

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560364

研究課題名(和文) 電場誘起磁化反転に関する波動関数の対称性を測る

研究課題名(英文) Measurement of symmetry of wavefunction which contributes to electric-field induced magnetization switching

研究代表者

櫻井 浩 (Sakurai, Hiroshi)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80251122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：Au/Fe/MgO磁気トンネル接合膜におけるスピン磁気モーメントの磁化曲線(SSMH)と軌道磁気モーメントの磁化曲線(OSMH)を磁気コンプトン散乱とSQUID磁力計の測定を組み合わせで求めた。さらに、磁気コンプトンプロファイルから磁気量子数別スピン選択磁化曲線を求めた。スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの磁化反転挙動は異なっており、軌道磁気モーメントの磁化反転特性は垂直磁化を示していた。さらに、磁気量子数 $|m|=2$ を有する状態が軌道磁気モーメントの磁化反転特性に対応していた。

研究成果の概要(英文)：A spin specific magnetic hysteresis (SSMH) curve and an orbital specific magnetic hysteresis (OSMH) curve are obtained for Au/Fe/MgO multilayers by magnetic Compton scattering and SQUID magnetometer measurements. The SSMH curve with each contribution of magnetic quantum number $|m|=0, 1,$ and 2 states is obtained by decomposition analyses of magnetic Compton profiles. Residual magnetization is observed for the SSMH curve with magnetic quantum number $|m|=2$ and the OSMH curve. Although the SQUID magnetometer measurements do not show perpendicular magnetic anisotropy (PMA), the SSMH curve with magnetic quantum number $|m|=2$ and OSMH curve show switching behaviors of PMA.

研究分野：工学

キーワード：磁気スイッチング スピントロニクス 軌道磁気モーメント スピン磁気モーメント 磁気コンプトン散乱

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) は不揮発性・高速性・耐久性・低消費電力などから、スピントロニクスデバイスとして研究が進められている。一方、微細化に伴いセルサイズが小さくなると反磁化効果による書き込み電流の増大、熱擾乱など問題が指摘されている。そこでデバイスの駆動電流を低減するため、電場誘起磁化反転、電流駆動磁化反転、熱アシスト・マイクロ波アシスト磁化反転などが提案されている。一方、その反転プロセスにおける電子状態の研究は多くない。

最近磁気コンプトン散乱がスピン磁気モーメントのみを観測することを利用したスピン選択磁化曲線 (Spin Specific Magnetic Hysteresis: SSMH) を求める研究手法を開発された [1]。さらに、振動試料型磁力計 (VSM) または SQUID 磁力計による全磁化測定と磁気コンプトン散乱測定を組み合わせ、軌道選択磁化曲線 (Orbital Specific Magnetic Hysteresis: OSMH) と SSMH を求める研究手法が報告されている [2]。このような新たに開発された手法を用いて、Aguiらは希土類-遷移金属合金膜の SSMH と OSMH を測定し、スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの磁化反転プロセスの違いを報告している [3,4]

そこで、本研究では、Au/Fe/MgO など垂直磁気異方性 [5] と電場誘起磁化反転効果が報告されている [6] 磁気トンネル接合多層膜を対象として磁気コンプトン散乱を測定し、磁気スイッチングに寄与する波動関数の対称性と関連するスピン磁気モーメント・軌道磁気モーメントの挙動を明らかにする。

2. 研究の目的

Au/Fe/MgO 磁気トンネル接合多層膜を対象として、

軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントの磁化反転挙動を明らかにする。

軌道磁気モーメントとスピン磁気モーメントの磁化反転挙動とそれに寄与する波動関数の対称性 (磁気量子数) を明らかにする。

3. 研究の方法

多元高周波スパッタリング装置を用いて Si 基板および Al フォイル (12 μ m) 基板上に (Fe(8nm)/Au(2nm)/Fe(2nm)/MgO(4nm)) 150 多層膜を製膜した。Fe ターゲットには 150W、MgO 焼結体ターゲットには 80W、Au ターゲットには 30W の電力を印可し、Ar ガス圧 1.0Pa で製膜した。結晶構造は X 線回折装置 (Cu-K α 1) を用いて評価した。Fe(8nm)/Au(2nm)/Fe(2nm)/MgO(4nm) 多層膜では、Fe(002)、Au(002)、MgO(002) に相当する回折線が観測された。一方、Fe(110) に相当する回折線も観測された。したがって、概ね Fe(002)、Au(002)、MgO(002) の結晶配向の制御には成功したが、部分的に Fe 層の

