

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630296

研究課題名(和文) 絶縁性下地層上エピタキシャル磁性金属超薄膜の高周波スピンドYNAMIX

研究課題名(英文) Spin dynamics of epitaxial ferromagnetic metal film on insulating layer

研究代表者

白土 優 (Shiratsuchi, Yu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70379121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性層/反強磁性層積層膜のスピンドYNAMIXとして、反強磁性体として電界応答可能なCr2O3薄膜を用いたパルス電圧による反強磁性スピン反転ダイナミクス、ならびに、CPW-FMR法を用いたCr2O3層上のCo/Pt垂直磁化多層膜の強磁性共鳴測定を行った。前者は、印可磁界-10 kOe、印加電界-1750 kV/cmの条件において、反強磁性スピン反転に要する時間は数百ナノ秒であることを明らかにし、後者の測定により強磁性共鳴周波数は数十GHzであることを明らかにした。これらの結果から、反強磁性スピン反転過程は、反強磁性磁壁の移動によって支配されていることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：Toward the clarification of spin-dynamics of ferromagnetic/insulating antiferromagnetic stacked system, we investigated (1) antiferromagnetic spin dynamics under the pulsed voltage and (2) ferromagnetic resonance measurement based on CPW-FMR method for the Co/Pt film/multilayer grown on magnetoelectric Cr2O3 layer. Former experiments clarified that the antiferromagnetic spin reversal time is in the order of a few hundred nano-seconds under the condition of -10 kOe and -1750 kV/cm. Latter investigation indicated that the ferromagnetic resonance frequency of Co/Pt multilayer on Cr2O3 is in GHz range. These results imply that the antiferromagnetic spin reversal process is dominated by the magnetic domain wall propagation.

研究分野：スピントロニクス、ナノ材料、ナノ磁性

キーワード：スピンドYNAMIX 強磁性共鳴 Cr2O3 電気磁気効果 反強磁性スピン

1. 研究開始当初の背景

スピンエレクトロニクスは、電子の電荷のみを用いる半導体デバイスと比較して、不揮発化による低消費電力、スピンドायナミクスを使用した超高速デバイス等の革新的機能を有するデバイスの創出を可能にする。研究代表者は、これまでに、強磁性金属層/絶縁性反強磁性層を用いることで、低消費電力化に有利な膜面垂直磁化型素子の実現が可能であることを提案している。この構造では、反強磁性体のスピンドાયナミクスを積極的に利用することが可能であり、例えば、強磁性層の強磁性共鳴周波数が GHz (G は 10^9) ことに対して、反強磁性共鳴周波数は 3 桁以上高い THz (T は 10^{12}) ことから、超高速デバイスの実現が期待される。

2. 研究の目的

強磁性金属/反強磁性絶縁層の高速スピンドાયナミクスの実現に向けて、特に、反強磁性体として電界によるスピン制御が可能な電気磁気反強磁性体である Cr_2O_3 を用い、強磁性層/ Cr_2O_3 積層膜における、電界駆動反強磁性スピン反転のダイナミクス、ならびに、 Cr_2O_3 層上に積層した垂直磁化強磁性薄膜の磁気共鳴測定を実施した。これらの知見を基に、反強磁性スピンドાયナミクスに向けた基礎知見を得ることを主な目的とする。

3. 研究の方法

試料作製には、これまでに Cr_2O_3 薄膜の作製実績がある DC 反応性マグネトロンスパッタリング装置を用いた。作製した試料の基本構造は、 $[\text{Pt}/\text{Co}]_{1,20}/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ 薄膜である。本研究のキーポイントは、良質な Cr_2O_3 層の作製にある。 Cr_2O_3 層の作製方法の詳細は、研究代表者の過去の報告(例えば、Y. Shiratsuchi et al., Appl. Phys. Express 3, 113001 (2010). など)を参照されたい。

