

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15158

研究課題名(和文) 非磁性金属元素導入によるFe/MgOの磁気異方性とその電圧変調性能の向上

研究課題名(英文) Improving perpendicular magnetic anisotropy of Fe/MgO and its voltage controllability by introducing nonmagnetic elements

研究代表者

坂本 祥哉 (Sakamoto, Shoya)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50868114

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)：本研究では、Fe/MgOをベースとした薄膜の磁気異方性とその電圧変調効率を、非磁性金属を導入することで向上させることを目的とした。まず、ベースとなるFe/MgOの界面における電子の振る舞いを放射光を用いた分光実験などにより調べ、Fe/MgOの磁気異方性の起源に関する新たな知見を得た。次に、FeにVやAlを導入しホールや電子を導入することで、フェルミ面の位置や電子構造を変調し、VでFeにホールをドーピングした場合にのみ磁気異方性の電圧変調効率の増強が見られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Fe/MgOをベースとした薄膜は、次世代磁気メモリにおいて最も重要な要素であり、FeとMgOの界面が生み出す磁気異方性とその電圧変調効率を向上することが課題となっている。本研究結果は、Fe/MgOにおける磁気異方性の起源に関する新しい知見を与えただけでなく、従来までの重元素を導入する以外の方法で性能向上が可能であることを示した点で意義があり、今後の研究の展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this project, we aimed to improve the magnetic anisotropy of Fe/MgO-based systems and its sensitivity to voltage application by introducing nonmagnetic metal elements. First, we examined how electrons behave at the Fe/MgO interface by performing synchrotron spectroscopy measurements and obtained new insights into the origin of magnetic anisotropy in Fe/MgO systems. Next, we doped V or Al in Fe/MgO to modify the position of the Fermi level or the electronic structure. We find that V doping, which introduces electrons to the system, can increase the sensitivity of magnetic anisotropy to the voltage application.

研究分野：スピントロニクス、物性物理学

キーワード：スピントロニクス 磁気異方性 磁気異方性制御 放射光分光 磁性体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、物質中のスピンを積極的に利用することで従来のエレクトロニクスでは実現できなかった機能を実現するスピントロニクスの研究が盛んである。その中でも Fe と MgO を用いた磁気トンネル接合は、大きな垂直磁気異方性と巨大なトンネル磁気抵抗効果を室温で示すことから、応用上最も重要な系である。現状では、この磁気トンネル接合にスピン偏極電流を流すことにより磁化反転を行う方式が主であるが、ジュール熱の発生が消費電力低減の大きな妨げとなっている。この課題を解決する方策の一つとして、電圧を印加することによる磁気異方性の変化(VCMA 効果)を利用した磁化反転方式が注目を集めている。この方式では書き込み時に電流を流す必要がないことから、超低消費電力での動作が可能であるが、応用へ向けては、その効率を5~10倍ほど改善する必要があるとされる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上記した Fe/MgO における磁気異方性とその電圧変調効率(VCMA 係数)を向上することである。これまでに Fe と Pt や Ir との合金が比較的大きな磁気異方性と VCMA 係数を示すことが見出され、Pt や Ir の磁気偏極とその大きなスピン軌道相互作用がその起源であることが明らかになっている。しかしながら、このような重い磁性元素の導入による性能向上には限界が見えてきた。従って Pt や Ir などの大きなスピン軌道相互作用に頼るだけでなく、Fe そのものの電子構造を最適化する方法を模索する必要がある。本研究では、Fe と合金を形成することにより熱流電流変換効果の増強が報告されている Al などの比較的軽い非磁性金属を Fe に導入することによって Fe の電子構造を変調し、磁気異方性、VCMA 係数がどのように変化するかを調べ、性能向上を目指す。

### 3. 研究の方法

まず、分子線エピタキシー法により、基礎となる高品質の Fe/MgO 薄膜を作成し、磁気異方性や VCMA 係数を評価する。さらに、Al や V といった軽元素を導入することによる物性の変化を調べていく。並行して放射光を用いた分光、特に X 線磁気円二色性(XMCD)測定を行うことにより、界面での電子状態を明らかにする。