配向が乱れていることがわかった。

磁化特性は振動試料型磁力計 (VSM) と SQUID 磁力計を用いて評価した。SPring-8-BL08W にて磁気コンプトン散乱測定を行った。磁気コンプトン散乱には 182.6keV の高エネルギー円偏光 X 線を用い、散乱角は 178 度であった。コンプトン散乱 X 線のエネルギースペクトルは、10 素子の半導体検出器を用いた。測定の分解能は $\Delta p_z = 0.43$ au であった。試料上のビームサイズは 1 \times 0.8mm² であった。磁気コンプトン散乱の磁場依存性を測定してスピン選択磁化曲線 (SSMH) を求めた。SQUID 磁力計から求めた全磁化曲線と磁気コンプトン散乱から求めた SSMH の差から軌道選択磁化曲線 (OSMH) を求めた。印可磁場 H は -2.5T から 2.5T であり膜面に垂直であった。測定は室温であった。

4. 研究成果

図 1 は Au/Fe/MgO 多層膜のスピン磁気モーメントの磁化曲線 SSMH、軌道磁気モーメントの磁化曲線 OSMH および全磁化曲線

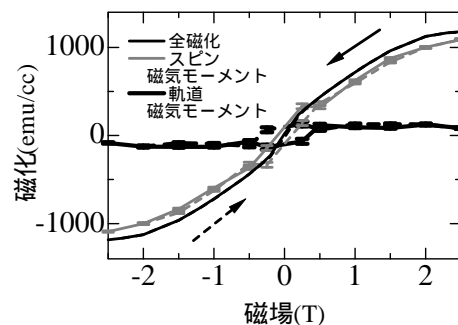


図 1

である。SSMH と OSMH の挙動は異なり、SSMH の保磁力は 0.1 T、OSMH の保磁力は 0.34 T である。全磁化曲線では垂直磁気特性は観測されないが、OSMH では残留磁化が観測される。

次に、SSMH と OSMH の挙動の違いを解析するため、磁気コンプトン散乱 X 線のエネルギースペクトルから磁気コンプトンプロファイルを求めた。磁気コンプトンプロファイルの積分値がスピン磁気モーメントに相当するので、磁気コンプトンプロファイルはスピン磁気モーメントを担う電子の運動量分布である。ところで、多層膜の積層方向の一軸性の結晶場を仮定すれば、Fe3d 電子のスピン磁気モーメントは磁気量子数 $|m| = 0, 1, 2$ の 3 つの状態を持つ。磁気コンプトンプロファイルは磁気量子数 $|m| = 0, 1, 2$ の状態に対して特徴的な形状を有する。そこで、磁気量子数 $|m| = 0, 1, 2$ の状態の磁気コンプトンプロファイルをモデル計算し、測定した磁気コンプトンプロファイルを解析した。図 2 は 2.5 T の磁気コンプトンプロファイルを $|m| = 0, 1, 2$ の各寄与に分離した例である。各磁場の磁気コンプトンプロファイルについて