作製した薄膜に対して、各層の結晶配向性と表面平坦性を、反射高速電子線回折法によってその場観察し、X 線回折法(高角 X 線回折, X 線反射率法)によって、積層状態(界面での格子整合)と界面ラフネスを評価した。

磁気特性評価として、振動試料型磁力計による磁化曲線測定を行った。スピンドાયナミクスの評価として、本研究では以下に記す 2 種類の手法で検討を行った。

(A) 電界駆動反強磁性スピン反転にともなう反転ダイナミクス評価

この手法は、 Cr_2O_3 の電気磁気効果を利用して、界面反強磁性 Cr スピンを反転させる際、トリガとなる電界をパルス電界とすることで、反強磁性スピンのダイナミクスを検討するものである。本検討には、作製した素子をフォトリソグラフィ法と Ar イオンミリング法を用いて、ゲート電圧印加可能なホール素子形状に微細加工し、異常ホール効果測定による交換バイアスの極性変化をベースとした測定を行った。(本研究で用いた薄膜

では、交換バイアスの極性は、界面反強磁性スピンの向きによって決まるため、交換バイアスの極性変化のプロセスによって、反強磁性スピン反転プロセスの検討が可能である。)

(B) CPW-FMR 測定による、 Cr_2O_3 層上の Co/Pt 垂直磁化多層膜の強磁性共鳴測定

作製した薄膜と別に、コプレーナ型伝送線路(CPW)を作製し、本素子を用いて作製した薄膜の磁気共鳴測定を行った。この方法は、CPW に高周波電流を印加し、高周波電流によって発生する高周波磁場の試料による吸収を測定する方法であり、高感度に加えて、微細素子や薄膜に対しても計測可能な手法である。本研究では、固定磁場条件で、ベクトルネットワークアナライザを用いて、高周波電界の周波数を掃引することで磁気共鳴測定を行った。

4. 研究成果

前項で述べた 2 種類の検討に対する研究成果を下記に記す。

(A) 電界駆動反強磁性スピン反転にともなう反転ダイナミクス

上述のように、本検討の前提は、 Cr_2O_3 薄膜の反強磁性スピンを電界によって反転させることにある。しかしながら、電気磁気効果を用いた反強磁性スピン反転技術そのものも、現時点では極めてチャレンジングな技術である。このため、反転ダイナミクスの検討に先立ち、Pt/Co/ Cr_2O_3 /Pt 薄膜における電界誘起スピン反転について検討した結果について記し、その後、パルス電圧を用いた反転ダイナミクスについて述べることとする。

図 1 に、Pt/Co/ Cr_2O_3 /Pt 薄膜に対して測定した、電界印加前後での異常ホール効果曲線の変化を示す。なお、電界印加時は電界に加えて、-10 kOe の磁界も同時に印可している。電界と磁界を印加する前(図の赤線)は、磁化曲線が左方向にシフトしており、交換バイアスが負方向に作用していることが分かる。これは、磁場中冷却によって、初期状態を創り出す際、印可した磁界を正方向に印可したためであり、一般的な磁場中冷却効果と同様である。この状態に、温度を保持したまま、-10 kOe の磁界と -2500 kV/cm の電界を同時印加すると、磁化曲線のシフト方向が正方向に変化する。すなわち、交換バイアスの極性が反転する。上述のように、交換バイアスの極性は、界面反強磁性スピンの向きによって決定されているため、図に示した結果は、磁界と電界の同時印加によって、界面反強磁性スピンを反転させることが出来たことを意味している。詳細な検討の結果、反強磁性スピン反転に必要な閾電界は、-10 kOe の磁界下では、約 -1200 kV/cm であり、印加する磁界強度に半比例して低下することが分かった。この結果は、反強磁性スピン反転が電気

