

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760659

研究課題名（和文） 人工ねじれ磁気構造を利用したスピン流の制御

研究課題名（英文） Control of Spin Current in Artificially Twisted Spin Structures

研究代表者

関 剛斎 (SEKI TAKESHI)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：40579611

研究成果の概要（和文）：スピン角運動量の流れである「スピン流」と磁化の相関を理解することは、スピントロニクスデバイスの高性能化のための重要な課題である。本研究課題では、ハード磁性体である $L1_0$ -FePt 合金とソフト磁性体であるパーマロイ(FeNi 合金)を積層化させ、人工的に磁気構造を変調したねじれ磁気構造を作製した。その積層膜を用いて、ねじれ磁気構造における磁化ダイナミクスを解明し、スピン波を利用した高効率な磁化反転手法を確立した。さらに、膜面垂直通電型素子においてスピン注入磁化反転の観測に成功した。

研究成果の概要（英文）：

The understanding of interaction between “spin current” and “magnetization” is an essential issue for the development of spintronic devices. In this research project, bilayers consisting of hard magnetic $L1_0$ -FePt and soft magnetic Permalloy (FeNi alloy) were prepared, and twisted spin structures were artificially formed in the bilayers. The magnetization dynamics of the bilayers were investigated, and the high efficient magnetization switching technique was developed using the spin wave mode in the bilayers. Also, the current-induced magnetization switching was successfully observed in the nanopillars with a twisted spin structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：金属人工格子、磁気構造、スピン流、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見以来、伝導電子と磁化の量子力学的相互作用を利用した「スピントロニクス」という工学分野が急速に発展してきた。GMR やトンネル磁気抵抗効果(TMR)では磁化配列に依存して抵抗が変化する、すなわち磁化方向により流れる電流量が変化する。一方、近年になって、伝導電子スピンと局在スピン間の角運動量の受け渡しによってスピントルクが発生し、それを利用することで電流により磁化方向

を制御できることも明らかになってきた。スピントルクを利用した物理現象は、ナノサイズ化されたGMR、TMR素子、磁性ナノ細線、あるいは磁気ディスク等を用いて研究が進められてきた。GMR素子あるいはTMR素子では電流印加により磁化スイッチングや自励発振が誘起でき、磁性ナノ細線では電流誘起磁壁移動といった現象が観測される。これらは基礎学問的に興味深い現象であると同時に、磁気ランダムアクセスメモリ、磁壁駆動型メモリ、次世代磁気ヘッド、スピントル

ク発振器などのデバイス開発におけるキーとなる技術であり、産業界も含めて精力的に研究されている。

この急速なスピントロニクスの進展の中で、スピン角運動量の流れである「スピン流」という新しい概念が重要視されるようになった。このスピン流は、磁気・電気・熱・光との相互作用により外部から制御することができる。スピン流を用いると電流のみでは実現不可能な機能性をデバイスに付与することが可能となるため、特にスピン流と磁化の相関の理解はスピントロニクスの更なる発展の為に急務となっている。しかしながら、従来研究されている GMR、TMR 素子や磁性ナノ細線では、磁化の平行および反平行状態や自然に形成される磁壁構造を利用してきたため、本研究課題を開始した当初、磁気構造を任意に制御しスピン流との相関を調べるといった観点からは研究が進められておらず、系統的な研究は皆無であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、人工的に制御されたねじれた磁気構造におけるスピン流に着目し、異種磁性金属をナノオーダーでヘテロエピタキシャル成長させる高度薄膜成長技術および微細加工技術を駆使することにより、人工制御ねじれ磁気構造のナノサイズ素子を作製し、ねじれ磁気構造におけるスピン流の制御を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ねじれ磁気構造を有する金属人工格子の薄膜成長の最適化、磁気構造の理解と磁気伝導特性の評価、微小ナノ構造体の作製と電流による磁気構造の不安定性の評価、ねじれ磁気構造に起因した磁化ダイナミクスの観測が、研究を進めて行く上でのキーポイントとなる。

超高真空マグネトロンスパッタ装置およびイオンビームスパッタ装置を用いて、MgO 単結晶基板上に薄膜試料を作製した。反射高速電子線回折(RHEED)および X 線回折により薄膜試料の構造評価を行い、超伝導量子干渉素子(SQUID)磁束計を用いて磁気特性を評価した。得られた実験結果を数値計算と比較することにより、ねじれ磁気構造のねじれ角等を算出した。

ねじれ磁気構造におけるスピン流の相関は、微細加工により 100nm サイズの縦型素子を作製し、面直通電型磁気抵抗 (CPP-MR) 効果を測定することで評価した。また、素子の微分抵抗を測定することで、直流電流印加による磁気構造の不安定性について検討した。さらに、ネットワークアナライザおよびスペクトラムアナライザを用いて、周波数領域における磁化ダイナミクスを評価した。