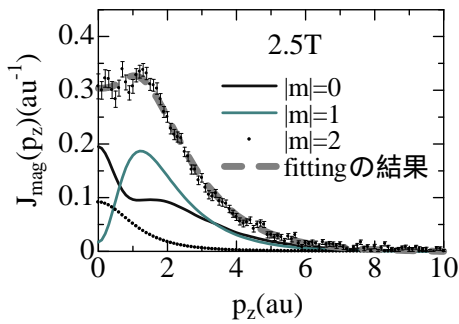


図 2

このような解析をすると、磁気量子数別 SSMH を求めることができる。図 3 は磁気量子数別 SSMH である。SSMH、OSMH の挙動と磁気量子数別 SSMH の挙動を比較するために、図 3 に図 1 の SSMH と OSMH を重ねて表示している。図 3 から OSMH と $|m|=2$ の SSMH は保磁力が等しく残留磁化が観測され、「垂直磁化膜」のような磁化反転挙動を示す。一方、SSMH (図 1 の SSMH) は $|m|=0, 1$ の SSMH の磁化反転挙動に対応している。この挙動は次のように考えることができる。全磁化曲線は垂直磁気異方性を示さないが、原子間隔が押し広げられているような部分、例えば Fe(002)/Au(002)界面では膜面内に $|m|=2$

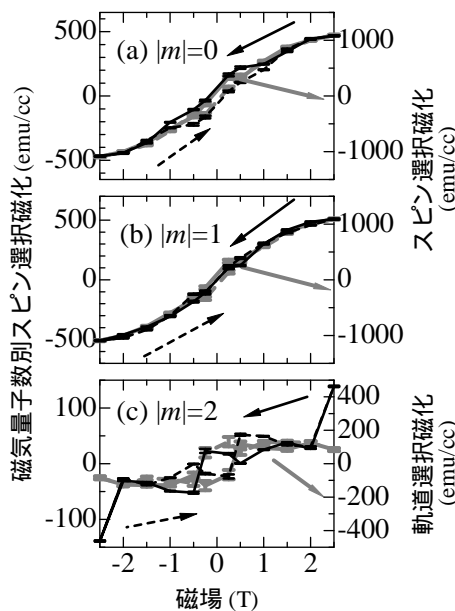


図 3

の軌道運動が生じ、軌道磁気モーメントを生じるため垂直磁気異方性が生じる。そのため、軌道磁気モーメントの磁化反転挙動は軌道磁気モーメントの起源である $|m|=2$ の電子軌道の磁化反転挙動に対応する。

以上から、Au/Fe/MgO 磁気トンネル接合膜について、

スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの磁化反転挙動は異なる。軌道磁気

モーメントの磁化反転挙動は垂直磁化を示す。

軌道磁気モーメントの磁化反転挙動は、磁気量子数 $|m|=2$ の対称性を有する状態の磁化反転挙動に対応する。

であることがわかった。詳細は発表された論文を参照されたい[7-9]

参考文献

- [1] A. Agui et. al., J. Synchrotron Rad. 17, pp. 321-324, (2010).
- [2] M. Itou et. al, Appl. Phys. Lett. 102(2013)082403
- [3] A. Agui et. al., J. Appl. Phys. 114, 183904 (2013).
- [4] A. Agui et. al., Appl. Phys. Express, 4, 083002 (2011).
- [5] R. Shimabukuro, K. Nakamura, T. Akiyama, and T. Ito, Physica E 42, 1014 (2010).
- [6] T. Maruyama, Y. Shiota, T. Nozaki, K. Ohta, N. Toda, M. Mizuguchi, A. Tulapurkar, T. Shinjo, M. Shiraishi, S. Mizukami, Y. Ando, and Y. Suzuki, Nat. Nanotechnol. 4, 158 (2009).
- [7] K. Suzuki et al., Appl. Phys. Lett. 105, 072412 (2014)
- [8] 櫻井浩ほか, までりあ 54, 621-625 (2015).
- [9] T. Kato et al., Mech. Mater., 423-426, pp 271-275 (2013)

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 17 件)

1. Akane Agui, Ryo Masuda, Yasuhiro Kobayashi, Tadashi Kato, Shun Emoto, Kosuke Suzuki and Hiroshi Sakurai, The study of the magnetization process of fe film by magnetic Compton scattering and Mossbauer spectroscopy, J. Magn. Magn. Matter 408, 41-45 (2016).., 10.1016/j.jmmm.2016.02.016 (査読有)

