

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17684

研究課題名(和文) マルチフェロイック特性を示す強磁性体・絶縁体接合における界面酸化物の機能解明

研究課題名(英文) Understanding the role of the interface oxide layer in the multiferroicity at the ferromagnet/insulator junctions

研究代表者

酒巻 真粧子 (SAKAMAKI, Masako)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教

研究者番号：90598880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本提案では、軟X線カメラを用いた蛍光収量型深さ分解X線磁気円二色性(XMCD)スペクトル検出システムの開発、およびマルチフェロイック特性に対する界面酸化物の機能解明を目的に研究を行った。試料周りに永久磁石を配置し、放射光円偏光を照射することで、磁場中における深さ分解XMCDスペクトル測定が可能になり、試料とカメラの距離を調整することでサブnmの深さ分解能を達成した。さらに試料ホルダーを改良し、電界を印加した状態でXMCD測定を行えるようになった。

研究成果の概要(英文)：In this proposal, we have developed fluorescence-yield depth-resolved x-ray magnetic circular dichroism (XMCD) measurement system by using soft x-ray camera, and performed a study on the multiferroicity at the ferromagnet/insulator junction. By placing the permanent magnet next to the sample and irradiating the circularly polarized synchrotron soft x ray on it, the depth-resolved XMCD measurement under the magnetic field has been realized. Its depth resolution is estimated to be sub nm. We furthermore developed the sample holder so that the depth-resolved XMCD measurement under the electric field has realised, as well.

研究分野：表面・界面

キーワード：深さ分解 X線吸収分光 電界効果 X線磁気円二色性

1. 研究開始当初の背景

一般に磁性体の磁化は磁場によって制御されるが、最近は低消費電力型の素子開発への応用の可能性から、電界を用いた制御技術が注目を集めている。一方、電気と磁気が互いに交差する現象は古くより電気磁気効果として知られ、近年では「マルチフェロイクス」として基礎から応用まで幅広い研究が行われている。中でも申請者らが注目したのは、ヘテロ界面を利用した磁化の制御である。

2. 研究の目的

申請者らはこれまで、典型的な強誘電体である BaTiO₃ と強磁性体 Fe の接合を用いて、BaTiO₃ の電気分極反転に伴う磁性変化の観察を行った。X線吸収分光(XAS)及びX線磁気円二色性(XMCD)による観察の結果、±10 kV/cm の電界によって厚さ 1 nm の Fe の保磁力が約 10% 変化し、また界面付近において Fe 酸化物の存在が確認された。この界面酸化物は Ti 3d-O 2p と Fe 3d 軌道の混成により生じたもので、Fe の電界効果に大きく影響していることがわかってきた。そこで本提案では、絶縁体と強磁性体の間に積極的に界面酸化物をはさみ、それを利用してこれまでにないマルチフェロイック特性を実現させることを目的とした。

3. 研究の方法

電界による磁化の制御を実現するためには、界面状態の精密な観察が必要となるが、数原子層程度の極めて薄い界面酸化物を用いるため、これまで申請者らが開発してきた深さ分解 XMCD 法[1]をもってしても、そこからのシグナルを選別して検出するのは困難を極める。というのも、従来の深さ分解検出システムでは電子検出法を用いており、電子軌道が曲げられるという制約から電界中の測定に適さないからである。そこで本提案では蛍光検出用軟 X 線カメラを用い、サブ nm オーダーの深さ分解能を持つ蛍光収量型深さ分解 XMCD 測定システムを開発し(図 1)、精密に界面酸化物の状態観察を行い、マルチフェロイック特性に対する微視的役割を明らかにすることとした。