4. 研究成果

本研究課題では、ハード磁性体である $L1_0$ -FePt とソフト磁性体であるパーマロイ (FeNi 合金、以下 Py と示す) を積層させた薄膜試料を作製した。図 1 に $L1_0$ -FePt / Py 薄膜の磁化曲線を示す。Py 膜厚(t_{Py}) は 40 nm とし、 $L1_0$ -FePt 層は 10 nm であり、 $L1_0$ -FePt 層と Py 層は界面で磁氣的に交換結合している。 $t_{Py} = 40$ nm の試料では、磁化反転が 2 段のステップとして現れている。この挙動は、低磁場で Py 層の磁化反転が開始するが、界面で FePt 層との交換結合により Py 層の磁化がピン止めされているため、全ての磁化の反転は生じない。さらに磁場を増やすことで、FePt 層も磁化反転し、 $L1_0$ -FePt 層および Py 層の磁化が飽和状態に至ることを意味している。この実験結果を数値計算 (図 1 の実線) と比較した結果、この $L1_0$ -FePt / Py 薄膜では磁化方向が空間的に変調されたねじれ磁気構造が形成されていることが明らかとなった。

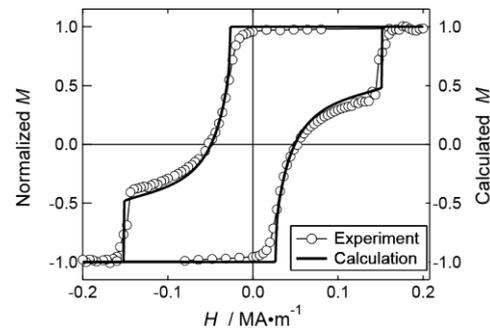


図 1 $L1_0$ -FePt / Py 薄膜の磁化曲線を示す。Py 膜厚(t_{Py}) は 40 nm とし、 $L1_0$ -FePt 層は 10 nm であり、 $L1_0$ -FePt 層と Py 層は界面で磁氣的に交換結合している。

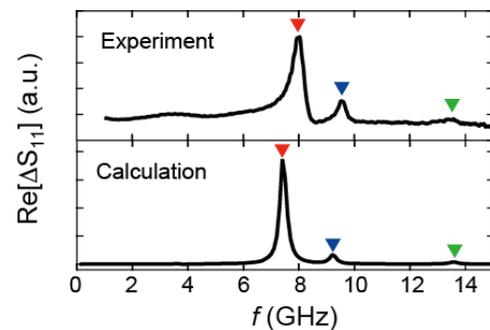


図 2 $t_{Py} = 100$ nm とした $L1_0$ -FePt / Py 薄膜における強磁性共鳴スペクトルの実験結果 (上段) および計算結果 (下段)。▼ は共鳴ピークを示している。

つぎに、このねじれ磁気構造の磁化ダイナミクスを調べた。図2に、 $t_{Py} = 100 \text{ nm}$ とした $L1_0\text{-FePt} / \text{Py}$ 薄膜における強磁性共鳴スペクトルの実験結果および計算結果を示す。スペクトルには、複数の共鳴ピークが観測されており、単一磁性体の磁化ダイナミクスとは異なる結果である。数値計算を行ったところ、これらのピークは Py 内に励起された Perpendicular standing spin wave (PSSW)モードというスピン波に起因することが明らかとなった。ハード磁性層とソフト磁性層からなる交換結合膜において、PSSWモードの励起を実験的に観測した例は今までに無く、本研究によって初めて明らかにされた。このことは $L1_0\text{-FePt}$ と Py の組合せがねじれ磁気構造の磁化ダイナミクスを調べるモデルケースになることを示唆している。

以上の知見をもとに、本研究課題では PSSW モードを積極的に利用することで、 $L1_0\text{-FePt}$ 層の磁化反転を誘起することを試みた。外部から高周波磁場を印加して Py 層内にスピン波を励起し、界面での交換結合により $L1_0\text{-FePt}$ 層の磁化ダイナミクスも励起することで $L1_0\text{-FePt}$ 層を小さな外部磁場で磁化反転させるというコンセプトである。図3に、 $L1_0\text{-FePt}$ 層における反転磁場(H_{sw})の高周波磁場の周波数(f)依存性を示す。 $f = 10 \text{ GHz}$ 近傍で H_{sw} が低下しており、この周波数はスピン波の共鳴周波数に一致している。この結果より、スピン波を励起すると $L1_0\text{-FePt}$ 層の磁化反転を誘起できることが実証された。今回の研究では、スピン波を利用することで H_{sw} を $1/10$ まで低下できることが明らかとなった。この「スピン波アシスト磁化反転」という手法は、新しい低エネルギー磁化反転技術として大いに期待される。

本研究の目的の一つであるスピン流とねじれ磁気構造の相関について、 $L1_0\text{-FePt}$ 層と Py 層を有する CPP-GMR 素子を作製し、磁気

