反転過程を明確に示している。さらに、それぞれの磁化反転時のθおよびεの変化から、複素 Kerr 効果強度Ωと位相角ξを求め、その大きさを比較することにより、2枚の Co 薄膜のどちらの磁化反転であるかを同定することに成功した。この結果は、ナノメートルの空間分解能で膜厚方向の磁化ダイナミクスを観察できることを示しており、前記の面内空間分解性能と組み合わせることにより、Sw-AMR で重要な膜厚方向のスピン波観察が可能である。

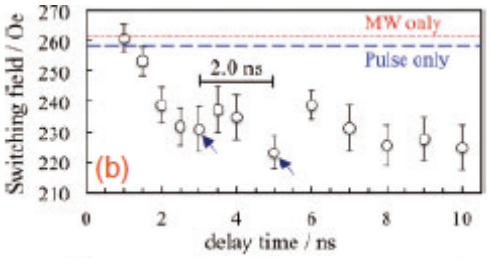

図 5 CS 法を用いて測定した非平衡状態における歳差運動角の時間発展

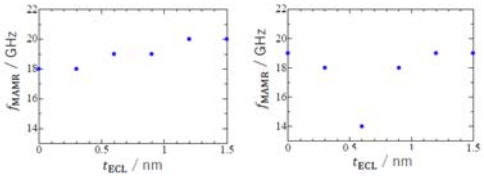

図 6 ECC 媒体の MAMR 周波数の層間交換結合力依存性

(2) 非平衡歳差運動の磁化反転特性

図5は、パルス磁場印加タイミングを変化させながら測定した NiFe 薄膜パターンの磁化反転磁場である。時間原点は、マイクロ波磁場を印加開始した時間である。500 ピコ秒幅のパルス磁場の印加タイミングを徐々に変化させるにしたがい、磁化反転磁場が振動しながら減少していく様子がわかる。これは、高強度マイクロ波磁場の印加により誘引される歳差運動の振幅が振動しながら増加することを示す結果であり、非平衡状態の非線形ダイナミクスを時間分解観察することに成功した。さらに、パルス磁場の印加タイミングを固定し、マイクロ波磁場の周波数や強度、スイッチング磁場強度を変化させながら、磁化反転に必要なパルス磁場強度を測定することにより、非線形ダイナミクス特有の分岐現象を伴う磁化反転の相図を調べることができた。従来の MAMR 実験では、磁化反転の臨界磁場しか測定することができなかったが、今回開発した CS 法を用いることにより、磁化反転に至らない領域における多様な分岐現象を観察できるため、Sw-AMR のような非一様モードの非線形ダイナミクスの詳細を調

べることができる。

(3) MAMR 特性の層間交換結合依存性

図6は、(a)ソフト層/ハード層 = 8 nm / 8 nm、(b) 4 nm / 12 nm の ECC 媒体について測定した MAMR 周波数(反転磁場が最小となる臨界周波数)の ECL 厚依存性である。(a)では、ECL 厚の増加(層間交換結合力の減少)に伴い、MAMR 周波数が単調に増加しており、各層の磁化を1つのマクロスピンに近似した2スピンモデルの計算結果と一致した。これに対し、ハード層が厚い(b)では、MAMR 周波数が層間交換結合力の減少に伴い減少し、2層の磁化反転が独立的となる臨界交換結合強度近傍で最小となり、2スピンモデルでは全く説明できない結果が得られた。これは、16 nm 程度の極薄ハードディスク用 ECC 媒体でも膜厚方向のスピン波が磁化反転をアシストできることを示す重要な結果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

(1) I. Kan, Y. Soeno, T. Roppongi, and Y. Nozaki, "Circularly Polarized Magnetic Field Generated by Two Microfabricated Crossed Coplanar Waveguides", Applied Physics Letters, **110** (2017) 202404(4 pages). 査読有、DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4983778

(2) S. Nakayama, M. Okano, Y. Nozaki and S. Watanabe, "Magneto-Optic Kerr Effect CCD Imaging with Polarization Modulation Technique", AIP Advances, 7 (2017) 056802 (7 pages). 査読有、DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4974023

(3) G. Okano and Y. Nozaki, "Microwave-assisted magnetization reversal using transient precession of magnetization in permalloy hexagons", Applied Physics Express, 9 (2016) 063001 (4 pages). 査読有、DOI: https://doi.org/10.7567/APEX.9.063001