磁気効果によって生じていることを示している。

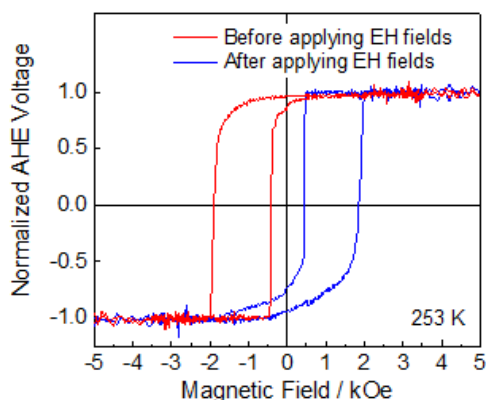


図 1 電場と磁場の同時印加による交換バイアスの極性反転実験結果。

次に、印加電界を交換バイアスの極性反転閾電界より高い-1750 kV/cm とし、印可する電界をパルス電圧によって生成させた結果について述べる。図 2 に、印加パルス幅に対する、交換バイアス磁界と残留磁化比の変化を示す。パルス幅の増加により、交換バイアス磁界と残留磁化比は共に徐々に変化し、パルス幅が約 200 ~ 300 ナノ秒の場合に、交換バイアス磁界、残留磁化比の変化は飽和する。これは、本実験での条件では、反強磁性スピン反転に要する時間が数百ナノ秒であることを意味している。この反転時間は、下記に記す強磁性共鳴周波数や反強磁性共鳴周波数と比較すると桁違いに遅く、この結果から、反強磁性スピン反転は反強磁性磁区の逆磁区生成と磁壁移動によって支配されている可能性が示唆される。

反強磁性磁壁のダイナミクスについては、これまで全く報告された例はなく、本研究が初の報告であるため、定量評価については今後の課題である。

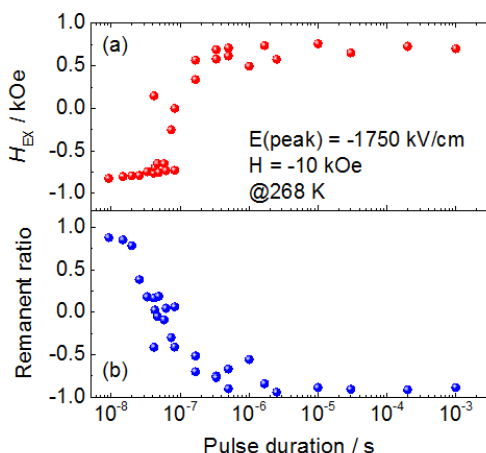


図 2 印加パルス幅に対する (a) 交換バイアス磁界と (b) 残留磁化比の変化。

(B) CPW-FMR 測定による、 Cr_2O_3 層上の Co/Pt 垂直磁化多層膜の強磁性共鳴測定

前述した反強磁性スピン反転ダイナミクスの詳細な理解に向けた第一段階として、 Cr_2O_3 上に積層した垂直磁化 Co/Pt 多層膜の強磁性共鳴測定を行った。CPW-FMR によって、磁性多層膜の強磁性シグナルを観測することが出来、印可磁界 1 kOe における強磁性共鳴周波数は、約 28.4 GHz となった。また、印可磁場強度の増加により、強磁性共鳴周波数は直背的に増加し、得られた関係を Kittel の式を用いて解析した結果、作製した薄膜の g 因子は 2.45、異方性磁界は 12.2 kOe となった。また、強磁性共鳴線幅を用いて、Gilbert ダンピング定数を見積もった結果、約 0.12 となった。

算出された異方性磁界は、磁化曲線測定によって得られる膜面内方向（磁化困難磁区方向）の飽和磁界と概ね一致する。また、Gilbert ダンピング定数は、Co/Pt 垂直磁化多層膜において報告されている値と概ね一致することが分かった。

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 4 件)

Kentaro Toyoki, Yu Shiratsuchi, Atsushi Kobane, Chiharu Mitsumata, Yoshinori Kotani, Tetsuya Nakamura, and Ryoichi Nakatani, Magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/ α - Cr_2O_3 /Pt stacked films, Applied Physics Letters, 106 (2015) 162404. 査読有。