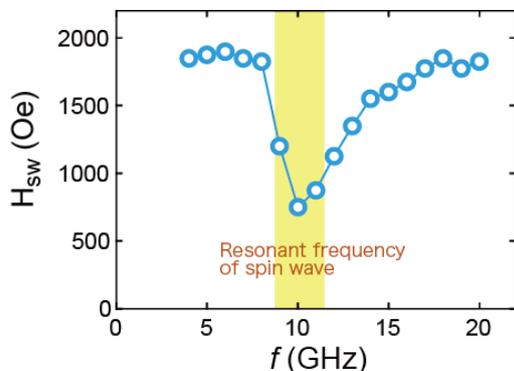


図3 $t_{Py} = 100 \text{ nm}$ とした $L1_0\text{-FePt} / \text{Py}$ 薄膜における $L1_0\text{-FePt}$ 層の反転磁場(H_{sw})の高周波磁場の周波数(f)依存性。

抵抗効果および電流による磁気構造の不安定性を調べた。 $L1_0\text{-FePt} / \text{Py} / \text{Cu} / \text{Py}$ の積層構造において明瞭な磁気抵抗が観測され、さらに直流電流印加下で微分抵抗を測定したところ、磁気構造の遷移に起因すると考えられる抵抗変化も観測された。これは、ねじれ磁気構造とスピン流間のスピントランスファートルクによるものであると考えられ、基本的な知見が得られた。

以上をまとめると、本研究課題を遂行した結果、ねじれ磁気構造を形成するための薄膜作製条件が明らかとなり、計算結果より詳細な磁気構造を明らかにする成功した。さらに、ねじれ磁気構造に特有なスピン波モードを実験的に観測し、磁化ダイナミクスの解明に繋げた。また、このスピン波を利用することで新しい磁化反転手法を確立した。さらに、スピン流とねじれ磁気構造の相互作用を示唆する磁気構造の変化が観測された。本研究によって得られた知見は、スピントロニクスデバイスの高集積化や多機能化に大きく寄与するものであると考えられる。

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2件)

1. T. Seki, K. Utsumiya, Y. Nozaki, H. Imamura, and K. Takanashi, Spin Wave-Assisted Reduction in Switching Field of Highly Coercive FePt Magnets, *Nature Commun.*, **4**, 10.1038/ncomms2737 (2013). 査読有
2. K. Utsumiya, T. Seki, and K. Takanashi, Magnetic properties of $L1_0\text{-FePt} / \text{permalloy}$ exchange-spring films, *J. Appl. Phys.*, **110**, 103911-1-6 (2011). 査読有

[学会発表] (計10件)

1. 関剛斎、堀田京子、能崎幸雄、今村裕志、高梨弘毅、スピン波アシスト磁化反転における磁化ダイナミクス、第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年03月30日、神奈川工科大学、厚木市。
2. T. Seki, Magnetization switching assisted by spin wave excitation, International Workshop on Development of Functionalized Molecule-based Magnetic Materials, 2013年2月21日、Sendai, Japan. (招待講演)
3. 関剛斎、菊池祐介、堀田京子、高梨弘毅、電界およびスピン波を用いた FePt 規則合金薄膜の磁化制御、応用電子物性分科会・スピントロニクス研究会 共催研究会、2012

年 11 月 21 日, 首都大学東京, 東京. (招待講演)

4. T. Seki, K. Utsumiya, Y. Nozaki, H. Imamura, and K. Takanashi, Spin wave-assisted magnetization switching, International Conference of AUMS 2012, 2012 年 10 月 03 日, Nara, Japan.
5. T. Seki, and K. Takanashi, Control of Magnetization Switching in Highly Coercive $L1_0$ -FePt, 21st International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, 2012 年 9 月 27 日, Shanghai, China. (招待講演)
6. 関剛斎, $L1_0$ 型 FePt 規則合金における低エネルギー磁化反転, 日本金属学会 2012 年秋期大会, 2012 年 9 月 18 日, 愛媛大学, 松山市.
7. T. Seki, and K. Takanashi, Control of Magnetization Reversal in Hard Magnetic $L1_0$ -FePt, IUMRS- ICYRAM 2012, 2012 年 7 月 5 日, Matrix Building, Singapore. (招待講演)
8. 関剛斎、宇津宮和寿、能崎幸雄、今村裕志、高梨弘毅, スピン波アシスト磁化反転, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学.
9. 関剛斎、宇津宮和寿、能崎幸雄、今村裕志、高梨弘毅, スピン波アシスト磁化反転, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 18 日, 早稲田大学.
10. 関剛斎、宇津宮和寿、高梨弘毅, 人工制御ねじれ磁気構造の強磁性共鳴測定, 第 35 回日本磁気学会学術講演会, 2011 年 9 月 29 日, 新潟・朱鷺メッセ.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: マイクロ波アシスト磁気記録媒体

発明者: 関剛斎、高梨弘毅

権利者: 関剛斎、高梨弘毅

種類: 特許

番号: 特願 2011-246937

出願年月日: 2011 年 11 月 10 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 剛斎 (SEKI TAKESHI)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号: 40579611