### 4. 研究成果

まず基礎となる Fe/MgO 界面に対しての理解を深めるために研究を進めた。Fe/MgO 薄膜に対して行った深さ分解 XMCD 実験[1]では、界面における Fe の 3d 電子のスピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントを評価し、界面においてその両方が顕著に増大していることを明らかにした(図1)。特に軌道磁気モーメントの増大は、第一原理計算の予測を大きく上回っており、電子相関を考慮した計算によってはじめて再現されることがわかった。この成果は、スピントロニクスの分野ではあまり考慮されてこなかった電子相関が界面で重要になることを示した点で重要である。

さらに、V/Fe/MgO 三層構造において Fe の下地層の V の膜厚を変化させ、格子の歪みが Fe/MgO の磁気異方性に与える影響を評価し、界面の磁気異方性が格子の歪みにあまり影響されないことを示した[2]。

次に、本研究の主目的であった軽元素 (Al と V) を Fe に導入した研究の成果を報告する。

まず、大きな熱流電流変換効果の報告された  $\text{Fe}_3\text{Al}$  合金の成膜に取り組み、0.5 nm ほどの超薄膜の作製に成功した。この超薄膜に対し磁気異方性と VCMA 係数を評価したが、磁性が界面で消失するデッドレイヤーの影響で、性能の向上には繋がらなかった。一方、単に V や Al を Fe に導入し、それぞれホールと電子をドーピングした薄膜においては、V でホールをドーピングした場合にのみ VCMA 係数の増大が見られた。これはホールドーピングによって、フェルミ面の位置が、性能が向上する方向にシフトしたためだと考えられる。この結果は、さらなる性能向上のためには、重元素の導入によってスピン軌道相互作用を増強するだけでなく、バンド構造そのものを最適化する必要性を示唆し、さらなる研究の展開を期待させるものである。