(4) Y. Nozaki and S. Kasai, "Microwave-Assisted Magnetization Reversal in Exchange-Coupled Composite Media Using Linearly Polarized Microwave Fields", IEEE Transactions on Magnetics, 52 (2016) 3100207 (7 pages). 査読有、DOI: 10.1109/TMAG.2015.2473668

(5) M. Takahashi and Y. Nozaki, "Spin-transfer-torque-assisted magnetization reversal in spin-valve strips using the spin-pumping effect", Applied Physics Express, 9 (2016) 063002 (4 pages). 査読有、DOI: https://doi.org/10.7567/APEX.9.063002

(6) G. Okano and Y. Nozaki, "Cooperative microwave-assisted magnetization reversal with pulsed fields in 2-μm-wide nickel-iron wires at nanosecond time scales", Applied Physics Express, 8 (2015) 013001 (4 pages). 査読有、DOI: https://doi.org/10.7567/APEX.8.013001

(7) T. Tanaka, S. Kashiwagi, Y. Otsuka, Y. Nozaki, Y. Hong, and K. Matsuyama, "Microwave-Assisted Magnetization Reversal of Exchange-Coupled Composite Nanopillar With Large Gilbert Damping Constant", IEEE Transactions on Magnetics, 50 (2014) 300503 (4 pages). 査読有、DOI: 10.1109/TMAG.2013.2297156

[学会発表](計 30 件)

(1) T. Tanaka, Y. Nozaki, and K. Matsuyama, "Controlling of standing spin wave configuration in nanowires with domain wall", IEEE International Magnetics Conference 2017, Dublin (Ireland), Apr. 25, 2017.

(2) I. Kan and Y. Nozaki, "Selective Excitation of Ferromagnetic Resonance Using Circularly Polarized Magnetic Fields Generated by Coplanar Cross Waveguides", 61st MMM, New

Orleans (USA), Nov. 1, 2016.

(3) T. Tanaka, Y. Nozaki, and K. Matsuyama, "Computational analysis of microwave assisted magnetization reversal in unstable switching process", 61st MMM, New Orleans (USA), Nov. 1, 2016.

(4) S. Nakayama, M. Okano, Y. Nozaki and S. Watanabe, "Computational analysis of microwave assisted magnetization reversal in unstable switching process", 61st MMM, New Orleans (USA), Nov. 5, 2016.

(5) ［招待講演］Y. Nozaki and S. Kasai, "Microwave-assisted magnetization reversal in perpendicular media using obliquely applied magnetic fields", The 4th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies, Tainan (Taiwan), Aug. 2, 2016.

(6) G. Okano and Y. Nozaki, "Strong excitation of spinwaves and associated magnetization reversal in NiFe strips", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, Kobe (Japan), Aug. 9, 2016.

(7) I. Kan and Y. Nozaki, "Spacially resolved measurement of ferromagnetic resonance in Co/Ni multilayer using a magneto-optical Kerr effect", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, Kobe (Japan), Aug. 9, 2016.

(8) G. Okano and Y. Nozaki, "Cooperative Microwave-Assisted Magnetization Reversal in Transient Precession Regime", The 9th International Symposium on Metallic Multilayers, Uppsala (Sweden), Jun. 21, 2016.

(9) G. Okano and Y. Nozaki, "Dynamic magnetization reversal in NiFe wires with assistance of microwave impulse combined with 100-picosecond pulsed field", 20th ICM, Barcelona (Spain) , Jul. 7, 2015.

(10) Y. Nozaki and T. Tanaka, "Atomic composition dependence of microwave-assisted magnetization reversal in CoCrPt-based perpendicular media", 20th ICM, Barcelona (Spain) , Jul. 7, 2015.

(11) ［招待講演］Y. Nozaki and S. Kasai, "MAMR in CoCrPt-based granular films using a linearly polarized microwave field with a width of several tens of nanoseconds", 26th TMRC, Mineapollis (USA) , Aug. 18, 2015.

(12) ［招待講演］Y. Nozaki and G. Okano, "Nonlinear Switching Dynamics of Microwave-Assisted Magnetization Reversal in Permalloy Strips", 14th IUMRS, ICC Jeju (Korea) , Oct. 28, 2015.

(13) G. Okano and Y. Nozaki, "Experimental study on switching time of microwave-assisted magnetization reversal in 2 μm wide NiFe wires", 59th MMM, Honolulu (USA), Nov. 4, 2014.

［その他］

http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/nozaki/index.html

6．研究組織

(1)研究代表者

能崎　幸雄(NOZAKI, Yukio)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：30304760

(2)研究分担者

渡邉　紳一(WATANABE, Shinichi)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10376535