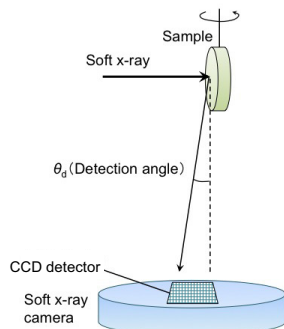


図 1. 蛍光収量型深さ分解 X 線吸収スペクトル測定システムの概要図。

4. 研究成果

初年度に検出システムの設計及び組立が完了し、テスト試料に対する XAS 測定を行った。さらに試料周りに永久磁石を配置し、放射光円偏光を照射することで、磁場中における深さ分解 XMCD スペクトル測定が可能となった。この手法を使って Fe/NiO/BaTiO₃ 薄膜の Ni 及び Fe の XMCD スペクトル観察を行ったところ、Fe/NiO 界面に Ni の強磁性成分が存在することがわかった。界面における酸化還元反応によって強磁性 Ni が生じたと考えており、この反応がどのように電界効果に影響しているか調査中である。

最終年度では試料ホルダーの改良を行い、振動や磁場の影響を抑える構造にした。さらに試料とカメラの距離を調整することでサブ nm の深さ分解能を実現することを確認した。この手法を FeCo 薄膜に適用し、XAS スペクトルの検出深さによる変化を観察したところ、有意な差が得られた(図 2)。

自己吸収補正機能を備えた解析ソフトを開発し、得られたデータに適用したところ、薄膜の表面層と内部層のスペクトルを抽出することに成功した(図 3)。さらに Fe/NiO/BaTiO₃ 薄膜に電界を印加した状態で XMCD 測定を行ったところ、電界により生じるわずかな可視光が検出器に影響を与え、スペクトルの S/B 比を下けていることがわかった。そこで可視光フィルターを導入したところ、劇的な改善が見られ、鮮明なスペクトルが得

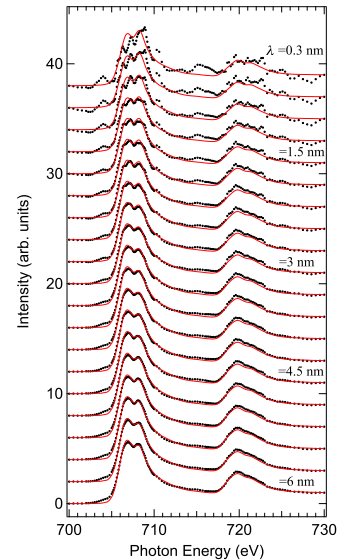


図 2. FeCo 薄膜の Fe L 端 XAS スペクトルの検出深さ(λ)依存性。

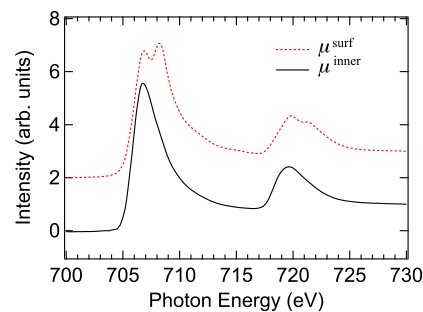


図 3. FeCo 薄膜の表面層(surf)と内部層(inner)の Fe L 端 XAS スペクトル。

られるようになった。詳細な界面状態観察から、NiO 界面層が厚くなるに従って Fe の磁化が強くなる傾向が得られた。一方で FeO_x 界面層を用いると Fe に交換結合的な振る舞いが見られ、界面における強磁性/反強磁性相互作用の違いによって強磁性体の電界効果に変化が生じることがわかった。

<引用文献>

[1] K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 2012, 10477-10484

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 5 件)