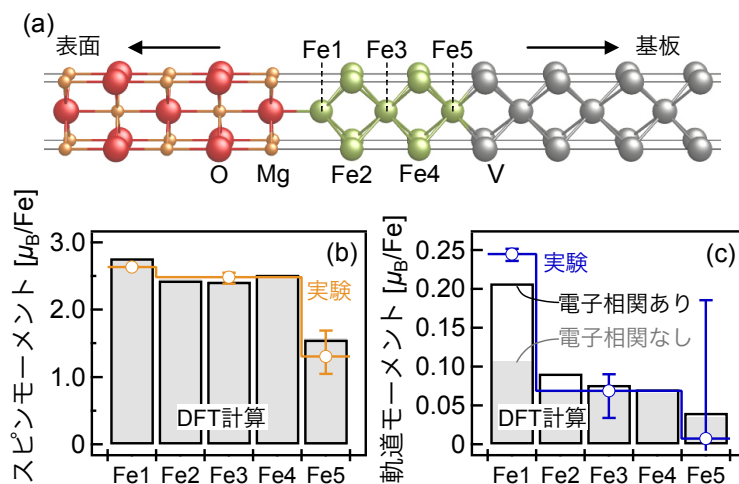


図 1 (a) V/Fe/MgO 構造の模式図。各 Fe 層の (b) スピン磁気モーメントと (c) 軌道磁気モーメント。

#### 参考文献

- [1] Shoya Sakamoto, Masahito Tsujikawa, Masafumi Shirai, Kenta Amemiya, and Shinji Miwa, ACS Applied Electronic Materials **4**, 1794-1799 (2022)
- [2] Masanobu Shiga, Shoya Sakamoto, Takaya Tsujikawa, Ryoya Ando, Kenta Amemiya, and Shinji Miwa, Physical Review B **104**, L140406 (2021)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoya Sakamoto, Tomoya Higo, Shingo Tamaru, Hitoshi Kubota, Kay Yakushiji, Satoru Nakatsuji, and Shinji Miwa	4. 巻 103
2. 論文標題 Low Gilbert damping in epitaxial thin films of nodal-line semimetal D03-Fe3Ga	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.165122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masanobu Shiga, Shoya Sakamoto, Takaya Tsujikawa, Ryoya Ando, Kenta Amemiya, and Shinji Miwa	4. 巻 104
2. 論文標題 Influence of epitaxial strain on the perpendicular magnetic anisotropy of Fe/MgO systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L140406
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.L140406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shoya Sakamoto, Tomoya Higo, Masanobu Shiga, Kenta Amemiya, Satoru Nakatsuji, and Shinji Miwa	4. 巻 104
2. 論文標題 Observation of spontaneous x-ray magnetic circular dichroism in a chiral antiferromagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134431
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.134431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shoya Sakamoto, Masahito Tsujikawa, Masafumi Shirai, Kenta Amemiya, and Shinji Miwa	4. 巻 4
2. 論文標題 Electron Correlation Enhances Orbital Polarization at a Ferromagnetic Metal/Insulator Interface: Depth-Resolved X-ray Magnetic Circular Dichroism and First-Principles Study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1794-1799
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsaem.2c00049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shoya Sakamoto, Edward Jackson, Takeshi Kawabe, Takuya Tsukahara, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Emi Minamitani, Yoshio Miura, Tetsuya Nakamura, Atsufumi Hirohata, and Shinji Miwa	4. 巻 105
2. 論文標題 Control of perpendicular magnetic anisotropy at the Fe/MgO interface by phthalocyanine insertion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.184414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Shoya Sakamoto, Masahito Tsujikawa, Masafumi Shirai, Kenta Amemiya, and Shinji Miwa
2. 発表標題 Depth profile of the Fe spin and orbital magnetic moments in a V/Fe/MgO trilayer revealed by depth-resolved x-ray magnetic circular dichroism
3. 学会等名 2021年 第68回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoya Sakamoto, Tomoya Higo, Masanobu Shiga, Kenta Amemiya, Satoru Nakatsuji, and Shinji Miwa
2. 発表標題 Observation of spontaneous x-ray magnetic circular dichroism in the antiferromagnetic Mn <sub>3</sub> Sn thin film
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoya Sakamoto, Tomoya Higo, Masanobu Shiga, Kenta Amemiya, Satoru Nakatsuji, and Shinji Miwa
2. 発表標題 Spontaneous x-ray magnetic circular dichroism in the antiferromagnetic Mn <sub>3</sub> Sn epitaxial thin film
3. 学会等名 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	三輪 真嗣  (Miwa Shinji)	東京大学	
研究協力者	志賀 雅亘  (Shiga Masanobu)	東京大学	
研究協力者	辻川 貴也  (Tsujikawa Takaya)	東京大学	
研究協力者	安藤 遼哉  (Ando Ryoya)	東京大学	
研究協力者	雨宮 健太  (Amemiya Kenta)	高エネルギー加速器研究機構	
研究協力者	中辻 知  (Nakatsuji Satoru)	東京大学	
研究協力者	肥後 友也  (Higo Tomoya)	東京大学	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	白井 正文  (Shirai Masafumi)	東北大学	
研究協力者	辻川 雅人  (Tsujikawa Masahito)	東北大学	
研究協力者	薬師寺 啓  (Yakushiiji Kay)	産業技術総合研究所	
研究協力者	田丸 慎吾  (Tamaru Shingo)	産業技術総合研究所	
研究協力者	久保田 均  (Kubota Hitoshi)	産業技術総合研究所	
研究協力者	河辺 健志  (Kawabe Takeshi)	大阪大学	
研究協力者	塚原 拓也  (Tsukahara Takuya)	大阪大学	
研究協力者	中村 哲也  (Nakamura Tetsuya)	東北大学	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小谷 佳範  (Kotani Yoshinori)	高輝度光科学研究センター	
研究協力者	豊木 研太郎  (Toyoki Kentaro)	高輝度光科学研究センター	
研究協力者	南谷 英美  (Minamitani Emi)	分子科学研究所	
研究協力者	三浦 良雄  (Miura Yoshio)	物質・材料研究機構	
研究協力者	廣畑 貴文  (Hirohata Atsufumi)	ヨーク大学	
研究協力者	ジャクソン エドワード  (Jackson Edward)	ヨーク大学	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関



英国	University of York			
----	--------------------	--	--	--