2. 櫻井浩、鈴木宏輔、伊藤真義、櫻井吉晴, 磁気コンプトン散乱で調べる化学結合の形とその磁場依存性～垂直磁気異方性の起源, までりあ 54, 621-625 (2015).., 10.2320/materia.54.621 (査読有)

3. K. Suzuki, S. Takubo, T. Kato, M. Yamazoe, K. Hoshi, Y. Homma, M. Itou, Y. Sakurai, H. Sakurai, Magnetic switching behaviors of orbital states with different magnetic quantum numbers in Au/Fe/MgO multilayer system, Appl. Phys. Lett. 105, 072412 (2014), 10.1063/1.4893566. (査読有)

4. Tadashi Kato, Kosuke Suzuki, Shouta Takubo, Yoshiya Homma, Masayoshi Itou, Yoshiharu Sakurai and Hiroshi Sakurai, Perpendicular magnetic anisotropy in Fe/MgO multilayer film measured by magnetic Compton scattering, Appl. Mech. Mater., 423-426, pp 271-275 (2013), 10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.271. (査読有)

5. Akane Agui, Tomoya Unno, Sayaka Matsumoto, Kousuke Suzuki, Akihisa Koizumi, and Hiroshi Sakurai, Microscopic magnetic properties of an oxygen-doped Tb-Fe thin film by magnetic Compton scattering, J. Appl. Phys. 114, 183904 (2013), 10.1063/1.4829906. (査読有)

6. Kosuke Suzuki, Masaki Hayata, Katsuhiko Minegishi, Ryosuke Kondoh, Tadashi Kato, Kazushi Hoshi, Masayoshi Itou, Yoshiharu Sakurai and Hiroshi Sakurai, Study of Perpendicular Magnetic Anisotropy in Co/Au Multilayer Probed by Magnetic Compton Profile, Key Eng. Mater. 596 pp. 8-14(2013), 10.4028/www.scientific.net/KEM.596.8. (査読有)

他 11 件すべて査読有

〔学会発表〕(計 70 件)

1. 安居院あかね, 水牧仁一朗, 劉小晰, 櫻井浩, 安達美咲, 柴山茜, 鈴木宏輔, 19pPSB-13 希土類 遷移金属垂直磁化膜のミクロスコピックな磁化過程, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19-22, 東北学院大学(泉キャンパス)

2. 櫻井浩, 磁気コンプトン散乱で調べるスピントロニクス材料, 第 2 回 実用スピントロニクス新分野創成研究会, 2016 年 3 月 10 日, グランパークプラザ(田町)

3. 山添誠敏, 加藤忠, 鈴木宏輔, 伊藤真義, 櫻井吉晴, 櫻井浩, CoFeB/MgO 多層膜のスピ/軌道選択的磁化測定及び磁気量子数選択的磁化測定, 110P092, 第 29 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2016 年 1 月 9-11, 東京大学柏の葉キャンパス

4. Akane Agui, Hiroshi Sakurai, Kosuke Suzuki, Syouta Takubo, and Xiaoxi Liu, Spin and orbital selective magnetization curves of Tb-Co film, IXS2015; The 9th International Conference on Inelastic X-ray Scattering November 22-26, 2015; Hsinchu, Taiwan

5. M. Yamazoe, T. Kato, K. Suzuki, M. Itou, Y. Sakurai, H. Sakurai, Spin/Orbital and Magnetic Quantum Number Specific Magnetization Measurement for CoFeB/MgO Multilayers, P8-23, 7th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (AMDE2015), November 11 - 13, 2015, Kiryu, Japan

6. 安居院あかね, 櫻井浩, 鈴木宏輔, 田久保翔太, 劉小晰, 18pCM-5 Tb₂₃Co₇₇ 垂直磁化膜のスピ/軌道選択的磁化曲線の測定, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16-19, 関西大学

7. 安居院 あかね, 櫻井 浩, 鈴木宏輔, 田久保 翔太, 劉 小晰, 9aB-9 Tb₂₃Co₇₇ 垂直磁化膜のミクロスコピックな磁化過程の観察, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8-11 名古屋大学