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4918940>

Yu Shiratsuchi and Ryoichi Nakatani, Perpendicular exchange bias ant magneto-electric control using Cr_2O_3 (0001) thin film, Materials Transaction, 57 (2016) 781. 査読有。DOI: 10.2320/matertrans.ME201506

Yasushi Endo, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Study on Magnetization Dynamics of Ni-Fe Dot Arrays Estimated by the CPW-FMR Measurement Method, IEEE Transaction on Magnetics, 51 (2015) 2300604. 査読有。DOI: 10.1109/TMAG.2015.2434400

Yasushi Endo, Yoshio Mitsuzuka, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Substrate Influence on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Thin Films, IEEE Transaction on Magnetics, 52 (2016) in press. 査読有。

〔学会発表〕(計 12 件)

Yu Shiratsuchi, Dynamical switching of perpendicular exchange bias, The 27th Magnetic Recording Conference(招待講演), 2016年8月17日~19日(講演決定), スタンフォード大学(米国).
Yu Shiratsuchi, Magneto-electric switching of interfacial spins toward magnetic recording/memory, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (招待講演), 2016年5月29日~6月3日(講演決定), Messe Cofngress (Graz, Austlia)

Yu Shiratsuchi, Electric-field induced switching of antiferromagnetic spins, BIT's 2nd Annual world congress of smart materials-2016 (招待講演), 2016年3月4日~6日, Grand Copthorne Waterfront (シンガポール, シンガポール)

Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Saori Yoshida, Atsushi Kobane, and Ryoichi Nakatani, Polarity reversal of perpendicular exchange bias using magnetoelectric effect of Cr_2O_3 thin film, 25th Annual meeting of MRS-J (2015) (招待講演), 2015年12月8日~10日, 横浜情報文化センター(神奈川県, 横浜市)

白土 優, 電気磁気効果による $\text{Co}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ 界面の垂直交換磁気異方反転とそのダイナミクス, 日本磁気学会第208回研究会(招待講演), 2016年6月9日(講演決定), 中央大学(東京都, 千代田区).
白土 優, 電気磁気効果によるスピントロニクス材料 $\text{Co}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ の界面スピン制御, 第1回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ(招待講演), 2016年3月10日, グランパークプラザ(東京都, 港区).

白土 優, 電気磁気効果に基づく垂直交換磁気異方性の電界誘起方位反転, 第3回エレクトロニクス薄膜研究会(招待講演), 2015年9月18日, 九州大学(福岡県, 福岡市).

白土 優, 電気磁気効果を示す反強磁性 Cr_2O_3 薄膜による垂直交換磁気異方性, 日本金属学会 2015年秋期講演大会(受賞記念講演), 2015年9月16日~18日, 九州大学(福岡県, 福岡市).

Yasushi Endo, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Study on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Dot Arrays Estimated by the CPW-FMR Measurement Method, IEEE International Magnetics Conference, 2015年5月11日~15日, China National Convention Center 北京, 中国)
遠藤 恭, 山口正洋, 磁界掃引 CPW-FMR

測定による Ni-Fe 薄膜のダンピング定数の評価, 第39回日本磁気学会学術講演会, 2015年9月8日~11日, 名古屋大学(愛知県, 名古屋市).

遠藤 恭, 山口正洋, 磁界掃引 CPW-FMR 測定による Ni-Fe 薄膜のダンピング定数の評価, 平成27年度スピニクス特別研究会, 2015年11月20日, 信州大学(長野県, 松本市).

Yasushi Endo, Yoshio Mitsuzuka, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Substrate Influence of the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Thin Films, 13th Joint MMM-INTERMAG Conference, 2016年1月12日~15日, Hilton San Diego Bayfront (San Diego, U.S.A.)

〔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〕

ホームページ等

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 中谷研究室ホームページ

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse2/MSE2-HomeJ.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白土 優 (SHIRATSUCHI, Yu)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70379121

(2) 研究分担者

遠藤 恭 (ENDO, Yasushi)

東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50335379

(3) 連携研究者

無し