- ① M. Sakamaki, K. Amemiya, I. Sveklo, P. Mazalski, M. O. Liedke, J. Fassbender, Z. Kurant, A. Wawro, and A. Maziewski, Formation of Co nanodisc with enhanced perpendicular magnetic anisotropy driven by Ga⁺ ion irradiation on Pt/Co/Pt films, 査読有, Phys. Rev. B **94**, 2016, 174422-1-8, DOI: 10.1103/Phys.RevB.94.174422
- ② K. Amemiya and M. Sakamaki, Voltage-induced Changes in Magnetism of FeCo/BaTiO₃ Thin Films Studied by X-ray Absorption Spectroscopy, e-J. Surf. Sci. Nanotech., 査読有, **13**, 2015, 465-468, DOI: 10.1380/ejssnt.2015.465
- ③ T. Matsui, K. Aiko, M. Sakamaki, K. Amemiya, A. Iwase, In-situ XMCD evaluation of ferromagnetic state at FeRh thin film surface induced by 1 keV Ar ion beam irradiation and annealing, Nucl. Instr. Meth. B, 査読有, **365**, 2015, 187-190, DOI: 10.1016/j.nimb.2015.07.060
- ④ M. Sakamaki and K. Amemiya, Observation of Fe/BaTiO₃ interface state by x-ray absorption spectroscopy, e-J. Surf. Sci. Nanotech., 査読有, **13**, 2015, 139-142, DOI: 10.1380/ejssnt.2015.139
- ⑤ K. Amemiya, M. Sakamaki, M. Mizusawa, and M. Takeda, Magnetic Field Dependence of the Canted Spin Moment around the Interface between Ferromagnetic Ni and Antiferromagnetic FeMn Revealed by the Polarized Neutron Reflectivity, JPS Conf. Proc., 査読有, **8**, 2015, 034004-1-6, DOI: 10.7566/JPSCP.8.034004

[学会発表] (計 9 件)

- ① 酒巻真粧子, 雨宮健太「Fe/NiO 界面における酸素移動と Fe の磁気モーメント変化」 日本物理学会秋季大会, 金沢大学(石川県金沢市) 2016 年 9 月 13-16 日
- ② 酒巻真粧子, 雨宮健太「Fe/NiO の界面状態と Fe の磁気モーメント変化の観察」 第 19 回 XAFS 討論会, 名古屋大学(愛知県名古屋市) 2016 年 9 月 3-5 日
- ③ 酒巻真粧子「X 線磁気円二色性(XMCD)法を用いた磁性薄膜研究—材料中における磁性元素の元素選択的状態分析—」 日本鉄鋼協会 評価・分析・解析部会「材料の構成元素の化学状態と特性の相関の評価・解析」フォーラム「偏光を利用した先端的な磁気状態の評価・解析」, 東北大学(宮城県仙台市) 2016 年 8 月 19 日
- ④ 酒巻真粧子, 雨宮健太「Fe/BaTiO₃における界面酸化物を介した交換結合と電界効果」 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学(宮城県仙台市) 2016 年 3 月 19-23 日
- ⑤ 酒巻真粧子, 雨宮健太「界面酸化物を介した Fe/BaTiO₃ の電界効果観察」 強制的秩序とその操作に関する第一回研究会, 東工大田町キャンパス(東京都港区) 2016 年 1 月 4 日
- ⑥ 酒巻真粧子, 雨宮健太「Fe/BaTiO₃ 界面の状態制御と電界効果」 日本物理学会秋季大会, 関西大学(大阪府吹田市) 2015 年 9 月 16-20 日
- ⑦ M. Sakamaki and K. Amemiya, “Role of interface oxide state for the electric field effect of Fe/BaTiO₃ investigated by x-ray absorption spectroscopy”, 16th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure (XAFS 16), August 23-28, 2015, Karlsruhe (Germany)
- ⑧ 酒巻真粧子, 雨宮健太「Fe/BaTiO₃ の電界効果における界面 Fe 酸化物の影響」 第 18 回 XAFS 討論会, 高エネ研(茨城県つくば市) 2015 年 7 月 29-31 日
- ⑨ M. Sakamaki and K. Amemiya, “Role of interface oxide layer on the electric field effect in Fe/BaTiO₃ films”, 22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2015), July 12-17, 2015, Krakow (Poland)

[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]
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒巻 真粧子 (SAKAMAKI, Masako)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教
研究者番号：90598880

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

該当者なし

(4) 研究協力者

雨宮 健太 (AMEMIYA, Kenta)
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授
研究者番号：80313196