8. 櫻井 浩, 磁気コンプトンプロファイル測定による対称性選択的磁化測定, 第 1 回 実用スピントロニクス新分野創成研究会, 2015 年 9 月 4 日, SPring-8 放射光普及棟・中講堂

9. S.Takubo, A.Agui, X.Liu, K.Suzuki and H.Sakurai, Spin/Orbital/Element specific hysteresis curve of Tb₂₈Co₇₂ perpendicular magnetic anisotropy film with a high squareness ratio, 1st International Symposium of Gunma University Medical Innovation (GUMI) and 6th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (AMDE), December 5th, 2014, Kiryu (Japan).

10. M. Yamazoe, T. Kato, S. Takubo, K. Suzuki, K. Hoshi, M. Itou, Y. Sakurai and H. Sakurai, Perpendicular magnetic anisotropy behavior of CoFeB/MgO multilayers by spin/orbital specific magnetization measurement, 1st International Symposium of Gunma University Medical Innovation (GUMI) and 6th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (AMDE), December 5th, 2014, Kiryu (Japan).

11. 安居院あかね, 櫻井浩, 鈴木宏輔, 磁気コンプトン散乱による希土類-遷移金属薄膜のスピ/軌道・元素選択ヒステリシス測定, 7pPSA-1, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月 7-10 日

12. 櫻井浩, 鈴木宏輔, 田久保翔太, 山添誠敏, 加藤忠, 星和志, 伊藤真義, 櫻井吉晴, MgO/Fe/Au 多層膜におけるスピ/軌道選択的磁化測定(30aAY-5), 日本物理学会第 69 回

年次大会,2014年3月27日-30日,東海大学
湘南キャンパス

13. Shota Takubo, Tadashi Kato, Kosuke Suzuki, Yoshiya Homma, Masayoshi Ito, Yoshiharu Sakurai and Hiroshi Sakurai, Perpendicular magnetic anisotropy in Fe/MgO multilayer film measured by magnetic Compton scattering, 5th International Conference on Advanced Micro Device Engineering, Dec. 19th 2013, Kiryu, Japan

14. 田久保翔太,加藤 忠,本間佳哉,江本駿,鈴木宏輔,櫻井 浩,伊藤真義,櫻井吉晴,Fe/MgO多層膜の磁気コンプトンプロファイルの磁場依存性(3pA-5),第37回日本磁気学会,2013年9月3日-6日,北海道大学

15. Hiroshi Sakurai, Tadashi Kato, Kosuke Suzuki, Shouta Takubo, Yoshiya Homma, Masayoshi Ito and Yoshiharu Sakurai, Perpendicular magnetic anisotropy in Fe/MgO multilayer film measured by magnetic Compton scattering, 6th International Conference on Advanced Science and Technology for Materials, Manufacturing and Measurement (ICA3M2013), Aug. 24-25, 2013, Dalian, China.

他 55 件

〔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
スピントロニクスを測る
<http://www.st.gunma-u.ac.jp/electron/05.html>

リチウムイオン二次電池の電池電極反応に
寄与する電子軌道の解明
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150204-2/>

X線を用いた燃焼現象の新しい非接触測定
手法の開発に成功
<http://www.gunma-u.ac.jp/information/12215>

電池内部のリチウム元素を非破壊で定量する
新手法の開発に成功
<http://www.gunma-u.ac.jp/information/11484>

6. 研究組織

(1)研究代表者

櫻井 浩 (SAKURAI Hiroshi)
群馬大学大学院理工学府・教授
研究者番号:80251122

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

鈴木 宏輔 (SUZUKI Kosuke)
群馬大学大学院理工学府・助教
研究者番号:90580506

櫻井 吉晴 (SAKURAI Yoshiharu)
高輝度光科学研究センター利用研究促進部
門・主席研究員
研究者番号:90205815

伊藤 真義 (ITOU Masayoshi)
高輝度光科学研究センター利用研究促進部
門・副主幹研究員
研究者番号:10344392